



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MATERIALES

INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ADHERENCIA SOBRE MATRICES DE EMBUTICIÓN DE ACERO F-1110, Y ANÁLISIS MEDIANTE ENSAYOS DE EMISIÓN ACÚSTICA, DE RECUBRIMIENTOS DE NÍQUEL-ÓXIDOS Y CARBUROS CERÁMICOS, APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA, Y DE LAS CARACTERÍSTICAS ADHESIVAS CON ALEACIONES METÁLICAS DE EMBUTICIÓN.

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR: D. PEDRO ANTONIO MAITA

DIRIGIDA POR:

Dr. D. CARLOS FERRER GIMÉNEZ

Dr. D. MANUEL PASCUAL GUILLAMÓN

VALENCIA, 2007

DEDICATORIA

A

Dios Altísimo, por sus bendiciones.

Mi madre, Ramona de J. Maita de Martínez (†).

Mis abuelos, Pedro Maita Rivas y Amada E. Domínguez de Maita (†).

Mi esposa, Arvelis del C. Muñoz de Maita.

Mis hijos, Paola de los A. y Pedro J., Maita Muñoz.

Mis hermanos, Dionicio, Daniel, Yudely, Agustín y Rosa.

Mis tíos, Aurelio (†), Belén, Amalia, Alberto, Elio, Celia, Olayda y Haydée.

Mis sobrinos, Dionicio, Dioneqlis, Yenirée, Daniela, Gabriela y Silvia.

Mis suegros, Santos E. Muñoz S. y Hercilia A. Medina de Muñoz.

Mis cuñados, Arvenis, Argenis (†), Andrelys, Santos y Anglidenis.

Mis primos, amigos y hermanos en el sentir amor a Dios.

Mis compañeros de trabajo del I. U. T. J. A. A.

Los profesores de la U.P.V. y U.J.I..

Todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible el feliz término de esta Tesis Doctoral.

Gracias a todos.

Pedro

AGRADECIMIENTO

Al Profesor D. Carlos Ferrer Giménez por su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo, en su carácter de Director (Tutor).

Al Profesor D. Manuel Pascual Guillamón por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo, en su condición de Director.



**INSTITUTO UNIVERSITARIO TECNOLÓGICO
JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI - VENEZUELA**

Al Ministerio de Educación Superior de la República Bolivariana de Venezuela y a los Miembros del Consejo Directivo del Instituto Universitario Tecnológico “José Antonio Anzoátegui”, especialmente al Director actual Profesor D. Nemecio Villalobos Pérez por el permiso otorgado.

Al Ministerio de Educación y Ciencia, Dirección General de Investigación, España, por la ayuda prestada a través del proyecto MAT-2004-04909 al equipo investigador.

Al Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia por su asistencia técnica en el desarrollo de esta investigación.

Al Profesor D. Bernardo Alonso Giner por su apreciable ayuda y disposición técnica en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a D./D^a : Adrián Corbí C., Danilo Navarro, Fátima, Romero S., Félix García, Fernando Sancho B., Gabriel Esteller L., Fidel Salas V., Francisco Segovia L., Gloria Cano C., Javier Orozco M., Jesús Cembrero C., José Andrés O., José Vicente G., José Villena C., Juan A. García M., M^a Carmen Gamir A., Kudama A. Habib, Lorenzo Solano G., Marcos Signes O., Mercedes Perales V., Nelson Montaña, Pedro Rosado C., Santiago Gutiérrez R. y a todas aquellas personas, que de una u otra forma contribuyeron al éxito de esta Tesis Doctoral.

Pedro

Resumen

En los últimos cinco (5) años, la tecnología de los recubrimientos superficiales se ha incrementado. Al respecto se tienen avances en las propiedades superficiales de los materiales influyendo en el campo de la competitividad, producción de calidades y surgimiento de técnicas de recubrimientos, dependiendo de la adaptabilidad del recubrimiento a la técnica, nivel de adherencia, disponibilidad, aplicación y costo. En la actualidad el campo de las matrices de embutición apunta al problema generado en el servicio: modificaciones de medidas, desgastes, impactos, deformaciones y proceso de fractura, causado por las altas tensiones cortantes en zonas de deslizamiento de la chapa con la matriz. No obstante se puede recuperar la matriz por desgaste prematuro en bordes, y posibles fisuras.

A nivel mundial, el problema ha sido estudiado, pero dada su complejidad en la búsqueda de lograr la calidad y la eficiencia en las condiciones de servicio de la matriz, se aplican sobre su superficie las siguientes tecnologías: procesos térmicos, tratamientos superficiales, deposiciones superficiales y técnicas en recuperación por desgaste y fisuras. En esta investigación se aplicó la proyección térmica por llama con uso de polvo como técnica en reparación, en virtud de la importancia de

alternativas de recuperación de matrices de embutición para complementar las tecnologías existentes, garantizándose la función destino de la matriz, antes de ser consumida durante las operaciones de trabajo en frío y caliente. La proyección térmica por llama es una alternativa de bajo costo, aventajada en aplicación de capas cerámicas para recuperación de zonas desgastadas en matrices. Un requerimiento principal es la adherencia del recubrimiento en el sustrato, y no es fácil alcanzar valores apropiados dadas la naturaleza cerámica del recubrimiento y los cortos tiempos de aplicación. Para cuantificar la adherencia se ensayaron las probetas recubiertas con aleaciones cerámicas sometidas a esfuerzos de cizalladura, para lograr en la intercara el deslizamiento cortante del recubrimiento fijado al sustrato.

Es oportuno indicar, que en esta investigación se usó la estadística, previamente se planificaron los diseños y, luego se analizaron los resultados experimentales. Las variables fueron la temperatura o, en otro caso, el proceso térmico, la rugosidad y el recubrimiento, para determinar si hay efectos e interacciones entre las variables, usando como indicadores las variables respuestas: los esfuerzos de cizalladura, las rigideces, las microdurezas y las porosidades. Para analizar el proceso de deformaciones y microfisuraciones que sostienen la adherencia recubrimiento – sustrato se incorpora la técnica de emisión acústica que informa sobre la liberación de energía elástica que se correlaciona con las causas de las microdeformaciones que ocurren cuando se ensaya a cizalladura gradualmente la probeta hasta alcanzar la rotura. El proceso de deformaciones y microfisuraciones previas a la fractura, se midió a través de la correlación de los impactos acumulados de emisión acústica y los indicadores del ensayo de cizalladura, que midieron las adherencias de los recubrimientos, y se justificó por emisión acústica las causas que

condicionan los microsaltos en la evolución y la variación de los valores de los indicadores.

En este mismo orden de ideas, se investigó la tendencia a la adhesión tribológica mediante el ensayo pin on disk de los recubrimientos de níquel-óxidos y carburos cerámicos pueden tener con las chapas de acero, acero inoxidable y aluminio, realizándose para cuatro cargas y cinco velocidades de rotación los ensayos. Igualmente, se logró el objetivo de investigar la adherencia sobre matrices de embutición de acero de bajo contenido de carbono (F-1110), y análisis mediante ensayos de emisión acústica, de recubrimientos de níquel-óxidos y carburos cerámicos (WC/Ni y Al_2O_3/TiO_2), aplicados por proyección térmica, y de las características adhesivas con aleaciones metálicas de embutición (acero de bajo contenido de carbono DC01, acero inoxidable AISI 304, aluminio AA1060). Los recubrimientos investigados cumplen las expectativas de propiedades de acuerdo a la aplicación y servicio de la matriz, con capacidad de recuperación de las superficies deterioradas en la misma. Se obtuvo del análisis estadístico y las correlaciones, el mejor recubrimiento la aleación en base WC/Ni y la selección entre las dos aleaciones estudiadas dependerá de la aplicación. Resultó la mayor adherencia en las aleaciones de WC/Ni con poca porosidad y mínima adhesión en lubricación.

Palabras Claves: Proyección Térmica, Adherencia, Rugosidad, Recubrimiento Cerámico, Emisión Acústica, Fractura, Cizalladura, Níquel, Óxido de Aluminio, Óxido de Titanio, Carburo de Wolframio, Tribología, Rozamiento, Adhesión.

Resum

En els últims cinc (5) anys, la tecnologia dels recobriments superficials s'ha incrementat. Respecte d'això es tenen abanicos. En les propietats superficials dels materials influint en el camp de la competitivitat, producció de qualitats i sorgiment de tècniques de recobriments, depenent de l'adaptabilitat del recobriment a la tècnica, nivell d'adherència, disponibilitat, aplicació i cost. En l'actualitat el camp de les matrius d'embotició apunta al problema generat en el servei: modificacions de mesures, desgastos, impactes, deformacions i procés de fractura, causat per les altes tensions tallants en zones de lliscament de la xapa amb la matriu. No obstant es pot recuperar la matriu per desgast prematur en bords, i possibles fissures.

A nivell mundial, el problema ha sigut estudiat, però donada la seua complexitat en la busca d'aconseguir la qualitat i l'eficiència en les condicions de servei de la matriu, s'apliquen sobre la seua superfície les tecnologies següents: processos tèrmics, tractaments superficials, deposicions superficials i tècniques en recuperació per desgast i fissures. En esta investigació es va aplicar la projecció tèrmica per flama amb ús de pols com a tècnica en reparació, en virtut de la importància d'alternatives de recuperació de matrius

d'embotició per a complementar les tecnologies existents, garantint-se la funció destí de la matriu, abans de ser consumida durant les operacions de treball en fred i calent. La projecció tèrmica per flama és una alternativa de baix cost, avantatjada en aplicació de capes ceràmiques per a recuperació de zones desgastades en matrius. Un requeriment principal és l'adherència del recobriment en el substrat, i no és fàcil aconseguir valors apropiats donades la naturalesa ceràmica del recobriment i els curts temps d'aplicació. Per a quantificar l'adherència es van assajar les provetes recobertes amb aliatges ceràmics sotmesos a esforços de cizalladura, per a aconseguir en la intercara el lliscament tallant del recobriment fixat al substrat.

És oportú indicar, que en esta investigació es va usar l'estadística, prèviament es van planificar els dissenys i, després es van analitzar els resultats. Experimentals. Les variables van ser la temperatura o, en qualsevol altre cas, el procés tèrmic, la rugositat i el recobriment, per a determinar si hi ha efectes i interaccions entre les variables, usant com a indicadors les variables respostes: els esforços de cizalladura, les rigideses, les microdureses i les porositats. Per a analitzar el procés de deformacions i microfractures que sostenen l'adherència recobriment – Substrat s'incorpora la tècnica d'emissió acústica que informa sobre l'alliberament d'energia elàstica que es correlaciona amb les causes de les microdeformacions que ocorren quan s'assaja a cizalladura gradualment la proveta fins a aconseguir la ruptura. El procés de deformacions i microfractures prèvies a la fractura, es va mesurar a través de la correlació dels impactes acumulats d'emissió acústica i els indicadors de l'assaig de cizalladura, que van mesurar les adherències dels recobriments, i es va justificar per emissió acústica

les causes que condicionen els microbots en l'evolució i la variació dels valors dels indicadors.

En este mateix orde d'idees, es va investigar la tendència a l'adhesió tribològica per mitjà de l'assaig Pin on disk dels recobriments de níquel-òxids i carburs ceràmics poden tindre amb les xapes d'acer, acer inoxidable i alumini, realitzant-se per a quatre càrregues i cinc velocitats de rotació els assajos. Igualment, es va aconseguir l'objectiu d'investigar l'adherència sobre matrius d'embotició d'acer de baix contingut de carboni (F-1110), i anàlisi per mitjà d'assajos d'emissió acústica, de recobriments de níquel-òxids i carburs ceràmics (WC/Ni i Al_2O_3/TiO_2), aplicats per projecció tèrmica, i de les característiques adhesives amb aliatges metàl·lics d'embotició (acer de baix contingut de carboni DC01, acer inoxidable AISI 304, alumini AA1060). Els recobriments investigats complixen les expectatives de propietats d'acord amb l'aplicació i servici de la matriu, amb capacitat de recuperació de les superfícies deteriorades en la mateixa. Es va obtindre de l'anàlisi estadística i les correlacions, el millor recobriment l'aliatge en base WC/Ni i la selecció entre els dos aliatges estudiats dependrà de l'aplicació. Va resultar la major adherència en els aliatges de WC/Ni amb poca porositat i mínima adhesió en lubricació.

Paraules Claus: Projecció Tèrmica, Adherència, Rugositat, Recobriment Ceràmic, Emissió Acústica, Fractura, Cizalladura, Níquel, Òxid d'Alumini, Òxid de Titani, Carbur de Wolframi, Tribología, Fregament, Adhesió.

Summary

On the last five years surface coating technology has spread widely. Different achievements have appeared on material surface properties about: competitiveness, quality production, and new coating technologies developing coating technique adaptability, adherence properties, availability, productivity and cost. Nowadays deep drawing dies are liable to the following service problems: measures change, wear, impacts, strain, and fracture due to high shear stresses on the sheet-die sliding area. However, dies with premature corner wear and possible cracks, can be recovered.

Worldwide this problem has been studied but the problem is really complex. Quality and performance efficiency for operating conditions on dies are the result objectives for surface modification techniques including thermal treatments, surface coatings and crack or wear regeneration. On the current research flame thermal spraying was studied as mending technique, as it is key to recover deep drawing dies independently of their own fabrication. In this way, the final function of the die is guaranteed before it is rejected either from cold or hot work. Flame thermal spraying is a costless alternative, specially apt for growing ceramic layers on worn dies. The main

requirement on this technique is a good adherence between coating and substrate. This is a difficult enough task considering the ceramic coating nature and short application times. For quantifying adherence different samples were tested under shear stress, for creating a shear strain on the interface between coating and substrate.

It is important to point out that throughout the research statistics have played an important role, first for test design planning, and later for result analysis. Input variables considered were temperature, or thermal process, rugosity and its originating coating. Output variables were: shear stress, sample rigidity, microhardness and porosity. In order to analyze strain and microcracking processes maintaining coating/substrate adherence, acoustic emission techniques were used, obtaining information on elastic energy emission that can be correlated with microstrain originated when samples are tested to shear stress step by step until breaking point is reached. Strain and microcracking prior to fracture is evaluated through the correlation between accumulated impacts on acoustic emission and indicators from shear loading measuring coating adherence. It was also demonstrated, through acoustic emission, the different causes conditioning microjumps on the evolution and value change of the indicators.

In much the same way, the tendency for adhesive tribology was evaluated through the pin on disk test for coatings nickel-oxides, and cermets on steel sheet, stainless steel and aluminium. Each pair was evaluated for four different loads combined with five different rotating speeds. Similarly, the research on the adherence on low carbon steel (F-

1110) dies was performed. The analysis through acoustic emission of nickel-oxide, and cermets (WC/Ni, Al₂O₃/TiO₂) coatings applied through flame thermal spraying was achieved, as well as the determination of adhesive performance on deep drawing metallic alloys (low carbon steel DC01, stainless steel AISI 304, and aluminium AA1060). Researched coatings perform according to the expectations of application and service for the die, allowing later recovery of damaged surfaces on used dies. The statistical analysis and correlations obtained, determined that the best coating was WC/Ni and the best base alloy for the die varied on different applications. The best adherence properties for WC/Ni alloys was obtained for small porosity and low adhesion on lubrication.

Keywords: Thermal Spraying, Adherence, Rugosity, Ceramic Coating, Acoustic Emission, Fracture, Shear Stress, Nickel, Aluminium Oxide, Titanium Oxide, Tungsten Carbide, Tribology, Friction, Adhesion.

Índice de Contenido

	Página
Título	i
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	v
Resumen	vii
Resum	xi
Summary	xv
Índice de Contenido	xix
Nomenclatura	xxvii
Capítulo I Revisión Bibliográfica	1
1.1. Requisitos de Aplicaciones de los Recubrimientos.....	3
1.1.1. Desgaste.....	4
a.) Abrasión.....	5
b.) Desgaste Adhesivo.....	6
c.) Fretting.....	8
d.) Desgaste por Erosión.....	8
e.) Desgaste por Cavitación.....	10
1.1.2. Corrosión.....	11
a.) Corrosión Húmeda.....	12

	Página
b.) Corrosión Seca.....	13
1.1.3. Efectos Decorativos.....	15
1.2. Aplicaciones de Recubrimientos.....	16
a.) Sierra Circular.....	16
b.) Plaquita.....	17
c.) Rodillos.....	18
d.) Tubos.....	19
e.) Fémur.....	19
1.3. Métodos de Recubrimientos.....	20
1.3.1. Preparación de Superficies.....	22
1.3.1.1. Preparación Mecánica.....	23
1.3.1.2. Preparación Química.....	24
a.) Decapado.....	24
b.) Desengrase.....	25
1.3.2. Recubrimientos Metálicos.....	25
1.3.3. Recubrimientos Cerámicos.....	26
1.3.4. Recubrimientos Polímeros.....	26
a.) Termoplásticos.....	27
b.) Termoestables.....	27
1.3.5. Métodos Químicos y Electroquímicos.....	27
1.3.5.1. Métodos Químicos.....	28
a.) Pavonado.....	29
b.) Fosfatado.....	29
c.) Cromatizado.....	30
1.3.5.2. Métodos Electroquímicos.....	31
1.3.5.2.1. Anodizado.....	32
1.3.6. Sol-Gel.....	33
1.3.7. Procesos Termoquímicos.....	34
a.) Cementación.....	34
b.) Nitruración.....	35
c.) Carbonitruración.....	36
1.3.8. Recubrimientos de Inmersión en Caliente.....	36
1.3.8.1. Galvanización.....	37
a.) Galvanizado.....	38
b.) Electrocincado.....	38
1.3.8.2. Aluminizado.....	39
1.3.8.3. Estañado.....	39

	Página
1.3.8.4. Emplomado.....	39
1.3.9. Chapado.....	40
1.3.10. Deposición Física en Fase Vapor.....	40
1.3.10.1. Evaporación Térmica en Vacío.....	41
a.) Calentamiento Resistivo.....	42
b.) Evaporación Mediante Bombardeo de Electrones.....	43
c.) Evaporación de Aleaciones, Mezclas y Compuestos	44
d.) Evaporación por Arco Catódico.....	45
1.3.10.2. Pulverización Catódica.....	46
1.3.10.3. Epitaxia por Haces Moleculares.....	48
1.3.10.4. Deposición Asistida con Iones.....	48
1.3.10.5. Depósito por Láser.....	50
1.3.11. Deposición Química en Fase Vapor.....	51
1.3.11.1. Activación Térmica.....	54
a.) CVD a Presión Atmosférica.....	54
b.) CVD a Presión Reducida.....	55
1.3.11.2. Activación por Plasma.....	56
1.3.11.3. Activación por Fotones.....	57
1.3.11.3.1. Excitación por Radiación Ultravioleta.....	57
1.3.11.3.2. Excitación por Láser.....	58
a.) Pirólisis.....	58
b.) Evaporación.....	59
c.) Fotólisis.....	60
1.3.12. Tratamientos Superficiales.....	60
1.3.12.1. Tratamiento con Láser.....	61
1.3.12.2. Implantación.....	61
1.3.13. Proyección Térmica.....	63
1.3.13.1. Procesos de Combustión.....	66
a.) Proyección por Llama (Flame Spray).....	66
b.) Proyección por Llama a Alta Velocidad.....	68
c.) Proyección por Detonación.....	70
1.3.13.2. Procesos Eléctricos.....	71
a.) Proyección por Arco Eléctrico.....	72
b.) Proyección por Plasma.....	73
1.4. Aplicaciones a Matrices.....	74
1.4.1. Recubrimientos a Matrices.....	78
1.4.1.1. Procesos Especiales de Tratamiento Térmico.....	79

	Página
1.4.1.2. Tratamientos Superficiales.....	79
a.) Nitruración.....	80
b.) Carbonitruración.....	81
1.4.1.3. Deposiciones Superficiales.....	81
1.4.1.4. Técnicas de Recuperación por Desgaste y Fisuras.....	82
1.4.1.4.1. Soldadura.....	82
a.) Soldadura TIG.....	83
b.) Soldadura MIG / MAG.....	83
1.4.1.4.2. Recubrimiento Láser.....	84
1.4.1.4.3. Proyección Térmica.....	84
1.4.2. Requisitos de estas Aplicaciones.....	85
1.4.2.1. Resistencia Mecánica.....	86
a.) Resistencia a la Compresión.....	87
b.) Resistencia a la Flexión.....	87
c.) Resistencia a la Cizalladura.....	87
d.) Dureza.....	88
e.) Tenacidad.....	88
1.4.2.2. Resistencia al Desgaste.....	89
1.4.2.3. Templabilidad.....	90
1.4.2.4. Mínima Variación de Medida.....	90
1.4.2.5 Adhesión.....	91
a.) Mecanismo Interferencial.....	91
b.) Mecanismo Cohesivo	91
1.4.2.6. Adherencia al Sustrato.....	92
a.) Tipo de Enlace de los Átomos en la Interfase.....	93
b.) Estado del Material de la Interfase.....	93
c.) Rugosidad Superficial y Depósito de Capas de Anclaje.....	93
d.) Método de preparación del recubrimiento.....	94
1.5. Enfoque de los Objetivos de la Investigación.....	94
1.5.1. Variables de la Adherencia.....	95
1.5.1.1. Clase de Materiales.....	95
1.5.1.1.1. Sustrato.....	95
1.5.1.1.1.1. Predepósitos de Capas de Anclajes.....	96
1.5.1.1.2. Material de Aporte.....	96
a.) Materiales de la Industria de la Proyección Térmica.....	97
b.) Materiales de Referencias de Investigaciones.....	97
1.5.1.2. Preparación Superficial del Sustrato.....	98

	Página
1.5.1.2.1. Estado de la Superficie del Sustrato.....	98
1.5.1.2.2. Rugosidad.....	98
a.) Paso.....	99
b.) Ángulo de Filete.....	99
c.) Profundidad de la Rosca.....	99
1.5.1.3. Temperatura Superficial del Sustrato.....	99
1.5.2. Variables de la Proyección por Llama.....	100
a.) Distancia de Proyección.....	101
b.) Ángulo de Proyección.....	101
c.) Potencia del Dardo.....	101
d.) Naturaleza de la Llama.....	101
e.) El Tratamiento de Post-Proyección.....	102
1.5.3. Variables de la Resistencia Mecánica.....	102
1.5.4. Variables de la Resistencia al Desgaste.....	103
a.) Coeficiente de Fricción.....	103
b.) Desgaste Abrasivo.....	103
1.6. Proyección Térmica por Llama (Flame Spray).....	104
1.6.1 Parámetros del Proceso.....	106
a.) Llama.....	106
b.) Polvo.....	107
c.) Inyección del Polvo.....	107
d.) Características de la Proyección.....	108
e.) Sustrato.....	108
1.6.2. Características del recubrimiento.....	109
1.6.2.1. Características mecánicas.....	109
1.6.2.1.1. Adherencia al Sustrato.....	110
a.) Rugosidad del Sustrato.....	110
b.) Forma del Sustrato.....	110
c.) Pre calentamiento del Sustrato.....	111
d.) Fuerza de Enlace.....	111
1.6.2.2. Características Microestructurales.....	111
a.) Porosidad.....	112
b.) Óxidos.....	112
c.) Fisuras.....	112
1.6.3. Investigaciones de Flame Spray.....	112
1.6.4 Síntesis de las Investigaciones de Flame Spray.....	126

	Página
1.6.4.1. Temas de Flame Spray en los que se Evidencia Carencia de Investigación.....	130
Capítulo II Objetivos.....	133
Capítulo III Metodología.....	137
3.1. Ensayos para Análisis de Requisitos.....	137
3.1.1. Métodos Metalográficos.....	138
3.1.2. Análisis de Defectos.....	141
3.1.3. Métodos Mecánicos.....	141
3.2. Probetas.....	142
3.2.1. Probetas de los Métodos Metalográficos.....	142
3.2.2. Probetas de los Análisis de Defectos.....	144
3.2.3. Probetas de los Métodos Mecánicos.....	144
3.2.3.1. Probetas de la Medida de la Adherencia por Ensayo de Cizalladura.....	145
3.2.3.1.1. Sustrato.....	145
3.2.3.1.2. Recubrimientos.....	145
3.2.3.2. Probetas del Ensayo de Dureza.....	153
3.2.3.3. Probetas del Ensayo de Desgaste Pin on Disk.....	154
3.3. Planificación de las Pruebas.....	159
3.3.1. Pruebas de los Métodos Metalográficos.....	159
3.3.1.1. Macroscopía Óptica.....	159
3.3.1.2. Microscopía: Óptica y Electrónica de Barrido.....	161
3.3.2. Pruebas de los Análisis de Defectos.....	164
3.3.2.1. Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X.....	165
3.3.2.2. Emisión acústica.....	166
3.3.3. Pruebas de los Métodos Mecánicos.....	167
3.3.3.1. Pruebas de la Medida de la Adherencia por Ensayo de Cizalladura.....	168
3.3.3.1.1 Metodología para la Proyección Térmica por Llama.....	174
3.3.3.3. Pruebas del Ensayo de Dureza.....	182
3.3.3.6. Pruebas del Ensayo de Desgaste Pin on Disk.....	186
3.4. Planificación de Experimentos.....	198
3.4.1. Planificación de Experimentos Generales.....	198

	Página
3.4.2. Planificación de Experimentos Específicos.....	198
Capítulo IV Resultados y Análisis.....	213
4.1. Análisis por Diseño Estadístico.....	214
4.1.1. Recubrimiento Total.....	215
4.1.1.1. Macroscopía Óptica.....	216
4.1.1.2. Microscopía Óptica.....	223
4.1.1.3. Análisis del Diagrama Impactos Versus Deformaciones	230
4.1.1.4. Análisis del Diagrama Impactos Acumulados Versus	
Deformaciones.....	231
4.1.1.5. Los Esfuerzos de Cizalladura.....	232
4.1.1.6. Las Rigideces.....	240
4.1.1.7. Las Microdurezas Vickers.....	247
4.1.1.8. Las Porosidades.....	251
4.1.2. Recubrimiento en Cuatro Partes.....	255
4.1.2.1. Los Esfuerzos de Cizalladura.....	260
4.1.2.2. Las Rigideces.....	268
4.1.3. Recubrimiento en Tres Partes.....	275
4.1.3.1. Diseño Estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60).....	278
4.1.3.1.1. Los Esfuerzos de Cizalladura.....	280
4.1.3.1.2. Las Rigideces.....	287
4.1.3.1.3. Las Microdurezas Vickers.....	293
4.1.3.1.4. Las Porosidades.....	298
4.1.3.2. Diseño Estadístico II para Al ₂ O ₃ /TiO ₃ (87/13, 97/3).....	301
4.1.3.2.1. Macroscopía Óptica.....	302
4.1.3.2.2. Microscopía Óptica.....	306
4.1.3.2.3. Los Esfuerzos de Cizalladura.....	309
4.1.1.2.4. Las Rigideces.....	315
4.1.1.2.5. Las Microdurezas Vickers.....	319
4.1.1.2.6. Las Porosidades.....	324
4.2. Análisis Relativos a las Variables Controladoras de la	
Adherencia.....	328
4.2.1. Comparación Recubrimiento de las probetas (1/3, 1/4 y 1)..	328
4.2.2. Comparación de Energías de Ruptura (E _R).....	333
a.) Recubrimiento Total (1).....	333
b.) Recubrimiento en Cuatro Partes (1/4).....	335

	Página
c.) Recubrimiento en Tres Partes (1/3).....	337
4.3. Comportamiento Tribológico.....	346
a.) Indicadores de la Adhesión del Rozamiento entre Recubrimiento y Chapa de Embutición.....	366
4.4. Fractografía y Adhesión del Recubrimiento – Sustrato.....	374
a.) Proceso de Fractura.....	374
b.) Mecanismo de Difusión.....	376
Capítulo V Conclusiones y Aportaciones.....	395
5.1. Conclusiones.....	395
5.1.1. Recubrimiento Total.....	395
5.1.2. Recubrimiento en Cuatro Partes.....	401
5.1.3. Recubrimiento en Tres Partes.....	404
5.1.3.1. Diseño Estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60).	404
5.1.3.2. Diseño Estadístico II para Al ₂ O ₃ /TiO ₃ (87/13, 97/3).....	408
5.1.4. Análisis Relativos a las Variables Controladoras de la Adherencia.....	411
5.1.5. Comportamiento Tribológico.....	414
5.1.6. Fractografía y Adhesión del Recubrimiento – Sustrato.....	416
5.2. Aportaciones.....	417
Capítulo VI Investigaciones Futuras.....	421
Referencias Bibliográfica.....	425
Apéndice.....	451

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
ANOVA	Análisis de Varianza (Analysis of Variance)
APCVD	Deposición Química en Fase Vapor a Presión Atmosférica (Atmospheric Pressure CVD)
BoD	Bola sobre disco (Ball on disk)
CA	Corriente Alterna
CM	Cuadrado Medio
CV	Voltamperometría cíclica
CVD	Deposición Química en Fase Vapor (Chemical Vapor Deposition)
DC o CC	Corriente Directa
DMS o LSD	Diferencia Mínima Significativa (Least Significant Difference)
DSC	Calorimetría de barrido diferencial (Differential scanning calorimetry)
EAS	Proyección Térmica con Arco Eléctrico o Proyección por Arco Eléctrico (Electrical Arc Spray)
EDX o EDS	Espectroscopia dispersiva de rayos X de la energía (Energy dispersive X-ray spectroscopy)
EPMA	Micro-analizador de sonda de electrón (Electrón probe micro-analyzer)
EOC	Potencial de circuito abierto
F-Radio	Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor
FS	Proyección por llama (flame spray);
FTIR	Espectroscópica de infrarrojo de transformación de Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy)
FV	Fuentes de Variación
gl	Grado de libertad
HV	Dureza Vickers (Vickers hardness)
HVOF	Proyección Térmica por Llama a Alta Velocidad (High Velocity Oxy-Fuel Spray) o HVOF Spray
HR	Dureza Rockwell (Rockwell hardness)
IBAD	Deposición Asistida con Iones (Ion Beam Assited Deposition)
IV	Viscosidad intrínseca (Intrinsic viscosity)

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
LS	Dispersión láser (Laser scattering)
LPCVD	Deposición Química en Fase Vapor a Presión Reducida o Baja (Low Pressure CVD)
MAG	Soldadura MAG (Metal Active Gas)
MIG	Soldadura MIG (Metal Inert Gas)
MO o OM	Microscopía óptica (Optical microscopy)
MOCC	Microscopía óptica de campo claro
PCVD	Excitación por Radiación Ultravioleta (Photo-CVD)
PECVD	Técnica de CVD Asistida por Plasma (Plasma-Enhanced CVD)
PoD	Pin sobre disco (Pin on disk)
PLD	Depósito por Láser Pulsado (Pulsed Laser Deposition)
PS	Proyección Térmica por Plasma o proyección por plasma (plasma spray)
P-Valor	Probabilidad determinada usando la Tabla de Distribución F de Fisher – Snedecor
PVD	Deposición Física en Fase Vapor (Physical Vapor Deposition)
Ra	Rugosidad media de la superficie
RF	Radio Frecuencia (Radiofrecuencia)
Rp	Resistencia de polarización
RW	Rueda de caucho (Rubber wheel)
SC	Sumas de cuadrados
SEM	Microscopía electrónica de barrido (Scanning electronic microscopy)
SS	Acero inoxidable (Stainless steel)
SSF	Cámara de niebla salina (Salt spray fog)
S.S.M.	Módulos de Proyección (Standard Spray Module)
SWLI	Microscopía interferométrica de luz blanca (Scanning white light interferometry)
TAT	Ensayo de adherencia de tracción (Tensile adhesion test)
TIG	Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas)
TEM	Microscopía electrónica de transmisión (Transmission electron microscopy)
XRD	Difracción de rayos X (X-ray diffraction)
UHV	Atmósfera de Ultra–Alto Vacío
WDS	Espectroscopia dispersiva de la longitud de onda (Wavelength dispersive spectroscopy)

Capítulo I

Revisión Bibliográfica

La tecnología de los recubrimientos superficiales ha experimentado un incremento en los últimos cinco (5) años, debido a la cantidad de aplicaciones que surgen cada día en los diversos entornos industriales. En el caso de los recubrimientos, el compuesto de la capa y el material del sustrato suelen ser de distinta naturaleza. El avance industrial en el campo de la competitividad y la producción de calidades en aumento, reduciendo o manteniendo los costos, ha inducido el desarrollo de mejoras en las propiedades superficiales presentadas por los materiales utilizados. Los recubrimientos se especializan en cierta propiedad superficial crítica característica de cada aplicación o tipo de sollicitación, con la finalidad de mejorarla. Algunas de las sollicitaciones son la resistencia al desgaste y oxidación, el coeficiente de fricción y la dureza, las cuales se combinan para lograr el recubrimiento idóneo a las condiciones de aplicaciones [2]. Un recubrimiento como factor aislado no puede garantizar la consecución de los resultados optimizados, únicamente asociado a otros factores como propiedades del material base o sustrato, del tratamiento térmico, del estado

y preparación superficial de la pieza a recubrir conjuntamente con las del recubrimiento, podrá garantizar la función para la que fue destinado [1, 3].

La selección entre varias técnicas de recubrimiento dependerá principalmente de la aplicación de la pieza, sin embargo, la temperatura de proceso es un factor fundamental a tener en cuenta. El sustrato no debe perder propiedades por efecto de la temperatura de recubrimiento [4].

Es conocida la relación directa entre la adherencia de la capa dura y la temperatura de deformación de la misma. Los fenómenos de difusión entre el sustrato y los componentes duros que se forman en su superficie provocan una adherencia superior a la obtenida en los procesos a baja temperatura [1].

La utilización de nuevos materiales base con prestaciones superiores a los convencionales, se ha complementado con la mejora de las propiedades superficiales [2]. La característica principal que debe presentar el material a recubrir es la dureza o posibilidad de ser endurecido. Toda capa dura debe poder transmitir los esfuerzos que recibe al material base sin que en él se produzcan deformaciones. Si la dureza del sustrato es insuficiente, la capa dura es frágil y, por lo tanto, poco deformable, rompe hasta desprenderse como consecuencia del hundimiento del núcleo [1, 11, 14].

En todas las técnicas de recubrimientos y tipos de sustrato es necesario prestar un cuidado especial en la preparación superficial y limpieza, debido a que, la presencia de grasas, aceites, productos de corrosión, restos de pastas de pulir, pinturas, suciedad u otros cuerpos

extraños ejerce una determinada influencia sobre la adherencia, continuidad, calidad y duración de los recubrimientos, que dificultan o impiden el proceso [4, 12, 14, 52].

La aplicación de recubrimientos sobre un sustrato permite jugar, como en un material compuesto, con las propiedades de la capa y del material base. Generalmente, las propiedades relacionadas con el desgaste se atribuyen al recubrimiento, las propiedades mecánicas las aporta el sustrato [4].

Los recubrimientos de superficies realizados, son numerosos y aún así cada día, se descubren nuevas aplicaciones que aportan algunas mejoras en el proceso industrial de varias maneras en la: a.) Producción de lotes de piezas, donde se aplica un recubrimiento que confiere las características superficiales deseadas sobre un sustrato más económico o con mayor resistencia mecánica. b.) Recuperación y reparación de grandes elementos de máquinas cuya fabricación sea costosa, por haberse desgastado excesivamente o estar mal mecanizadas. c.) Aplicaciones especiales y decorativas [5].

1.1. Requisitos de Aplicaciones de los Recubrimientos.

Los requisitos de los recubrimientos se determinan por: el método, la aplicación, las características físicas y mecánicas, el espesor y el post-tratamiento. Teniendo en cuenta que la superficie de un material es la región más sensible a las agresiones del entorno [116], se consideraron varios

requisitos que dependen de la aplicación concreta y el medio, figura 1.0. Los más generales son: a.) Desgaste en sus diferentes causas: Abrasión, Adhesión, Fretting, Erosión, Cavitación. b.) Corrosión electroquímica (húmeda) o corrosión seca (química) [164, 166, 168, 198, 200, 202]. c.) Efectos decorativos [20, 36, 53].

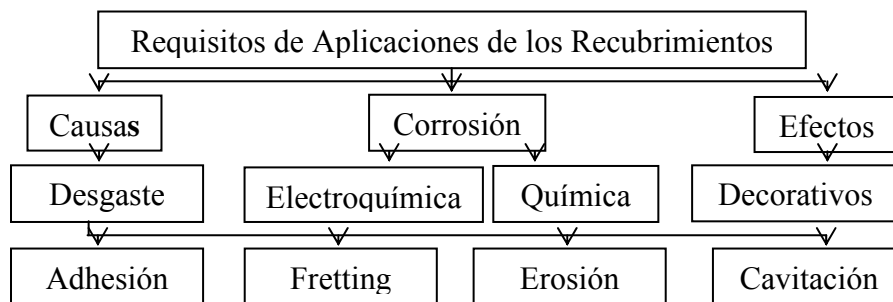


Figura 1.0. Diagramas de los requisitos de los recubrimientos.

1.1.1. Desgaste.

El desgaste es un proceso complejo que se produce en las superficies de los cuerpos que están en contacto y existe entre ellos un movimiento relativo, debido a la fricción o roce de otro cuerpo o medio, trayendo como consecuencia la variación de la micro y macro-geometría superficial. La estructura y las propiedades mecánicas y físicas del material con o sin pérdida de éste; resulta de una acción mecánica o interacción superficial de naturaleza dual, y de atracción molecular en los límites de la adhesión y deformación mecánica en los límites del micro-corte, figura 1.1, [55, 59, 86, 116, 171, 201].

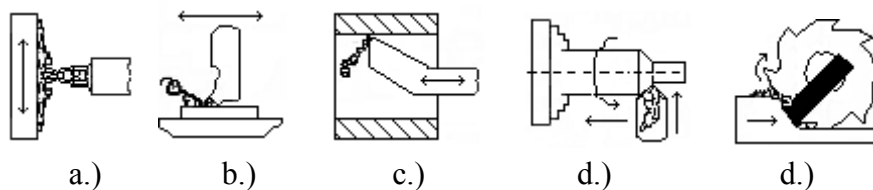


Figura 1.1. Utilidad de la Tribología en Procesos: a.) Proyección Térmica, b.) Cepillado, c.) Mortajado, d.) Fresado y e.) Torneado.

a.) Abrasión.

El desgaste abrasivo ocurre por el contacto entre superficies de materiales, cuando: a.) Las rugosidades o aristas de una superficie dura se incrustan en una superficie suave o blanda, produciendo una serie de surcos o cavidades y desplazando material de éstas en forma de partículas generalmente libres [178, 205]. b.) El roce o deslizamiento constante en presencia de material extraño o contaminante, tal como partículas duras con aristas, suciedad en el lubricante e insuficiencia o ausencia de lubricante, ocasionan en el material: rotura o resquebrajamiento, agotamiento o desprendimiento, dislocaciones de cristales, rayados profundos, etc. [37, 57, 59, 66, 192]. c.) La deformación plástica en frío produce endurecimiento que se repiten cíclicamente resultando en el agrietamiento por fragilidad, como el doblado en frío de una pieza, donde aparece grietas, acritud, tensiones residuales en la parte exterior de ésta [29, 170].

En la figura 1.2 se ilustra el desgaste abrasivo por las acciones de: a.) Corte de la herramienta abrasiva que desliza sobre el metal suave a conformar. b.) Rayado de una partícula dura y aguda en contacto cuando es

retenida o presionada entre dos superficies sólidas o piezas [29, 55, 59, 170]. El desgaste abrasivo está afectado por: a.) La dureza del material, la cual determina la velocidad de desgaste. Si es rápida la dureza del abrasivo es superior a la dureza de la superficie del material de trabajo y si es lenta por lo contrario es más blando [86]. b.) La tenacidad o resistencia que opone el material deformado por la acción de las partículas abrasivas hasta la rotura. c.) El coeficiente de fricción, o fuerza de unión adhesiva entre las partículas de la superficie del metal y las partículas duras; favorece el proceso de micro-corte para valores altos del coeficiente [57]. Otros factores son: las cargas que actúan sobre la superficie de trabajo, condiciones ambientales tales como temperatura, humedad y grado de compactación de las partículas. En una estructura determinada la intensidad de desgaste abrasivo depende de la forma, dureza y tamaño de los granos y partículas abrasivas [171, 192].

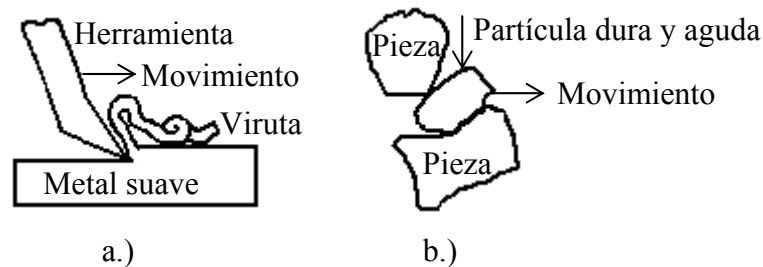


Figura 1.2. Acciones abrasivas de: a.) Corte y b.) Rayado.

b.) Desgaste Adhesivo.

El desgaste adhesivo sucede cuando las superficies de piezas en movimiento entran en contacto una con la otra, ocasionando que las

partículas de desgaste se suelten de una y se transfieran hacia la otra, debido a la adhesión molecular entre los cuerpos en contacto [55]. Por ejemplo un caso de desgaste adhesivo es el de la soldadura en frío entre la pieza a conformar de material más duro en contacto con la herramienta que al separarse, parte de la herramienta se desprende [29, 59, 116, 178, 192]. Para evitar este problema, es necesario un bajo coeficiente de fricción y una baja afinidad entre los materiales en contacto [37, 177].

En la figura 1.3 se muestra el desgaste adhesivo entre dos superficies en movimiento en íntimo contacto por la falta de una película de lubricante de suficiente espesor para separarlas, apreciándose en: a.) Las micro-irregularidades o rugosidades que conforman el área real de contacto, donde ocurre el proceso de desgaste, es mucho menor que el área aparente o geométrica. b.) La zona de desgaste está constituida por los puntos de contacto real, donde la presión específica es alta y ocurren deformaciones e incrementos de temperaturas, que aceleran los procesos de desgaste [57, 170, 178, 192].

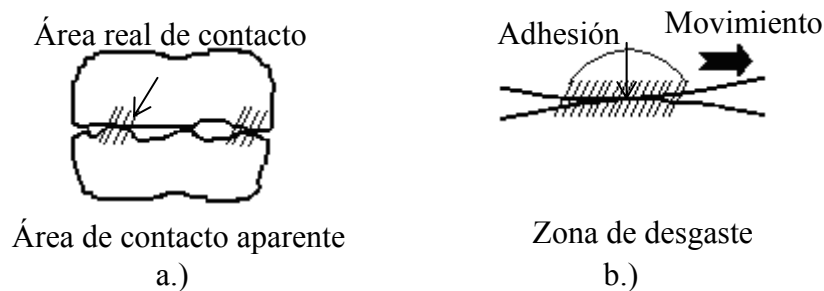


Figura 1.3. Desgaste adhesivo entre superficies en contacto: a.) Micro-irregularidades y b.) Zona de desgaste.

c.) Fretting.

El fretting consiste en un fenómeno de desgaste (desintegración y pérdidas superficiales o sub-superficiales de material) que ocurre entre superficies sólidas o piezas en contacto (cercano-estático, alternado o con alto grado de ajuste) y con movimiento (relativo oscilatorio de amplitud pequeña o cíclico pequeño), o impuestas (vibraciones o impactos) o a causa de las tensiones cíclicas debido a la carga y descarga repetida [67, 68, 69]. Puede ocurrir simultáneamente con corrosión produciendo el fenómeno llamado fretting-corrosión, ver figura 1.4 [63, 64, 65, 86, 167].

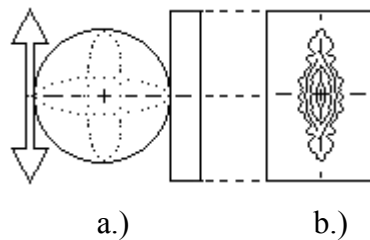


Figura 1.4. Fretting en: a.) Bola que oscila sobre la superficie fija y b.) Resultado de fretting-degaste o evolución del fretting-corrosión.

d.) Desgaste por Erosión.

El desgaste erosivo sucede por: a.) Partículas pequeñas que originan pérdida de material a consecuencia de repetidos impactos, en suspensión en un medio líquido o gaseoso, sobre la superficie del metal [86, 192]. b.) Corrientes de fluidos líquidos que impactan a gran velocidad sobre superficies como alabes de turbinas. La duración del impacto es pequeña y produce una breve y violenta compresión pulsatoria que se transmite al

material originando grietas en los componentes frágiles y deformaciones plásticas en superficies blandas. En la figura 1.5 se aprecia el desgaste erosivo por partículas sobre la superficie que: a.) Golpean y rebotan ocurriendo pérdida de material. b.) Chocan con ángulo de inclinación a alta velocidad y compresión ocasionando retiro gradual de volumen [59, 70, 178].

Como variante del desgaste erosivo está el impacto; un tipo de destrucción que se produce por contactos dinámico o transferencia de energía cinética de cuerpos sólidos generalmente metálicos, aunque no se excluyen rocas y minerales, que acompañados de determinada velocidad, originan choques intermitentes contra la pieza; debido a la aplicación de carga de compresión rápida, repetida, causando deformación superficial y subsuperficial del material que altera su forma y dimensión, pudiendo devenir en la fractura por fatiga o corte en partes, directamente debajo del punto de impacto, ver figura 1.6 [192].

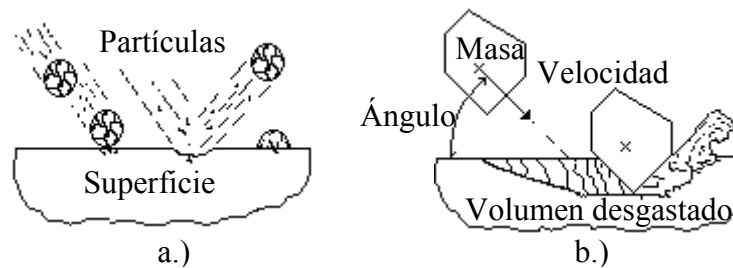


Figura 1.5. Desgaste erosivo en la superficie por partículas que: a.) Golpean y rebotan y b.) Chocan.

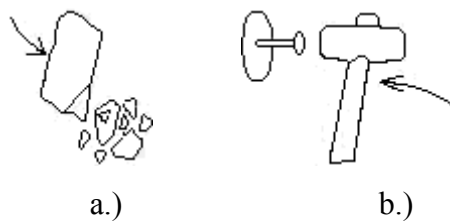


Figura 1.6. Impacto sobre la pieza causando: a.) Corte en pedazos y b.) Deformación en el clavado.

e.) Desgaste por Cavitación.

El desgaste por cavitación se da por la continua nucleación, crecimiento y colapso violento de burbujas de gas en el seno de un fluido. En la práctica la cavitación puede aparecer en todo líquido en el cual se generen cambios de presión por vibraciones en el flujo o cambios e irregularidades en las conducciones [61, 66]. El proceso de cavitación se puede resumir en 4 fases principales, ver figura 1.7: a.) Fase 1: Formación de burbujas de vapor en las regiones donde la presión es inferior a la del vapor del líquido. b.) Fase 2: Crecimiento de las burbujas de vapor, favorecido por micro-burbujas de aire o de otros gases atrapados en el fluido y por las pequeñas impurezas ocluidas por el fluido. c.) Fase 3: Compresión brusca de las burbujas al llegar el líquido a áreas de presión superior. d.) Fase 4: Las burbujas son totalmente inestables estallando de manera violenta en la mayoría de los casos. El colapso de las burbujas desencadena micro-proyecciones de fluido que inciden directamente sobre la pared del sólido que contiene al fluido [98, 178]. Las áreas sometidas a desgaste por cavitación presentan diminutas picaduras, que se extienden progresivamente sobre la superficie sólida, llegando a desprender fragmentos de material de un tamaño considerable [59].

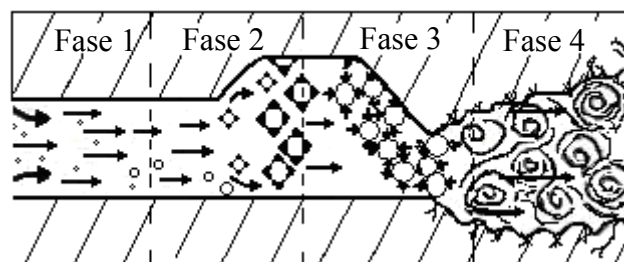


Figura 1.7. Diferentes fases del proceso de cavitación.

1.1.2. Corrosión.

La corrosión es un proceso natural y normal, de desgaste total o parcial que disuelve cualquier sustancia por reacción química o electroquímica con el medio que lo rodea, figuras 1.8 y 1.9, [164, 177, 202]. La corrosión hace que: a.) La interacción entre el material fundamentalmente metálico con el medio ambiente, destruya o deteriore progresivamente, rápida o lenta, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, estado superficial, produciéndose óxidos u otro compuesto y puede acelerarse por calor, luz, oxígeno, agua, productos químicos o biológicos, cambio en la composición físico-química del material, catalizadores del material, ácidos o contaminantes sólidos; conduciendo al incremento de la viscosidad y formación de depósitos [80, 166, 167, 168, 169, 200]. b.) La presencia de humedad puede influir o cambiar las condiciones: El gas cloro en forma iónica (Cl^-) es un contaminante corrosivo, que como cloro seco a temperatura ambiente no ataca al acero, pero como cloro húmedo es extremadamente corrosivo y ataca a la mayoría de los metales y sus aleaciones; lo contrario sucede con el titanio (Ti) [98].

La corrosión también es el proceso, mediante el cual los materiales tienden a abandonar el estado de transformación a que la persona los sometió, para regresar a su estado natural primitivo [164]; en el caso de los metales, depende de varios factores: a.) Medio: composición química, impurezas, temperatura, presión, etc. b.) Metalúrgicos: composición, estructura, heterogeneidad, etc. c.) Condiciones de aplicación: tipos de reacción, naturaleza de los productos [80, 167, 168, 169]. En la figura 1.8 se ilustra la corrosión puntualizándose como la gradual destrucción y desintegración de los materiales por efecto de un proceso electroquímico, químico o de erosión por la interacción del material, expuesto al medio

reactivo o agresivo en ambientes: rurales, urbanos, marinos o industriales [58, 98, 166].

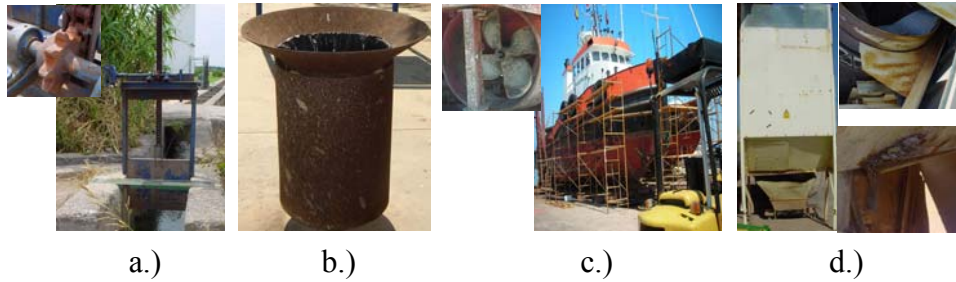


Figura 1.8. La Corrosión en ambientes: a.) Rurales, b.) Urbanos, c.) Marinos o d.) Industriales.

a.) Corrosión Húmeda.

La corrosión húmeda o electroquímica es un fenómeno que sucede en presencia de medios líquidos (rociado o inmersión) conductores de electricidad (electrolito), causando regiones: a.) Anódicas donde se liberan los electrones por la reacción de oxidación y se produce la disolución del metal (corrosión húmeda) y b.) Catódicas sitio de recepción de los electrones y que ocasiona la inmunidad del metal [5, 21, 98, 116, 164, 165, 167, 168, 202].

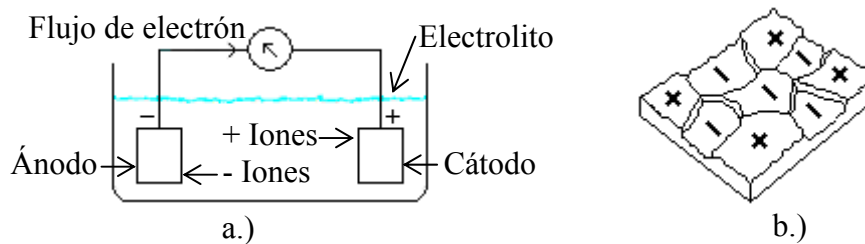


Figura 1.9. a.) Proceso de corrosión electroquímica y b.) Material con zonas locales catódicas y anódicas.

En la figura 1.9 a se aprecia el proceso de corrosión electroquímica (diferencia de potencial) a causa de que los electrodos se hallan en contacto directo (cortocircuito) en el electrolito [13], formándose la célula compuesta por: a.) El ánodo es el sitio en el cual se corroe el metal, b.) El cátodo que no se consume, es parte de la misma superficie del metal, o de otra superficie del metal en contacto y c.) El electrolito es el medio corrosivo, que consiste en una disolución eléctricamente conductora. En el ánodo, el metal corroído pasa al electrolito como iones positivamente cargados, lanzando los electrones que participan en la reacción catódica. Por lo tanto, la corriente de la corrosión entre los dos electrodos, el ánodo y el cátodo, consiste en los electrones que fluyen dentro del electrolito [98, 164, 165, 166, 167, 168, 183]. El material puede en cierto momento transferir y recibir electrones, creando zonas catódicas y zonas anódicas en su estructura, debido a que los enlaces metálicos tienden a convertirse en enlaces iónicos, figura 1.9 b. La velocidad a que un material se corroe es lenta y continua, todo depende del ambiente donde se encuentre, a medida que pasa el tiempo se va creando una capa fina de material en la superficie, que van formándose inicialmente como manchas hasta que llegan a aparecer imperfecciones en la superficie del metal [167,177]. Ejemplos de reacciones electroquímicas en la corrosión húmeda: a.) El hierro(II) en una solución puede ser oxidado para producir un ión con estado mayor hierro(III): $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^{-}$ [13, 62, 164]. b.) El aluminio en forma de metal tiene valencia tres y pasa en solución a la forma de un ión trivalente (Al^{+3}), perdiendo tres electrones, el Al en medio acuoso se corroe o oxida según: $Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^{-}$ [80, 98, 168, 183].

b.) Corrosión Seca.

La corrosión seca o química es causada por contacto con vapores o gases, sin la presencia de líquidos y generalmente está asociada con altas

temperaturas, sin circulación de iones. Significa pérdida de un metal, debido a una reacción química entre el metal y su medio ambiente. Es un proceso de transformación en el cual el metal pasa de su forma elemental a una forma combinada. Cuando las superficies en contacto se encuentran en un medio corrosivo, los productos de la corrosión formarán una capa encima de las superficies que frenará (pasiva) o inhibirá la corrosión [98, 164, 167, 168, 183]. Sin embargo, el continuo deslizamiento podría arrancar esta película, continuando así el ataque directo corrosivo, figura 1.10, [59].

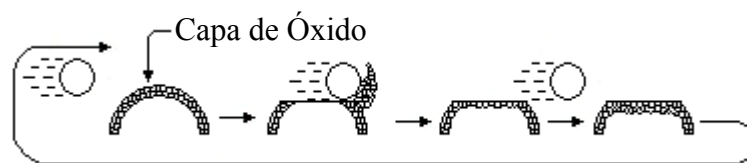


Figura 1.10. Corrosión por oxidación de las capas superficiales del material y el continuo deslizamiento.

Se exponen ejemplos de combinaciones químicas directas cuando existe una reacción entre el metal y otros elementos o compuestos no metálicos: a.) El sodio (Na) reacciona con el oxígeno (O), formado el óxido de sodio (Na_2O), se dice que el átomo de sodio se oxida: $4\text{Na} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Na}_2\text{O}$. b.) El Fe reacciona con el O, formando el óxido de hierro (FeO), el átomo de hierro se ha oxidado: $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$ [164, 168]. c.) El Fe reacciona con el dióxido de azufre (SO_2 contaminante corrosivo) y se obtienen el sulfuro de hierro más oxígeno: $\text{Fe} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{O}_2$ [98].

La corrosión por altas temperaturas o seca se origina en posibles fallas de difusión de fases sólidas del metal, con la cual se modifica la aleación original y se posibilita el ataque selectivo; lo que puede causar: a.) Oxidación en seco por ataque de O, C o S, agravado por la formación de gases que hacen frágil el metal. b.) Transferencia de masa (solución de esta

en un punto y acumulación en otro). c.) Destrucción de las capas protectoras del metal, por contacto con fundentes como compuestos de Pb, S o pentóxido de vanadio. d.) Agrietamientos por tensión del metal y desprendimiento de los productos de la corrosión (erosión), lo que debilita el metal haciéndolo más propenso al ataque del medio ambiente [98, 167, 168, 183].

1.1.3. Efectos Decorativos.

Los efectos o acabados decorativos son los más extendidos en el campo de los recubrimientos. Tienen como misión proporcionar a la pieza un efecto atractivo y durable solamente durante un tiempo definido, coincidente con el término de su vida industrial. Los acabados más extendidos en estas áreas son los recubrimientos de cobre, níquel, cromo, plata y oro. Actualmente, se están desarrollando procesos multicapas de aleaciones metálicas que garantizan una elevada resistencia a la corrosión, abrasión, y en general, una resistencia al deterioro de la pieza, que mejora el aspecto de su superficie y la decora, figura 1.11, [16, 51, 53, 82].

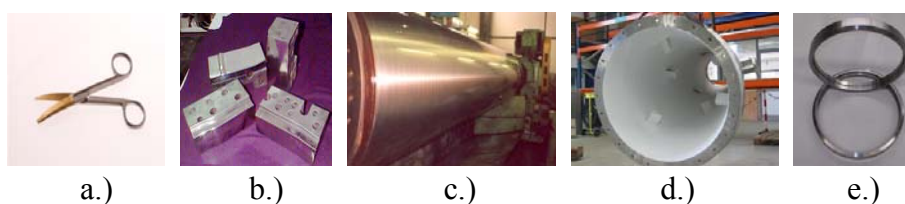


Figura 1.11. Efectos decorativos de recubrimientos – tecnologías: a.) Tijera (TiN–PVD), b.) Matriz de Conformado (TiC–TiN–CVD), c.) Rodillo Compactador (NiCrMo–EGAS), d.) Secador (Al_2O_3 –APS) y e.) Anillos (WC/Co–HVOF Spray).

1.2. Aplicaciones de Recubrimientos.

En aplicaciones de recubrimientos se han desarrollado tecnologías, de acuerdo a las necesidades de los procesos industriales y de otra índole son ejemplos los casos concretos siguientes:

a.) Sierra Circular.

En la figura 1.12 se muestra una sierra circular a la que se le aplicaron diferentes recubrimientos: nitruro de titanio (TiN), nitruro de titanio aluminio (TiAlN), carbonitruro de titanio (TiCN) y nitruro de cromo (CrN) por la tecnología de deposición física en fase vapor (PVD) [3, 10]. Descripción de los recubrimientos usados para corte: a.) TiN para materiales en base acero, para resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo, con excepciones del acero inoxidable, cobre y titanio. b.) TiAlN para materiales con alta resistencia de tracción y dureza que generan altas temperaturas a altas velocidades y avances, tales como materiales en base aceros, aceros inoxidables, bronce y latón, con excepción del Cu. Se pueden realizar cortes en seco, debido a la estabilidad térmica, química y la tenacidad de la estructura del recubrimiento de alto rendimiento contra el desgaste [121]. c.) TiCN para materiales con resistencia al desgaste abrasivo y alta resistencia de tracción a altas velocidades y avances, tales como aceros, incluido el inoxidable [71]. d.) CrN para materiales no férricos.

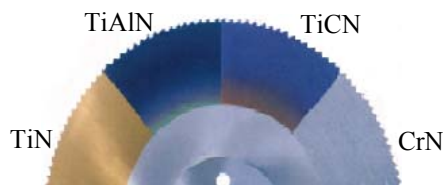


Figura 1.12. Sierra Circular

b.) Plaquita.

En la figura 1.13 se ilustra una plaquita de herramienta de corte del carburo de tungsteno (WC) como sustrato de excelente adherencia, revestida de multicapas (carburo de zirconio (ZrC), Óxido de aluminio (Al_2O_3), TiCN y TiN) por la tecnología de deposición química en fase vapor (CVD). La plaquita de corte multicapas está desarrollada para operaciones de desbaste pesado, corte interrumpido en el mecanizado y apropiada para acabado y desbaste ligero, que puede hacerse a alta velocidad en aceros, aceros inoxidable, y aleaciones de aceros termo resistentes, garantizándose calidades en el mecanizado que incrementan la productividad y reducen el costo de la herramienta [1, 2, 14].



Figura 1.13. Plaquita.

Descripción de las capas depositadas en la plaqueta: a.) ZrC aplicado como sustrato especial de alta conductividad térmica y extremadamente tenaz, mantiene la estabilidad del filo de corte, incluso en condiciones de alta temperatura. b.) Al_2O_3 con una capa fina estructurada se obtiene estabilidad térmica e incremento en la resistencia al desgaste en condiciones de alta velocidad de corte. c.) TiCN capa resistente al calor garantizando alta resistencia al desgaste abrasivo y alta resistencia de tracción a altas

velocidades y avances en la operación de corte o mecanizado [71]. d.) TiN capa de baja fricción, que actúa como barrera de difusión del calor y de resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo. e.) La alúmina (Al_2O_3) de grano fino y el carbonitruro de titanio (TiCN) fibroso incrementan la fuerza de adherencia al sustrato, lo cual aumenta la tenacidad y la durabilidad de la plaquita [28].

c.) Rodillos.

En la figura 1.14 a, b y c se observa como se realizan las actividades de recuperación y reparación de los rodillos en la Industria Manufacturera del Papel con revestimiento de carburo de wolframio/cobalto cromo (WC/10Co4Cr) por proyección térmica por llama a alta velocidad (HVOF). La realización de la proyección del material de capa, que posteriormente constituirá el recubrimiento WC/10Co4Cr, tiene la finalidad de restaurar la vida útil de los rodillos, a través de las operaciones de trabajos y, lograr resolver problemas de corrosión electroquímica y a altas temperaturas, fatiga axial y de desgastes por abrasión, erosión y deslizamiento.

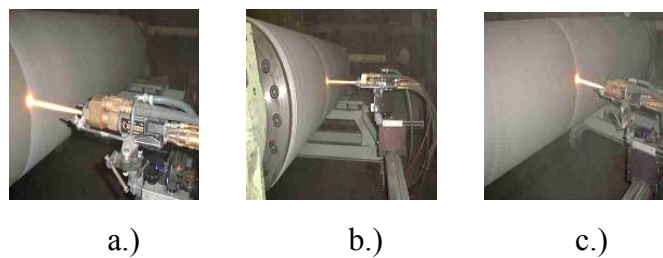


Figura 1.14. Pasos de Proyección HVOF de Rodillos a, b y c.

d.) Tubos.

En la figura 1.15 a y b se observan dos vistas de los tubos de caldera una aplicación en la Industria Siderúrgica, emplea la tecnología de proyección térmica con arco eléctrico (EAS), para recargar y proteger los tubos del desgaste por erosión con recubrimientos de carburo de tungsteno (WC).



a.)



b.)

Figura 1.15. Tubos de caldera: a.) Erosionados y b.) Recubiertos de carburo de tungsteno (WC).

e.) Fémur.

En la figura 1.16 se aprecia la reparación de un extremo del fémur colocando un implante óseo con capa biocompatible, realizado por la Industrial Biomédica con la tecnología de proyección térmica por plasma (PS). Entre los materiales típicos usados para crear la unión relacionada entre el implante y el tejido fino, que permite promover el crecimiento del hueso en forma acelerada, se encuentran las aleaciones de titanio (Ti), cobalto cromo (CoCr) y hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ o HA) [15, 18, 73, 74, 75, 79, 113, 120, 124].

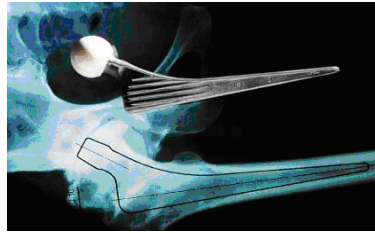


Figura 1.16. El fémur hueso del cuerpo humano e implante óseo.

Otros casos de aplicaciones de recubrimientos se describen en el Apéndice, Tabla A.1. desde la A a la F. En estas hay ilustraciones concretas, señalándose el método dependiente del tipo de recubrimiento superficial, con los objetivos de recuperar, reparar, decorar y asegurar la producción en serie, en sectores industriales y afines.

1.3. Métodos de Recubrimientos.

El recubrimiento consiste en una o varias capas de un material que se agrega o deposita sobre la superficie del mismo o de otro material, formándose una región superficial con propiedades diferentes de las del sustrato, figura 1.18, [114]. El objeto de aplicar un recubrimiento en la superficie de los materiales es servir en una o más de las finalidades siguientes: a.) Proteger la superficie contra el ambiente que puede producir la corrosión u otras reacciones de deteriorización o destrucción. b.) Mejorar el aspecto de la superficie recuperándola o decorándola [16, 20, 36, 53].

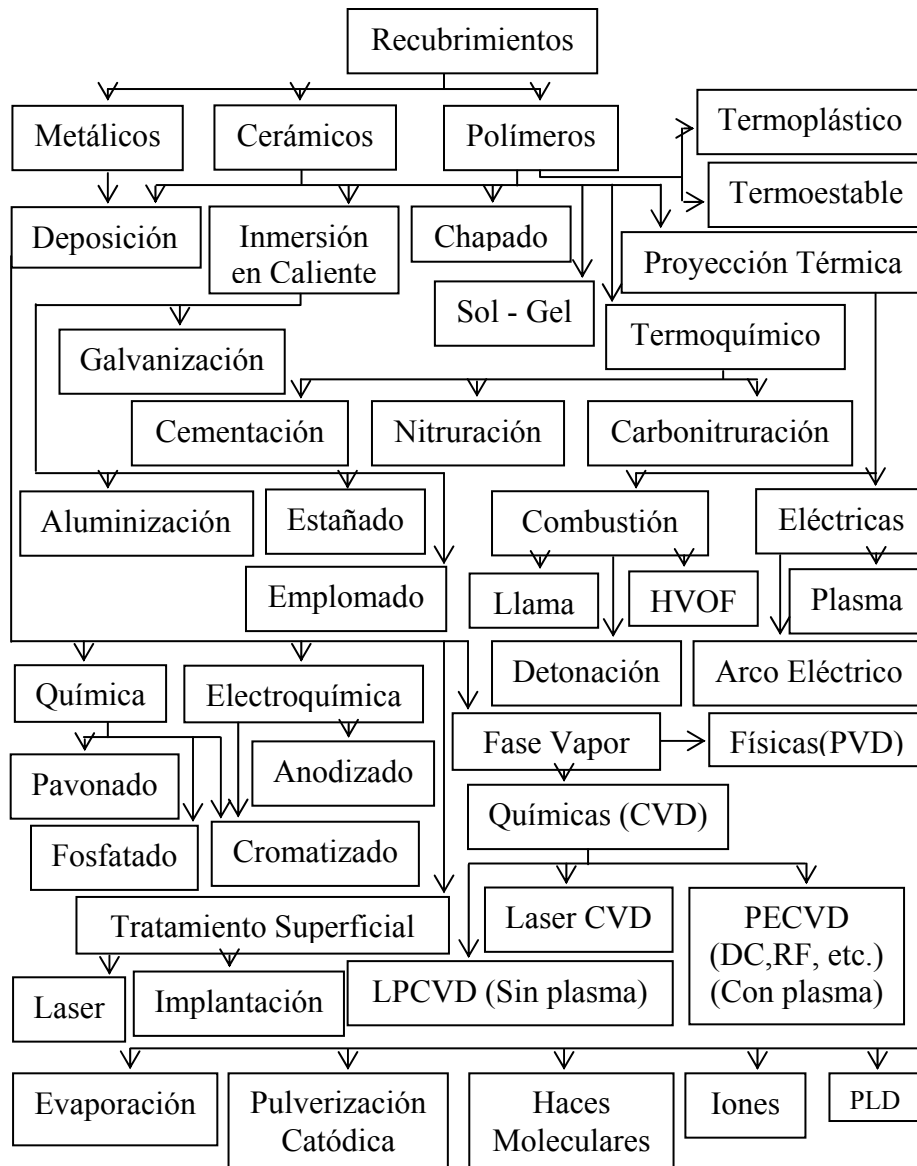


Figura 1.17. Esquema de clasificación de los recubrimientos.

Hay muchos métodos de recubrimientos disponibles, y la selección del mejor proceso depende de los requisitos funcionales (tamaño, geometría y metalurgia del sustrato), de la adaptabilidad del material de recubrimiento al método previsto, nivel de adherencia requerido, así como la disponibilidad y costo del equipo. En la figura 1.17 se muestra la división de los recubrimientos en: metálicos, cerámicos y polímeros [13, 16, 21, 25, 53, 119, 177].

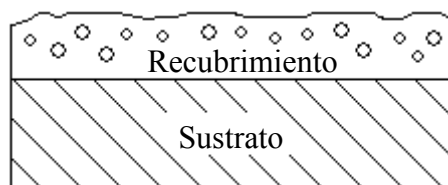


Figura 1.18. Recubrimiento o material de aporte que no reacciona con el sustrato y no se difunde o lo hace en pequeña proporción [80].

1.3.1. Preparación de Superficies.

La preparación de superficies se realiza para asegurar una óptima adherencia y comportamiento del tratamiento superficial por recubrimiento aplicado; cualquier proceso comienza siempre con la adecuación de la superficie que se puede efectuar de manera mecánica, química o ambas, figuras 1.19 y 1.20, [81, 82, 98, 198]. En algunos recubrimientos antes de realizarlos, se necesita aumentar o mejorar la adherencia en la superficie del sustrato, creándose: a.) La rugosidad que sirva de anclaje mecánico y aumente la superficie de contacto, figura 1.18. b.) Una capa de óxido natural por procesos de pasivación en los metales [85, 114, 166, 205].

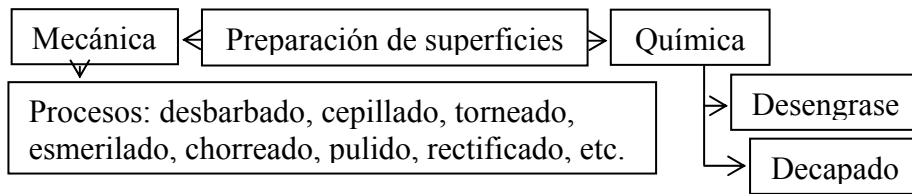


Figura 1.19. Esquema de la preparación de superficies.

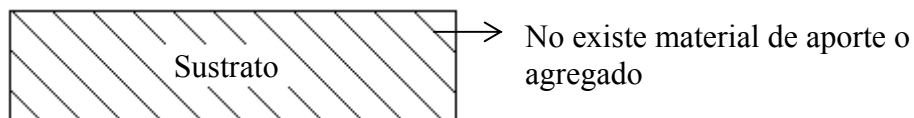


Figura 1.20. Preparación superficial.

1.3.1.1. Preparación Mecánica.

La preparación mecánica arranca de la superficie de la pieza o sustrato una fina capa, a través de procesos tales como el desbarbado, cepillado, torneado, esmerilado, pulido, rectificado, etc. que permiten eliminar faltas de planitud, asperezas y otras irregularidades, defectos locales tales como raspones, hoyos, marcas de herramientas, etc., figura 1.21. En menor medida se aplica la técnica del chorreado, con arena u otro material, que permite eliminar junto con las asperezas y defectos de la superficie, los aceites, óxidos y restos del mecanizado. Después de estas operaciones se necesita someter a las piezas a un proceso de lavado, puesto que durante el mismo se deposita sobre la superficie de las piezas una parte de la grasa y del abrasivo usado como polvo metálico [16, 80, 81, 98, 114, 205].

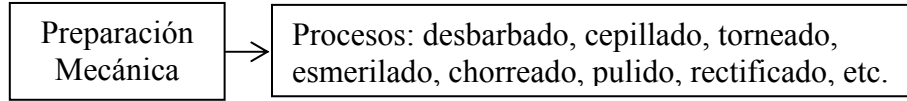


Figura 1.21. Esquema de la preparación mecánica.

1.3.1.2. Preparación Química.

La preparación química tiene como objeto eliminar de la superficie del sustrato, los residuos (aceites y grasas) y alteraciones superficiales producidas por la mecanización o manipulación de esta, figura 1.22, [16, 51, 80, 81, 91, 98, 205].

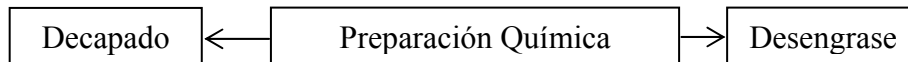


Figura 1.22. Esquema de la preparación química.

a.) Decapado.

El contacto entre atmósfera y piezas metálicas provoca la formación de capas de óxido. El proceso de decapado tiene como objeto la eliminación, de las capas adherentes, del óxido y cascarilla de laminación de la superficie de la pieza de material metálico mediante su disolución química o electrolítica [81, 91, 166, 198, 206]. Luego del decapado es necesario lavar bien con agua corriente y secar con aire caliente las piezas [80, 98, 188].

b.) Desengrase.

El desengrase consiste en un pretratamiento de lavado para limpiar y eliminar partículas sueltas sobre el sustrato, material abrasivo, impurezas de tipo orgánico, aceites y grasas minerales y vegetales adheridas a la superficie de las piezas procedentes de procesos de mecanizado, transformación mecánica del material y protección anticorrosiva. El desengrase puede efectuarse por: 1.) Solución acuosa alcalina (química o electrolítica). 2.) Baño de disolventes no halogenados. 3.) Vapores de disolventes halogenados [81, 82, 99]. Los baños de desengrases tienen agentes tensoactivos en su composición que emulsionan los aceites y las grasas adheridas a la superficie de la pieza y su efectividad depende de la concentración de los agentes, la temperatura y la duración. Algunos solventes orgánicos usados en el proceso de remoción de aceites y grasas de la superficie de una pieza son petróleos alifáticos, aromáticos, hidrocarburos (oxigenados y halogenados) o combinaciones de estos, vapor con percloroetileno o tricloroetileno, con un rociado final de agua a presión, etc. [51, 80, 91, 98].

1.3.2. Recubrimientos Metálicos.

Los recubrimientos metálicos consisten en una o varias capas de material metálico sobre la superficie de un sustrato, aplicada con la finalidad proteger o decorar [20, 36]; consiguiéndose alguna propiedad superficial deseada, como la resistencia al desgaste que no tiene el sustrato [53, 114], por algún método de recubrimientos metálicos electroquímicos (anodizado y cromatizado), inmersión en caliente (galvanización, aluminización, estañado

y emplomado), metalización por proyección térmica, tratamientos termoquímicos de difusión (cementación, nitruración y carbonitruración) y otros.

1.3.3. Recubrimientos Cerámicos.

Los recubrimientos cerámicos de tipos glaseados o vítreos, están formados por constituyentes que se encuentran abundantemente en la naturaleza, de inapreciable valor en la protección de materiales contra el descascarillado, choque térmico, erosión de los gases que circulan a altas velocidades, etc. Estos recubrimientos son eficaces, no forman ampollas ni se agrietan, resisten a las altas temperaturas y a la corrosión intergranular en el aire y en atmósferas corrosivas a temperaturas que pueden llegar en ocasiones a 1370 °C. Ciertos compuestos proporcionan propiedades refractarias y elevadas temperaturas de cocción [52, 183, 201, 202].

1.3.4. Recubrimientos Polímeros.

Los recubrimientos polímeros son a base de polímeros sintéticos: termoplásticos y termoestables, los cuales son creados por el hombre y se emplean para proteger, recuperar y decorar [36, 177, 180, 181, 183, 185, 187, 189, 190, 193, 195, 197, 201, 202].

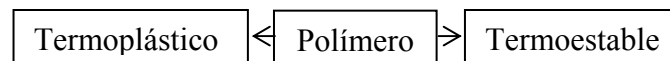


Figura 1.23. Esquema de los recubrimientos polímeros.

a.) Termoplásticos.

Los recubrimientos termoplásticos están formados por moléculas de cadenas largas lineales o ramificadas y a base de materiales de resinas de polimerización; su característica principal es que al calentarse se ablandan o funden; son solubles en disolventes adecuados; moldeables, reversibles, resistente a la corrosión y al impacto [36, 98, 172]. Ejemplos de polímeros termoplásticos: politetrafluoroetileno (PTFE o $\text{CF}_2=\text{CF}_2$), polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET), poliamida o nylon (PA), poliestireno (PS), polimetilmetacrilato (PMMA), etc. [177, 178, 179, 180, 181, 183, 185, 186, 187, 189, 190, 193, 197, 201, 202].

b.) Termoestables.

Los recubrimientos termoestables están constituido a base de materiales de resinas de condensación, experimentan un cambio químico o curado, se descomponen al ser calentados, tienen estructuras reticulares tridimensionales [172, 189], no lineales, que proporcionan un consolidado continuo no deformable plásticamente [177], duros y rígidos, infusibles, insolubles, irreversibles. Ejemplos de polímeros termoestables: bakelita ($-\text{C}_6(\text{OH})(\text{CH}_2)\text{H}_2-\text{CH}_2-$), epoxi (EP), poliuretanos (PUR), etc. [180, 181, 183, 185, 187, 190, 193, 197, 201].

1.3.5. Métodos Químicos y Electroquímicos.

En los métodos químicos y electroquímicos ocurre el proceso de conversión, a través de la reacción superficial del material de aporte con el

sustrato, pasando a formar parte de él. Ejemplos del proceso de conversión son el pavonado, fosfatado, cromatizado y anodizado, figuras 1.24 y 1.25.

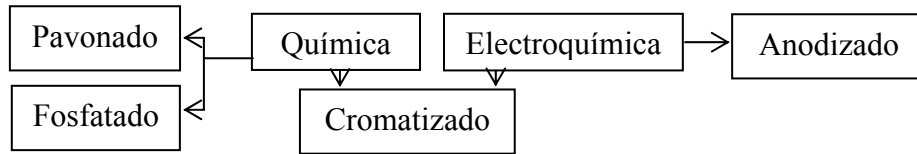


Figura 1.24. Esquema de los métodos químicos y electroquímicos.

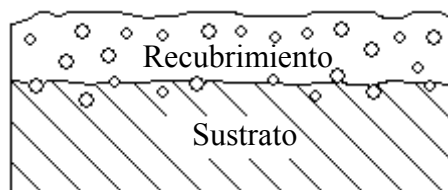


Figura 1.25. Proceso de conversión ilustrándose la reacción superficial material de aporte – sustrato.

1.3.5.1. Métodos Químicos.

En los métodos químicos, el depósito del recubrimiento ocurre por reacciones químicas, a través de la oxidación superficial del material se produce una fina capa de óxido, que tiene una estructura molecular distinta a la del sustrato, no porosa, uniformemente extendida y resistente a los procesos corrosivos, figura 1.26, [13, 172, 198, 203].

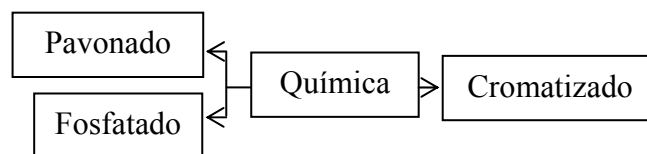


Figura 1.26. Esquema de los recubrimientos por métodos químicos.

a.) Pavonado.

El pavonado consiste en calentar las piezas de hierros (Fe) o aceros en un baño básico de sales fundidas oxidantes a la temperatura de unos 260 – 425 °C, con la finalidad de crear una capa protectora de óxido de hierro (Fe_3O_4) de color negro [51, 81]. También se puede obtener capas negras sobre el cromo (Cr) y el aluminio (Al) [13, 198].

b.) Fosfatado.

El fosfatado consiste en la conversión de la superficie metálica en una película porosa de fosfato, que: a.) Proporciona el anclaje o fijación mecánica debido a su rugosidad a pinturas, esmaltes, aceites, lacas o parafinas [13, 99, 172, 198]. b.) Evita que la humedad penetre y alcance el sustrato e inhiba la corrosión por debajo de la película. c.) Facilita la deformación en frío que se aplique después. e.) Ejerce, por si solo, un efecto anticorrosivo [51, 52, 80].

Los recubrimientos de fosfato lo constituyen sales cristalinas del sustrato sometido a tratamiento o de iones metálicos añadidos a la solución de fosfatado. El secado de las piezas se debe hacer con aire caliente a temperatura < 90 °C [80]. Algunos sustratos son: Fe, acero, Zn, aleaciones de Al, aleaciones ligeras o férricas, Cd, Sn, Mg [13, 91]. El fosfatado no ejerce ningún efecto adverso a las propiedades físicas, pues ni la dureza ni la resistencia a la tracción se modifican [52] y es respetuoso con el medio ambiente [80]. Se distinguen los procedimientos de: a.) Fosfatación ferrosa

por procedimientos de aspersión y inmersión a piezas pequeñas y que requieren de poca protección anticorrosiva. b.) Fosfatación con zinc. Forma una capa uniforme de fosfato de Zn y Fe que ofrece protección anticorrosiva y facilita la adherencia de un barnizado o laqueado. c.) Fosfatación con varios metales. Se lleva a cabo en láminas delgadas galvanizadas y afinadas de superficie mediante iones externos de Ca, Ni y Zn. Debido a la toxicidad de los iones de Ni, existen procesos alternos de fosfatación sin Ni. d.) Fosfatación orgánica. Se realiza la formación de la capa de fosfato a través de polifosfatos y un polímero de fosfato en una mezcla de hidrocarburo y alcohol [99, 198].

c.) Cromatizado.

El cromatizado consiste en una capa de formación tipo gel, mixta de metal-óxido de Cr, de comportamiento de modo pasivo, naturaleza no porosa que excluye casi toda la humedad, impidiendo que llegue al metal [51, 82]. Este proceso, tras los tratamientos de pasivado y secado a temperatura ≤ 90 °C, además de proteger la superficie de las piezas contra la corrosión, es un medio que incrementa la adherencia de la pintura que se aplique inmediatamente después de la cromatación [166]. La aplicación puede ser en medio ácido o alcalino, y entre los componentes del baño pueden estar los ácidos crómicos y fluorhídricos, así como cromatos y fluoruros. Industrialmente se emplean indistintamente tratamientos de cromatizado ácido, como el verde, el amarillo y el transparente, en función de los compuestos químicos empleados y cromatizado alcalino [198]. Los mejores resultados del tratamiento se obtienen por inmersión o rociado a temperaturas de 25 – 35 °C, alcanzándose espesores de 0,5 – 2,0 μm . Algunos materiales usados son: Al, Mg, Zn, Cd, Cu, Sn, Ag y aleación

ligera. Dadas las características de sus componentes, es preciso un alto control en su proceso para evitar el ataque al medio ambiente; las piezas resultantes tras el tratamiento no deben entrar en contacto con alimentos ni artículos de consumo; la limitación del proceso se debe al agotamiento del principal componente del baño, cuya vida efectiva es corta por ser de baja concentración y de pH entre 1 – 4 y no admite demasiadas dosificaciones de refuerzo, ocasionándose descargas discontinuas y frecuentes del baño empobrecido. Los componentes de metal pesado contaminantes contenido en el baño son el cromo hexavalente Cr^{+6} y trivalente Cr^{+3} , no obstante existe tecnología menos contaminante [13, 80]. Por otro lado, van formulados con sustancias activadoras o catalizadoras (fluoruros, bifluoruros, cloruros, nitratos, boratos, sulfatos, etc..) así como ácidos orgánicos tal como el acético y fórmico [82].

1.3.5.2. Métodos Electroquímicos.

En los métodos electroquímicos, figura 1.27, el proceso de depósito de los recubrimientos sucede por la aplicación de un campo eléctrico externo, que se forma al pasar una corriente eléctrica apropiada por conductores de electricidad (metálicos, electrolíticos y mixtos), ocasionando zonas: a.) anódicas donde se produce el material a depositar por la disolución de un ánodo del mismo material que el sustrato y b.) catódicas formada por el sustrato o cátodo a revestir, figura 1.28, [13, 166, 172].

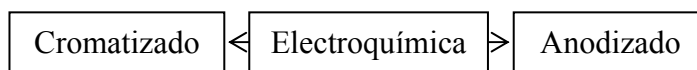


Figura 1.27. Esquema de los recubrimientos por métodos electroquímicos.

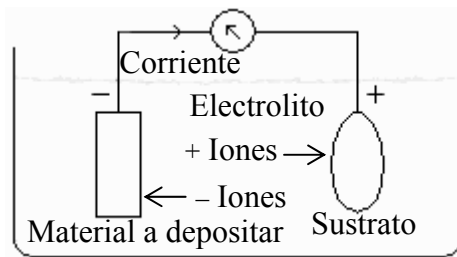


Figura 1.28. Principio de la deposición electrolítica.

1.3.5.2.1. Anodizado.

El anodizado es un proceso de protección electroquímica que se fundamenta en la oxidación anódica controlada. Fenómeno que consiste en la producción de una capa uniforme de óxido de estructura porosa, más o menos hidratada, en la superficie del sustrato metálico (Al, Zn, Cu, Cd, Ag, Ti y aleaciones de Al) a sumergir en un medio electrolítico (ácidos: fosfórico, crómico o sulfúrico) y con la intervención de una corriente eléctrica (fuente externa continua o alterna). Este proceso consta de tres etapas: a.) Oxidación del metal y formación de una película dura de óxido. b.) Disolución del metal en el electrolito. c.) Desprendimiento de oxígeno en el ánodo [51, 78, 81, 82, 90, 98, 169, 198].

Las características del anodizado que influyen en las etapas de formación de la capa dura de óxido, están determinadas por los siguientes parámetros: a.) Concentración del electrolito. Se recomienda la de máxima conductividad iónica, la cual mide la velocidad de oxidación proporcional al grado de disolución electrolítica y a la densidad de corriente. b.)

Temperatura del baño relacionada con la concentración del electrolítico. c.) Agitación mínima. d.) Densidad de corriente en función de la fuerza electromotriz aplicada, de la intensidad de corriente que circula por el baño y de la superficie del ánodo. e.) Tiempo de duración. Cuanto más largo es el tratamiento, de mayor espesor es la capa de óxido. [51, 82]. La anodización en una pieza aumenta la resistencia a la corrosión, abrasión y agentes químicos, garantizando un aspecto uniforme y decorativo, excelente adherencia y máxima durabilidad al recubrimiento [80, 89, 90, 188, 198].

1.3.6. Sol–Gel

El Sol–Gel consiste en la evolución de redes de polímeros híbridos (metal – cadena orgánica), a través de la formación de un sistema de un líquido o suspensión coloidal “sol” de partículas sólidas con tamaño de $\approx 0,001 - 1 \mu\text{m}$, que permanecen en suspensión debido al movimiento Browniano o en estado de gelificación del sol, formando una red en una fase líquida continua “gel”, sólido consistente en al menos dos fases, con la fase líquida atrapada e inmovilizada por la fase sólida [6, 115]. En el proceso Sol – Gel se puede conseguir: a.) Control de la pureza de los reactivos, del grado de homogeneidad de la mezcla de precursores, y de la microestructura (uniformidad y distribución de tamaños de partículas). b.) Fabricar en formas útiles no tradicionales (fibras, películas, polvos, burbujas, elementos ópticos, etc.) con propiedades controladas. c.) Preparar materiales puros a temperaturas bajas y alto grado de homogeneidad [13, 92, 118].

1.3.7. Procesos Termoquímicos.

Los tratamientos superficiales termoquímicos o termoreactivos sirven para modificar la composición química superficial, debido a que se incorpora un elemento químico (C, N, S, etc.) en la superficie del material por procesos de difusión. Se logra a nivel de la superficie de la pieza, dureza y resistencia al desgaste. Los parámetros de estos procesos son la atmósfera usada y el control de la misma, la temperatura y el tiempo, figuras 1.29 y 1.30, [13, 95, 172, 198, 203].

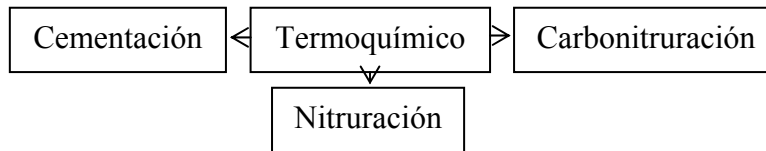


Figura 1.29. Esquema de recubrimientos termoquímicos.

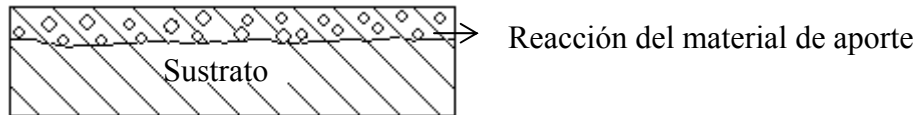


Figura 1.30. Proceso de difusión observándose el material de aporte que se difunde total o parcial en el sustrato.

a.) Cementación.

El tratamiento de cementación o carburación consiste en suministrar carbono (C) a la superficie de la pieza de acero calentada en el intervalo de temperatura de 810 – 950 °C y en contacto con un material carbonoso, para

que se difunda carbono en el interior de la pieza, lográndose el endurecimiento de la capa superficial y una mayor resistencia [95, 171, 189]. El proceso de difusión depende de las propiedades del material y de las variables temperatura y tiempo. Si la temperatura es constante el coeficiente de difusión es constante y los espesores de la capa cementada más utilizados están entre 0,50 – 1,50 mm [180]. El agente carburante en el proceso puede ser un hidrocarburo gaseoso (el gas natural o metano CH₄, propano C₃H₈, butano C₄H₁₀, etc.), o hidrocarburos líquidos (benceno C₆H₆, alcoholes glicoles o acetonas). Si en el proceso se usa una atmósfera gaseosa (ejemplo el monóxido de carbono CO) en el horno se da la reacción: $3 \text{ Fe} + 2\text{CO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2$. También se utilizan agentes activadores y catalizadores, que pueden ser el carbono de bario (20 %) o sodio que aumentan la velocidad de reacción. Con el cementado se aumenta antes de endurecerse la cantidad de carbono en los aceros de bajo % C [93, 201]. En la cementación líquida, el acero se introduce en un baño de sales fundidas a 930 °C, compuestas por una mezcla en porcentajes adecuados de sales: carbonato o cloruro de sodio (base), cianuro de potasio (portador de % C) o de sodio, cloruro de bario (activante) [13, 176, 182, 198].

b.) Nitruración.

La nitruración consiste en hacer penetrar nitrógeno (N) en la capa superficial del material, modificándose las propiedades por la formación de nitruros de Fe. Se incrementa la dureza y aumentan las resistencias al desgaste, a la corrosión, a la fatiga y al ablandamiento por revenido. La temperatura de la nitruración está entre 500 – 590 °C [176]. En la

nitruración gaseosa, los constituyentes de la fase de vapor reaccionan químicamente con el sustrato para formar el nitruro, esto ocurre en una atmósfera compuesta por amoníaco NH_3 gaseoso a presión, un activador oxidante específico y N; por el calentamiento a esas temperaturas el amoníaco se disocia, según la reacción: $2\text{NH}_3 = 2\text{N} + 3\text{H}_2$ [171, 189]. La nitruración líquida se hace en sales de cianuro fundido y emplea las mismas temperaturas que la nitruración gaseosa. Algunos elementos nitrurables de los aceros son: Al, Cr, V y Mo. Entre los aceros nitrurables están los aceros especiales al aluminio (0.85 – 1.5 % Al) y al cromo (5 % Cr). Todos los aceros de nitruración son templados y revenidos antes; los espesores de la capa nitrurada más empleada varían entre 0,20 – 0,70 mm [13, 51, 94, 95, 172, 173, 174, 175, 180, 182, 191, 194, 196, 198, 201, 204].

c.) Carbonitruración.

En la carbonitruración o cianurización se produce una capa mixta de carbono (C) y nitrógeno (N) al calentarse el acero en un baño de cianuro o carbonitruro, que al templar y revenir adquiere una gran dureza y resistencia al desgaste [176, 182]. La temperatura del proceso varía de 800 – 900 °C y los períodos de tiempo son más cortos que en la cementación gaseosa, que produce capas más delgadas ≤ 0.75 mm [13, 171, 172, 180, 189, 194, 201].

1.3.8. Recubrimientos de Inmersión en Caliente.

En los recubrimientos de inmersión en caliente, una vez limpia la pieza a recubrir, se sumerge en el metal protector caliente y se retira al

adherirse a su superficie, la cantidad de metal fundido necesaria para obtener un recubrimiento de excelente adherencia y espesor entre 10 – 100 μm [91]; que se consigue formándose una capa interna de aleación y una capa externa de metal protector prácticamente puro. La capa de aleación se origina por difusión del metal fundido dentro del metal a proteger y está formada por un compuesto intermetálico de composición no estequiométrica [52]. El espesor del recubrimiento depende de las variables: metal líquido (la temperatura, la composición y el tiempo de permanencia y composición del sustrato) y velocidades de: inmersión, extracción y enfriamiento del metal protector. La principal limitación de estos recubrimientos es que el metal protector debe tener un punto de fusión bajo, figura 1.31, [51, 198].

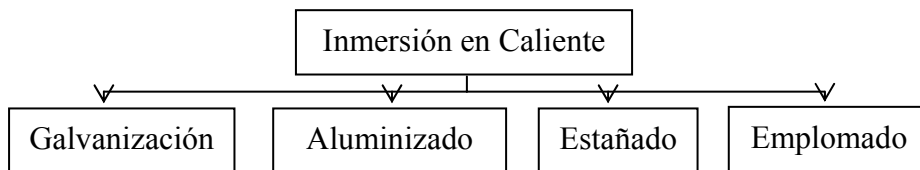


Figura 1.31. Esquema de recubrimientos por inmersión en caliente.

1.3.8.1. Galvanización.

El galvanización es un proceso físico – químico por inmersión, mediante el cual, se obtiene recubrimiento de zinc (Zn) fundido, a una temperatura $\approx 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, consiguiéndose la unión entre el hierro y el zinc (Zn–Fe), de modo que el material férreo adquiera propiedades superficiales equivalentes al Zn, mejorándose la resistencia frente a determinados medios corrosivos con las características mecánicas del sustrato [98, 198]. En la

galvanización en caliente la resistencia a la corrosión depende del espesor de la capa y del sustrato (aceros, fundiciones o aleaciones de Fe); también hay una correlación entre el espesor de la capa y el peso de Zn por unidades de superficie del sustrato ($85 \mu\text{m}$ equivalen a unas 60 g/m^2), en cuanto a los espesores para los aceros oscilan entre $40 - 80 \mu\text{m}$ y son algo superiores en las fundiciones [51]. Sin embargo, aunque la superficie zincada se pasiva rápidamente, el espesor de la capa de Zn va reduciéndose progresivamente en función de las condiciones externas. Según la vía se distinguen los galvanizados o electrozincados.

a.) Galvanizado.

El galvanizado es un procedimiento que incluye un lavado con agua, un tratamiento con flujo, antes de sumergir la pieza en el baño de Zn, tal como viene del baño de decapado. El flujo es, generalmente, una mezcla de cloruro de Zn y de cloruro amónico, cuya finalidad es limpiar la superficie del metal recubrir y proteger la masa de Zn fundido y en contacto con la atmósfera [51, 91].

b.) Electroincado.

El electroincado electrolítico consiste en depositar sobre el sustrato una capa de Zn haciendo circular una corriente continua a través de una solución salina, que contiene el Zn e inmersión de los materiales a tratar pasándolos a través de la capa que flota de flujo fundido sobre el baño de Zn líquido [91]. La extracción puede hacerse retirando la capa de flujo o

volviendo a pasar por la capa, siguiendo inmediatamente un lavado con agua, para eliminar el flujo adherido [51, 98].

1.3.8.2. Aluminizado.

La aluminizado es un procedimiento mediante el cual se obtienen recubrimientos de aluminio (Al) sobre hierro (Fe), por inmersión en caliente en un baño de Al fundido, a una temperatura en el entorno de 700 °C, durante un cierto tiempo [51].

1.3.8.3. Estañado.

El proceso de estañado emplea el estaño, metal blando de color plateado, que presenta una resistencia a la corrosión atmosférica, a los ambientes húmedos y a las disoluciones acuosas neutras, pero debido a su carácter anfótero puede reaccionar con ácidos y bases. La mayoría de los compuestos organometálicos son tóxicos, pero el Sn sólido no lo es, por tal motivo el acero estañado se utiliza en la industria de alimentación [51].

1.3.8.4. Emplomado.

En el emplomado se utiliza el plomo puro a pesar de que no forma aleación con el hierro (Fe). Esto se hace aleando el Pb con otros metales, los cuales formarán la unión con el metal base. El aleante más común es el Sn, que se disuelve fácilmente en el Fe sirviendo de puente entre el metal base y la aleación Pb–Sn [51].

1.3.9. Chapado.

El chapado se consigue por: a.) Laminación en caliente del sustrato y del recubrimiento. b.) Técnica de electrosoldadura. c.) Fusión generalmente por soldadura por explosión. La interdifusión entre el metal base y la lámina de recubrimiento proporciona la suficiente adherencia [51]. El espesor del chapado esta entre 0,65 – 1,30 mm [52]

1.3.10. Deposición Física en Fase Vapor.

En la deposición física en fase vapor (Physical Vapor Deposition o PVD) se parte directamente de un material sólido que se convierte en vapor mediante calentamiento (evaporación) o bombardeo con iones energéticos. El material en forma de vapor, termina condensándose sobre la superficie del sustrato en forma de capa delgada. Los distintos métodos PVD consisten genéricamente en evaporar un metal puro o aleación, por medios físicos en la cámara del reactor, donde previamente se obtiene un grado de vacío, elevado, del orden de $10^{-2} - 10^{-3}$ Pa. El metal evaporado en contacto con el gas reactivo, forma el compuesto que se desea proyectar sobre la superficie a recubrir, por acción de la diferencia de potencial de 200 – 400 V existente entre las piezas y la cámara. Las piezas antes de empezar la etapa de recubrimiento, suelen ser calentadas a temperaturas ≈ 500 °C, produciéndose una atmósfera reactiva o inerte, para conseguir el grado de adherencia aceptable de la capa dura sobre el sustrato. En las piezas acabadas a estas temperaturas se hace posible el recubrimiento sin necesidad de posteriores tratamientos térmicos o rectificadas, ya que no se producen deformaciones

ni alteraciones en la microestructura del material y pueden mantener su dureza original [1, 3, 4, 116]. La baja temperatura de los PVD es una de las ventajas, pues se evitan cambios dimensionales en las piezas y ésta, a su vez, es una limitación de la adherencia al sustrato [10, 11, 14]. Existen diversos procesos, figura 1.32.

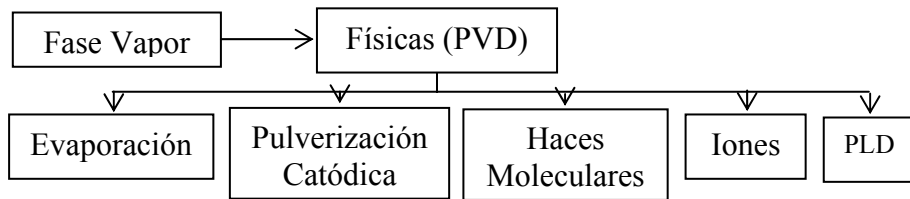


Figura 1.32. Esquema de los recubrimientos PVD.

1.3.10.1. Evaporación Térmica en Vacío.

En los métodos de evaporación térmica en vacío el material se calienta a temperaturas elevadas hasta alcanzar una presión de vapor alta, de forma que una fracción de átomos o moléculas de la superficie pasa al estado de vapor antes de condensarse en capa delgada, figura 1.33. Éstos métodos se basan en el: a.) Paso de corriente eléctrica por el propio material a través de un soporte adecuado. b.) Bombardeo con haz intenso de electrones o descarga en arco, etc., se usan para evaporar materiales refractarios de temperatura de fusión alta [13]. Entre los métodos se distinguen: a.) Calentamiento resistivo. b.) Evaporación mediante bombardeo de electrones. c.) Evaporación de aleaciones, mezclas y compuestos. d.) Evaporación por arco catódico.

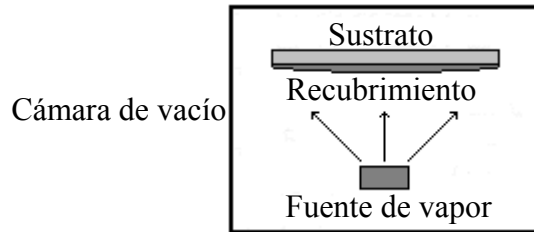


Figura 1.33. Proceso de deposición a partir del vapor.

a.) Calentamiento Resistivo.

El calentamiento resistivo se basa en la circulación de una corriente eléctrica por el material, figura 1.34, empleándose: a.) Un filamento o hilo de tungsteno (W) conductor, en forma de espiral y que rodea el material a evaporar, por el cual se pasa la corriente eléctrica hasta que el hilo alcanza la temperatura deseada. b.) Una banda metálica generalmente usada para evaporar material en forma de polvo, estando en el exterior de la campana de vacío, la fuente de alimentación eléctrica de bajo voltaje y alta corriente, evitándose las descargas eléctricas entre los hilos de contacto. Los materiales típicos para el filamento u hoja metálica suelen ser metales refractarios de alto punto de fusión (Ta, Mo, W), es decir, aquellos con presión de vapor ≈ 0 , a temperatura de vapor (1000 – 2000 °C), para evitar el desprendimiento, conviene en el caso del hilo metálico que el evaporante en el punto de fusión moje el metal. c.) Un crisol cerámico calentado a través de un arrollamiento metálico por corriente eléctrica o inducción de radio frecuencia (RF). Si el evaporante es conductor, se utiliza como alternativa para evaporar materiales que reaccionarían a la temperatura de

fusión con el propio metal de la resistencia. Los materiales inertes a las temperaturas de fusión de un gran número de materiales se usan en el crisol como grafito, óxidos y nitruros refractarios (alúmina Al_2O_3 , nitruro de boro BN, etc.) [13].

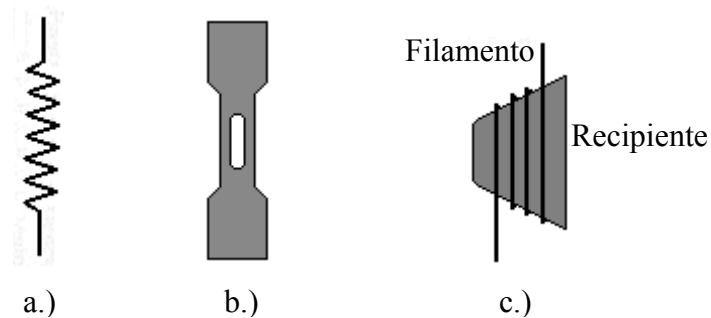


Figura 1.34. Diferentes soportes del calentamiento resistivo: a.) Filamento, b.) Banda metálica y c.) Crisol.

b.) Evaporación Mediante Bombardeo de Electrones.

En la evaporación mediante bombardeo electrónico, el calentamiento se basa en el bombardeo de un haz de electrones de alta energía, proveniente de un cañón de electrones formado por un filamento incandescente (cátodo) que emite electrones por emisión termoiónica y son acelerados hacia un ánodo polarizado a una tensión alta, figura 1.35. El ánodo es el propio crisol o un disco perforado situado en sus proximidades (cañones auto-acelerados). A menudo se usa un campo magnético para dirigir, controlar y curvar la trayectoria de los electrones hacia el crisol [13, 116].

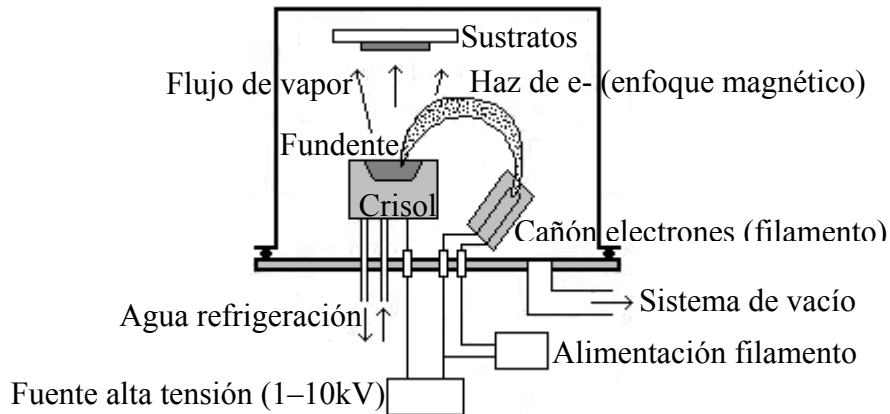


Figura 1.35. Evaporación mediante bombardeo de electrones.

c.) Evaporación de Aleaciones, Mezclas y Compuestos.

La evaporación de aleaciones, mezclas y compuestos ocurre de forma: a.) Directa incongruentemente debido a que cada componente tiene una presión de vapor, provocando que el componente más volátil sea el primero en evaporarse con mayor velocidad, figura 1.36. De ahí que el vapor condensado no tenga la composición de partida o la misma en el depósito y haya falta de homogeneidad en la composición a lo largo del espesor. b.) Reactiva con la posibilidad de depositarse compuestos metálicos que sufren disociación parcial o total a temperatura de vapor por evaporación en atmósfera reactiva del metal correspondiente [13].

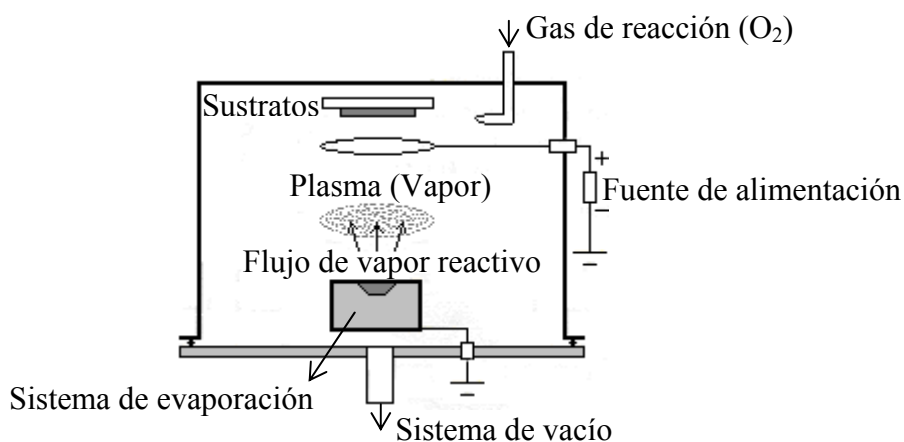


Figura 1.36. Evaporación reactiva con activación mediante descarga eléctrica.

d.) Evaporación por Arco Catódico.

La evaporación por arco catódico se fundamenta en la descarga en arco entre un electrodo inerte (ánodo) y un blanco (cátodo) del material a evaporar, obteniéndose iones del cátodo mediante la evaporación, debido al efecto producido por un arco eléctrico (fuente de alimentación de bajo voltaje y alto amperaje) que se desplaza sobre la superficie de este material, haciéndolo luego reaccionar introduciendo un gas reactivo a baja presión dentro de una cámara con un grado de vacío elevado, figura 1.37. Los iones son focalizados por un campo magnético, acelerados y proyectados sobre el material de la pieza a recubrir por acción de una diferencia de potencial existente entre las piezas y las cámaras del reactor. La energía cinética de los iones se transforma en calorífica al chocar contra la pieza y mantiene la temperatura durante la fase de recubrimiento [3, 11, 13].

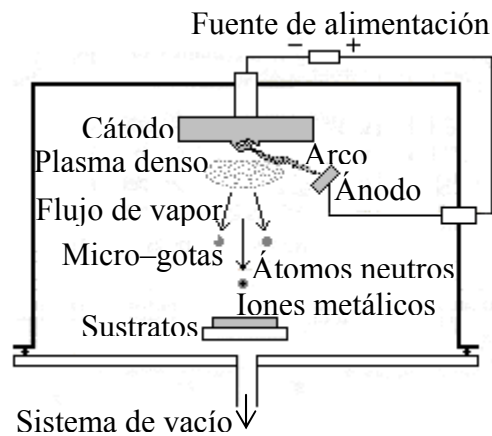


Figura 1.37. Evaporación por arco catódico, observándose el proceso de fusión microgotas y especies excitadas.

La evaporación por arco catódico genera una gran densidad de iones (plasma), lo que permite lograr espesores de capa considerables en tiempos cortos, además posibilita la evaporación simultánea de distintos metales e introduce alternadamente diversos gases reactivos de diferentes naturaleza en la cámara a bajas presiones, para formar variados compuestos. Facilitando la producción de capas dopadas y multicapas con propiedades mejoradas de densidad, dureza y adherencia [3, 11, 13].

1.3.10.2. Pulverización Catódica.

En la pulverización catódica (sputtering), la evaporación se genera por bombardeo sobre la superficie del material (blanco o cátodo) de un haz de iones de gas generalmente inerte, procedentes del plasma, a causa de la descarga del plasma producida entre los electrodos (cátodo – ánodo), figura

1.38. Producidos los iones reactivos se introducen los gases a baja presión (133 – 1333 kPa) y la corriente de la descarga suele ser pequeña ($\leq 1 \text{ mA cm}^{-2}$), para formar los compuestos y focalizarlos hacia las piezas, aplicando una diferencia de potencial (continua o pulsante) entre éstas y la cámara del reactor ($> 1000 \text{ V}$). Debido al campo eléctrico los electrones son acelerados y se mantiene el plasma al chocar con los átomos del gas generando más iones y electrones. Los iones acelerados por el campo aplicado bombardean el material blanco que se va pulverizando, donde existe una transferencia de energía y momento de los iones a los átomos de la superficie del blanco, dando lugar a la eyección o arranque de los átomos cuando la energía transferida es suficiente para superar la energía local de enlace. Luego los átomos arrancados del blanco se van depositando sobre el sustrato en el proceso de crecimiento de la lámina o capa delgada, es decir, el material es transportado desde el blanco o fuente de partículas hasta depositarlo sobre el sustrato donde se forma la película de material (metal, cerámica o aleación) usando descargas de gases nobles [12, 13, 35, 51, 87, 116].

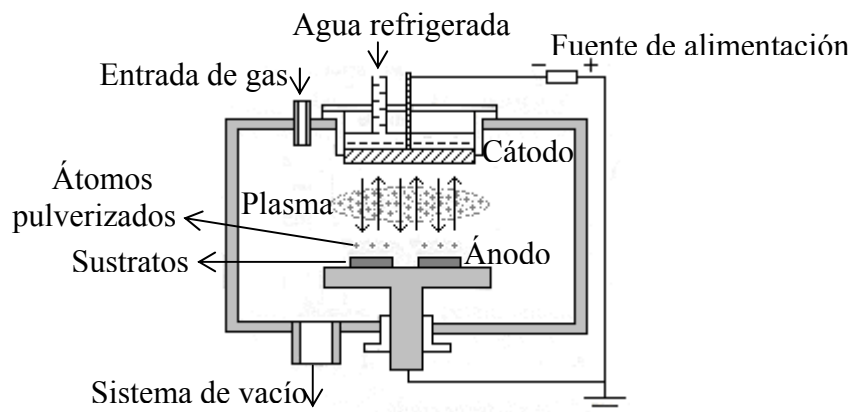


Figura 1.38. Sistema de sputtering diodo (configuración de dos electrodos), apreciándose el proceso de bombardeo.

La pulverización o emisión del material ocurre por colisiones en cascada más que debido a colisiones directas, la energía está en el orden de $10^2 - 10^5$ eV y la descarga aplicada a los electrodos se genera por: a.) corriente directa (DC) no aplicable a blancos de materiales aislantes o reactivos debido a la acumulación de carga eléctrica en la superficie de estos materiales y b.) corriente de radiofrecuencia (RF) aplicable a todo tipo de blancos, independientemente de su conductividad. También para depositar materiales compuestos puede emplearse blancos elementales con gases reactivos y optimizarse a través de campos magnéticos (sistema magnetrón) aplicado sobre el blanco la ionización [12, 13, 35, 51, 87].

1.3.10.3. Epitaxia por Haces Moleculares.

La epitaxia por haces moleculares (Molecular Beam Epitaxy o M.B.E.) consiste en la síntesis de capas delgadas en la que el proceso de crecimiento ocurre cuando la reacción de uno o más haces moleculares o atómicos neutros térmicos de los distintos elementos que forman el compuesto, generados independientemente en células de evaporación, inciden sobre el sustrato monocristalino mantenido a temperatura controlada caliente en atmósfera de Ultra-Alto Vacío o UHV [13].

1.3.10.4. Deposición Asistida con Iones.

La deposición asistida con iones (Ion Beam Assited Deposition o IBAD) es un proceso de depósito basado en haces de iones, utilizable con

todo tipo de átomos. Simultáneamente a la deposición de átomos por distintos métodos (evaporación térmica, pulverización catódica, etc.) se bombardea el sustrato con iones procedentes de un cañón de determinada energía, densidad de corriente y dirección controlada, figura 1.39, [97]. En la superficie del sustrato se produce la interacción entre átomos e iones, con transferencia de energía de llegada a la superficie de los átomos depositados, que pueden no ser fácilmente ionizables y, por lo tanto, acelerables. Tras la colisión, estos átomos hiper-térmicos pueden dar lugar a entornos de enlace metaestables, capas densas por introducción de átomos intersticiales, o reacciones químicas entre átomos e iones. Con este proceso se consiguen excelentes adherencias en cerámicas, metales o polímeros, sin necesidad de aumentar excesivamente la temperatura de tratamiento [96, 116]. Los modos de operación son: a.) IBAD no reactivo: se emplean iones de gases nobles, principalmente Ar por su bajo coste. En la colisión del ión incidente con el átomo que llega a la superficie hay transferencia de energía y momento y se forman capas densas. b.) IBAD reactivo: en este los mecanismos físicos que ocurren por la energía y relación de transporte, interviene la reactividad entre átomos e iones [13].

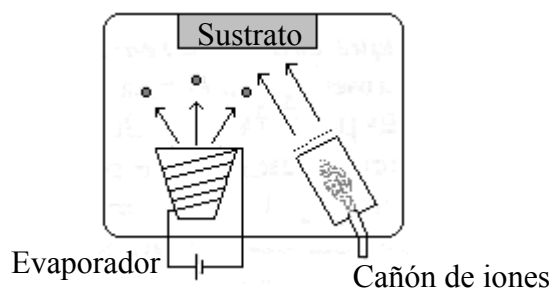


Figura 1.39. Evaporación asistida por haces de iones (IBAD).

1.3.10.5. Depósito por Láser.

El depósito por láser pulsado (Pulsed Laser Deposition o PLD) es un proceso de ablación con láser en el que intervienen diversos mecanismos físico-químico, basados en la capacidad de un haz láser para arrancar material de una superficie. En la figura 1.40 se muestra un láser pulsado cuyo haz se enfoca sobre el blanco (material) provocando su ablación y como resultado la producción de un plasma que se expande perpendicularmente al blanco y hace contacto con el sustrato sobre el que crece la capa o lámina delgada. Después de realizarse la síntesis del material en la cámara evacuada de partículas y gases con un grupo de bombeo a presiones de $10^{-6} - 10^{-4}$ Pa, se sitúan dentro el blanco y en el frente o en forma paralela el sustrato en una atmósfera controlada. La limitación de la técnica es que el haz láser no debe impactar siempre en el mismo punto, debido a que agujerearía el blanco y se acabaría el proceso, por lo que es necesario mover el blanco o el haz, de forma que la ablación ocurra sucesivamente en puntos distintos del blanco y éste se vaya consumiendo de manera homogénea. En la práctica para conservar las condiciones ópticas del sistema se rota el blanco [13, 122].

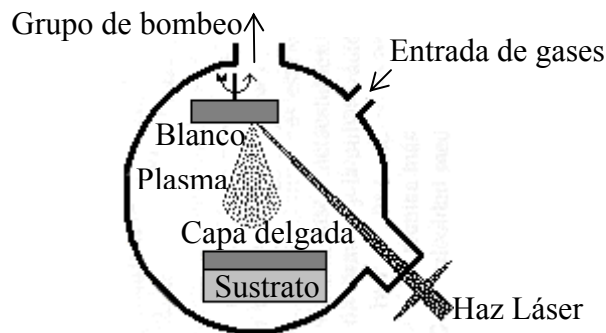


Figura 1.40. Sistema de PLD.

1.3.11. Deposición Química en Fase Vapor.

La deposición química en fase vapor (Chemical Vapor Deposition o CVD) consiste en el depósito de un material sobre un sustrato, figura 1.41, a partir de las reacciones químicas: a.) Homogéneas, se producen en la fase gaseosa formando un agregado de polvos y capas poco adheridas y porosas, es decir dan lugar a la formación de partículas de diámetro pequeño de décimas a centésimas de micras, que se depositan por gravedad sobre el sustrato y otras zonas del reactor e incluso pueden recogerse a lo largo de las líneas de evacuación y ser arrastradas por los gases de salida. b.) Heterogéneas, se producen en la intercara gas – sólido, es decir en el contacto con la superficie del sustrato a recubrir, alcanzado una temperatura mínima y los productos de la reacción se condensan formando la capa de recubrimiento sobre el sustrato y las paredes del reactor [1, 4, 13, 88, 116]. En los procesos de CVD a presión reducida combinada con un sistema modelizado de difusores aseguran un buen reparto de reactivos en todo el volumen del reactor. El volumen útil de la cámara, aún siendo superior en diámetro a los reactores CVD convencionales, permite una uniformidad del espesor de la capa obtenida [9].

En los procesos de CVD los gases utilizados se clasifican, según su papel en: a.) Precursores separados como silicio (Si) y carbono (C), el Si se obtiene del SiH_4 , el C de diversos tipos de hidrocarburos: propano (C_3H_8), etileno (C_2H_4), metilsilano (SiCH_6) y tetrametilsilano ($\text{Si}(\text{CH}_3)_4$), compuesto organometálico en el cual la molécula tiene radicales metil enlazados directamente con un átomo de Si. b.) Portadores, habitualmente Ar o H_2 , permiten el control efectivo del proceso y facilitan el transporte del gas o

mezcla de gases precursores hasta el sustrato. Los parámetros principales que caracterizan un proceso de CVD son la temperatura del sustrato, la naturaleza y flujos de gases (portadores y precursores) y la presión a la que se mantiene el reactor durante el proceso de deposición. También son importantes los parámetros geométricos referentes tanto a la forma del reactor: cilíndrico, esférico, semiesférico, etc., o su disposición: vertical o horizontal; así como la forma del sustrato, etc. [2, 88].

Los procesos de CVD se fundamentan en la reacción de uno o varios compuestos, donde un material de partida, ya sinterizado, se convierte en vapor y luego se condensa en forma de película o producto sólido. Las fuentes precursoras de los productos están en forma de gas o directamente en estado líquido y pasan a estado de vapor. En ambos casos, los reactivos (gas o vapor) han de ser arrastrados a la cámara de reacción en la proporción adecuada para producir el recubrimiento deseado, una vez que ocurre la reacción. Los gases reactivos son introducidos por uno de los extremos del reactor y los subproductos de la reacción, así como los gases que no han llegado a reaccionar son eliminados a través de la puerta de salida mediante un sistema de evacuación adecuado [13].

Un aspecto de las reacciones de CVD es la necesidad de activar los gases precursores o actuación de las moléculas para producir la reacción, ya que en condiciones normales de operación (presión y temperatura) la velocidad de reacción suele ser baja. El método de activación de la reacción de la mezcla gaseosa durante el proceso de deposición, tiene sus propias características y el producto formado puede presentar propiedades diferentes cuando el depósito es obtenido por uno u otro método; distinguiéndose en la

clasificación de las técnicas de deposición CVD activación por: temperatura, plasma, radiación electromagnética, etc. [13, 116].

Uno de los inconvenientes de las técnicas de CVD es que la reacción de deposición requiere de temperaturas altas $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, con objeto de activar los constituyentes de la reacción y obtener así depósitos a una velocidad razonable. Este hecho limita el tipo de sustratos que pueden ser recubiertos mediante la técnica de CVD y hace imposible su uso en el caso de recubrimientos sobre un sustrato con una estructura crecida [13, 108, 116]. La aplicación de una descarga eléctrica o la irradiación con un haz láser (u otra fuente de radiación de longitud de onda adecuada) de los gases presentes en un reactor de CVD provoca la excitación de partículas gaseosas a estados más energéticos y, por tanto, más reactivos. De esta forma, se genera un plasma o gas de partículas (eléctricamente neutro en promedio) que contienen constituyentes neutros (átomos y/o moléculas), cargados (electrones e iones) así como radicales atómicos y/o moleculares y otros activados. Con la creación del plasma se aumenta la velocidad del depósito, para una temperatura dada y se hace posible la obtención de depósitos a temperaturas de sustratos $< 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ e incluso a temperatura ambiente, con respecto a las usadas en los sistemas convencionales de CVD [13].

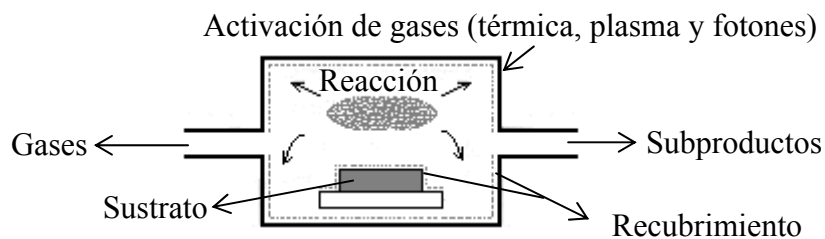


Figura 1.41. Proceso de CVD.

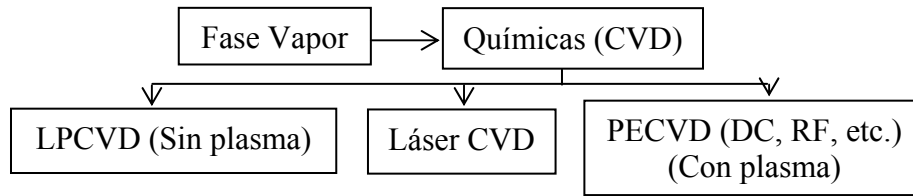


Figura 1.42. Esquema de los recubrimientos CVD.

1.3.11.1. Activación Térmica:

La activación térmica del proceso se hace por calentamiento directo de los reactivos mediante: a.) una resistencia externa; b.) inducción de radiofrecuencia (RF) usando un sustrato conductor y c.) radiación de infrarrojo a través de iluminación con lámparas de cuarzo. El CVD activado térmicamente se realiza por calentamiento de los gases reactivos, según la presión del reactor se distinguen las técnicas a presiones atmosférica y reducida; en este caso la presión de los gases se sitúa alrededor de ≤ 133 Pa [13, 88].

a.) CVD a Presión Atmosférica.

En la deposición química en fase vapor a presión atmosférica (Atmospheric Pressure CVD o APCVD) los gases se introducen en el reactor una vez caliente, normalmente produciéndose una sobre presión entre 0,1 – 10 kPa en torno a la presión atmosférica que evite el reflujo del

aire de la atmósfera por la boca de salida de los gases. Antes se hace un purgado de la atmósfera de aire del reactor a través de un barrido con algún gas inerte. Al no requerir equipo de evacuación, el equipamiento necesario para esta técnica se reduce al reactor con el horno correspondiente y al sistema de entrada y control del flujo de gases. La velocidad de reacción es elevada si ocurre a temperaturas altas. Con esta técnica se obtiene películas gruesas de un material, pero tiene el inconveniente de que la alta presión de los gases favorece la reacción en fase homogénea, produciendo una concentración elevada de partículas sobre el sustrato y defectos en el recubrimiento y en la homogeneidad del espesor, sobre todo en los puntos de difícil acceso a los gases reactivos [13].

b.) CVD a Presión Reducida.

La deposición química en fase vapor a presión reducida o baja (Low Pressure CVD o LPCVD) en el orden de 25 – 40 kPa, dependiendo de los compuestos o precursores a obtener y es respetuosa con el medio ambiente [117]. La uniformidad de capa es extremadamente precisa incluso en las zonas anguladas y cantos, zonas estrechas y geométricamente difíciles. El ahorro de precursores debido a la baja presión de trabajo, genera poca cantidad de compuestos residuales a tratar y la facilidad en el cambio de los gases reactivos ofrecen la posibilidad de obtención de capas simples y multicapas, con un acabado brillante y manteniendo la rugosidad inicial de la pieza [2, 9]. La velocidad de deposición está determinada durante la reacción de CVD en fase heterogénea, por los procesos de difusión a través de la capa límite y la reacción en la superficie [13].

1.3.11.2. Activación por Plasma:

La activación por plasma se produce a través de la transferencia de energía, por la descarga eléctrica inducida en forma de plasma de tipo luminoso generada por dos electrodos o una bobina de inducción, situadas en la zona de reacción o campo eléctrico en el interior del reactor; haciendo que las moléculas de los gases precursores pasen a estados de energía elevada, favoreciendo la velocidad de reacción, figura 1.43. En esta técnica de CVD asistida por plasma (Plasma-Enhanced CVD o PECVD), la descarga se genera con fuentes de corrientes: directa DC y alterna CA, siendo la fuente más utilizada la CA en el rango de radiofrecuencia (RF), porque se consiguen plasmas uniformes y estables en zonas relativamente grandes, mejorándose la eficiencia del proceso de deposición de recubrimientos. La fuente de generación del plasma suele activarse a presiones de trabajo reducidas, dependiendo del sistema de excitación entre 13 – 1333 Pa, aunque la variable importante es la densidad de potencia de la descarga. Ya que los tiempos de vida media de los constituyentes del plasma son cortos, es preciso suministrar constante la energía necesaria para regenerar y mantener la concentración adecuada de constituyentes activos [88]. En la técnica PECVD se realiza la transferencia de parte de la energía media (o temperatura) del campo eléctrico del plasma (descarga eléctrica de 1 – 4 eV) a sus electrones, existiendo un pequeño número de electrones muy energéticos capaces de excitar, ionizar y/o disociar por impacto electrónico de moléculas y/o átomos del plasma, permitiendo efectuar el depósito entre la temperatura del ambiente y unos 300 – 400 °C y a baja presión [13, 108].

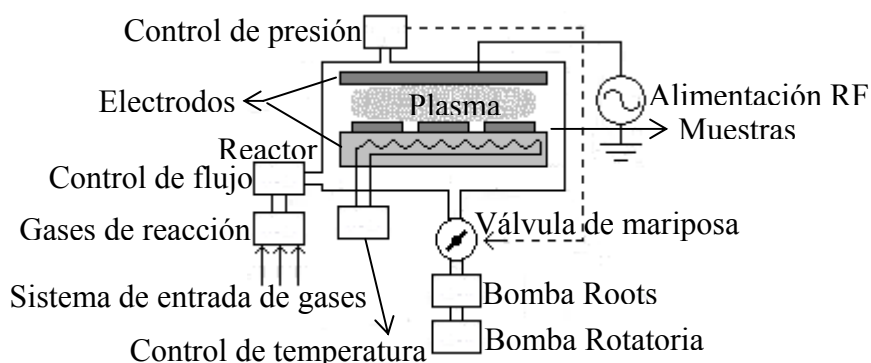


Figura 1.43. Sistema PECVD con un reactor capacitivo de electrodos plano – paralelos.

1.3.11.3. Activación por Fotones:

La activación por fotones se origina mediante la excitación de las moléculas reactivas por iluminación con fotones de energía elevada (luz ultravioleta producida por lámpara de mercurio) o de intensidad elevada (radiación láser). En esta técnica, las moléculas son excitadas mediante radiación electromagnética de energía suficiente elevada, distinguiéndose según el mecanismo de excitación: radiación ultravioleta y láser [13, 88].

1.3.11.3.1. Excitación por Radiación Ultravioleta.

La excitación por radiación ultravioleta (Photo-CVD o PCVD) lleva a las moléculas de los gases reactivos a estados excitados muy reactivos, incrementándose la velocidad de deposición. Los átomos de mercurio

absorben la energía eficientemente, y luego por colisiones la transfieren a las moléculas del gas. La complejidad de la técnica, y la posible contaminación con mercurio hace al método restringible [13].

1.3.11.3.2. Excitación por Láser.

La excitación por láser (Laser-CVD o LCVD) es absorbida por los átomos y/o moléculas de los gases precursores, mediante procesos que implican uno o varios fotones. Estos procesos de foto-absorción dan lugar, dependiendo de la energía de los fotones, a la excitación, ionización y/o disociación de los constituyentes gaseosos. Así, los productos altamente excitados a través de estos procesos, pueden reaccionar químicamente de forma eficaz con otros constituyentes presentes en el gas o condensarse sobre la superficie del sustrato. En las técnicas de depósito asistidas por láser (Photo-CVD (PCVD) o de Laser-CVD (LCVD)) la activación de las moléculas de reacción se basa en la transferencia de energía procedente de la radiación, sea de un haz de luz de una lámpara o un láser respectivamente. En el caso particular de usar radiación láser, los modos de activación implican los mecanismos físico-químicos de: a) Pirólisis. b) Evaporación. c) Fotólisis [13].

a) Pirólisis.

La pirólisis consiste en focalizar un haz láser sobre el sustrato calentándose localmente un área aproximadamente igual a la sección del

haz, favoreciéndose los procesos de transferencia de energía desde los electrones calientes, recombinaciones no radiactivas, excitaciones vibracionales y descomposición de los gases reactivos que se hallan cerca de la zona caliente, figura 1.44, Así el aumento de la temperatura del gas en contacto con la superficie del sustrato, provoca reacción activa e incrementa las velocidades de deposición. La longitud de onda del láser se elige de modo que los gases reactivos sean transparentes a la luz del láser y sea absorbida por el sustrato [13].

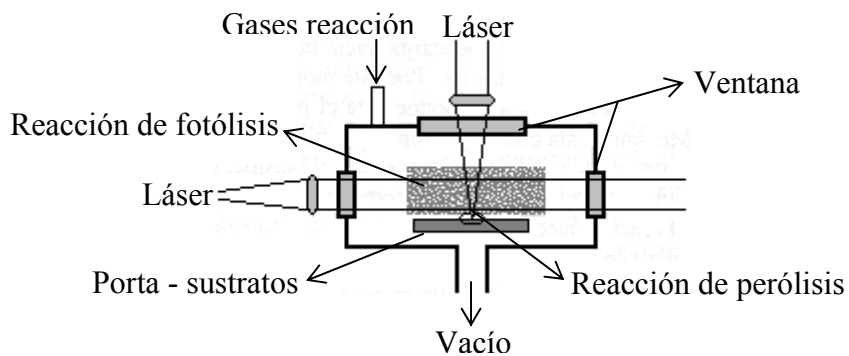


Figura 1.44. Esquema del reactor CVD asistido por láser usando para activar reacciones químicas por pirólisis o fotólisis.

b) Evaporación.

La evaporación es una técnica de ablación láser, donde se focaliza el flujo de fotones de este sobre un blanco sólido que está situado próximo al sustrato, de tal manera que el láser arranca átomos del blanco, originándose un plasma energético en las cercanías del blanco compuesto por constituyentes excitados de energías altas, que luego se mueven hacia el

sustrato y, formándose una o varias capas densas que mantienen la composición del blanco [13].

c) Fotólisis

La fotólisis se da mediante los procesos que implican unos o varios fotones, donde los gases reaccionantes excitados absorben la luz (radiación emitida) del láser, produciéndose posiblemente la fragmentación de la molécula. Al ser la longitud de onda de la radiación láser de un valor definido, se requiere un acoplamiento crítico entre la energía de la radiación y la de excitación de las moléculas. Cuando esto es posible, la pureza del material depositado es elevada y la velocidad de deposición suele ser baja. Los productos de esta foto-disociación pueden reaccionar químicamente con otros constituyentes presentes o condensarse sobre las superficies, permitiendo la obtención de películas uniformes sobre áreas extensas de, menor de 10 cm² [13].

1.3.12. Tratamientos Superficiales.

Con los tratamientos superficiales se obtienen propiedades deseadas; aplicando diversas tecnologías se logran: proteger materiales sometidos a varias condiciones de servicio y diferentes fines: pulido, conversión, oxidación, modificaciones morfológicas, tratamientos térmicos y termoquímicos, hidruración, nitruración, etc., figura 1.45, [13,116].

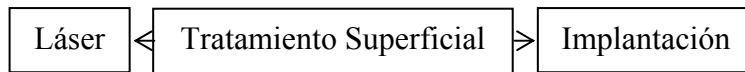


Figura 1.45. Esquema de tratamiento superficial.

a.) Tratamiento con Láser.

El tratamiento con láser consiste en focalizar el haz láser necesario con una densidad de potencia suficiente sobre un sustrato. En función de la potencia y del tiempo de interacción, el material sufrirá una serie de transformaciones que pueden ir desde el calentamiento a la fusión. Una vez que la radiación láser ha sido absorbida por la superficie, ésta comienza su solidificación con velocidades altas de $10^6 - 10^{10}$ °C/s. Puesto que los elementos de aleación se difunden en estado líquido, es posible obtener capas de diferentes espesores en tiempos en el orden de 0,1 – 10 s, lográndose generar recubrimientos sobre diferentes tipos de sustratos metálicos con aportaciones diversas, controlándose la composición se podría conseguir que la difusión entre los elementos añadidos y el material base sea total, obteniéndose una aleación superficial o parcial [13].

b.) Implantación.

La implantación consiste en introducir átomos (iones de alta energía), proyectando partículas energéticas o bombardeando iones a baja presión acelerados que chocan contra la superficie del sustrato sólido

suministrándole la energía suficiente para que se dé la reacción en el rango de $10^3 - 10^7$ eV, figura 1.46. En estas condiciones se obtiene disolución del blanco en el sustrato, con independencia de la posible insolubilidad de ambas sustancias, pero de composiciones muy controladas. Este control se lleva a cabo variando convenientemente el flujo de iones (número de iones por segundo y por unidad de superficie) que inciden en la superficie de la muestra y el tiempo de implantación, la profundidad de penetración de la zona implantada viene definida por la energía [13, 51, 116].

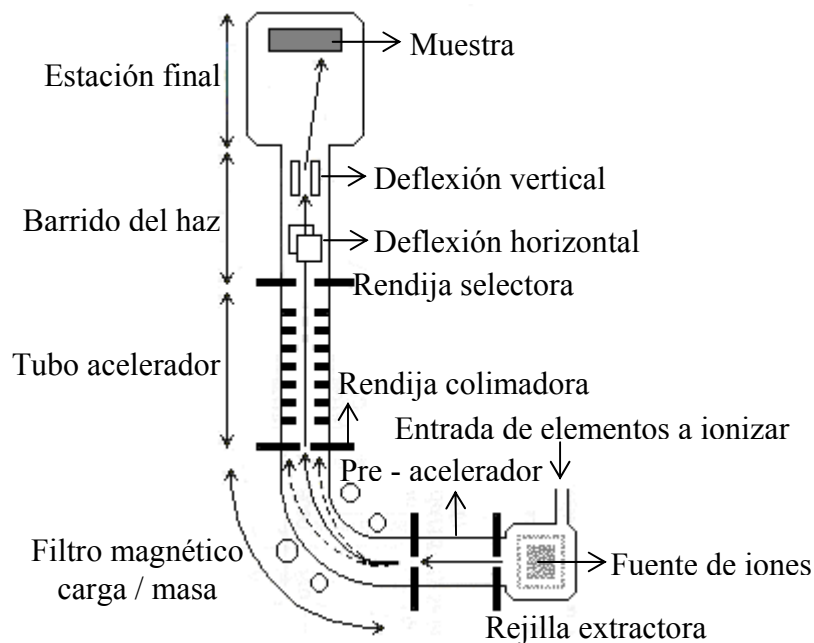


Figura 1.46. Implantador de iones.

Se utiliza generalmente para introducir modificaciones químicas (estequiometría), estructurales (creación de defectos) o electrónicos (dopaje), deseadas en una parte de este material. Las experiencias de implantación iónica se realizan utilizando un acelerador magnético de

partículas capaz de producir y acelerar, dentro de la gama de energías deseadas, los iones del elemento elegido. Estos iones se proyectan sobre el blanco y se obtiene una distribución de átomos implantados en el seno del blanco llamada perfil de impurezas que se puede homogeneizar por un sistema de barrido de haz iónico sobre la superficie. Ejemplos de elementos implantados: Ar, Xe, Zr, Au, Pt, Pb, Hg, Cr, P, Ta, B, Pd, Ti, N, Si, Nb y Mo entre otros [13, 88].

1.3.13. Proyección Térmica.

La proyección térmica engloba un grupo de procesos donde un material alimentado es calentado y proyectado como partícula individual en forma de gotas sobre una superficie, figura 1.47. El equipo de proyección térmica genera el calor necesario por gases combustibles o arco eléctrico. Los materiales son calentados cambiando a plástico o fundido y son comprimidos y acelerados hacia el sustrato usando gas comprimido. Las partículas proyectadas impactan en el sustrato de superficie fría, aplastándose y formando placas delgadas, que aumentan superponiéndose partículas, adhiriéndose a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas, produciéndose el recubrimiento de estructura laminar, que no es homogéneo y típicamente contiene cierto grado de porosidad y óxidos en el caso de proyección de metales, figura 1.48, [16, 21, 101, 102, 104, 114, 127].

Los materiales de alimentación en formas de polvos, alambres y barras, son metálicos, cerámicos, polímeros y combinaciones de ellos que

pueden aplicarse bajo condiciones atmosféricas normales o especiales [20, 21, 25, 48, 85, 100, 103, 104, 114]. Por otra parte, los alambres metálicos o aleados se utilizan solamente en los procesos de proyecciones por arco eléctricos y flame spray. En cuanto las barras de cerámica sinterizadas, por tener la longitud corta son rápidamente fundidas, lo que conlleva a su sustitución con pérdida de tiempo, se conduce inevitablemente a un cambio de la microestructura. Este proceso tiene que ser evitado en la deposición de capas de piezas grandes, razones por las cuales se usa, a veces, en proyección térmica menos que el material en polvo. Sin embargo, las partículas fundidas son casi de un único tamaño mientras se proyecta una barra, lo que hace capas más homogéneas que las proyectadas usando polvo [16].

Los sistemas de proyecciones térmicas son tecnologías respetuosas con el medio ambiente, rápidas de aplicar, flexibles a nivel tecnológico y ventajoso en el tema de recubrimientos de espesores $> 100 \mu\text{m}$ [15, 19, 46]. La unión entre el sustrato y el recubrimiento puede ser mecánica, química o metalúrgica o una combinación de ambas [17, 24, 100, 103, 127, 184]. En el proceso la alta temperatura para fundir el material se alcanza químicamente (combustión) o eléctricamente (arco), que también desempeñan el papel de acelerar las partículas fundidas al sustrato, donde el material depositado se solidifica en una nueva superficie o recubrimiento, permitiendo conseguir mejoras sustanciales en la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste y a las elevadas temperaturas [18, 20, 21, 85, 102, 104, 112, 114]. Las propiedades aplicadas al recubrimiento o capa dependen del material de alimentación, del proceso de proyección térmica, de los parámetros aplicados y del pos-tratamiento [16, 54].

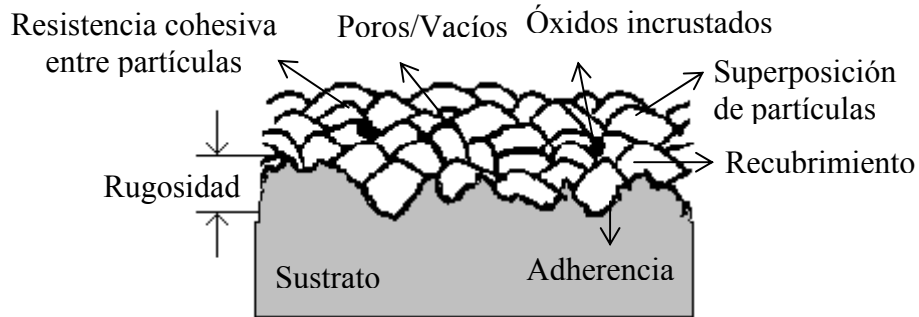


Figura 1.47. Típica sección transversal de un recubrimiento por proyección térmica, ilustrándose la estructura laminar, los poros o vacíos y los óxidos incrustados.

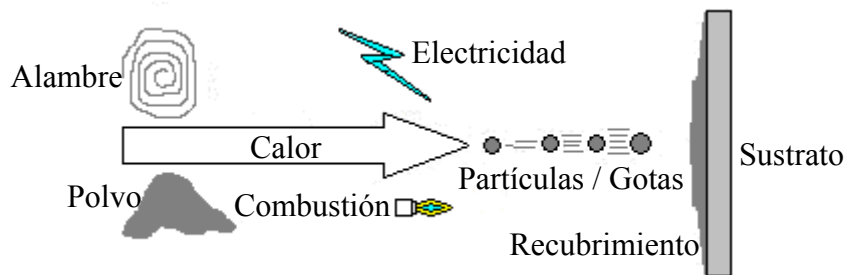


Figura 1.48. Representación esquemática de la clasificación de la proyección térmica según los criterios de aporte térmico y cinético basado en la combustión y la electricidad.

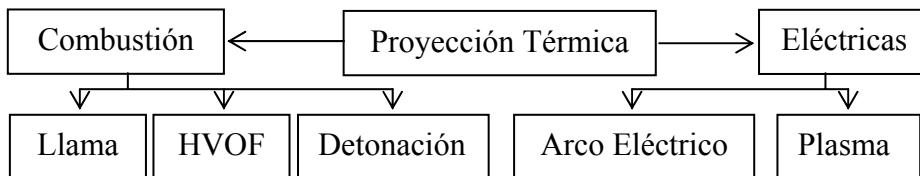


Figura 1.49. Esquema de los recubrimientos por proyección térmica.

Los sistemas de proyección térmica se clasifican, figura 1.49, según diversos criterios por el aporte de: a.) Material. b.) Térmico. c.) Cinético. A continuación, la clasificación considerando los criterios más generales, el aporte térmico y cinético que se basan en la combustión y en la corriente eléctrica [20, 21, 22, 25, 27, 40, 48, 100, 101, 102, 103, 112, 184]:

1.3.13.1. Procesos de Combustión:

En los procesos de combustión se utiliza la energía química de gases comburente y combustible para calentar el material a proyectar, figura 1.49, [16, 20, 25, 112].

a.) Proyección por Llama (Flame Spray).

Proyección por llama (Flame Spray o FS); este proceso es la forma más antigua de proyección térmica denominado "proceso frío", concerniente al material del sustrato que está revestido y es donde se encuentra el punto más bajo de temperatura el cual permanece sin modificaciones, cambios metalúrgicos y distorsiones. Este proceso puede ser usado con una gran variedad de materiales de alimentación, incluyendo alambres de metal, barras de cerámica, polvos metálicos y no metálicos. El material es alimentado continuamente hacia el soplete o pistola donde es fundido en una llama de combustión realizada en el aire (ambiente) de una mezcla gas comburente (oxígeno O_2) y gas combustible (acetileno C_2H_2 , hidrógeno H_2 y propano C_3H_8), para producir una fuente de calor o llama,

utilizándose el aire comprimido para proyectar y acelerar las partículas en forma de gotas fundidas sobre el sustrato, donde fluyen juntas y solidifican proporcionando una capa, figura 1.50, [21, 36, 60, 123, 127]. Limitan la proyección por llama los materiales que se: a.) Funden a temperaturas más altas que la proporcionada por la llama. b.) Descomponen en el calentamiento [16, 25]. Debido a la temperatura baja de la llama y la velocidad de la partícula, las capas son generalmente de menor calidad, tienen alta porosidad y bajas fuerzas cohesivas y adhesivas, baja resistencia y espesor limitado [46, 54].

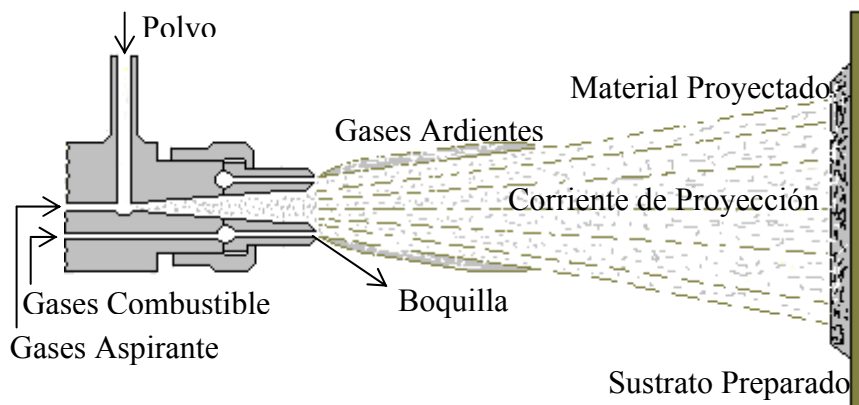


Figura 1.50. Proyección por llama usando polvo.

En este proceso de combustión de proyección por llama las variantes más usadas son: a.) Proyección por llama usando polvo, figura 1.50: En ésta, el material de aporte en forma de polvo es alimentado directamente en el centro de la llama, donde se calienta y alrededor de ésta, se inyecta una corriente de: aire comprimido, gas inerte (argón Ar o nitrógeno N_2) o oxígeno O_2 , que pulverizan y aceleran las partículas proyectándolas hacia el sustrato [21, 25, 60]. b.) Proyección por llama usando alambre, figura 1.51:

En esta el material de aporte en forma de alambre a nivel de la entrada debe ser ajustado y la llama balanceada para lograr fundir el alambre continuo y así tener una proyección de partículas fina y a través de la corriente o el flujo comprimido de aire atomizador acelerar las partículas hacia el sustrato [16, 23, 36, 184].

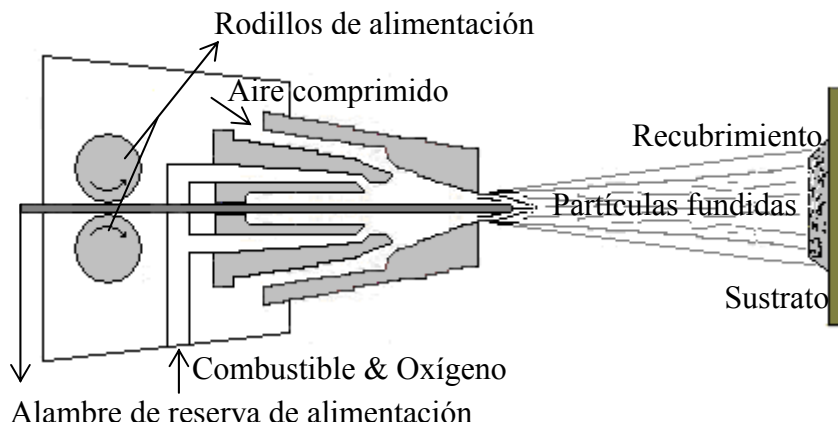


Figura 1.51. Proyección por llama usando alambre.

b.) Proyección por Llama a Alta Velocidad.

La proyección por llama a alta velocidad (High Velocity Oxy-Fuel Spray o HVOF Spray), se desarrolló a principios de los años 80. Desde entonces, se ha convertido en una de las más utilizadas y en esta última década ha surgido un notable interés en esta técnica de proyección como herramientas de conformado de piezas. Este proceso, figura 1.52, se basa en la generación de un flujo gaseoso de gran velocidad (> 1400 m/s) originado en la combustión a alta presión y detonación en el interior de la cámara de combustión de una mezcla oxígeno O_2 y combustible de un gas (propano

C_3H_8 , metano CH_4 , propileno $2HC = CH - CH_3$, etileno C_2H_4 , hidrógeno H_2 , nitrógeno N_2 , acetileno C_2H_2) o un líquido (querosén), la mezcla de gases es acelerada a velocidades supersónicas y el material de alimentación en forma de polvo es inyectado dentro de la llama donde cambia a estado fundido o semifundido de tal forma que las partículas proyectadas alcanzan la máxima energía cinética impactando contra el sustrato, formando las capas o recubrimientos de alta calidad con propiedades específicas, extrema densidad (densos), cohesión interna y adherencia (alta fuerza de enlace) al sustrato y con baja porosidad [16, 21, 23, 25, 31, 47, 54, 76, 135]. Los espesores de capa se extienden a partir de 0,000013 – 3 mm. Puede ocurrir una cierta oxidación o reducción de óxidos bajos, debido a que en la fuerte de calor se obtiene menos temperatura de llama $\approx 3000\text{ }^\circ\text{C}$ y las partículas por su velocidad pasan menos tiempo dentro [60, 105, 130, 133, 184].

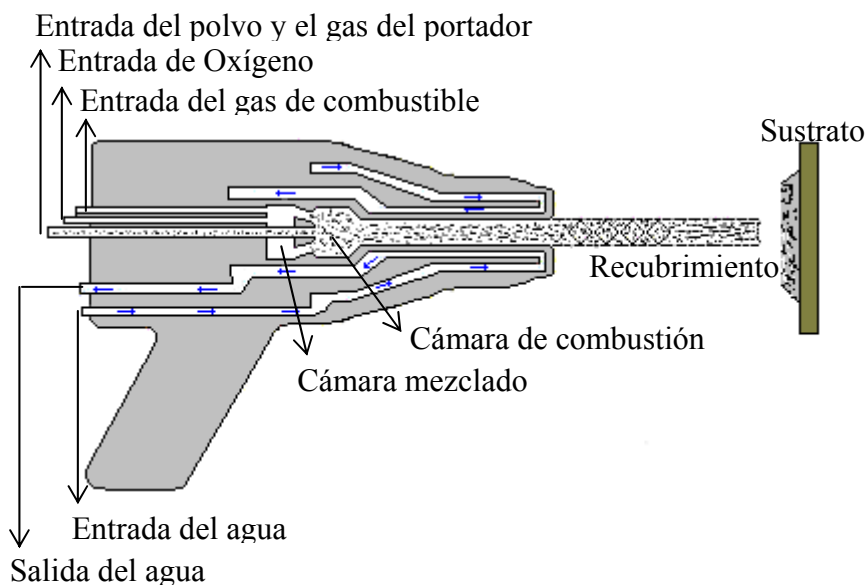


Figura 1.52. Proyección por llama a alta velocidad.

c.) Proyección por Detonación.

En la proyección por detonación se usa la combustión continua con una serie de explosiones o detonaciones intermitentes controladas, que funden el material de capa transformándolo en partículas y lo proyectan por impacto con alta energía cinética hacia el sustrato, para obtener por acumulación de capas, un determinado espesor, figura 1.53, [25, 54]. Estas capas son el resultado de la mezcla de gas de oxígeno (O_2) y de combustible comúnmente acetileno (C_2H_2), junto con el material de capa en forma de polvo, se introduce o alimenta en el cañón, que consiste en un tubo de salida, en cuyo extremo cerrado o final se encuentra la cámara de combustión, y el otro está abierto, refrigerado por agua y limpiado con nitrógeno (N_2) después de cada detonación. Dependiendo del equipo usado, hay 1 – 15 detonaciones por segundo [60]. La mezcla de gas es encendida por una bujía en el interior de la cámara, una chispa inicia la detonación, resultando la expansión del gas caliente, que funde y acelera las partículas de los materiales del polvo en un rango de temperaturas que se extienden a partir de 1100 – 19000 °C [16, 23].

Debido a la alta velocidad de impacto ≈ 600 m/s en que se depositan los materiales comúnmente óxidos y carburos, los sopletes de combustión y los cañones de detonación se pueden usar solamente en los sustratos de metal. El procedimiento alcanza niveles de ruido > 140 decibeles y, por lo tanto, debe realizarse en habitaciones a prueba de sonido y de explosiones [25, 54, 60]. Los espesores de capa típicos se extienden de 0,05 – 0,5 mm, aunque pueden obtenerse capas más finas y gruesas. El cañón de detonación se considera el primer proceso de proyección térmica a alta velocidad,

donde las características de las capas son menos sensibles al ángulo de deposición que otros tipos de proyecciones. Los recubrimientos producidos con este método son de excelente calidad, por ejemplos recubrimiento de alta resistencia a la abrasión y elevadas temperaturas, pero con un costo muy alto [16].

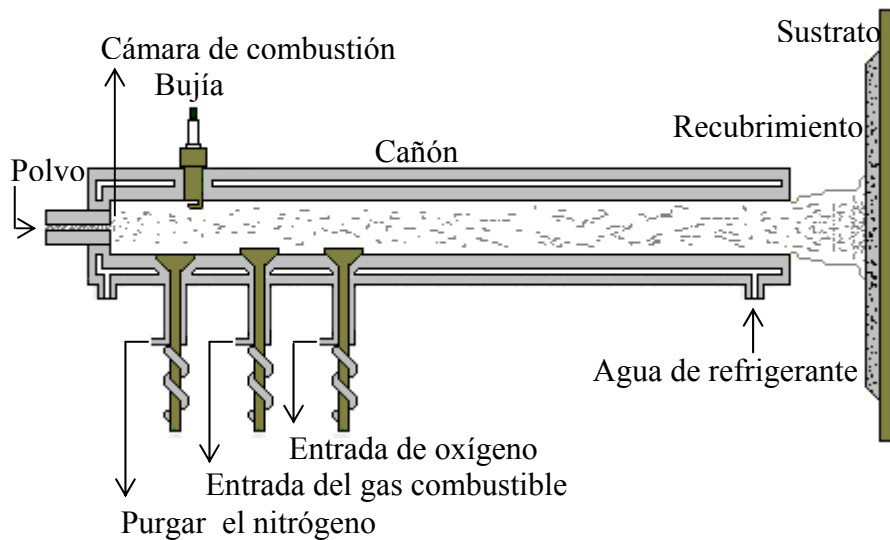


Figura 1.53. Proyección por detonación.

1.3.13.2. Procesos Eléctricos:

Estos procesos utilizan como fuente de energía térmica la alimentación por corriente eléctrica, figura 1.49, [16, 21, 23]. Se realizan diversas variantes.

a.) Proyección por Arco Eléctrico.

En la proyección por arco eléctrico (Electrical Arc Spray o EAS) se usa una corriente eléctrica para generar la energía térmica necesaria entre dos barras o alambres del material de la capa, que actúan como electrodos consumibles, mientras se funden por el arco eléctrico presente entre ellos [16]. Para que esto suceda, las dos barras deben estar cargadas eléctricamente, una negativa y otra positiva y dispuestas de tal forma que el ángulo entre ellas se reduzca gradualmente; se aplica una diferencia de potencial entre 15 – 50 V y el calor que se genera funde las puntas o extremos de las barras y el gas atomizante o propulsor proyecta las gotas fundidas hacia el sustrato o pieza de trabajo preparada, figura 1.54. Este gas atomizante es generalmente aire comprimido, pero también se puede usar un gas inerte como N_2 o Ar [21, 23, 25].

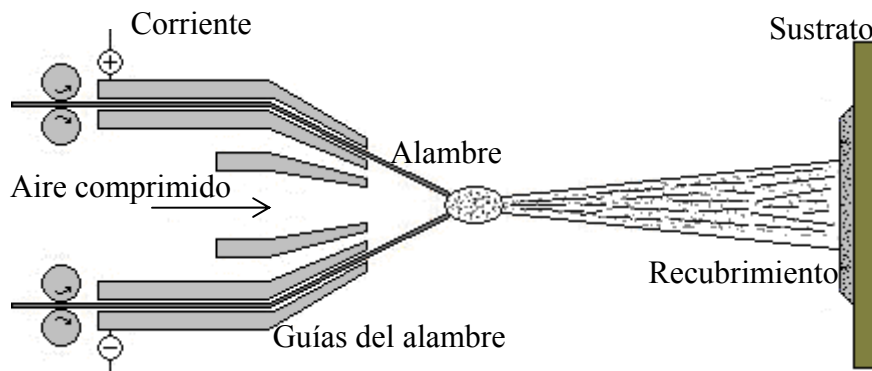


Figura 1.54. Proyección por arco eléctrico

La combinación de elevadas temperaturas de arco (5727 °C) y altas velocidades de las partículas (100 m/s), producen recubrimientos con mayor fuerza de enlace y menor porosidad que la proyección con llama [54]. El

proceso funciona desde una fuente de energía de voltaje constante y se limita a los materiales que se pueden hacer en forma de alambre [16, 21, 23].

b.) Proyección por Plasma.

La proyección por plasma (Plasma Spray o PS) se fundamenta en la producción de un arco eléctrico DC o CC a causa de una descarga de alto voltaje iniciada en un cañón plasma, generando altas temperaturas, que actúa como fuente de calor para disociar e ionizar y de esta manera, formar el plasma que fluye alrededor del cátodo y sale al inyector del ánodo como llama libre o neutral del plasma, el cual no lleva corriente eléctrica, figura 1.55. El arco se forma por el calentamiento de la resistencia entre dos electrodos no consumibles que consisten en un cátodo de tungsteno (W) y un ánodo de cobre ambos refrigerados por agua. El cañón es alimentado con un flujo continuo de gas (Ar, H₂, helio He, N₂) en un medio relativamente inerte el cual es ionizado por el arco DC y es comprimido y acelerado por el cañón, de tal forma que sufriendo una expansión volumétrica sale como un flujo gaseoso o chorro de plasma, a través de una tobera a altas velocidades y temperaturas > 9727 °C. Luego el material de capa es introducido en forma de polvo o de alambre en el chorro de plasma donde es fundido y acelerado hacia el sustrato, según un proceso de rápida solidificación las partículas que impactan a altas velocidades absolutas (200 – 500 m/s), van formando un recubrimiento con excelentes características de adherencia, cohesión, densidad interna y espesores a partir de 0,3 – 6 mm, dependiendo de los materiales de la capa o recubrimiento y del sustrato [16, 21, 23, 25, 27, 39, 48, 54, 60, 112, 114].

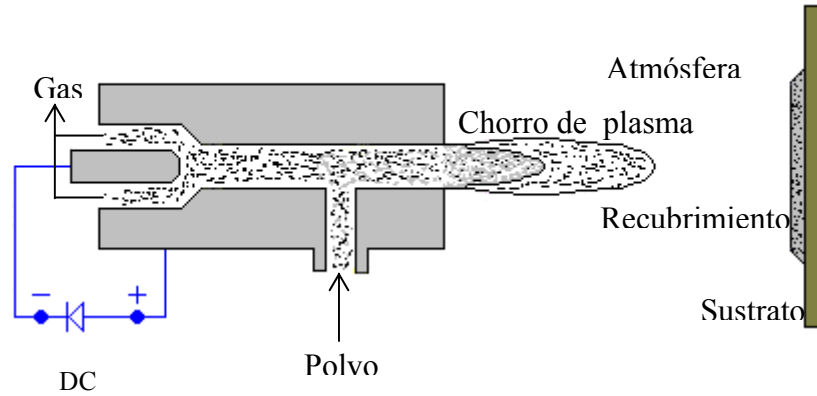


Figura 1.55. Proyección por Plasma.

1.4. Aplicaciones a Matrices.

La necesidades de la investigación del presente trabajo trata de la recuperación de las matrices de embutición desgastadas, y/o fisuradas en casos extremos. Esto ocurre debido al considerable esfuerzo por rozamiento en su funcionamiento de servicio durante su carrera de producción, provocándose la acción de desgaste en la zona de deslizamiento de la chapa con la matriz.

Teniendo presente que una matriz de embutición es una herramienta de trabajo en frío y caliente sometida principalmente en su borde a esfuerzo y movimiento durante su funcionamiento, los cuales causan desgastes y posiblemente fisuras, como consecuencia la matriz se necesitaría recuperarla y/o repararla o en caso extremo de rotura se reemplaza por una nueva.

En los procesos de conformación plástica intervienen las matrices y punzones que según el esfuerzo aplicado y el movimiento del material que se procesa, se divide en: a.) Desplazamiento por compresión: forjas libre y con estampa (cerrada y semi-cerrada), extrusión, laminación (superficies lisas, perfiles, tubos, repujado, estirado por presión y alisado), adelgazamiento rotativo, b.) Estirado por tracción: embutición, trefilado y troquelado, c.) Doblado por flexión: según el eje rectilíneo y curva y d.) Torsionado: alabeado [207, 208].

Como se ha expuesto en el punto 1.4 la matriz de embutición pertenece a los procesos de estirado y tracción, este proceso de embutición consiste en transformar una chapa plana de formas variadas en cuerpo hueco o recipiente, en una o varias operaciones [207, 209]. La operación de acción mecánica se realiza por medio de una estampa de embutición que está compuesta de tres partes principales: a.) Matriz, que forma el orificio o hueco a la que ha de adaptarse la chapa [14]. Con el objeto de disminuir: 1.) El rozamiento entre la chapa y la matriz, se utilizan lubricantes, como aceites minerales y grasas con adición de talco, grafito, etc.; 2.) Las tensiones y la acritud superficial que se producen cuando ocurren los cambios de formas del material de la pieza embutida, la matriz debe ser redondeada, sin aumento excesivo que ocasione arrugas al material en la operación [207]. b.) Punzón o macho que empuja al material de la chapa adaptándolo al hueco de la matriz a espesor constante [209], para evitar el corte el punzón debe ser redondeado [172]. c.) Pisador que presiona la chapa encima de la matriz, para evitar que se formen arrugas o pliegues indeseables, pero sin sujetarla, para que pueda deslizarse o conducirla en su deformación a medida que es empujada por el punzón [208, 210, 211].

La embutición tiene tres formas de operar: a.) Sin modificación sensible del espesor en el material de partida (embutición profunda). b.) Estirado de una pieza previamente embutida con el objeto de disminuir el espesor de sus paredes. c.) Estirado en prensas especiales sometiendo el material a esfuerzos de dilatación mecánicos [207, 211]. Las piezas embutidas al distenderse por elasticidad, tienden a apretarse a la matriz de la que se expulsa por medio de extractores accionados por muelles, sacos de caucho o taco; al retirarse el punzón, una vez terminada la estampación, recobran su forma primitiva expulsando la pieza [210]. También para evitar rozamiento, hace falta darle un juego al conjunto matriz – chapa – punzón, de 10 – 30% del espesor de la chapa [208, 209].

Además, se emplea lubricación para facilitar la extracción de la pieza embutida de lubricantes (aceite de colza, grafito, aceite mineral, sebo, vaselina, etc.) con aditivos (creta, grafito, talco, etc.) para disminuir el rozamiento entre el material y las zonas colindantes de la prensa [211]. Se eligen lubricantes que reúnan características de: a.) Proporcionar una película homogénea que soporte grandes presiones sin secarse. b.) Buena adherencia a la matriz y ser capaz de repartirse uniformemente sobre su superficie. c.) Facilidad para eliminar de la pieza embutida. d.) No debe reaccionar ni mecánica ni químicamente con las superficies que recubre. e.) Ser estable químicamente y no nocivo para la salud [207, 210].

En la embutición de piezas se debe considerar que los materiales adquieren acritud. En este sentido, se distinguen los que adquieren: a.) Solamente una acritud media (chapa de acero, latón y aluminio recocido). b.) Gran acritud (acero inoxidable (SS) y refractario, cobre (Cu) y titanio

(Ti). Los materiales que tienen acritud débil se usan en automoción. Las piezas sometidas a re-embutido o embutido por etapas se alternan con recocidos para eliminar del material la acritud y evitar que suceda el agriado, a menos que la acritud originada no empeore la calidad de la pieza, en cuyo caso no se emplea el recocido.

La producción de piezas profundas usando el proceso de embutido no es posible en una sola operación, debido al peligro de adquirir excesiva acritud, desgarre o roturas del material entre la pared lateral y el fondo, ocasionadas por el gran esfuerzo de compresión radial de la chapa que fluye debajo del pisador hacia el hueco de la matriz [176, 207, 208, 209, 210]. El pisador debe ejercer una presión exacta que permita el deslizamiento del material de la chapa, consiguiéndose espesor constante y paredes lisas. Los fallos ocurren en el material de la chapa durante el desplazamiento de introducción en el hueco de la matriz debido a la presión ejercida por el pisador sobre la chapa: a.) Presión insuficiente producen pliegues y arrugas en el material. b.) Presión excesiva provoca alargamiento o la rotura del material por los grandes esfuerzos de tracción [189, 211].

En la embutición es preciso que se dé una serie de consideraciones que faciliten el proceso, ya que se trata de una operación de deformación relativamente compleja [14]. No hay que olvidar que parte del material de partida ha de ser sometido a importantes esfuerzos para conseguir su deformación permanente. Para ello deberá cumplirse lo siguiente: a.) Buen acabado superficial del punzón y la matriz, en especial, las superficies donde cambia de forma el material. b.) Redondeo en el borde de la matriz y,

en menor medida, en el radio del punzón [207]. c.) Lubricación que facilite el proceso [210, 211].

En las aplicaciones a matrices para lograr un determinado grado de eficiencia se necesitan ciertas características como: a.) Limite elástico para poder soportar los esfuerzos en la fase de transición de arranque y distensión. b.) Resistencia del núcleo para evitar las fracturas durante el proceso. c.) Dureza superficial sobre todo el borde para reducir su desgaste y d.) menor coeficiente de rozamiento, por adquirir un elevado pulido, para incrementar la velocidad del proceso sin que se caliente el borde de la matriz [173, 174, 204, 211].

1.4.1. Recubrimientos a Matrices.

Los recubrimientos aplicados sobre los materiales de matrices, debe: a.) Proteger la superficie contra el medio donde puede ocurrir la corrosión u otras reacciones de desgastes. b.) Mejorar el aspecto de la superficie contra el desgaste y abrasión [20, 36, 57]. Deben aportar características que determinan el grado de eficiencia y alargan la vida útil, reduciendo el desgaste abrasivo [3], minimizando la adherencia del material de la chapa embutida [1] y mejorando algunas propiedades que incrementan la resistencia [173, 174, 204].

En la búsqueda de obtener la calidad y la eficiencia en la matriz de embutición para condiciones óptima de servicio se aplican sobre su superficie en el sector industrial las siguientes tecnologías: a.) Procesos

especiales de tratamiento térmico. b.) Tratamientos superficiales. c.) Deposiciones superficiales. d.) Técnicas de recuperación por desgaste y fisuras.

1.4.1.1. Procesos Especiales de Tratamiento Térmico.

La industria emplea grandes hornos provistos de controles automáticos de temperatura y de tiempo. Las matrices, han de tratarse térmicamente llegando hasta el horno a través de unas cestas ó útiles, permaneciendo en su interior a temperaturas convenientes, durante el período de tiempo adecuado y, luego se trasladan a los baños de enfriamiento o son enfriados bajo presión de nitrógeno (N_2) dentro del mismo horno, para los procesos de endurecimiento martensítico [53]. El tiempo y la temperatura hay que fijarlos de acuerdo con la composición del acero, la forma y el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener en tratamiento térmico, donde ocurre modificación de la estructura microscópica de los aceros, transformaciones físicas y, a veces, cambios en la composición de la aleación [182]. En los aceros herramientas para matrices el tratamiento térmico se combina con la composición para lograr la microestructura conveniente como las estructuras, Apéndice, Tabla A.3: a.) Martensíticas con carburos dispersos. b.) Austenítacas originada por disolución incompleta de carburos en austenita [219, 213].

1.4.1.2. Tratamientos Superficiales.

Los tratamientos superficiales de endurecimientos tienen limitaciones sobre los resultados de las superficies de la matriz de

embutición como son: a.) Estructuras de capas irregulares y difícilmente repetitivas. b.) Deformaciones dimensionales. c.) Deterioro en los acabados con pulidos brillantes. d.) Procesos de endurecimientos extremadamente largos [174, 175, 204]. Entre los tratamientos más aplicados a las matrices están los termoquímicos, punto 1.37, donde se distinguen la nitruración y la carbonitruración que modifican por procesos de difusión la composición química de la superficie del material de la matriz de embutición incorporando un elemento químico, con el objeto de obtener dureza y resistencia al desgaste. Los parámetros de estos procesos son la atmósfera usada y el control de la misma, la temperatura y el tiempo [13, 92, 172, 198, 201, 203].

a.) Nitruración.

Los tratamientos por nitruración, punto 1.37 b, son aplicados previamente templada y revenida la matriz de embutición, éste tiene lugar por difusión del nitrógeno en solución sólida intersticial del acero aleado con contenidos de Cr, Al, Mo, V y Ti [172, 189], que va a difundir nitruros finalmente dispersos. Conduce a un endurecimiento por reforzamiento estructural en profundidad, con capas muy finas de compuestos, y una zona de difusión menos concentrada en nitruros, ocasionando conversión química y a priori la modificación de las propiedades causadas por la formación de nitruros de hierro y otros elementos, que afectan la estructura y la composición del acero, incrementando la dureza, y la resistencia: al desgaste, a la corrosión, a la fatiga y al ablandamiento por revenido [13, 51, 92, 94, 173, 175, 180, 182, 198, 201, 212]. Después del tratamiento por

nitruación no existe peligro de aparición de deformaciones, grietas y otros [174, 204].

b.) Carbonitruración.

Los tratamientos por carbonitruración o cianurización, punto 1.37 c, se producen al calentarse el acero en un baño de cianuro o carbonitruro, una capa difundida con carbono y nitrógeno, que templada y revenida aumenta la dureza y la resistencia al desgaste [13, 176, 180, 182, 201] y si se adquiere mayor templabilidad no se pierde dureza y hay menos necesidad de velocidad de temple [176, 189].

1.4.1.3. Deposiciones Superficiales.

La deposición superficial más usada para recuperar la matriz de embutición es la deposición física en fase vapor o PVD, punto 1.3.10, la cual está constituida por distintos métodos, donde se parte de un material sólido puro o aleado, que se convierte por medios físicos en vapor mediante evaporación o bombardeo con iones energéticos, dentro de la cámara de un reactor con un grado de vacío. Luego este vapor del material en contacto con el gas reactivo forma el compuesto, que se proyecta sobre la superficie de la pieza sustrato precalentada a temperatura ≈ 500 °C para conseguir la atmósfera reactiva y el grado de adherencia, condensándose en forma de capa delgada, por acción de la diferencia de potencial entre la pieza y la cámara. Las piezas recubiertas por estos métodos PVD de baja temperatura,

no necesitan tratamientos térmicos o rectificadas posteriores, ya que no se producen deformaciones ni alteraciones en la microestructura del material, pueden mantener su dureza original [4, 116], pues se evitan cambios dimensionales en estas piezas y ésta, a su vez, es una limitación de la adherencia al sustrato [11, 14]. Ejemplos de materiales de capas aplicados por la tecnología de deposición física en fase vapor (PVD) se tienen: nitruro de titanio (TiN) [38], carburo de titanio (TiC) , carbonitruro de titanio (TiCN) [8, 13, 29], nitruro de cromo (CrN) [1, 3, 7, 10, 55, 72], etc..

1.4.1.4. Técnicas de Recuperación por Desgaste y Fisuras.

Entre las técnicas de recuperación por desgaste y fisuras más empleada para la matriz de embutición se pueden considerar: a.) Soldadura. b.) Recubrimiento láser. c.) Proyección térmica. Luego de la aplicación de estas técnicas se requiere realizar operaciones de mecanizado para llevar la pieza a sus dimensiones originales de diseño.

1.4.1.4.1. Soldadura.

La tecnología de la soldadura se utiliza en la reparación y recuperación de la matriz de embutición por recargues en las zonas desgastadas, eliminando fisuras puntuales e implementando cambios en el diseño, etc.; entre estos procesos de soldadura están: a.) Soldadura TIG. b.) Soldadura MIG / MAG.

a.) Soldadura TIG.

La soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) consiste en un proceso por arco bajo atmósfera de gas protectora con electrodo refractario no consumible, donde la fuente de energía de corriente alterna CA o corriente continua CC genera el arco eléctrico que salta entre el electrodo de tungsteno (wolframio o volframio W) y el metal base. En nuestro caso la matriz de embutición, el arco se protege circundando gas inerte (argón Ar, helio He, etc. y mezclas), que impide la contaminación del metal fundido o baño de fusión con el oxígeno O₂, hidrógeno H₂ y nitrógeno N₂ atmosférico. Este procedimiento TIG es autógeno básicamente, debido a que el aporte de material o de alimentación se introduce mediante una varilla de aporte, con el inconveniente de ininterrumpir en ese punto la barrera protectora [184, 199, 200, 214, 215].

b.) Soldadura MIG / MAG.

La soldadura MIG (Metal Inert Gas) / MAG (Metal Active Gas) consiste en un proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible, fundamentado en la fusión de los bordes de las piezas (matrices de embutición) a unir y del hilo de alimentación (metal de aportación) a fundir y transferir en estado líquido, debido al calor necesario generado por el arco eléctrico de corriente continua CC que se establece entre el hilo y la pieza y por el impacto de los electrones sobre el terminales positivo, se logran temperatura ≈ 4000 °C. En este proceso se usa electrodo de hilo o alambre continuo y desnudo, y como atmósfera de protección del

baño de fusión gases inertes (argón Ar, helio He, etc. y mezclas) en la soldadura MIG y gases activos dióxido de carbono (anhídrido carbónico CO₂ y mezclas) en la soldadura MAG; se proporciona características mecánicas óptimas y gran penetración, reducción de los defectos, alta velocidad de soldadura [184, 199, 200, 214, 215, 216].

1.4.1.4.2. Recubrimiento Láser.

El recubrimiento láser (Laser Cladding) es un tratamiento de modificación superficial, donde el material sufre una serie de transformaciones desde el calentamiento a la fusión, a causa de la focalización del haz láser necesario en función de una densidad de potencia suficiente y del tiempo de interacción sobre el sustrato; en este caso la superficie dañada de la matriz durante su servicio, pudiéndose conseguir diferentes espesores junto con la difusión en estado líquido del aporte al sustrato y posteriormente enfriándose a altas velocidades. Con el recubrimiento láser se realiza la recuperación o reconstrucción sin un contacto directo y con una mínima distorsión, adquiriéndose protección frente a la corrosión de materiales metálicos al difundirse elementos de aleación en la superficie de la matriz haciéndola más resistente a determinado medio agresivo [13, 217].

1.4.1.4.3. Proyección Térmica.

En los procesos de proyección térmica, punto 1.3.13, los materiales de alimentación metálicos, cerámicos, polímeros y combinaciones de ellos,

se utilizan en formas de polvos, alambres y barras; elegido el material o combinación se alimenta a un equipo que genera el calor necesario por gases combustibles o arco eléctrico, bajo condiciones atmosféricas normales o especiales, calentándose hasta cambiar a plástico o fundido y acelerado con gas comprimido, como partículas individuales en forma de gotas que impactan sobre la superficie fría o precalentada del sustrato [38, 48, 100, 103], aplastándose y formando placas delgadas, que aumentan superponiéndose partículas, adhiriéndose a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas, finalmente se solidifica en una nueva superficie o recubrimiento de estructura laminar, heterogéneo que contiene cierto grado de porosidad y en el caso de proyección metálica óxidos [16, 21, 101, 127], permitiendo conseguir mejoras sustanciales en la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste, incluso a las elevadas temperaturas [18, 20, 21, 85, 102, 104, 112, 114].

Los recubrimientos por proyección por llama “flame spray”, punto 1.3.13.1 a, se especializan en cierta propiedad superficial crítica característica de cada aplicación o tipo de sollicitación en este caso las matrices, con la finalidad de mejorarla. Algunas de las sollicitaciones son la resistencia al desgaste y oxidación, el coeficiente de fricción y la dureza, las cuales se combinan para lograr el recubrimiento idóneo a las condiciones de aplicaciones [2, 173, 213].

1.4.2. Requisitos de estas Aplicaciones

En las matrices es necesario: 1.) Características que determinen un grado de eficiencia [173]. 2.) Reducir al mínimo la adherencia de las

partículas de metal trabajado [218]. 3.) Minimizar las roturas o posiblemente impedir las.

En los procesos de embutición, las matrices fabricadas de aceros para herramientas están sometidas durante las series de operaciones de trabajo en frío y caliente a grandes esfuerzos de compresión, con el objeto de producir deformación permanente del material de la chapa, se necesitan considerar las aplicaciones a matrices descritas en el punto 1.4, los requisitos siguientes: a.) Resistencia mecánica. b.) Resistencia al desgaste. c.) Templabilidad. d.) Mínima variación de medida. e.) Adhesión. f.) Adherencia al sustrato.

1.4.2.1. Resistencia Mecánica.

La resistencia mecánica es la respuesta del sistema que está relacionada directamente con el comportamiento del material sometido a esfuerzos mecánicos hasta deformarlo temporal o permanentemente o fracturarlo. Por lo tanto, un material resiste una determinada intensidad de fuerza o carga hasta romperse [193]. Ante un esfuerzo un material puede tener tres respuestas: deformarse elásticamente, deformarse plásticamente o fracturarse [219]. Las sollicitaciones de las matrices de embutición, para conservar la calidad necesitan tener requisitos tales como: a.) Resistencia a la compresión. b.) Resistencia a la flexión. c.) Resistencia a la cizalladura. d.) Dureza. e.) Tenacidad.

a.) Resistencia a la Compresión.

La resistencia a la compresión se mide por el esfuerzo que resiste el material antes de ceder. Un cuerpo está sometido a compresión cuando sobre él se aplica una fuerza y su reacción, acortándose y ensanchándose, esto es, las caras paralelas al esfuerzo tienden a separarse, mientras que las perpendiculares tienden a unirse o reducir su longitud. En el comportamiento a compresión influye la esbeltez, como por ejemplo sucederá el efecto de pandeo si un elemento es muy largo con respecto a la sección, esbelto. Entonces cuando se intente comprimir, se flexionará o se doblará [220, 206]. La compresión ocurre cuando las fuerzas que soporta la pieza tienden a aplastarla [219, 221].

b.) Resistencia a la Flexión.

La resistencia a la flexión es una combinación de los esfuerzos de tracción y compresión. Un cuerpo apoyado está sometido a esfuerzo de flexión cuando actúa una fuerza normal a su eje longitudinal o un momento, experimentándose tracción y compresión en el eje, que tiende a deformarse elásticamente o plásticamente o romperse por tracción en caso extremo [206, 219, 220].

c.) Resistencia a la Cizalladura.

La resistencia a la cizalladura es una combinación de esfuerzos a tracción y compresión que superan el límite de flexión y compresión del

material produciendo corte en este. Un cuerpo se encuentra sometido a cortadura cuando sobre él actúa una fuerza tangencial y su reacción en plano paralelo muy próximo. Si el valor de la fuerza es suficiente el cuerpo se separará por desgarradura [219].

d.) Dureza.

La dureza se valora por: 1.) La resistencia del material a: a.) La deformación plástica permanente o rotura. b.) Ser rayado o a desgastarse con rapidez por abrasión. c.) La penetración por otro [13, 182, 193, 195, 199, 200, 202, 206, 219, 222, 223, 224]. 2.) La altura de rebote de un cuerpo al caer sobre la superficie del material ensayado [194, 198].

e.) Tenacidad.

La tenacidad es la capacidad de resistencia de un material: a.) Para absorber energía durante la deformación plástica, para soportar esfuerzos ocasionales a alta velocidad, sin que se produzca la fractura [198, 199, 200, 219]. b.) Que contiene uno o más defectos (fisuras, grietas, etc.) para soportar una determinada carga aplicada. Si el material es frágil en la región elástica, intensidades de fuerzas o impacto sin que el defecto se propague hasta la rotura [193, 195, 202, 213]. Cuando más amplia es la zona plástica de un material mayor es su tenacidad [4]. La herramienta en la mayoría de los casos está sometida a impactos mecánicos o sollicitaciones repetidas, por lo cual debe tener cierta tenacidad, para evitar roturas prematuras y frágiles

[222]. La tenacidad es una propiedad que depende de varios factores: a.) Relacionada inversamente con la dureza y con la penetración de temple. b.) Influenciada por la elaboración del acero, en cuanto su estado de limpieza de inclusiones no metálicas, su tamaño de granos, la dosificación correcta de ciertos elementos que mejoran la tenacidad de la matriz como el Ni y el Mn y elementos de aleación como V, Ti y Nb que tienen un efecto favorable sobre la tenacidad por el refinamiento de granos [13, 92, 94, 172, 173, 174, 182, 189, 192, 204, 212, 213].

1.4.2.2. Resistencia al Desgaste.

Durante las operaciones de uso, la parte activa de la herramienta está en contacto con el material trabajado y existe una fricción entre las dos partes, que es elevada en el caso de las matrices al deformar metales en frío. Por tal razón, la resistencia al desgaste es una propiedad del sistema o respuesta predominante [201, 222], que depende de la microestructura y dureza de la parte sometida al desgaste [212]. Incorporando carburos no disueltos y bien distribuidos en una matriz, debido a su tratamiento térmico de temple y revenido, es bien dura. Puede aumentarse considerablemente su resistencia con carburos de elementos de aleación como V, W, Mo y Cr, los cuales son más duros que el simple carburo de hierro [94, 173, 174, 180, 182, 189, 192, 204]. Además de la cantidad y naturaleza de estos carburos de aleación tiene importancia la morfología, el tamaño de los mismos y su distribución en la matriz. Para mejorar aún más la resistencia al desgaste en ciertos casos, se pueden aplicar tratamientos superficiales entre los cuales se

destacan la nitruración o carbonitruración a la superficie de la herramienta, descrito en el punto 1.3.7, apartados b y c [13, 92, 172, 201, 212, 213].

1.4.2.3. Templabilidad.

La templabilidad es la capacidad o tendencia del material acero para endurecerse mediante el tratamiento térmico. Es la medida de la profundidad y distribución de la dureza en el interior de la pieza, que se puede obtener calentando y templando subsecuentemente. La templabilidad base de cada acero depende de su composición química: contenido en C, elementos de aleación (la aumentan el: Mn, Cr, Ni y Mo); tamaño del grano; la masa y la velocidad de enfriamiento [189, 191]. Otros factores metalúrgicos relacionados con el proceso de elaboración del acero, en particular su desoxidación, también tienen influencia sobre la templabilidad. A mayor penetración o profundidad de temple, mayor es la resistencia mecánica de las piezas de espesores de consideración y además es más profunda la resistencia al desgaste. En piezas grandes en general es importante que el efecto del temple llegue solo superficialmente manteniendo el núcleo sin temple, tenaz [182, 213].

1.4.2.4. Mínima Variación de Medida.

Hay que considerar una mínima variación de medida cuando se haga la recuperación o reparación de la matriz de embutición con los procesos expuestos en el punto 1.4.1.

1.4.2.5 Adhesión.

La adhesión entre dos o más superficies limpias, secas y lisas o de mínima rugosidad, que toca sólo una pequeña fracción (área real) de su área aparente o geométrica de contacto, punto 1.1.1 b, [57, 170, 178] y desliza con movimiento relativo depende de los fenómenos que causan el rozamiento o fricción [177, 189, 192]. Entre éstos se tienen: a.) Mecanismo interferencial. b.) Mecanismo Cohesivo (Micro-soldadura).

a.) Mecanismo Interferencial.

El mecanismo interferencial de Coulomb actúa directamente sobre las rugosidades superficiales en contacto en el área real [57, 170, 178], forzadas por el campo de deformaciones, que se oponen a su desplazamiento o movimiento relativo [177, 192].

b.) Mecanismo Cohesivo.

El mecanismo cohesivo (microsoldadura), de Tomlinson y Bowden, ocurre entre superficies que se oponen al movimiento y están sometidas a altas presiones, que causan deformación plástica e incremento de temperatura en el área real de contacto causando la microsoldadura y acelerando los procesos de desgaste. Este mecanismo se da entre metales de estructuras con cierta filiación cristalina cuyas superficies no están separadas por una película de lubricante de suficiente espesor [57, 170]. El

rozamiento es función inversa con la rugosidad y directa con la limpieza de las superficies. Para evitar la microsoldadura, es necesario un bajo coeficiente de fricción y una baja afinidad entre los materiales en contacto [37]. Las capas de sustancias orgánicas e inorgánicas son absorbidas por las superficies y evitan la realización de las microsoldaduras de contacto [177]. La soldadura en frío por presión se basa en este mecanismo [189]. En el desgaste adhesivo, un caso es la soldadura en frío que sucede entre la pieza a conformar de material más duro en contacto con la herramienta, que al separarse parte de ésta se desprende [29, 59, 116, 178, 192].

1.4.2.6. Adherencia al Sustrato

La adherencia es la capacidad del recubrimiento para mantenerse unido al sustrato, bien sea a través de fuerzas de enlace o bien mediante cualquier otro tipo de fuerzas de interconexión. La naturaleza de estas fuerzas puede ser de tipo Van der Waals electrostático, químico, anclaje mecánico, etc., actuando en la interfase recubrimiento y sustrato.

La no adherencia ocurre cuando el material del sustrato no tiene suficiente rugosidad y la fuerza de atracción atómica en el proceso no actúa, produciéndose una forma autosostenida de la proyección de la capa que se puede remover o despegar del material que le conforma tras la deposición [84]. Entre los factores de mayor influencia en la adherencia de una capa depositada sobre el sustrato están: a.) Tipo de enlace de los átomos en la interfase. b.) Estado del material de la interfase. c.) Rugosidad superficial y

depósito de capas de anclaje. d.) Método de preparación del recubrimiento [13, 205].

a.) Tipo de Enlace de los Átomos en la Interfase.

Debido a la atracción molecular entre los átomos del sustrato y la capa depositada se dan los diferentes tipos de enlaces de los átomos en la interfase del recubrimiento y sustrato, donde el más común es el enlace Van der Walls [13].

b.) Estado del Material de la Interfase.

La adherencia de la capa está influenciada por óxidos o compuestos intermedios, de manera positiva facilitando la reacción entre los átomos y negativa cuando la capa intermedia es poco adherente, como capas contaminantes de hidrocarburos en la superficie del sustrato [13].

c.) Rugosidad Superficial y Depósito de Capas de Anclaje.

El aumento de la rugosidad de la superficie del sustrato permite incrementar el área de contacto y con ello la adherencia [85, 114, 116, 205]. Frecuentemente se usa la técnica de grabado de la superficie, mediante procedimientos de tipo mecánico, químico o de bombardeo con iones. Como tratamiento previo a la deposición con el objeto de mejorar la

adherencia, punto 1.31. En otros casos, se utilizan capas intermedias para reducir la energía interfacial y con ello mejorar la adhesión de capas de naturaleza más inerte. En este sentido, las técnicas de bombardeo iónico durante la deposición permiten llevar a cabo un mezclado de los átomos que alcanzan la superficie con los del sustrato formándose así una interfase con un espesor amplio que favorece la adhesión [13].

d.) Método de Preparación del Recubrimiento.

Las técnicas que favorezcan la difusión de los átomos que llegan a la superficie, por ejemplo, mediante el bombardeo iónico y / o temperatura altas en el sustrato, permiten mejorar la adherencia [13].

1.5. Enfoque de los Objetivos de la Investigación

En esta investigación se aplica la proyección térmica por llama con uso de polvo, debido a que se considera importante encontrar alternativas en el campo de la recuperación de las matrices de embutición que se complementen con las tecnologías expuestas en el punto 1.3 y punto 1.4.1, garantizándose la función para las que fueron destinadas, antes de ser consumidas durante las operaciones severas de trabajo contra el deslizamiento interno, rozamiento, deformación e impacto principalmente en sus bordes o aristas. Igualmente, se consideran los requisitos expuestos en el punto 1.4.2, donde se formulan las variables siguientes de la: a.)

Adherencia. b.) Proyección por llama. c.) Resistencia mecánica. d.) Resistencia al desgaste; para su respectivo análisis.

1.5.1. Variables de la Adherencia

Las variables de la adherencia, punto 1.4.2.6, están ligadas a las interrelaciones físicas y metalúrgicas que dependen de, punto : a.) Clase de materiales. b.) Preparación superficial del sustrato. c.) Temperatura superficial del sustrato.

1.5.1.1. Clase de Materiales

Las clases de materiales a usar son: a.) Sustrato. b.) Material de aporte.

1.5.1.1.1. Sustrato.

En la selección del sustrato se tendrán en cuenta la composición química [116, 127, 128, 129] y los requisitos de aplicaciones a matrices de embutición, expuesto en el puntos 1.4.2, los que cumplen éstos son los aceros aleados de herramientas para trabajo en frío, cuya división comprende a los aceros estándar y de composición especial, algunos descritos en el Apéndice, Tabla A.3. especificándose su composición química, según la norma UNE-EN 4957 [225, 222, 226, 227]. Además,

cuando se requiere aumentar la adherencia en el sustrato se modifica con predepósitos de capas de anclajes.

1.5.1.1.1. Predepósitos de Capas de Anclajes.

A causa de la no afinidad del recubrimiento que se necesita proyectar sobre el sustrato de naturaleza inerte con éste, se aplican los predepósitos de capas de anclajes sobre el sustrato según la norma UNE-EN 13507 [13], aprovechándose la afinidad entre los materiales y su composición química [116, 127, 128], con tendencia a la solubilidad metalúrgica con el objeto de modificar el sustrato, mejorándose su adherencia con el recubrimiento deseado e incluso haciéndola posible, mediante la proyección de materiales de anclaje como materiales que contengan aluminio (Al), materiales a base de níquel (Ni), molibdeno (Mo) y otros metales [205].

1.5.1.1.2. Material de Aporte.

El material de aporte o polvo micropulverizado a proyectar se seleccionó teniendo presente la norma UNE-EN 1274 [228], los distintos materiales que se han estudiado y los que se consiguen en la industria de proyección térmica específicamente usados para el proceso flame spray o FS. A continuación materiales de: a.) Industria de la proyección térmica. b.) Referencias de investigaciones.

a.) Materiales de la Industria de la Proyección Térmica.

Algunos materiales de la industria de la proyección térmica son: a.) Aleaciones base: Ni, Fe, Cu, Sn, Mo, Ni+CW, Cu/Ni, Co/Ni/Cr/W, Ni/Cr, Ni/Cr+Diamax, Co/Ni/Cr+Diamax, Ni + CW, NiBSi, NiCrBSi, CoNiCrBSi + Diamax y NiCrMoBSi [228, 229, 230, 231]. b.) Óxidos de: Cr y Al. c.) Compuestos de óxidos de: Al y Ti, Zr y de Ca [229, 228].

b.) Materiales de Referencias de Investigaciones.

Los materiales de referencias de investigaciones de flame spray se señalan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Materiales de Referencias de Investigaciones.

Polvo Micropulverizado	Referencia
Poliamida (PA)	107, 109
Alúmina (Al ₂ O ₃)	107, 228
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄) y Nitruro de boro (BN)	109
CW-Ni	110, 228, 259
Hidroxiapatita (HA) y Etileno-ácido metacrílico (EMMA)	206
NiCrBSiFe	20, 128, 228
Polietileno tereftalato (PET)	126
NiCrBSiC, WC-Co y WC-NiCrBSiC	127, 228
Carburo de wolframio (WC)	110, 127, 141, 228, 259
NiCr80/20 y Molibdeno (Mo)	125, 228
NiCrBSi	125, 141, 143, 228
NiCrAlY	125, 142, 228
WC-NiCrBSi	141, 228
Cr-Ni-Mo	259

1.5.1.2. Preparación Superficial del Sustrato.

La preparación superficial del sustrato se realiza con el objeto de optimizar la adherencia de la capa del material de aporte con el sustrato, puede estar limitada en su duración por corrosión; en el proceso de proyección térmica por llama se comienza siempre con esta preparación según la norma UNE-EN 13507, la cual se puede ejecutar de manera mecánica, química o ambas, punto 1.3.1, [80, 81, 82, 85, 98, 100, 114, 198]. También se debe tener presente el enmascarado de la superficie antes de proyectar cualquier material de aporte al sustrato [16, 171, 205].

1.5.1.2.1. Estado de la Superficie del Sustrato.

El estado de la superficie del sustrato influye sobre la adherencia, que pudiera haber entre capa proyectada y sustrato, por lo cual, es necesario y se deben realizar las preparaciones superficiales, punto 1.3.1: a.) Mecánica, punto 1.3.1.1: usando los procesos de mecanizados y la técnica de chorreado con cualquier mineral debe quedar sin irregularidades y defectos superficiales, posteriormente de estas operaciones se realiza un lavado de la misma [114]. b.) Química, punto 1.3.1.2 a y b: se realiza a través del decapado y/o desengrase quedando las superficies libre de residuos y alteraciones, productos de la mecanización o manipulación de ésta [13, 16, 51, 80, 81, 98, 205].

1.5.1.2.2. Rugosidad.

Las rugosidades se harán en la superficie del sustrato por medio de operaciones de mecanizado, punto 1.3.1 y apartado 1.3.1.1, mejorándose la

adherencia como resultado de incrementar la superficie de contacto, según la norma UNE-EN 13507 [13, 85, 114, 116, 205], en éstas se considerarán los parámetros siguientes: a.) Paso. b.) Ángulo de filete. c.) Profundidad.

a.) Paso

El paso es la distancia medida en forma paralela al eje de la rosca entre cualquier punto de la rosca y el punto correspondiente de la siguiente vuelta adyacente [204].

b.) Ángulo de Filete.

El ángulo de filete es la abertura medida entre las superficies de los flancos.

c.) Profundidad de la Rosca.

La profundidad de la rosca o altura del filete es la distancia medida en forma normal al eje la rosca desde la cresta hasta el valle. Esta debe ajustarse en función del espesor final del recubrimiento [204, 205].

1.5.1.3. Temperatura Superficial del Sustrato.

La temperatura superficial es la que tiene la superficie de la pieza (sustrato) normal o inducida por tratamiento de precalentamiento antes de

ser realizado el proceso de proyección (pre-proyección) térmica por llama, teniendo como fin mejorar la adherencia de la capa de recubrimiento con el sustrato, según la norma UNE-EN 13507 el precalentamiento de una pieza puede ser recomendable por diversas razones: 1.) Previene la humedad debido a condensaciones, a una temperatura $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ se evita la condensación de la húmeda atmosférica y en la proyección por llama usando polvo se recomienda una temperatura de precalentamiento de $70 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para evitar la condensación de los productos de combustión. 2.) Reducir las tensiones y el peligro de formación de grietas en el recubrimiento debido a contracciones. 3.) Incrementa la adherencia de los recubrimientos proyectados, en algunos casos particulares, especialmente para predepósitos de capas de anclaje [205]. Además puede ser de importancia en las proyecciones de: a.) cerámica sobre metales, a causa de la producción de tensiones residuales, debe permanecer entre $100 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y b.) metales o aleaciones la temperatura podría estar mientras ocurre el proceso de fundición del material de capa fundente a $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16].

1.5.2. Variables de la Proyección por Llama.

Las variables que se emplean para la proyección térmica por llama usando polvo. En este caso, para realizar la recuperación de la matriz de embutición y que permitan controlar el proceso tienen como objetivos: 1.) obtener el recubrimiento deseado en cuanto a la microestructura, funcionamiento y duración. 2.) Evitar riesgos de trabajo [16, 128, 129], serán: a.) Distancia de proyección. b.) Ángulo de proyección. c.) Potencia del dardo. d.) Naturaleza de la llama. e.) El tratamiento de post-proyección.

a.) Distancia de Proyección.

La distancia de proyección: es la longitud medida en la línea del eje axial de la pistola desde el extremo o salida de su boquilla hasta su intersección con la superficie del sustrato o pieza de trabajo. Especificada en la norma UNE-EN 657, está entre 120 – 250 mm [16, 184, 232].

b.) Ángulo de Proyección.

El ángulo de proyección: es la abertura medida entre la línea del eje axial de la boquilla o centro del chorro de pulverización con la línea tangencial a la superficie del sustrato o pieza de trabajo, especificado en la norma UNE-EN 65 [232]. Este es 90° por lo general, aunque puede variar según la forma geométrica y / o la orientación del sustrato [16].

c.) Potencia del Dardo.

La potencia del dardo o cono en una pistola (antorcha o soplete) depende de la mezcla y proporción de los gases comburente y combustible que se usan para producir la llama. En este caso, la potencia viene dada por la relación de los gases: oxígeno (O_2) y acetileno (C_2H_2).

d.) Naturaleza de la Llama.

La llama es la fuente de calor generada en el aire (ambiente) en los procesos de combustión [20, 112], en el caso de la proyección térmica por

llama la pistola, según su tipo regula la presión y el caudal de una mezcla de gas comburente (oxígeno O_2) con gases combustibles (acetileno C_2H_2 , hidrógeno H_2 y propano C_3H_8) [21, 25, 36, 123, 127], que puede estar en relación O_2 /Gas combustible entre 1:1 – 1,1:1, resultando la llama carburante o bien oxidante respectivamente y la temperatura de la llama en el orden de 2727 – 3077 °C y su velocidad de 80 – 100 m/s.

En la llama oxiacetilénica que se da entre los gases O_2 y C_2H_2 se logra un grado de control y altas temperatura que puede ajustarse en: oxidante cuando hay exceso de O_2 , neutra si la relación O_2/C_2H_2 es 1:1 y carburante o reductora cuando existe exceso de C_2H_2 [16, 60, 184, 199, 200]. El tipo de llama recomendada viene indicada con el material de aporte o polvo micropulverizado [230].

e.) El Tratamiento de Post-Proyección.

El tratamiento de post-proyección se hace con el fin de mejorar la adherencia: a.) puede incluirse la fusión de la capa usando una relación de composición de contenido de polvos con fundentes de aleaciones de Ni-Cr y agentes de Si o B [16, 228] y b) al aumentarse la temperatura superficial entre la capa proyectada y el sustrato para que ocurra el proceso de difusión, puede ser utilizado un horno para calentar las piezas proyectadas [203].

1.5.3. Variables de la Resistencia Mecánica.

Las variables necesarias de la resistencia mecánica, como la respuesta del sistema, condicionada en forma directa con la conducta del

material sometido a esfuerzos mecánicos hasta la deformación elástica o plástica o rotura, de acuerdo a lo descrito en el punto 1.4.2.1 [193, 219], deben tenerse en cuenta en el proceso de embutición específicamente para la matriz las sollicitaciones de: a.) Resistencia a la compresión. b.) Resistencia a la flexión. c.) Resistencia a la cizalladura. d.) Dureza. e.) Tenacidad.

1.5.4. Variables de la Resistencia al Desgaste.

La resistencia al desgaste está directamente relacionada con la fricción o rozamiento de las partes que permanecen en contacto durante su servicio, en el caso de la matriz de embutición es muy elevado [170, 213, 222], por esta razón se requieren considerar las siguientes variables: a.) Coeficiente de fricción. b.) Desgaste abrasivo.

a.) Coeficiente de Fricción.

El coeficiente de fricción o rozamiento es la fuerza de unión adhesiva entre las partículas de la superficie del material y las partículas duras; el proceso de micro-corte ocurre con mayor facilidad para valores altos del coeficiente de fricción [57, 170, 192].

b.) Desgaste Abrasivo.

El desgaste abrasivo, punto 1.1.1 a, sucede en las superficies de materiales en contacto debido a: a.) Las rugosidades o bordes de una

superficie dura que se incrustan en una superficie blanda causando una serie de cavidades y desplazando del material de estas cavidades [178, 205]. b.) El rozamiento o deslizamiento constante en presencia de material extraño [37, 57, 59, 66, 192, 201]. c.) La deformación plástica en frío causa endurecimiento que se repiten cíclicamente resultando en el agrietamiento por fragilidad [29, 170].

1.6. Proyección Térmica por Llama (Flame Spray)

La proyección por llama (flame spray), punto 1.3.13.1 a y punto 1.4.1.4.3, consiste en la deposición de un material metálico, cerámico, polimérico o combinaciones, dotado de energía térmica y cinética suficiente y que tomando la forma de partículas o gotas fundidas, semi-fundidas o sólidas se proyectan y se aceleran mediante presión gaseosa e impactan depositándose sobre la superficie de cualquier material o sustrato a recubrir, no afectándose su masa y llegando a estado final dividido; la microestructura y las propiedades superficiales de la capa dependen de la solidificación y la sinterización de las partículas [15, 16, 18, 20, 21, 45, 51, 85, 100, 101, 103, 104, 114, 123].

La tecnología de proyección por llama tiene su origen en los primeros años de 1900 y, se acepta generalmente como fecha de nacimiento la de la invención de un proceso de metalización por Dr. Max Ulrick Schoop, de Zurich, tuvo la idea de que un chorro de partículas en estado líquido proyectadas sobre un material, podría crear una capa [52, 114].

Inicialmente, el proceso se utilizó para la deposición de capas de zinc (Zn) resistentes a la corrosión y posteriormente con metales duros [16, 22].

La proyección por llama usando polvo es el más viejo de los procesos de proyección térmica [54], sin embargo, es un proceso todavía hoy extensamente empleado, debido a la cantidad disponibles de materiales de capas y aleaciones [27, 40]. En este proceso de combustión flame spray (FS) no existen limitaciones relativas al tamaño de la pieza. En cuanto a la forma geométrica de la pieza, los componentes cilíndricos, tales como ejes y rodillos de prensado, se recubren por proyección haciéndolos girar alrededor y desplazando la pistola longitudinal y simultáneamente. Muchas superficies se recubren manualmente, no obstante, presentan dificultades las ranuras estrechas, los taladrados largos o agujeros de pequeño diámetro [36, 51]. Solamente esta restringida a los materiales con temperaturas de fusión más altas que la proporcionada por la llama o si se descompone en el calentamiento el material [16, 25].

La tecnología de proyección térmica abarca un campo de aplicaciones complejas y proporciona una solución eficaz de protección a diversos problemas de corrosión a largo plazo en una gran variedad de medios, entre las ventajas se incluyen una gama amplia de materiales para producir con rapidez capas, facilidades de transportes, buenos sellados, resistencias a la abrasión y corrosión [18, 20, 21, 32, 85, 104]. El recubrimiento proyectado es el producto de una o varias capas de partículas individuales o gotas que al chocar contra la superficie preparada o sustrato se adhieren por unión mecánica o metalúrgica, a sus irregularidades superficiales y entre ellas mismas, las capas tienen estructura laminar de

grano, resultado de la solidificación rápida de glóbulos pequeños, aplanada debido al impacto a alta velocidad sobre la superficie fría [17, 24, 54, 102, 103, 205]; la calidad del recubrimiento se encuentra afectado por la preparación superficial y los parámetros del proceso de proyección [16, 100, 114].

1.6.1 Parámetros del Proceso.

Los parámetros o variables de proyección térmica por llama usando polvo permiten su control y deben tenerse en cuenta en cualquier aplicación, para que no ocurra riesgo y el trabajo realizado sea logrado, éstos probablemente pueden afectar la microestructura de la capa influenciando directamente su funcionamiento y duración. Entre éstos están incluidos: llama, polvo, inyección del polvo, características de proyección y sustrato [16, 128, 129].

a.) Llama.

La llama, punto 1.5.2 d, es el resultado de un conjunto o equipo constituido en forma general por: a.) Pistola (antorcha o soplete), según su tipo se regula la presión y el caudal de los gases comburentes y combustibles. b.) Gases, el oxígeno O₂ (gas comburente) en proporción con los gases combustibles (acetileno C₂H₂, hidrógeno H₂ y propano C₃H₈) [21, 25, 36, 123, 127] puede variar de su proporción O₂ / Gas combustible entre 1:1 – 1,1:1, resultando la llama carburante o bien oxidante respectivamente y la

temperatura de la llama en el orden de 2727 – 3077 °C y su velocidad de 80 – 100 m/s. La llama oxiacetilénica ofrecida por los gases O₂ y C₂H₂ permite un grado de control y altas temperatura ajustable a: oxidante, carburante o reductora y neutra [16, 60, 184, 199, 200].

b.) Polvo.

En el polvo, punto 1.5.1.1.2 a y b, se debe tener en cuenta: 1.) El método de producción: dependiente del tipo de material: a.) Los metales y aleaciones se preparan por los métodos de atomización (fraccionamiento) y sinterizado (fundido), b.) Los óxidos de cerámica y los carburos se fabrican por sinterizado seguido de un aplastamiento, por sol–gel, punto 1.3.6, o a través de calcinación y c.) Los polvos compuestos se producen por una técnica de recubrimiento como la proyección seca (aglomeración). 2.) La composición química: es una forma de identificar el material del polvo por sus elementos, aleantes y microestructura [127, 128, 129]. 3.) Las características físicas: especialmente densidad, punto de fusión, calor latente de fusión, etc. 4.) La forma de las partículas: se desea la esférica, porque facilita la dirección del polvo y disminuye el punto de proyección. 5.) La distribución del tamaño: se desecha la delgada para mejorar la eficacia de la proyección. 6.) Los tamaños de las partículas del polvo: generalmente están en el rango de 5 – 100 μm [16].

c.) Inyección del Polvo.

La inyección o niveles de entrada del polvo depende de: a.) Las pistolas, en las primeras la inyección fue de forma vertical a su eje, y en las

modernas, la inyección es en forma axial. b.) La alimentación del polvo es gravitacional en las pistolas más viejas. Los mismos modelos de alimentadores de polvo, se podían emplear en las proyecciones térmicas por llama y plasma. c.) La velocidad de alimentación del polvo está en el orden de 50 – 100 g/min. d.) El caudal del gas de transporte está entre: 3 – 5 Nl/min [16].

d.) Características de la Proyección.

En las características de proyección se tienen: a.) La distancia de proyección, punto 1.5.2 a: medida a lo largo de la línea del eje axial de la pistola desde el extremo de su boquilla hasta su intersección con la superficie del sustrato, dicha distancia está en el rango de 120 – 250 mm [184]. b.) El ángulo de proyección, punto 1.5.2 b: medido entre la línea del eje axial de la boquilla con la línea paralela a la superficie del sustrato, generalmente 90°, pudiendo variar según la forma geométrica y / o la orientación del sustrato. c.) La atmósfera de proyección: aire. d.) El tratamiento de post-proyección, punto 1.5.2 e: puede incluir la fusión de la capa, usando una proporción de composición de contenido de polvos con fundentes de aleaciones de Ni-Cr y agentes de Si o B, para mejorar su densidad y la fuerza de enlace o unión [16].

e.) Sustrato.

En el sustrato se considera: 1.) La composición química: descrita en el punto 3.2.3.1.1, [128, 129]. 2.) La preparación superficial: mejora la

adherencia de la capa con el sustrato y puede influenciar el deterioro por corrosión en su duración, descrita en el punto 1.3.1 y punto 1.5.1.2, [80, 98, 100]. 3.) El enmascarado de la superficie: es un material que brinda protección a las áreas donde esté aplicado, antes de la ejecución de cualquier proceso, como el silicón o teflón, paños, cauchos, plásticos, cintas metálicas y fibras de vidrios, etc. [171, 205]. 4.) Temperatura superficial, punto 1.5.1.3: puede ser de importancia en: a.) La proyección de cerámica sobre metales, por la generación de tensiones residuales; en este caso, la temperatura debe mantenerse entre 100 – 200 °C. b.) La proyección de metales o aleaciones: donde la temperatura podría llegar mientras se funde el material de capa fundente a 727 °C [16].

1.6.2. Características del Recubrimiento.

Las características del recubrimiento se integran a la superficie del sustrato aportándole principalmente mejoras en la protección de tipo mecánicas y microestructurales.

1.6.2.1. Características Mecánicas.

Las características mecánicas permiten mejorar en la superficie del sustrato sus propiedades tales como resistencias: a la corrosión, al desgaste y a las altas temperaturas, para que tenga un funcionamiento y duración están influenciada por la adherencia al sustrato [18, 20, 21, 85, 102, 104, 129].

1.6.2.1.1. Adherencia al Sustrato.

La calidad de la adherencia, punto 1.4.2.6, entre el recubrimiento proyectado y la superficie del sustrato depende de los elementos siguientes: a.) Rugosidad. b.) Forma. c.) Pre calentamiento. d.) Fuerza de enlace. e.) Distancia de proyección, f.) Ángulo de proyección. Los apartados e y f fueron descritos en el punto 1.5.2 a y b respectivamente [16, 85, 111, 129].

a.) Rugosidad del Sustrato.

La creación de la rugosidad permite incrementar o mejorar la adherencia de la superficie a recubrir, debido a que sirve de anclaje mecánico y aumenta la superficie de contacto, éstas se realizan por los procesos que intervienen en la preparación de superficies, descrita en el punto 1.3.1 apartado 1.3.1.1, punto 1.4.2.6 c y punto 1.5.1.2.

b.) Forma del Sustrato.

La forma del sustrato puede facilitar o dificultar la adherencia del recubrimiento, considerando: a.) El acabado en la creación de las rugosidad por el hecho de sumarse las imperfecciones [129, 205]. b.) La existencia de geometría tales como agujeros, ranuras, curvas, aristas, etc., donde las entallas incrementan las concentraciones de tensiones residuales [16, 36].

c.) Precalentamiento del Sustrato.

Ante de la realización del proceso de proyección térmica conviene también someter a un precalentamiento de la superficie del sustrato, punto 1.6.1 e, con el fin de reducir las tensiones residuales, prevenir la humedad y, de esta manera, conseguir mejorar la adherencia o fijación [16, 107, 126, 129, 205].

d.) Fuerza de Enlace.

La fuerza de enlace consiste en la adherencia, punto 1.4.2.6, entre la capa y el sustrato; la unión o anclaje de una capa proyectada térmicamente puede ser mecánica, química o metalúrgica y una combinación de éstas [127, 205]; cuando ésta es principalmente mecánica la fuerza de enlace o unión es dependiente del material del sustrato [17, 24, 25, 36, 54, 100, 102, 103, 114]. La fuerza de enlace puede alcanzar 60 MPa, para las capas NiAl proyectadas con llamas, o aún 70 MPa en los aportes fundentes. Los valores típicos están de 15 MPa para las capas de cerámica a 30 MPa para otros materiales [16].

1.6.2.2. Características Microestructurales.

Entre la característica microestructurales que interviene en la defectología del recubrimiento de una o varias capas de material depositado están: a.) Porosidad. b.) Óxidos. c.) Fisuras, etc. [16, 25, 85, 114, 127, 128].

a.) Porosidad.

La porosidad se forma al quedar atrapado gas durante la solidificación y sus valores están entre el 10 – 20 %, podría no haber porosidad en todas las capas fundente y los espesores típicos están en la gama 100 – 2500 μm [16, 25, 27, 36, 60, 114, 119, 127].

b.) Óxidos:

El contenido de óxidos esta entre 7 – 10 %, el cual ejerce una acción de protección o destrucción según el tipo de óxido, parámetros del proyección y características del recubrimiento [25, 36, 114].

c.) Fisuras.

Las fisuras, grietas o discontinuidades se producen por enfriamiento rápido y aparecen en las direcciones longitudinales, transversales, etc. [184]; éstas actúan en la zona donde se encuentran incrementando la concentración de tensiones o esfuerzos residuales y la posible fractura si hay influencia externa como fuerzas, presiones, etc. [25, 114].

1.6.3. Investigaciones de Flame Spray.

A continuación, se hace referencia a las publicaciones concernientes a las proyecciones térmicas de tipo de proceso de combustión,

concretamente la flame spray, con el propósito de conocer los trabajos de investigaciones realizados en los últimos años:

• Evaluación de la Resistencia a la Corrosión y de las Propiedades Tribológicas de Recubrimientos Compuestos de Matriz Polimérica obtenidos por Proyección Térmica.

En este trabajo se usó la técnica de flame spray para proyectar con la pistola DS8000 mezclas de poliamida (PA) con alúmina (Al_2O_3) sobre un acero, e igualmente, se compararon las resistencias al desgaste y a la corrosión de las capas de polímero (PA) y recubrimientos compuestos. En conclusión: 1.) Se han obtenido recubrimientos compuestos de matriz polimérica y reforzante cerámico por FS. 2.) La temperatura de precalentamiento del sustrato influye en la resistencia a la abrasión. Temperaturas insuficientes impiden la completa fusión del polímero y la aparición de partículas sólidas, disminuyendo su resistencia. 3.) Hasta el 15 % Al_2O_3 las capas sellan por completo la superficie recubierta impidiendo la penetración del electrolito. Por el contrario para el 25 % y 35 % Al_2O_3 , el aislamiento no es efectivo obteniéndose resistencias a la corrosión inferiores [107].

• Modificación de Recubrimientos obtenidos por Proyección Térmica mediante Haces de Alta Densidad Energética.

En este trabajo, se estudió la posibilidad de modificar las propiedades de los recubrimientos Ni-Cr-B-Si-Fe sobre el acero AISI 1018,

obtenidos mediante proyección térmica por llama, por medio de la aplicación de un tratamiento térmico superficial posterior usando para ello, el calentamiento en un horno y la energía solar. Las capas con y sin tratamiento posterior se caracterizaron usando técnicas de OM y SEM, análisis químico por microsonda y HV. Se concluye que: 1.) Es posible modificar las capas obtenidas por FS, a través de un tratamiento térmico posterior mediante haces de alta densidad energética, se posibilita disminuir la porosidad de las capas y se espera incrementar la adherencia. 2.) El uso de calentamientos y posterior aplicaciones de la capa, en hornos eléctricos, requiere de una selección de una atmósfera protectora, que impida reacciones químicas que puedan alterar el aspecto y afectar sus propiedades. 3.) La aplicación de la energía solar para producir el calentamiento al recubrimiento y disminuyendo su porosidad. 4.) Si se consigue fundir la capa de FS es posible obtener en la resolidificación un recubrimiento sin poros, mejorándose la resistencia a la oxidación [20].

• La corrosión y el Comportamiento Tribológico de las Capas Compuestas de Poliamida y Nitruros de Si y B.

En el Centro de Proyección Térmica de Barcelona, se ha estudiado la proyección por llama con mezcla de polvo de poliamida (PA) con volúmenes diferentes de nitruros de Si y B. Para la caracterización microestructural de las capas compuestas se ha usado OM y SEM. Se han evaluado las resistencias: al desgaste con los ensayos BoD y RW y a la corrosión con los ensayos de SSF.

Se concluye que: 1.) Los coeficientes de fricción aumentan con la carga pero disminuyen con crecientes volúmenes de relleno de Si_3N_4 . Las capas de Si_3N_4 muestran las mejores propiedades lubricantes disminuyendo los coeficientes a 32 %. 2.) Con el incremento del contenido de relleno, las pérdidas de volumen de capas aumentan. Esto es porque hay una baja cantidad de polímero de carga de apoyo. 3.) La resistencia al desgaste abrasiva se mejora con la baja cantidad de relleno. Altas cantidades de rellenos causan la unión pobre entre la matriz de polímero y las partículas de relleno, incrementándose la pérdida de material. Los mejores resultados se obtienen con Si_3N_4 , incluso para altos volúmenes de relleno, se muestran velocidades de desgaste similares que en la PA. 4.) Excepto en capas con alto contenido de aglomerado de BN, la presencia del volumen de relleno de nitruro no disminuiría la resistencia a la corrosión de las capas, aislándose con éxito los sustratos [109]..

• Modificación Superficial del Acero F-1110 por Proyección Térmica de CW-Ni.

Para modificar la superficie del sustrato de acero F-1110 se usa la proyección térmica “en frío”, depositándose espesores de 0,9 y 1,5 mm de una aleación en polvo CW-Ni sobre la superficie del sustrato de rugosidades de 0,4 y 0,7 mm, el cual es resistente al desgaste por abrasión, erosión, oxidación y corrosión. En este método, la temperatura < 200 °C en el metal soporte, por lo cual, la pieza cilíndrica de acero no sufre deformación. De los resultados se concluye que: 1.) Se ha modificado la superficie del acero F-1110 por FS de CW-Ni. 2.) La capa de recubrimiento ha incrementado en

el acero su dureza media a 968 HV. 3.) Se determinó el coeficiente de fricción a través del ensayo de desgaste por rozamiento. 4.) El espesor es un factor determinante, siendo el comportamiento superior cuanto menor es el espesor de recubrimiento. 5.) Las piezas de acero de mayor rugosidad soportan más esfuerzos [110].

• Propiedades Mecánicas y Caracterización de las Capas Compuestas de Hidroxiapatita / Polímero por Flame Spray.

El propósito de este trabajo es obtener un recubrimiento con una combinación óptima de propiedades mecánicas y biológicas utilizando materiales para implantes óseos; el recubrimiento consistió en capas compuestas de hidroxiapatita / polímero de diferente proporciones de volumen con la base de fluidificación del alimentador de polvo se produjeron por flame spray. Para la caracterización se realizó SEM sobre la superficie pulida de fractura y las secciones transversales de las capas. Las capas biocompatibles se evaluaron con un medidor de ión de Ca, y el comportamiento esfuerzo-deformación se evaluó con la prueba de tracción. Las propiedades mecánicas y biológicas fueron determinadas y relacionada al volumen y distribución de la HA en la matriz de etileno-ácido metacrílico (EMAA). En conclusión: 1.) Las capas compuestas de HA / EMAA de FS, tienen buena adherencia a los sustratos metálico y dureza, incremento del módulo Young y razonable biocompatibilidad. 2.) En la capa el % HA incorporado aumenta su biocompatibilidad y el módulo Young y disminuye su alargamiento. 3.) La superficie de fractura de las capas muestran que ésta se inició en las partículas de HA y la cohesión pobre entre las partículas de

HA y la matriz de EMAA. 4.) Los polvos de HA se pierden durante la proyección, formándose capas heterogéneas y reducidas en la proporción de HA / EMAA [124].

• La Producción y Caracterización por Proyección Térmica de las Capas de Polietileno Tereftalato.

En este trabajo, el polvo de polietileno tereftalato (PET) con la tecnología de proyección por llama a baja velocidad se deposita sobre el acero 1020. Una posible aplicación de esta capa es proteger de la corrosión, el tanque de combustible del automóvil, fabricado de acero recubierto de capas de Sn-Pb, las cuales tienen buenas propiedades, presentan restricciones de costos y medioambientales, limitándose su aplicación por ser metales pesados. Estudio de materiales se están probando para sustituirlos, tal como el polvo PET usado para fabricar botellas. En el proceso de capa, se consideraron los parámetros: sustrato, temperatura de pre-calentamiento, relación de caudal del O_2/C_3H_8 y distancia de proyección. Se observó que la temperatura lograda por PET durante una deposición significativa afecta las características y propiedades de la capa. Los cambios estructurales y químicos del PET se investigaron en FS por FTIR, DSC y análisis de IV. La resistencia de corrosión de la capa fue evaluada por la prueba de inmersión parcial y total en gasolina, aceite y alcohol. Ningún daño de la capa se detectó. En conclusión: 1.) Es posible producir usando FS capas de PET. La temperatura de la capa afecta su calidad en la proyección, el precalentamiento del sustrato tiene un efecto mayor en la capa y, por consiguiente, en la fundición y degradación de las

partículas PET. 2.) El tiempo de permanencia de las partículas en el cañón fue insuficiente para que se fundieran completamente, causando poca unión cuando se depositaron en el sustrato no precalentado. La unión mayor de las partículas ocurrió por el calor proporcionado por la llama y el flujo de calor del sustrato precalentado a la capa depositada. 3.) Las técnicas analíticas apuntaron a la degradación del PET debido al proceso de FS. Esta degradación se debe probablemente a un mecanismo de escisión de cadena que involucra la fractura de enlaces covalentes en la cadena principal. Este efecto mantiene la estructura química y reduce el peso molecular. 4.) Es posible la degradación del PET, pero no la corrosión, la picadura y el aumento de calor en las muestras sumergidas en gasolina, aceite y alcohol. Los resultados de las capas de PET prometen en la aplicación contra la corrosión en los tanques de combustible [126].

• Valoración en la Proyección por Llama, de la Acción del Desgaste y las Capas Fundida en base Ni.

La caracterización de la proyección por llama y las capas fundidas de NiCrBSiC en el horno con dos diferentes contenidos de C en volumen adicional del 15 – 45 % WC-Co, se describe en término de la microestructura, microdureza y análisis térmico diferencial. El desarrollo de la microestructura de las capas antes y después del tratamiento de fundición se estudia para identificar su desprendimiento. La acción del desgaste de las capas se realizó con pruebas experimentales de desgaste deslizando seco y con dos y tres partes de abrasivo. La capa de 35 % WC con NiCrBSiC mostró la mejor calidad alta dureza y baja porosidad. Se concluye que: 1.)

Las condiciones óptimas de fundición tiempo y temperatura en el horno para las muestras de la prueba de desgaste se investigó en término de la microdureza y la porosidad de las capas. 2.) La capa con 35 % WC y NiCrBSiC tiene la mejor calidad en términos de dureza y porosidad. Sin embargo, con 25 % WC se observó mejor resistencia al desgaste en la prueba de desgaste abrasiva Sugaru, mientras adicionado 40 % WC ésta mostró mejor resistencia al desgaste en la prueba abrasiva RW con arena seca. 3.) La resistencia al desgaste deslizante seco de capas compuestas WC–NiCrBSiC con 20 % (y / o 30 %) es mejor ≈ 10 veces que el acero usado para cojinete [127].

• Mecánicas de Fractura de Capas Metálicas por Proyección Térmica usando Técnica de Indentación de Prueba de Impacto en escala Micro.

La dureza de la fractura es una propiedad del material decisiva, para el diseño de componentes bajo carga mecánica. En los materiales comprados, para comprobar si hay grietas por fatiga, se les aplica pruebas de tracción y flexión a 3 o 4 puntos. La fabricación de la muestra en estos procedimientos de prueba es difícil para capas de proyección térmica a causa de la dimensión, fragilidad, cambio en la microestructura y relajación de esfuerzos residuales. La dureza de la fractura de los materiales de estructura fina como cerámicos puede estimarse por métodos de fractura de indentación usando un Vickers, Rockwell o indentadores esférico. Sin embargo, la evaluación preliminar de pruebas de indentación en las aleaciones de Ni por proyección térmica se han empleado diferentes

indentadores, por la porosidad y plasticidad del material de capa, para evitar una formación de grieta y su propagación con cargas altas. La propuesta a usar es la prueba de impacto para caracterizar los bordes de cortes de las plaquitas de metal duro. En conclusión: 1.) Reduciendo la dimensión macroscópica al micro rango es posible aplicar la prueba de impacto en las capas, considerando propiedades anisotrópicas paralela y perpendicular a la superficie del sustrato. 2.) Basándose en la distancia de fractura del borde y la fuerza cortante como mejor criterio, para caracterizar la dureza del borde de las capas, en lugar de la profundidad de indentación, área de la fractura o energía de entrada, el procedimiento de la prueba puede simplificarse en las capas densas, debido a que la distancia del indentador no tiene que conocerse antes del corte, puede medirse después del corte, por cualquier tipo de dispositivo microscópico. El método de la prueba de impacto es más conveniente para capas cerámicas [125].

• Comportamiento del Desgaste Abrasivo en Capas de Polvos de Proyección por Llama sobre Sustratos de Acero.

En este estudio, se ha investigado el comportamiento del desgaste abrasivo de las capas de polvo de proyección por llama sobre acero. El recubrimiento se hizo en sustratos frío y caliente usando 4 tipos de polvos. Antes de la prueba de desgaste, se hicieron las rugosidades superficiales de las probetas en un torno y las mediciones de durezas. Los sustratos precalentando antes de la capa disminuyen su dureza. De los resultados se concluye que: 1.) La velocidad de desgaste en todas las probetas disminuyo después de un tiempo. 2.) Cuando los parámetros, excepto la entrada de

calor, cambiaron, la resistencia al desgaste, en las probetas fría y caliente, y se determinó que en estas últimas era más alta. 3.) La resistencia al desgaste abrasivo de las capas FS dependen de la composición química, características del material y condiciones del recubrimiento. 4.) No hay diferencia marcada entre las microestructuras de las capas frías y calientes observadas en SEM [128].

• Un Estudio Experimental de la Acción de Desgaste de Capas de NiCrBSi por Proyección Térmica.

En este trabajo, se estudian las aleaciones de NiCrBSi por su alta resistencia al desgaste y a la corrosión a altas temperaturas. Esta se realizó en forma experimental, analizando la influencia de los factores: carga, temperatura, presencia de partículas del refuerzo y tipo de técnica de proyección térmica en la acción de desgaste de una aleación NiCrBSi. En la máquina de desgaste para ensayo PoD, se experimentaron las probetas escogiendo las cargas en el rango de 50 – 200 N y temperaturas ≤ 500 °C. 4 juegos de probetas, se experimentaron variando la composición química (con la presencia o no de WC en los polvos) y el tipo de técnica de proyección térmica (plasma o llama con fusión). Un análisis estadístico basado en el plan de la metodología fue aplicado para identificar el efecto significativo y las interacciones. De los experimentos y del análisis realizado, se concluye que: 1.) Las aleaciones NiCrBSi, depositadas por las técnicas de proyección térmica, mantiene las acciones de resistencia al desgaste hasta temperaturas > 500 °C. 2.) La técnica de proyección tiene un factor signficante en la acción de desgaste de las aleaciones de NiCrBSi.

Las aleaciones depositadas por FS con fusión tienen mejor resistencia al desgaste que las depositada por PS. 3.) La carga es más influyente que la temperatura dentro de los rangos analizados. 4.) La presencia de WC en los polvos no es un el factor beneficioso en la acción de desgaste de las capas de NiCrBSi por proyección térmica [129].

• Investigación de Métodos de Endurecimiento Superficiales y el comportamiento de los desgastes Erosivo y Abrasivo en el Acero AISI 1050.

En este estudio, las muestras de acero AISI 1050 se exponen a tratamientos termoquímico, como boronización, nitruración, o endurecimiento por proyecciones térmicas por llama con fusión por inducción y por HVOF con fusión por inducción; y posteriormente el tratamiento de enfriamiento superficial con aceite. Al final de las pruebas de desgaste, se observa que la cantidad de desgaste en el metal base disminuye con el enfriamiento en el aceite y los métodos de proyecciones térmicas. Después de la proyección el tratamiento de refundido reduce la cantidad de desgaste aun más. De los resultados se concluye que: 1.) En el material cerámico, las capas duras y frágiles se forman debido a partículas que originan desgaste abrasivo al impactar sobre la superficie del sustrato y pueden ocasionan micro-grieta aumentando el desgaste. Esta formación de capas duras y frágiles en la superficie se observa en las muestras con tratamientos termoquímicos como nitruración y boronización. 2.) La resistencia de desgaste puede aumentar cuando las capas son de materiales compuestos en lugar de cerámicos. Tales combinaciones pueden obtenerse

entre varias opciones en los procesos de proyección de capa. 3.) En la FS, la pérdida de peso en la superficie del sustrato disminuye en un 59 % en el Ni-Cr-B-Si, en un 61 % en el WC-Ni-Cr-B-Si, en un 69% en el Cr-Ni-B-Si y 80 % en el 35%WC+65%(Cr-Ni-B-Si). 4.) La resistencia de desgaste del sustrato aumenta en el 3,36 %, poniéndole en la proyección 35 % WC de polvo. 5.) La característica de desgaste es afectada por el nivel de energía sobre la capa en la superficie del sustrato durante y después de la proyección. Cualquier aumento del nivel de energía causa la difusión entre capa y superficie, incrementándose la adherencia y anulándose entre las capas superpuestas pudiéndose eliminar el desgaste y dar mejor penetración. Esto se logra con el proceso de fusión superficial después de la proyección [141].

• Determinación de Esfuerzo Residual en Proyección Térmica de Depósitos metálico por Difracción Neutrónica.

La difracción neutrónica fue usada para obtener resultado espacialmente de perfiles de esfuerzo y deformación en proyección térmica de depósitos metálicos de NiCrAlY (composición química 67 % Ni, 22 % Cr, 10 % Al, 1 % Y) y sustratos de acero. Se utilizaron 4 técnicas: proyección de plasma atmosférico y estabilizada por agua (APS y WSP), proyección por llama (FS) y proyección de arco usando alambre (WAS). Los resultados se comparan cuantitativamente con el esfuerzo medio residual en el plano determinado en las pruebas de flexión y la técnica de taladrado de agujero. En conclusión: 1.) En la proyección de NiCrAlY los esfuerzos residuales se determinan por difracción neutrónica,

transformándose en resultados espaciales que dan información sobre el estado del esfuerzo dentro del sistema depósito y sustrato. 2.) Para las diferentes técnicas de proyección, los esfuerzos residuales son similares en la capa y en el espesor del sustrato, difiriendo de otros en términos del esfuerzo medio y magnitud del gradiente de esfuerzo [142].

• Relaciones entre las Características de las Partículas de NiCrBSi y las Propiedades de la Capa usando diferentes Procesos de Proyección Térmica.

En este trabajo, se probaron diferentes procesos para explorar los efectos de las variables relacionadas con las características de la partícula y la calidad de la capa. El polvo de NiCrBSi se proyectó por plasma, llama y HVOF. Para supervisar las características de la partícula durante su vuelo en la proyección se usó el sistema de medición DPV 2000. De los resultados se concluye: 1.) Las capas de NiCrBSi pueden producirse usando proyecciones térmicas de: llama, plasma y HVOF. 2.) En el estudio de las propiedades de partícula, los datos medidos por el DPV 2000, indican que el diámetro grande da una temperatura baja y la velocidad baja para cada tipo de proceso, y permaneciendo la temperatura por encima de la de fusión en todos los casos. La velocidad de partícula alta se da en el proceso de HVOF y está a más de 10 veces por encima de la obtenida por llama y ≈ 3 por encima que la de plasma. En contraste con la temperatura de la partícula, la temperatura baja se da en HVOF, con 500 °K inferior a las partículas de proyección por llama y ≈ 100 °K inferior que la de plasma. Entonces, la temperatura de la partícula es alta como consecuencia de la baja velocidad

de las partículas que están juntas con tiempo de permanencia grande de partículas proyectadas. 3.) Con el DPV 2000, la temperatura y la velocidad se usarán para determinar las correlaciones entre las propiedades de las partículas y las características de la capa como microestructura, porosidad, nivel de óxido, composición de la fase, dureza, adherencia y módulo Young. Los resultados muestran varios cambios en las propiedades de la capa cuando se usa el proceso HVOF en lugar de los procesos por llama o plasma. Entonces, las capas proyectadas por HVOF muestran los mejores resultados relacionado a sus capas densas (la porosidad baja) y asociada a la micro-dureza alta, el módulo Young y la adherencia. 4.) La estructura de capa por llama es amorfa, la morfología cristalizada presentada por plasma y HVOF está directamente relacionada a la solidificación de las partículas en el sustrato. 5.) Las propiedades de las capas de HVOF como dureza, porosidad o módulo Young son mejores que las capas por llama o plasma; debido principalmente a las altas velocidades de las partículas. Entonces, disminuyendo la temperatura y el tiempo de permanencia de la partícula dentro del chorro se baja el nivel de óxido [143].

• Investigación de la Adherencia en la Interfase Aceros de Moldeo con Capas Cerámicas de WC-Ni, Cr-Ni-Mo, Depositadas por Proyección Térmica (Tesis Doctoral).

Pascual G., Manuel asesorado por Ferrer G., Carlos y Cembrero C., Jesús; investigó la posible alternativa de procedimientos de tratamiento a superficies, que al mismo tiempo que pueden resultar complicados de ejecución, resultan de alguna forma laboriosos y económicamente costosos,

en tal sentido, ha surgido la necesidad de esta investigación de la adherencia en la interfase aceros de moldeo con capas cerámicas de WC-Ni, Cr-Ni-Mo, depositadas por proyección térmica, las premisas de base, consisten en disponer de materiales para sustrato soporte, relativamente económicos y de factible obtención, y adaptable mediante preparación superficial. Las fases que ha compuesto este estudio se basan en la determinación de los sustratos a emplear así como de las condiciones superficiales óptimas que mejor resultado pudiesen dar, como son las de obtener superficies rugosas, bien a través de las generatrices de las muestras cilíndricas para: las experiencias de adherencia a cizalladura ó diametrales, las experiencias de los ensayos de adherencia a tracción, durezas y desgaste, y para proceder a la determinación de los parámetros de proyección, ensayos correspondientes, micrografías que determinen y corroboren las experiencias ensayadas, así como, la toma de decisiones en cuanto a resultados obtenidos, con el fin de dar respuesta a posibles soluciones que pueden ser utilizadas con plena fiabilidad industrialmente [259].

Otras investigaciones de flame spray y HVOF Spray se describen en las Tablas A.2.1 de A – D y A.2.2. de A – H se muestran las referencias de investigaciones considerándose en las Tablas A.2.1 los trabajos sobre flame spray y en las Tablas A.2.2. las variables del proceso y del recubrimiento sobre flame spray y HVOF spray:

1.6.4 Síntesis de las Investigaciones de Flame Spray.

- Evaluación de la resistencia a la corrosión de: a.) Compuestos de matriz polimérica [109]. b.) Capas compuestas de poliamida (PA) con

volúmenes diferentes de nitruro de silicio (Si_3N_4) y nitruro de boro (BN), considerando la variante de sin o con contenido de relleno [107] y usando sustrato de acero [107, 109]. c.) Polvo de polietileno tereftalato (PET) depositado a baja velocidad sobre el acero 1020 [126].

- Evaluación de la resistencia al desgaste de recubrimientos de: polímero [107], capas cerámicas de carburo de wolframio y níquel (CW-Ni) y de cromo, níquel y molibdeno Cr-Ni-Mo [110, 259], compuestos de matriz polimérica y reforzante cerámico (Al_2O_3) [107], capas de aleación de NiCrBSiC experimentando desgaste de deslizamiento seco con dos y tres abrasivos [127].

- Valoración de la acción de desgaste en las capas de aleación de NiCrBSiC [127, 129] fundida en el horno considerando condiciones óptimas de (tiempo y temperatura) con dos diferente contenidos de carbono en volúmenes adicional del 15 – 45 WC–Co sobre sustrato de acero [127].

- Estudio de la modificación superficial [20, 110] mediante haces de alta densidad energética usando calentamiento en un horno y la energía solar, posteriormente de haber aplicado la proyección térmica en el sustrato de acero AISI 1018 con los recubrimientos Ni-Cr-B-Si-Fe [20].

- Investigación de capas de polietileno tereftalato (PET) y su posible producción, considerando los siguientes parámetros: el sustrato, la temperatura de pre-calentamiento, la relación de caudal del oxígeno (O_2) / propano (C_3H_8) y la distancia de proyección [126].

- Estudio de la modificación superficial [20, 110, 259] del sustrato de acero F-1110 [110, 259] y fundición gris [259] con tipos de rugosidades [110, 259], proyectándose térmicamente material de WC-Ni [110, 259] y Cr-Ni-Mo [259], capas cerámicas, de espesores variados [110, 259].

- Estudios tribológicos comparativo sobre sustrato de acero de: a.) Propiedades en recubrimientos compuestos de matriz polimérica [107], capas compuestas de hidroxiapatita (HA) / polímero etileno-ácido metacrílico (EMAA) con diferentes proporciones en volumen [124] y capas de NiCr [125]. b.) Comportamiento de capas compuestas de poliamida nitrurada con volúmenes diferentes de nitruro de silicio (Si_3N_4) y nitruro de boro (BN), considerando la variante de sin y con contenido de relleno [107].

- Evaluación de las propiedades mecánicas y biológicas de las capas compuestas de hidroxiapatita (HA) / polímero etileno-ácido metacrílico (EMAA) con diferentes proporciones en volumen para implantes óseos [124].

- Optimización de los materiales de capas compuestas de hidroxiapatita (HA) / polímero con diferentes proporciones en volumen para la biocompatibilidad en implantes óseos [124].

- Evaluación de la dureza de la fractura de la capa NiCr proyectada térmicamente, aplicando la técnica de indentación de prueba de impacto en escala micro y considerando propiedades anisotrópicas paralela y perpendicular a la superficie del sustrato [125].

- Análisis comparativo de la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión de recubrimientos de: a.) Polímero y compuestos de matriz polimérica y reforzante cerámico [107]. b.) Aleaciones NiCrBSi [129].

- Evaluación de la influencia de la temperatura de precalentamiento del sustrato en: a.) La resistencia a la abrasión de la poliamida (PA) con alúmina (Al_2O_3) [107]. b.) Las capas de polietileno tereftalato (PET) [126].

- Investigación del comportamiento del desgaste abrasivo de: a.) Las capas de polvo de proyección por llama sobre los sustratos de acero con superficie fría y caliente, teniendo en cuenta la velocidad de desgaste, la composición química, las características del material y las condiciones del recubrimiento [128]. b.) El sustrato de acero AISI 1050 [141].

- Evaluación de la porosidad de los recubrimientos: a.) Ni-Cr-B-Si-Fe proyectados térmicamente y modificados mediante haces de alta densidad energética utilizando calentamiento en un horno y energía solar [20]. b.) 35 % WC con NiCrBSiC [127] c.) Capas Cerámicas de WC-Ni, Cr-Ni-Mo [259].

- Análisis estadístico basado en la metodología experimental de la influencia de varios factores tal como carga, temperatura, presencia de partículas del refuerzo y tipo de técnica de proyección térmica en la acción de desgaste de una aleación NiCrBSi [129].

- Investigación de métodos de endurecimiento superficiales: termoquímico (boronización y nitruración), por medio de inducción (calor y

fundido), proyecciones térmica de llama, HVOF, plasma y el comportamiento de los desgastes erosivo y abrasivo en el sustrato de acero AISI 1050 y utilizando los polvos de: Ni-Cr-B-Si, WC-Ni-Cr-B-Si, Cr-Ni-B-Si y 35%WC+65%(Cr-Ni-B-Si) [141].

- Evaluación de esfuerzo residual utilizando proyección de plasma atmosférico y estabilizada por agua (APS y WSP), proyección por llama (FS) y proyección de arco usando alambre (WAS) de depósitos metálico de NiCrAlY y sustratos de acero por difracción de neutrónica [142].

- Investigación de las relaciones entre las características de las partículas de NiCrBSi y las propiedades de la capa usando en los procesos de proyección térmica de: plasma, llama, HVOF empleando el sistema de medición DPV 2000 [143].

1.6.4.1. Temas de Flame Spray en los que se Evidencia Carencia de Investigación.

- Evaluación del efecto del ángulo de proyección sobre el: 1.) Recubrimiento: a.) Propiedades. b.) Microestructura. 2.) Sustrato: Mecanismo de erosión considerando: a.) La velocidad de impacto. b.) Materiales dúctil y frágil.

- Estudio de la influencia de la distancia de proyección sobre el: 1.) Recubrimiento: a.) Propiedades. b.) Microestructura. 2.) Sustrato: El

desgaste erosivo tomando en cuenta: a.) La velocidad de impacto. b.) Materiales dúctil y frágil. c.) La rugosidad.

- Análisis de la influencia de los valores de la adherencia en sustratos de forma cilíndrica, considerando la rugosidad de acuerdo al filete de la rosca, la profundidad, avance, el ángulo y el radio en el exterior de la rosca.

- Estudio de las concentraciones de esfuerzos residuales en la microestructura debido a imperfecciones dejada por la aplicación del proceso considerando tipo de pistola, con o sin precalentamiento del material en la superficie.

- Modificación de los recubrimientos obtenidos por proyección térmica aplicando diversos tratamientos superficiales; considerando posible procesos de difusión para con el material del sustrato.

- Análisis de la influencia de los parámetros del proceso de proyección térmica, potencia de consumo para la generación de la llama, ángulo de proyección, relación de mezcla de gases, considerando los defectos inherentes del mismo, porosidad y microestructura.

- Estudio de la influencia de los parámetros del proceso de proyección térmica optimizada, potencia para la generación de la llama, ángulo de proyección, relación de mezcla de gases y la composición en un material de polvo y aleación de material de polvo con aditivos nanos cerámicos en los defectos inherentes al mismo, porosidad y microestructura.

- Análisis del efecto de los parámetros del proceso de proyección térmica optimizada y composición en un material de polvo y aleación de este con aditivos nanos cerámicos con adherencia al sustrato en las modalidades de requisitos axiales, cortantes circulares y cortantes planos, para una rugosidad estándar.

- Evaluación de la influencia de los parámetros del proceso de proyección térmica optimizada y composición en un material de polvo y aleación de este con aditivos nanos cerámicos con adherencia al sustrato en las tres modalidades de tensiones, para una rugosidad de diseño especial en conformaciones circulares y planas.

- Análisis del efecto de los parámetros del proceso de proyección térmica optimizada y composición en un material de polvo y aleación de este con aditivos nanos cerámicos en las características resistentes del recubrimiento adherido al sustrato para una rugosidad optimizada: módulo, tensión de fractura a compresión y a cortante.

- Estudio de la influencia de los parámetros de la composición del recubrimiento adherido al sustrato, material de polvo y aleación de este con aditivos nanos cerámicos en el comportamiento frente al desgaste para una rugosidad estándar y condiciones de lubricación límite.

- Evaluación del efecto de los parámetros de la composición de recubrimiento adherido al sustrato, material de polvo y aleación de este con aditivos nanos cerámicos en el comportamiento frente a la corrosión seca para unas condiciones definidas.

Capítulo II

Objetivos

El estudio de adherencia sobre matrices de embutición de acero de bajo contenido de carbono (F-1110), y análisis mediante ensayos de emisión acústica, de recubrimientos de níquel-óxidos y carburos cerámicos, aplicados por proyección térmica, y de las características adhesivas con aleaciones metálicas de embutición. Se fundamenta en los objetivos siguientes:

- Cuantificar la adherencia al sustrato de acero de bajo contenido de carbono (F-1110) de recubrimientos con proporciones variables de carburo de wolframio – níquel en función de las variables de proceso: a.) Rugosidad diseñada. b.) Temperatura del sustrato. c.) Temperatura de post-proceso.
- Medir la adherencia al sustrato de acero de bajo contenido de carbono (F-1110) de recubrimientos con proporciones variables de óxido de aluminio – óxido de titanio en función de las variables de proceso:

a.) Rugosidad diseñada. b.) Temperatura del sustrato. c.) Temperatura de post-proceso.

- Investigar la tendencia a la adhesión mediante el ensayo pin on disk que los recubrimientos con proporciones variables de carburo de wolframio – níquel pueden tener con las chapas de aleaciones de acero de bajo contenido de carbono, acero inoxidable austenítico y aleaciones de aluminio.

- Indagar la tendencia a la adhesión mediante el ensayo pin on disk que los recubrimientos con proporciones variables de óxido de aluminio – óxido de titanio pueden tener con las chapas de aleaciones de acero de bajo contenido de carbono, acero inoxidable austenítico y aleaciones de aluminio.

- Analizar los procesos de microfisuración en la interfase sustrato-recubrimiento con proporciones variables de carburo de wolframio – níquel, representativo de los valores de adherencia, mediante técnicas no destructivas de emisión acústica.

- Examinar los procesos de microfisuración en la interfase sustrato-recubrimiento con proporciones variables de óxido de aluminio – óxido de titanio, representativo de los valores de adherencia, mediante técnicas no destructivas de emisión acústica.

- Analizar los constituyentes, la porosidad y la microdureza en los recubrimientos con proporciones variables de: a.) carburo de wolframio – níquel y b.) óxido de aluminio – óxido de titanio, utilizando metalografía, análisis de imágenes y ensayo de microdureza.

- Estudiar el proceso de fractura y los mecanismos de difusión en la interfase sustrato – recubrimiento con proporciones variables de: a.) carburo de wolframio – níquel y b.) óxido de aluminio – óxido de titanio, representativo de los valores de adherencia, aplicando metalografía, fractografía y microanálisis.

Capítulo III

Metodología

Este capítulo se desarrolló considerando las normas vigentes UNE, ISO y ASTM; así como las variables expuestas en los objetivos del Capítulo II, los materiales y métodos empleados. Para desarrollar la metodología se observaron los siguientes puntos: 1.) Ensayos para Análisis de Requisitos. 2.) Probetas. 3.) Planificación de las Pruebas. 4.) Planificación de Experimentos.

3.1. Ensayos para Análisis de Requisitos.

Los ensayos para análisis de requisitos involucran variables, distinguiéndose en la conducta tribológica, la adherencia, la defectología y la modificación en la interfase del recubrimiento proyectado sobre el material de la matriz (sustrato), para esto se necesitan realizar ensayos sobre

probetas de tipo destructivos y no destructivos fundamentados en: 1.) Métodos metalográficos. 2.) Análisis de defectos. 3.) Métodos mecánicos.

3.1.1. Métodos Metalográficos.

Los métodos metalográficos emplean los microscopios (metalográfico, electrónico, etc.) para determinar la estructura del material y las modificaciones por los tratamientos. Son métodos destructivos cuando se emplean probetas y no destructivos cuando se efectúan sobre las mismas piezas. Estos métodos tienen como objetivo analizar el comportamiento del material dependiente principalmente de su estructura cristalina, los cuales pueden realizarse a simple vista, con lupa o con microscopio. Según el aumento del instrumento óptico que se use para la observación, se diferencian dos tipos de análisis: a.) Macroscópico: desde la simple vista hasta con 15 aumentos, como la macroscopía óptica (lupa estereográfica). b.) Microscópico: desde los 15 aumentos en adelante como las microscopías óptica (OM del inglés “Optical Microscopy”) y electrónica de barrido (SEM del inglés “Scanning Electron Microscopy”) según las normas UNE-EN ISO 9220 y 14923 [233, 234], ASTM B 748 – 90 y E 1920 – 97 [235, 236].

Las operaciones previas a las observaciones macro y microscópica, excepto en observación de superficies naturales, examen de fracturas, aspecto de superficies acabadas, etc., son: a.) Selección y extracción de la probeta. El lugar de extracción de la probeta depende del fin que se investiga, debido a su influencia en el análisis metalográfico y químico. b.)

Desbaste se realiza con papel abrasivo de lija de granulometría 80, 220, 500, 1000 y desbastadora de disco, LaboPol–21 del fabricante Struers, es la operación que sigue al corte, usando tronzadora Labotom del fabricante Struers, con ella se trata de poner al descubierto la superficie del material sin impurezas, y darle una conformación plana a la cara. Durante las operaciones de desbaste deberá evitarse ejercer una presión excesiva sobre las muestras, para evitar posibles calentamientos y que se incrusten en ellas granos de abrasivo. Si es necesario después del corte se realiza el montaje de la muestra o probeta con resina, en nuestro caso en una embutidora LaboPress–3 del fabricante Struers para embutir cilindro de 25 mm, especificándose las condiciones de la resina para la SpeciFast en cantidad de 15 ml, es necesario en calentamiento ejercer una fuerza de 15 kN, una temperatura de 180 °C, un tiempo de 360 s y en enfriamiento un tiempo de 480 s. c.) Pulimento y ataque: esta etapa consiste en conseguir a través del pulido una superficie reflectora empleando paños impregnados con abrasivos, en nuestro caso pastas de alúmina (Al_2O_3) de 0,5 μm y 1 μm y pulidora de disco LaboPol–21 del fabricante Struers y luego, se aplica el ataque adecuado, llegándose a reflejar los rayos luminosos, permitiendo que éstos presenten en el ocular del microscópico una imagen fiel [204,206,236].

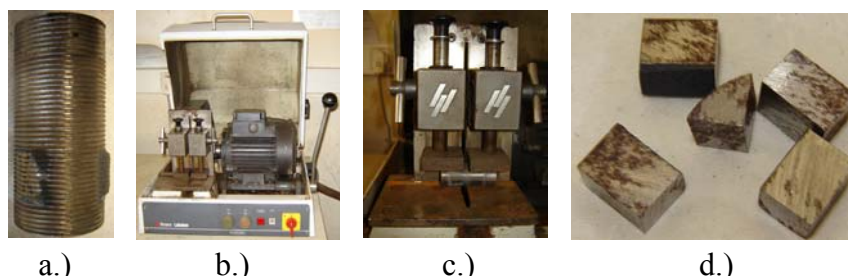
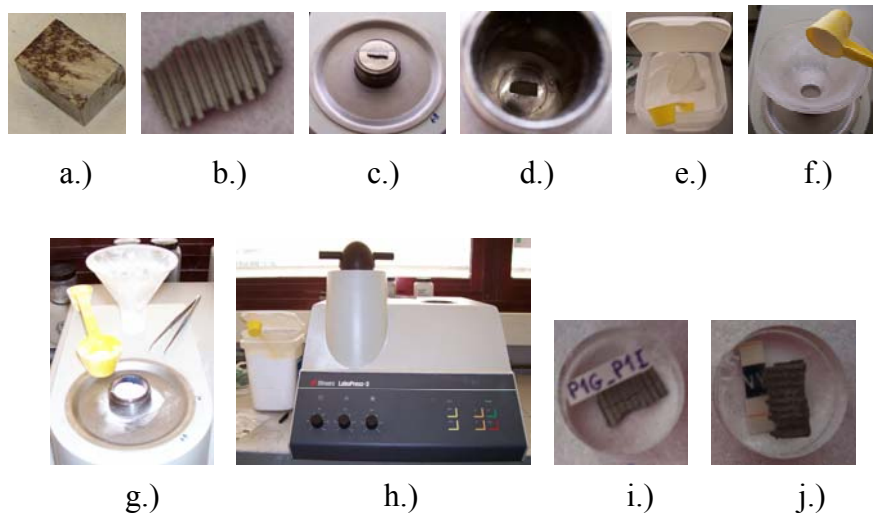


Figura 3.1. Corte: a.) Probeta Fracturada para Cortar, b.) Tronzadora, c.) Detalle de Corte y d.) Muestra Cortada.

Durante las operaciones debe procurarse que la temperatura de la probeta no sobrepase a la de la mano, evitándose el calentamiento excesivo que puedan producir cambios estructurales [174, 204, 206, 236]. Observar en las figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 los pasos descritos anteriormente.



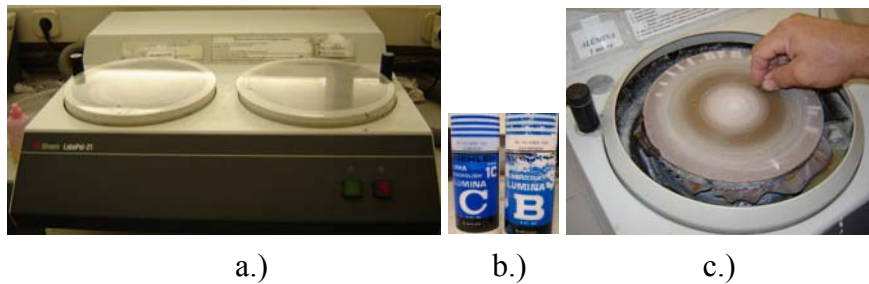


Figura 3.4. Pulido: a.) Pulidora y b.) Pastas de Alúmina 0,5 μm y 1 μm y c.) Detalle del Pulido.

3.1.2. Análisis de Defectos.

Los análisis de defectos permiten conocer las propiedades físicas (densidad, masa, temperatura, etc.) o empleando las mismas, para determinar las heterogeneidades, discontinuidades y demás defectos internos (grietas, inclusiones, poros, etc.) [174, 204]. En este grupo se encuentran ensayos de tipo destructivos y no destructivos como la espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS del inglés “Energy Dispersive Spectroscopy”) según la norma ASTM F 1375 – 92 [238] y la emisión acústica según las normas UNE-EN 13477-1 y 2 [239, 240], 1330-9, 13554 [241, 242].

3.1.3. Métodos Mecánicos.

Los métodos mecánicos son de tipo destructivos y tienen por misión conocer las características elásticas y la resistencia de los materiales, según

el comportamiento de probetas normalizadas sometidas bajo la acción de determinados esfuerzos [174, 204, 206]. A éstos pertenecen los siguientes ensayos estáticos: cizalladura; microdureza Vickers (HV), según las normas UNE-EN ISO 4516, 6507-1, 14923 y 657 [223, 224, 232, 234], ensayo desgaste pin on disk según la norma ASTM G99 [237].

3.2. Probetas.

Las probetas o muestras cuyas dimensiones y preparación se estipulan en las normas, se utilizarán para determinar las características que involucran los métodos metalográficos, los análisis de defectos y los métodos mecánicos, como la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura y los ensayos de: dureza y desgaste pin on disk. Estas Probetas son: 1.) Probetas de los métodos metalográficos. 2.) Probetas de los análisis de defectos. 3.) Probetas de los métodos mecánicos, figura 3.5.

3.2.1. Probetas de los Métodos Metalográficos.

Los métodos metalográficos que se realizarán en este trabajo son los análisis: a.) Macroscopía óptica (lupa estereográfica); la probeta utilizada es la pieza completa, en ésta se debe prestar atención al examinarla, con el objeto de detectar las zonas de fallos. b.) Microscopías: óptica (OM) y electrónica de barrido (SEM) según las normas UNE-EN ISO 9220 y 14923 [233, 234] y ASTM B 748 – 90 [235], las probetas deben estar en el rango

de 12 – 25 mm y seleccionarse de diferentes localizaciones y direcciones del material, examinándose con atención los fallos según la norma ASTM E3 – 01 [243], pudiéndose analizar material en polvo. Las probetas y las muestras de polvos micro-pulverizado de material se pueden montar en soportes para realizar el examen, figura 3.6.

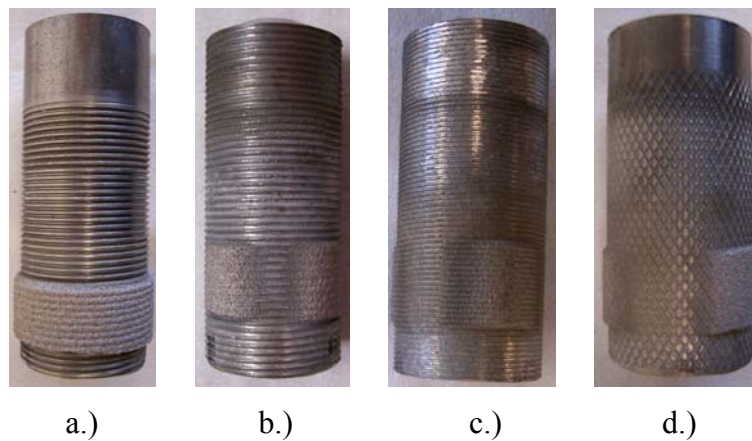


Figura 3.5. Probetas Proyectadas para Lupa: a.) Roscado $P = 1,5$ mm y $\Phi = 45^\circ$, b.) Roscado $P = 1,5$ mm y $\Phi = 90^\circ$, c.) Roscado $P = 1$ mm y $\Phi = 60^\circ$ y d.) Moletado.

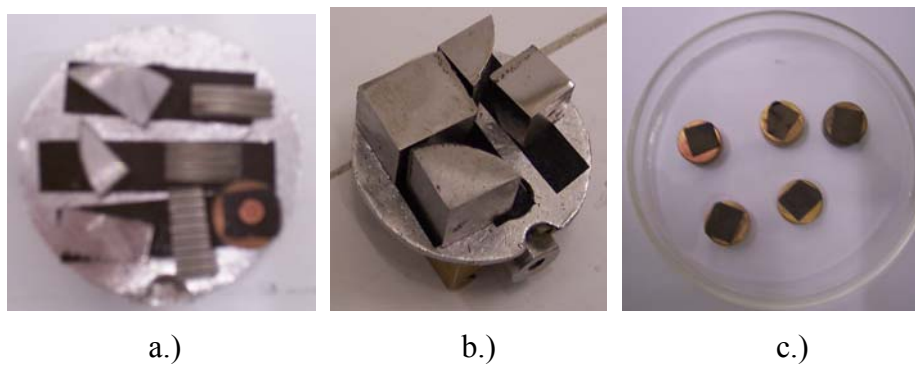


Figura 3.6. Montaje de Probeta en el Porta Probeta de Microscopías Electrónica de Barrido (SEM): Material Proyectado en el Porta en a.) Con la Rejilla , b.) Sin la Rejilla y c.) Probeta en Polvo Preparada.

3.2.2. Probetas de los Análisis de Defectos.

En los análisis de defectos, las probetas, figura 3.7, a usar dependen del ensayo que lo acompañe: a.) Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) según la norma ASTM F 1375 – 92 [238]. Esta técnica de microanálisis analítica se origina en este caso de la microscopía electrónica de barrido (SEM) según las normas UNE-EN ISO 9220 y 14923 [230, 233] y ASTM B 748 – 90 [121], por lo cual usa sus mismas probetas. b.) Emisión acústica usa la misma probeta de los ensayos mecánicos donde se estudie, en este trabajo se emplearon las probetas de las pruebas de la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura.

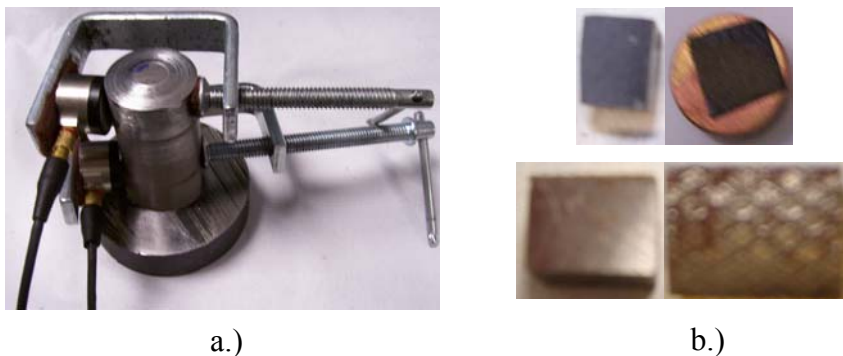


Figura 3.7. a.) Montaje de Probeta para Realizar la Emisión Acústica y b.) Tipos de Probeta para Microanálisis EDS.

3.2.3. Probetas de los Métodos Mecánicos.

Los métodos mecánicos utilizados en este trabajo son: a.) Medida de la adherencia por ensayo de cizalladura y microdureza Vickers (HV),

especificados en las normas UNE-EN ISO 4516, 6507-1, 14923 y 657 [223, 224, 232, 234]. b.) Ensayo desgaste pin on disk establecido en la norma ASTM G99 [114].

3.2.3.1. Probetas de la Medida de la Adherencia por Ensayo de Cizalladura.

Para la medida de la adherencia por el ensayo de cizalladura a compresión se emplearon probetas proyectadas: 1.) Sustrato. 2.) Recubrimientos.

3.2.3.1.1. Sustrato.

El sustrato utilizado con dimensiones de 65 mm – 70 mm y 145 mm – 150 mm de largo cortadas en barras cilíndricas de 30 mm de diámetros de aceros F-1110, según la UNE y certificado de calidad N° 90682 de Alsimet, S.A., con descripción: calibrado redondo F-1 de 30 mm; composición química 0,169 % C; 0,669 % Mn; 0,187 % Si, 0,008 % P y 0,023 % S; la resistencia a la tracción de 58,75 kg/mm².

3.2.3.1.2. Recubrimientos.

Los recubrimientos de polvos micro-pulverizado fueron:

a.) Carburo de wolframio más níquel (WC/Ni): aleación de tipo composite, compuesta por una distribución de finas partículas de carburo de wolframio (WC) en una matriz de níquel cromo (NiCr), en relación de 40/60, en peso. De acuerdo al certificado N° C009-06 de Castolin Ibérica, S.A. y fundamentado en la normativa UNE EN 10204, su descripción: Aleación en polvo (alloy powder), Ni base + 40% Carburos (Carbides); designación: PR 3029; análisis: 3,3 % B; 0,8 % C; 4,2 % Si; 15,5 % Cr; 3,9 % Fe y base Ni; granulometría $\leq 125 - \geq + 32 \mu\text{m}$.

b.) Óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3) + óxido de titanio (TiO_2), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, en proporción de 97/3 por ciento en peso y según el certificado N° M421-06 de Castolin Ibérica, S.A. y basado en la norma UNE EN 10204; descripción: polvo de cerámico (ceramic powder); designación: MetaCeram 28020; análisis: base Al_2O_3 ; $\leq 3,5 \%$ TiO_2 ; $\leq 0,6 \%$ SiO_2 y $\leq 0,05 \%$ Fe_2O_3 , granulometría $\leq 53 - \geq 15 \mu\text{m}$.

c.) Óxido de aluminio (Al_2O_3) + óxido de titanio (TiO_2), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, en razón de 87/13 % en peso y según el certificado N° M421-06 de Castolin Ibérica, S.A. y la norma UNE EN 10204; descripción: polvo de cerámico; designación: MetaCeram 28030; análisis: base Al_2O_3 ; 13,0 % TiO_2 ; $\leq 0,6 \%$ SiO_2 y $\leq 0,2 \%$ Fe_2O_3 , granulometría $\leq 53 - \geq 15 \mu\text{m}$.

d.) Aleación micropulverizada base níquel (Ni) empleada como capa de enganche o anclaje; de acuerdo al certificado N° M422-06 de Castolin Ibérica, S.A. y la UNE EN 10204; descripción: polvo de base níquel (nickel base powder); designación: RotoTec 51000; análisis: 0,07 % C; 6,04 % Al; 0,19 % Si; 0,22 % Cr; 0,38 % Fe; balance Ni y 5,25 % Mo.

e.) Aleación preparada de carburo de wolframio + níquel, WC/Ni, en relación de 30/70 % en peso (30%WC + 70%Ni); se elaboró realizando dos balances en base a 100 gr de masa. a.) Balance general de la mezcla: $m_A + m_B = 100$ gr, siendo m_A y m_B cantidad de masa de cada aleación, m_A de la aleación WC/Ni en relación de 40/60 % en peso (40%WC + 60%Ni) y m_B de la aleación base Ni. b.) Balance individual de un componente: $0,60 m_A + 1,00 m_B = 70$ gr, donde $0,60 m_A$ y $1,00 m_B$ cantidad de masa de níquel en cada aleación; $0,60 m_A$ en la aleación 40%WC + 60%Ni y $1,00 m_B$ en la aleación base Ni. Resolviendo el sistema que conforman las ecuaciones los balances de masa y operando se obtiene la proporción de $m_B/m_A=1/3$ que debe agregarse de cada aleación, es decir en base 100 gr se debe mezcla para que resulte una aleación de 30%WC + 70%Ni de $m_B = 25$ gr de la aleación 40%WC + 60%Ni y $m_A = 75$ gr de la aleación en base Ni, figura 3.8.



Figura 3.8. Preparación de la aleación de 30%WC+70%Ni.

En las probetas para la medida de la adherencia por el ensayo de cizalladura, se consideran: 1.) Material del sustrato obtenido de las barras de acero F-1110 y mecanizado, figura 3.9, a través del torno, a las rugosidades obtenidas por: roscado, moleteado, rayado con la lima y ranurado. Estas rugosidades son: a.) Roscas de paso 1,5 mm y ángulos de filete de 45° y 90° con profundidades de 0,75 mm (750 μ m). b.) Roscas de paso 1mm y ángulo

de filete de 60° con profundidades de 0,35 mm (350 μm). c.) Moleteado de paso 1,5 mm de las estrías cruzadas (líneas helicoidales de paso contrario) de las moletas (herramientas) profundizadas a 0,35 mm (350 μm). d.) Rayado con lima de paso 1 mm y realizadas a profundidades de 0,35 mm (350 μm). e.) Ranurado cilíndrico a lo largo del eje axial en una distancia de 15 mm, torneándose cinco ranuras circulares completas con profundidades de 0,35 mm (350 μm), una central y otras dos pares en el extremos de la distancia de 15 mm con espaciamiento de 2 mm. f.) Lisas sin mecanizar obtenida directamente de la barra calibrada de 30 mm de diámetro. 2.) Recubrimientos empleando la técnica de proyección térmica a la llama con polvos de níquel – óxidos y carburos cerámicos.



a.)



b.)



c.)



d.)

Figura 3.9. Procesos de mecanizado para obtener las rugosidades: a.) Roscado, b.) Moleteado, c.) Rayado con Lima y d.) Ranurado.

Se fabricó un “portaprobeta” con los objetivos: a.) Proteger las partes del torno cuando se proyecta el material del sustrato y que las dimensiones de las probetas proyectadas para la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura fueran de diámetro 30 mm y largo en el intervalo de 65 mm a 70 mm. b.) Economizar el material del sustrato, la mano de obra y energía, reduciendo la longitud en el intervalo de 145 mm a 150 mm en las probetas primeras fabricadas entre la longitud de 65 mm a 70 mm, figura 3.10.



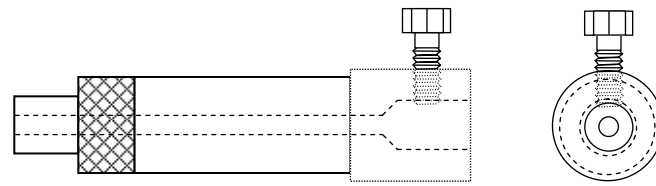
a.)



b.)

Figura 3.10. Longitudes del Material del Sustrato: a.) 145 mm – 150 mm y b.) 65 mm – 70 mm.

El “portaprobeta” cuenta con: a.) Una cavidad central para introducir una parte de esta probeta. b.) Un tornillo de métrica M8, es decir, de 8 mm de diámetro para sujetarla. c.) Un agujero central a lo largo del eje axial para sacarla en caso de un apriete y no pueda salir esta al aflojar el tornillo de sujeción, se introduce una varilla por la cavidad central y se empuja hasta lograr sacar la probeta, figura 3.11.



a.)



b.)



c.)

Figura 3.11. a.) Esquema de Portaprobeta, b.) Porta Probeta de la Medida de la Adherencia por el Ensayo de Cizalladura y c.) Forma de Introducir una Probeta en el Portaprobeta.

Las probetas para cizalladura, figuras 3.12 y 3.16, según el perímetro proyectado son: a.) probetas totales las que tenían recubrimiento en toda la superficie lateral (área=perímetro por altura = $P \cdot h$). b.) Probetas parciales a tres y cuatro trozos de la superficie lateral; es decir el recubrimiento proyectado es discontinuo en la superficie lateral en 3 o 4 trozos iguales. Para conseguir delimitar la altura de 15 mm o 20 mm del recubrimiento en las probetas totales y parciales, y además para realizar las discontinuidades de las partes iguales de 3 y 4, para las probetas parciales se fabricaron “piezas moldes” cuya función era proteger las áreas que no se quería

recubrir, en forma continua o discontinua en la altura especificada, figuras 3.13, 3.14 y 3.15.

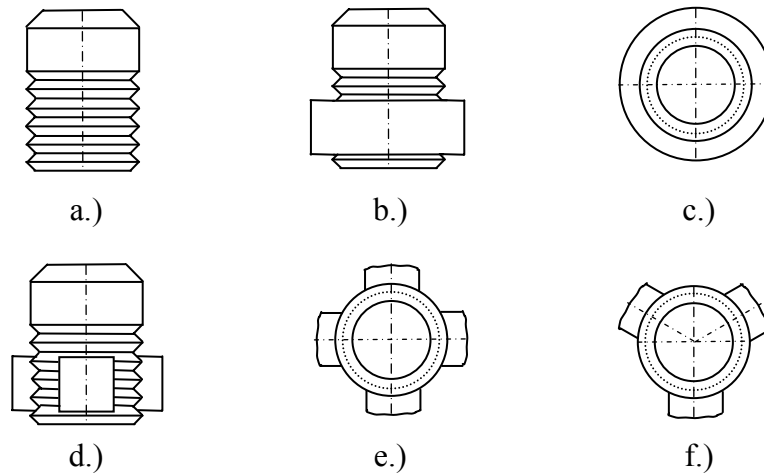


Figura 3.12. Esquemas de las Probetas Proyectadas con Rugosidad Roscada: a.) Sin Recubrimiento; b.) y c.) Probeta Total; d.), e.) y f.) Probetas Parciales con Cuatro Trozos en e.) y Tres Trozos en f.).



Figura 3.13. Piezas Moldes Fabricada para Probetas Totales.



Figura 3.14. Piezas Moldes Fabricada para Probetas Parciales a 3 Trozos

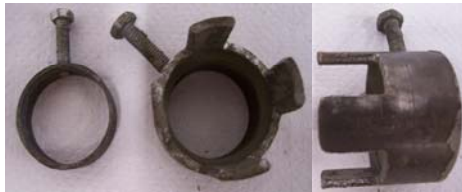
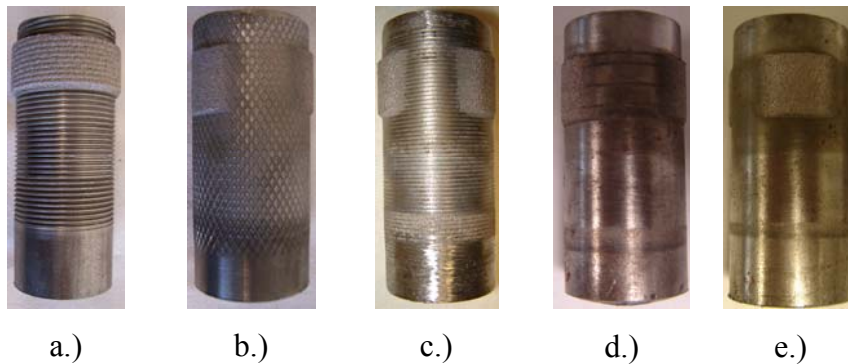


Figura 3.15. Piezas Moldes Fabricada para Probetas Parciales a 4 Trozos



a.)

b.)

c.)

d.)

e.)

Figura 3.16. Probeta Proyectada para cizalladura con Rugosidades de: a.) Roscado, b.) Moleteado, c.) Limado, d.) Ranurado y e.) Lisa.

Se realizaron procesos térmicos a las probetas proyectadas con polvos micropulverizados consistente en la: a.) colocación de las probetas en un crisol con sales previamente fundidas. b.) introducción del crisol con sales y los grupos de probetas en el horno o estufa a la temperatura de 400 °C aproximadamente y c.) permanencia del crisol dentro del horno o estufa con los grupos de probetas en los tiempos de proceso de 2 , 4, 6 , 8 y 10 hr. Las sales a base de nitrito sódico (PA-ACS) + nitrato potásico (KNO₃) al 50 % de Panreac Química, S.A.; sodio nitrito(NaNO₂, M=69,00), código del producto: 131703, funden sobre los 135 a 140 °C y son operativos hasta los 500 °C, aunque no forzar, calentar hasta los 450 °C. Sirven para temple bainticos, matensíticos. En este caso, las probetas se introdujeron en una

estufa carbolite de capacidad de 1100 °C (máxima temperatura), serial N° 6/00/1524, tipo Elf 11/14. Observar en la figura 3.17 los pasos que se han venido describiendo.

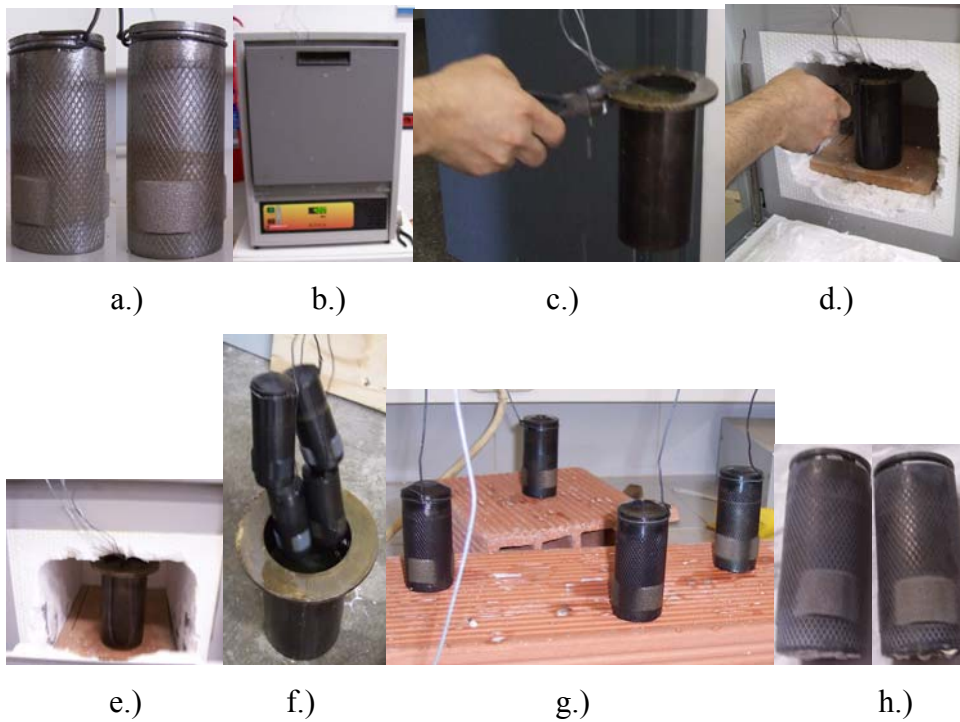


Figura 3.17. Probeta Proyectada para Cizalladura sometida a un Proceso Térmico de Sales en una Estufa a ≈ 400 °C. a.) Probetas Proyectadas. b.) Estufa. c.), d.) y e.) Introducción del Crisol con Sales a la Estufa. f.) y g.) Sacando de la Estufa el Crisol con las Sales y las Probetas. g.) Probeta Tratada Térmicamente.

3.2.3.2. Probetas del Ensayo de Dureza.

En este trabajo, se usará el ensayo de microdureza Vickers. La probeta debe prepararse cumpliendo las especificaciones de las normas ISO

1463, UNE-EN ISO 4516, 6507-1, 14923 y 657 [223, 224, 232, 234] para materiales metálicos, llevándose a cabo sobre una superficie lisa y uniforme, libre de óxidos y otras materias extrañas y, en particular, completamente libre de lubricantes, a menos que en las normas sobre el producto se especifique lo contrario. El acabado superficial debe permitir una determinación precisa de la longitud de la diagonal de la huella. El espesor de la probeta (recubrimiento – sustrato) a ensayar, debe ser al menos 1,5 veces mayor que la longitud de la diagonal de la huella. No debe aparecer ninguna deformación en la cara opuesta de la probeta después del ensayo. Para probetas de sección transversal pequeña o de forma irregular puede ser necesario utilizar algún tipo de soporte adicional, ver figura 3.18, [224].

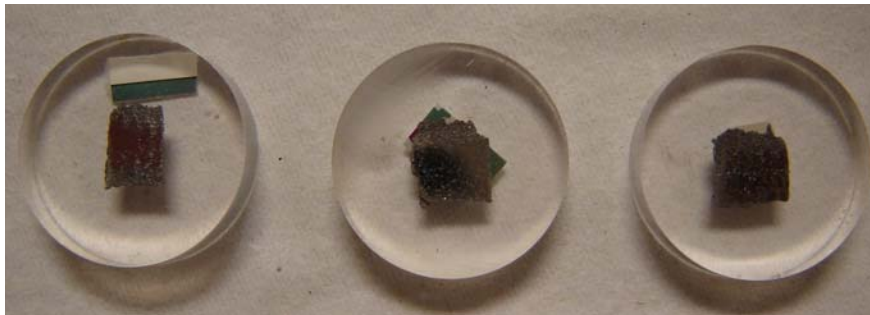


Figura 3.18. Probeta o Material de la Muestra para la Prueba de Microdureza Vickers.

3.2.3.3. Probetas del Ensayo de Desgaste Pin on Disk.

Para este ensayo de desgaste pin on disk se requieren dos probetas. Una es un pin que debe sostenerse rígidamente, tiene forma cilíndrica o

esférica (bola) de diámetro en el rango de 2 – 10 mm, la cual se posiciona perpendicularmente a la otra que usualmente es un disco circular plano de diámetro en el intervalo de 30 – 100 mm y tiene un espesor en el rango de 2 – 10 mm según la norma ASTM G 99 – 03 [237].

Las Probetas de disco, disk, figura 3.19, fueron chapas de: a.) Acero de bajo contenido de carbono o hierro pulida de calidad DC01 En 10.130/99 y composición química de: 0,04 % C; 0,19 % Mn; 0,011 % Si, 0,011 % S y 0,009 % P; b.) Acero inoxidable AISI 304 y composición química en peso de: 0,08 máx % C; 18 – 20 % Cr; 66,345 – 74 % Fe; 2 máx % Mn; 8 – 10,5 % Ni; 0,045 máx % P; 0,03 máx % S y 1 máx % Si y c.) Aleación de aluminio AA1060 y composición química en peso de: > 99,6 % Al.

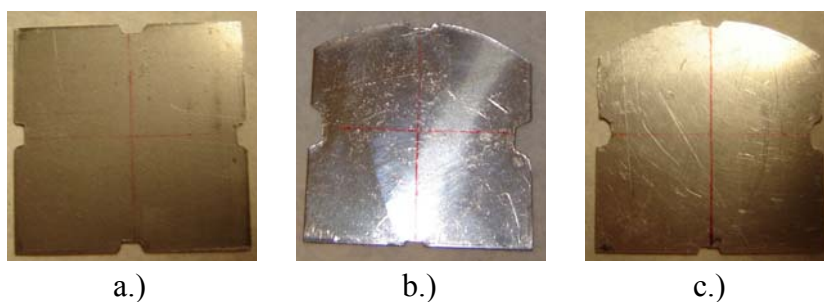


Figura 3.19. Probetas de Desgaste Discos de Chapas de: a.) Hierro o Acero de Bajo Contenido de Carbono, Acero Inoxidable 304 y c.) Aleación de Aluminio AA1060.

Las Probetas cilíndricas o pins, se obtuvieron de barras calibradas de acero F1140 de diámetro 8 mm, cortándose pequeños cilindros de 25 mm de largo con la tronzadora Struers Labotom. Luego se desbastó el área cilíndrica para conseguir la plenitud necesaria usando un taladro de torre, lima basta plana y papel de lija de granulometría 80. Una vez desbastada el área se procede a hacer las rugosidades, que consintieron en punzar o

granetear la base del pin sistemáticamente, obteniendo una altura media de los pequeños conos de 1 mm. En el proceso de perforación se utilizaron el martillo y para sujetar la probeta una prensa. Estas operaciones se realizaron manualmente. Finalmente, se proyectó con recubrimientos en dos aleaciones y de cada una dos composiciones diferentes la primera aleación fue de carburo de wolframio níquel 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, y la segunda aleación fue alúmina con óxido de titanio 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂. En las figuras 3.20, 3.21 y 3.22 se detallan los pasos descriptos.

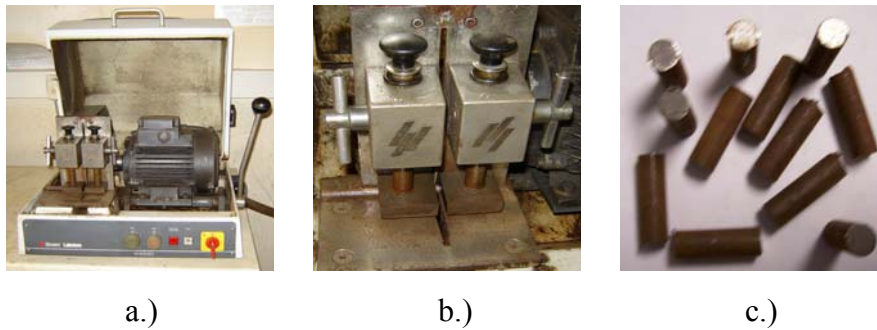


Figura 3.20. Pasos de Cortes de la Probeta Pins: a.) Tronzadora, b.) Sujeción y Ajuste para los Corte y c.) Probetas Pins Cortadas.

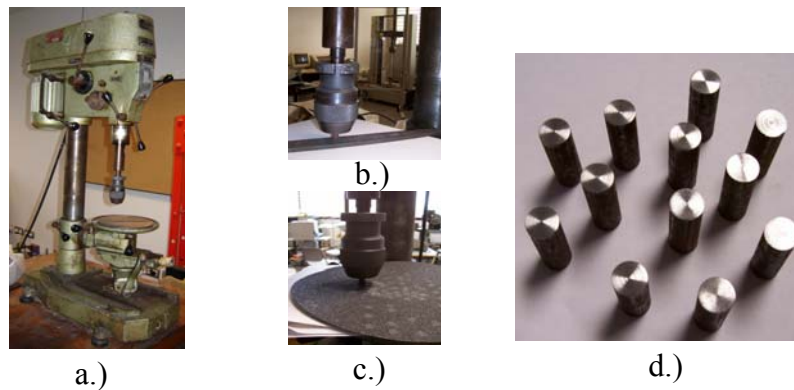


Figura 3.21. Pasos de Desbaste de las Probetas Pins: a.) Taladro de Torre, b.) Desbaste con Lima, c.) Desbaste con Lija 80 y d.) Probetas Pins Desbastadas.

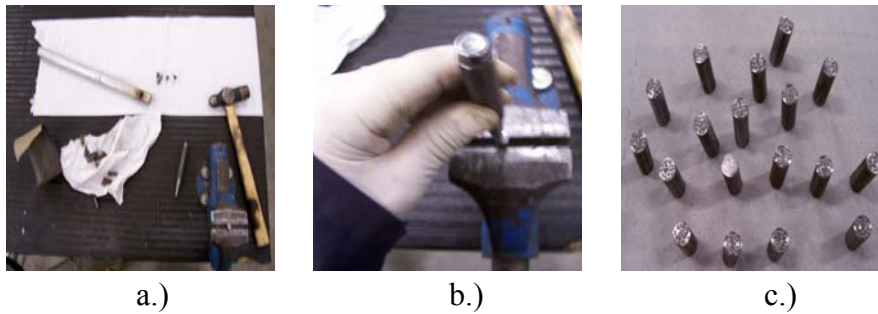


Figura 3.22. Pasos de Fabricación de las Rugosidades de los Pins: a.) Preparación Granate, Martillo, Prensa y Pieza Molde para Pins, b.) Procedimiento Manual y c.) Probetas Pins con las Rugosidades Perforadas.

Para conseguir proyectar las probetas pins se mecanizó una “pieza molde” para colocar tres pins cuya función era proteger tanto las áreas que no se querían recubrir como también el cabezal del torno y otras partes del mismo, esto fue posible haciendo la “pieza de molde” para pins de longitud 25 mm, para que los polvos empleados no causaran daños, ni la llama de la pistola de proyección alcanzara a dichas partes quedando las áreas transversales perpendiculares a los ejes axiales de los tres pins, figura 3.23.

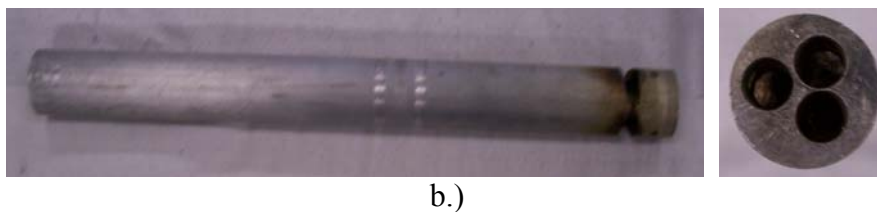
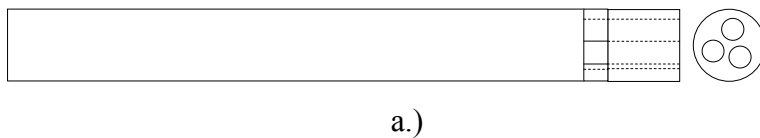


Figura 3.23. Piezas Moldes Mecanizada para Tres Probetas Pins: a.) Esquema de Porta Pins, b.) Fotografía de Porta Pins.



Figura 3.24. Forma de Introducir los Pins en la Pieza Molde.

Los tres pins se colocan en la “pieza molde” dejando una pequeña longitud fuera de la cavidad donde se introducen éstos; esta diferencia de nivel entre los pins y los espacios de la “pieza molde” permite la preparación de las probetas y una proyección adecuada de los polvos de proyección. Además la “pieza molde” cuenta con una ranura mecanizada en su parte cilíndrica que coincide con el fondo de los agujeros donde se deben introducir los pins; esta ranura permite sacarlos después de la proyección, ver figuras 3.24 y 3.25.

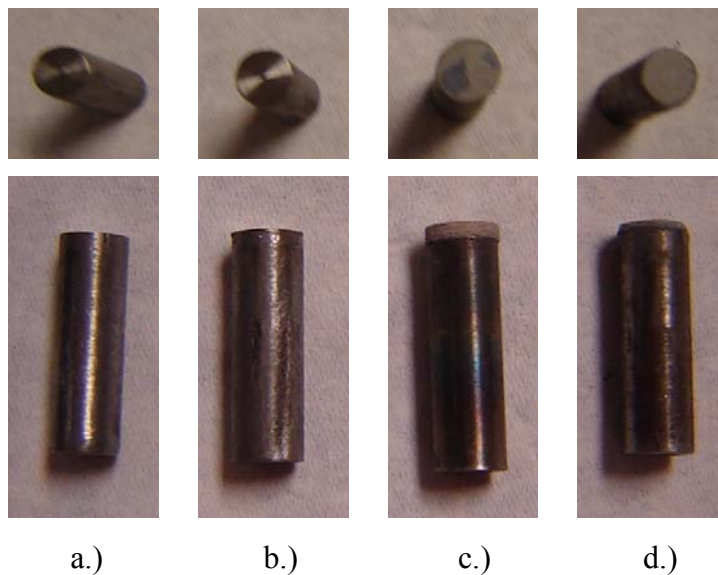


Figura 3.25. Probetas de Desgaste Pins Proyectados en los Siguiete Polvos: a.) 40%WC/60%Ni b.) 30%WC/70%Ni, d.) 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

3.3. Planificación de las Pruebas.

Las pruebas que se desarrollaron en la planificación de este trabajo según las normas que involucran los métodos metalográficos, los análisis de defectos, la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura y los ensayos de: dureza y desgaste pin on disk.

3.3.1. Pruebas de los Métodos Metalográficos.

Los métodos metalográficos permiten estudiar los materiales como los metales y sus aleaciones. En este trabajo, se emplearon las siguientes: 1.) Macroscopía óptica. 2.) Microscopías: óptica y electrónica de barrido.

3.3.1.1. Macroscopía Óptica.

La macroscopía óptica (lupa estereográfica) examina una área amplia y da la visión de toda la macroestructura del material, suministrando la información de: a.) Diferencias de concentración (segregaciones) de elementos de aleación o impurezas indeseables. b.) Inclusiones de combinaciones metálicas o no metálicas como presencia de óxidos. c.) Tratamiento termoquímico (procesos de difusión), orientación de la fibra como la obtenidas en el mecanizado. d.) Defecto de fabricación como grietas. e.) Deformación de los granos cristalinos como diferencia de acritud

por trabajo en frío. f.) Penetración del temple como la inducida por sobrecalentamiento.

En las observaciones que se realizan en las superficies de una muestra de material, se tienen: 1.) Observaciones naturales: sobre las fracturas producidas en servicio o provocadas, detallándose el aspecto de la rotura del grano, inclusiones, porosidades, grietas, penetración del temple, etc. [174, 204, 205, 206]. 2.) Observaciones preparadas: realizándose primero la preparación y desengrase de la superficie en este trabajo con alcohol (etanol 95 % vol., C_2H_6O , siguiendo la norma UN 1170), acetona según la norma UN 1090 (C_3H_6O 100 %), etc. y luego su ataque por impresión o inmersión, puede ser rápida de 1 segundo a 2 horas y lenta, de varias horas de duración.

En la realización de la macroscopía óptica se empleó una lupa estereográfica, figura 3.26, de marca Nikon y modelo SMZ800 del fabricante Nikon Corporation, a la que se le incorporaba una cámara de video digital marca Sony y modelo SSC – DC58AP del fabricante Sony Corporation.



Figura 3.26. Lupa Estereográfica con Cámara de Incorporada.

3.3.1.2. Microscopía: Óptica y Electrónica de Barrido.

Las microscopías: óptica (OM o MO) y electrónica de barrido (SEM o MEB) según las normas UNE-EN ISO 9220 y 14923 [233, 234], ASTM B 748 – 90 y E 1920 – 97 [235, 236], estudian áreas muy pequeñas y dan una visión de los detalles de la estructura dependiendo si es: 1.) Homogénea se admite que todo el material tiene la misma estructura que el área examinada. 2.) Heterogénea como en capas con tratamiento termoquímico la estructura sólo corresponde a la área examinada.

En la microscopía, los resultados se valoran estadísticamente y entre la información que suministra se tiene: a.) Constituyentes estructurales de las aleaciones. b.) Tamaño del grano, forma y procesos de formación. c.) Naturaleza de la microinclusiones metálicas o no metálicas; d.) Defectos microscópicos (porosidades, grietas, dislocaciones estructurales y grietas intergranulares, etc.). e.) Corrosión intergranular como zonas descarburadas. f.) Capas superficiales a causa de los tratamientos superficiales, tales como el temple a la llama y a procesos de difusión. Para la realización de las técnicas las superficies han de prepararse de forma que estén perfectamente pulidas y desengrasadas. Las observaciones microscópicas en una muestra de material pueden ser: 1.) Sin ataque, se podría apreciar inclusiones no metálicas, grietas, micro-porosidades, constituyentes con dureza y microdureza muy distinta de los restantes, etc.. 2.) Con ataque, se logra hacer visibles los bordes de los granos y constituyentes estructurales de la aleación [174, 204, 206, 236]. Entre las características que se distinguen en los microscopios ópticos y electrónicos están las longitudes de onda de la

luz y de los electrones diferenciadas por un factor de varios miles, por lo que la resolución y la profundidad de campo será mayor para la microscopía electrónica [206]. Los reactivos utilizados en este trabajo para las aleaciones proyectada de polvos micro-pulverizados de. a.) WC/Ni en proporciones de 40/60 y 30/70 en tanto por ciento en peso fue ácido nítrico (HNO_3) (50 – 100 ml) y agua destilada H_2O 50 ml, este reactivo fue usado al 50 % ataca en éste caso los componente químico de las aleaciones en base níquel (Ni), hierro (Fe), aluminio (Al), poros y líneas de flujo y b.) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ en relación 97/3 y 87/13 en tanto por ciento en peso fueron: a.) Nital 3 (97 ml etanol 3 ml de ácido nítrico HNO_3) y b.) Kroll (agua destilada H_2O 100ml, ácido fluorhídrico HF 3 ml y ácido nítrico HNO_3 6 ml) ataca al titanio (Ti) .

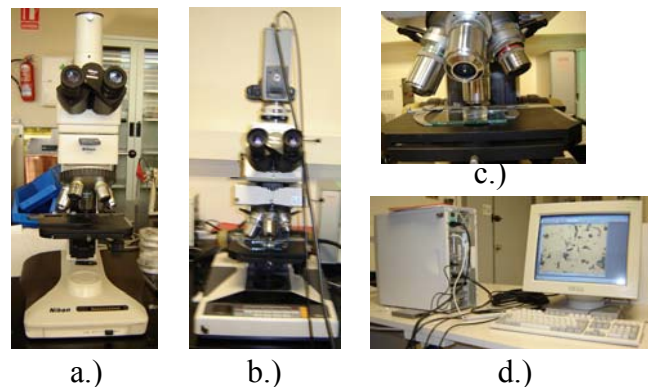


Figura 3.27. Microscopio Óptico Nikon: a.) Optiphot – 100S, b.) Microphot – FX, c.) Ordenador con Software Incorporado para Procesar y Presentar la Información Adquirida por la Cámara de Video Digital y d.) Detalle Objetivo del Microscopio Óptico y Probeta.

En la realización de microscopía óptica se emplearon dos microscopios, figura 3.27, marca Nikon y modelos Optiphot – 100S y Microphot – FX, la cámara de video digital que se le incorpora a estos

instrumentos es marca Sony modelo y modelo SSC – DC58AP del fabricante Sony Corporation.

En los recubrimientos de níquel-óxidos y carburos cerámicos, aplicados por proyección térmica, empleado microscopía óptica a cada recubrimiento se le ha hecho microfotografías a 100x y 400 x de aumentos en el microscopio utilizando la cámara de videos accionándola con un programa para capturar las imágenes, luego a través del programa XnView las microfotografías a 100 x, para la determinación de las porosidades se han llevado o transformándolo a escala de grises, luego se usa el programa Visilog 5 y Visilog 6.4 especializado en varias funciones entre la cual se encuentra la de poder determinar la porosidad haciéndose uso de las imágenes en escala de grises se llevan acabo los siguientes pasos: abrir la imagen que se desea, procesar la imagen para que se pueda tratar, indicar los poros en la imagen rellenándolos haciendo uso de la escala para diferenciarlos, binarizar en grises la imagen y por último realizar el análisis para la determinación de la porosidad, figura 3.28.

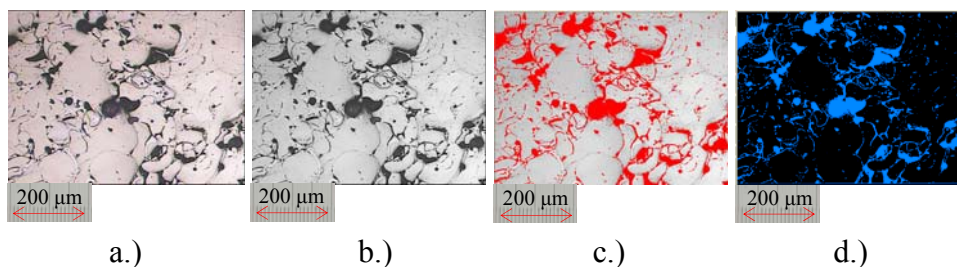


Figura 3.28. Microscopía Óptica a 100x de la Probeta R1A a.) Imagen a Color, b.) Imagen a Escala de Grises, con el Programa Visilog: c.) Imagen Procesada Diferenciándose los Poros, d.) Imagen Binarizada,

Para hacer la microscopía electrónica de barrido se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) del fabricante Jeol modelo JSM 6300, equipado con detectores de imágenes de electrones secundarios y retrodispersados y con espectrómetro de energía dispersiva de rayos X de Oxford Instruments, para realizar microanálisis de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS), y un software el INCA Microanalysis Suite para presentar la imagen observada en el microscopio y procesar los datos adquirido del microanálisis EDS. Las condiciones de trabajos para la adquisición de datos fueron: a.) Voltaje de aceleración de electrones de 20 kV. b.) Distancia de trabajo en el intervalo de 13 mm a 20 mm. c.) Aumentos de: 20x, 50x, 400x y 2000x para imágenes y realización de espectros puntuales, figura 3.29.

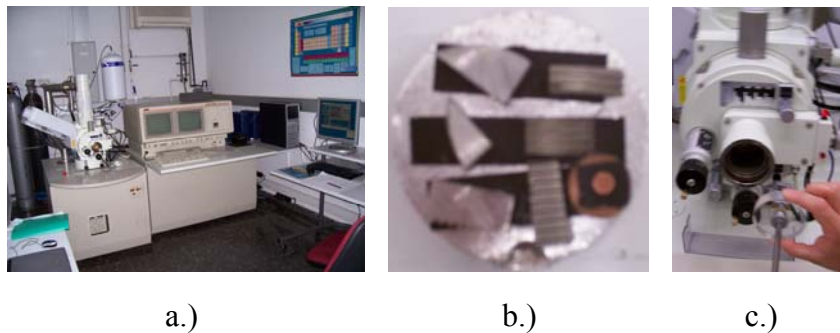


Figura 3.29. Microscopía Electrónica: a.) Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y EDS. b.) Montaje de Probetas. C.) Introducción de las Probetas.

3.3.2. Pruebas de los Análisis de Defectos.

Los análisis de defectos que se realizarán en este trabajo serán la: 1.) Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X. 2.) Emisión acústica.

3.3.2.1. Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X.

La espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) según la norma ASTM F 1375 – 92 [238], es una técnica de microanálisis analítica deriva, en este caso, de la microscopía electrónica de barrido (SEM) según las normas UNE-EN ISO 9220 [233] y ASTM B 748 – 90 [231], que permite la caracterización de todo tipo de materiales sólidos. Este microanálisis se fundamenta en la emisión de rayos X característicos, cuando un haz de electrones incide sobre una muestra y permite analizar muestras muy pequeñas o estudiar áreas muy pequeñas de muestras mayores. En un espectro de rayos X, la medida de la longitud de onda (energía o cantidad de rayos X emitidos por segundo), permite determinar los elementos que están presentes en las superficies de la muestra, es decir, realizar un análisis cualitativo de cualquier componente del material, pudiéndose comparar la composición elemental de superficies normales con cualquier defecto que se encuentre en la superficie del material [238].

El espectrómetro de energía dispersiva de rayos X de Instrumentos Oxford para realizar microanálisis de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) forma parte del microscopio electrónico de barrido (SEM) conjuntamente con el software el INCA Microanalysis Suite presenta la imagen observada en el microscopio y procesa los datos adquirido de microanálisis por el espectrómetro en los puntos señalados en la imagen presentándola en espectros visuales. Las condiciones de trabajo son las mismas mencionadas para el SEM y además la siguiente condición de adquisición de espectros por puntos tiempo de vida de adquisición de 100 s.

3.3.2.2. Emisión acústica.

La emisión acústica sucede en un medio material o debida a un proceso, en forma de ondas elásticas transitorias y su detección puede incluir uno o más canales por medio de uno o varios sensores usualmente son elementos piezos-eléctricos transductores de ondas mecánicas en señales eléctricas que contienen información sobre el comportamiento interno del material como crecimientos de grietas, cambios en la estructura del material, etc.; si el sonido es aperiódico, es decir, las sucesivas perturbaciones no se producen en intervalos regulares como las ondas sinusoidales (continua, triangular y rectangular) y no mantiene constante su onda captada se denomina señal de ruido, según las normas UNE-EN 13477-1 y 2 [239, 240], 1330-9, 13554 [241, 242], figura 3.30.

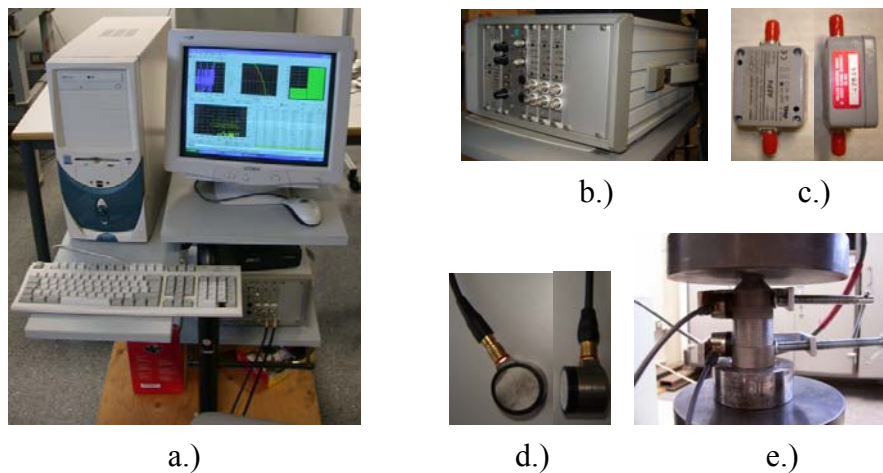


Figura 3.30 a.) Equipo de Emisión Acústica, b.) Módulo de EA, c.) Amplificadores, d.) Sensores Piezos-Eléctricos y e.) Montaje en el Ensayo de Cizalladura de los Sensores Sujetado en la Probeta a través de Sargentos o Gatos.

El equipo de emisión acústica (EA) esta conformado por un sistema de control con un software Vallen Acoustic Emisión Suite de la compañía de emisión acústica Vallen Systeme que permite la adquisición y visualización de datos a través de un módulo de adquisición de emisión acústica, configurado por: 2 sensores piezos-eléctricos resonantes a 150 KHz conectado con cables respectivamente a 2 amplificadores con ganancia de 34 dB los cuales están conectado a su vez a dos canales del módulo, límite inferior de detección de 40 dB, tiempo de rearme: 3,2 ms y tiempo de discriminación: 400 μ s .

La emisión acústica en esta investigación sucede debido a un proceso mecánico que acompaña a la prueba de la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura. El software Vallen Acoustic Emisión Suite de adquisición y visualización instalado en el sistema de control del equipo de emisión acústica (EA) se ejecuta abriendo el acceso directo Vallen Control Panel acción que despliega un menú con varios iconos, en el cual se pincha primeramente el icono de adquisición de datos AMSY-5 para proceder a la configuración del sistema de adquisición de datos del módulo de EA y crear un archivo de datos. Realizado esto se pulsa el icono de visualización VisualAE, abriéndose el archivo de datos para visualizar las graficas pertinentes a la EA producida en la prueba de la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura.

3.3.3. Pruebas de los Métodos Mecánicos.

Las pruebas que se realizaron usando los métodos mecánicos son: 1.) Pruebas de medida de la adherencia por ensayo de cizalladura. 2.) Pruebas del ensayo de dureza. 3.) Pruebas del ensayo de desgaste pin on disk.

3.3.3.1. Pruebas de la Medida de la Adherencia por Ensayo de Cizalladura.

En el ensayo de cizalladura se determinó el comportamiento de un material sometido a un esfuerzo cortante, progresivamente hasta conseguir la rotura por deslizamiento a lo largo de la sección de corte. En ésta prueba de medida de la adherencia por el ensayo de cizalladura se utilizó la máquina prensa universal de ensayo del fabricante Instron, modelo 4204, figura 3.31.



a.)



b.)

Figura 3.31. Máquina Prensa Universal de ensayo Instron, modelo 4204, a.) Sistema de Control y b.) Prensa.

En el montaje utilizado en el ensayo de cizalladura, para cada experimento, se aprecia la probeta terminada en cono, para tener mínima área y por ende contacto más estable con la mordaza de la máquina de ensayo, Instron. La carga es de tipo de compresión aplicada en forma perpendicular y centrada sobre la probeta en la área mínima transversal, para contar con la estabilidad en este ensayo. También se ilustra la forma como se introduce el otro extremo de la probeta en la pieza cilíndrica hueca cónica fabricada, o matriz de corte, que sirve para realizar el cizallamiento o arrastre del recubrimiento proyectado sobre el sustrato de acero, figura 3.32.

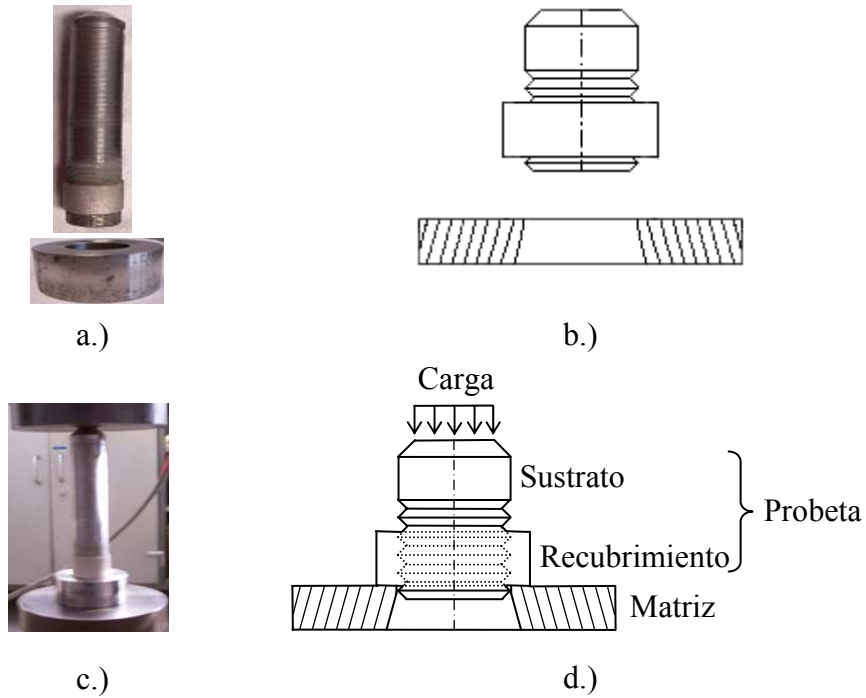


Figura 3.32. Destalles del Montaje del Ensayo de Cizalladura: Fotografías en a.) y c.) y Esquemas en b.) y d.).

Para realizar la prueba se emplearon las matrices de corte con diámetros de 30,0 mm; 30,1 mm; 30,2 mm y 30,3 mm; debido a estas tolerancias 0,1 mm entre cada matriz, se pudo cizallar los recubrimientos proyectados en distintos tipos de rugosidades, figura 3.33.



Figura 3.33. Matrices de Corte de diámetros a.) 30,0 mm b.) 30,1 mm; c.) 30,2 y d.) 30,3.

Área de cizalladura en las probetas con diferentes rugosidades y según el perímetro proyectado, deducción en coordenada cilíndrica en un elemento de área ΔA , figura 3.34.

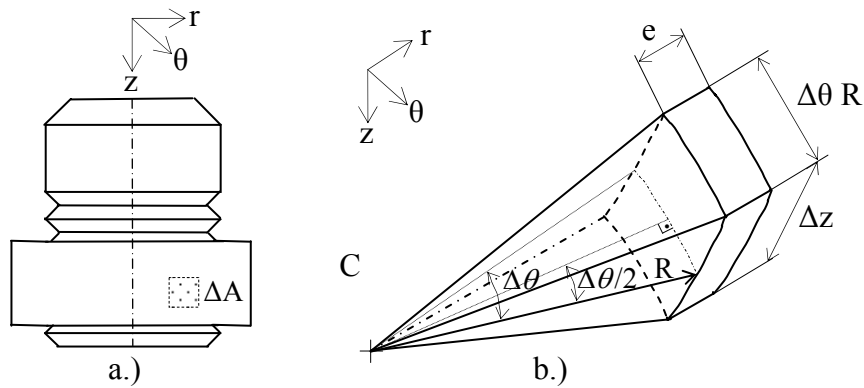


Figura 3.34. Esquemas: a.) Probeta Proyectada Señalándose un Elemento de Área ΔA y b.) Elemento de Área ΔA en Forma Macro Usándose Coordenada Cilíndrica.

$$\Delta A = \Delta \theta R \Delta z = \Delta \theta / 2 D \Delta z \quad (3.1)$$

Donde en la probeta proyectada $\Delta \theta R = L$ es el ancho del recubrimiento, $\Delta z = h$ es su altura y e es su espesor.

Para una probeta total cuando el recubrimiento tiene continuidad en todo el área lateral el ancho es la longitud del perímetro $L = \pi D$ se tiene el ángulo del círculo, es decir $\Delta \theta = 2\pi$, entonces sustituyendo este ángulo, el área de cizalladura A_{cT} resulta:

$$A_{cT} = \Delta A = 2\pi / 2 D \Delta z = \pi D h \quad (3.2)$$

Para una probeta parcial a tres y cuatro trozos cuando el recubrimiento es discontinuo en sectores del perímetro L y en partes iguales de 3 y 4 pedazos, se tiene el ángulo del arco o sector circular por relaciones de trigonometría $\Delta\theta = 2 \arcsen(L/D)$, luego sustituyendo y simplificando se obtiene la ecuación para el área de cizalladura A_{cP} de una parte:

$$A_{cP} = \Delta A = (2 \arcsen(L/D)/2) D h = \arcsen(L/D) D h \quad (3.3)$$

La ecuación (3.3) para calcular el área de cizalladura en las probeta parciales a tres y cuatro trozos se multiplica por 3 o 4.

El módulo transversal de corte G en la zona elástica, sea el elemento de Área ΔA , figura 3.35, fijo en una sección extrema $O-O$ de su parte empotrada sometida a una carga $\Delta F = \Delta P$, cuya reacción es la carga cortante ΔV de igual magnitud a la carga aplicada ($\Delta V = \Delta F$), dirección paralela o tangencial a la sección de corte o cizalladura ($\Delta A // \Delta V // \Delta F$), pero en sentido opuesto. Se produce una deformación, muy pequeña, es una distorsión o deformación angular $\overline{AA'} \approx \overline{AA''}$, dentro de la zona elástica de proporcionalidad; del triángulo $\Delta OAA''$ se tiene el ángulo de corte $\Delta\alpha$ por trigonometría la $\tan \Delta\alpha = \overline{AA''} / \overline{OA} \approx \Delta\alpha$, donde $\overline{OA} = e$ es el espesor del recubrimiento. El esfuerzo de cizalladura o de corte $\tau = \Delta V / \Delta A$, coincidente con el plano de la sección ΔA . Del diagrama de esfuerzo de corte versus deformación por cizalladura se obtiene por trigonometría la $\tan \Delta\alpha = \Delta\tau / \Delta\varepsilon = G$; esta expresión $\tau = G\varepsilon$ constituye la ley de Robert Hooke (1635 – 1703) [243] que establece que el esfuerzo cortante τ es proporcional al producto del módulo de elasticidad transversal o de rigidez por la deformación por corte ε .

Luego el esfuerzo de cizalladura se determina por:

$$\tau = P/A_c = G\varepsilon \quad (3.4)$$

Para una probeta total el esfuerzo se obtiene sustituyendo la área de corte $A_c = A_{cT}$ ecuación (3.2) en la ecuación (3.4), resultando:

$$\tau = P/\pi D h \quad (3.5)$$

Para una probeta parcial de un trozo el esfuerzo se calcula sustituyendo la área de corte $A_c = A_{cP}$ ecuación (3.3) en la ecuación (3.4), obteniéndose:

$$\tau = P/ \arcsen(L/D) D h \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) se divide por 3 o 4 para determinar respectivamente el esfuerzo de cizalladura en la probeta parciales a tres y cuatro trozos.

La cruceta móvil M de la prensa Instron antes de comenzar su desplazamiento se posiciona manteniéndose por un momento en reposo, desplazamiento y tiempo cero, mientras se programa el ensayo de cizalladura por compresión, introduciéndose en el sistema de control los datos y el método de compresión donde se ha programado la velocidad lineal de la cruceta móvil en $V = 0,25$ mm/min. Cuando comienza la adquisición de datos, ésta cruceta M se mueve con movimiento rectilíneo recorriendo la trayectoria en una línea en dirección y sentido de la cruceta

fija F de la prensa, para un instante cualquiera se puede determinar el tiempo $t = \delta/V$, considerando la velocidad de la cruceta V y el desplazamiento δ adquirido en ese instante, figura 3.36.

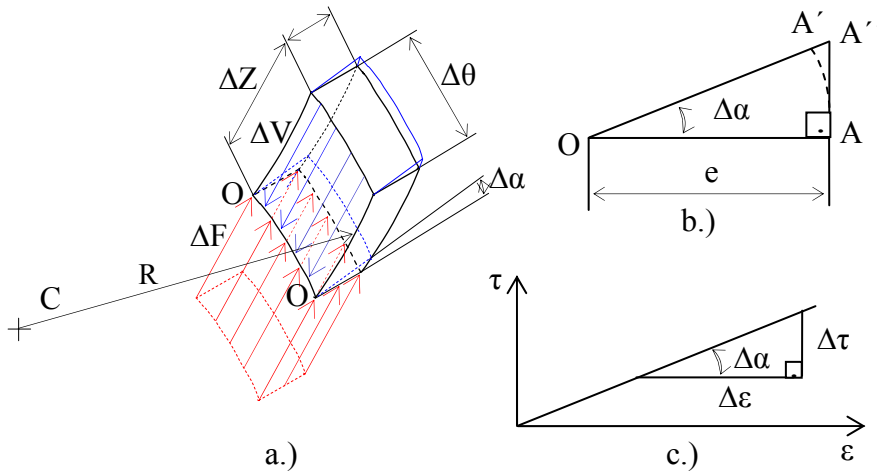


Figura 3.35. a.) Distorsión Producida por la Fuerza Cortante en la Sección ΔA y b.) Esquema del Desplazamiento Angular AA' y c.) Diagrama Esfuerzo Cortante versus Deformación Angular ($\tau - \epsilon$).

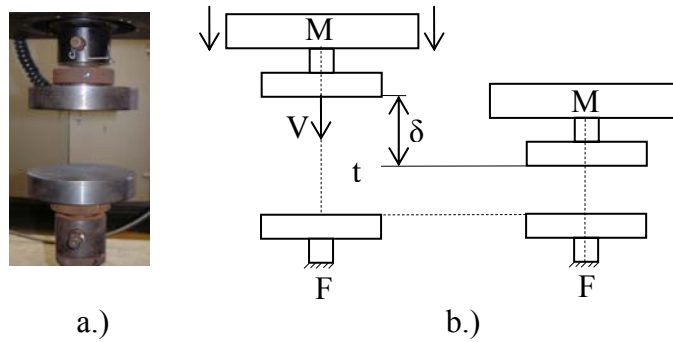


Figura 3.36. Cruceta Móvil y Fija de la Prensa Instron a.) Real y b.) Esquema.

3.3.3.1.1 Metodología para la Proyección Térmica por Llama.

En el proceso de proyección térmica por llama se siguió la siguiente metodología:

a.) Preparación superficial para asegurar una adherencia óptima al sustrato según la norma UNE-EN 13507 [205] y referida en el Capítulo I, puntos 1.3.1, 1.4.2.6 c y 1.5.1.2. La preparación superficial de manera mecánica sirve para arranca de la superficie del sustrato una fina capa a través de procesos mecánicos antes de proyectar cualquier recubrimiento al sustrato. La preparación mecánica se realizó mecanizando las probetas con dimensiones de 65 mm – 70 mm y 145 mm –150 mm de largo cortadas en barras cilíndricas de 30 mm de diámetros de aceros F-1110, según la UNE. Luego, con el objeto de mejorar la adherencia se realizaron las diferentes rugosidades sobre el sustrato de acero, ver punto 3.2.3.1 y Capítulo I, punto 1.5.1.2.2. Para cada tipo de probeta antes de proyectarse el recubrimiento se remueve de la superficie mecanizada los óxidos y partículas extrañas por medio de un cepillo de limpieza de alambre colocado en un taladro, para hacerlo girar enfrentándolo con la probeta colocada en el cabezal giratorio del torno de proyección, figura 3.37.

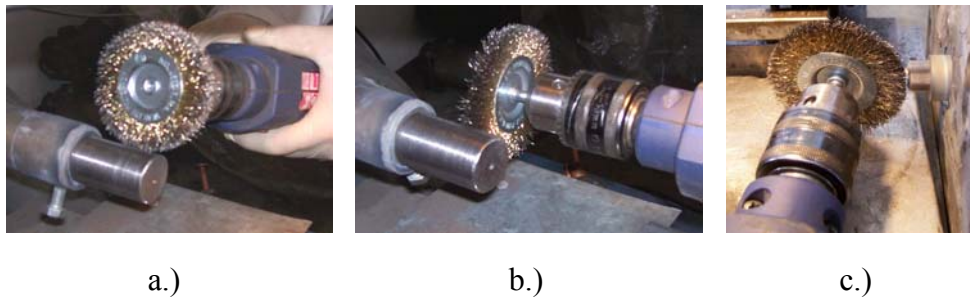


Figura 3.37. Proceso de Remoción de Óxido y otras Partículas Adheridas al Sustrato con Cepillo de Limpieza: a.) Probeta de Cizalladura y c.) Probeta Pin.

b.) Preparación química, Capítulo I, punto 1.3.1.2, se aplica para eliminar de la superficie del sustrato, los residuos, en este caso se emplea el desengrase de la superficie de la probeta que se hace girar en el cabezal del torno enfrentando una brocha impregnada con acetona (C_3H_6O) que fue vertida en una cápsula cerámica para facilitar mojar la brocha, figura 3.38.

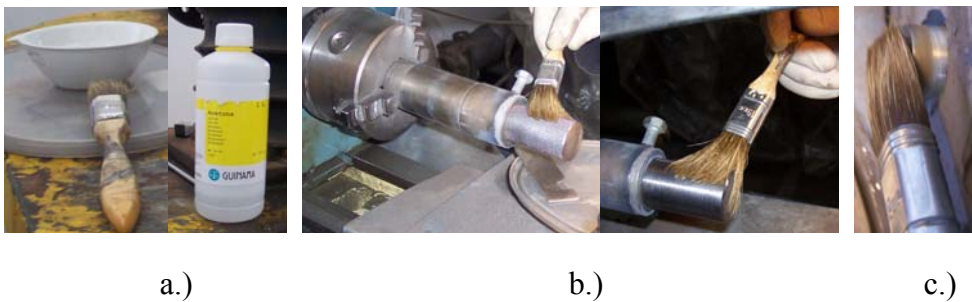


Figura 3.38. Preparación Superficial del Sustrato: a.) Materiales Utilizado Cápsula, Brocha y Acetona. b.) Desgrasado para Probeta de Cizalladura. c.) Desengrasado para Probeta Pin.

c.) Dimensionar la zona que será proyectada con el utillaje preparado (piezas moldes y calibre de altura), punto 3.2.3.1, figura 3.39.

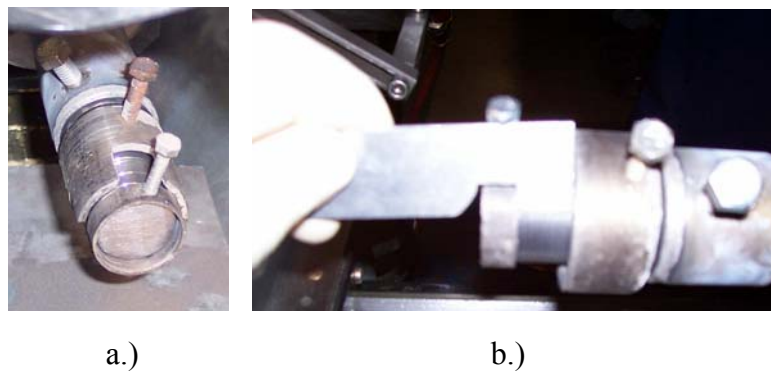


Figura 3.39. Dimensionado del Recubrimiento: a.) Colocación de Piezas Moldes y b.) Ajuste de la Altura con el Calibre.

Se ha medido la temperatura de la superficie del sustrato de acero antes de realizar la proyección térmica de los materiales en polvos con un termómetro infrarrojos que mide sin tener contacto con el objeto opaco. Hay que tener en cuenta para medir la temperatura la característica referida a la emisión de energía del material debido a que el fabricante Raytex en el manual del instrumento (Raynger ST, RS 373-8499) indica que el sistema óptico del termómetro detecta energía emitida, reflejada y transmitida, las cuales son captadas y enfocadas hacia el detector y luego ésta información el sistema electrónico la convierte en una lectura de temperatura, el termómetro posee un láser que es exclusivamente para apuntar; el fabricante recomienda aproximadamente para el acero la emisividad (EMS) de 0,80 y una distancia corta para la realizar la medición (distancia de ubicación recomendada por el fabricante 0,50 m). El termómetro cumple la certificación (CE), satisfaciendo las normas EN61326-1 Emisiones electromagnéticas, EN61010-1, EN60825-1 Seguridad.



Figura 3.40. Detalles de la Medición de la Temperatura en la Probeta (Sustrato).

En la figura 3.41. se ilustran los equipos para la graduación de las presiones de los gases: para realizar el proceso de combustión intervienen el comburente el oxígeno (O₂), bombona de color negro con ojiva de color

blanco, regulando en la bombona a través de la válvula el consumo de oxígeno para ajustarse en el manómetro la presión de 4,5 bar, cuando se tiene esta presión de 4,5 bar la posición en el sistema de control de la pistola de proyección debe coincidir con el número de identificación correspondiente a cada elemento del módulo de proyección y el combustible el acetileno (C_2H_2), bombona de color rojo con ojiva de color marrón, debe ajustarse en el manómetro de control a la presión de 0,7 bar, el gas de transporte, el aire comprimido, debe ajustarse en el manómetro a la presión entre 1,5 a 2 bar para focalizar el haz proyectado en el soplete que a través de la válvula de aire comprimido de dos posiciones (verde abierto y rojo cerrado).

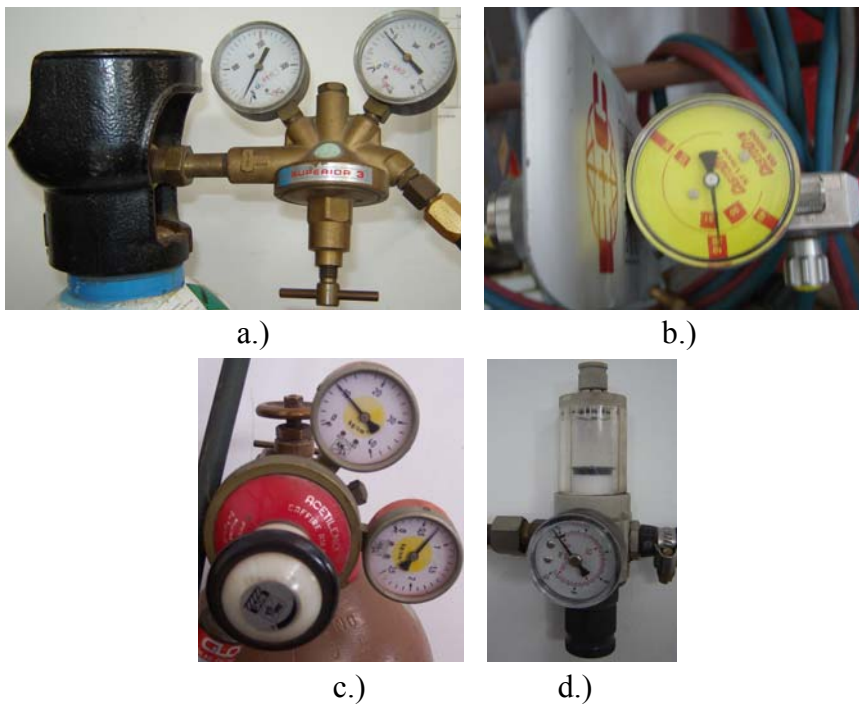


Figura 3.41. Equipos para las Graduaciones de las Presiones de los Gases Usado: a.) Manómetro para el Oxígeno. b.) Sistema de Control del Soplete. c.) Manómetro de Acetileno. D.) Manómetro para el Aire.

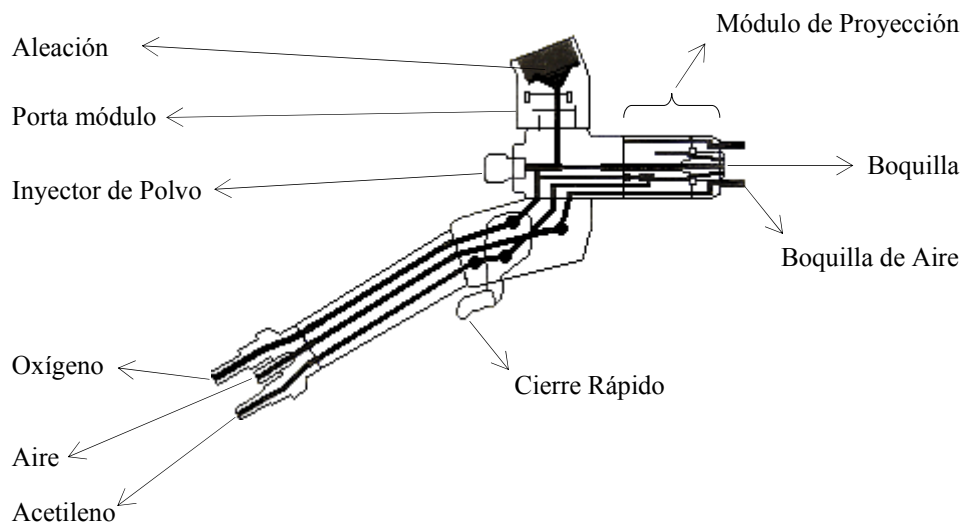


Figura 3.42. Esquema del Funcionamiento del Soplete Castodyn D.S. 8000

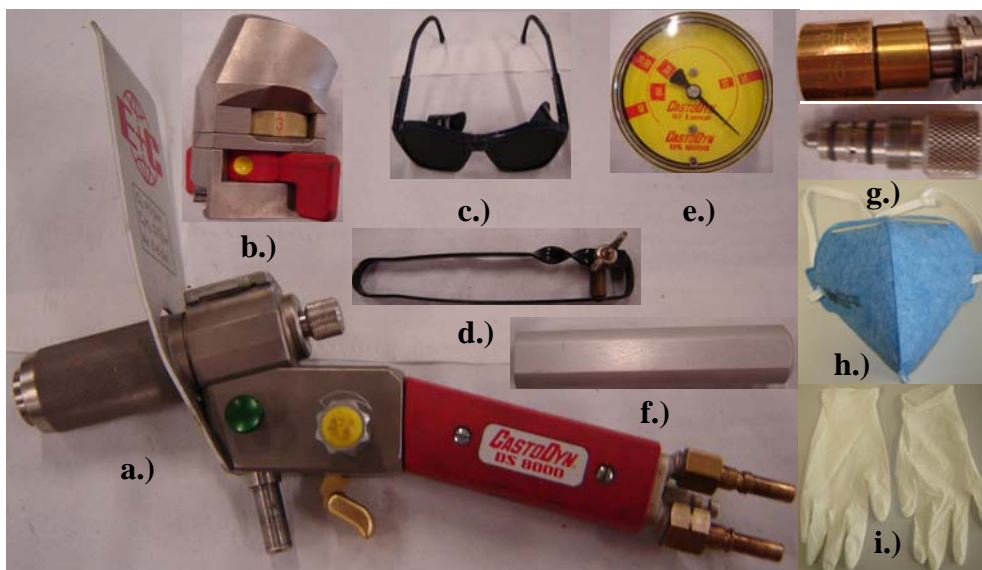


Figura 3.43. Equipo Básico: a.) Soplete Castodyn D.S. 8000. b.) Portamódulos con el Diafragma y el Obturador. c.) Gafa de Protección. d.) Encendedor. e.) Sistema de Control (Manómetro). f.) Soporte. g.) Módulo de Proyección. h.) Mascara de Polvo. i.) Guante de Latex.



Figura 3.44. El Soplete con los Accesorios y la Forma de Instalación.

En las figuras 3.42, 3.43. y 3.44. se muestra el tipo de soplete a usar en este trabajo tiene la siguiente especificación Castodyn DS 8000 de Castolin Eutectic, en el escudo protector se indica los gases y las proporciones recomendadas (O_2 : 4,0 bar; C_2H_2 : 0,7 bar y aire: 0 – 6 bar). El cuerpo del soplete dispone de tres entradas de gases para conexiones rápidas, como es un equipo óxido-acetilenico los gases empleado son el oxígeno (O_2) y el acetileno (C_2H_2), en esta investigación la proporción de los gases para la combustión fue $O_2/C_2H_2 = 45/ 7$ y el aire comprimido como gas transportador entre 1 a 2 bar. Con este soplete se realiza la proyección térmica por llama usando polvos micro-pulverizados, los cuales se calienta dentro de la cámara de combustión del soplete a aproximadamente 3200 °C. En el soplete DS 8000 el consumo de aleación se regula con el diafragma de seis posiciones y con el obturador de dos posiciones: cerrado, punto amarillo para permitir el montaje y desmontaje del portamódulos, y abierto, punto verde para bloquear el portamódulos sobre el cuerpo del soplete durante el paso de la aleación. Con este soplete

óxido-acetilenico se puede obtener los diferentes tipos de llamas, oxidante, neutra y reductora regulando la válvula del acetileno. Además en el cuerpo del soplete tiene una llave de cierre rápido de gases y secuencial (abierto hacia delante, cerrado hacia atrás), espárrago de fijación, escudo protector y los módulos de proyección (Standard Spray Module o S.S.M.) y el inyector de polvo, que determina el consumo del gas de transporte de la aleación identificado y el bloque de proyección o módulo del potencia (boquilla – difusor) [93].

Debido a que los recubrimientos de aleaciones en base WC/Ni y Al_2O_3/TiO_2 a proyectar, las figuras 3.45 y 3.46, no tienen afinidad con el sustrato F-1110, se aplican los predepósitos de capas de anclajes de aleación de en base níquel (Ni) sobre el sustrato según la norma UNE-EN 13507 [205], valiéndose de la afinidad entre los materiales y su composición química, con el objeto de modificar el sustrato para hacer posible la adherencia con el recubrimiento deseado.



Figura 3.45. Etapas de Proyección Térmica por Llama para una Probeta de Cizalladura.

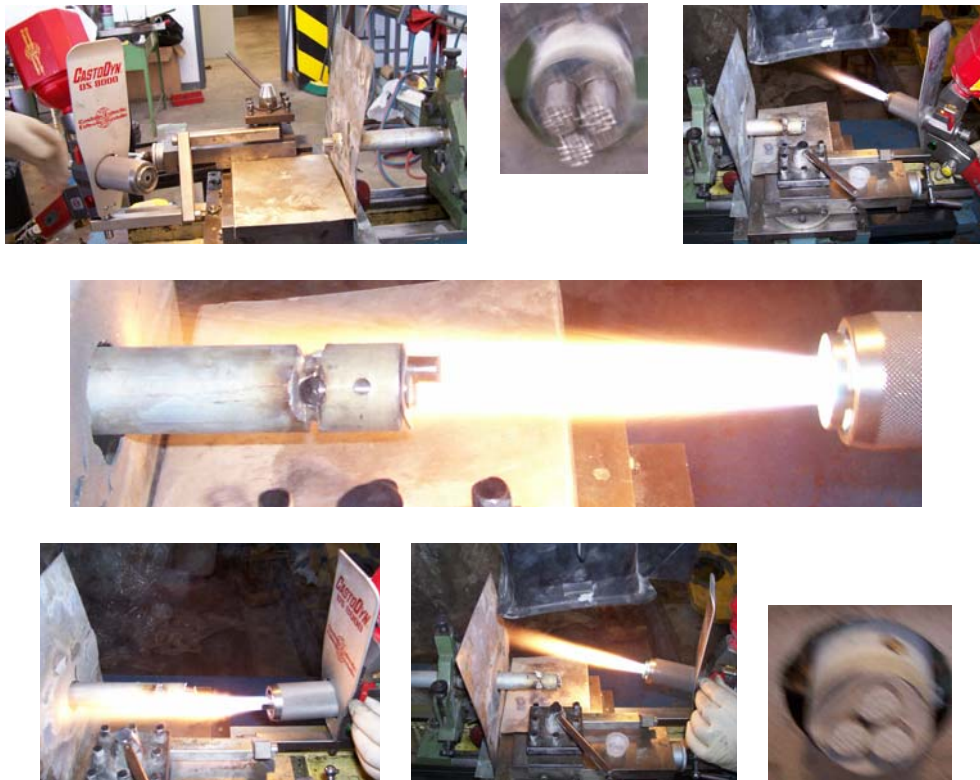


Figura 3.46. Etapas de Proyección Térmica por Llama para un grupo de Probetas de Pins.

La distancia de proyección para la aleación WC/Ni fue 200 mm y para capa de enganche en base níquel fue 200 mm, se utilizó la boquilla SSM-10 y respectivamente con el inyector o difusor de polvo, SSM-10. El conjunto boquilla – inyector se emplea para realizar proyección en frío, para granulometría entre 38 y 125 micras corresponde el tamiz de polvo número 3, la velocidad de rotación del sustrato en el torno de proyección fue 200 R.P.M y la velocidad de desplazamiento fue 180 mm/min.

La distancia de proyección para la aleación Al_2O_3/TiO_2 fue 85 mm y para capa de enganche en base níquel fue 200 mm, se utilizó la boquilla SSM-30 y respectivamente con el inyector de polvo SSM-30, este conjunto

boquilla- inyector se utiliza para realizar proyección de aleaciones con punto de fusión elevado, para granulometría entre 40 y 60 μm corresponde el tamiz de polvo número 4, la velocidad de rotación del sustrato en el torno de proyección fue 200 R.P.M y la velocidad de desplazamiento fue 180 mm/min.

Dichos experimentos se harán con probetas cilíndricas de diámetro 30 mm, sustrato acero al carbono F-1110, según la UNE y se repetirán con cada tipo de prueba entre las cuales se tendrán las que se describieron en el punto 3.3, polvos micropulverizados compuestos de níquel (Ni) y de cerámica tipo dura de carburo de tungsteno o wolframio (WC), adicionándose el metal Ni, el cual sirve de capa de anclaje, resultando las aleaciones en base WC-Ni en relaciones de 40/60 y 30/70 en tanto % de peso, es decir una de 40%WC-60%Ni y la otra de 30%WC-70%Ni.

3.3.3.3. Pruebas del Ensayo de Dureza.

En este trabajo, a través del ensayo de microdureza Vickers, el cual mide la resistencia de un material a la penetración de un punzón [13, 182, 193, 194, 195, 198, 199, 200, 202, 206, 219, 222, 223, 224, 245], que consiste en un penetrador de punta de diamante tallada en forma de pirámide vertical con base cuadrada, el cual baja lentamente y en vertical hasta entrar en contacto con la superficie de la muestra y permanece allí durante un tiempo y carga especificada, dejando la marca o huella midiéndose sus diagonales con un microscopio, determinándose el número de dureza Vickers a través de la carga y la media de las diagonales [206, 221, 223, 224, 234, 245, 246, 247, 248], según las normas UNE-EN ISO 4516 y 14923, este método se aplica en recubrimientos metálicos y no orgánicos, cuando el esfuerzo ejercido por el penetrador necesita ser generalmente < 10

N, como en el caso de los recubrimientos por proyección térmica de este trabajo [223, 234]; también en las normas UNE-EN ISO 6507-1, 14923 y 657 se refiere su contenido al ensayo de microdureza Vickers en materiales metálicos [224, 232, 234]. Este ensayo nunca se debe hacer cerca del borde de la muestra o de otra penetración ya existente. La mínima distancia para efectuar una nueva penetración es de 3 veces el diámetro de la impresión anterior. El espesor de la probeta debe ser, por lo menos, $10 \frac{1}{2}$ veces la profundidad de la impresión [245].

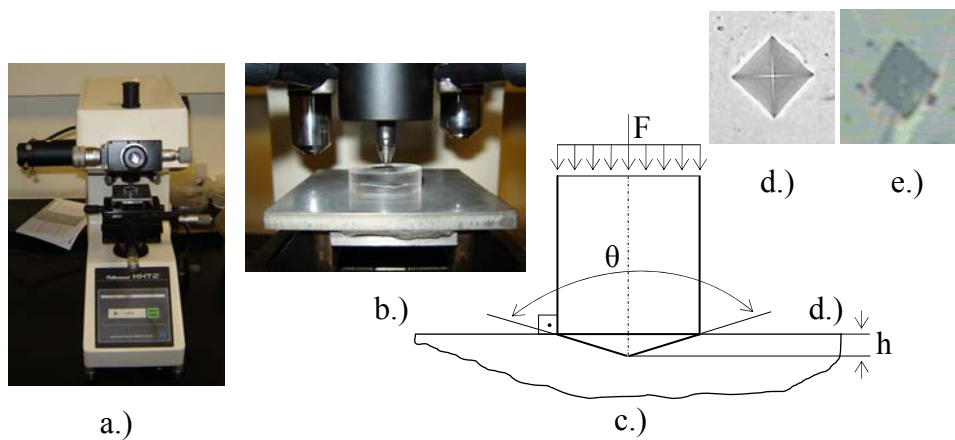


Figura 3.47. Fotografías en a.) del Microdurometro y en b.) Detalle de la Prueba; en b.) y c.) la Prueba Vickers en b.) Real. c.) Esquema. Huellas Marcada por las Aleaciones: d.) WC/Ni y e.) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$

Las pruebas de microdureza Vickers se realizaron con un microdurometro del fabricante Matsuzawa Seiki CO, LTD., modelo MHT 2, con intervalos de selección para la carga de 10 grf a 1000grf (0,1N a 10N) y para el tiempo 5 a 35 s. En este trabajo, cuando el penetrador o indentador de diamante de pirámide de base cuadrada y ángulo de $\theta = 136^\circ \pm 1^\circ$ entre su caras opuestas, es forzado perpendicularmente bajo carga constante de compresión F dependiendo de las aleaciones se aplicaba para WC/Ni ($F=300$ grf) y para $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ($F=100$ grf) sobre la superficie del material de muestra o probeta ($F \perp A$), mantenido durante un tiempo $t = 10$ s

seleccionado. La microdureza Vickers HV es el cociente obtenido de dividir la carga F por el área A de la huella, ecuación(3.7), el área se determina por el producto de 4 veces el área del triángulo ΔABV de una de las cara del penetrador ecuación (3.8), ver figuras 3.47, 3.48 y 3.49.

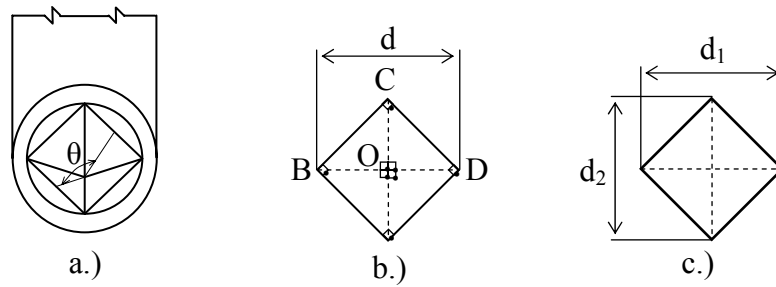


Figura 3.48. Esquemas: a.) Penetrador. Geometrías de las huellas o improntas que quedan sobre la superficie de la muestra b.) cuadrada diagonales $d = d_1 = d_2$ y c.) aproximadamente cuadrada promedio de las diagonales $d = (d_1 + d_2)/2$.

$$HV = \frac{F}{A} \quad (3.7)$$

$$A = 4 \left(\frac{\overline{AB} \overline{EV}}{2} \right) = 2 \overline{AB} \overline{EV} \quad (3.8)$$

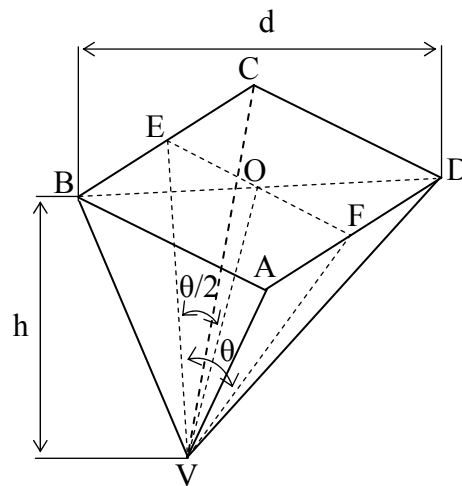


Figura 3.49. Esquema del penetrador de diamante de pirámide vertical con base cuadrada.

Considerando las relaciones geométrica del penetrador, en la base cuadrada $\square ABCD$ se cumple que:

$$\overline{AB} = \overline{CD} = \overline{BC} = \overline{AD} \quad (3.9)$$

Aplicando el teorema de Pitágoras en el triángulo $\triangle ABC$ se obtiene:

$$\overline{AC} = \overline{BD} = \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{AD}^2} = d \Rightarrow \overline{AB} = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad (3.10)$$

$$\overline{EO} = \frac{\overline{AB}}{2} = \frac{d}{2\sqrt{2}} \quad (3.11)$$

El segmento \overline{EO} base del triángulo $\triangle EOV$ resulta la mitad del \overline{AB} , ecuación (3.10):

Teniendo el segmento \overline{EO} ecuación (3.11) y aplicando trigonometría en el triángulo $\triangle EOV$ y se obtiene la altura \overline{EV} :

$$\overline{EV} = \frac{\overline{EO}}{\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{d}{2\sqrt{2} \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.12)$$

Luego sustituyendo (3.10) y (3.12) en (3.8) y simplificando se tiene el área de la huella cuadrada como:

$$A = \frac{d^2}{2\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.13)$$

El número de microdureza Vickers HV sustituyendo y simplificando (3.13) en (3.7) resultando:

$$HV = \frac{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) F}{d^2} \quad (3.14)$$

3.3.3.6. Pruebas del Ensayo de Desgaste Pin on Disk.

La máquina de ensayo de desgaste pin on disk causa que la probeta disco o la probeta pin o bola gire cerca del centro del disco. En cualquier caso, el camino de deslizamiento es un círculo sobre la superficie del disco. El plano del disco puede ser orientado horizontalmente o verticalmente. Los resultados de desgaste pueden diferir para diferentes orientaciones según la norma ASTM G 99 – 03 [237].

Las pruebas del ensayo de desgaste pin on disk se realizaron con un tribómetro, figura 3.50, del fabricante Microtest S.A., modelo MT2/60/SCM/T.



Figura 3.50. Tribómetro.

Los experimentos sobre lubricación y rozamiento se iniciaron con Leonardo da Vinci (1452 – 1519) que dedujo las leyes que gobiernan el movimiento de un bloque rectangular que desliza sobre una superficie plana. Guillaume Amontons (1699), investigando sobre las leyes del rozamiento estudia el deslizamiento seco de dos superficies planas, concluyendo que la fuerza de rozamiento: a.) Se opone al movimiento de un bloque que desliza sobre un plano. b.) Es proporcional a la fuerza normal que ejerce el plano sobre el bloque. c.) No depende del área aparente de contacto. Leonhard Euler (1707 – 1783) estableció el valor de la fuerza de rozamiento en función del número de vueltas con que se arrolla la cuerda al amarradero. Charles-Augustin de Coulomb (1736 – 1806) trabaja sobre las leyes de fricción una vez iniciado el movimiento concluyendo que la fuerza de rozamiento es independiente de la velocidad [244].

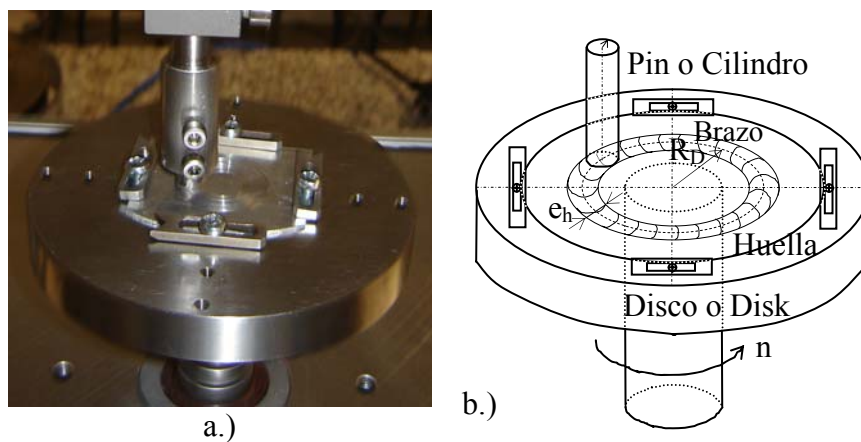


Figura 3.51. Sistema Pin on Disk: a.) Fotografía y b.) Esquema.

La carga de acción debido al peso W que se transmite al Pin y este a la vez perpendicularmente la ejerce sobre el disco o disk donde se posiciona,

ocasionando una fuerza de reacción de magnitud y dirección igual pero sentido contrario como respuesta normal N sobre la superficie de contacto del pin según la tercera ley de Jorge Isaac Newton (1643 – 1727) [244], la cual forma parte del equilibrio en el eje z vertical; es decir cuando se efectúa la sumatoria de las fuerzas en el eje z debe ser igual a cero ($\Sigma F_z = N - W = 0$), resultando que el peso aplicado es de magnitud igual a la fuerza normal ($W = N$). Cuando comienza a moverse el disco con movimiento uniformemente circular debido a las revoluciones angulares n , la fuerza de rozamiento F causada por el deslizamiento de las superficies en contacto es tangencial a la trayectoria circular, que se describe cuando se mueve y contraria al giro que rompe el equilibrio del sistema estático pin on disk en el eje x ($\Sigma F_x = F - T = 0$), haciendo que el disk comience a moverse y el área trasversal del pin deslice continuamente dejando una huella circular de espesor e_h menor o igual al diámetro D_p del pin ($e_h \leq D_p = 2R_p$), debido al coeficiente de rozamiento o fricción μ de las superficies de contacto del sistema pin on disk. El coeficiente fricción se determina de la fuerza resultante R en el instante que tiene igual magnitud y dirección que la fuerza de equilibrio E ($R = E$), pero actuando en sentido contrario, siendo la carga R la sumatoria vectorial de la fuerza de fricción F que resiste al movimiento actuando en una dirección opuesta a la del movimiento más la fuerza normal N de magnitud y dirección igual pero actuando sentido opuesto. Esta carga R forma un ángulo de rozamiento ϕ con el eje z vertical, donde la tangente del ángulo de fricción ϕ equivale al coeficiente de roce estático $\mu_e = \mu$.

Los coeficientes de fricción que se originan entre dos superficies en contacto son: a.) Coeficiente de fricción estática μ_e cuyo valor es mayor que

cero, es utilizado para calcular la fuerza de fricción estática máxima que evita o se opone al movimiento entre las superficies en contacto. b.) Coeficiente de fricción dinámica μ_d el cual atenúa el movimiento que existe entre las superficies de contacto, su valor es menor que el coeficiente fricción estática ($\mu_e > \mu_d$).

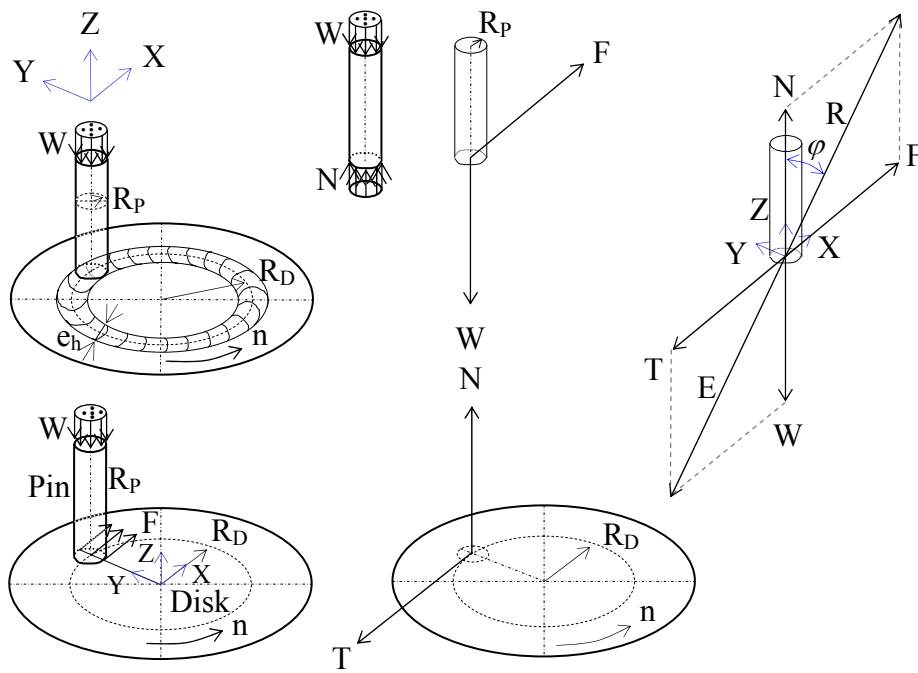


Figura 3.52. Diagramas de Cuerpo Libre del Pin y del Disk en la Prueba del Ensayo de Desgaste Pin on Disk.

Luego aplicando la función tangente en el triángulo formado por las magnitudes de fuerzas F, N y R, figura 3.52.

$$\tan \varphi = \frac{F}{N} = \mu \quad (3.15)$$

Entonces despejando de la ecuación (3.15) la magnitud de la fuerza de fricción F resulta.

$$F = \mu N \quad (3.16)$$

Esta ecuación (3.16) se fundamenta en las hipótesis de que la fuerza de rozamiento o fricción tangencial F originada entre las superficies de contacto es: a.) Independiente de la velocidad. b.) Proporcional a la fuerza normal N . c.) No depende del área aparente de las superficies de contacto.

La presión aparente P_a se determina haciendo el cociente entre la intensidad de fuerza a compresión ejercida sobre la superficie del disco, la cual produce la huella

$$P_a = W/A_p \quad (3.17)$$

Donde el $A_p = \pi/4 D_p^2$ es el área de contacto del pin con el disco, para determinarla se mide experimentalmente el espesor e_h de la huella dejada cuando se ejecuta la prueba y se toma como diámetro del pin $D_p = e_h$, el área de desgastes marcada por el pin sería $A_G = e_h 2\pi R_D = e_h \pi D_D$.

La prueba del ensayo de desgaste pin on disk en este trabajo se realizó empleando como lubricante líquido un aceite de corte puro para tallado de engranajes CUT – MAX 110 del fabricante Houghton Iberica S.A., figura 3.53; tres radios para el brazo o disco $R_D = 10, 20$ y 30 mm;

cinco cargas normales aplicadas o pesos $N=W= 5, 10, 15, 20$ y 30 N; cinco velocidades de rotación $n= 25, 50, 75, 100$ y 150 RPM. y recorrido 10 m.



Figura 3.53. Tribómetro a.) Sistema Pin on Disk: b.) Estático Lubricante en Reposo 0 RPM y c.) Dinámico Lubricante en Movimiento 150 RPM.

Para realizar la prueba del ensayo de desgaste pin on disk en el tribómetro, figura 3.54, Microtest S.A., modelo MT2/60/SCM/T, primeramente se enciende su sistema de control, seguidamente se enciende el tribómetro y luego se hacen los siguiente pasos en:

1.) El tribómetro: a.) Retirar el brazo porta pin hacia arriba. b.) Montar las probetas: b.1.) El disco con la garras y tornillos al porta disco. b.2.) El pin o bola con los tonillos al porta pin o bola, ver figura 3.51. c.) Ajustar el nivel horizontal del brazo porta pin con los tornillos hasta que la burbuja este centrada. d.) Equilibrar el brazo sin carga y sin que se toquen el pin y disco desplazando los contrapesos. e.) Colocar la carga en el porta carga sobre junta tórica o arandela polimérica (poliuretano reforzado, teflón

o similar) cuando suceda la advertencia “baje el brazo y coloque las masas apropiadas” perteneciente al icono de “ejecución de ensayo”.

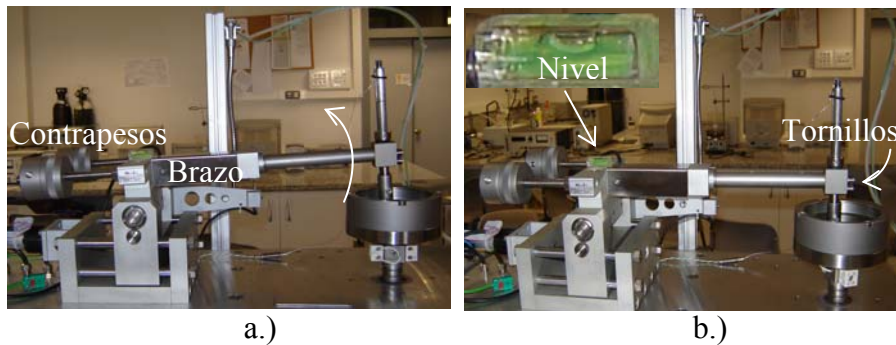


Figura 3.54. Tribómetro Ilustrándose los pasos en a.) y b.)

2.) El sistema de control: Se enciende y se ejecuta el programa MT 4000 98, al aparecer el menú se abre la ventana control de ensayos el cual presenta tres iconos:

2.1.) Al abrir el icono “configuración de ensayos” se despliegan tres opciones para introducir los datos en el siguiente orden: a.) Pulsar opción “General” e introduzca: nombre del ensayo, tecleándolo, ubicación del ensayo, seleccionando carpeta para guardar el ensayo, y método de ensayo asociado (no tocar). b.) Pinchar opción “Identificación” y escriba: 1.) Peso, tecleando la carga en Newtons para el ensayo y luego pulsar Enter. 2.) Material, teclear el material del ensayo y luego pulsar Enter. 3.) Fecha de ensayo, teclearla. 4.) Operador, identificarse con su nombre y luego pulsar Enter. c.) Hacer clic en la opción “Parámetros de ejecución” e introduzcase: 1.) Radio, teclear el radio del brazo en mm para el ensayo y luego pulsar Enter. 2.) Velocidad del brazo, no tocar. 3.) Velocidad de rotación, pulsar la

velocidad en revoluciones rpm y luego pinchar Enter. 4.) Recorrido máximo, teclear la distancia a recorrer en m y luego pulsar Enter. Luego de introducir los datos solicitados en las tres opciones se pulsa el botón “salvar parámetros”.

2.2.) Al pulsar el icono “Control manual” se despliega un menú con varias subventanas: Seleccionar la subventana “lectura en tiempo real” e indicar con el botón “seleccionar canal” las lecturas de: fuerza [N], coeficiente de rozamiento, recorrido [m] y brazo [mm] y luego dichas lecturas deben ponerse a cero pinchando sucesivamente en el botón cero de los diferentes displays

2.3.) Al hacer clic en el icono “Ejecución de ensayos” se abrirá una ventana pinchar en esta el botón “marcha de método”, entonces aparecerá en la pantalla una serie de advertencias: a.) “levante el brazo y manténgalo levantado hasta que se posiciones el radio”, realícese y luego pase a la siguiente advertencia pulsando aceptar, b.) “el radio es adecuado”, si el display marca el radio que se desea pulsar “si” si es un radio diferente pulsar “no”, “levante el brazo”, comprobar que el brazo sigue levantado, c.) “baje el brazo y coloque las masas apropiadas”, bajar el brazo, colocar la carga adecuada sobre una junta tórica en el porta carga, sujetándola con la anilla metálica, colocar el termopar tocando la probeta pin o bola, luego sujetarlo con una junta tórica y pulsar aceptar y el ensayo comenzará a registrarse. Finalizado el ensayo aceptar “end of test”, fin del ensayo.

Cuando comienza a registrarse la prueba de ensayo de desgaste pin on disk la probeta pin cargada presiona contra la superficie de la probeta disco en rotación y una capa de aceite CUT – MAX 110 entra en contacto entre las superficies en movimiento relativo del pin sobre el disco. La probeta disco en el desarrollo de la prueba se encuentra dentro del accesorio de lubricación del tribómetro sumergida en 90 ml de aceite CUT – MAX 110. Cuando comienza el movimiento de rotación se forma la capa de aceite intermedia que separa las superficies del pin y el disco en un espesor de capa e_H , figura 3.55.

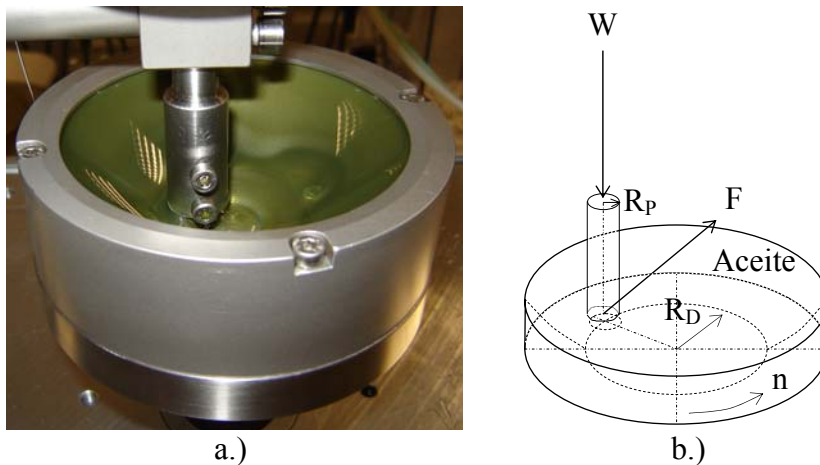


Figura 3.55. Sistema Pin on Disk Lubricado con Aceite a.) Fotografía y b.) Esquema.

Según la ley de Jorge Isaac Newton de los fluido la viscosidad es la capacidad que tiene un fluido de resistir deformaciones cortantes, es decir la resistencia interna del fluido al desplazamiento. La viscosidad absoluta o dinámica es obtenida a través de un modelo geométrico – mecánico elemental, donde F es la fuerza de fricción o de corte, A es área de la

superficie, V es la velocidad de la superficie superior y e_H es el espesor de película respectivamente.

La capa de aceite CUT – MAX 110 intermedia se opone al movimiento relativo entre las superficie del pin que desliza sobre el disco en movimiento rotacional. Suponiendo flujo laminar, figura 3.56, es decir las partículas de fluidos se mueven en capas o láminas, las partículas que están en cierta lámina, permanecen en ella y no pueden cambiar de capa y el fluido en contacto con las superficies del pin y el disco, tiene la velocidad del disco rotativo.

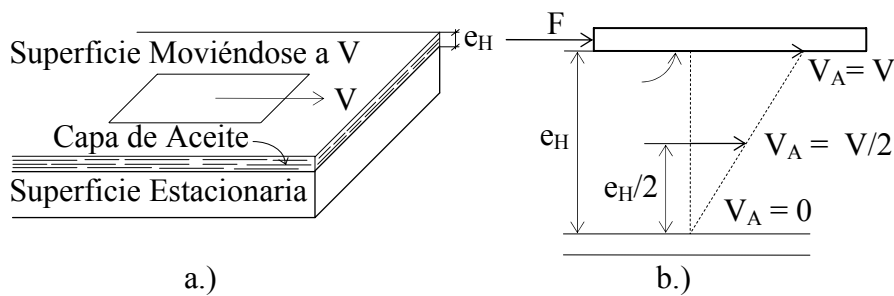


Figura 3.56. Modelo Geométrico Elemental para Interpretar la Viscosidad Absoluta indicándose esquemas de Partículas de Fluido Moviéndose en Capas: a.) Capa de Aceite y b.) Diagrama de Velocidades.

En la determinación de la viscosidad se utilizó el viscosímetro rotacional, figura 3.57, instrumento para medir la viscosidad y algunos otros parámetros de flujo de un fluido. En esta estudio se ha medido la viscosidad del aceite CUT – MAX 110 con velocidades de giro del cilindro o disco (husillo) de 50, 100 y 200 R.P.M. respectivamente y husillo R2. El objeto es la obtención de la curva de calibración, por lo cual se han realizados a diferentes velocidades de rotación la curva de calibración para el aceite

figura 3.58. y así se seleccionó la curva para 100 R.P.M. para los ensayos tribológico de pin o disk. El viscosímetro usado es marca visco star R, con resolución de 0,1 a 100 Cp según rango, de la empresa Fungilab, S. A.



Figura 3.57. Procedimiento en la Medición de la Viscosidad del Aceite CUT – MAX 110: a.) Calentamiento del aceite b.) Determinación de la Viscosidad de aceite.

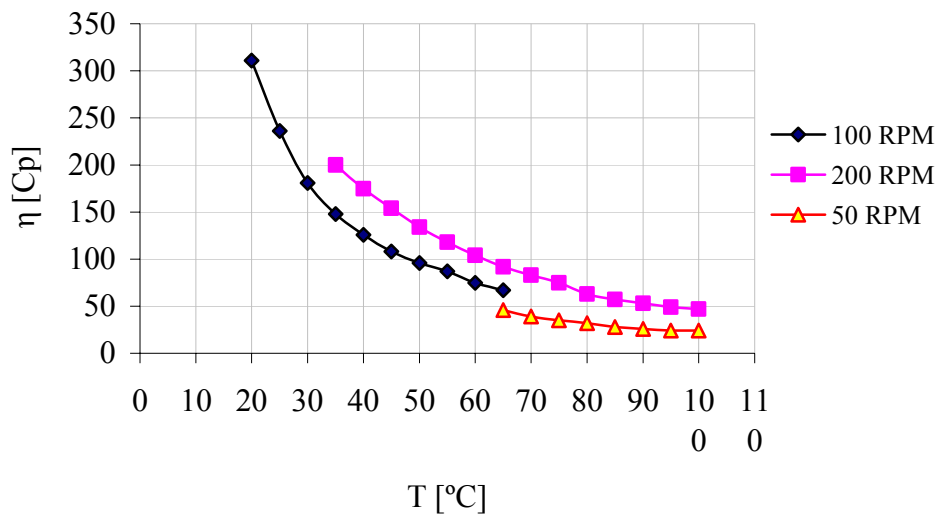


Figura 3.58. Curva de Calibración del Aceite CUT – MAX 110.

Con el objeto de evaluar el acabado superficial en el ensayo de desgaste pin on disk de las piezas que han de ponerse en contacto y rozamiento a diferentes velocidades; serán medidas las rugosidades pin y el disco con el rugosímetro, figura 3.59, Perthometer M₂/M₃, tipo: PRN-10, N° serial: 3254 de la empresa: Mahr GmbH, Göttingen. El acabado superficial del pin y el disco es importante, debido a que influye cuando se quiere definir la tribología de acuerdo a la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia y aspecto externo del pin y el disco. Antes de realizar la medición de la rugosidad Ra con el rugosímetro se desengrasa la superficie limpiándola con acetona o alcohol.

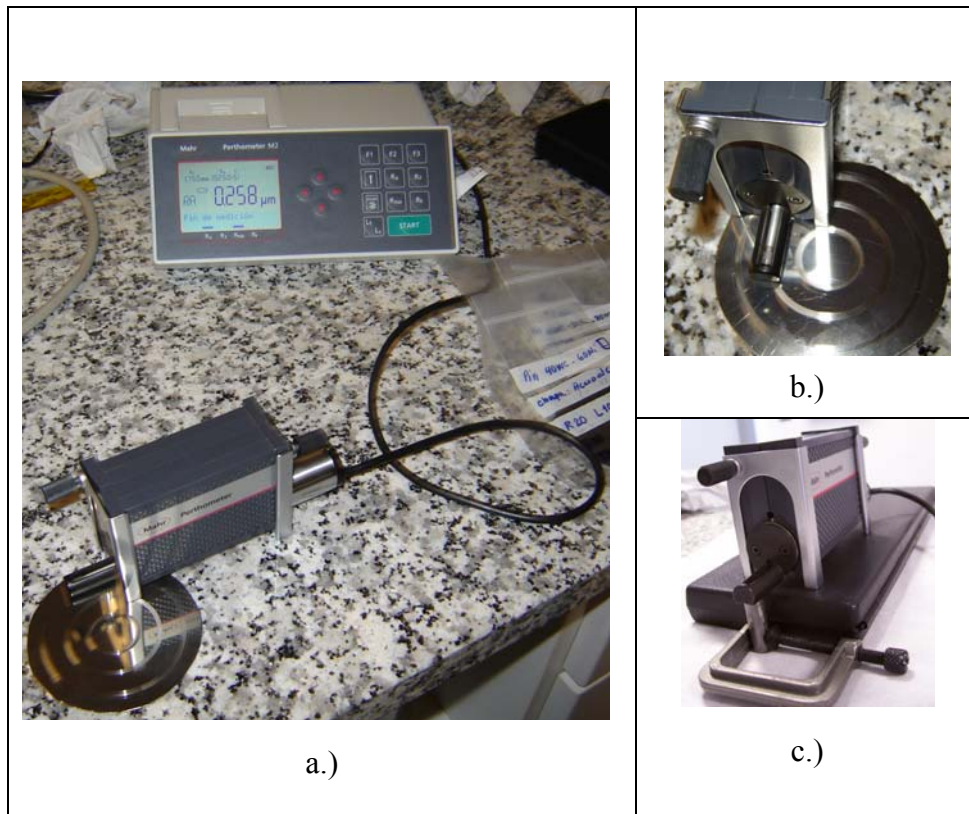


Figura 3,59. a.) Medición con el Rugosímetro del Disco, Detalles: b.) Disco y c.) Pin.

3.4. Planificación de Experimentos.

Teniendo presente los enunciados teóricos, variables y relaciones entre ellas, que se han expuestos en el Capítulo I, así como los objetivos establecidos descritos en el Capítulo II de este trabajo, los cuales deben ejecutarse y comprobarse en estudio controlado con autentica veracidad, por lo que se realizará la planificación de experimentos.

3.4.1. Planificación de Experimentos Generales.

La planificación de experimentos enfocando las variables o factores: de experimentos en la figura 3.60, de las probetas en la figura 3.62, del proceso de proyección térmica por llama usando polvo en la figura 3.61.

3.4.2. Planificación de Experimentos Específicos.

En la planificación de experimentos se aplicó la estadística como herramienta utilizándose el diseño factorial en una potencia “ a^n ” de base “ a ” y exponente “ n ”; donde la “ a ” significa que cada factor tomará a “ a ” niveles (“ a ” valores distintos), “ n ” es el número total de factores que intervendrán en la experimentación. El resultado de elevar “ a^n ” proporciona el número de experimentos elementales que se deben realizar. En el diseño factorial se investigan todas las combinaciones posibles de los tratamientos o niveles de los factores en cada ensayo o réplica completa del experimento [250].

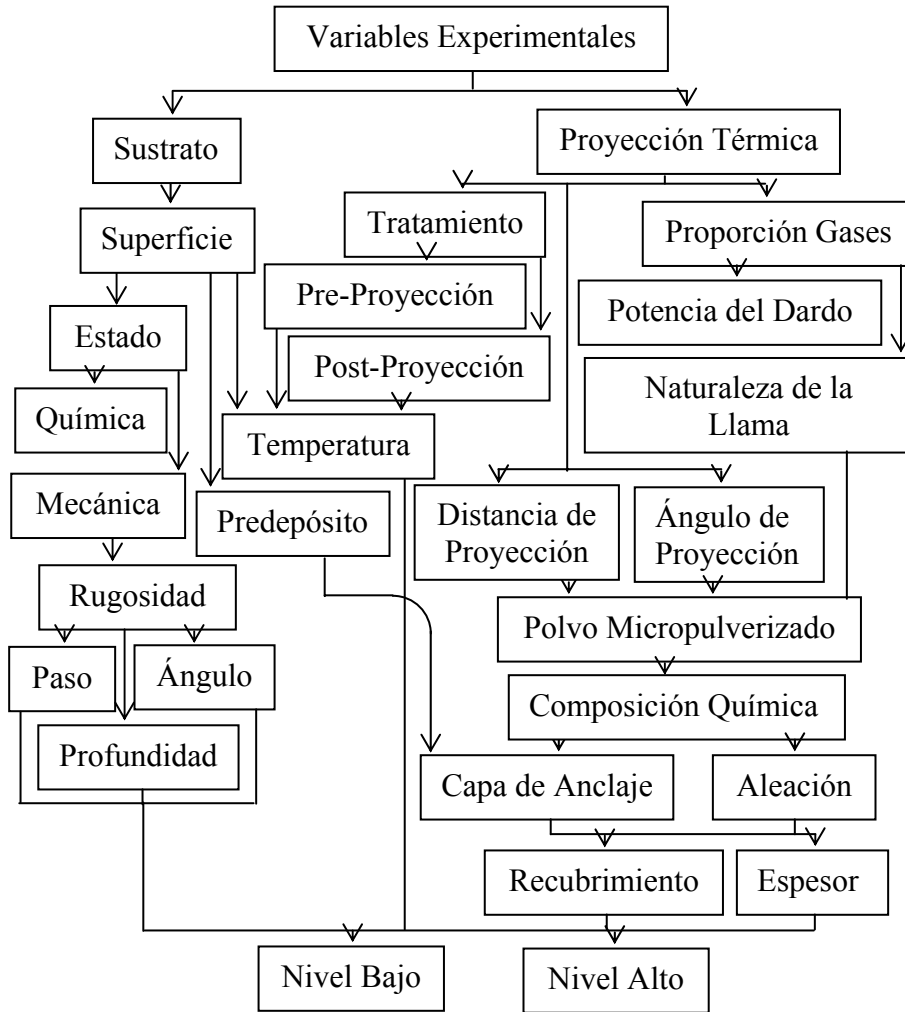


Figura 3.60. Esquema de las Variables Experimentales.

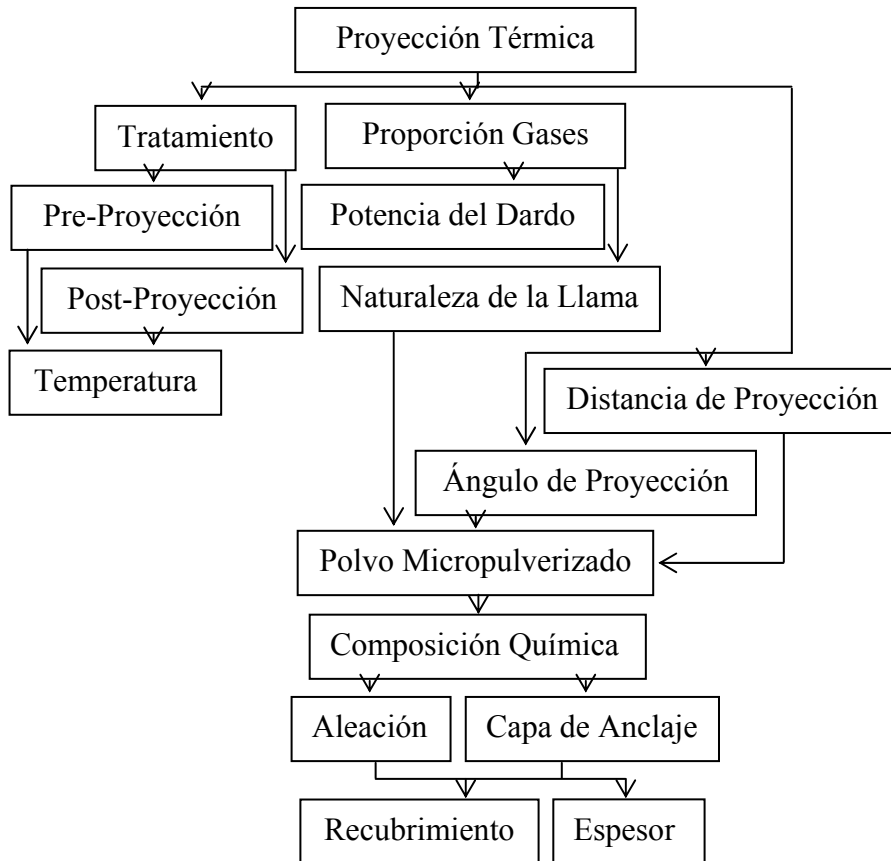


Figura 3.61 Esquema de las Variables del Proceso de Proyección Térmica usando Polvos.

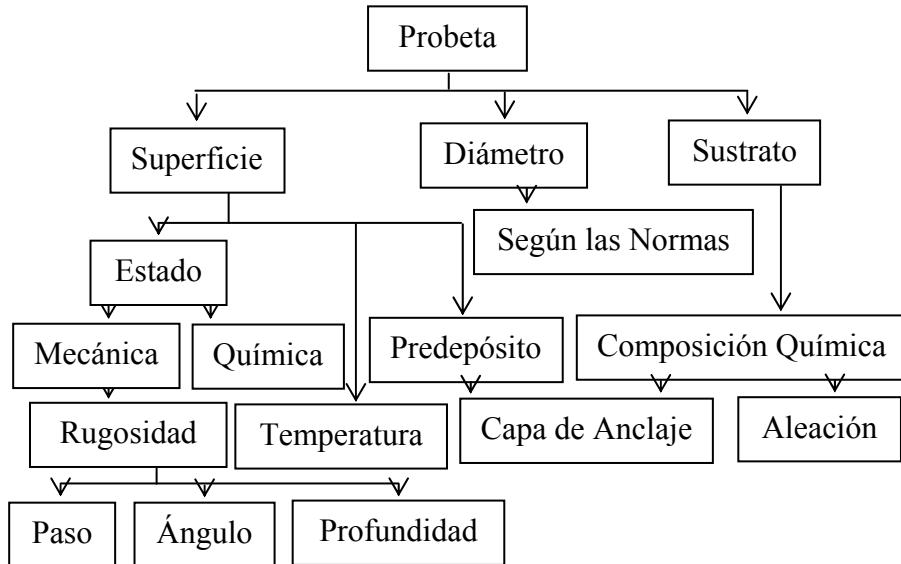


Figura 3.62. Esquema de los Variables de la Probeta.

En el presente trabajo se estudiarán tres variables o factores: la temperatura, o en otro caso el proceso térmico, la rugosidad y el material del recubrimiento, aleaciones de polvos micro-pulverizados de níquel – óxidos y carburos cerámicos (aleaciones de WC/Ni y Al₂O₃/TiO₂) en dos proporciones punto 3.2.3.1. Considerando los niveles y valores donde se reúnen un conjunto de ocho experimentos que se obtuvieron de las tres variables con dos niveles, bajo y alto, que en forma exponencial se representa por la expresión 2³. Dichos experimentos se harán con muestras y probetas, puntos 3.1. y 3.2, guiándose por las normas pertinentes y se repetirán por cada tipo de prueba entre las cuales se tendrán las que se describieron en el punto 3.3.

Tabla 3.1. Matriz de Diseño en orden estándar de experimentación para la Planificación de Experimentos, considerando los Niveles codificados bajo y alto en orden estándar para un diseño 2^3 y respuesta.

Experimentos	Variables Experimentales			Respuestas
	A	B	C	
1	-1	-1	-1	
2	+1	-1	-1	
3	-1	+1	-1	
4	+1	+1	-1	
5	-1	-1	+1	
6	+1	-1	+1	
7	-1	+1	+1	
8	+1	+1	+1	

Experimentos	Variables Experimentales			Respuestas
	A	B	C	
1	-	-	-	
2	+	-	-	
3	-	+	-	
4	+	+	-	
5	-	-	+	
6	+	-	+	
7	-	+	+	
8	+	+	+	

En el diseño factorial a dos niveles de tipo “ 2^n ”, los valores correspondientes a los dos niveles se codifican asignando al nivel bajo el valor “-1” (o simplemente -) y al alto “+1” (o simplemente +) [252, 255], ver la Tabla 3.1.

Los diseños factoriales son importantes por varias razones: a.) Requieren relativamente pocos experimentos elementales para cada factor, y permiten explorar factores que pueden indicar tendencias y así determinar una dirección prometedora para experimentos futuros. b.) Si existe interacción entre los factores estudiados permite medirla. c.) Cuando el número de factores (variables) suelen ser importantes para estudiar todas las variables, los diseños factoriales fraccionados permiten analizarlas a todas para estudiarlas superficialmente en lugar de hacer experimentos mas

pequeños que pueden no incluir las variables importantes. d.) Estos diseños y sus correspondientes fraccionados pueden ser utilizados en bloques para construir diseños de un grado de complejidad que se ajuste a las necesidades del problema. e.) La interpretación de las observaciones producidas por estos diseños se puede realizar en gran parte a base de sentido común y aritmética elemental [244, 255].

En este mismo orden de ideas, es importante destacar que fue empleada la estadística de métodos de diseño factorial en la planificación experimental, los análisis y los resultados de los experimentos. A continuación dos métodos estadísticos para calcular los efectos: a.) El Algoritmo de los Signos. b.) El Algoritmo de Yates.

a.) El Algoritmo de los Signos.

El algoritmo de los signos también llamado de Box, Hunter y Hunter usa la tabla de coeficientes de contrastes para determinar los efectos principales como las interacciones de todo tipo, a partir de los signos algebraicos utilizados para definir los niveles de la matriz de diseño [133, 136]. Mediante una tabla de signos algebraicos se puede obtener las fórmulas para determinar las estimaciones del efecto principal o interacción en cualquier experimento en un diseño “2ⁿ”. El signo para cualquier efecto principal es “+” en los renglones que corresponden a los tratamientos donde el factor está en su nivel alto, y “-“ en renglones que corresponden a los tratamientos donde el factor está en su nivel bajo [250, 251, 252]. Los

signos para las interacciones se encuentran al multiplicar los que corresponden a los factores en la interacción, renglón por renglón. La estimación para cualquier efecto o interacción, esta determinada por la multiplicación de las combinaciones de tratamiento de la primera columna "I" de la Tabla 3.2. por los signos de la columna de efecto principal o interacción correspondiente y sumando algebraicamente para producir un contraste; es decir, se encuentra sumando y restando las medias de celda para los tratamientos, utilizando los signos en las columnas adecuadas, para calcular un contraste [250, 251].

El efecto de un factor se entiende como el cambio en la respuesta al ir del nivel bajo "–" al alto "+" de ese factor [252]. Para un experimento con cualquier diseño factorial 2^n con K réplicas la estimación de los efectos principales o interacciones se calcula dividiendo entre la mitad del número total de tratamientos o corridas del experimento, $K 2^{n-1}$, obteniéndose: a.) Efecto = contraste/($K 2^{n-1}$) [250, 251, 252, 255]. b.) Los grados de libertad "gl" para error son $2^n (K-1)$, donde K es el número de réplicas por niveles de los factores [250, 252]. c.) La suma de los cuadrados (SC en inglés 'sum of squares' SS) para cualquier efecto e interacción es igual al cuadrado del contraste, dividido entre el producto del número de réplicas K por el número de tratamiento 2^n . Las sumas de los cuadrados para los efectos y las interacciones tienen un grado de libertad cada una. La suma de los cuadrados para cualquier efecto se determina: $SC = (\text{contraste})^2 / (K 2^n)$ [250, 252, 255].

Tabla 3.2. tiene varias propiedades: a.) Con excepción de la columna identidad I, cada columna tiene el mismo número de signos más y menos.

b.) La suma de los productos de los signos en cualquier par de columna es cero; esto es, las columnas de la tabla son ortogonales. c.) La multiplicación de cualquier columna por (I) deja la columna sin cambio alguno: esto es, I es un elemento identidad, por ejemplo, $A \times I = A$. d.) El producto de cualquier par de columnas da como resultado una columna de la Tabla, por ejemplo, $A \times B = AB$, $AB \times ABC = A^2B^2C = C$, puesto que cualquier columna multiplicada por sí misma es igual a la columna identidad, por ejemplo $A \times A = A^2 = I$, $AB \times AB = (AB)^2 = I$ [250, 251, 252].

Tabla 3.2. Coeficientes de Contrastes para Calcular a través de los Signos algebraicos los Efectos del Diseño Factorial 2^3 .

Número de Experimento	Tratamiento Combinado	Efecto Factorial							
		Media (I)	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
1	(I)	+	-	-	+	-	+	+	-
2	a	+	+	-	-	-	-	+	+
3	b	+	-	+	-	-	+	-	+
4	ab	+	+	+	+	-	-	-	-
5	c	+	-	-	+	+	-	-	+
6	ac	+	+	-	-	+	+	-	-
7	bc	+	-	+	-	+	-	+	-
8	abc	+	+	+	+	+	+	+	+
Divisor		8	4	4	4	4	4	4	4

b.) Algoritmo de Yates.

Método de F. Yates, o algoritmo de Yate, para utilizarlo se puede construir una Tabla con las combinaciones del tratamientos y los correspondientes totales de tratamiento, en un orden estándar [250, 252]; es decir, cada factor se introduce uno a la vez combinándolo con todos los

niveles de los factores que están por encima de él. Por ejemplo el algoritmo de Yates para el diseño 2^3 , calcular tanto los efectos principales como las interacciones de todo tipo de factores y además este algoritmo proporciona la media; el orden estándar de un diseño 2^3 es: (1), a, b, ab, c, ac, bc y abc [249, 250, 252]. A continuación se efectúa el procedimiento siguiente: a.) Se etiqueta la columna adyacente (1); las entradas en la mitad superior de esta columna se calculan sumando las respuestas pares adyacentes. Las entradas de la parte inferior de esta columna se calculan cambiando el signo de la primera entrada de cada par de las respuestas originales y luego sumando los pares adyacentes. b.) Se etiqueta la columna adyacente (2); la columna (2) se construye con las entradas de la columna (1), siguiendo el mismo procedimiento utilizado para generar la columna (1). El proceso continúa hasta que se han construido (k) columnas que contiene los contrastes designados en los reglones. c.) Se calcula la suma de cuadrados (SS) para los efectos elevando al cuadrado cada entrada de la columna (k) y dividiéndolo entre $K2^n$. d.) Se calcula las estimaciones de los efectos dividiendo cada entrada de la columna k entre $K2^{n-1}$ [250, 254].

Para un diseño factorial $2^n=2^3$ siendo $n=3$ se etiquetan tres columnas, ver Tabla 3.3., donde los valores obtenidos para columna III, a través de las operaciones algebraicas de sumas y restas son los contrastes (columna III=contrastos). Cuando los valores de la columna III se han obtenidos se puede calcular: a.) La suma de cuadrados para los efectos elevando al cuadrado cada entrada de la columna III y dividiéndolo entre $K2^n$, es decir, $SC=(\text{columna III})^2/(K2^n) =(\text{contrastos})^2/(K2^n)$. b.) Las estimaciones de los

efectos dividiendo cada entrada de la columna III entre el producto $K2^{n-1}$, es decir, estimaciones de los efectos=(columna III)/($K2^{n-1}$) [250, 252, 255].

Tabla 3.3. Aplicándose del algoritmo de Yates para experimento de diseño factorial 2^3 .

Combinaciones de Tratamientos	Respuesta	Algoritmo						
		Columnas Auxiliares			Divisor	Efecto	Suma de cuadrados	Efecto Estimado
		I	II	III				
(1)	Y_1	$Y_{11}=Y_1+Y_2$	$Y_{12}=Y_{11}+Y_{21}$	$Y_{13}=Y_{12}+Y_{22}$	8	Media	—	$Y_{13}/8$
a	Y_2	$Y_{21}=Y_3+Y_4$	$Y_{22}=Y_{31}+Y_{41}$	$Y_{23}=Y_{32}+Y_{42}$	4	A	$Y_{23}^2/4$	$Y_{23}/4$
b	Y_3	$Y_{31}=Y_5+Y_6$	$Y_{32}=Y_{51}+Y_{61}$	$Y_{33}=Y_{52}+Y_{62}$	4	B	$Y_{33}^2/4$	$Y_{33}/4$
ab	Y_4	$Y_{41}=Y_7+Y_8$	$Y_{42}=Y_{71}+Y_{81}$	$Y_{43}=Y_{72}+Y_{82}$	4	AB	$Y_{43}^2/4$	$Y_{43}/4$
c	Y_5	$Y_{51}=Y_2-Y_1$	$Y_{52}=Y_{21}-Y_{11}$	$Y_{53}=Y_{22}-Y_{12}$	4	C	$Y_{53}^2/4$	$Y_{53}/4$
ac	Y_6	$Y_{61}=Y_4-Y_3$	$Y_{62}=Y_{41}-Y_{31}$	$Y_{63}=Y_{42}-Y_{32}$	4	AC	$Y_{63}^2/4$	$Y_{63}/4$
bc	Y_7	$Y_{71}=Y_6-Y_5$	$Y_{72}=Y_{61}-Y_{51}$	$Y_{73}=Y_{62}-Y_{52}$	4	BC	$Y_{73}^2/4$	$Y_{73}/4$
abc	Y_8	$Y_{81}=Y_8-Y_7$	$Y_{82}=Y_{81}-Y_{71}$	$Y_{83}=Y_{82}-Y_{72}$	4	ABC	$Y_{83}^2/4$	$Y_{83}/4$

En los experimentos factoriales generales muchos experimentos toman en cuenta más de dos factores, donde se tienen ‘a’ niveles del factor A, ‘b’ niveles del factor B, ‘c’ niveles del factor C y así sucesivamente, acomodado en un experimento factorial. En general, se tendrá un total de abc...K observaciones, si existen K réplicas o ensayos del experimentos completo. Considerando el experimento de tres factores o variables, con modelo subyacente: $Y_{ijkl}=\mu+A_i+B_j+AB_{ij}+C_k+AC_{ik}+BC_{jk}+ABC_{ijk}+\varepsilon_{ijkl}$ para $i=1,2,\dots,a$; $j=1,2,\dots,b$; $k=1,2,\dots,c$; $l=1,2,\dots,K$, donde se tienen ‘a’, ‘b’ y ‘c’ son niveles de los factores fijos A, B y C respectivamente, entonces el análisis

de varianza es mostrado en la Tabla 3.4.. Nótese que deben existir al menos dos réplicas ($K \geq 2$) para calcular una suma de cuadrados del error [250].

En el presente trabajo los experimentos tiene tres (3) factores: la temperatura (A) o en otro caso el proceso térmico (A), la rugosidad (B) y el recubrimiento (C), y en cada uno dos (2) niveles. Es decir un factorial de potencia “ a^n ” de base número de niveles “ $a = 2$ ” y exponente número de factores “ $n = 3$ ”, resultando es el número de experimentos elementales que se deben realizar $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$, el promedio o media μ ; los errores o residuos ε , los efectos principales A, B y C e interacciones asociadas de dos sentidos AB, AC, BC y de tres sentidos ABC; y si el orden de los experimentos es completamente aleatorio, el modelo del diseño de experimento es: $Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + C_k + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$, para $i=j=k=1,2,3$ y $l=1,2,\dots,K$ [251, 252, 254, 255]:

La Tabla 3.4 de análisis de varianza (“anova” del inglés analysis of variance) muestra los resultados de un diseño experimental en particular, modelo de efectos con tres factores 2^3 . Descomponiéndolos en fuentes de variación (FV) independientes atribuible a cada uno de sus efectos. El objeto del análisis de varianza es identificar la importancia, significación, de las diferentes variables, factores, condiciones, tratamientos, en estudio y determinar como interaccionan entre sí, comparando los valores de un conjunto de datos numéricos si son significativamente distintos de otro. Es decir, nos indicará que algunas medias de tratamientos son diferentes. El análisis de varianza o prueba F de un diseño experimental conlleva a la realización de pruebas de significación estadística, usando la denominada

distribución F de Fisher – Snedecor, por medio de ciertas hipótesis que se plantean para juzgar si una propiedad que se supone cumple una población, conjunto de elementos que son objeto de estudios o experimentos, estadística compatible con lo observado en una muestra de la población [244, 256, 257].

Tabla 3.4. Tabla de Análisis de la Varianza para el Modelo de Efectos con Tres Factores.

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-valor
A	SC _A	gl _A =a-1	CM _A =SC _A /gl _A	CM _A /CM _E	
B	SC _B	gl _B =b-1	CM _B =SC _B /gl _B	CM _B /CM _E	
C	SC _C	gl _C =c-1	CM _C =SC _C /(c-1)	CM _C /CM _E	
A*B	SC _{AB}	gl _{AB} =gl _A ×gl _B	CM _{AB} =SC _{AB} /gl _{AB}	CM _{AB} /CM _E	
A*C	SC _{AC}	gl _{AC} =gl _A ×gl _C	CM _{AC} =SC _{AC} /gl _{AC}	CM _{AC} /CM _E	
B*C	SC _{BC}	gl _{BC} =gl _B ×gl _C	CM _{BC} =SC _{BC} /gl _{BC}	CM _{BC} /CM _E	
A*B*C	SC _{ABC}	gl _{ABC} =gl _B ×gl _B ×gl _C	CM _{ABC} =SC _{ABC} /gl _{ABC}	CM _{ABC} /CM _E	
Residuos	SC _E	gl _E =abc(K-1)	CM _E =SC _E /gl _E		
Total (corregido)	SC _T	gl _T =abcK-1			

La descomposición de la suma de cuadrados totales corregidas (SC):

$$SC_T = SC_A + SC_B + SC_C + SC_{AB} + SC_{AC} + SC_{BC} + SC_{ABC} + SC_E$$

La descomposición correspondiente de los grados de libertad (gl):

$$abcK-1 = (a-1) + (b-1) + (c-1) + (a-1)(b-1) + (a-1)(c-1) + (b-1)(c-1) + (a-1)(b-1)(c-1) + abc(K-1)$$

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad determinada usando la Tabla de Distribución F de Fisher – Snedecor ver referencia [134, 138, 140].

La hipótesis estadística, suposición teórica, se hace sobre el valor de un parámetro constante que caracteriza a una población, el cual puede ser validado mediante una prueba estadística. La hipótesis a probar es si los

tratamientos, niveles, tienen el mismo efecto sobre la variable que se estudia, teniéndose de esta manera: a.) La hipótesis nula ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_t$) los “t” tratamientos tienen el mismo efecto, las medias ($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_t$) son iguales, sobre la variable en estudio, ejemplo: para $i=1, 2, \dots, t$ y $j=1, 2, \dots, t$, $i \neq j$ sea $H_0: T_i = T_j$ el tratamiento “i” es igual en su efecto al tratamiento “j”. b.) La hipótesis alternativa ($H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_t$) no todo los “t” tratamientos tienen el mismo efecto, las medias ($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_t$) son diferentes, sobre la variable en estudio, ejemplo: para $i=1, 2, \dots, t$ y $j=1, 2, \dots, t$, $i \neq j$ sea $H_0: T_i \neq T_j$ el tratamiento “i” tiene un efecto diferente al tratamiento “j” [244, 257, 258].

Al probar la hipótesis estadística el investigador esta propenso a cometer: a.) Error tipo I, cuando se rechaza la hipótesis planteada, siendo esta hipótesis falsa. La magnitud del error el investigador puede fijarlo y constituye en la prueba el nivel de significación, probabilidad= p -valor= P , cuyos valores usuales son: 0,05 ó 0,01. b.) Error tipo II, cuando se acepta la hipótesis que se plantea, siendo esta falsa; la magnitud de este error no se puede fijar, pero si es posible minimizar usando un tamaño adecuado de muestra o réplicas (repeticiones) de experimentos [244, 256, 258].

Se ha planificado la experimentación para la realización del diseño experimental pertinente a las pruebas, puntos 3.3, que proporcionaran los datos experimentales, en contrastes con los datos de las observaciones de la unidad experimental, muestra o probeta, para las condiciones estudiadas. En el presente trabajo se aplicó una prueba estadística de las que más se utilizan para encontrar la mejor condición que responde a los experimentos. Existen varias métodos, pruebas, de comparaciones múltiples de medias entre ellas

las siguientes: a.) Diferencia Mínima Significativa (DMS), compara dos medias y su uso en comparaciones simultáneas se justifica sólo cuando: la prueba F (anova) resulta significativa y las comparaciones son planeadas antes de ejecutarse el experimento. b.) Prueba de rangos múltiples de Duncan: se utiliza para comparaciones de múltiples de medias. No es necesario realizar previamente la prueba F y que esta resulte significativa [256, 257, 258]. c.) Prueba de rangos múltiples de Tukey (diferencia significativa Honesta). Se usa para comparaciones de múltiples de medias; es similar su procedimiento a la prueba Duncan, pero más exigente [257, 258]. d.) Prueba de comparaciones Dunnet, es útil cuando el investigador está interesado en determinar que tratamiento es diferente de un testigo, control o tratamiento estándar, y no en hacer todas las comparaciones posibles, que pasarían a una segunda a una segunda prioridad, es decir, cuando se quiere comparar el testigo con cada uno de los tratamientos en estudio [244].

En el presente trabajo se ha seleccionado el método ideado por Fisher (Diferencia Mínima Significativa (D.M.S.), en inglés se define como L.S.D. (Least Significant Difference)). En el Capítulo IV, se usará el programa Statgraphics Plus versión 5.1, con aplicaciones estadísticas para diseño de experimentos, análisis de datos y construcciones de modelos, y como variables respuestas o indicadores de salidas los datos de las variables dependientes, que se investigaran en el presente trabajo serán: los esfuerzos de cizalladura, las rigideces, las microdurezas Vickers y las porosidades.

Capítulo IV

Resultados y Análisis

A continuación, se exponen los resultados y análisis de la *investigación de las características de adherencia sobre matrices de embutición de acero de bajo contenido de carbono (F-1110), y análisis mediante ensayos de emisión acústica, de recubrimientos de níquel – óxidos y carburos cerámicos (aleaciones de WC/Ni y Al₂O₃/TiO₂), aplicados por proyección térmica, y de las características adhesivas con aleaciones metálicas de embutición (acero de bajo contenido de carbono, acero inoxidable AISI 304, aleación de aluminio AA1060).*

En líneas anteriores, en la metodología de la investigación Capítulo III, punto 3.4, *se estudiaron tres variables o factores la temperatura o en otro caso el proceso térmico, la rugosidad y el material del recubrimiento aleaciones de polvos micro-pulverizados.* En la investigación se utilizó el análisis por diseño estadístico para encontrar los efectos e influencias de las variables.

4.1. Análisis por Diseño Estadístico.

El diseño estadístico para examinar los resultados obtenidos en los experimentos y a su vez analizarlo fue el diseño factorial como herramienta experimental óptima, con el objeto de medir las variables que intervienen en el proceso y determinar si existen efectos e interacciones entre ellas. El análisis estadístico se aplicó a los resultados de los experimentos cuando el recubrimiento es depositado sobre el sustrato cilíndrico en forma continua o total a lo largo del diámetro o en forma de banda periférica y de altura constante (15 mm y 20 mm) se designará como “1” y cuando el recubrimiento es depositado en sustrato cilíndrico en forma discontinua o parcial en tres y cuatro partes o trozos iguales a lo largo del diámetro y de altura constante (15 mm) se designará como “1/3” y “1/4” respectivamente.

La cuantificación de la adherencia o fijación, a través de la aplicación del ensayo de cizalladura, en el cual se carga la probeta proyectada de recubrimiento apoyándose sobre una matriz de corte hasta que ocurre el arrastre del recubrimiento, ver Capítulo III, punto 3.3.3.1. Obteniéndose y procesando los datos experimentales de las variables independientes mediante los programas: Microsoft Excel y Bloc de Notas, Prensa Instron 4323, Vallen Acoustic Emisión Suite, MT 4000 98 y luego como variables respuestas o indicadores de salidas los datos de las variables dependientes, que se investigaran en el presente trabajo, aplicando los programas Microsoft Excel, XnView, Visilog 5 y 6, Statgraphics Plus versión 5.1, con aplicaciones estadísticas para diseño de experimentos, análisis de datos y construcciones de modelos, se determinaron del material

proyectado: los esfuerzos de cizalladura, las rigideces, las microdurezas Vickers y las porosidades.

El diseño estadístico aplicado para analizar los resultados de las pruebas de los experimentos en probetas recubierta a lo largo del área diametral por la técnica de proyección térmica por llama (flame spray) con aleaciones de polvos micro-pulverizado designado como: 1.) Recubrimiento Total. 2.) Recubrimiento en Cuatro Partes. 3.) Recubrimiento en Tres Partes.

4.1.1. Recubrimiento Total.

Este recubrimiento es continuo a lo largo del diámetro, es decir, está depositado sobre el sustrato cilíndrico en forma de una banda periférica con altura constante de 20 mm y 15 mm, se designó como 1. El diseño estadístico aplicado para analizar los resultados de las pruebas, para este recubrimiento será el factorial $a^n=2^3$, donde la base $a=2$ representan los niveles y el exponente $n=3$ el número de factores o variables independientes, este diseño factorial permite para cada una de las tres variables dos niveles bajo (-) y alto (+). A continuación los valores numéricos de las variables, para la temperatura se consideró la temperatura en el sustrato a 20 °C y la temperatura de precalentamiento del sustrato a 100 °C, con el objeto de reducir los esfuerzos residuales y prevenir la humedad, la rugosidad de tipo roscas de paso 1,5 mm y profundidades de 0,75 mm (750 μm), con ángulos de filete de 45 ° y 90 ° y las aleaciones proyectada de polvos micro-pulverizados de WC/Ni en proporciones de

40/60 y 30/70, en tanto por ciento en peso, para el material del recubrimiento Capítulo III, punto 3.2.3.1.2, Tablas 4.1, Apéndice A.4.

Tabla 4.1. Variables (Factores) y Niveles Codificados.

Variable		Código	Nivel		
			Bajo (-)	Alto (+)	
Rugosidad	Rosca de Paso (P) 1,5 mm y Ángulo de Filete (α)		A	45 °	90 °
Proyección Térmica	Pre-proyección	Temperatura (T)	B	20 °C	100 °C
	Proyección	Recubrimientos Composición Química de la Aleación WC/Ni en Relaciones de % en peso		C	40/60

4.1.1.1. Macroscopía Óptica.

Por medio de la macroscopía óptica referida en el Capítulo III, punto 3.1.1, se realizaron observaciones de las superficies naturales en las probetas antes y después de la proyección térmica por llama de los polvos micro-pulverizado de WC/Ni en dos proporciones de 40/60 y 30/70, sobre un sustrato de acero F1110, ver composiciones químicas en el Capítulo III, punto 3.2.3.1. Las observaciones fueron desde la simple vista hasta el empleo de una lupa estereográfica, la graduación de aumento seleccionada fue de 10x.

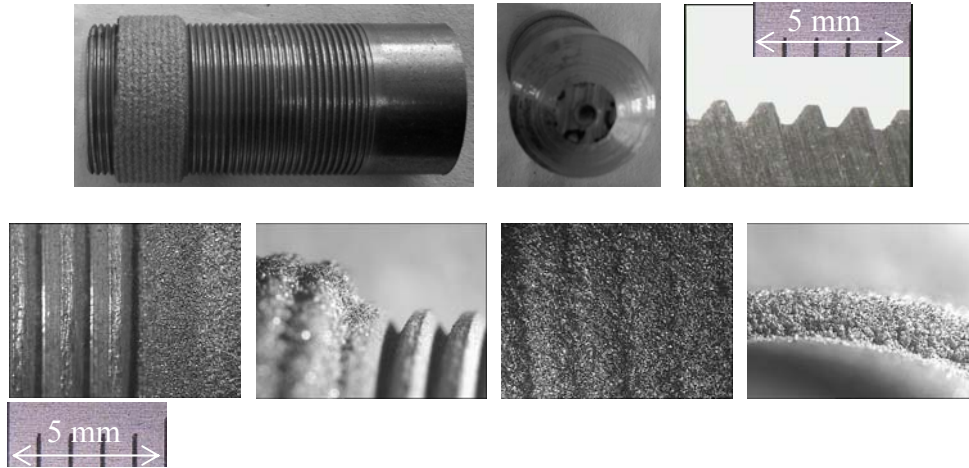


Figura 4.1. Fotografía de la Probeta y Detalles de la Intercara Sustrato – Recubrimiento de 40%WC/60%Ni con la Rugosidad de Rosca de Paso 1,5 mm y Ángulo de Filete 45°, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

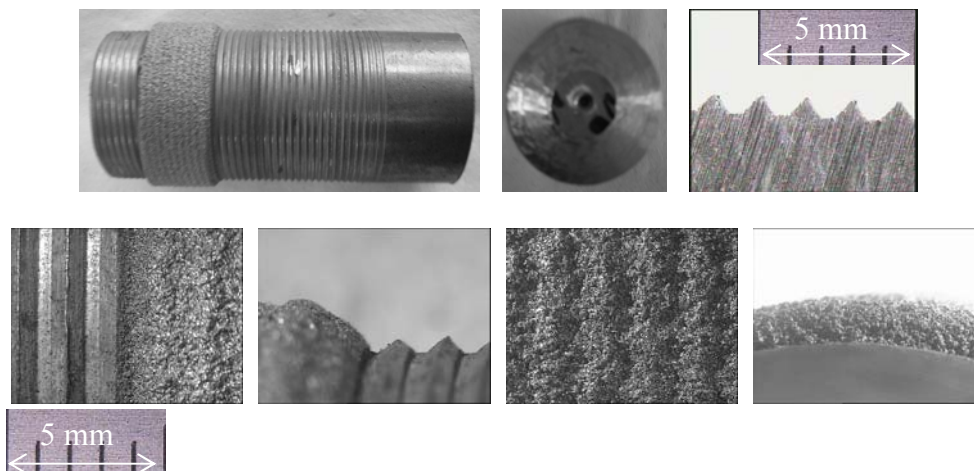


Figura 4.2. Fotografía de la Probeta y Detalles de la Intercara Sustrato – Material Proyectoado de 30%WC/70%Ni con la Rugosidad de Rosca de Paso 1,5 mm y Ángulo de Filete 90°, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

En las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se ilustran las imágenes macroscópicas con aumento de 10x de las adherencias del material proyectado, detallándose en la figura 4.4 por cada condición de experimentos y niveles las variables recubrimiento, temperatura y rugosidad (ángulo de filete) que se han tenido en cuenta en la técnica de proyección térmica por llama (flame spray).

En las imágenes de figuras 4.1 y 4.2 se ilustran los acabados de las rugosidades y los recubrimientos observándose: a.) Como los recubrimientos proyectados dibujan la forma de las rugosidades que permiten el anclaje mecánico al sustrato mecanizado. b.) El color del depósito se distingue con el color gris, siendo de color gris claro en la aleación 40%WC/60%Ni de mayor contenido de carburos (WC) y de color gris oscuro en la aleación 30%WC/70%Ni. c.) La apariencia de la superficie del recubrimiento proyectado es de aglomeración de partículas irregulares aplastadas y adheridas una sobre otras, esto se debe al proceso de proyección térmica por llama donde se proyectaron seis capas una capa de anclaje sobre el sustrato con aleación en base níquel y sobre ésta capa se proyectaron después y en forma repetida cinco capas de acuerdo a la condición experimental Tabla 4.1 con la aleación de 40%WC/60%Ni o 30%WC/70%Ni. d.) El espesor del recubrimiento de las seis capas superpuestas se distingue en la proyección térmica por llama de cualquier otra y de otros procesos, llegándose a obtener espesores macro. e.) En el corte a lo largo de la sección longitudinal se aprecia la rugosidad en función del ángulo del filete de la rosca incompleta, debido a que se tomó un paso constante de 1,5 mm y una profundidad constante de 0,75 mm en la figura

4.1 la rosca incompleta para 45° y en la figura 4.2 la rosca incompleta para 90°. f.) Se observa el dimensionado de la probeta de proyección para la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura de sustrato con diámetro 30 mm y largo en éste caso en el intervalo de 65 mm a 70 mm, aunque alguna se llegaron a fabricar al principio de largo en el intervalo 145 mm a 150 mm; la probeta tiene un extremo acabado en forma cónica con el objeto de estabilizar y reducir el área de contacto con la cruceta móvil, cuando la carga sea aplicada en la ejecución del ensayo de cizallamiento, consiguiéndose el arrastre del recubrimiento.

En las imágenes de la figura 4.3 se muestran los detalles de la adherencia o fijación en la intercara sustrato – recubrimiento considerando las variables o factores experimentales rugosidad, temperatura y recubrimiento.



Figuras 4.3. Detalles de Rupturas de Probetas Proyectadas.

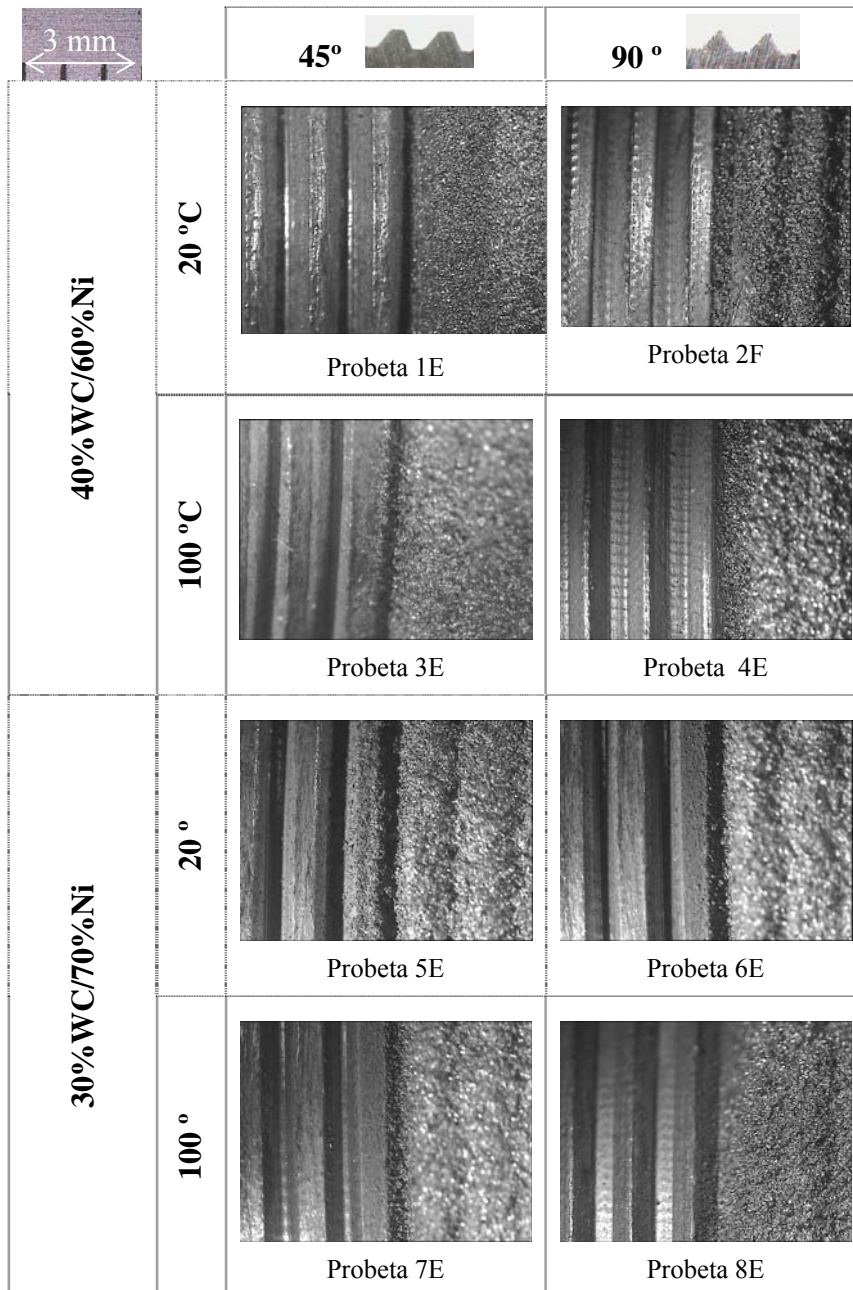
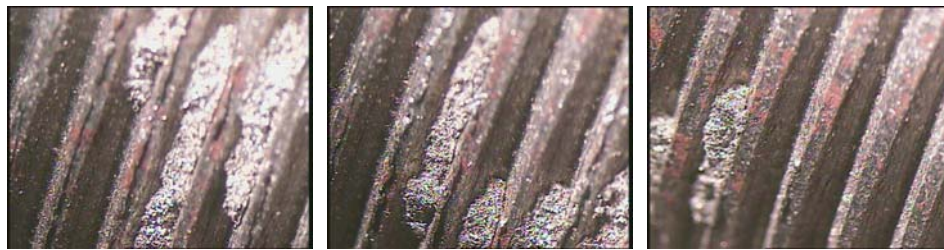


Figura 4.4. Detalles de las Intercaras Sustratos – Materiales Proyectados de WC/Ni [%/%] con relaciones 40/60 y 30/70 de Rugosidades Roscadas de Paso 1,5 mm y Ángulos de Filete (45° y 90°) y Temperaturas de Pre-proyección de 20 °C y 100 °C, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.



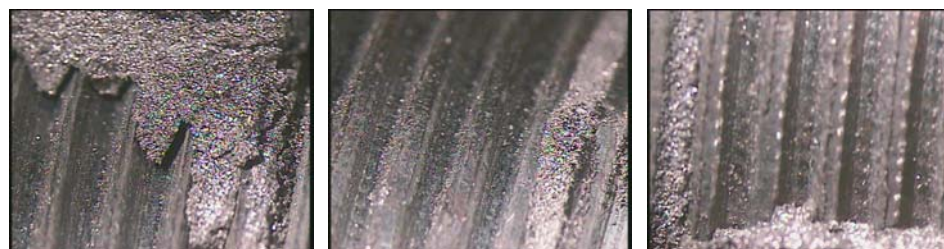
Probeta 1F, 20 °C y 45 °



Probeta 2D, 20 °C y 90 °



Probeta 3B, 100 °C y 45 °



Probeta 4B, 100 °C y 90 °



Figura 4.5. Detalles de la Intercara Sustrato – Material Proyectado de aleación 40%WC/60%Ni con de Rugosidades Roscadas de Paso 1,5 mm y Ángulos de Filete (45° y 90°) y Temperaturas de Pre-proyección de 20 °C y 100 °C, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

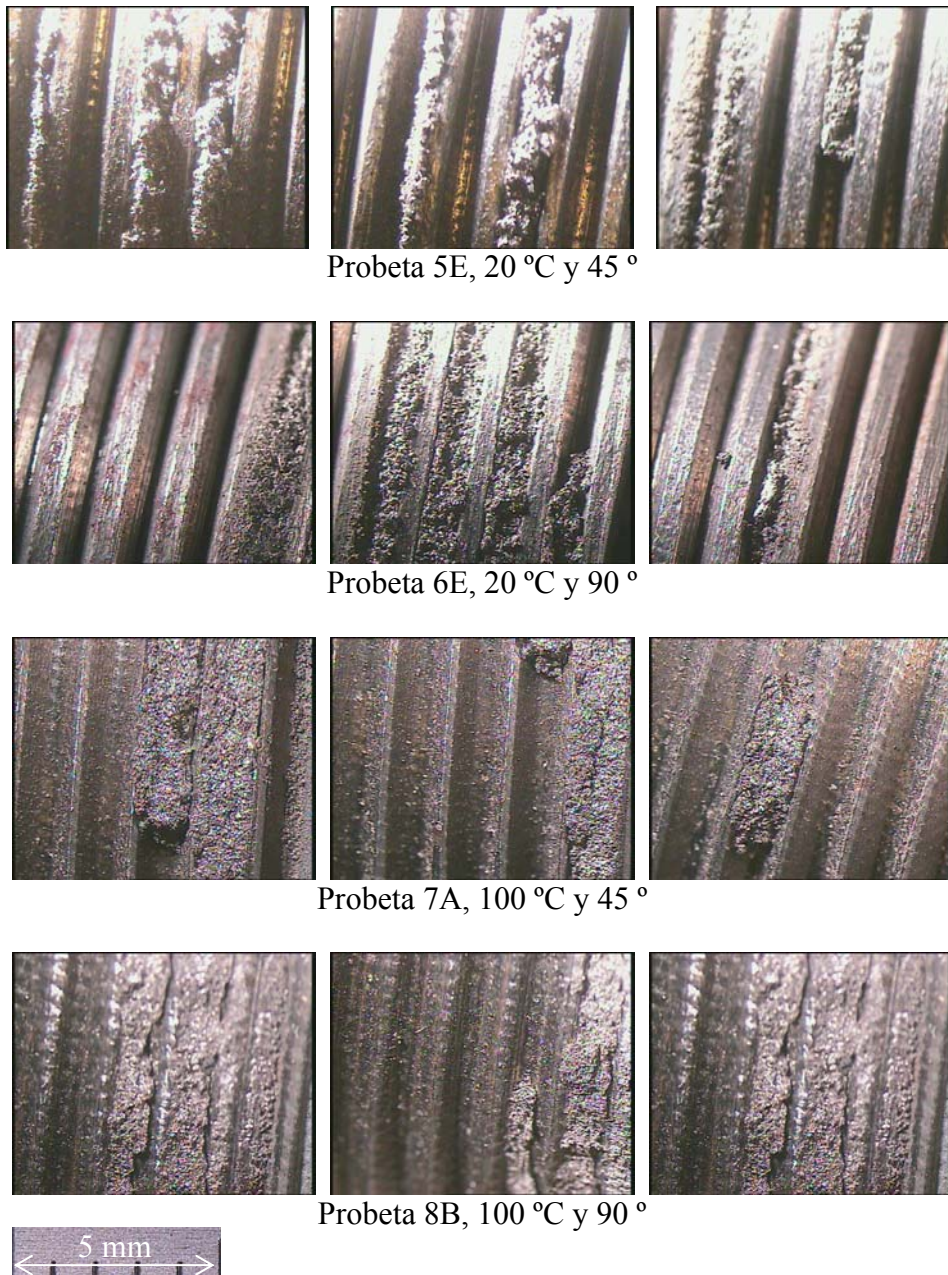


Figura 4.6. Detalles de la Intercara Sustrato – Material Proyectado de aleación 30%WC/70%Ni con de Rugosidades Roscadas de Paso 1,5 mm y Ángulos de Filete (45° y 90°) y Temperaturas de Pre-proyección de 20 °C y 100 °C, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

En las imágenes de las figuras 4.3, 4.5 y 4.6 se muestran las macroscopías de las fracturas provocadas en la intercara sustrato – recubrimiento, cuando se hace el ensayo de cizalladura forzando la probeta recubierta cargada contra una matriz de corte; también se detallan los aspectos superficiales de las roturas por cada condición de experimentos y niveles en las imágenes, las rupturas o fracturas observadas en los restos de los recubrimientos que han quedado adheridos al sustrato tienen aspecto brillante con plano de deslizamiento del corte provocado, tipo fractura frágil. También hay presencia de óxidos.

Se obtuvo con la macroscopía óptica las superficies naturales sin y con aumento 10x, el acabado mecanizado del sustrato, la presencia de óxidos, el color del depósito gris claro en la aleación comercial 40%WC/60%Ni y gris oscuro en la aleación preparada 30%WC/70%Ni, la aglomeración de partículas irregulares aplastadas y adheridas una sobre otras en los recubrimientos, el espesor macro de las capas superpuestas y la fractura tipo frágil por cada condición de experimentos.

4.1.1.2. Microscopía Óptica.

Las micro-estructura del material proyectado carburo de wolframio (volframio o tungsteno) más níquel (WC/Ni) en sus dos composiciones química, en tanto por ciento en peso, se han ilustrado después de un ataque con el reactivo ácido nítrico (HNO_3) + agua destilada (H_2O) al 50% en las figura 4.7 y 4.8.

Primeramente, según el Capítulo III, punto 3.2.3.1 la aleación comercial certificada de carburo de wolframio más níquel (WC/Ni) es de tipo compuesta por una distribución de finas partículas de carburo de wolframio (WC) en una matriz de níquel cromo (NiCr), en relación de 40/60 por ciento en peso, denotándose comercialmente como 40%WC/60%Ni. Fundamentándose en la normativa UNE EN 10204; la aleación en polvo contiene: 40% Carburos + 3,3 % B + 0,8 % C + 4,2 % Si + 15,5 % Cr + 3,9 % Fe + Ni base.

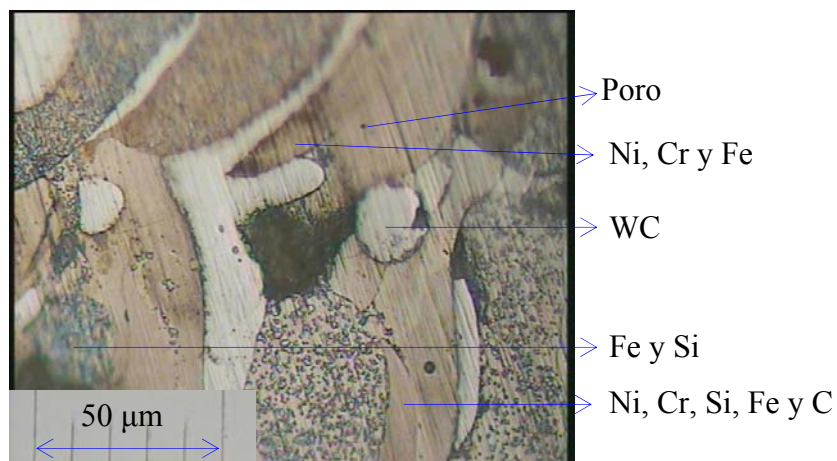


Figura 4.7. Microestructura de la Aleación 40%WC/60%Ni, Microscopía Óptica 400x.

En la figura 4.7 se observan los componentes de la aleación 40%WC/60%Ni, en esta los carburos de wolframio (WC) tienen una apariencia de color blanco grisáceo, brillante con estructura dendrítica de diversas formas irregulares, el boro (B) y el carbono (C) tienen un color negro, el silicio (Si), el hierro (Fe) y el cromo (Cr) tienen un color gris el silicio más oscuro con un tono azulado y son brillantes: el hierro, el cromo formador de carburo y el níquel (Ni) de color blanco.

La aleación preparada 30%WC/70%Ni contiene los siguientes elementos carburos (WC), boro (B), carbono (C), silicio (Si), cromo (Cr), hierro (Fe), aluminio (Al), Molibdeno (Mo) y balance níquel (Ni). En la figura 4.8 se observan los componentes de la aleación 30%WC/70%Ni, en esta los carburos de wolframio (WC) tienen una apariencia de color blanco grisáceo, brillante con estructura dendrítica de diversas formas irregulares, el boro (B) y el carbono (C) tienen un color negro, el silicio (Si), el hierro (Fe), el cromo (Cr) tienen un color gris el silicio más oscuro con un tono azulado y son brillantes: el hierro, el níquel (Ni) de color blanco, el cromo y el molibdeno (Mo) de color blanco grisáceo formadores de carburos, y el aluminio (Al) de color blanco.

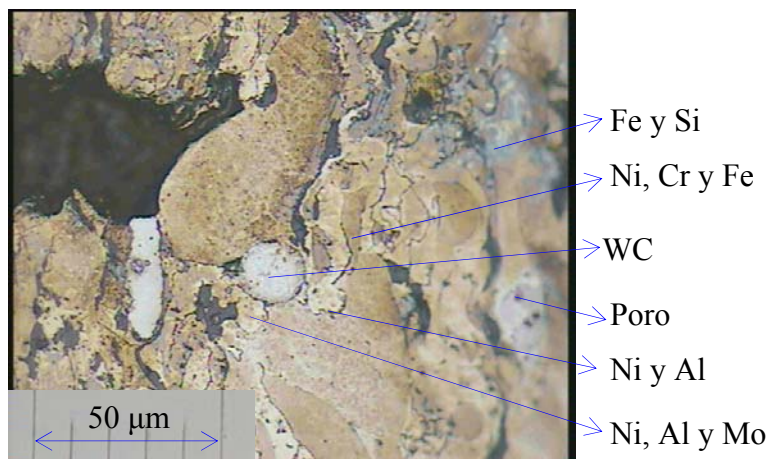


Figura 4.8. Microestructura de la Aleación 30%WC/70%Ni, Microscopía Óptica 400x.

Resultando con la microscopía óptica observar las superficies atacadas usando aumento de 400x, la microestructura de la aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, identificación de formas y colores, zonas diluidas y límites de zonas, granos y poros.

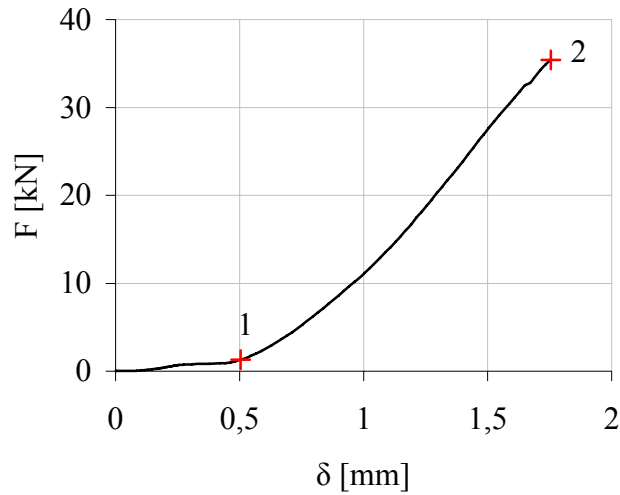


Figura 4.9. Diagrama de Carga versus Deformaciones Lineales (F-δ) de la Probeta 1A, Perteneciente al Grupo de Experimentos 1 con Recubrimiento Total.

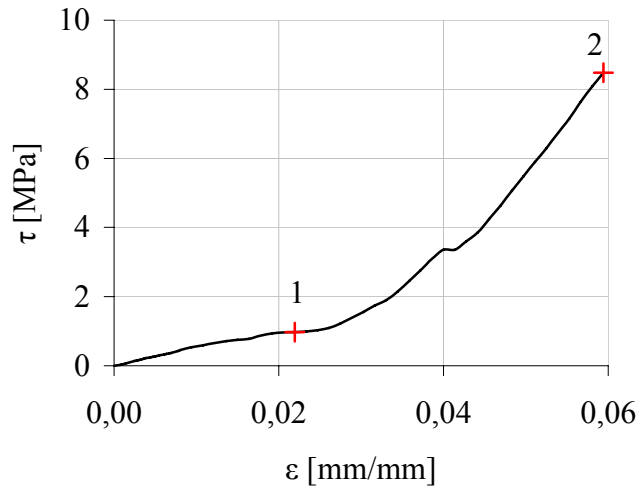


Figura 4.10. Diagrama de Esfuerzos de Cizalladura versus Deformaciones Unitarias Lineales (τ-ε) de la probeta 1A Perteneciente al Grupo de Experimentos 1 con Recubrimiento Total.

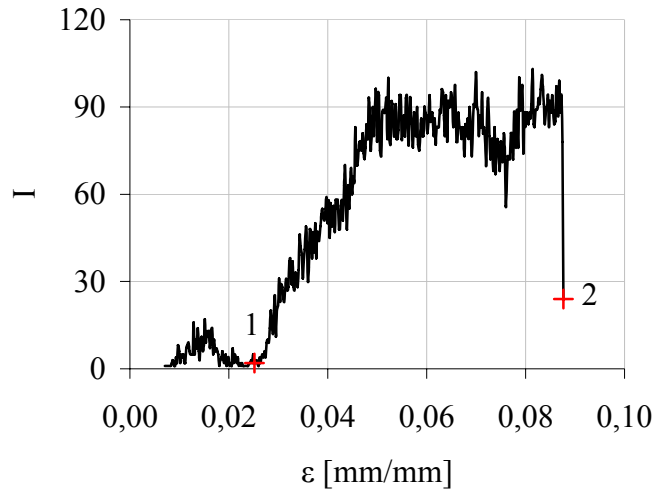


Figura 4.11. Diagrama de Impactos versus Deformaciones Unitarias Lineales (I- ϵ) de la Probeta 1A, Perteneciente al Grupo de Experimentos 1 con Recubrimiento Total.

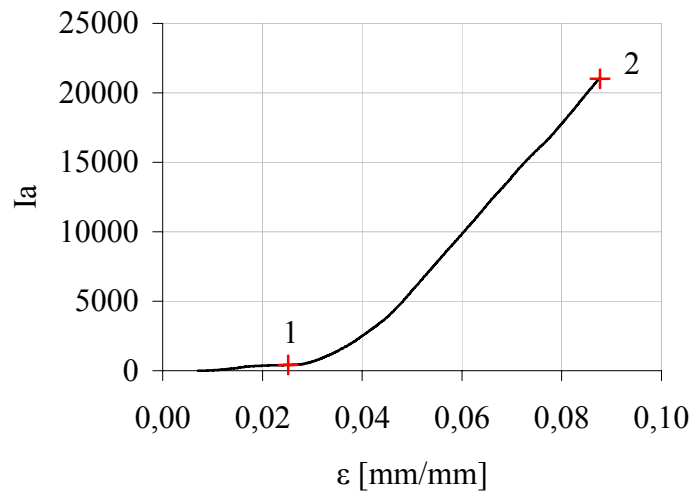


Figura 4.12. Diagrama de Impactos Acumulados versus Deformaciones Unitarias Lineales (Ia- ϵ) de la Probeta 1A, Perteneciente al Grupo de Experimentos 1 con Recubrimiento Total.

Tabla 4.2. Valores Promedios de WC/Ni para 7 réplicas de la experimentación: Cargas de Cizalladura (F_1 y $F_R=F_2-F_1$), Deformaciones Lineales (δ_1 y $\delta_R=\delta_2-\delta_1$), Porosidades (P_p) y Microdurezas Vickers (HV), Esfuerzos de Cizalladuras (τ_1 y $\tau_R=\tau_2-\tau_1$), Deformaciones Unitarias Lineales (ε_1 y $\varepsilon_R=\varepsilon_2-\varepsilon_1$) y Rigideces $G_R=(\tau_2-\tau_1)/(\varepsilon_2-\varepsilon_1)=\tau_R/\varepsilon_R$ en los Experimentos para Recubrimiento Total (ExpT.), Apéndice A.4.

ExpT.	F_1 [kN]	δ_1 [mm]	F_R [kN]	δ_R [mm]	P_p [%]	HV	τ_1 [MPa]	ε_1 [mm/mm]	τ_R [MPa]	ε_R [mm/mm]	G_R [MPa]
1	0,94	0,48	23,89	1,03	11,70	979,93	0,56	0,022	14,24	0,058	245,35
2	0,81	0,54	25,11	1,08	10,72	975,35	0,46	0,019	14,27	0,058	246,89
3	0,81	0,50	31,16	1,22	11,94	976,79	0,53	0,019	20,44	0,076	269,74
4	0,87	0,44	32,60	1,21	12,22	975,69	0,52	0,017	18,46	0,060	305,67
5	0,92	0,48	24,64	0,95	10,19	957,84	0,65	0,020	17,43	0,063	274,66
6	0,91	0,43	30,97	1,12	9,77	964,44	0,65	0,019	21,91	0,075	293,51
7	0,73	0,42	30,49	1,13	9,48	964,22	0,51	0,017	21,57	0,076	285,65
8	0,92	0,42	40,10	1,11	10,88	967,01	0,65	0,017	28,36	0,074	383,29

Las pruebas experimentales para la determinación de la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura, con el objeto de cuantificarla, se realizaron a probetas con recubrimiento proyectado por la técnica de proyección térmica por llama (flame spray) y a la vez que se realizaban los ensayos de cizalladuras, también simultáneamente se detectaban con elementos transductores o sensores piezos-eléctricos de las ondas mecánicas que contienen información sobre el comportamiento interno del material como crecimientos de grietas, cambios en la estructura del material, etc.; estos se hacia a través de la técnica de emisión acústica descrita en el Capítulo III, punto 3.3.2.2. Cuando las probetas proyectadas con

recubrimiento son sometidas a cizalladura ocurren deformaciones y microfisuraciones, acompañadas de ondas mecánicas como consecuencia de las cargas aplicadas que generan procesos de deformaciones, en éste caso en el material del recubrimiento y finalmente la fractura de la misma. Para detallar los resultados de la adquisición de los datos la probeta 1A perteneciente al grupo de experimento 1 se ha tomado ilustrándose en la figura 4.9 las cargas de cortes y deformaciones lineales, y sus derivadas de esfuerzos de cizalladuras y deformaciones lineales unitarias en la figura 4.10 para los ensayos de cizalladuras y los productos de sus ondas de emisiones acústicas de señales e intensidades de impactos e impactos acumulado en función del tiempo, ver las figuras 4.11 y 4.12.

La probeta 1A pertenece al grupo de experimentos 1 con recubrimiento total, ilustrada en las figuras 4.9 y 4.10 y representadas estas pruebas de la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura, Capítulo III, punto 3.3.3.1, da el diagrama $F-\delta$ para la misma probeta 1A. En estos diagramas se observan: a.) Zona 0–1, donde sucede: primero que está libre o sin contacto entre la mordaza de la máquina de ensayo y la probeta a cizallar y segundo que existe pre-compresión, donde comienza a tener contacto la mordaza y la probeta y b.) Zona pseudo-elástica representada por el inicio en el punto 1 hasta el punto 2 donde ocurre la ruptura y es válida la ley de Robert Hooke; en cuanto a la emisión acústica, figuras 4.11 y 4.12. Referida a estas dos zonas a continuación se realizan los análisis de los diagramas: 4.1.1.3 Análisis del Diagrama Impactos Versus Deformaciones Unitarias. 4.1.1.4. Análisis del Diagrama Impactos Acumulados Versus Deformaciones Unitarias.

4.1.1.3 Análisis del Diagrama Impactos Versus Deformaciones.

En este diagrama de impactos versus deformaciones unitarias “I- ϵ ” figura 4.11, se muestra la zona 0–1 de acomodamiento y pre-compresión entre los puntos 0 y 1, donde primero suceden pocos impactos (I) debido al contacto incompleto del extremos de forma cónica de la probeta con la mordaza móvil de la máquina de ensayo y a los valores pequeños de deformaciones (ϵ) y segundo comienza a detectarse crecimiento de los impactos o señales (I). Y también la zona pseudo-elástica o 1–2, en donde los impactos registrados se originan por micro-fisuras y deformaciones; luego el incremento de las deformaciones internas en el material del recubrimiento WC/Ni, generan nuevas microfisuras, grietas y propagación de éstas, emitiendo más impactos acústicos, cuanto más se aproxima a la ruptura del recubrimiento por cizallamiento. En la zona 1–2 se observa que los impactos aumentan, luego tienen pocas variaciones y finalmente disminuyen o decrecen hasta suceder la ruptura en el punto 2.

Se obtuvo del análisis de la emisión acústica en conjunto con el ensayo de cizalladura que en la curva impactos versus deformaciones en los recubrimientos de aleación de WC/Ni dos zonas se distinguen: 1.) Zona de acomodamiento y pre-compresión donde suceden pocos impactos o señales. 2.) Zona pseudo-elástica donde aumentan los impactos por la formación progresivamente de micro-fisuras y deformaciones hasta la ruptura por cizalladura lo que determina la adherencia del recubrimiento.

4.1.1.4. Análisis del Diagrama Impactos Acumulados Versus Deformaciones.

En este diagrama de impactos acumulados versus deformaciones unitarias “ $I_a-\epsilon$ ”, figura 4.12, en la zona 0 – 1 primero de recorrido y ajuste de la mordaza móvil, para hacer contacto con la probeta, se tienen pocos impactos acumulados sin efectos, que ocurran sobre la probeta y segundo una pre-compresión donde se detecta inicio de crecimiento de los impactos o señales acumuladas (I_a). Se observa la zona 1–2 o pseudo-elástica, donde los impactos acumulados son directamente proporcionales. Los impactos acumulados implican las intensidades de los impactos producto de microfisuras y grietas con su debida propagación y evolución.

Resultó del análisis de la emisión acústica en conjunto con el ensayo de cizalladura que en la curva impactos acumulados versus deformaciones en los recubrimientos de aleación de WC/Ni dos zonas se diferencian: 1.) Zona de acomodamiento y pre-compresión donde suceden pocos impactos o señales. 2.) Zona pseudo-elástica donde aumentan los impactos por la formación gradualmente de microfisuras y deformaciones hasta la ruptura por cizalladura, lo que determina la adherencia del recubrimiento.

Se identificaron dos zonas por analogía del ensayo de cizallamiento y de emisión acústica adquirida conjuntamente cuando se realiza el ensayo de la probeta recubierta: 1.) La zona de acomodamiento y pre-compresión los esfuerzos de cizalladura, las deformaciones, los impactos e impactos acumulados son de bajo energía y además las

señales de impactos son pocas debido al acomodo que sucede. 2.) La zona pseudo-elástica los esfuerzos de cizalladura e impactos acumulados son directamente proporcionales a las deformaciones ($\tau \propto \varepsilon$ y $Ia \propto \varepsilon$). Con relación a los impactos primero aumentan, luego varían poco y finalmente disminuyen hasta ocurrir la ruptura. En ésta zona pseudo-elástica se verifica mediante la emisión acústica que en la probeta ensayada ocurren internamente procesos de microdeformaciones y deformaciones que se desarrollan repetidamente causando microfisuraciones, microsaltos, o discontinuidades y deformaciones, incrementándose la concentración de esfuerzos residuales y finalmente se produce la fractura o la ruptura por corte del recubrimiento, lo que cuantifica la medida adherencia o fijación por cizallamiento.

4.1.1.5. Los Esfuerzos de Cizalladura.

Los esfuerzos de cizalladura (τ), punto 3.3.3.1, figura 4.10, obtenido como respuesta, o indicadores resistentes del diagrama de cargas (F) deformaciones lineales (δ) mostrados en la figura 4.9. Estos son los esfuerzos de cizalladura en la zona pseudo-elástica de inicio el punto 1, $\tau_1 = F_1/A$, y final el punto 2, $\tau_2 = F_2/A$, ruptura del recubrimiento ocurrida en el punto 2, $\tau_R = \tau_2 - \tau_1$, donde el área es $A = \Delta A = (\Delta\theta/2) D \Delta z$, siendo D el diámetro de la probeta, $L = \Delta\theta (D/2) = \Delta\theta R$ la longitud y $\Delta z = h$ la altura proyectada del material del recubrimiento. Para una probeta con recubrimiento total se tiene el ángulo del círculo $\Delta\theta = 2\pi$ y la longitud del perímetro $L = 2\pi R = \pi D$, resultando el área de cizalladura $A = A_{cT} = \pi D h$, los valores de los esfuerzos τ_R calculados se muestran en cada uno de sus siete (7) repeticiones por probeta en la Tabla 4.3 y sus promedios en la Tabla 4.2.



a.)

b.)

c.)

Figura 4.13. Fotografías: a.) Probetas, b.) Ensayo de Cizalladura y c.) Probetas con Roturas.

Tabla 4.3. Matriz de Diseño de los Esfuerzos de Cizalladura en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: A=Rugosidad [°], B=Temperatura [°C], C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%] y Respuesta=Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpT	Variables			Respuestas (τ_R [MPa])						
	A	B	C	1	2	3	4	5	6	7
1	45 (-)	20	40/60 (-)	18,10	15,76	14,79	13,28	11,81	15,25	10,70
2	90 (+)	(-)		10,39	17,81	17,54	16,44	15,85	16,29	13,29
3	45 (-)	100		34,39	15,28	30,87	10,02	21,19	19,05	12,31
4	90 (+)	(+)		16,56	21,83	19,58	16,04	14,01	20,50	20,68
5	45 (-)	20	30/70 (+)	18,25	24,26	18,55	12,16	11,64	10,37	26,76
6	90 (+)	(-)		20,27	23,64	10,26	16,46	21,63	31,58	29,52
7	45 (-)	100		18,54	24,55	19,60	18,62	23,83	26,40	19,45
8	90 (+)	(+)		31,25	34,68	24,17	21,33	28,29	26,88	31,95

En la figura 4.14 se representa el análisis de los efectos estimados e interacciones en gráficos de Pareto trazado en orden decreciente de importancia. Dichas estimaciones resulta y (+) es de las variables respuestas en este caso los esfuerzos de cizalladura (τ_R), causante de la de ruptura en el

punto 2, de promedio $\tau_R = 19,72 \pm 0,71$ MPa, valor alrededor del cual han variadas las respuestas. Se observa que los esfuerzos de cizalladura τ_R se modifican con: el factor o variable independiente C, el material proyectado en base WC/Ni al pasar de la relación de % en peso de composición química del nivel negativo de 40/60 al nivel positivo de 30/70 en $5,19 \pm 1,41$ unidades. Igualmente la variable B, la temperatura al subir de 20°C a 100°C en $4,97 \pm 1,41$ unidades; y el producto de la variable A, el ángulo del filete, por la variable C, el material de polvos micropulverizados WC/Ni, elevándose con la interacción AC de $45^\circ * 40/60$ a $90^\circ * 30/70$ en $3,03 \pm 1,41$ unidades.

Gráfico de Pareto estandarizado para Esfuerzos de Cizalladura

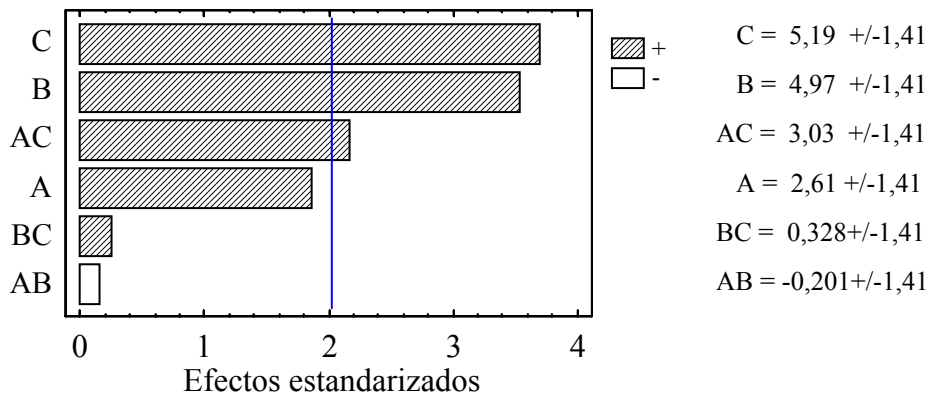


Figura 4.14. Efectos Estimados de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) donde: A=Rugosidad, B=Temperatura, C=Recubrimiento.

*Se observo que las mejores condiciones de adherencia o fijación a cizalladura en la intercara sustrato – recubrimiento se obtienen para los valores de nivel alto (+), es decir, para los factores B=100 °C y C=30%WC/70%Ni y la combinación de los factores AC=90° * 30%WC/70%Ni.*

Tabla 4.4. Análisis de la Varianza para Esfuerzo de Cizalladura τ_R .

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	95,00	1	95,00	3,25	0,0775
B	346,01	1	346,01	11,85	0,0012
C	376,90	1	376,90	12,91	0,0008
A*B	0,57	1	0,57	0,02	0,8896
A*C	128,78	1	128,78	4,41	0,0410
B*C	1,50	1	1,50	0,05	0,8214
A*B*C	25,81	1	25,81	0,88	0,3518
Residuos	1401,35	48	29,19		
Total (corregido)	2375,93	55			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Mediante el análisis de la varianza señalado en la Tabla 4.4, las variables respuestas τ_R son afectadas por la variable C, el material WC/Ni en 99,92 % (P = 0,0008); la variable B, la temperatura en 99,88 % (P = 0,0012), el producto de la variable A, el ángulo del filete, por la variable C, el material micropulverizados WC/Ni en 96,90% (P = 0,0410) y la variable A, la rugosidad dada por el ángulo del filete en 92,25 % (P = 0,0775).

Indicó el análisis de varianza para los esfuerzos de cizalladura que 3 efectos (B, C y A*C) tuvieron los p-valores inferiores a 0,05 (P<0,05), es decir, las medias para los niveles de los factores temperatura (B), recubrimiento (C) y la interacción rugosidad*recubrimiento (A*C) son diferentes significativamente, con 95,0 % de nivel de confianza. Los demás efectos (A, A*B y B*C) no tuvieron medias con diferencia estadística significativa (P>0,05).

Para probar la significación estadística de cada efecto encontrado en el análisis de varianza o prueba de F, se aplicará un método de comparaciones múltiples de medias para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En el presente trabajo se ha seleccionado el método ideado por Fisher (Diferencia Mínima Significativa (D.M.S.), que en inglés se define como L.S.D. (Least Significant Difference)).

En la figura 4.15 se observa para el factor temperatura (B) que las medias **a** y **b** difieren en $-4,97$ MPa siendo ésta diferencia en valor absoluto mayor que la mínima diferencia significativa ($DMS_{0,05}=2,90$ MPa), lo que denota una diferencia de las medias estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confiabilidad.

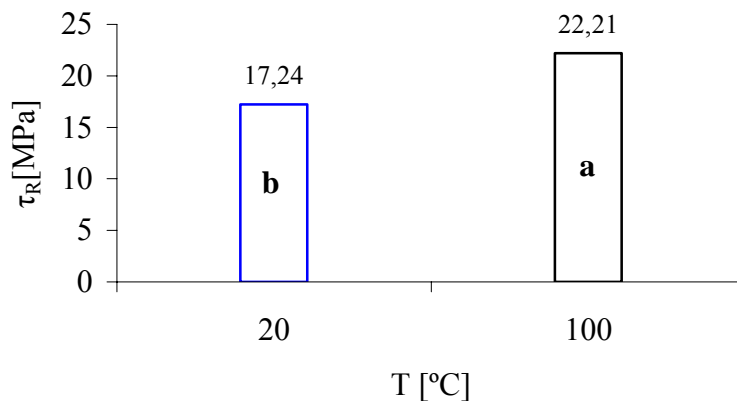


Figura 4.15. El Efecto Significativo del Factor Temperatura (B) para los Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) con $DMS_{0,05}$.

La adherencia a la cizalladura en la intercara sustrato-recubrimiento aumenta con la temperatura. La temperatura óptima en función de los esfuerzos de cizalladura ha sido de 100 °C.

En la figura 4.16 se muestra que las medias difieren debido a la interacción A*C de los factores rugosidad (A) y recubrimiento (C), estando éstas diferencias en valores absolutos superiores que la mínima diferencia significativa $DMS_{0,05}$, lo que expresa diferencias de las medias estadísticamente significativas con un 5 % de riesgos. La acción conjunta A*C se encuentra fuera del área de explorada de estos factores, rugosidad y recubrimiento. Debido a éste comportamiento hay mayor adherencia entre la intercara sustrato – recubrimiento a resistir los esfuerzos de cizalladura.

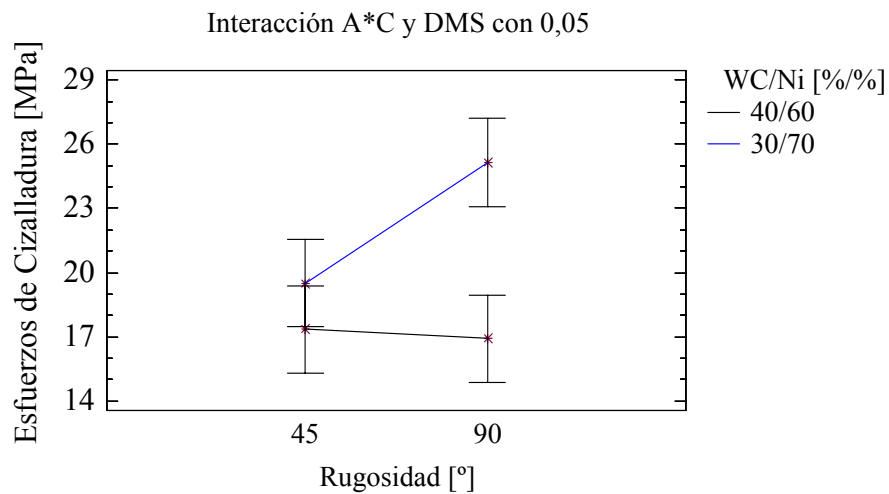


Figura 4.16. La Interacción Significativa Rugosidad * Recubrimiento (A*C) para los Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) con $DMS_{0,05}$.

La adherencia entre sustrato-recubrimiento en función del esfuerzo de cizalladura, es mayor cuando el contenido de níquel (Ni) está en mayor proporción, es decir, en la aleación 30%WC/70%Ni y la rugosidad con ángulo de filete de 90 °.

Se hizo un análisis de regresión lineal simple para ver el comportamiento de los esfuerzos en los diferentes experimentos para recubrimiento total (ExpT), en la figura 4.17 se ilustra la comparación de los promedios en orden creciente de los esfuerzos de cizalladura de ruptura (τ_R) versus experimentos (ExpT). En la cual se observa una relación proporcional, es decir, al pasar por las distintas condiciones de un experimento a otro en forma creciente los esfuerzos τ_R son más elevados en la zona pseudo-elástica (1-2), figura 4.10. Teniendo en cuenta que el estadístico de regresión (R^2) para el modelo lineal ajustado en el diagrama de la figura 4.12 explica la variabilidad del esfuerzos τ_R en 91,11 %.

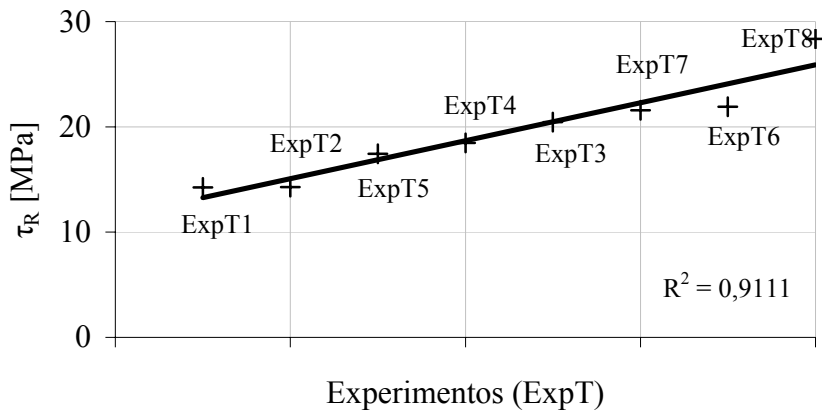


Figura 4.17. Diagrama de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) versus Experimentos para recubrimiento total (ExpT).

Los esfuerzos de cizalladura, en este caso, tienen relación proporcional de acuerdo a las condiciones de cada experimento estudiado para recubrimiento total.

En las curvas de dispersiones ajustadas a un modelo lineal mostradas en la figura 4.18, existe semejanza directamente proporcional en cuanto a las relaciones de las variables. Las aleaciones WC/Ni de los recubrimientos de 60/40 y 70/30, en tanto por ciento en peso, no se observan intersecciones en el intervalos de trabajo, señal indicadora en este caso de una independencia en cuanto a los materiales de las dos aleaciones cerámicas de WC/Ni. Dichos coeficientes de correlaciones, R^2 de 0,8977 para 30%WC/70%Ni y 0,8967 para 40%WC/60%Ni, de ajuste de la curva en forma lineal son buenos, y son indicativos del grado de confianza y dependencia de las variables: rugosidad, temperatura y recubrimiento.

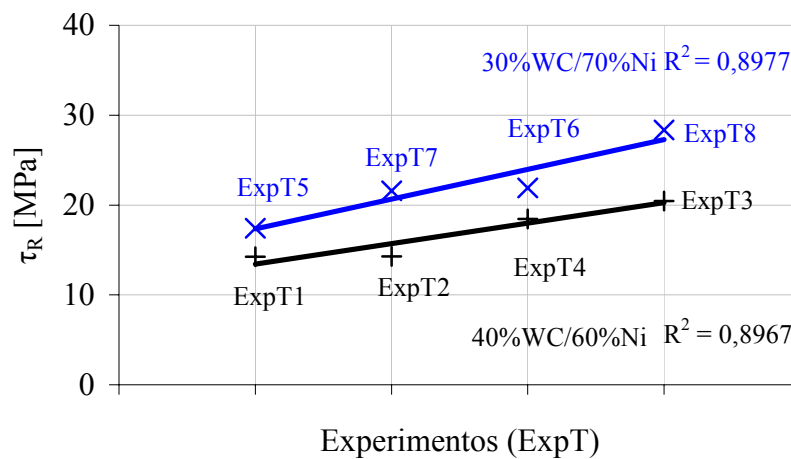


Figura 4.18. Diagrama Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) versus Experimentos (ExpT) para el Recubrimientos WC/Ni con proporción en % peso de 40/60 y 30/70.

Se obtuvo una relación proporcional semejante para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel de la aleación de WC/Ni. Resultando el mayor esfuerzo de cizalladura en el material WC/Ni con la proporción 30/70 en por ciento de peso.

4.1.1.6. Las Rigideces.

Las rigideces (G) del material proyectado, la figura 4.10, se determinaron en la zona pseudo-elástica comprendida entre los punto 1 y 2. En este último punto donde ocurre la ruptura dentro de los límites de la ley de Robert Hooke, las rigideces de ruptura (G_R) se obtuvieron por $G_R = (\tau_2 - \tau_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) = \tau_R / \epsilon_R$, donde las deformaciones unitarias lineales (ϵ) vienen dadas por $\epsilon = \delta / L$. Los resultados de las rigideces G_R calculadas por probeta en la Tabla 4.5 y sus promedios en la Tabla 4.2.

Tabla 4.5. Matriz de Diseño de las Rigideces en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo y alto para el diseño 2^3 de las variables: A=Rugosidad [°], B=Temperatura [°C], C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%], Respuestas=Rigideces de Ruptura (G_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpT	Variables			Respuestas (G_R [MPa])						
	A	B	C	1	2	3	4	5	6	7
1	45 (-)	20	40/60 (-)	289,52	276,77	236,70	227,69	201,74	290,39	194,58
2	90 (+)	(-)		247,09	252,88	267,65	241,59	255,40	211,37	265,79
3	45 (-)	100		325,81	238,12	308,63	127,92	284,87	318,89	254,68
4	90 (+)	(+)		340,61	324,47	284,78	235,72	267,98	333,49	367,74
5	45 (-)	20	30/70 (+)	302,90	335,86	287,90	203,56	194,95	219,65	332,10
6	90 (+)	(-)		217,18	309,43	223,90	241,89	352,32	366,73	323,00
7	45 (-)	100		278,07	264,71	313,67	273,57	311,93	301,76	260,26
8	90 (+)	(+)		482,82	445,92	376,69	255,96	415,76	349,30	384,80

Seguidamente, los resultados que se determinaron aplicando el programa Statgraphics Plus 5.1, fueron: el análisis y varianzas tomando como variables respuestas en estos casos las rigideces G_R entre los puntos 1-2 mostrado en la figura 4.10.

En la figura 4.19, se muestran los efectos estimados e interacciones representados en orden decreciente de importancia por gráficos de Pareto de los resultados estimados debidos a las rigideces de promedio $G_R = 287,49 \pm 6,32085$ MPa, observándose que se afectan por la variable B, la temperatura pasó de 20 °C a 100 °C en 48,5143 \pm 12,6417 unidades; la variable A, el ángulo del filete al incrementarse de 45 ° a 90 ° en 42,3236 \pm 12,6417 unidades; la variable C, el material de aleación en base WC/Ni al pasar de la relación de % en peso del nivel negativo de 40/60 al nivel positivo de 30/70 en 41,2043 \pm 12,6417 unidades; el producto de la variable A, el ángulo del filete, por la variable B, la temperatura, con la interacción del producto AB de 45 ° * 20 °C a 90 ° * 100 °C en 29,33 \pm 12,6417 unidades y el producto de la variable A, el ángulo del filete, por la variable C, el material aleación WC/Ni, con la interacción del producto AC de 45 ° * 40/60 a 90 ° * 30/70 en 19,4486 \pm 12,6417 unidades.

Gráfico de Pareto estandarizado para Rigideces

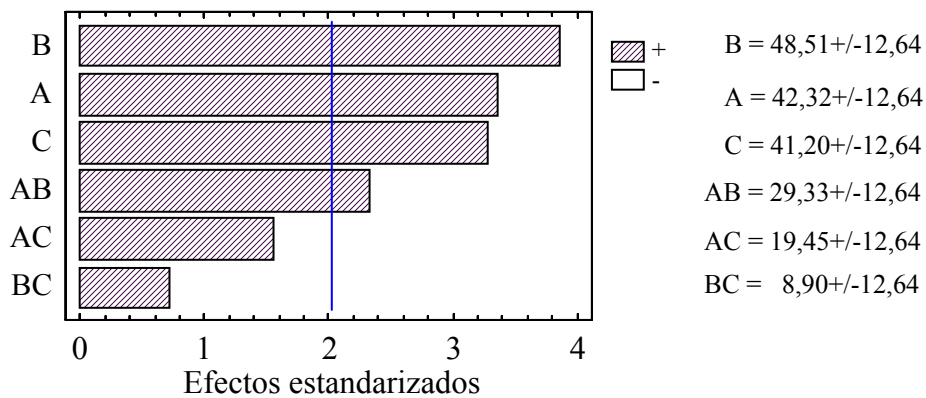


Figura 4.19. Efectos Estimados de G_R donde: A=Rugosidad, B=Temperatura, C=Recubrimiento.

Las condiciones dominantes de las rigideces para la adherencia al sustrato del recubrimiento las proporcionan los valores de nivel alto (+) de las variables: A=90 °, B=100 °C, C=30%WC/70%Ni y la combinación de las variables AB= 90 ° * 100 °C.

Del análisis de la varianza señalado en la Tabla 4.6. de las variables respuestas G_R , resultó que se afectaron con la variable A, el ángulo del filete en 99,57 % (P = 0,0043); la variable B, la temperatura al elevarse en 99,88 % (P = 0,0012); la variable C, el material proyectado WC/Ni en 99,47 % (P = 0,0053); el producto AB de la variable A, el ángulo del filete, por la variable B, la temperatura en 95,68 % (P = 0,0432) y el producto AC de la variable A, el ángulo del filete, por la variable C, el material aleación WC/Ni en 82,52 % (P = 0,1748).

Tabla 4.6. Análisis de la Varianza para Rigideces (G_R).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	25078,00	1	25078,00	8,98	0,0043
B	32950,90	1	32950,90	11,80	0,0012
C	23769,10	1	23769,10	8,51	0,0053
A*B	12043,50	1	12043,50	4,31	0,0432
A*C	5295,46	1	5295,46	1,90	0,1748
B*C	1109,83	1	1109,83	0,40	0,5314
A*B*C	1382,65	1	1382,65	0,50	0,4850
Residuos	134008,00	48	2791,82		
Total (corregido)	235637,0	55			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Resultando para las rigideces que 4 de los efectos (A, B, C y A*B) tuvieron los p-valores inferiores a 0,05 (P<0,05), es decir, las medias para

*los niveles de las variables rugosidad (A), temperatura (B), recubrimiento (C) y la interacción rugosidad * temperatura (A*B) son significativamente diferentes, con 95,0 % de confiabilidad. En los restante efectos (A*C y B*C) no se observaron medias con diferencias significativas ($P > 0,05$).*

La significación de los efectos obtenidos a través del análisis de varianza se comprobó aplicándose el método elegido en este trabajo para las comparaciones múltiples de medias de variables, la cual es la prueba de DMS (Diferencia Mínima Significativa).

De la figura 4.20 se determina para la variable recubrimiento (C) que las diferencias de las medias $\mathbf{b} - \mathbf{a} = - 41,20$ MPa y el valor absoluto es mayor que la mínima diferencia significativa $|b - a| > DMS_{0,05} = 28,39$ MPa, lo que indica una diferencia de las medias estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confiabilidad.

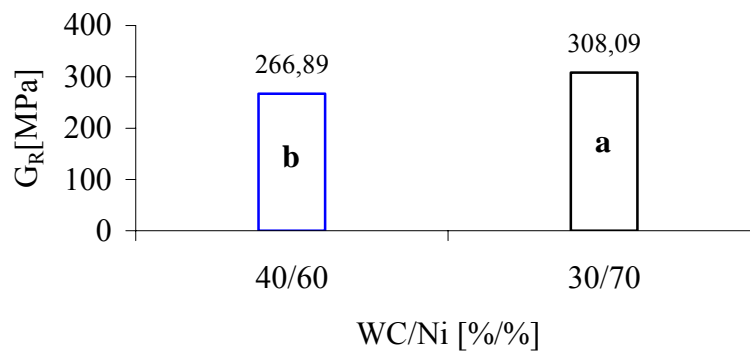


Figura 4.20. El Efectos Significativo de el Variable Recubrimiento (C) para las Rigideces (G_R) con $DMS_{0,05}$.

La adherencia entre sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, es superior cuando el contenido de níquel (Ni) está en mayor proporción, o sea, la aleación del recubrimiento 30%WC/70%Ni°.

En la figura 4.21 se muestra que las medias difieren debido a la interacción A*B de las variables rugosidad (A) y temperatura (B), estando éstas diferencias en valores absolutos superiores que la mínima diferencia significativa $DMS_{0,05}$, lo que denota diferencias de las medias significativas al 95 % de confiabilidad. La acción de interacción A*B se halla externamente al área de influencia de las variables rugosidad y temperatura, debido a éste comportamiento hay mayor adherencia en función de las rigideces entre sustrato – recubrimiento.

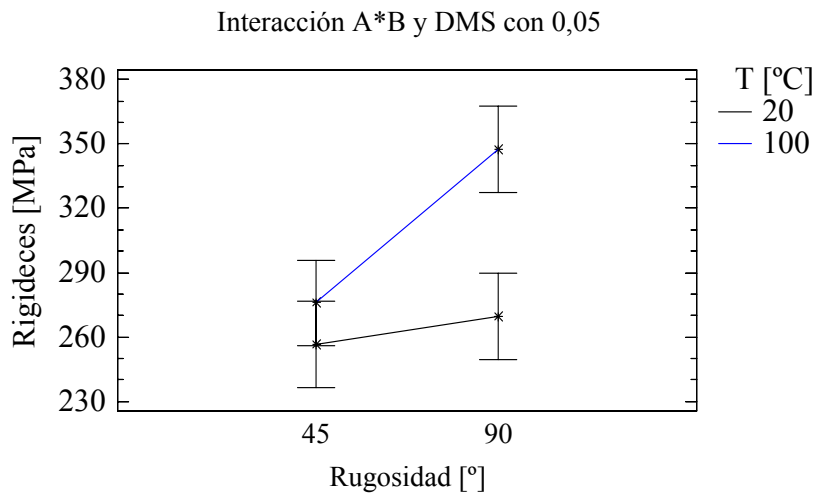


Figura 4.21. La Interacción Significativa Rugosidad*Temperatura (A*B) para las Rigideces (G_R) con $DMS_{0,05}$.

La adherencia entre sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, aumenta con la temperatura óptima de 100 °C y para una rugosidad roscada con ángulo de filete de 90 °.

Se realizó un análisis de regresión lineal simple para ver el comportamiento de las rigideces en los distintos experimentos para recubrimiento total (ExpT). En la figura 4.22 se representa la comparación de los promedios de las rigideces de ruptura (G_R) en la zona 1–2 versus experimentos (ExpT). También las rigideces de ruptura, al igual que los esfuerzos de cizalladura de ruptura, en esta zona pseudo-elástica muestran una relación proporcional de acuerdo a las condiciones de un experimento a otro ordenado de forma creciente, en sentido de aumento de las rigideces (G_R). El estadístico R–cuadrado mide en el modelo lineal la bondad del ajuste explicando 79,68 %. de la variabilidad de las rigideces de ruptura.

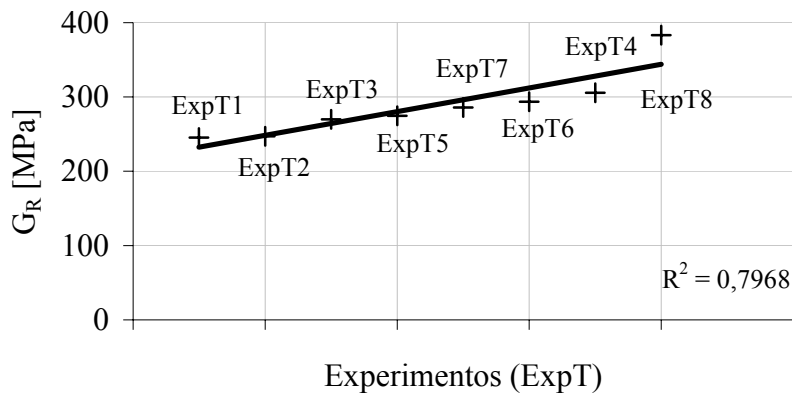


Figura 4.22. Diagrama de Rigideces de Rupturas (G_R) versus Experimentos (ExpT).

En las curvas de dispersiones ajustadas a un modelo lineal mostradas en la figura 4.23, existe semejanza proporcional en cuanto a las relaciones de las variables. Las aleaciones WC/Ni de los recubrimientos de 60/40 y 70/30, en tanto por ciento en peso, no se observan intersecciones en la zona de trabajo, señal indicadora, en este caso de una independencia en cuanto a los materiales de las dos aleaciones cerámicas de WC/Ni. Dichos coeficientes de determinaciones R^2 de 0,70443 para 40%WC/60%Ni y de 0,8742 para 30%WC/70%Ni y de ajuste de la curva en forma lineal son óptimos, y son indicativos del grado de confianza y dependencia de los factores: rugosidad, temperatura y recubrimiento.

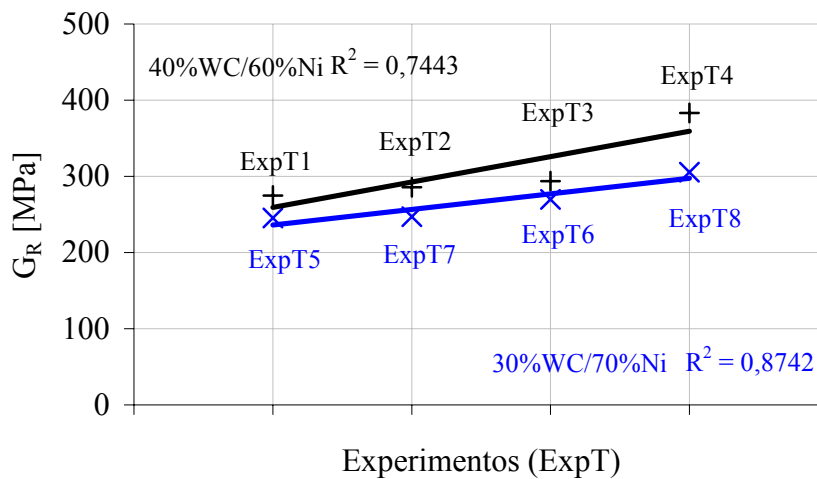


Figura 4.23. Diagrama Rigideces (G_R) versus Experimentos (ExpT) para el Recubrimientos WC/Ni con proporción en % peso de 40/60 y 30/70.

Se obtuvo una relación semejante a los esfuerzos de cizalladura para las rigideces en función de contenido de carburos (WC). Resultando la mejor rigidez en el material 40%WC/60%Ni.

4.1.1.7. Las Microdurezas Vickers.

Los valores promedios de las microdurezas Vicker (HV) se presentan en la Tabla 4.2. Para obtener las microdurezas: primero se preparan las probetas de acuerdo a las normas ISO 1463, UNE-EN ISO 4516, 6507-1, 14923 y 657 y segundo se realizan los ensayos a cada probeta (Tabla 4.7.) con un microdurometro cumpliendo con las normas UNE-EN ISO 6507-1, 14923 y 657. Se midieron las diagonales de cada huella causada por el penetrador (ángulo de $\theta = 136^\circ \pm 1^\circ$ entre su caras opuestas) con carga constante de compresión $F = 300$ grf y perpendicular sobre la superficie de la probeta por un tiempo $t = 10$ s, y finalmente se evalúa cada microdureza por medio de la ecuación $HV=F/A$, donde $A=d^2/[2\text{sen}(\theta/2)]$ es el área de la huella cuadrada, $d=(d_1+d_2)/2$ es el promedio de las diagonales, ver Tabla 4.7 y figura 4.24.

Tabla 4.7. Matriz de Diseño de las Microdurezas Vickers en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo y alto para el diseño 2^3 de las variables: A=Rugosidad [°], B=Temperatura [°C], C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%], Respuestas=Microdurezas Vickers (HV), Apéndice A.4.

ExpT	Variables			Respuestas (HV)						
	A	B	C	1	2	3	4	5	6	7
1	45 (-)	20 (-)	40/60 (-)	987,8	986,8	967,0	957,1	988,2	990,4	982,3
2	90 (+)			970,4	977,8	970,6	974,2	977,4	981,7	985,3
3	45 (-)	100 (+)		988,0	978,8	983,5	968,5	980,4	971,0	967,4
4	90 (+)			976,5	973,0	977,2	973,3	973,4	979,4	977,0
5	45 (-)	20 (-)	30/70 (+)	963,1	967,4	967,5	951,9	951,0	938,6	965,4
6	90 (+)			968,8	968,9	956,6	958,9	963,4	968,8	965,7
7	45 (-)	100 (+)		968,8	968,9	956,6	958,9	963,1	962,7	959,6
8	90 (+)			973,3	973,8	966,6	960,2	967,3	960,2	967,5

De los resultados de la figura 4.25 del análisis a través del Statgraphics Plus 5.1 de los datos señalados en la Tabla 4.7., se tienen los efectos estimados de las microdurezas Vickers (HV) del material proyectado, con promedio de $HV = 970,14 \pm 0,91$. Se observa que con la variable C, el material de la aleación WC/Ni disminuyen los efectos al pasar de la relación de % en peso de composición química del nivel bajo de 40/60 al nivel alto de 30/70 en $-14,31 \pm 1,82$ unidades; el producto de la variable A, el ángulo del filete, por la variable C, el material aleación WC/Ni, con la interacción del producto AC de $45^\circ * 40/60$ a $90^\circ * 30/70$ en $3,81 \pm 1,82$ unidades y el producto de la variable B, la temperatura, por la variable C, el material aleación WC/Ni, con la interacción del producto BC de $20^\circ C * 40/60$ a $100^\circ C * 30/70$ en $2,90 \pm 1,82$ unidades.

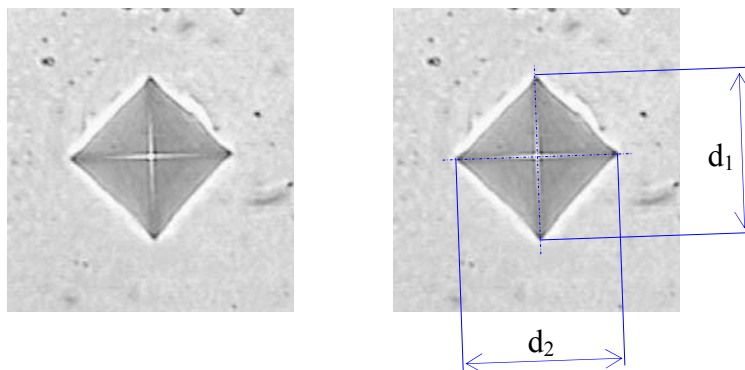


Figura 4.24. Prueba de Microdureza Vickers Geometrías de la Huella.

Se observó una tendencia para las microdurezas de los efectos para los valores de: nivel bajo (-) de la variable C = 40%WC/60%Ni y nivel alto (+) de la interacción de las variables A*C = 90° * 30%WC/70%Ni.

Gráfico de Pareto estandarizado para Microdurezas

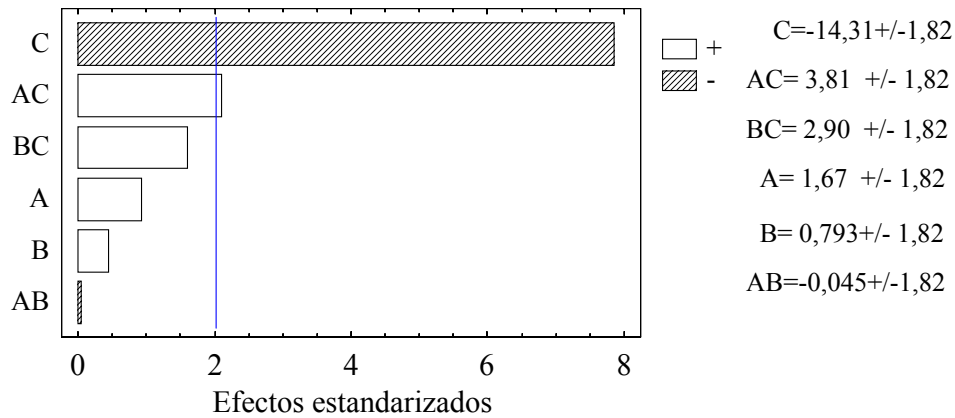


Figura 4.25. Efectos Estimados de las Microdurezas donde: A=Rugosidad, B=Temperatura, C=Recubrimiento.

Tabla 4.8. Análisis de la Varianza para las Microdurezas (HV).

	FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A		39,11	1	39,11	0,68	0,4137
B		8,80	1	8,80	0,15	0,6974
C		2866,29	1	2866,29	49,82	0,0000
A*B		0,028	1	0,028	0,00	0,9824
A*C		202,69	1	202,69	3,52	0,0666
B*C		117,68	1	117,68	2,05	0,1591
A*B*C		16,11	1	16,11	0,28	0,5991
Residuos		2761,52	48	57,53		
Total (corregido)		6012,34	55			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Al evaluar a través del análisis de la varianza (Tabla 4.8) las variables respuestas las microdurezas Vickers (HV) del material proyectado, se obtuvo como influyó la variable C, el material proyectado WC/Ni en 100,00 % (P = 0,0000); el producto AC de la variable A, el ángulo del filete,

por la variable C, la aleación WC/Ni en 93,34 % ($P = 0,0666$) y el producto BC de la variable B, la temperatura, por la variable C, el material WC/Ni en 84,09 % ($P = 0,1591$).

Señaló el análisis de varianza para las microdurezas que el efecto recubrimiento (C) posee el p-valor menor a 0,05 ($P < 0,05$), es decir, las medias para los niveles del factor C son diferentes significativamente, con 95,0 % de nivel de confianza. En los otros efectos no se observaron medias con diferencias significativas ($P > 0,05$).

El efecto obtenido por el análisis de varianza se probara empleándose la prueba de diferencia mínima significativa (DMS).

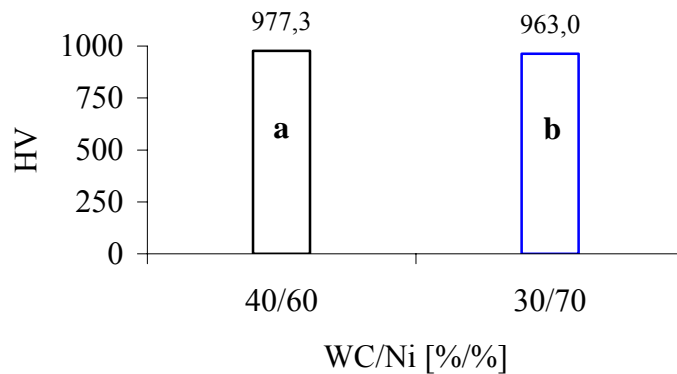


Figura 4.26. El Efecto Significativo del Factor Recubrimiento (C) para las Microdurezas Vickers (HV) con $DMS_{0,05}$.

En la figura 4.26 se observa para la variable temperatura (B) que las medias **a** y **b** difieren en valor absoluto en 14,31 HV, superando ésta diferencia a la mínima significativa ($DMS_{0,05} = 4,08$ HV), lo que señala una significación de las medias al 5 % de errores.

Se obtuvo mayor microdureza Vickers en función de contenido de carburo de wolframio (WC). Resultando la mejor microdurezas en el material 40%WC/60%Ni.

4.1.1.8. Las Porosidades.

Los valores promedios de las porosidades (P_p) se muestran en la Tabla 4.2. Para obtener las porosidades: primero se preparan las probetas de acuerdo a las normas ISO 1463 y UNE-EN ISO 14923; segundo se hacen las fotografías de las imágenes a 100x empleando un microscopio óptico con cámara incorporada, y tercero se procesan las imágenes convirtiéndolas a escala de grises con el programa visualizador de imágenes XnView y finalmente, a través del programa especializado en el procesamiento de imágenes Visilog 5 y 6, se determinan las porosidades.

En la figura 4.27 se ilustran las imágenes microscópicas con aumento de 100x de las porosidades del material proyectado señalándose detalles por cada condición de experimentos y niveles, las variables recubrimiento, temperatura y rugosidad, ángulo de filete, que se han tenido en cuenta en el proceso de proyección térmica por llama (flame spray). También en la figura 4.27 se observan las porosidades o poros en las imágenes en escala de grises como cavidades o huecos de formas irregulares de colores oscuros. Las porosidades se forman al quedar atrapado gas durante la solidificación y sus valores están para la técnica de proyección térmica por llama (flame spray) entre el 10 – 20 %. También podría no haber porosidad en todas las capas fundente; en éste estudio la porosidad para el recubrimiento de WC/Ni en sus dos composiciones química se encuentra en ese intervalo de porcentajes.

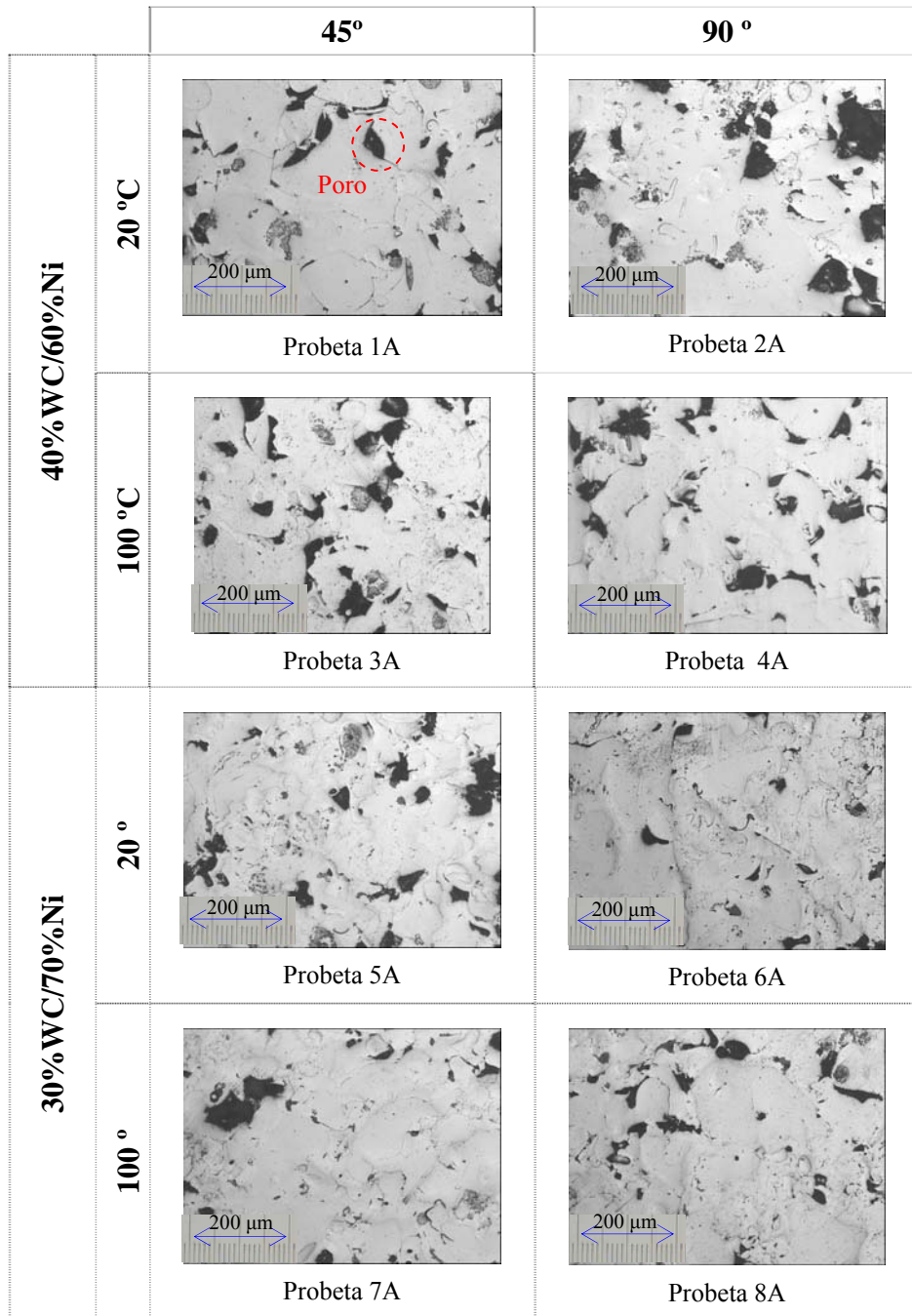


Figura 4.27. Detalles de Porosidades del Material Proyectado de WC/Ni, Microscopías Óptica 100x.

De los resultados de la figura 4.28 del análisis a través del Statgraphics Plus 5.1 de los datos señalados en la Tabla 4.9, se tienen los efectos estimados de las porosidades (Pp) del material proyectado, con media de Pp= 10,81 +/- 0,34 %, observándose en éstas como disminuyen los efectos por la variable C, la relación de % en peso del material de aleación en base WC/Ni al pasar de la composición química de un nivel negativo de 40/60 a otro positivo de 30/70 en -1,46 +/- 0,67 unidades; el producto de la variable A, el ángulo del filete, por la variable B, la temperatura, con la interacción AB de 45 ° * 20 °C a 90 ° * 100 °C en 0,87 +/- 0,67 unidades.

Tabla 4.9. Matriz de Diseño de las Porosidades en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo y alto para el diseño 2³ de las variables: A=Rugosidad [°], B=Temperatura [°C], C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%], Respuestas=Porosidades (Pp [%]), Apéndice A.4.

ExpT	Variables			Respuestas (Pp[%])						
	A	B	C	1	2	3	4	5	6	7
1	45 (-)	20 (-)	40/60 (-)	9,73	15,36	11,66	8,64	8,74	12,91	14,86
2	90 (+)			12,11	6,39	12,94	10,28	12,12	8,09	10,31
3	45 (-)	100 (+)		13,73	13,88	10,17	15,68	12,72	7,50	9,89
4	90 (+)			11,62	10,51	11,28	18,98	10,33	10,28	12,54
5	45 (-)	20 (-)	30/70 (+)	11,66	13,27	9,71	12,64	6,25	9,76	8,04
6	90 (+)			8,07	10,75	9,95	16,84	9,40	5,74	7,65
7	45 (-)	100 (+)		8,25	9,77	9,71	16,25	6,28	8,86	7,22
8	90 (+)			9,09	13,07	10,26	12,92	6,32	10,39	14,12

Se observó para las porosidades una tendencia del efecto con valor de nivel bajo de la variable recubrimiento (C=40%WC/60%Ni).

Del análisis de varianza señalado en la Tabla 4.10, se han evaluados las variables respuestas, las porosidades del material proyectado, resultando que están influenciadas por la variable C, el material proyectado WC/Ni en 93,42 % (P = 0,0658); el producto AB de la variable A, la rugosidad en función del ángulo del filete, por la variable B, la temperatura en 73,16 % (P = 0,2684).

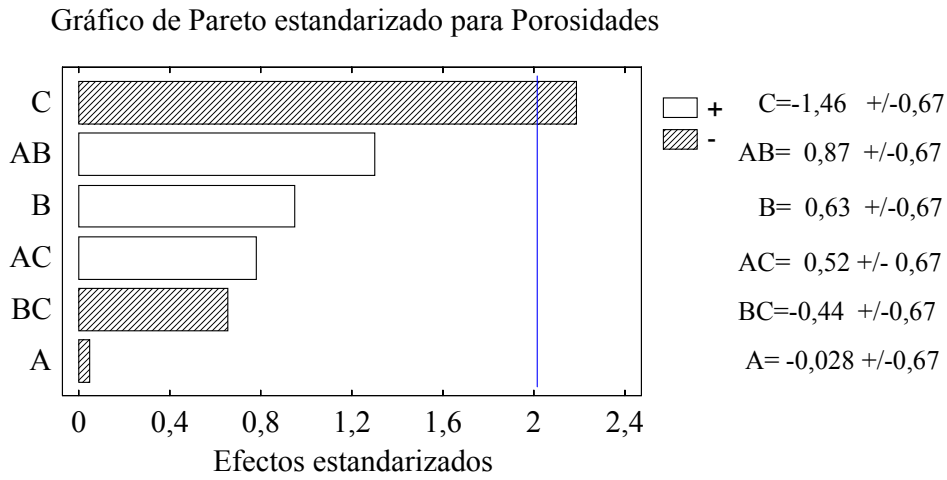


Figura 4.28. Efectos Estimados de las Porosidades donde: A=Rugosidad, B=Temperatura, C=Recubrimiento.

Tabla 4.10. Análisis de la Varianza para las Porosidades (Pp).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	0,011	1	0,011	0,00	0,9712
B	5,63	1	5,63	0,66	0,4192
C	30,03	1	30,03	3,54	0,0658
A*B	10,62	1	10,62	1,25	0,2684
A*C	3,80	1	3,80	0,45	0,5062
B*C	2,65	1	2,65	0,31	0,5762
A*B*C	0,023	1	0,023	0,00	0,9588
Residuos	406,74	48	8,47		
Total (corregido)	459,51	55			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Indicó el análisis de varianza para las porosidades que en los efectos no se observaron medias con diferencias significativas ($P > 0,05$). Resultando que la porosidad no es función del contenido de la aleación de WC/Ni.

4.1.2. Recubrimiento en Cuatro Partes.

Este recubrimiento es discontinuo o parcial en cuatros partes o zonas iguales depositado sobre el sustrato o probeta cilíndrica a lo largo del diámetro con altura constante de 15 mm, se designó como 1/4. El diseño estadístico aplicado para analizar los resultados fue el factorial, el cual permite justificar la tendencia para cada una de las tres variables dos niveles bajo (-) y alto (+). A continuación los valores numéricos de las variables para la temperatura se considero la temperatura ambiente a 20 °C y la temperatura de precalentamiento de 100 °C, la rugosidad específicamente las roscas de paso 1,5 mm y profundidades de 0,75 mm (750 μm) con ángulos de filete de 45° y 90° y las aleaciones de polvos micro-pulverizados de WC/Ni en proporciones de 40/60 y 30/70 en tanto por ciento en peso para el material del recubrimiento, ver Tablas 4.11, Apéndice A.4.

Tabla 4.11. Variables (Factores) y Niveles Codificados.

Variable		Código	Nivel	
			Bajo (-)	Alto (+)
Rugosidad	Rosca de Paso (P) 1,5 mm y Ángulo de Filete (α)	A	45 °	90 °
Proyección Térmica	Pre-proyección	B	20 °C	100 °C
	Proyección		Recubrimientos Composición Química de la Aleación WC/Ni en Relaciones de % en peso	C

En las figuras 4.29 y 4.30 se representan detalles de las imágenes macroscópicas con aumento de 10x de las adherencias del material proyectado con las condiciones de experimentos y niveles los factores recubrimiento, temperatura y rugosidad (ángulo de filete) que se asumieron en la proyección térmica por llama (flame spray), al igual que en el punto 4.1.1.1 para recubrimiento total.

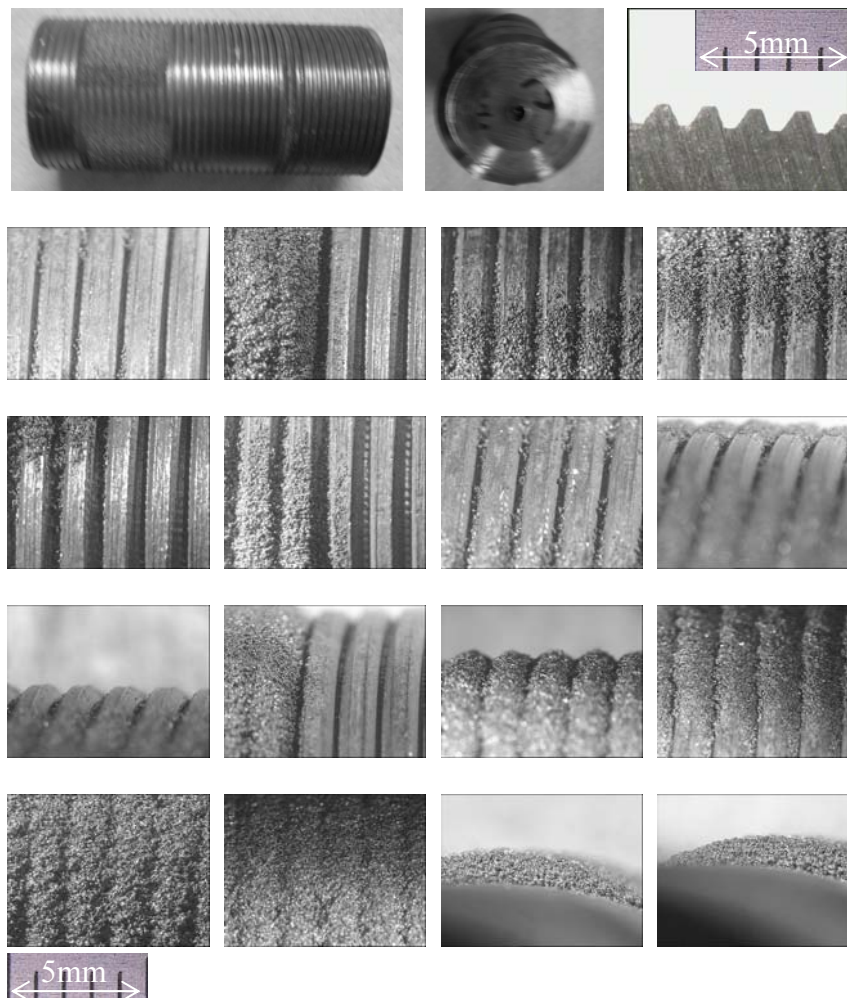


Figura 4.29. Detalles Intercara Sustrato – Material Proyectado de 40%WC/60%Ni con las Rugosidades Roscadas de Paso 1,5 mm y Ángulos de Filete 45°, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

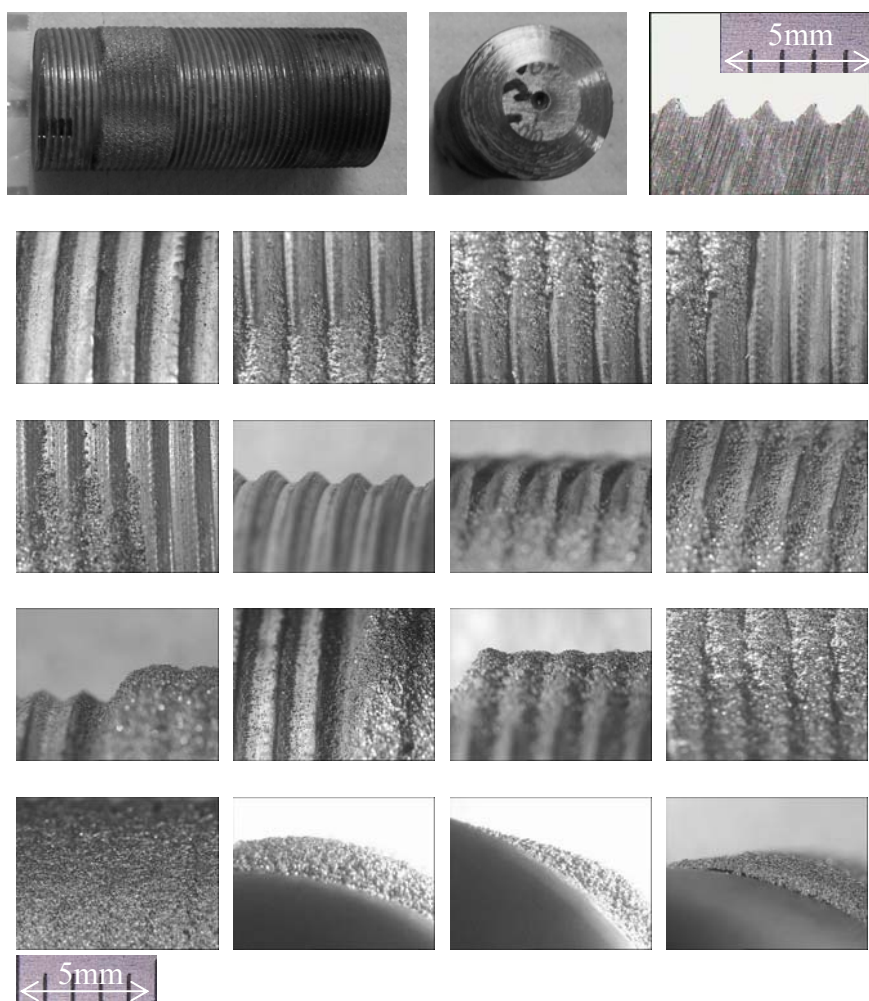


Figura 4.30. Detalles Intercara Sustrato – Material Proyectado de 40%WC/60%Ni con las Rugosidades Roscadas de Paso 1,5 mm y Ángulos de Filete 90°, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

Se obtuvo por microscopía óptica la micro-estructura de las aleaciones proyectadas en base carburo de wolframio más níquel (WC/Ni) en sus dos relaciones de % en peso, se han igualmente detallado y descrito en el punto 4.1.1.2 para el recubrimiento total.

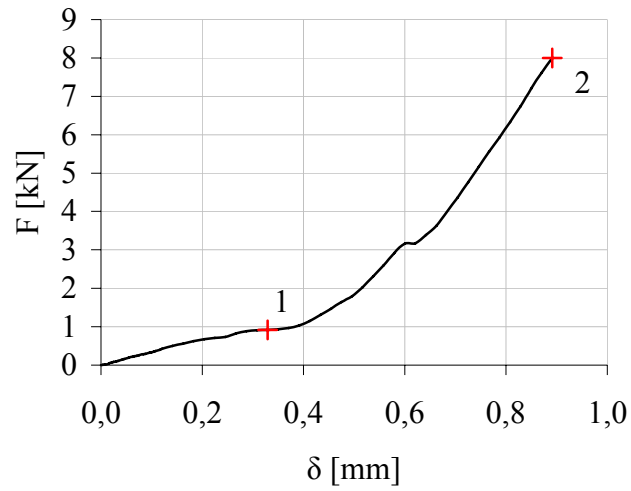


Figura 4.31. Diagrama de F-δ de la probeta P1A, perteneciente al grupo de experimentos 1 con recubrimiento parcial en cuatro partes.

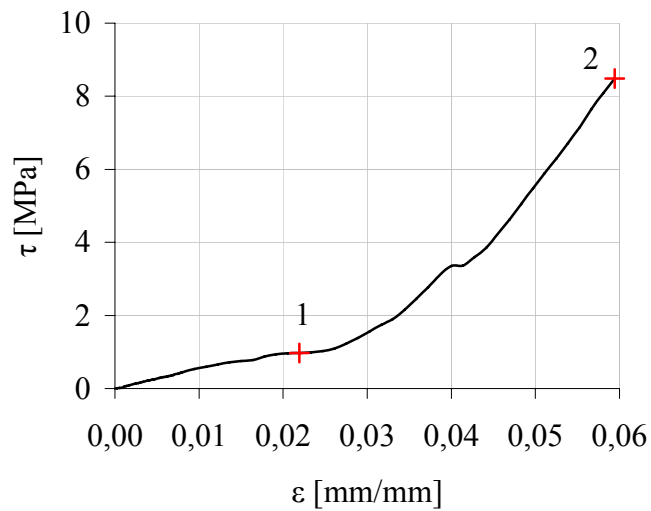


Figura 4.32. Diagrama de τ-ε de la probeta P1A, perteneciente al grupo de experimentos 1 con recubrimiento parcial en cuatro partes.

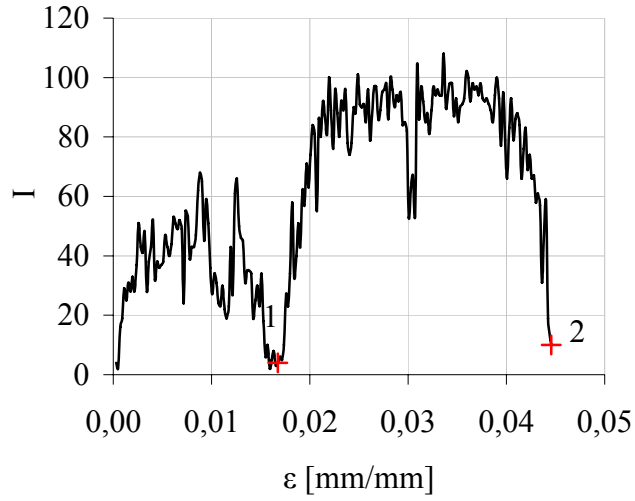


Figura 4.33. Diagrama de I- ϵ de la probeta P1A, perteneciente al grupo de experimentos 1 con recubrimiento parcial en cuatro partes.

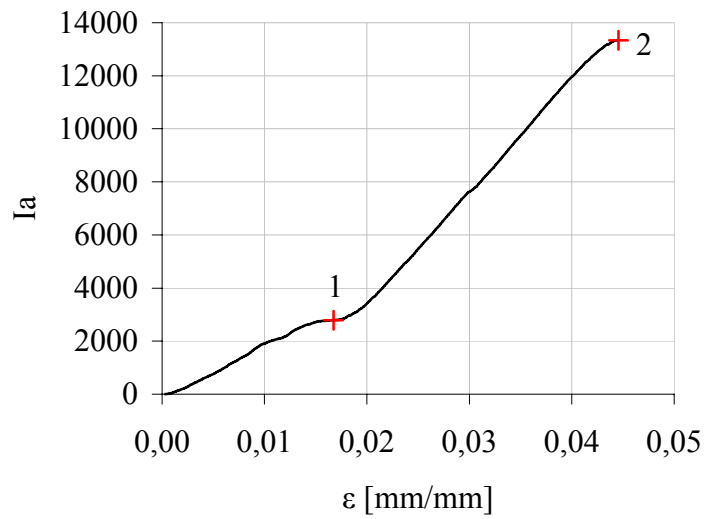


Figura 4.34. Diagrama de Ia- ϵ de la probeta P1A, perteneciente al grupo de experimentos 1 con recubrimiento parcial en cuatro partes.

Se identificó en el recubrimiento en cuatro partes por analogía del recubrimiento total punto 4.1.1.3 y el punto 4.1.1.4 usando el ensayo de cizalladura y de emisión acústica simultáneamente en las curvas de impactos o en otro caso impactos acumulados versus deformaciones igualmente dos zonas: una de acomodamiento y pre-compresión y otra pseudo-elástica donde la liberación de energía se manifiesta en señales y deformaciones.

4.1.2.1. Los Esfuerzos de Cizalladura.

Los esfuerzos de cizalladura (τ), punto 3.3.3.1, figura 4.32, como variables respuestas resultantes del diagrama de cargas (F) deformaciones lineales (δ) ilustrados en la figura 4.31, se analizaron estadísticamente anteriormente para una probeta proyectada con recubrimiento total en el punto 4.1.1.5. A continuación se analizará para un recubrimiento parcial en cuatro trozos, considerando los esfuerzos de cizalladura cuando ocurre la ruptura del recubrimiento $\tau_R = \tau_2 - \tau_1 = (F_2 - F_1) / A$ donde el área es $A = (\Delta\theta/2) D \Delta z$, siendo D el diámetro de la probeta, $L = \Delta\theta (D/2) = \Delta\theta R$ la longitud y $h = \Delta z$ altura proyectada del material del recubrimiento. Para una probeta con recubrimiento parcial a cuatro (4) trozos se tiene el ángulo del sector circular $\Delta\theta = 2 \arcsen (L/D)$ y la longitud del sector perímetro $L = 2 \arcsen (L/D) R$, resultando para un trozo el área $A_{CP} = \arcsen (L/D) D h$ y para cuatro trozos se multiplica por 4, es decir el área de cizalladura $A = A_{CP4} = 4A_{CP}$, los valores de los esfuerzos de cizalladura (τ_R) determinado se muestran con sus nueve (9) réplicas por probeta en la Tabla 4.13 y sus promedios en la Tabla 4.12.

Para cuantificar en las pruebas experimentales la adherencia se ensaya la probeta recubierta de WC/Ni en relación 40/60 y 30/70 en % en peso por flame spray a esfuerzos cortantes tendentes a arrastrar el recubrimiento del sustrato de acero definido por el contenido de WC, rugosidad y temperatura del sustrato Tabla 4.11 y conjuntamente mediante técnica de emisión acústica se adquieren las señales de las ondas que se van produciendo por cizallamiento de dicha probeta. Para detallar los resultados de la adquisición de los datos se muestra la probeta P1A perteneciente al grupo de experimento 1, figura 4.31, las cargas de cortes versus deformaciones lineales, y sus derivadas de esfuerzos de cizalladuras versus deformaciones lineales unitarias en la figuras 4.32 para los ensayos de cizalladuras y las emisiones acústicas de impactos e impactos acumulado en función de las deformaciones lineales unitarias, ver las figuras 4.33 y 4.34.

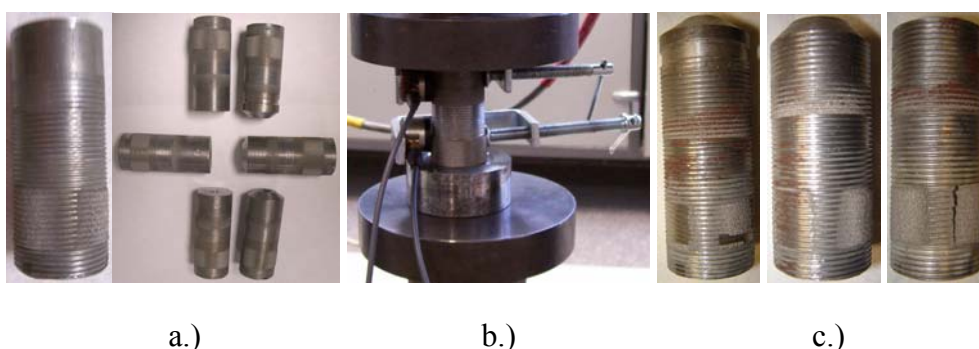


Figura 4.35. Fotografías: a.) Probetas, b.) Ensayo de Cizalladura y c.) Probetas con Roturas.

Del análisis estadísticos ANOVA o prueba de F, realizado con el Statgraphics Plus 5.1, de las variables respuestas entre ellas el esfuerzo de cizalladura de ruptura (τ_R), y mostrado en la figura 4.32.

Tabla 4.12. Valores Promedios de WC/Ni para 7 réplicas de la experimentación: Cargas de Cizalladura (F_1 y $F_R=F_2-F_1$), Deformaciones Lineales (δ_1 y $\delta_R=\delta_2-\delta_1$), Porosidades (P_p) y Microdurezas Vickers (HV), Esfuerzos de Cizalladuras (τ_1 y $\tau_R=\tau_2-\tau_1$), Deformaciones Unitarias Lineales (ε_1 y $\varepsilon_R=\varepsilon_2-\varepsilon_1$) y Rigideces $G_R=(\tau_2-\tau_1)/(\varepsilon_2-\varepsilon_1)=\tau_R/\varepsilon_R$ en los Experimentos para Recubrimientos Parciales en Cuatro Partes (ExpP4.), Apéndice A.4.

ExpP4.	F_1 [kN]	δ_1 [mm]	F_R [kN]	δ_R [mm]	P_p [%]	HV	τ_1 [MPa]	ε_1 [mm/mm]	τ_R [MPa]	ε_R [mm/mm]	G_R [MPa]
1	0,87	0,28	3,96	0,47	15,29	964,76	0,92	0,018	4,20	0,031	133,68
2	0,88	0,23	9,27	0,63	12,08	967,57	0,93	0,015	9,83	0,042	235,52
3	0,86	0,26	5,82	0,52	14,49	959,24	0,91	0,017	6,17	0,035	177,65
4	1,00	0,25	9,22	0,65	13,15	969,10	1,06	0,017	9,79	0,044	224,93
5	0,91	0,26	8,21	0,58	13,18	964,79	0,96	0,017	8,71	0,039	223,50
6	0,90	0,26	9,57	0,54	11,55	969,09	0,95	0,017	10,16	0,036	280,22
7	0,94	0,26	8,19	0,54	11,57	972,61	1,00	0,017	8,68	0,036	243,21
8	0,90	0,27	9,10	0,64	12,39	962,57	0,95	0,018	9,66	0,042	227,74

En la figura 4.36 se representa el análisis de los efectos estimados de los esfuerzos de cizalladura (τ_R) cuyo promedio $\tau_R = 8,47 \pm 0,45$ MPa; observándose que el factor C, el recubrimiento en base WC/Ni, elevó los efectos al pasar de la proporción de por ciento en peso del nivel bajo de 40/60 al nivel alto de 30/70 en $2,03 \pm 0,90$ unidades; el factor A, el ángulo del filete 45° a 90° en $2,82 \pm 0,90$ unidades; el producto de la factor A, el ángulo del filete, por el factor C, el recubrimiento de WC/Ni, disminuyendo con la interacción AC de $45^\circ * 40/60$ a $90^\circ * 30/70$ en $-1,72 \pm 0,90$ unidades.

Se lograron los efectos a la adherencia a la cizalladura sustrato – recubrimiento para los factores: recubrimiento (C=30%WC/70%Ni) y rugosidad (A) roscada en función del ángulo de filete (90 °).

Tabla 4.13. Matriz de Diseño de los Esfuerzos de Cizalladura en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: A=Rugosidad [°], B=Temperatura [°C], C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%] y Respuesta=Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpP4	Variables			Respuestas (τ_R [MPa])								
	A	B	C	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	45 (-)	20	40/60 (-)	7,51	2,30	4,05	3,99	2,74	4,60	3,86	3,82	4,96
2	90 (+)	(-)		8,19	17,79	5,54	18,07	7,08	6,26	15,14	7,63	2,80
3	45 (-)	100		6,20	6,25	3,82	7,68	12,29	5,20	5,48	4,42	4,20
4	90 (+)	(+)		11,27	15,99	8,23	12,17	14,10	4,65	6,20	5,11	8,87
5	45 (-)	20	30/70 (+)	12,23	15,50	9,54	5,20	11,81	12,12	5,37	3,78	4,60
6	90 (+)	(-)		7,61	11,75	9,82	11,11	7,49	13,05	3,60	19,01	10,54
7	45 (-)	100		7,37	9,86	12,56	5,71	11,43	14,75	7,58	5,14	6,39
8	90 (+)	(+)		11,79	4,45	4,96	15,14	17,03	12,30	4,87	7,72	8,36

A través del análisis de la varianza (ANOVA) ilustrado en la Tabla 4.14, considerando las variables respuestas τ_R , resultó que influyeron la variable C, el material proyectado en base WC/Ni en 96,61 % (P = 0,0339), la variable A, la rugosidad dada por el ángulo del filete en 99,62 % (P = 0,0038) y la interacción AC producto de la variable A la rugosidad en función del ángulo del filete de la rosca por la variable C el material proyectado aleación WC/Ni en 92,98 % (P = 0,0702).

Gráfico de Pareto estandarizado para Esfuerzos de Cizalladura

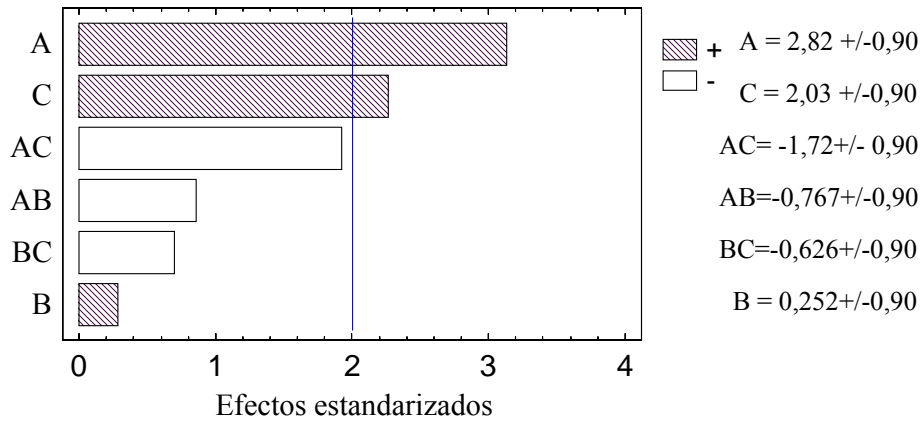


Figura 4.36. Efectos Estimados de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) donde: A=Rugosidad, B=Temperatura, C=Recubrimiento.

Tabla 4.14. Análisis de la Varianza para Esfuerzo de Cizalladura τ_R .

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	142,75	1	142,75	9,05	0,0038
B	1,15	1	1,15	0,07	0,7885
C	74,18	1	74,18	4,70	0,0339
A*B	10,60	1	10,60	0,67	0,4155
A*C	53,49	1	53,49	3,39	0,0702
B*C	7,04	1	7,04	0,45	0,5064
A*B*C	1,88	1	1,88	0,12	0,7314
Residuos	1009,73	64	15,78		
Total (corregido)	1300,81	71			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Mostró el análisis de varianza para los esfuerzos de cizalladura que 2 efectos (A y C) tuvieron los valores de las probabilidades menores a 0,05 ($P < 0,05$), es decir, las medias para los niveles de las variables:

rugosidad en función del ángulo del filete (A), recubrimiento (C) son diferentes significativamente, con 5 % de errores.

Dos efectos obtenidos por el análisis de varianza se comprobaran aplicando el método de Fisher DMS (diferencia mínima significativa).

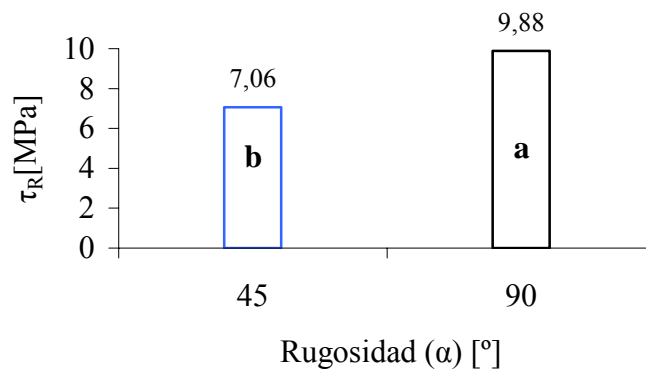


Figura 4.37. El Efecto Significativo del Factor Rugosidad (α) para los Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) con $DMS_{0,05}$.

En la figura 4.37 se observa que en la variable rugosidad en función del ángulo del filete las medias **a** y **b** difieren en $- 2,82$ MPa siendo ésta diferencia $|b - a| > DMS_{0,05}=1,87$ MPa (diferencia mínima significativa), lo que indica una discrepancia de las medias con significación al 95 % de confiabilidad.

Se obtuvo mayor adherencia en la intercara sustrato-recubrimiento cuando mayor es el ángulo del filete (α) fue el de 90 °.

En la figura 4.38 se observa que en la variable recubrimiento de WC/Ni las medias **a** y **b** difieren en $- 2,03$ MPa, estando ésta diferencia en

valor absoluto superior que la menor diferencia significativa de Fisher ($DMS_{0,05}=1,87$), lo que indica diferencias de las medias significativas con un 5 % de peligros .

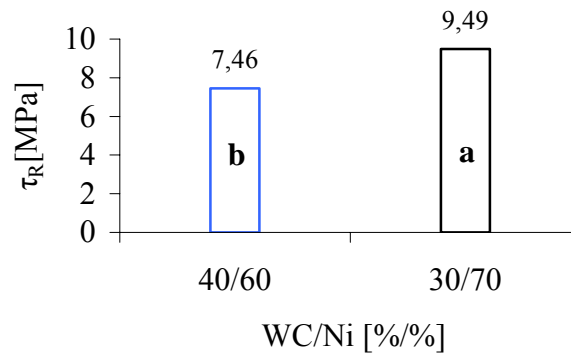


Figura 4.38. El Efecto Significativo del Variable Recubrimiento de WC/Ni para los Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) con $DMS_{0,05}$.

La adherencia en la intercara sustrato-recubrimiento en función del esfuerzo de cizalladura, es alta cuando la proporción del contenido de níquel (Ni) es mayor, en este caso está en la aleación 30%WC/70%Ni.

Aplicando un análisis de regresión lineal simple para observar la actuación de los esfuerzos en los experimentos para recubrimiento parcial a cuatro (4) trozos (ExpP4), en la figura 4.39 se ilustran los promedios en orden creciente de los esfuerzos de cizalladura de ruptura (τ_R) versus experimentos (ExpP4). Se observa que existe una relación para las distintas condiciones de un experimento a otro en forma creciente los esfuerzos τ_R son mayores en la zona pseudo-elástica (1-2), figura 4.32. El coeficiente de correlación (R^2) indica que el modelo lineal se ajustaría explicando la variabilidad de los esfuerzos de cizalladura τ_R en 78,23 %, figura 4.39.

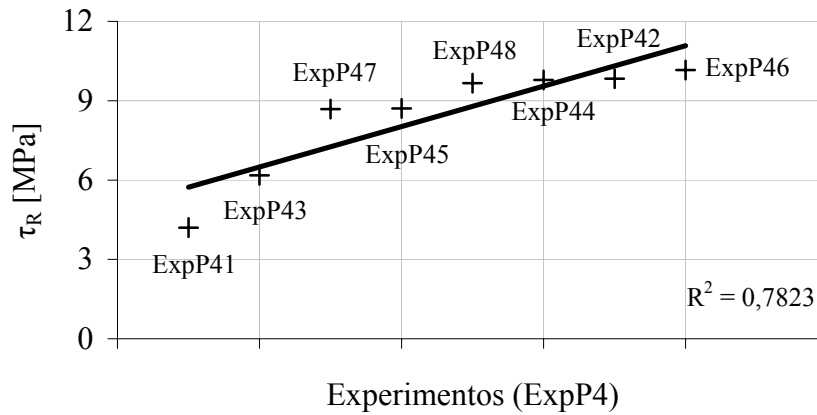


Figura 4.39. Diagrama de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) versus Experimentos para Recubrimiento Parcial a 4 Trozos (ExpP4).

Se obtuvo por correlación entre los esfuerzos de cizalladura y el conjunto de condiciones de los experimentos relación proporcional.

En la figura 4.40, se correlacionan analogías directamente proporcionales en cuanto a las relaciones de los factores. Los recubrimientos de 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, en estas se observan: una intersección en el rango de trabajo indicando en este caso dependencia de los recubrimientos en este punto común y en el resto de los puntos existe independencia entre los recubrimientos. Dichos coeficientes de determinaciones R^2 de 0,8977 para 30%WC/70%Ni y 0,9022 para 40%WC/60%Ni de ajuste de la curva en forma lineal son buenos, y son indicativos del nivel y dependencia de los factores: rugosidad en función del ángulo de filete, temperatura y recubrimiento.

Se logró una relación proporcional para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel. Resultando el mayor

esfuerzo de cizalladura para la aleación 30%WC/70%Ni. El ajuste de regresión lineal indicó que las aleaciones de WC/Ni tuvieron las mismas características en el punto común de cruce dentro del área explorada experimentalmente.

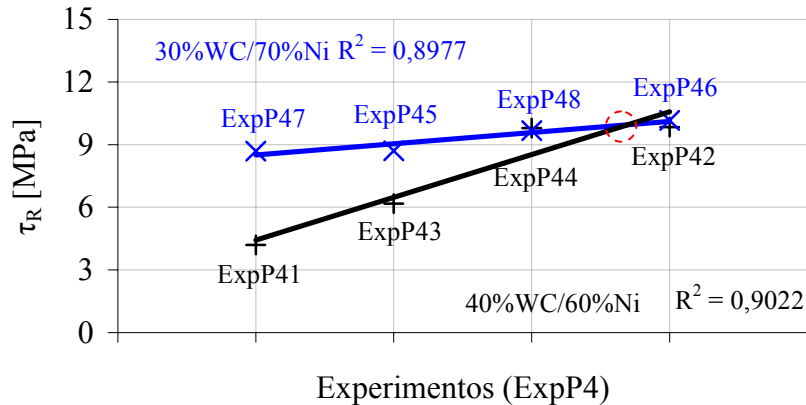


Figura 4.40. Diagrama Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) versus Experimentos (ExpP4) para el Recubrimientos WC/Ni con relación en % peso de 40/60 y 30/70.

4.1.2.2. Las Rigideces.

Las rigideces (G) del material proyectado, ver las figuras 4.32, se analizaron usando la estadística anteriormente para una probeta recubierta con recubrimiento total en el punto 4.1.1.6, a continuación se analizará para un recubrimiento parcial en cuatro trozos, considerando las rigideces de ruptura por $G_R = (\tau_2 - \tau_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) = \tau_R / \epsilon_R$ en la zona pseudo-elástica, donde las deformaciones $\epsilon = \delta / L$. Los resultados de las rigideces G_R calculadas por probeta en la Tabla 4.15 y sus promedios en la Tabla 4.12.

Los resultados obtenidos por el programa Statgraphics Plus 5.1, fueron: el análisis y varianzas tomando como variables respuestas las rigideces G_R en la zona pseudo-elástica (puntos 1–2), la figura 4.32.

Tabla 4.15. Matriz de Diseño de las Rigideces en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo y Alto para el Diseño 2^3 de las Variables: A=Rugosidad [$^\circ$], B=Temperatura [$^\circ\text{C}$], C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%], Respuestas=Rigideces de Ruptura (G_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpP4	Variables			Respuestas (G_R [MPa])								
	A	B	C	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	45 (-)	20	40/60 (-)	200,26	80,57	171,58	106,50	89,49	132,45	156,32	112,74	155,31
2	90 (+)	(-)		280,75	260,33	219,04	285,43	196,10	235,03	201,19	218,05	168,02
3	45 (-)	100		212,48	77,84	136,11	230,37	368,47	170,11	180,97	198,95	137,32
4	90 (+)	(+)		334,50	348,86	237,07	139,06	211,45	126,66	202,76	158,48	266,17
5	45 (-)	20	30/70 (+)	255,56	214,60	248,76	180,13	303,70	389,51	241,68	126,13	134,06
6	90 (+)	(-)		228,37	367,95	261,73	289,73	277,98	348,06	112,70	390,96	244,75
7	45 (-)	100		253,77	215,13	376,64	192,26	283,62	272,45	281,16	145,71	158,66
8	90 (+)	(+)		265,46	145,74	189,83	216,29	308,07	340,60	186,51	193,07	183,91

En la figura 4.41, se observan los efectos estimados e interacciones de las rigideces de media $G_R = 219,89 \pm 8,02$ MPa, los cuales se modifican: con la variable A, la rugosidad en función del ángulo del filete al aumentar de 45° a 90° en $40,26 \pm 16,04$ unidades; la variable C, el recubrimiento de aleación en base WC/Ni al cambiar de la relación de % en peso del nivel baja de 40/60 al nivel alto de 30/70 en $50,51 \pm 16,04$ unidades. La interacción AB de la variable A, la rugosidad (α), por la variable B, la temperatura, disminuyendo al pasar de $45^\circ * 20^\circ\text{C}$ a $90^\circ * 100^\circ\text{C}$ en $-31,23 \pm 16,04$ unidades y la interacción AC de la variable A, la

rugosidad (α), por la variable C, el recubrimiento, decreciendo al pasar de $45^\circ * 40/60$ a $90^\circ * 30/70$ en $-24,33 \pm 16,04$ unidades.

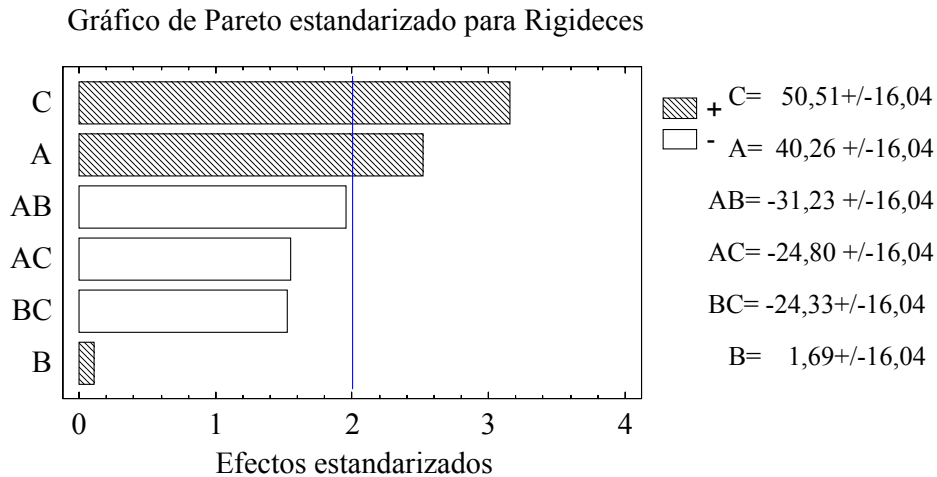


Figura 4.41. Efectos Estimados de G_R donde: A=Rugosidad, B=Temperatura, C=Recubrimiento.

Se observó para las rigideces que la adherencia en la intercara sustrato – recubrimiento se relacionaron con los valores de nivel positivo de los factores: recubrimiento (C=30%WC/70%Ni) y rugosidad (A) roscada con ángulo de filete de 90° .

Del análisis de la varianza, Tabla 4.16., de las variables respuestas G_R , se obtiene que influenciaron la variable A, rugosidad en función del ángulo del filete en 98,20 % ($P = 0,0180$); la variable C el material proyectado de aleación WC/Ni en 99,66 % ($P = 0,0034$); la interacción AB de la variable A, el ángulo del filete, por la variable B, la temperatura en 93,58 % ($P = 0,0642$), la interacción AC de la variable A, el ángulo del filete, por la variable C, el material de aleación WC/Ni en 86,03 % ($P =$

0,1397) y la interacción BC de la variable B, la temperatura, por la variable C, el recubrimiento de aleación WC/Ni en 85,28 % (P = 0,1472).

Tabla 4.16. Análisis de la Varianza para Rigideces (G_R).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	29172,8	1	29172,8	5,89	0,0180
B	51,66	1	51,66	0,01	0,9190
C	45927,2	1	45927,2	9,28	0,0034
A*B	17557,8	1	17557,8	3,55	0,0642
A*C	11073,9	1	11073,9	2,24	0,1397
B*C	10656,8	1	10656,8	2,15	0,1472
A*B*C	13,95	1	13,95	0,00	0,9578
Residuos	316843,0	64	4950,67		
Total (corregido)	431297,0	71			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Resultando para las rigidez que 2 de los efectos (A y C) tuvieron los p-valores inferiores a 0,05 ($P < 0,05$), es decir, las medias para los niveles de las variables rugosidad (A) y recubrimiento (C) son significativamente diferentes, con 95,0 % de seguridad.

La significación de los efectos resultantes mediante el análisis de varianza se demuestra empleándose la prueba de DMS (Diferencia Mínima Significativa).

De la figura 4.42 se obtiene en la variable rugosidad (α) que las diferencias de las medias $\mathbf{b} - \mathbf{a} = - 40,26$ MPa es superior que la mínima diferencia significativa $|\mathbf{b} - \mathbf{a}| > \text{DMS}_{0,05} = 33,13$ MPa, lo que muestra una diferencia de significación de las medias con 5% de peligro.

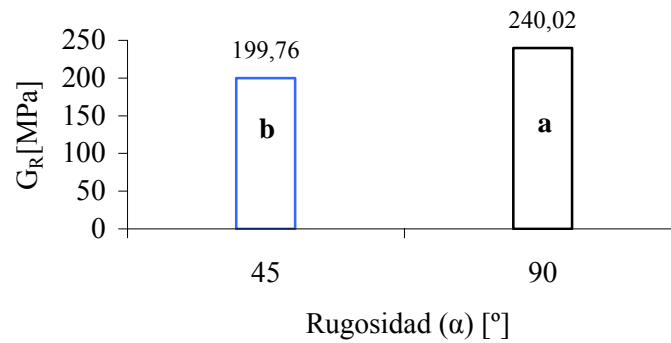


Figura 4.42. El Efectos Significativo de el Variable Rugosidad en función del Ángulo de Filete (A) para las Rigideces (G_R) con $DMS_{0,05}$.

La adherencia o fijación en la intercara sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, es mayor cuando mayor es el contenido de níquel (Ni) en la aleación del recubrimiento, es decir, en el recubrimiento de aleación 30%WC/70%Ni.

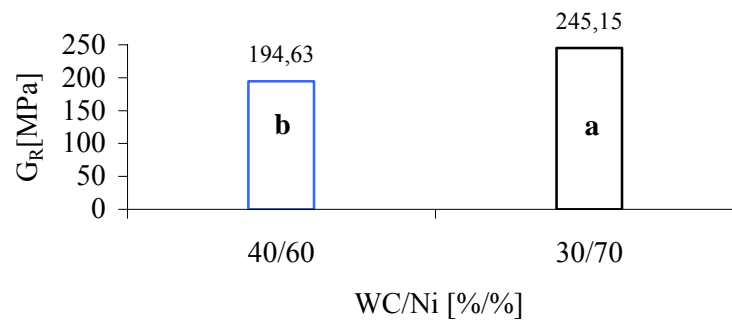


Figura 4.43. El Efecto Significativo del Variable Recubrimiento de aleación base WC/Ni para las Rigideces (G_R) con $DMS_{0,05}$.

En la figura 4.43 resultando que en la variable recubrimiento de aleación WC/Ni las medias **a** y **b** difieren en – 50,51 MPa, siendo esta diferencia en valor absoluto mayor que la mínima diferencia significativa

($DMS_{0,05}=33,13$ MPa), lo que demuestra significación en las diferencias de las medias 95 % de probabilidades.

La adherencia entre el sustrato – recubrimiento en función de la rigidez, es alta cuando la relación en el contenido de níquel (Ni) es mayor, en este caso está en la aleación 30%WC/70%Ni.

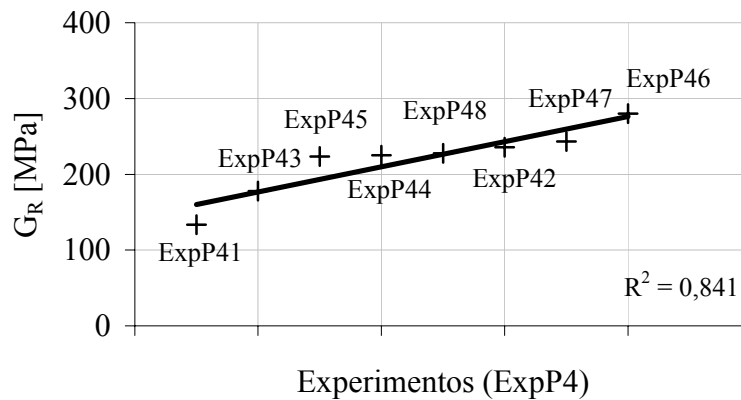


Figura 4.44. Diagrama de Rigideces de Rupturas (G_R) versus Experimentos (ExpP4).

Se obtiene de un análisis de regresión lineal simple aplicado a las rigideces versus distintas condiciones de los experimentos para recubrimiento parcial a cuatro trozos (ExpP4). En la figura 4.44 se representa la comparación de los promedios de las rigideces de ruptura (G_R) en la zona 1–2 contra experimentos (ExpP4), también las rigideces de ruptura al igual que los esfuerzos de cizalladura de ruptura en esta zona pseudo-elástica muestran una relación proporcional de acuerdo a las condiciones de un experimento a otro ordenado de forma creciente, en consecuencia se incrementan las rigideces de ruptura. El estadístico de

regresión (R^2) indica que el modelo lineal se ajustaría explicando 84,10 % de la variabilidad de las rigideces (G_R).

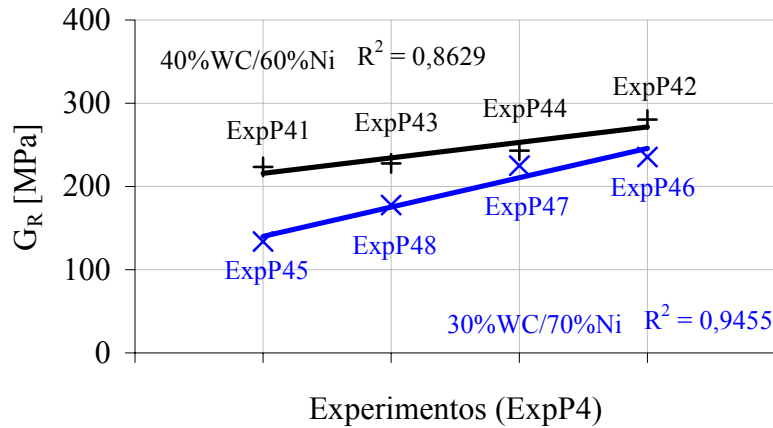


Figura 4.45. Rigideces (G_R) versus Experimentos (ExpP4) para los Recubrimientos de Aleaciones (40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni).

En la figura 4.45, existe similitudes directamente proporcionales en cuanto a las variables. Los recubrimientos de aleaciones de WC/Ni en relación 60/40 y 70/30 en tanto por ciento en peso, en estas no se observan intersecciones en la zona explorada, señalándose que hay independencia en cuanto a los materiales de las dos aleaciones cerámicas de WC/Ni en ésta zona. Dichos coeficientes de determinaciones R^2 de 0,8629 para 40%WC/60%Ni y de 0,9455 para 30%WC/70%Ni y de correlación de la curva en forma lineal son buenos, y son indicativos del grado de confianza y dependencia de las variables: rugosidad, temperatura y recubrimiento.

Se obtuvo una relación análoga para las rigideces en función de contenido de carburos. Resultando la mejor rigidez para el recubrimiento de aleación 40%WC/60%Ni.

4.1.3. Recubrimiento en Tres Partes.

Este recubrimiento es discontinuo o parcial en tres partes o zonas iguales depositadas sobre el sustrato o probeta cilíndrica a lo largo del área diametral con altura constante de 15 mm, se designará como 1/3. El diseño estadístico factorial para analizar los resultados de las variables: rugosidad, proceso térmico y recubrimiento con dos niveles bajo (-) y alto (+). Para cada experimento se investigaron dos tipos de aleaciones y composiciones químicas en base WC/Ni y Al₂O₃/TiO₂ sobre un sustrato acero F-1110 pre-calentado a temperatura de 100 °C y luego una parte de estas probetas recubiertas fueron tratada térmicamente en un baño de sales a base de nitrito sódico más nitrato potásico al 50 % a la temperatura aproximada de 400 °C. El sustrato fue mecanizado en un torno con varias rugosidades: roscas de paso 1mm y ángulo de filete de 60° con profundidades de 0,35 mm (350 μm) y moleteado de paso 1,5 mm de las estrías cruzadas de las moletas profundizadas a 0,35 mm (350 μm), ver Capítulo III, apartado 3.2.3.1.2, Apéndice A.4. En los dos apartados siguientes se investigan las tres zonas depositadas sobre la probeta cilíndrica. Se utilizan varios diseños estadísticos factoriales 2³ que tienen en cuenta las variables: rugosidad, tratamiento y recubrimiento. Las explicaciones se realizan en los apartados: 4.1.3.1. Diseño Estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60). 4.1.3.2. Diseño estadístico II para Al₂O₃/TiO₂ (87/13, 97/3).

En los diseño estadísticos I y II se determinan las variables respuestas: a.) Los esfuerzos de cizalladura de ruptura del recubrimiento $\tau_R = \tau_2 - \tau_1 = (F_2 - F_1) / A$ donde el área es $A = (\Delta\theta/2) D \Delta z$, siendo D el diámetro de la probeta, $L = \Delta\theta (D/2) = \Delta\theta R$ la longitud y $h = \Delta z$ altura proyectada del material del recubrimiento, para una probeta con

recubrimiento parcial a tres (3) trozos se tiene el ángulo del sector circular $\Delta\theta = 2 \arcsen (L/D)$ y la longitud del sector perímetro será $L = 2 \arcsen (L/D) R$, resultando para un trozo el área $A_{cP} = \arcsen (L/D) D h$ y para tres trozos se multiplica por 3, es decir el área de cizalladura $A = A_{cP3} = 3A_{cP}$.

b.) Las rigideces (G) del material proyectado de ruptura por $G_R = (\tau_2 - \tau_1) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) = \tau_R / \varepsilon_R$ en la zona pseudo-elástica, donde las deformaciones $\varepsilon = \delta / L$.

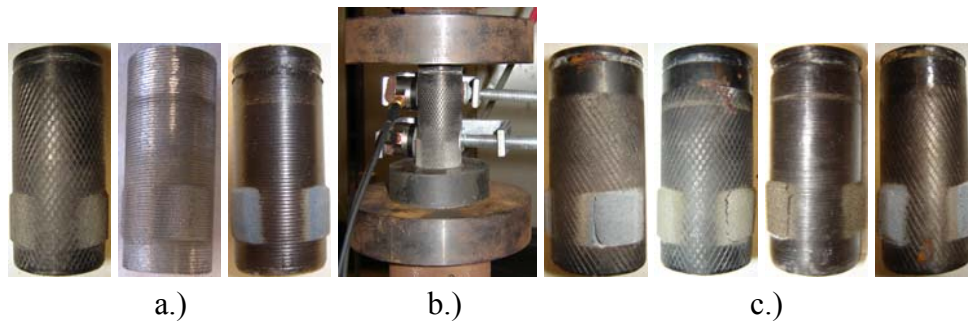


Figura 4.46. Fotografías: a.) Probetas, b.) Ensayo de Cizalladura y c.) Probetas con Roturas.

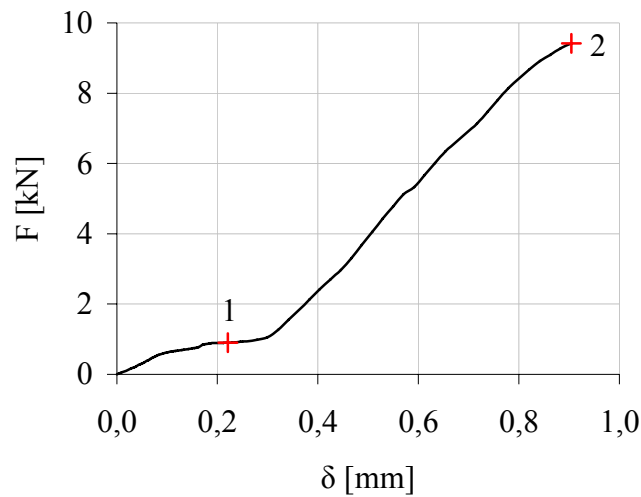


Figura 4.47. Diagrama de F- δ de la Probeta R1A, Perteneciente al Grupo de experimentos 1 con Recubrimiento Parcial en Tres Partes.

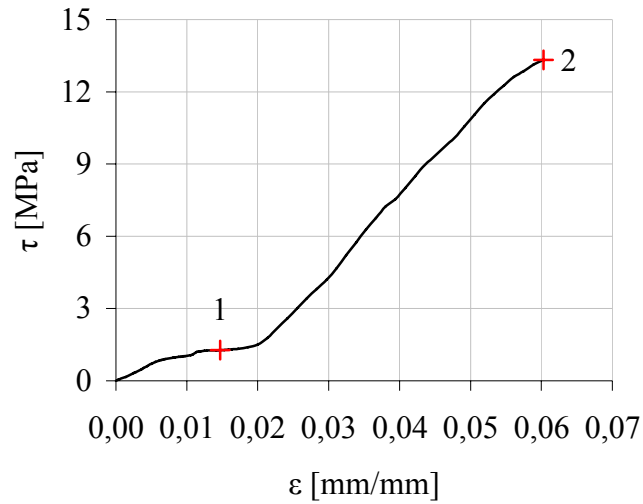


Figura 4.48. Diagrama de τ - ϵ de la Probeta R1A, Perteneciente al Grupo de experimentos 1 con Recubrimiento Parcial en Tres Partes.

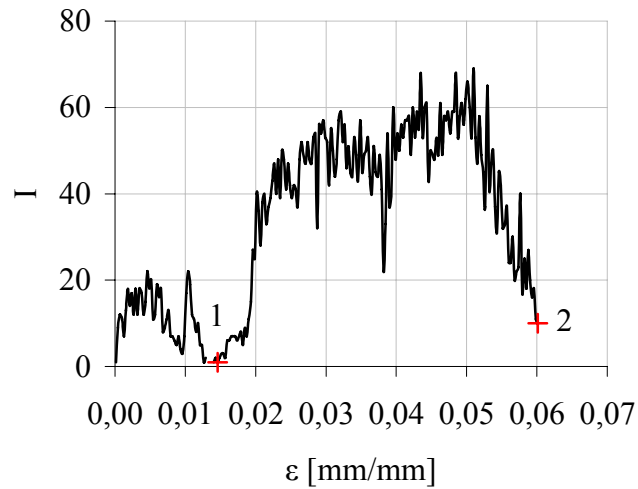


Figura 4.49. Diagrama de I - ϵ de la Probeta R1A, Perteneciente al Grupo de experimentos 1 con Recubrimiento Parcial en Tres Partes.

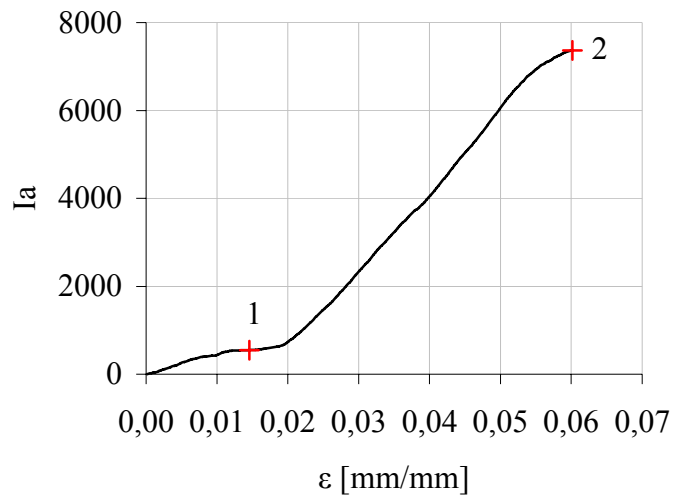


Figura 4.50. Diagrama de Ia-ε de la Probeta R1A, Perteneciente al Grupo de experimentos 1 con Recubrimiento Parcial en Tres Partes.

Se identifico en el recubrimiento en tres partes por analogía del recubrimiento total punto 4.1.1.3 y el punto 4.1.1.4 y recubrimiento en cuatro partes punto 4.1.2 usando el ensayo de cizalladura y de emisión acústica simultáneamente en las curvas de impactos o en otro caso impactos acumulados versus deformaciones igualmente dos zonas: una de acomodamiento y pre-compresión y otra pseudo-elástica donde la liberación de energía se manifiesta en señales y deformaciones.

4.1.3.1. Diseño Estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60).

El diseño estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60) se estableció con los valores siguientes de las variables: proceso térmico se consideró una variable cualitativa con los niveles refiere al tratamiento denotado “sin” y

“con” éste; la rugosidad consistieron en: los moleteados de paso 1,5 mm de las estrías cruzadas de las moletas profundizadas a 0,35 mm (350 μ m) y rosca de paso 1mm y ángulo de filete de 60 ° con profundidades de 0,35 mm (350 μ m); y las aleaciones de polvos micro-pulverizados en base WC/Ni en proporciones de 40/60 y 30/70 en tanto por ciento en peso para el material del recubrimiento, ver Tabla 4.17, Apéndice A.4.

Tabla 4.17. Variables (Factores) y Niveles Codificados.

Variable			Código	Nivel	
				Bajo (-)	Alto (+)
Rugosidad			A	Moleteado	Roscado
Proyección Térmica	Post-proyección	Proceso Térmico	B	Sin	Con
	Proyección	Recubrimientos Composición Química de la Aleación WC/Ni en Relaciones de % en peso	C	40/60	30/70

Se obtiene para el recubrimiento en tres partes con las aleaciones 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni los mismos resultados de: a.) macroscopía óptica punto 4.1.1.1 para el recubrimiento total y punto 4.1.2 para el recubrimiento en cuatro partes y b.) microscopía óptica punto 4.1.1.2 para el recubrimiento total y punto 4.1.2 para el recubrimiento en cuatro partes.

Se analizó para el recubrimiento en tres partes la emisión acústica en conjunto con el ensayo de cizalladura en las probetas proyectadas con

aleaciones 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, en analogía al recubrimiento total y al recubrimiento en cuatro partes.

4.1.3.1.1. Los Esfuerzos de Cizalladura.

Los esfuerzos de cizalladura (τ), como variables respuestas resultantes del diagrama de cargas (F) deformaciones lineales (δ) ilustrados en la figura 4.47, se analizaron estadísticamente anteriormente para una probeta proyectada con recubrimiento total en el punto 4.1.1.5 y recubrimiento en cuatro partes en el punto 4.1.2.1. A continuación se analizará para un recubrimiento parcial en tres trozos, los valores de los esfuerzos de cizalladura (τ_R) calculado se muestran con sus cinco (5) réplicas por probeta en la Tabla 4.19 y sus promedios en la Tabla 4.18.

Para medir la adherencia la probeta proyectada por proyección térmica con la aleación de WC/Ni en relación 40/60 y 30/70 en % en peso se ensaya a esfuerzos de cizalladura que causan el arrastre del recubrimiento del sustrato de acero definido por el contenido de WC, rugosidad y proceso térmico del sustrato Tabla 4.17 y simultáneamente a través de la técnica de emisión acústica se captan las señales que se van originándose por cizallamiento de dicha probeta. Para detallar los resultados de la adquisición de los datos se muestra la probeta R1A perteneciente al grupo de experimento 1, ver figura 4.47, las cargas de cortes versus deformaciones lineales, y sus derivadas de esfuerzos de cizalladuras versus deformaciones lineales unitarias en la figuras 4.48. Para los ensayos de cizalladuras y las

emisiones acústicas de impactos e impactos acumulado en función de deformaciones lineales unitarias, ver las figuras 4.49 y 4.50. Del análisis estadísticos ANOVA con el Statgraphics Plus 5.1, de las variables respuestas entre ellas el esfuerzo de cizalladura de ruptura (τ_R) mostrado en la figura 4.48.

Tabla 4.18. Valores Promedios de WC/Ni para 5 replicas de la experimentación: Cargas de Cizalladura (F_1 y $F_R=F_2-F_1$), Deformaciones Lineales (δ_1 y $\delta_R=\delta_2-\delta_1$), Porosidades (P_P) y Microdurezas Vickers (HV), Esfuerzos de Cizalladuras (τ_1 y $\tau_R=\tau_2-\tau_1$), Deformaciones Unitarias Lineales (ε_1 y $\varepsilon_R=\varepsilon_2-\varepsilon_1$) y Rigideces $G_R=(\tau_2-\tau_1)/(\varepsilon_2-\varepsilon_1)=\tau_R/\varepsilon_R$ en los Experimentos para Recubrimientos Parciales en Cuatro Partes (ExpP3.), Apéndice A.4.

ExpP3.	F_1 [kN]	δ_1 [mm]	F_R [kN]	δ_R [mm]	P_P [%]	HV	τ_1 [MPa]	ε_1 [mm/mm]	τ_R [MPa]	ε_R [mm/mm]	G_R [MPa]
1	0,86	0,23	2,97	0,28	14,47	932,70	1,22	0,015	4,20	0,018	227,91
2	0,93	0,30	8,35	0,65	9,26	966,04	1,31	0,020	11,81	0,044	271,27
3	0,68	0,20	3,93	0,39	12,07	947,22	0,96	0,013	5,56	0,026	215,75
4	0,90	0,33	13,06	0,78	12,10	1011,96	1,28	0,022	18,47	0,052	357,48
5	0,87	0,29	3,18	0,28	14,41	932,53	1,23	0,019	4,50	0,022	204,17
6	0,94	0,30	5,47	0,48	16,49	953,82	1,33	0,020	7,74	0,032	243,05
7	0,87	0,27	4,42	0,54	13,97	955,30	1,10	0,018	8,19	0,036	227,40
8	0,84	0,31	14,15	1,18	13,80	969,25	1,19	0,020	20,01	0,079	254,45

En la figura 4.51 se representa el análisis de los efectos estimados de los esfuerzos de cizalladura (τ_R) de promedio $\tau_R = 10,38 \pm 0,93$ MPa; mostrándose que el factor A, la rugosidad afecta en $9,08 \pm 1,86$ unidades y el factor B, el proceso térmico interviene en $5,36 \pm 1,86$ unidades.

Tabla 4.19. Matriz de Diseño de los Esfuerzos de Cizalladura en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: donde: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moleteado), B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%] y Respuesta=Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (τ_R [MPa])				
	A	B	C	1	2	3	4	5
1	M (-)	Sin	40/60 (-)	3,43	6,77	4,06	2,72	4,17
2	R (+)	(-)		9,48	8,05	10,49	18,91	18,21
3	M (-)	Con		5,01	6,30	1,62	13,67	1,22
4	R (+)	(+)		7,80	31,08	20,73	27,22	5,53
5	M (-)	Sin	30/70 (+)	6,71	4,80	4,81	3,02	7,61
6	R (+)	(-)		6,69	6,30	9,56	9,22	9,07
7	M (-)	Con		8,47	9,02	10,09	9,87	3,49
8	R (+)	(+)		34,81	19,33	18,79	16,05	11,10

Gráfico de Pareto estandarizado para Esfuerzos de Cizalladura

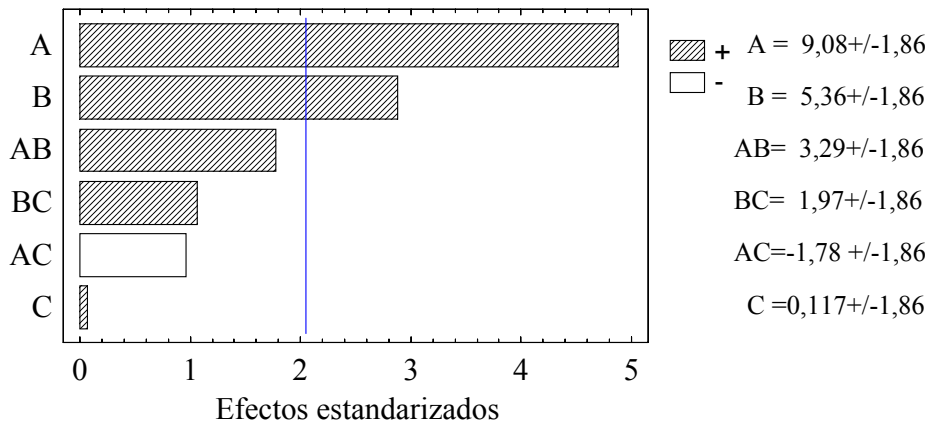


Figura 4.51. Efectos Estimados de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) donde: A=Rugosidad, B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento.

Se observó que los efectos a la adherencia en la intercara sustrato – recubrimiento se consiguen para los factores: rugosidad (rosca de paso 1 mm y ángulo de filete de 60°) y proceso térmico en baño de sales a base de nitrito sódico (NaNO₂) más nitrato potásico (KNO₃) al 50 % a la temperatura aproximada de 400 °C.

Por medio del análisis de la varianza (ANOVA) mostrado en la Tabla 4.20, considerando las variables respuestas τ_R , resultó que influyeron: la variable A, la rugosidad en 100,00 % (P = 0,0000), el proceso térmico en 99,30 % (P = 0,0070) y la interacción A*B la rugosidad por el proceso térmico en 91,38 % (P = 0,0862)

Tabla 4.20. Análisis de la Varianza para Esfuerzo de Cizalladura τ_R .

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	824,10	1	824,10	23,86	0,0000
B	286,87	1	286,87	8,30	0,0070
C	0,137	1	0,137	0,00	0,9502
A*B	108,24	1	108,24	3,13	0,0862
A*C	31,51	1	31,51	0,91	0,3467
B*C	38,69	1	38,69	1,12	0,2978
A*B*C	15,25	1	15,25	0,44	0,5112
Residuos	1105,48	32	34,55		
Total (corregido)	2410,27	39			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Mostró el análisis de varianza que 2 efectos (A y B) tuvieron los p-valor menores a 0,05 (P<0,05), es decir, las medias para los niveles de las variables: rugosidad (A) y proceso térmico (C) son diferentes significativamente, con 5 % de riesgos.

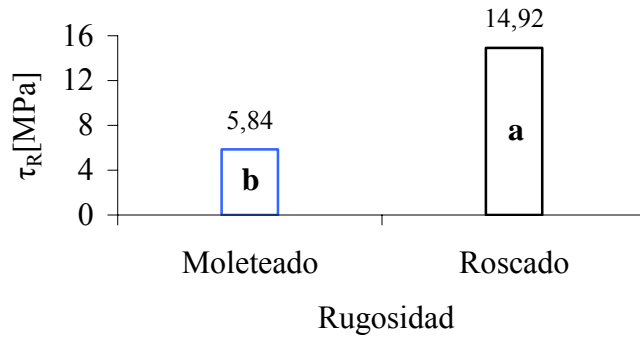


Figura 4.52. El Efecto Significativo del Factor Rugosidad (α) para los Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) con $DMS_{0,05}$.

Los dos efectos obtenidos por el análisis de varianza se prueban empleando el método de Fisher DMS (diferencia mínima significativa). En la figura 4.52 se observa que en la variable rugosidad las medias **a** y **b** difieren en $-9,08$ MPa, hallándose ésta diferencia en valor absoluto mayor que la menor diferencia mínima significativa ($DMS_{0,05}=3,79$ MPa), lo que indica diferencias de las medias con significación al 95 % de confiabilidad.

Se logró mayor adherencia en función de los esfuerzos de cizalladura cuando la rugosidad es roscada sobre la superficie del sustrato.

En la figura 4.53 se observa que en la variable proceso térmico de las aleaciones de WC/Ni las medias **a** y **b** difieren en $-5,36$ MPa, siendo ésta diferencia en valor absoluto superior que la menor diferencia significativa de Fisher ($DMS_{0,05}=3,79$ MPa), lo que señala diferencias de las medias significativas con un 5 % de riesgos.

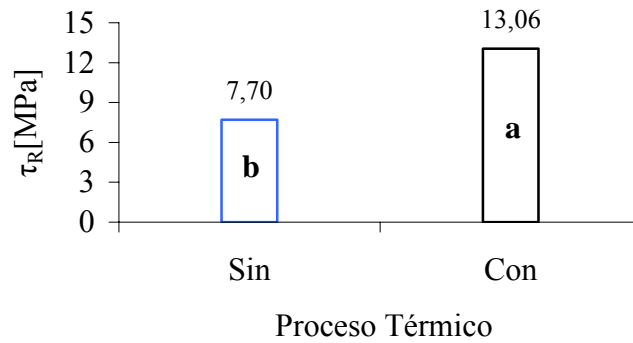


Figura 4.53. El Efecto Significativo del Variable Proceso Térmico en Baños de Sales (NaNO_2 más + KNO_3 al 50% a $\approx 400\text{ }^\circ\text{C}$) de la aleación WC/Ni para los Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) con $\text{DMS}_{0,05}$.

La adherencia en la intercara sustrato – recubrimiento en función del esfuerzo de cizalladura, es alta cuando se realiza un proceso térmico con sales (NaNO_2 más + KNO_3 al 50% a $\approx 400\text{ }^\circ\text{C}$) a los recubrimientos proyectados en aleaciones de WC/Ni.

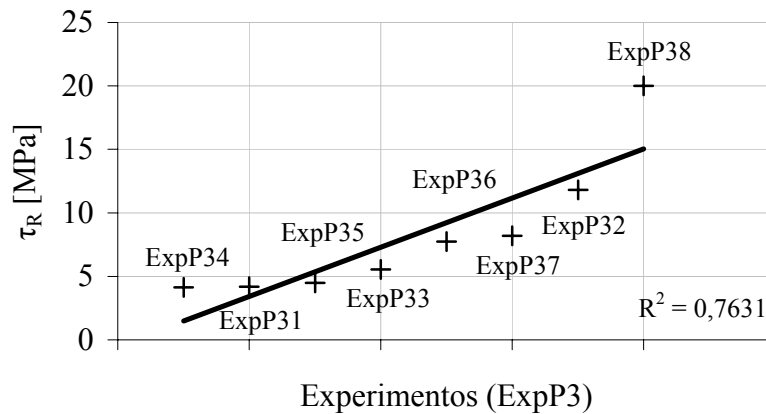


Figura 4.54. Diagrama de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) versus Experimentos para Recubrimiento Parcial a 3 Trozos (ExpP3).

Del análisis de regresión lineal simple aplicado para observar la acción de los esfuerzos en los experimentos para recubrimiento parcial a 3 trozos (ExpP3), en la figura 4.54 se ilustran los promedios en orden creciente de los esfuerzos de cizalladura de ruptura (τ_R) versus experimentos (ExpP3), donde se observa que hay una relación para las distintas condiciones de un experimento a otro en forma creciente de los esfuerzos τ_R son superiores en la zona pseudo-elástica (1–2), figura 4.48. El coeficiente de regresión (R^2) señala que el modelo lineal se ajustaría explicando la variabilidad de los esfuerzos de cizalladura τ_R en 76,31 %, figura 4.54.

Se obtuvo entre los esfuerzos de cizalladura y las condiciones experimentales relación proporcional.

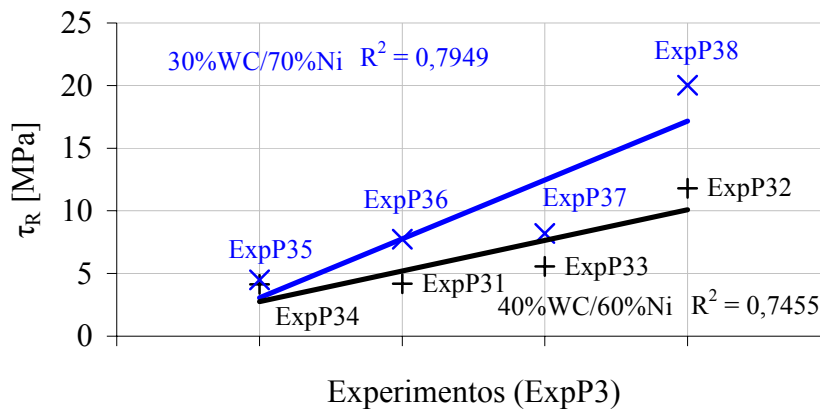


Figura 4.55. Diagrama Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) versus Experimentos (ExpP3) para el Recubrimientos WC/Ni con relación en % peso de 40/60 y 30/70.

En la figura 4.55, existe analogías directamente proporcionales en cuanto a las relaciones de los factores. Los recubrimientos de

40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, en estas no se muestran cruceros en el rango de trabajo indicando en este caso independencia en cuanto a los recubrimientos. Los coeficientes de correlaciones R^2 de 0,7949 para 30%WC/70%Ni y 0,7455 para 40%WC/60%Ni de ajuste de la curva en forma lineal son buenos, y son indicativos del nivel y dependencia de los factores: rugosidad, proceso térmico y recubrimiento.

Se logró una relación proporcional para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel del recubrimiento en base WC/Ni. Resultando el mayor esfuerzo de cizalladura para la aleación 30%WC/70%Ni.

4.1.3.1.2. Las Rigideces.

Las rigideces (G) del material proyectado, figuras 4.48, se analizaron estadísticamente para una probeta proyectada con recubrimiento total en el punto 4.1.1.6 y recubrimiento en cuatro partes en el punto 4.1.2.2, a continuación se analizará para un recubrimiento parcial en tres trozos. Los valores de las rigideces (G_R) calculado se muestran con sus cinco (5) réplicas por probeta en la Tabla 4.19 y sus promedios en la Tabla 4.18. Los resultados del análisis y varianzas tomando como variables respuestas las rigideces G_R en la zona pseudo-elástica (puntos 1–2), se determinaron por el programa Statgraphics Plus 5.1.

En la figura 4.56 se representa el análisis de los efectos estimados de las rigideces (G_R) de promedio $G_R = 249,22 \pm 14,33$ MPa observándose

que la variable A, la rugosidad fabricada al sustrato interviene en 66,21 +/- 28,65 unidades y la interacción entre la rugosidad (A) y el recubrimiento (C) disminuye al pasar del producto A*C de nivel negativo Moleteada * 40%WC/60%Ni al nivel positivo Roscado * 30%WC/70%Ni en - 41,18 +/- 28,65.

Tabla 4.21. Matriz de Diseño de las Rigideces en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2³ de las variables: donde: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moleteado), B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%] y Respuestas=Rigideces de Ruptura (G_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (G _R [MPa])				
	A	B	C	1	2	3	4	5
1	M (-)	Sin	40/60	273,81	259,55	160,99	192,02	209,28
2	R (+)	(-)		254,04	176,32	251,75	388,93	385,57
3	M (-)	Con	(-)	217,31	197,01	71,81	410,09	67,39
4	R (+)	(+)		215,92	508,65	414,49	416,94	120,55
5	M (-)	Sin	30/70	287,64	261,78	186,30	136,41	274,10
6	R (+)	(-)		235,34	254,85	193,37	349,35	241,93
7	M (-)	Con	(+))	225,79	216,56	302,75	229,25	142,44
8	R (+)	(+)		310,97	266,60	231,63	262,65	166,54

Se observó que las condiciones dominantes para la adherencia al sustrato – recubrimiento la proporciona la variable: rugosidad en su nivel alto la rosca de paso 1 mm y ángulo de filete de 60°.

Del análisis de la varianza señalado en la Tabla 4.22 de las variables respuestas G_R, resultó que se afectaron con la variable A, la rugosidad en 96,78 % (P = 0,0322) y el producto AC de la variable A, la rugosidad por la variable C, el material aleación en base WC/Ni en 82,69 % (P = 0,1731).

Gráfico de Pareto estandarizado para Rigideces

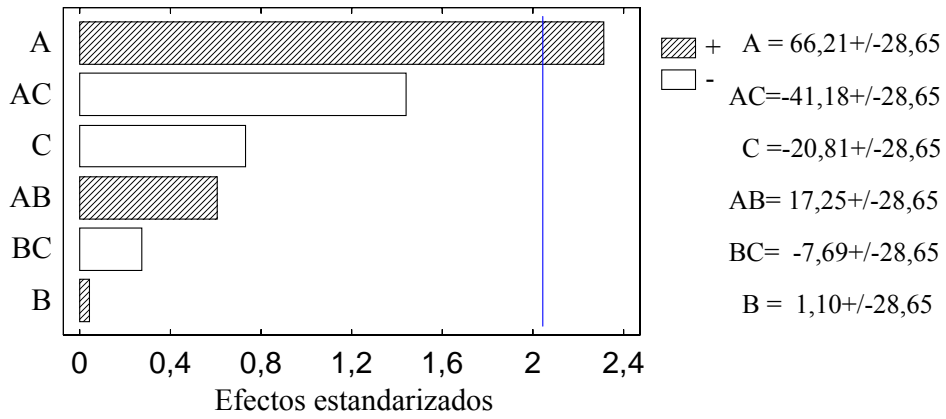


Figura 4.56. Efectos Estimados de las Rigideces de Ruptura (G_R) donde: A=Rugosidad, B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento.

Tabla 4.22. Análisis de la Varianza para Rigideces (G_R).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	43831,70	1	43831,70	5,02	0,0322
B	12,11	1	12,11	0,00	0,9705
C	4329,94	1	4329,94	0,50	0,4865
A*B	2975,11	1	2975,11	0,34	0,5636
A*C	16961,60	1	16961,60	1,94	0,1731
B*C	591,28	1	591,28	0,07	0,7964
A*B*C	3221,85	1	3221,85	0,37	0,5479
Residuos	279550,00	32	8735,93		
Total (corregido)	351473,00	39			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Resultando que 1 efecto (A) tuvo el p-valor inferior a 0,05 ($P < 0,05$), es decir, las medias para los niveles de la variable rugosidad (A) son significativamente diferentes, con 95,0 % de confiabilidad.

El efecto obtenido en el análisis de varianza se comprobaba utilizando el método de diferencia mínima significativa (DMS).

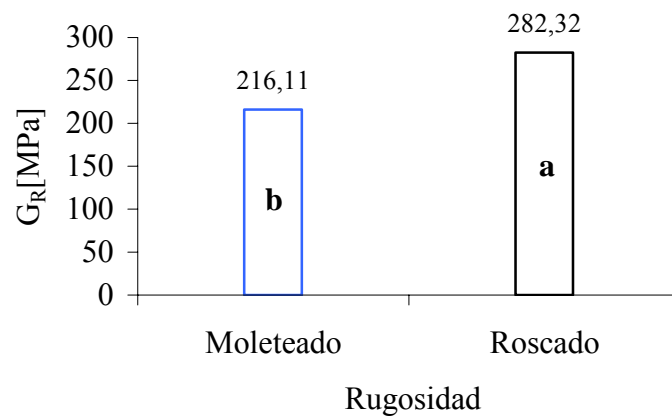


Figura 4.57. El Efectos Significativo de el Variable Recubrimiento (C) para las Rigideces (G_R) con $DMS_{0,05}$.

De la figura 4.57 se determina para la variable rugosidad (A) que las diferencias de las medias $b - a = - 66,21$ MPa y el valor absoluto es mayor que la mínima diferencia significativa $|b - a| > DMS_{0,05} = 60,21$ MPa, lo que denota una diferencia de las medias estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confiabilidad.

La adherencia entre sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, es mayor cuando la rugosidad del sustrato es el roscado.

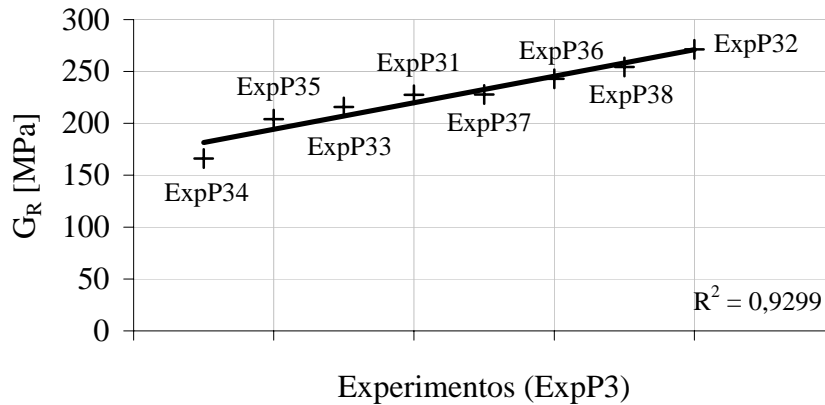


Figura 4.58. Diagrama de Rigideces de Rupturas (G_R) versus Experimentos (ExpP3).

Se realizó un análisis de regresión lineal simple para ver el comportamiento de las rigideces en los distintos experimentos para recubrimiento parcial a 3 trozos (ExpP3), en la figura 4.58, se representa la comparación de los promedios de las rigideces de ruptura (G_R) en la zona 1–2 versus experimentos (ExpP3), también las rigideces de ruptura al igual que los esfuerzos de cizalladura de ruptura en esta zona pseudo-elástica muestran una relación proporcional de acuerdo a las condiciones de un experimento a otro ordenado de forma creciente, en consecuencia aumentan las rigideces (G_R). El estadístico R–cuadrado indica que el modelo lineal se ajustaría explicando 92,99 % de la variabilidad de las rigideces de ruptura.

Se obtuvo relación directamente proporcional de las rigideces versus las condiciones experimentales.

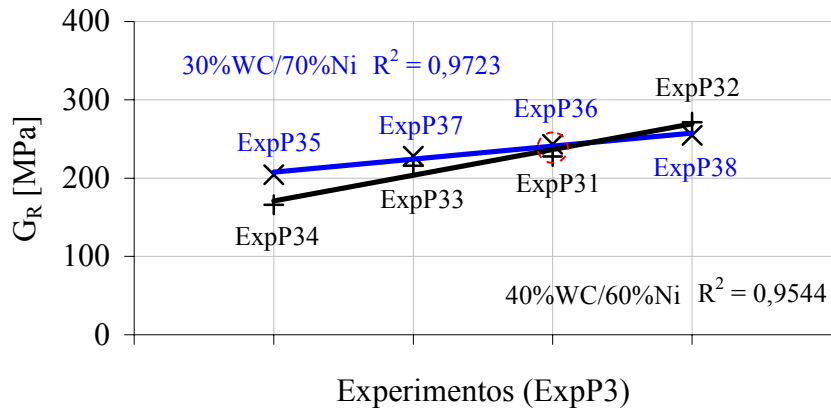


Figura 4.59. Diagrama Rigideces (G_R) versus Experimentos (ExpP3) para el Recubrimientos WC/Ni con proporción en % peso de 40/60 y 30/70.

En las curvas de dispersiones ajustadas a un modelo lineal mostradas en la figura 4.59, existe analogías proporcionales en cuanto a las variables. Los recubrimientos de 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, en estas se observan, una intersección en el rango de trabajo señalando en este caso dependencia de los recubrimientos en este punto común y en el resto de los puntos existe independencia entre los recubrimientos. Los coeficientes de regresiones lineales R^2 de 0,9723 para 40%WC/60%Ni y de 0,9544 para 30%WC/70%Ni y de ajuste de la curva son buenos, y son indicativos del grado de confianza y dependencia de los factores: rugosidad, proceso térmico y recubrimiento.

Se alcanzó una relación directamente proporcional para las rigideces en función de contenido de carburo. Resultando la mejor rigidez en el material 30%WC/70%Ni. El ajuste de regresión lineal indicó que las

aleaciones de WC/Ni tuvieron las mismas características en el punto común de cruce dentro del área de experimentación.

4.1.3.1.3. Las Microdurezas Vickers.

Los valores promedios de las microdurezas Vicker (HV) se muestran en la Tabla 4.18, anteriormente se analizaron estadísticamente para una probeta proyectada con recubrimiento total en el punto 4.1.1.7. A continuación se analizará para un recubrimiento parcial en tres trozos, los valores de las microdurezas Vicker (HV) calculado se tabularon con sus cinco (5) réplicas por probeta en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23. Matriz de Diseño de las Microdurezas Vickers en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moleteado), B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%] y Respuestas=Microdurezas Vickers (HV), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (HV)				
	A	B	C	1	2	3	4	5
1	M (-)	Sin	40/60 (-)	930,00	959,34	937,92	923,86	919,93
2	R (+)	(-)		968,64	950,79	967,49	980,57	975,34
3	M (-)	Con		951,90	954,42	919,39	983,99	926,41
4	R (+)	(+)		1053,62	1065,30	982,68	1004,51	953,68
5	M (-)	Sin	30/70 (+)	955,27	948,95	943,92	913,16	959,44
6	R (+)	(-)		951,63	952,89	957,98	955,81	955,17
7	M (-)	Con		953,69	958,31	969,62	963,26	931,60
8	R (+)	(+)		951,68	976,19	978,03	973,26	967,06

En la figura 4.60 los resultados del análisis usando el Statgraphics Plus 5.1 de los datos indicados en la Tabla 4.23, se obtienen los efectos estimados de las microdurezas Vickers (HV) del recubrimiento, con promedio de HV = 960,67 +/- 3,46; observándose que aumentan las variables respuestas con: la variable A, la rugosidad en 30,90 +/- 6,92 unidades; la variable B, el proceso térmico en 20,53 +/- 6,92 unidades, la interacción AB producto de variable A, rugosidad por la variable B, proceso térmico en 8,45 +/- 6,92 unidades; y disminuyen las variables respuestas con: la interacción AC la variable A, la rugosidad por la variable C, el recubrimiento en - 18,65 +/- 6,92 unidades, la interacción BC el producto de la variable B, el proceso térmico por la variable C, el recubrimiento en - 7,68 +/- 6,92 unidades y la variable C, recubrimiento en - 9,64 +/- 6,92 unidades.

Gráfico de Pareto estandarizado para Microdurezas

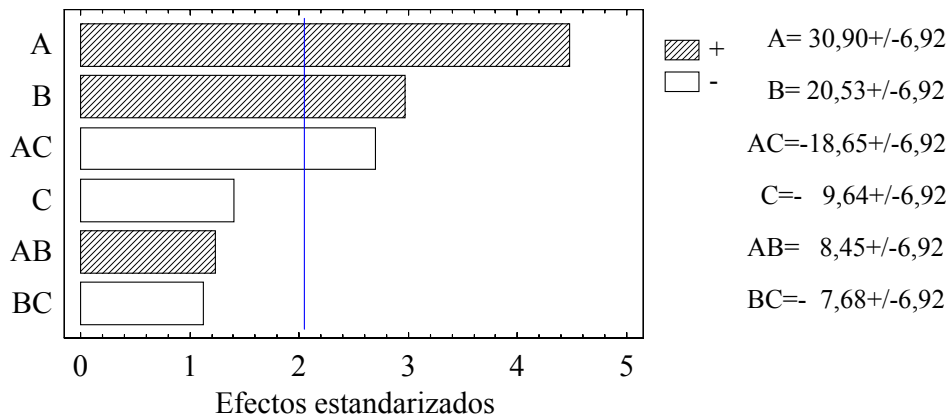


Figura 4.60. Efectos Estimados de las Microdurezas donde: A=Rugosidad, B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento.

Se observó que las variables A, B y el producto AC tuvieron efectos sobre las microdurezas, la aumentan las variables A (rugosidad) y la B (proceso térmico) y la disminuyen la interacción AC el producto de las variables A (rugosidad) por C (recubrimiento).

Tabla 4.24. Análisis de la Varianza para las Microdurezas (HV).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	9546,25	1	9546,25	19,50	0,0001
B	4212,76	1	4212,76	8,60	0,0062
C	929,87	1	929,87	1,90	0,1777
A*B	713,18	1	713,18	1,46	0,2363
A*C	3477,85	1	3477,85	7,10	0,0120
B*C	589,36	1	589,36	1,20	0,2808
A*B*C	454,95	1	454,95	0,93	0,3423
Residuos	15667,00	32	489,60		
Total (corregido)	35591,3	39			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Al evaluar a través del análisis de la varianza, Tabla 4.24 las variables respuestas las microdurezas Vickers (HV) del material proyectado, se obtuvo como intervinieron la variable A, la rugosidad en 99,99 % (P = 0,0001); la variable B, el proceso térmico en 99,38 % (P = 0,0062), el producto AC de la variable A, la rugosidad por la variable B, el proceso térmico en 98,80 % (P = 0,0120), la variable C, el recubrimiento en 82,23 % (0,1777), la interacción AB entre la variable A, la rugosidad por la variable B, el proceso térmico en 76,37 % (0,2363) y el producto BC de la variable B, el proceso térmico por la variable C, el recubrimiento en 71,92 % (0,2808).

Resultando del análisis de varianza que 3 efectos (A, B y AC) tuvieron las probabilidades menores a 0,05 ($P < 0,05$), es decir, las medias para las variables: recubrimiento (C), proceso térmico (B) y la interacción rugosidad (A) por recubrimiento (C) son diferentes significativamente, con 5 % de riesgos.

Los efectos resultantes del análisis de varianza se probaran usando la prueba de diferencia mínima significativa (DMS).

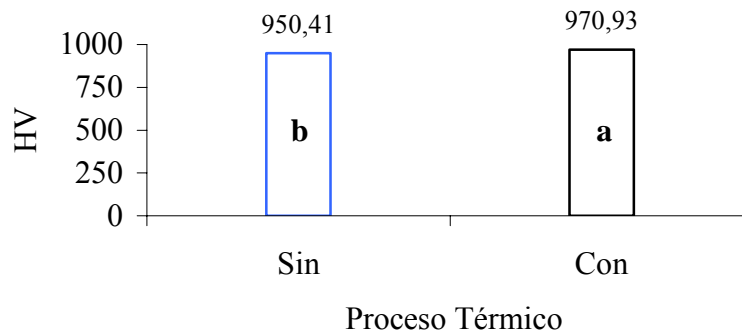


Figura 4.61. El Efecto Significativo del Factor Proceso Térmico (B) para las Microdurezas Vickers (HV) con $DMS_{0,05}$.

En la figura 4.61 se observa para la variable proceso térmico (B) que las medias **a** y **b** difieren en valor absoluto en $- 20,53$ HV, resaltando ésta diferencia a la mínima significativa ($DMS_{0,05}=14,25$ HV), lo que denota una diferencia de las medias estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confiabilidad.

Se logró mayor microdureza Vickers en función del proceso térmico.

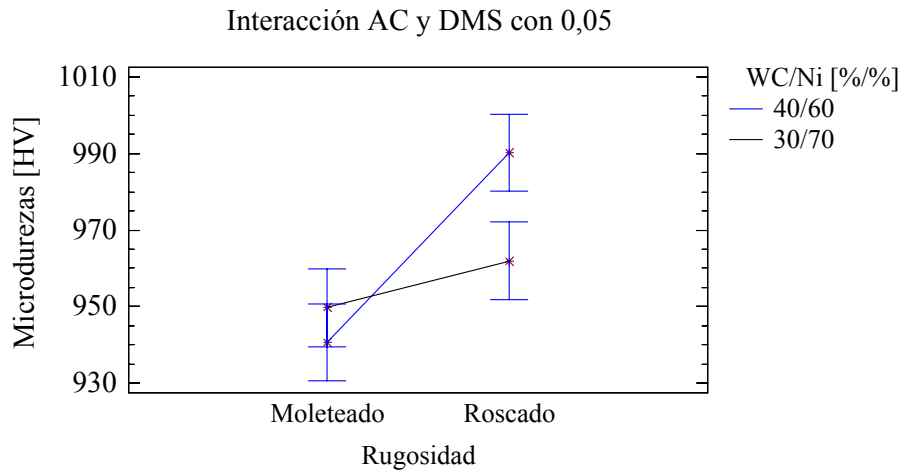


Figura 4.62. La Interacción Significativa Rugosidad * Recubrimiento (A*C) para las Microdurezas Vickers (HV) con $DMS_{0,05}$.

En la figura 4.62 se muestra que los promedios difieren debido a la interacción A*C de las variables rugosidad (A) y recubrimiento (C), siendo éstas diferencias en valores absolutos mayores que la mínima diferencia significativa $DMS_{0,05}$, lo que indica diferencias de los promedios estadísticamente significativos con un 5 % de riesgos. La interacción A*C tienen un punto de cruce donde ambas aleaciones tienen la misma microdureza, comportándose en las mismas condiciones. En los otros puntos existe un comportamiento diferenciados en las microdurezas para cada aleación de WC/Ni.

Se obtuvieron las mayores microdurezas para la rugosidad roscada en el recubrimiento 40%WC/60%Ni.

4.1.3.1.4. Las Porosidades.

Los valores medios de las porosidades (P_p) se muestran en la Tabla 4.18. Anteriormente se analizaron para una probeta proyectada con recubrimiento total en el punto 4.1.1.8, y a continuación se analizará para un recubrimiento parcial en tres trozos, los valores de las porosidades calculado con sus cinco (5) réplicas por probeta, Tabla 4.25.

Tabla 4.25. Matriz de Diseño de las Porosidades en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moletado), B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento (WC/Ni) [%/%] y Respuestas=Porosidades (P_p [%]), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (P_p [%])				
	A	B	C	1	2	3	4	5
1	M (-)	Sin	40/60 (-)	18,22	13,00	18,59	11,72	10,58
2	R (+)	(-)		10,67	8,93	8,12	7,87	9,66
3	M (-)	Con		10,88	13,24	11,85	13,77	10,61
4	R (+)	(+)		10,19	9,78	9,67	13,78	17,11
5	M (-)	Sin	30/70 (+)	16,47	13,63	11,56	13,47	11,67
6	R (+)	(-)		13,91	13,40	12,60	13,08	15,64
7	M (-)	Con		12,65	17,10	14,92	11,97	13,21
8	R (+)	(+)		17,93	13,82	12,98	11,35	12,93

De los resultados de la figura 4.63 del análisis a través del Statgraphics Plus 5.1 de los datos señalados en la Tabla 4.23, se tienen los efectos estimados de las porosidades (P_p) del recubrimiento, con promedio de $P_p = 12,81 \pm 0,41 \%$, observándose en éstas como disminuyen los efectos con la interacción BC el producto de variable B, proceso térmico por la variable C, recubrimiento en $-1,87 \pm 0,82$ unidades.

Gráfico de Pareto estandarizado para Porosidades

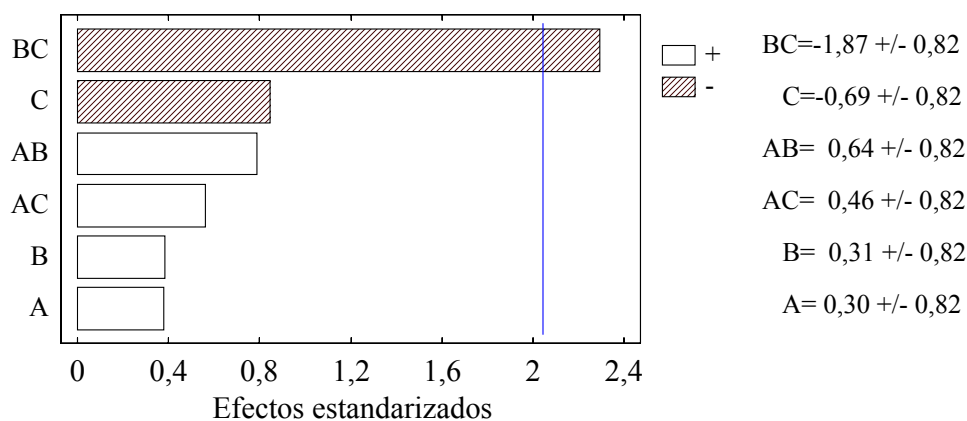


Figura 4.63. Efectos Estimados de las Porosidades.

Se observó que las porosidades están en función del proceso térmico (B) y el recubrimiento (C).

Tabla 4.26. Análisis de la Varianza para las Porosidades (Pp [%]).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	0,927	1	0,927	0,13	0,7237
B	0,964	1	0,964	0,13	0,7185
C	4,71	1	4,71	0,65	0,4273
A*B	4,10	1	4,10	0,56	0,4586
A*C	2,07	1	2,07	0,28	0,5973
B*C	34,91	1	34,91	4,79	0,0360
A*B*C	0,034	1	0,034	0,00	0,9458
Residuos	233,24	32	7,29		
Total (corregido)	280,97	55			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Del análisis de varianza señalado en la Tabla 4.26, se han evaluados las variables respuestas las porosidades del material proyectado, resultando que están influenciadas por la interacción BC el producto de la variable B, el proceso térmico por la variable C, el recubrimiento en 96,40 % ($P = 0,036$).

*Se obtuvo del análisis de varianza que en la interacción B*C (proceso térmico * recubrimiento) las medias se diferencian significativas ($P < 0,05$). Resultando que la porosidad está influenciada por el producto B*C.*

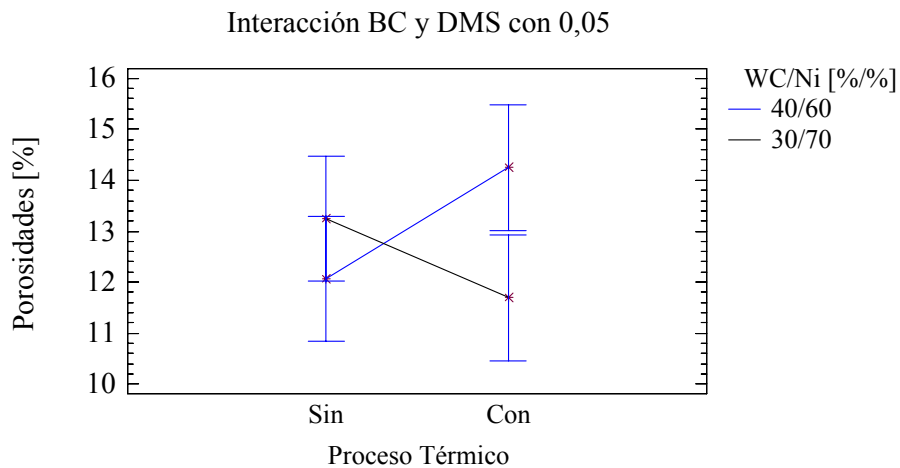


Figura 4.64. La Interacción Significativa Proceso Térmico * Recubrimiento (B*C) para las Porosidades (Pp) con $DMS_{0,05}$.

En la figura 4.64 se muestra que las medias difieren debido a la interacción B*C de las variables proceso térmico (B) y recubrimiento (C), siendo éstas diferencias en valores absolutos mayores que la mínima diferencia significativa $DMS_{0,05}$, lo que indica diferencias de las medias estadísticamente significativas con un 5 % de riesgos. La interacción B*C

tienen un punto de cruce donde ambas aleaciones tienen la misma porosidad, comportándose en las mismas condiciones, en los otros puntos existe un comportamiento diferenciado en las porosidades para cada aleación de WC/Ni.

Se obtuvieron las menores porosidades con el proceso térmico para el recubrimiento 30%WC/70%Ni.

4.1.3.2. Diseño Estadístico II para Al₂O₃/TiO₂ (87/13, 97/3).

El diseño estadístico II para Al₂O₃/TiO₂ (87/13, 97/3) se estableció con los siguientes valores de las variables. Para el “proceso térmico” se consideró una variable cualitativa con los niveles referidos al proceso térmico denotado “sin” y “con” éste. La “rugosidad” consistieron en: los moleteados de paso 1,5 mm de las estrías cruzadas de las moletas profundizadas a 0,35 mm (350 µm) y rosca de paso 1 mm y ángulo de filete de 60° con profundidades de 0,35 mm (350 µm). El recubrimiento de aleaciones de Al₂O₃/TiO₂ en relaciones de 97/3 y 87/13 en % peso, ver Tabla 4.27, Apéndice A.4.

Tabla 4.27. Variables (Factores) y Niveles Codificados.

Variable			Código	Nivel	
				Bajo (-)	Alto (+)
Rugosidad			A	Moleteado	Roscado
Proyección Térmica	Post-proyección	Proceso Térmico	B	Sin	Con
	Proyección	Recubrimientos Composición Química de la Aleación Al ₂ O ₃ /TiO ₂ en Relaciones de % en peso	C	97/3	87/13

4.1.3.2.1. Macroscopía Óptica.

Por medio de la macroscopía óptica descrita en el Capítulo III, punto 3.1, apartado 3.1.1 y en el punto 4.1.1.1, se efectuaron observaciones de las superficies naturales en las probetas antes y después de la proyección térmica por llama de los polvos micro-pulverizado de Al₂O₃/TiO₂ en dos proporciones de 97/3 y 87/13, sobre un sustrato de acero F1110, ver composiciones químicas en el Capítulo III, punto 3.2.3.1. Las observaciones fueron desde la simple vista hasta el uso de una lupa estereográfica, la graduación de aumento elegida fue de 10x.

En las figuras 4.65, 4.66, 4.67 y 4.68 se ilustran las imágenes macroscópicas con aumento de 10x de las adherencias del material depositado, detallándose en la figura 4.68, por cada condición de

experimentos y niveles de las variables recubrimiento, proceso térmico y rugosidad que se han tenido en cuenta en la técnica de proyección térmica por llama (flame spray).

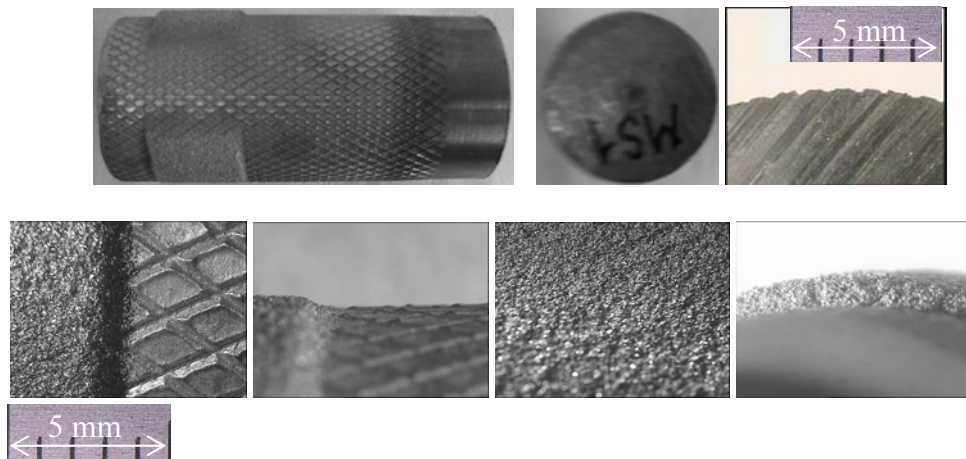


Figura 4.65. Fotografía de la Probeta y Detalles de la Intercara Sustrato – Recubrimiento de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ con la Rugosidad de Moleteado, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

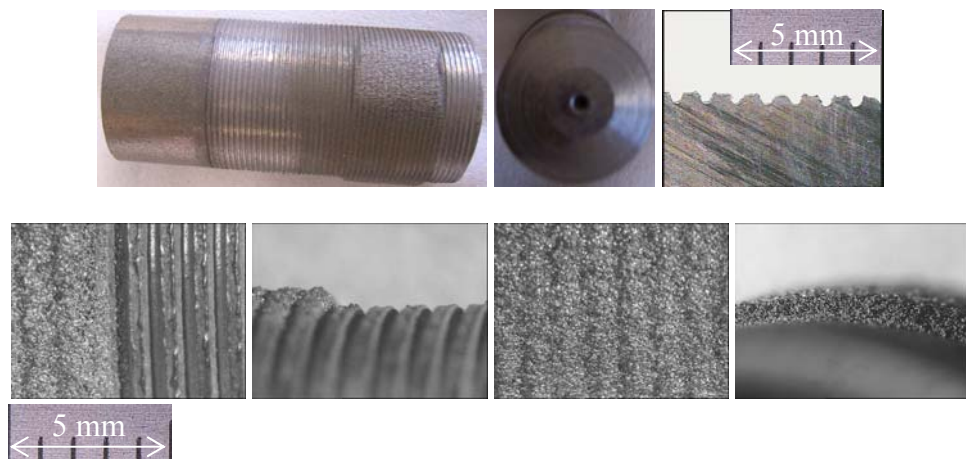


Figura 4.66. Fotografía de la Probeta y Detalles de la Intercara Sustrato – Recubrimiento de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ con la Rugosidad de Rosca de Paso 1 mm y Ángulo de Filete 60 °, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

En las imágenes de figuras 4.65 y 4.66 se ilustran los acabados de las rugosidades y los recubrimientos observándose: a.) Como los recubrimientos proyectados dibujan la forma de las rugosidades que permiten el anclaje mecánico al sustrato preparado. b.) El color del depósito se distingue con el color gris, siendo de color gris azulado en la aleación $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y de color gris oscuro en la aleación $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$. c.) La apariencia de la superficie del recubrimiento proyectado es de aglomeración de partículas irregulares aplastadas y adheridas una entre otras, debiéndose al proceso de proyección térmica por llama donde se proyectaron seis capas: una capa de enganche sobre el sustrato con aleación en base níquel y sobre ésta capa se proyectaron después y en forma repetida cinco capas de acuerdo a la condición experimental Tabla 4.27 con la aleación de $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$ o $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$. d.) El espesor del recubrimiento de las seis capas superpuestas se distingue en la proyección térmica por llama de cualquier otra y de otros procesos, llegándose a obtener espesores macro. e.) En el corte a lo largo de la sección longitudinal se aprecia la rugosidad moleteada en la figura 4.65 y la roscada en la figura 4.61. f.) Se observa el dimensionado de la probeta de proyección para la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura de sustrato con diámetro 30 mm y largo, en éste caso, en el intervalo de 65 mm a 70 mm; la probeta tiene un extremo acabado en forma cónica con el objeto de estabilizar y minimizar el área de contacto con la cruceta móvil, cuando la carga sea aplicada en la realización del ensayo de cizallamiento consiguiéndose en el arrastre del recubrimiento.



Figuras 4.67. Detalles de Rupturas de Probetas Proyectadas.

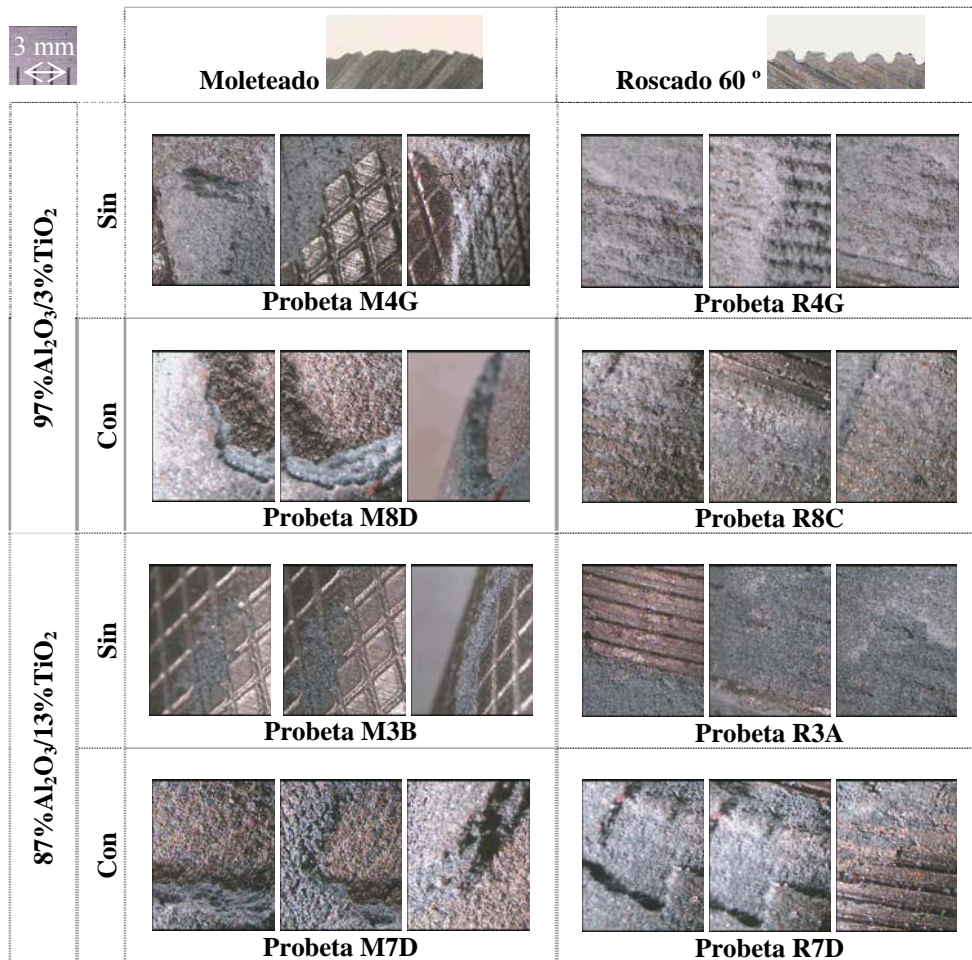


Figura 4.68. Detalles de las Intercaras Sustratos – Recubrimientos de Al₂O₃/TiO₂ [%/%] con relaciones 97/3 y 87/13 de Rugosidades Moletadas y Roscadas (Rosca de Paso 1 mm y Ángulo de Filete 60 °), Procesos Térmicos, Macroscopía Óptica (Lupa Estereográfica) 10x.

En las imágenes de las figuras 4.67 y 4.68 se muestran las macroscopías de las fracturas provocadas en la intercara sustrato – recubrimiento, cuando se hace el ensayo de cizalladura forzando la probeta recubierta cargada contra una matriz de corte. También se detallan los aspectos superficiales de las rotura por cada condición de experimentos y niveles en las imágenes, las rupturas observadas en los restos de los recubrimientos que han permanecidos adheridos al sustrato tienen aspecto brillante con plano de deslizamiento del corte provocado, tipo ruptura frágil.

Se obtuvo con la macroscopía óptica las superficies naturales sin y con aumento 10x, el acabado mecanizado del sustrato, la presencia de óxidos, el color del depósito gris azulado en la aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂ y de color gris oscuro en la aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, la aglomeración de partículas irregulares aplastadas y adheridas una sobre otras en los recubrimientos, el espesor macro de las capas superpuestas y la ruptura tipo frágil por cada condición de experimentos.

4.1.3.2.2. Microscopía Óptica.

Las microestructura del material proyectado óxido de aluminio o alúmina (Al₂O₃) + óxido de titanio (TiO₂), Al₂O₃/TiO₂, en dos composiciones química en tanto por ciento en peso se han ilustrado después de un ataque con los reactivos: a.) Nital 3 (97 ml etanol 3 ml de ácido nítrico HNO₃) y b.) Kroll (agua destilada H₂O 100 ml, ácido fluorhídrico HF 3 ml y ácido nítrico HNO₃ 6 ml) ataca al titanio (Ti) en las figura 4.69 y 4.70.

Primeramente según el Capítulo III, punto 3.2.3.1 y en el punto 4.1.1.2, la aleación comercial certificada de aluminio (Al_2O_3) + óxido de titanio (TiO_2), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ [%/%] en relación 97/3 y 87/13 en tanto por ciento en peso contienen respectivamente, polvo cerámicos de base a.) Al_2O_3 ; $\leq 3,5$ % TiO_2 ; $\leq 0,6$ % SiO_2 y $\leq 0,05$ % Fe_2O_3 y b.) Al_2O_3 ; 13,0 % TiO_2 ; $\leq 0,6$ % SiO_2 y $\leq 0,2$ % Fe_2O_3 .

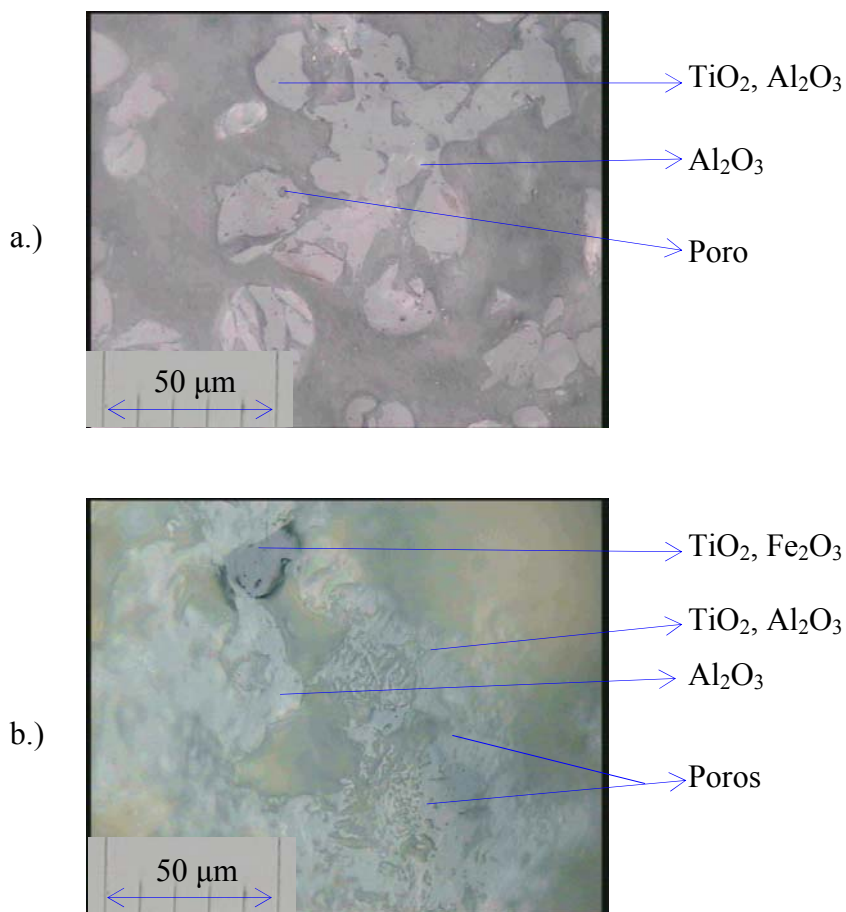


Figura 4.69. Microestructura de la Aleación 97% Al_2O_3 /3% TiO_2 , Reactivos a.) Nital 3 y b.) Kroll, Microscopía Óptica 400x.

En la figura 4.69 se observan los componentes de la aleación $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$, en esta el óxido de titanio (TiO_2) de color negro por el titanio (Ti), tiene una variación de tonalidad tiñendo en cierta zona a la alúmina o óxido de aluminio (Al_2O_3) de color blanco lo que da un color gris azulados en casi toda la aleación $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$, el óxido de silicio (SiO_2) y el óxido de hierro (Fe_2O_3) por el hierro (Fe) y el silicio (Si) tienen un color gris el silicio más oscuro con un tono azulado y el hierro es brillante.

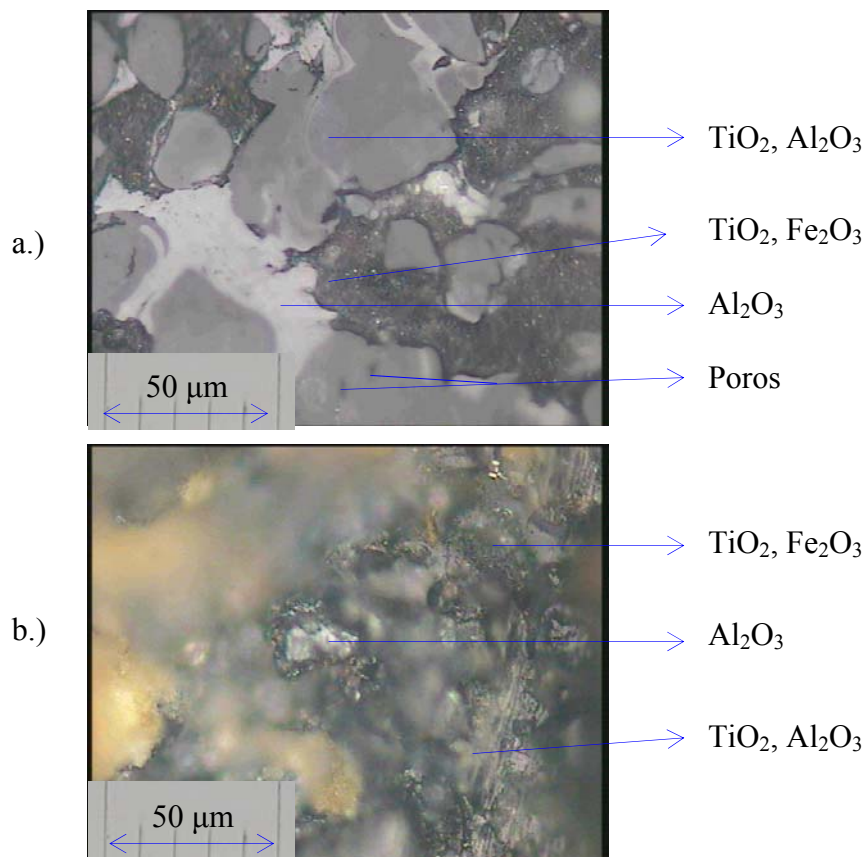


Figura 4.70. Microestructura de la Aleación $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$, Reactivos a.) Nital 3 y b.) Kroll, Microscopía Óptica 400x.

En la figura 4.70 se observan los componentes de la aleación $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$, en esta el óxido de titanio (TiO_2) de color negro por el titanio (Ti), tiene una variación de tonalidad tiñendo en cierta zona a la alúmina o óxido de aluminio (Al_2O_3) de color blanco lo que da un color gris oscuro en casi todo la aleación $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$, el óxido de silicio (SiO_2) y el óxido de hierro (Fe_2O_3) por el hierro (Fe) y el silicio (Si) tienen un color gris el silicio más oscuro con un tono azulado y el hierro es brillante.

Resultando con la microscopía óptica observar las superficies atacadas usando aumento de 400x, la microestructura de la aleaciones: $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$, identificación de formas y colores, regiones de componentes de elementos disueltos y límites de regiones, granos y poros.

4.1.3.2.3. Los Esfuerzos de Cizalladura.

Los esfuerzos de cizalladura (τ), como variables respuestas resultantes se han considerados para una probeta recubierta con recubrimiento total en el punto 4.1.1.5, recubrimiento en cuatro partes en el punto 4.1.2.1, y en el diseño estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60), apartado 4.1.3.1.1. A continuación se enfocara también para un recubrimiento parcial en tres trozos los valores de los esfuerzos de cizalladura (τ_R) calculado se con sus cinco (5) réplicas por probeta en la se muestran en la Tabla 4.29 y sus promedios en la Tabla 4.28. Del análisis

estadísticos ANOVA, empleando el Statgraphics Plus 5.1, de las variables respuestas se ilustró el esfuerzo de cizalladura de ruptura (τ_R) en la figura 4.48.

Tabla 4.28. Valores Promedios de Al_2O_3/TiO_3 para 5 replicas de la experimentación: Cargas de Cizalladura (F_1 y $F_R=F_2-F_1$), Deformaciones Lineales (δ_1 y $\delta_R=\delta_2-\delta_1$), Porosidades (P_P) y Microdurezas Vickers (HV), Esfuerzos de Cizalladuras (τ_1 y $\tau_R=\tau_2-\tau_1$), Deformaciones Unitarias Lineales (ε_1 y $\varepsilon_R=\varepsilon_2-\varepsilon_1$) y Rigideces $G_R=(\tau_2-\tau_1)/(\varepsilon_2-\varepsilon_1)=\tau_R/\varepsilon_R$ en los Experimentos para Recubrimientos Parciales en Cuatro Partes (ExpP3.), Apéndice A.4.

ExpP4.	F_1 [kN]	δ_1 [mm]	F_R [kN]	δ_R [mm]	P_P [%]	HV	τ_1 [MPa]	ε_1 [mm/mm]	τ_R [MPa]	ε_R [mm/mm]	G_R [MPa]
1	0,84	0,26	2,79	0,44	31,51	1483,96	1,19	0,017	3,95	0,030	133,91
2	0,83	0,33	3,01	0,69	34,98	1387,73	1,18	0,022	4,26	0,046	92,58
3	0,72	0,22	3,00	0,35	41,02	1543,65	1,02	0,013	4,24	0,033	129,18
4	0,85	0,28	2,57	0,35	39,21	1677,61	1,21	0,019	3,63	0,023	154,53
5	0,81	0,23	2,25	0,30	29,93	1296,58	1,14	0,015	3,19	0,020	157,13
6	0,89	0,30	2,98	0,55	31,92	1250,77	1,25	0,020	4,21	0,036	115,80
7	0,64	0,20	2,82	0,49	36,70	1406,78	0,91	0,014	3,99	0,033	121,67
8	0,84	0,26	3,78	0,44	36,17	1529,02	1,19	0,017	5,35	0,029	181,55

En la figura 4.71 se representa el análisis de los efectos estimados de los esfuerzos de cizalladura (τ_R) de promedio $\tau_R = 4,20 \pm 0,26$ MPa; mostrándose que el factor A, la rugosidad tiene cierto acción en $0,62 \pm 0,51$ unidades, la interacción A*C, el factor A, la rugosidad por el factor C, el recubrimiento tiene cierta influencia en $0,66 \pm 0,51$ unidades y la interacción B*C, el factor B, el proceso térmico por el factor C, el recubrimiento tiene cierto efecto en $0,53 \pm 0,51$.

Tabla 4.29. Matriz de Diseño de los Esfuerzos de Cizalladura en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: donde: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moleteado), B=Tratamiento Térmico, C=Recubrimiento (Al_2O_3/TiO_2) [%/%] y Respuesta=Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (τ_R [MPa])				
	A	B	C	1	2	3	4	5
1	M (-)	Sin	97/3 (-)	3,16	4,56	3,59	4,20	4,46
2	R (+)	(-)		5,72	5,63	3,20	4,84	3,28
3	M (-)	Con		4,64	4,05	2,61	4,64	5,28
4	R (+)	(+)		3,08	4,00	5,88	4,56	0,63
5	M (-)	Sin	87/13 (+)	3,68	2,02	2,86	2,72	5,43
6	R (+)	(-)		7,67	2,79	3,39	6,28	2,58
7	M (-)	Con		5,83	4,28	3,68	2,87	3,27
8	R (+)	(+)		8,14	4,53	7,00	6,25	0,81

Gráfico de Pareto estandarizado para Esfuerzos de Cizalladura

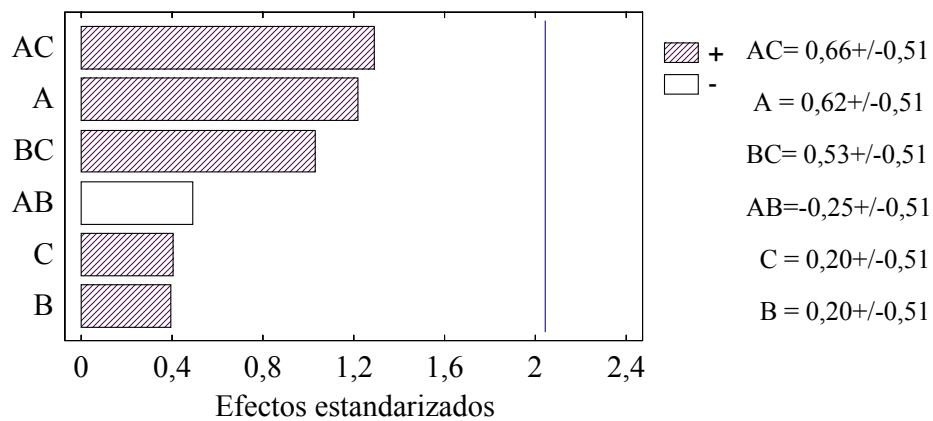


Figura 4.71. Efectos Estimados de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) donde: A=Rugosidad, B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento.

Se obtuvo que no hay efectos a la adherencia en la intercara sustrato – recubrimiento.

Tabla 4.30. Análisis de la Varianza para Esfuerzo de Cizalladura τ_R .

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	3,86	1	3,86	1,48	0,2343
B	0,39	1	0,39	0,15	0,7009
C	0,41	1	0,41	0,16	0,6937
A*B	0,62	1	0,62	0,24	0,6308
A*C	4,34	1	4,34	1,66	0,2083
B*C	2,76	1	2,76	1,05	0,3129
A*B*C	17,95	4	4,49	1,71	0,1739
Residuos	75,92	29	2,62		
Total (corregido)	106,25	39			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Por medio del análisis de la varianza (ANOVA) mostrado en la Tabla 4.30., considerando las variables respuestas τ_R , resultó que hubo cierta influencia de la variable A, la rugosidad en 76,57 % (P = 0,2343), la interacción A*C el producto de la variable A, la rugosidad y la variable, el recubrimiento en 79,17 % (P = 0,2083), la interacción B*C, la variable B, el proceso térmico por la variable C, el recubrimiento en 68,71 % (P = 0,3129), y la interacción A*B*C la variable A, la rugosidad por la variable B, el proceso térmico por la variable C, el recubrimiento en 82,61 % (P = 0,1739).

Mostrando el análisis de varianza que no hay efecto, los p-valor son superiores a 0,05 (P>0,05), no hay indicios de correlación de serie en

los residuos, implicando que ambas aleaciones de Al_2O_3/TiO_2 tienden a comportarse de manera semejantes.

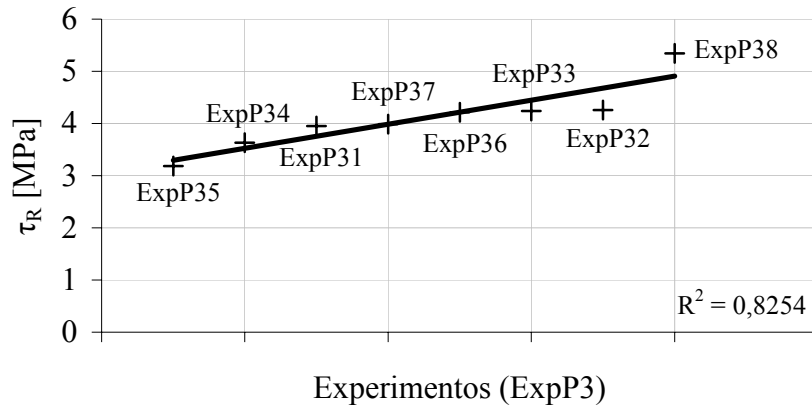


Figura 4.72. Diagrama de Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura (τ_R) versus Experimentos para Recubrimiento Parcial a 3 Trozos (ExpP3).

Del análisis de regresión lineal simple aplicado para observar la influencia de los esfuerzos en los experimentos para recubrimiento parcial a tres (3) trozos (ExpP3), en la figura 4.72, se muestran las medias en orden creciente de los esfuerzos de cizalladura de ruptura (τ_R) versus experimentos (ExpP3), donde se observa una relación entre las condiciones de un experimento a otro en forma creciente los esfuerzos τ_R son mayores, en la zona pseudo-elástica (1–2), figura 4.48. El coeficiente de regresión (R^2) indica que el modelo lineal se ajustaría explicando la variabilidad de los esfuerzos de cizalladura τ_R en 82,54 %, ver figura 4.72.

Obteniéndose entre los esfuerzos de cizalladura y las condiciones experimentales relación proporcional.

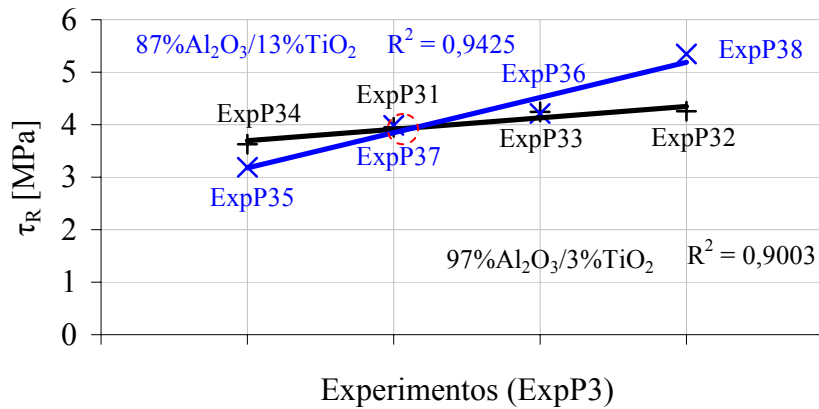


Figura 4.73. Diagrama Esfuerzos de Cizalladura (τ_R) versus Experimentos (ExpP3) para el Recubrimiento Al_2O_3/TiO_2 con relación en % peso de 97/3 y 87/13.

En la figura 4.73, existe semejanzas directamente proporcionales en cuanto a las relaciones de las variables. Los recubrimientos de $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$, en estas se observan: una intersección en el rango de trabajo señalando en este caso dependencia de los recubrimientos en este punto común y en el resto de los puntos existe independencia entre los recubrimientos. Los coeficientes de determinaciones R^2 de 0,9003 para $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y 0,9425 para $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$ de ajuste de la curva en forma lineal son buenos, y muestran el grado de confianza y dependencia de los factores: rugosidad, proceso térmico y recubrimiento.

Se logró una relación directamente proporcional para los esfuerzos de cizalladura en función de contenido de titanio (Ti). Resultando el mayor esfuerzo de cizalladura para la aleación $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$. El ajuste de regresión lineal indicó que las aleaciones de Al_2O_3/TiO_2 tuvieron las mismas características en el punto común de cruce dentro del área de experimentación.

4.1.3.2.4. Las Rigideces.

Las rigideces (G) del material proyectado, como variables respuestas resultantes se han considerados para una probeta recubierta con recubrimiento total en el punto 4.1.1.6, recubrimiento en cuatro partes en el punto 4.1.2.2, y en el diseño estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60), apartado 4.1.3.1.2. A continuación se enfocara también para un recubrimiento parcial, en tres trozos los valores de las rigideces (G_R) ensayados que se muestran con sus cinco (5) réplicas por probeta en la Tabla 4.31 y sus promedios en la Tabla 4.28. Los resultados del análisis y varianzas tomando como variables respuestas las rigideces G_R en la zona pseudo-elástica (puntos 1–2), figura 4.48, se obtuvieron por el programa Statgraphics Plus 5.1.

Tabla 4.31. Matriz de Diseño de las Rigideces en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: donde: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moleteado), B=Tratamiento Térmico, C=Recubrimiento (Al_2O_3/TiO_2) [%/%] y Respuestas=Rigideces de Ruptura (G_R [MPa]), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (G_R [MPa])				
	A	B	C	1	2	3	4	5
1	M (-)	Sin	97/3 (-)	112,06	203,26	135,94	100,81	153,02
2	R (+)	(-)		142,04	75,28	76,83	61,73	117,46
3	M (-)	Con		136,73	136,18	74,56	162,04	142,94
4	R (+)	(+)		149,92	169,59	203,42	182,48	32,51
5	M (-)	Sin	87/13 (+)	179,03	101,18	146,17	127,01	253,77
6	R (+)	(-)		117,57	77,30	88,05	309,76	106,58
7	M (-)	Con		146,72	144,19	123,94	88,34	101,54
8	R (+)	(+)		370,99	116,63	220,97	204,47	33,32

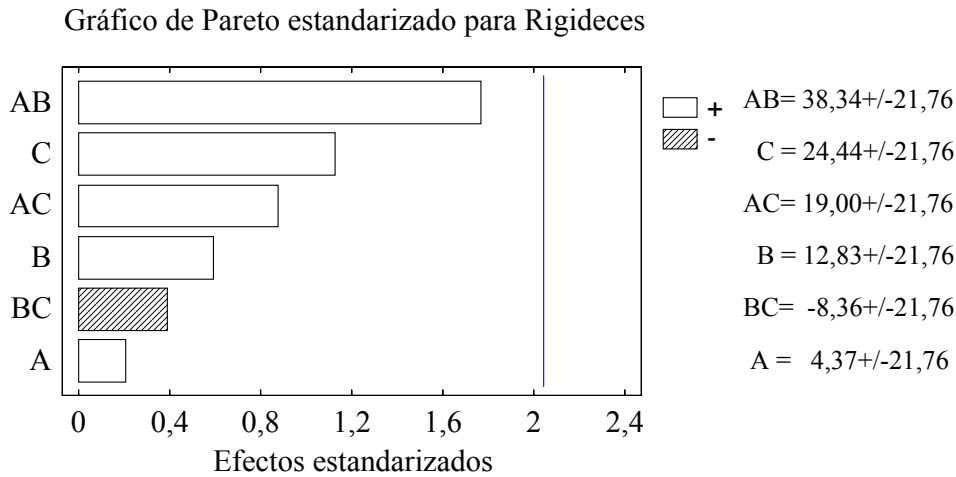


Figura 4.74. Efectos Estimados de las Rigideces de Ruptura (τ_R) donde: A=Rugosidad, B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento.

En la figura 4.74 se representa el análisis de los efectos estimados de las rigideces (G_R) de promedio $G_R = 140,66 \pm 10,88$ MPa, observándose que la interacción A*B producto de la variable A, la rugosidad por la variables B el proceso térmico en $38,34 \pm 21,76$ unidades y la variable C, el proceso tiene cierta acción en $24,44 \pm 21,76$ unidades.

Observó para las rigideces que no hay condiciones dominantes para la adherencia entre sustrato – recubrimiento.

Resultando del análisis de varianza que no hay efecto el p-valor es mayor a 0,05 ($P > 0,05$), los residuos no son significativamente diferentes, implicando que ambas aleaciones de Al_2O_3/TiO_2 tienden a comportarse de modo parecido.

Tabla 4.32. Análisis de la Varianza para Rigideces (G_R).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	191,28	1	191,28	0,04	0,8417
B	1646,47	1	1646,47	0,35	0,5588
C	5971,43	1	5971,43	1,27	0,2689
A*B	14698,40	1	14698,40	3,12	0,0870
A*C	3610,57	1	3610,57	0,77	0,3881
B*C	699,31	1	699,31	0,15	0,7027
A*B*C	437,78	1	437,78	0,09	0,7626
Residuos	150920,00	32	4716,24		
Total (corregido)	178175,00	39			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Se realizó un análisis de regresión lineal simple para ver el comportamiento de las rigideces en los experimentos para recubrimiento parcial a 3 trozos (ExpP3). En la figura 4.75 se representa la comparación de los promedios de las rigideces de ruptura (G_R) en la zona 1–2 versus experimentos (ExpP3). También las rigideces de ruptura al igual que los esfuerzos de cizalladura de ruptura en esta zona pseudo-elástica muestran una relación proporcional de acuerdo a las condiciones de un experimento a otro ordenado de forma creciente. En consecuencia se incrementan las rigideces (G_R). El estadístico R^2 señala que el modelo lineal se ajustaría explicando 95,66 % de la variabilidad de las rigideces de ruptura.

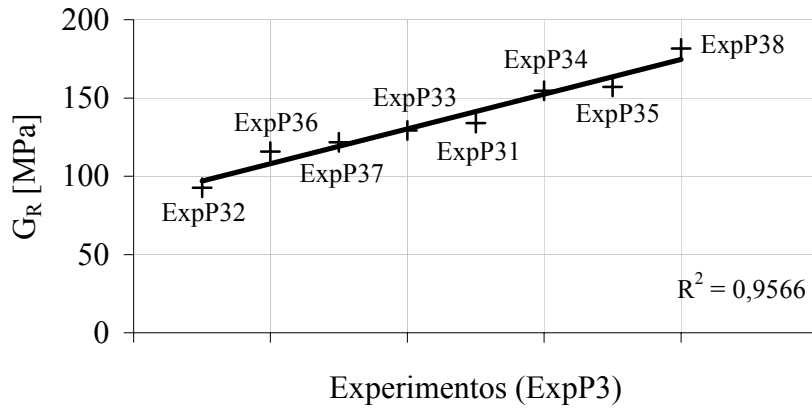


Figura 4.75. Diagrama de Rigideces de Rupturas (G_R) versus Experimentos (ExpP3).

Se logró relación directamente proporcional de las rigideces versus las condiciones experimentales .

En las curvas de dispersiones ajustadas a un modelo lineal mostradas en la figura 4.76, existe semejanza directamente proporcional en cuanto a las variables. En los recubrimientos de Al_2O_3/TiO_2 en relación 97/3 y 87/13, en tanto por ciento en peso, no se observan intersecciones en la zona explorada y existen en el resto de los puntos independencia entre los recubrimientos. Los coeficientes de modelo lineales R^2 de 0,9108 para 97% $Al_2O_3/3\%TiO_2$ y 0,9414 para 87% $Al_2O_3/13\%TiO_2$ de ajuste de la curva son buenos, y son indicativos del grado de confianza y dependencia de los factores: rugosidad, proceso térmico y recubrimiento.

Se obtuvo una relación directamente proporcional para las rigideces en función de contenido de titanio. Resultando la mejor rigidez para la aleación 87% $Al_2O_3/13\%TiO_2$.

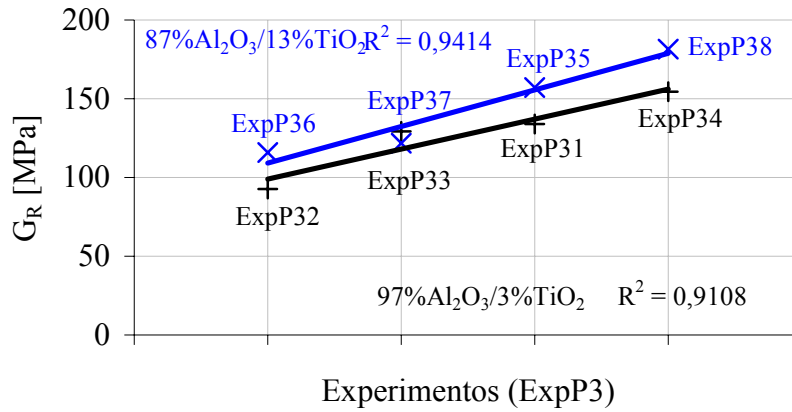


Figura 4.76. Diagrama Rigideces (G_R) versus Experimentos (ExpP3) para el Recubrimientos Al_2O_3/TiO_2 con relación en % peso de 87/13 y 97/3.

4.1.3.2.5. Las Microdurezas Vickers.

Los valores promedios de las microdurezas Vicker (HV) se muestran en la Tabla 4.28. Anteriormente se analizaron estadísticamente para una probeta proyectada con recubrimiento total en el punto 4.1.1.7 y para una probeta proyectada con recubrimiento parcial en tres trozos en el punto 4.1.3.1.3, Seguidamente para probetas también con recubrimiento parcial en tres trozos diferenciándose en: las aleaciones proyectadas ($97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y $0,9414$ para $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$) y la carga constante de compresión $F = 100$ grf aplicada durante el tiempo de 10 s, los valores de las microdurezas Vicker (HV) calculado se tabularon con sus cinco (5) réplicas por probeta en la Tabla 4.33.

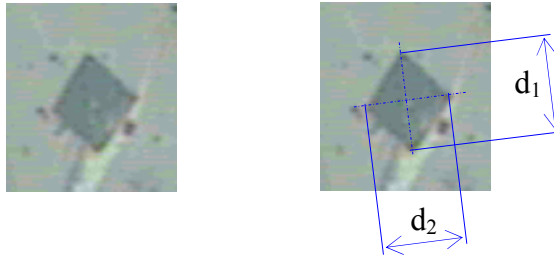


Figura 4.77. Microdureza Vickers Geometrías de la Huella.

Tabla 4.33. Matriz de Diseño de Microdurezas Vickers en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: donde: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moletado), B=Tratamiento Térmico, C=Recubrimiento (Al_2O_3/TiO_2) [%/%] y Respuestas=Microdurezas Vickers (HV), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (HV)				
	A	B	C	1	2	3	4	5
1	M (-)	Sin	97/3 (-)	1329,59	1487,64	1684,45	1559,52	1509,30
2	R (+)	(-)		1340,05	1317,10	1080,92	1551,01	1420,58
3	M (-)	Con		1482,37	1582,93	1685,90	1529,81	1437,26
4	R (+)	(+)		1667,92	1804,52	1768,37	1638,30	1508,95
5	M (-)	Sin	87/13 (+)	1250,71	1301,88	1361,01	1264,16	1273,16
6	R (+)	(-)		1229,51	1235,96	1211,86	1349,87	1304,45
7	M (-)	Con		1352,89	1478,37	1355,53	1427,18	1419,93
8	R (+)	(+)		1576,40	1690,29	1582,76	1625,56	1170,11

De los resultados de la figura 4.78 del análisis por medio del Statgraphics Plus 5.1 de los datos indicados en la Tabla 4.33, se tienen los efectos estimados de las microdurezas Vickers (HV) del recubrimiento, con promedio de HV = 1446,20 +/- 18,81. Se observó que con la variable C, el recubrimiento la aleación Al_2O_3/TiO_2 disminuyen los efectos al pasar de la relación de % en peso de composición química del nivel bajo de 97/3 al

nivel alto de 87/13 en $- 146,25 \pm 37,62$ unidades; y la variable B, el proceso térmico, si hay incremento de la variable respuesta en $186,13 \pm 37,62$ unidades, y la interacción AB la variable A, la rugosidad, por la variable B, el proceso térmico, influyen en $113,06 \pm 37,62$ unidades.

Gráfico de Pareto estandarizado para Microdurezas

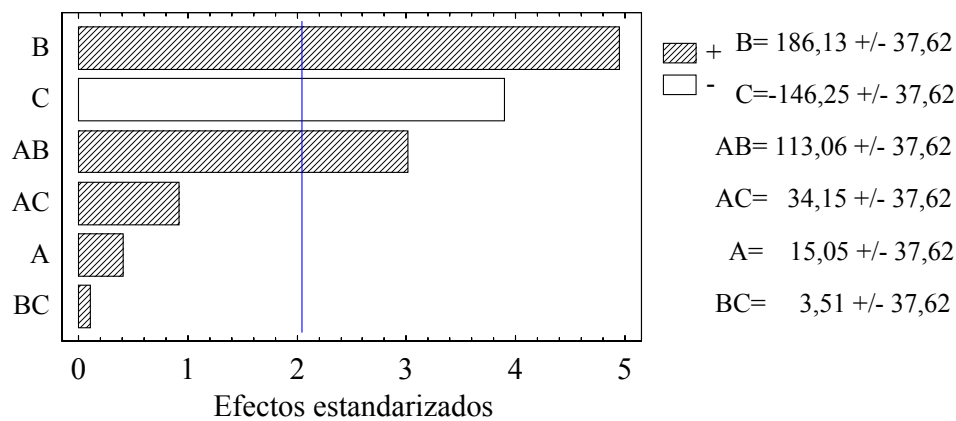


Figura 4.78. Efectos Estimados de las Microdurezas donde: A=Rugosidad, B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento.

Se observó que las variables B, C y el producto AB tuvieron efectos de aumentar las microdurezas cuando el recubrimiento (C) está en función del porcentajes de Al_2O_3 , si el material proyectado es tratado por proceso térmico (B) en baño de sales a base de nitrito sódico ($NaNO_2$) más nitrato potásico (KNO_3) al 50 % a la temperatura aproximada de 400 °C, y cuando sucede el nivel alto de la interacción de las variables rugosidad por proceso térmico (AB).

Del análisis de la varianza (Tabla 4.34.) las variables respuestas las microdurezas Vickers (HV) del material proyectado, se obtuvo como

influyó la variable C, el recubrimiento en 99,94 % (P = 0,0006); la variable B, el proceso térmico en 100,00 % (P = 0,0000) y el producto AB de la variable A, la rugosidad, por la variable B, el proceso térmico en 99,37 % (P = 0,0063).

Resultando del análisis de varianza que 3 efectos (B, C y AB) tuvieron los valores de las probabilidades inferiores a 0,05 (P<0,05), es decir, las medias para las variables: proceso térmico (B), recubrimiento (C) y la interacción rugosidad (A) por proceso térmico (B) son diferentes significativamente, con 5 % de errores.

Tabla 4.34. Análisis de la Varianza para las Microdurezas (HV).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	2263,52	1	2263,52	0,15	0,6996
B	346447,00	1	346447,00	23,20	0,0000
C	213876,00	1	213876,00	14,32	0,0006
A*B	127817,00	1	127817,00	8,56	0,0063
A*C	11662,20	1	11662,20	0,78	0,3834
B*C	123,48	1	123,48	0,01	0,9281
A*B*C	16005,60	1	16005,60	1,07	0,3083
Residuos	477846,00	32	14932,70		
Total (corregido)	1196040,00	39			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Los efectos resultantes del análisis de varianza se probaron utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (DMS).

En la figura 4.79 se observa para la variable recubrimiento (C) que las medias **a** y **b** difieren en valor absoluto en 146,25 HV, superando ésta

diferencia a la mínima significativa ($DMS_{0,05}=78,71$ HV), lo que denota una diferencia de las medias estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confiabilidad.

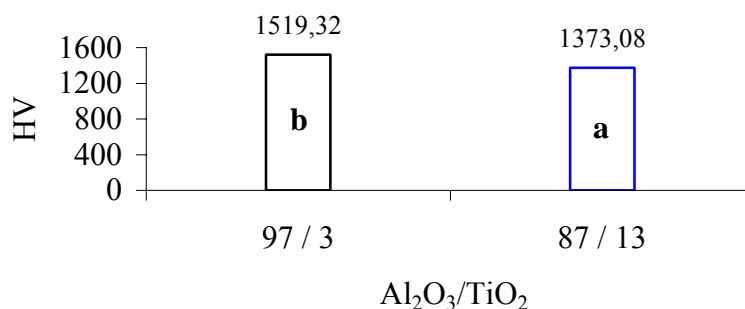


Figura 4.79. El Efecto Significativo del Factor Recubrimiento (C) para las Microdurezas Vickers (HV) con $DMS_{0,05}$.

Se obtuvo mayor microdureza Vickers en función del porcentajes de óxido de aluminio (Al_2O_3). Resultando la mejor microdurezas en el material 97% Al_2O_3 /3% TiO_2 .

En la figura 4.80 se muestra que las medias difieren debido a la interacción A*B de las variables rugosidad (A) y proceso térmico (B), siendo éstas diferencias en valores absolutos mayores que la mínima diferencia significativa $DMS_{0,05}$, lo que indica diferencias de las medias estadísticamente significativas con un 5 % de riesgos. La acción A*B se halla fuera de la zona de trabajo de estas variables rugosidad y proceso térmico, debido a éste comportamiento existe mayores microdurezas.

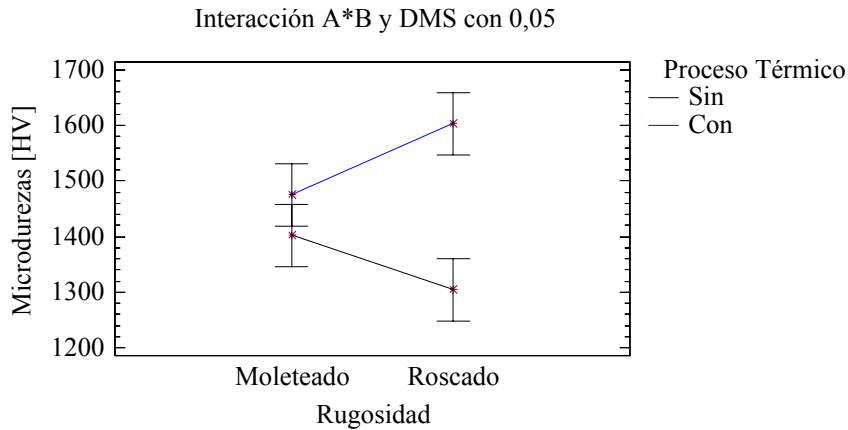


Figura 4.80. La Interacción Significativa Rugosidad * Proceso Térmico (A*B) para las Microdurezas Vickers (HV) con DMS_{0,05}.

Las mayores microdurezas se logran cuando hay proceso térmico y la rugosidad es roscada en el recubrimiento 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

4.1.3.2.6. Las Porosidades.

Los valores promedios de las porosidades (P_p) se muestran en la Tabla 4.28, anteriormente se analizaron para una probeta proyectada con recubrimiento total en el punto 4.1.1.8 y para una probeta proyectada con recubrimiento parcial en tres trozos en el punto 4.1.3.1.4, seguidamente para probetas también con recubrimiento parcial en tres trozos diferenciándose en: las aleaciones proyectadas (97%Al₂O₃/3%TiO₂ y 0,9414 para 87%Al₂O₃/13%TiO₂), los valores de las porosidades (P_p) calculado se tabularon con sus cinco (5) réplicas por probeta en la Tabla 4.35.

Tabla 4.35. Matriz de Diseño de las Porosidades en Orden de Experimentos, Niveles Codificados Bajo (-) y alto (+) para el diseño 2^3 de las variables: A=Rugosidad (R=Roscado y M=Moletado), B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento (Al_2O_3/TiO_2) [%/%] y Respuestas=Porosidades (Pp [%]), Apéndice A.4.

ExpP3	Variables			Respuestas (Pp[%])					
	A	B	C	1	2	3	4	5	
1	M (-)	Sin	97/3	33,48	39,36	36,63	32,48	36,59	
2	R (+)	(-)		35,05	37,00	37,12	35,06	34,93	
3	M (-)	Con		(-)	41,01	42,35	39,07	42,85	39,82
4	R (+)	(+)		39,02	39,85	38,67	38,63	39,86	
5	M (-)	Sin	87/13	24,56	25,14	30,25	31,84	18,35	
6	R (+)	(-)		33,40	28,00	30,30	31,79	28,74	
7	M (-)	Con		(+)	34,16	41,86	34,12	38,89	34,49
8	R (+)	(+)		35,81	34,96	39,51	36,14	34,41	

En la figura 4.81 se ilustran las imágenes microscópicas con aumento de 100x de las porosidades del material proyectado señalándose detalles experimentales en las aleaciones proyectadas $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$.

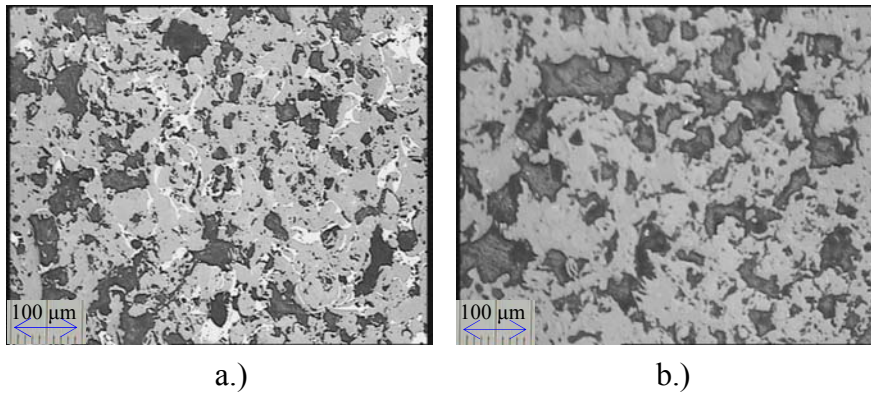


Figura 4.81. Detalles de Porosidades del Material Proyectado de Al_2O_3/TiO_2 en proporción en tanto por ciento en peso: a.) 87/13 y b.) 97/3. Microscopías Ópticas 100x.

En la figura 4.81 se observan las porosidades en las imágenes en escala de grises como cavidades de formas irregulares de colores oscuros, para el recubrimiento Al_2O_3/TiO_2 en dos composiciones química en relación de tanto por ciento en peso de 87/13 y 97/3 se encuentran sus valores Tablas 4.28 y 4.35, menor del 50 %.

De los resultados de la figura 4.82 del análisis a través del Statgraphics Plus 5.1 de los datos señalados en la Tabla 4.35, se tienen los efectos estimados de las porosidades (Pp) del material proyectado, con media de $Pp = 35,14 \pm 0,75 \%$, observándose en éstas como aumentan los efectos por la variable A, la rugosidad del nivel negativo de moleteado al nivel negativo roscado en $1,88 \pm 1,49$ unidades y de la variable B, el proceso térmico de la condición Sin a Con en $1,88 \pm 1,49$ unidades.

Gráfico de Pareto estandarizado para Porosidades

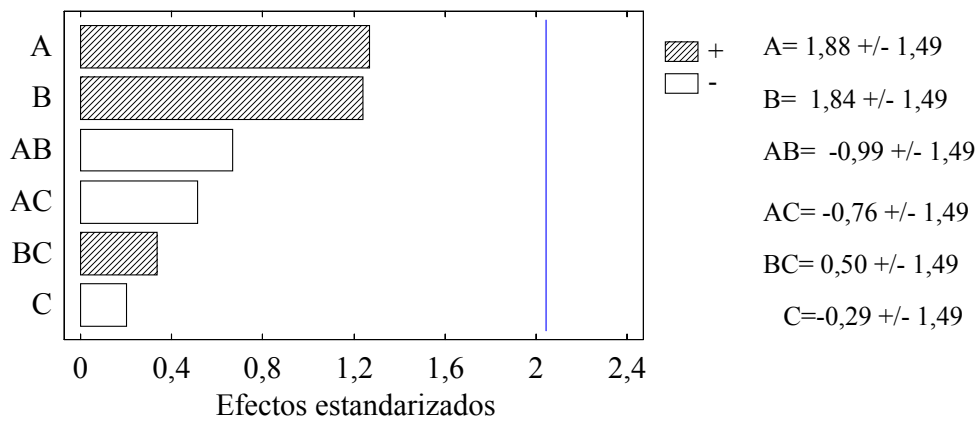


Figura 4.82. Efectos Estimados de las Porosidades donde: A=Rugosidad, B=Proceso Térmico, C=Recubrimiento.

Se observó para las porosidades una tendencia del efecto con valor de nivel alto de las variables rugosidad (A) roscada (roscada de paso 1 mm y ángulo de filete de 60°) y con proceso térmico (C).

Del análisis de varianza señalado en la Tabla 4.36, se han evaluados las variables respuestas las porosidades del material proyectado, resultando que están influenciadas por la variable A, la porosidad en 71,85 % (P = 0,2815) y la variable B, el proceso térmico en 70,80 % (P = 0,2920).

Tabla 4.36. Análisis de la Varianza para las Porosidades (Pp [%]).

FV	SC	gl	CM	F-Ratio	P-Valor
A	35,40	1	35,40	1,20	0,2815
B	33,87	1	33,87	1,15	0,2920
C	0,84	1	0,84	0,03	0,8672
A*B	9,79	1	9,79	0,33	0,5686
A*C	5,80	1	5,80	0,20	0,6605
B*C	2,46	1	2,46	0,08	0,7748
A*B*C	15,51	1	15,51	0,53	0,4737
Residuos	944,13	32	29,50		
Total (corregido)	1047,80	39			

FV=Fuente de variación, SC=Sumas de cuadrados, gl=Grado de libertad, CM=Cuadrado Medio, F-Ratio=Relación de Distribución F de Fisher – Snedecor y P-Valor=Probabilidad.

Señaló el análisis de varianza para las porosidades que no hay efectos no se observaron medias con diferencias significativas (P>0,05).

4.2. Análisis Relativos a las Variables Controladoras de la Adherencia.

En los análisis relativos a las variables controladoras de la adherencia se realizarán comparaciones entre experimentos considerando las variables y sus niveles, ver Apéndice A.4.

4.2.1. Comparación Recubrimiento de las probetas (1/3, 1/4 y 1).

En la figura 4.83 se representa la gráfica esfuerzos de cizalladura de ruptura (τ_R) versus experimentos para las probetas cilíndricas con los recubrimientos: total (ExpT.) y parciales a cuatro y tres partes (ExpP3 y ExpP4), por observación de la curva exponencial ajustada usando regresión exponencial la correlación R^2 explica 97,26 % (0,9716) de la dependencia del modelo exponencial, siendo indicativo del grado de confianza y dependencia del factor recubrimiento en cuanto a la geometría depositada denotada por: (1/3), (1/4) y (1) en el sustrato, probeta recubierta, figura 4.86, para las misma condiciones de: rugosidad rosca en función del ángulo del filete $\alpha = 90^\circ$, paso $P = 1,5$ mm y profundidad 0,75 mm (750 μm), temperatura 100 °C y la aleación en base de 40%WC/60%Ni.

Se obtuvo una correlación directamente proporcional para los esfuerzos de cizalladura de ruptura en función de la geometría depositada en el sustrato, es decir la probeta cilíndrica recubierta a 1/3, 1/4 y 1 con la aleación 40%WC/60%Ni.

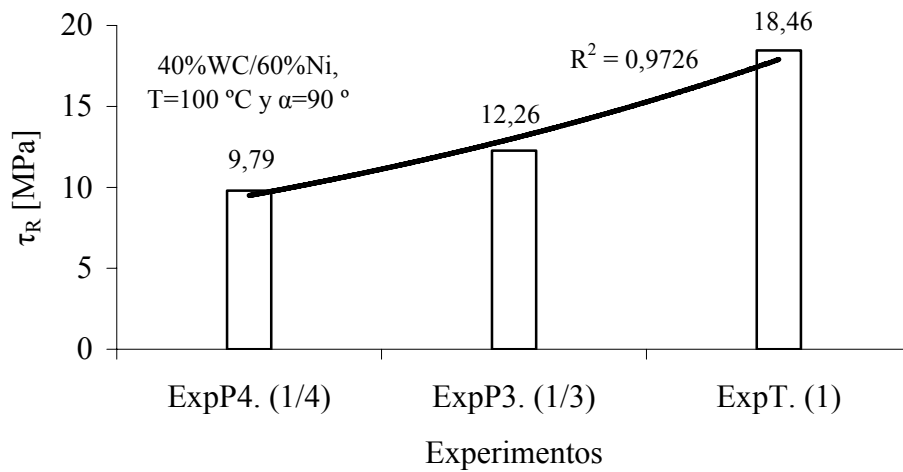


Figura 4.83. Diagrama Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura Rigideces (τ_R) versus Experimentos para los Recubrimientos: Total (ExpT.) y Parciales a Cuatro y Tres Partes (ExpP3 y ExpP4) para la Aleación en Base 40%WC/60%Ni, Rugosidad Roscada Ángulo de Filete $\alpha = 90^\circ$.

Al igual que en la figura 4.83 se grafican para la figura 4.84 los esfuerzos de cizalladura de ruptura (τ_R) versus experimentos para las probetas cilíndricas con los recubrimientos: total (ExpT.) y parciales a 3 y 4 trozos (ExpP3 y ExpP4), y se ajusta por regresión en forma exponencial hallándose el coeficiente de determinación R^2 que explica 99,31 % (0,9931) de la dependencia del modelo exponencial, siendo indicativo del nivel de seguridad y dependencia de la variable recubrimiento, debido a la geometría depositada a un (1/3), (1/4) y (1) en el sustrato, probeta recubierta, figura 4.86, para las mismas condiciones de: rugosidad rosca en función del ángulo del filete $\alpha = 90^\circ$, paso $P = 1,5$ mm y profundidad 0,750 mm (750 μm), temperatura 100 °C y la aleación en base de 30%WC/70%Ni.

Se logró una correlación directamente proporcional de los esfuerzos de cizalladura de ruptura en función de la geometría depositada

del recubrimiento en el sustrato, es decir para las probetas recubierta a 1/3, 1/4 y 1 con la aleación 30%WC/70%Ni.

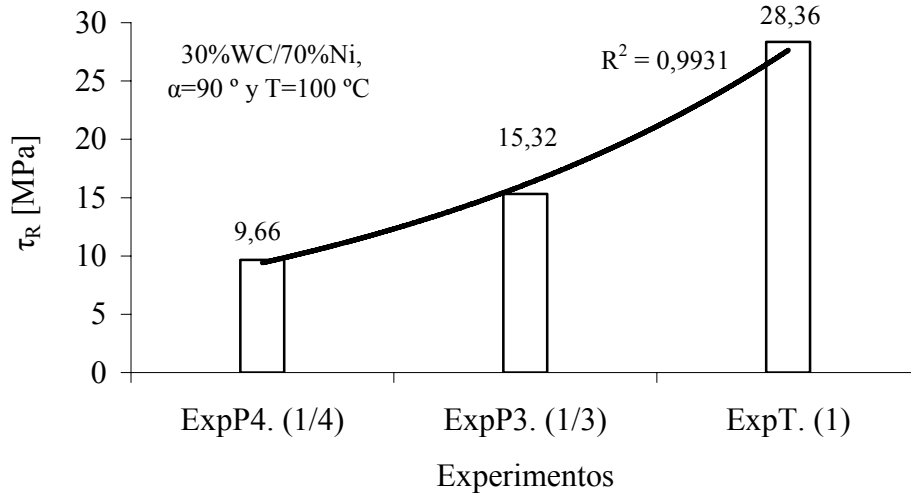


Figura 4.84. Diagrama Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura Rigideces (τ_R) versus Experimentos para los Recubrimientos: Total (ExpT.) y Parciales a Cuatro y Tres Partes (ExpP4 y ExpP3) para la Aleación en Base 40%WC/60%Ni, Rugosidad Roscada Ángulo de Filete $\alpha = 90^\circ$.

En las curvas ajustadas a un modelo exponencial mostradas en la figura 4.85, existe semejanzas directamente proporcionales en cuanto a las relaciones de las variables experimentales. Se observan los recubrimientos proyectados en las aleaciones en base WC/Ni [%/%] en proporciones de 40/60 y 30/70, en estas curvas los esfuerzos de cizalladura de ruptura son mayores para un recubrimiento total (ExpT.) y menores para un recubrimiento a cuatro partes (ExpP4.), expresándose en forma de desigualdad $\tau_{RExpT} > \tau_{RExpP3} > \tau_{RExpP4}$, justificándose que el recubrimiento total resisten elevados esfuerzos de cizalladura en todo el perímetro en forma de banda continua cerrada y la menor resistencia del recubrimiento parcial a cuatro trozos se podría deber a la no uniformidad de los trozos de

material proyectado, sucediendo la inestabilidad, en cuanto al apoyo en el contacto del recubrimiento con la pieza hueca o matriz de corte, empleada para la cizalladura del recubrimiento, es decir posiblemente solo dos o tres partes tuvieron contacto con la pieza hueca cuando se ejecutó el ensayo de cizalladura a la probeta cilíndrica recubierta. Dichos coeficientes de regresiones R^2 de 0,9931 para 30%WC/70%Ni y 0,9726 para 40%WC/60%Ni de ajuste de las curvas en forma exponencial son buenos, y muestran el grado de confianza y dependencia de las variables: rugosidad, temperatura, recubrimiento además del factor la geometría depositada del recubrimiento en los experimentos.

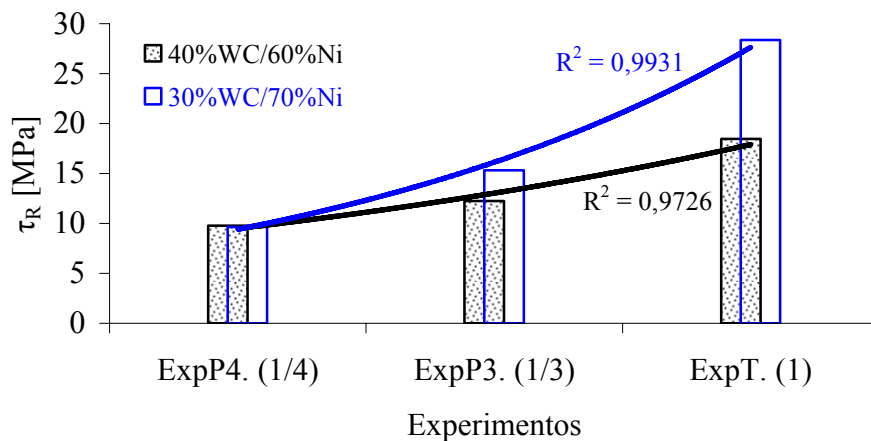


Figura 4.85. Diagrama Esfuerzos de Cizalladura de Ruptura Rigideces (τ_R) versus Experimentos para los Recubrimientos: Total (ExpT.) y Parciales a Cuatro y Tres Partes (ExpP3 y ExpP4) para la Aleación en Base 40%WC/60%Ni, Rugosidad Roscada Ángulo de Filete $\alpha = 90^\circ$.

Resultó una relación proporcional análoga para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel (Ni) de la aleación en base WC/Ni y de la geometría depositada del recubrimiento en el sustrato,

siendo mayor el esfuerzo de cizalladura en el material WC/Ni con la proporción 30/70 en tanto por ciento en peso.

Se obtuvo del ensayo de cizalladura que: a.) Los mayores valores de esfuerzos de cizalladura fueron para la probeta con recubrimiento total, se debió a que el material depositado produce una unión cerrada, abraza completo a lo largo del perímetro. b.) Los menores valores de esfuerzos de cizalladura fueron para la probeta con recubrimiento parcial a cuatro trozos, se debió a la no uniformidad de los trozos de material proyectado, ocurriendo inestabilidad de apoyo en el contacto del recubrimiento con la pieza hueca utilizada para la cizalladura del recubrimiento, es decir probablemente solo dos o tres partes tienen contacto con la pieza hueca cuando se realizó el ensayo de cizalladura a la probeta recubierta.



a.)

b.)

c.)

Figura 4.86. Probetas Cilíndrica de Cizalladura con Tipos de Geometría: a.) Recubrimiento Total (1), b.) Recubrimiento a Cuatro Partes (1/4) y c.) Recubrimiento a Tres Partes (1/3).

4.2.2. Comparación de Energías de Ruptura (E_R).

La comparación de energías de ruptura (E_R) según la geometría del recubrimiento sobre el sustrato, es decir probetas cilíndrica proyectada con polvo micropulverizado de aleaciones cerámicas a 1/3, 1/4 y 1, figura 4.86, Apéndice A.4.

a.) Recubrimiento Total (1).

En la figura 4.87 se ilustran las curvas para los experimentos con cada condición establecida en el diseño factorial 2^3 , Tabla 4.1 para recubrimiento total, Apéndice A.4. En esta figura 4.87 se observaron las correlaciones R^2 considerando un modelo de regresión lineal en cada condición experimental para recubrimientos total (ExpT.). En las curvas lineales ajustadas hay semejanzas directamente proporcionales en cuanto a las relaciones de las variables experimentales graficadas. Este recubrimiento total se proyecto con las aleaciones 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, en estas curvas se grafican la energía de ruptura (E_R), en el producto deformación por esfuerzo de cizalladura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$), versus impactos acumulado hasta la ruptura (I_{aR}), observándose que las curvas con mayores pendientes positivas y por lo tanto cantidad de energía liberada y señales acústicas generadas es para el recubrimiento de aleación 40%WC/60%Ni. Los ajustes de las curvas en forma lineal muestran el grado de confianza y dependencia de las variables: rugosidad, temperatura, recubrimiento, los mayores coeficientes de correlaciones (R^2) se hallaron para la aleación 40%WC/60%Ni en las condiciones (3) y (4) de temperatura de 100 °C y

rugosidad en función del ángulo de 45 ° y 90 ° respectivamente y en la aleación 30%WC/70%Ni en las condiciones (5) y (8) de temperatura 20 °C y 100 °C y la rugosidad en función del ángulo del filete de 45 ° y 90° respectivamente.

*Se obtuvo para recubrimiento total una relación directamente proporcional para la energía de deformación de ruptura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) en función de los impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando la condición dominante para: la temperatura ($T=100$ °C) y la rugosidad roscada en función del ángulo del filete ($\alpha=90^\circ$) para las aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni.*

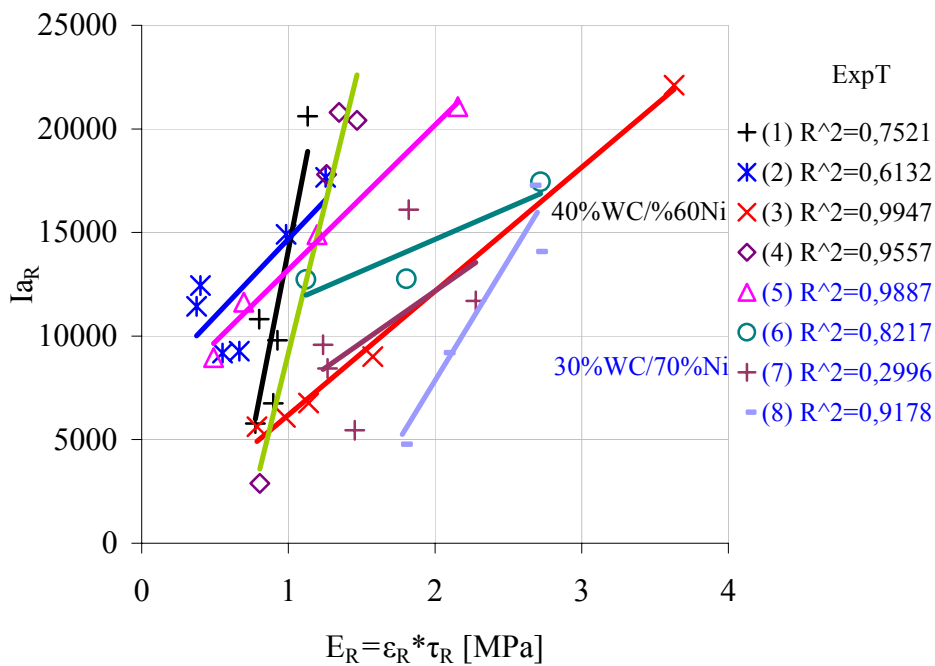


Figura 4.87. Recubrimiento Total Correlaciones Ajustada a un Modelo de Regresión Lineal para todas las Variables Rugosidad (A), Temperatura (B) y Recubrimiento (C), ver Tabla 4.1.

b.) Recubrimiento en Cuatro Partes (1/4).

Por analogía del recubrimiento total (1), figura 4.87, se graficaron para el recubrimiento en cuatro partes (1/4), figura 4.88, las curvas para los experimentos con cada condición establecida en el diseño factorial 2^3 , Tabla 4.11 para recubrimiento en cuatro partes, Apéndice A.4. En esta figura 4.88 las curvas lineales ajustadas en los experimentos para recubrimiento a cuatro partes tienen analogías directamente proporcionales en cuanto a las variables experimentales graficadas con las aleaciones 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, las cuales fueron la “energía de ruptura (E_R)” en el producto deformación por esfuerzo de cizalladura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) versus impactos acumulado hasta la ruptura (I_{aR}), observándose que las curvas con mayores pendientes positivas y por lo tanto cantidad de energía liberada e impactos acústicos producidos es para el recubrimiento de aleación 40%WC/60%Ni. Los ajustes de las curvas en forma lineal muestran el grado de confianza y dependencia de las variables: rugosidad, temperatura, recubrimiento, los mayores coeficientes de regresiones (R^2) se encontraron para la aleación 40%WC/60%Ni en las condiciones (2) y (4) de temperatura de 20 °C y 100 °C y rugosidad en función del ángulo de 90 ° respectivamente y en la aleación 30%WC/70%Ni en las condiciones (7) y (8) de temperatura de 100 °C y la rugosidad en función del ángulo del filete de 45 ° y 90 ° respectivamente.

*Se logró para el recubrimiento a cuatro partes por analogía del recubrimiento total una relación directamente proporcional para la energía de deformación de ruptura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) en función de los*

impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando la condición dominante para: la temperatura ($T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la rugosidad roscada en función del ángulo del filete ($\alpha=90^{\circ}$) para las aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni.

Resultando en ambos diseño factorial 2^3 par recubrimiento total y recubrimiento a cuatro partes relación directamente proporcional de la energía de deformación de ruptura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) en función de los impactos acumulados hasta la ruptura y la mejor condición experimental para: la temperatura ($T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la rugosidad roscada en función del ángulo del filete ($\alpha=90^{\circ}$) para ambas aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni.

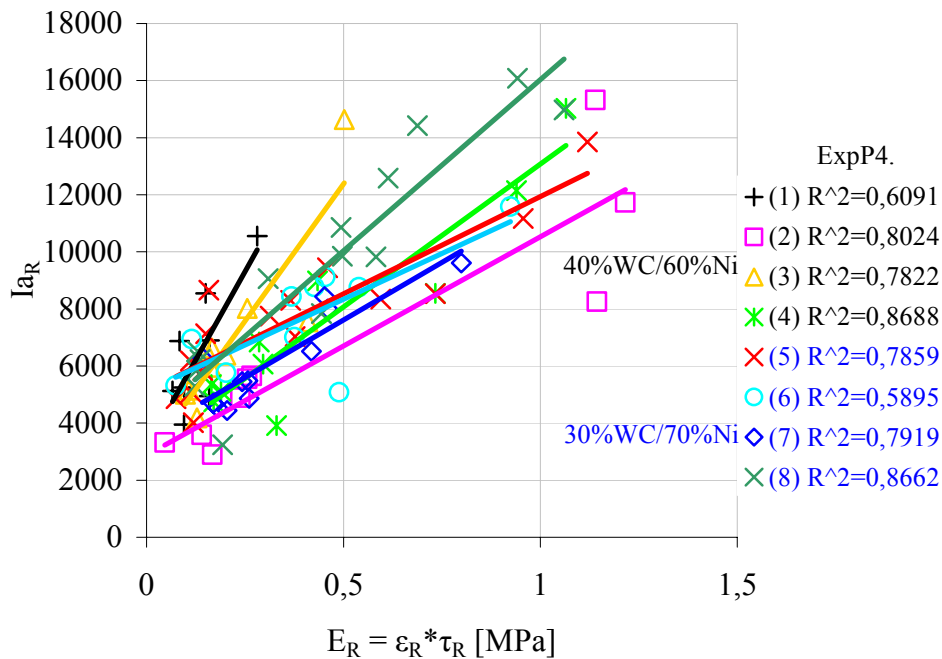


Figura 4.88. Recubrimiento a Cuatro Partes las Correlaciones Ajustada a un Modelo de Regresión Lineal para todas las Variables Rugosidad, Temperatura y Recubrimiento, ver Tabla 4.11.

c.) Recubrimiento en Tres Partes (1/3).

Las probetas de cizalladura para recubrimiento a tres partes se ensayaron referidas al proceso térmico “sin” y ”con” éste, los ensayos de cizalladura se hicieron en conjunto con la técnica no destructiva de emisión acústica se elaboran los diagramas de las curvas de “energía de ruptura (E_R)” en el producto deformación por esfuerzo de cizalladura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) versus impactos acumulado hasta la ruptura (I_{aR}) por tipo de rugosidades, Apéndice A.4:

a.) Roscas (proceso roscados) de paso 1 mm y ángulo de filete de 60° con profundidades de 0,35 mm (350 μ m), sin proceso térmico R1, R2, R3 y R4 (figura 4.89) y con proceso térmico R5, R6, R7 y R8 (figura 4.90).

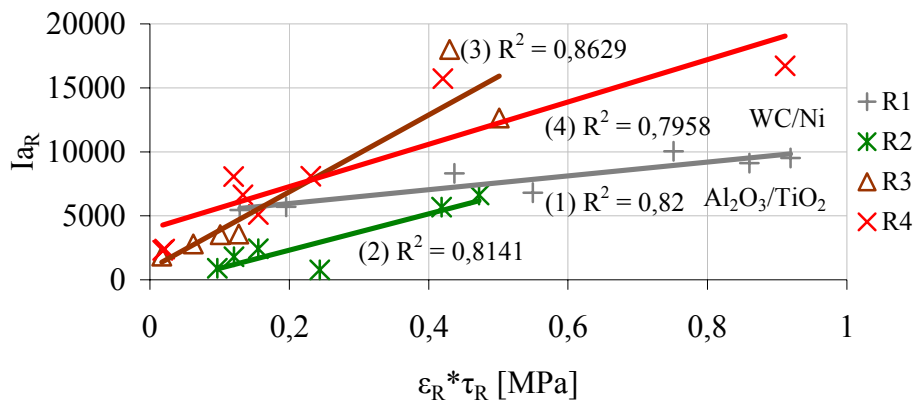


Figura 4.89. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Roscados R1 con 40%WC/60%Ni, R2 con 30%WC/70%Ni, R3 con 87%Al₂O₃/13%TiO₂, R4 con 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

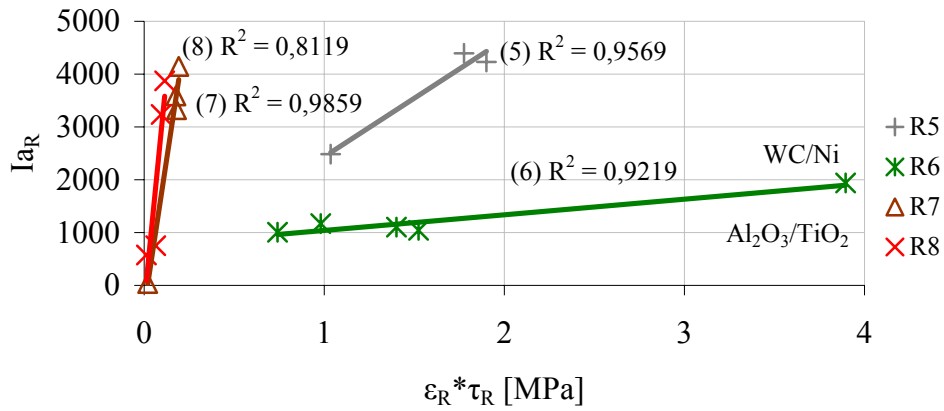


Figura 4.90. Recubrimiento a Tres Partes Con Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Roscados R5 con 40%WC/60%Ni, R6 con 30%WC/70%Ni, R7 con 87% Al_2O_3 /13% TiO_2 , R8 con 97% Al_2O_3 /3% TiO_2 .

b.) Moleteados de paso 1,5 mm de las estrías cruzadas de las moletas profundizadas a 0,35 mm (350 μ m), sin proceso térmico M1, M2, M3 y M4, (figura 4.91) y con proceso térmico M4, M5, M6 y M7 (figura 4.92).

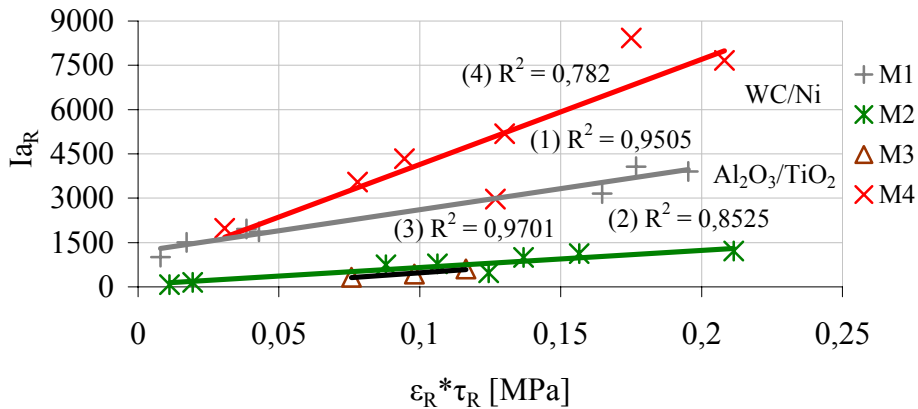


Figura 4.91. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Moleteados M1 con 40%WC/60%Ni, M2 con 30%WC/70%Ni, M3 con 87% Al_2O_3 /13% TiO_2 , M4 con 97% Al_2O_3 /3% TiO_2 .

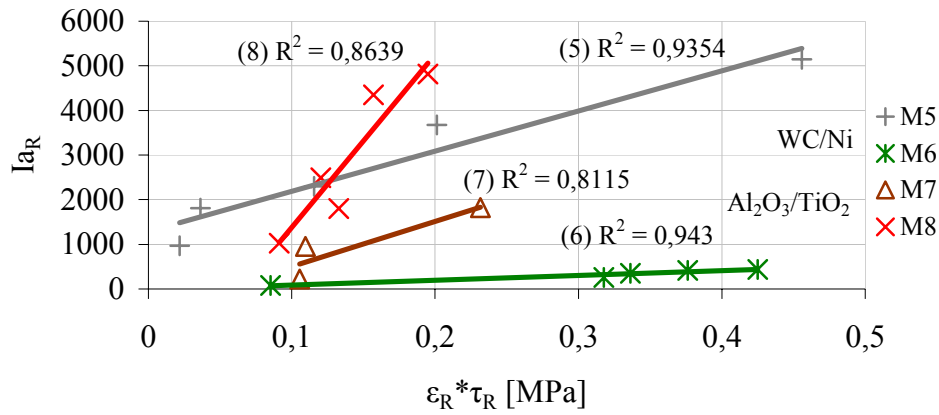


Figura 4.92. Recubrimiento a Tres Partes Con Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Moleteados M5 con 40%WC/60%Ni, M6 con 30%WC/70%Ni, M7 con 87%Al₂O₃/13%TiO₂, M8 con 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

c.) Rayados con limas (proceso limados) de paso 1 mm y realizadas a profundidades de 0,35 mm (350 μm), L1, L2, L3 y L4 (figura 4.93.) y L5, L6, L7 y L8 (figura 4.94).

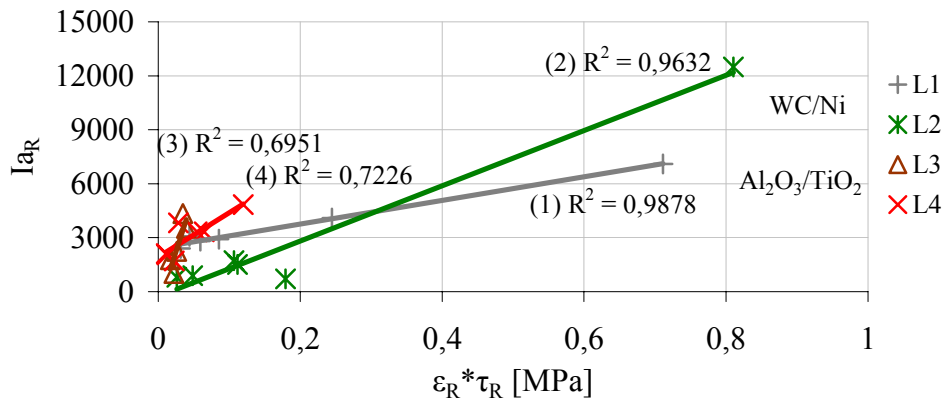


Figura 4.93. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Limados L1 con 40%WC/60%Ni, L2 con 30%WC/70%Ni, L3 con 87%Al₂O₃/13%TiO₂, L4 con 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

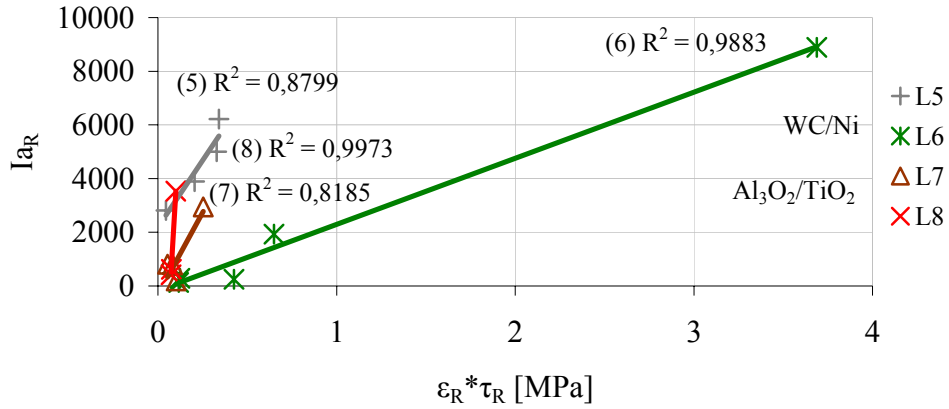


Figura 4.94. Recubrimiento a Tres Partes Con Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Limados L5 con 40%WC/60%Ni, L6 con 30%WC/70%Ni, L7 con 87%Al₂O₃/13%TiO₂, L8 con 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

d.) Roscas de paso 1,5 mm y ángulos de filete de 90° con profundidades de 0,75 mm (750 μm), sin proceso térmico PR1, PR2, PR3 y PR4 (figura 4.95)

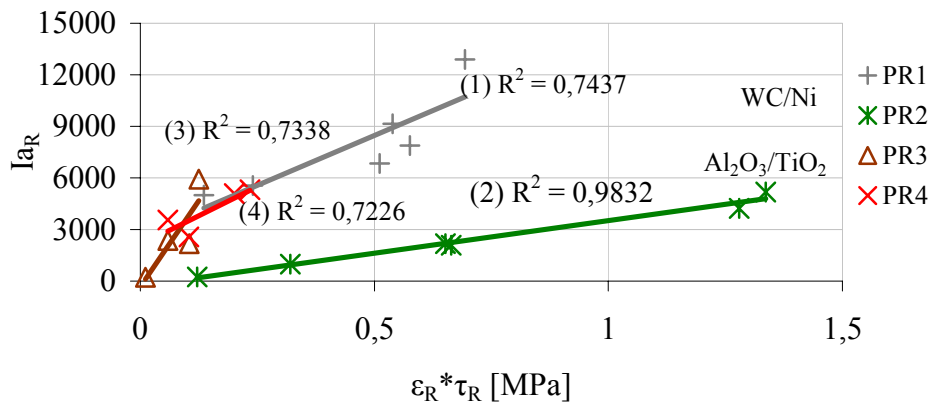


Figura 4.95. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Roscados PR1 con 40%WC/60%Ni, PR2 con 30%WC/70%Ni, PR3 con 87%Al₂O₃/13%TiO₂, PR4 con 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

Las curvas trazadas para las probetas de cizalladura sin proceso térmico ilustradas en las figuras 4.89, 4.91 y 4.93 y 4.95 y con proceso térmico ilustradas en las figuras 4.90, 4.92 y 4.94; fueron ajustadas por regresión lineal; observándose para este recubrimiento en tres partes (1/3) también las semejanzas directamente proporcionales en cuanto a las variables experimentales graficadas con las aleaciones de WC/Ni y Al₂O₃/TiO₂ que el recubrimiento total (1) y el recubrimiento a cuatro partes (1/4). Las mayores inclinaciones o pendientes positivas debido a la cantidad de energía liberada y señales acústicas generadas fueron para las aleaciones: a.) 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin proceso térmico y b.) 30%WC/70%Ni y 97%Al₂O₃/3%TiO₂ con proceso térmico. Los ajustes de las curvas en forma lineal muestran el nivel de seguridad y dependencia de las variables: rugosidad, proceso térmico, recubrimiento, en general los coeficientes de determinaciones (R²) son aceptables, siendo los mayores según el tipo de rugosidad: a.) Roscado en función del ángulo del filete ($\alpha=60^\circ$) para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin o con proceso térmico. b.) Moleteado para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin o con proceso térmico. c.) Limado para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin proceso térmico y 30%WC/70%Ni y 97%Al₂O₃/3%TiO₂ con proceso térmico. d.) Roscado en función del ángulo del filete ($\alpha=90^\circ$) para las aleaciones 30%WC/70%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin proceso térmico.

Se obtuvo para el recubrimiento en tres partes (1/3) por semejanza del recubrimiento total (1) y el recubrimiento en cuatro partes (1/4) una relación directamente proporcional para la energía de deformación de

*ruptura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) en función de los impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando las mayores pendientes positivas por la cantidad de energía liberada y señales acústicas generadas fueron para los materiales según la rugosidad: a.) Roscado en función del ángulo del filete ($\alpha=60^\circ$) y moleteado para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin o con proceso térmico. b.) Limado para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin proceso térmico y 30%WC/70%Ni y 97%Al₂O₃/3%TiO₂ con proceso térmico. c.) Roscado en función del ángulo del filete ($\alpha=90^\circ$) para las aleaciones 30%WC/70%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin proceso térmico.*

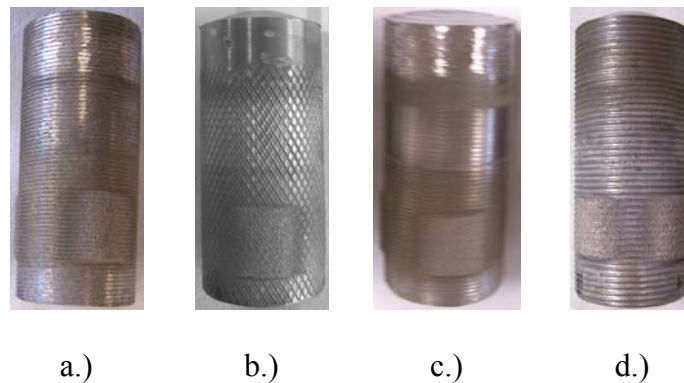


Figura 4.96. Probeta Proyectada para cizalladura con Rugosidades de: a.) Roscado ($\alpha=60^\circ$), b.) Moleteado, c.) Limado, d.) Roscado ($\alpha=90^\circ$).

Comparando por tipo de rugosidades la probeta de cizalladura para recubrimiento en tres partes (1/3) sin proceso térmico y para el recubrimiento fijado (constante) ilustrándose en las figuras 4.97, 4.98, 4.99 y 4.100 se trazaron las curvas de energía de ruptura en el producto deformación por esfuerzo de cizalladura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) versus impactos

acumulado hasta la ruptura (I_{aR}), dichas curvas se ajustaron a un modelo por regresión lineal; observándose para este recubrimiento a tres partes también las semejanzas directamente proporcionales en cuanto a las variables experimentales graficadas con las aleaciones de WC/Ni y Al_2O_3/TiO_2 . Los ajustes de las curvas en forma lineal muestran el nivel de confianza y dependencia de las variables: rugosidad, proceso térmico, recubrimiento, y en general los coeficientes de regresiones (R^2) son buenos, los mayores se encontraron según el tipo de recubrimiento: a.) 40%WC/60%Ni (figura 4.97.) para el limado y el moleteado. b.) 30%WC/70%Ni (figura 4.98.) para el roscado ($\alpha=90^\circ$) y el limado. c.) 87% $Al_2O_3/13\%TiO_2$ (figura 4.99.) para el moleteado y el roscado ($\alpha=60^\circ$). c.) 97% $Al_2O_3/3\%TiO_2$ (figura 4.100.) para el moleteado y el roscado ($\alpha=60^\circ$).

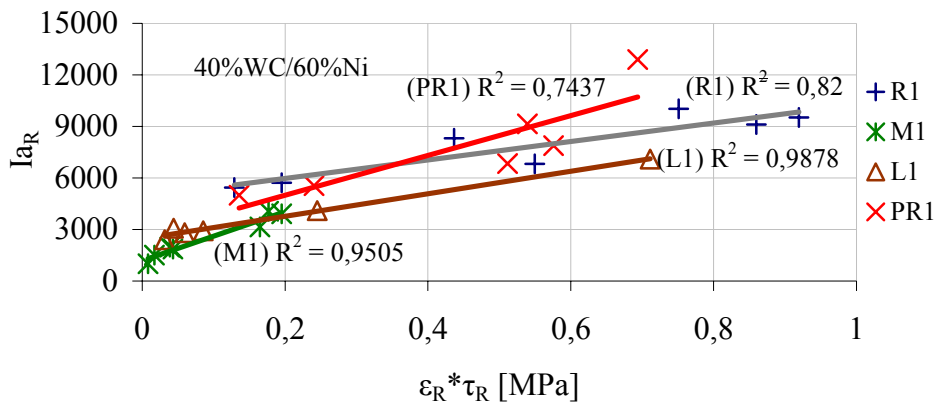


Figura 4.97. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Roscados R1, Moleteados M1, Limados L1 y Roscados PR1 y Recubrimiento Fijado 40%WC/60%Ni.

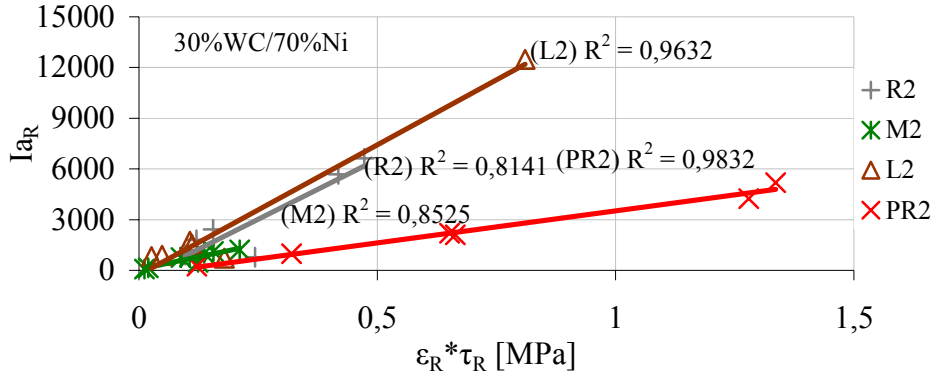


Figura 4.98. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Roscados R2, Moleteados M2, Limados L2 y Roscados PR2 y Recubrimiento Fijado 30%WC/70%Ni.

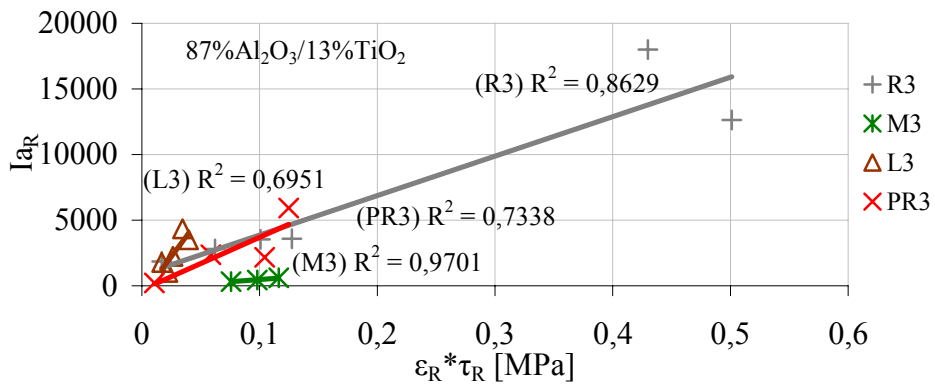


Figura 4.99. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Roscados R1, Moleteados M1, Limados L1 y Roscados PR1 y Recubrimiento Fijado 87%Al₂O₃/13%TiO₂.

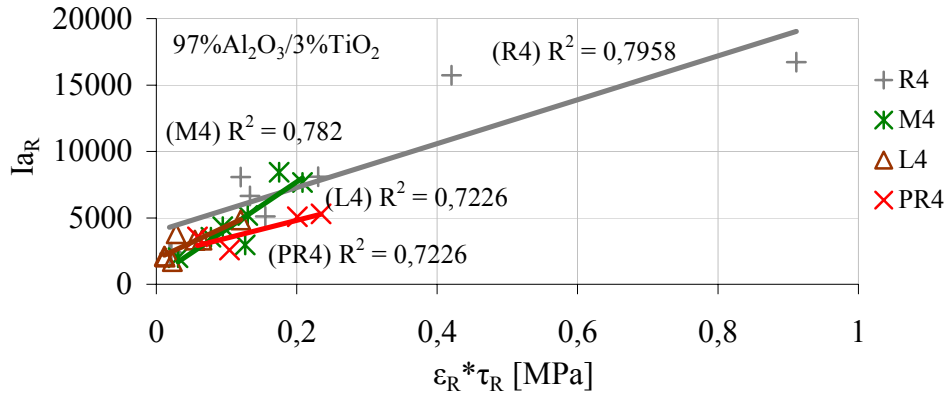


Figura 4.100. Recubrimiento a Tres Partes Sin Proceso Térmico Correlaciones del Modelo de Regresión Lineal para las Variables Rugosidades Roscados R4, Moleteados M4, Limados L4 y Roscados PR4 y Recubrimiento Fijado 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

*Se logró para el recubrimiento en tres partes (1/3) por analogía del recubrimiento total (1) y el recubrimiento en cuatro partes (1/4) una relación directamente proporcional para la energía de deformación de ruptura ($E_R = \epsilon_R * \tau_R$) en función de los impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando las pendientes positivas por la cantidad de energía liberada y señales acústicas generadas fueron según tipo de recubrimiento: a.) 40%WC/60%Ni para el limado y el moleteado. b.) 30%WC/70%Ni para el roscado ($\alpha=90^\circ$) y el limado. c.) 87%Al₂O₃/13%TiO₂ para el moleteado y el roscado ($\alpha=60^\circ$). d.) 97%Al₂O₃/3%TiO₂ para el moleteado y el roscado ($\alpha=60^\circ$).*

4.3. Comportamiento Tribológico.

Las pruebas tribológica se describieron en el Capítulo III, punto 3.3.3.6, ver Apéndice A.4. Pruebas del Ensayo de Desgaste Pin on Disk y las probetas para desgaste descrita en el punto 3.2.3.3. El análisis tribológico del comportamiento en servicio desde la perspectiva de la tendencia a la adhesión, condicionadora del desgaste inestable, se realiza usando indicadores de los ensayos normalizados de fricción de las muestras o probetas de ensayo de dos tipos: a.) Probeta “disco”. Consistieron de chapas de: acero de bajo contenido de carbono de calidad DC01, acero inoxidable AISI 304 y aluminio AA1060. b.) Probeta “pin”, en la que se proyectaron los mismos polvos que la probeta para el ensayo de cizalladura, de las aleaciones en base: 40%WC/60%Ni, 30%WC/70%Ni, 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂. El sustrato (pin) se obtuvo de acero F1140 de diámetro 8 mm quedando éste diámetro en 5,3 mm en punta romana y largo de 25 mm. Los ensayos tribológicos se hicieron en una máquina de fricción pin on disk (tribómetro) empleando como lubricante aceite de corte CUT – MAX 110. Se seleccionó la curva de calibración para 100 R.P.M. Capítulo III, punto 3.3.3.6 para los ensayos tribológico de pin o disk, viscosidad dinámica (η) de 126 C_p (126 mPa s) a 40 °C y se consideraron cinco peso (W) 5, 10, 15, 20 y 30 N y cinco velocidades de rotación (n) 30, 50, 75, 100 y 150 R.P.M., los radios del disco o brazo (R_D) para cada prueba fueron 10, 20 y 30 mm. Los indicadores que pueden obtenerse en esta máquina son: a.) Fuerza normal aplicada igual al peso (N=W); b.) Presión aparente $P_a=N/A_p$ siendo A_p el área o sección de contacto del pin. c.) Presión aparente lineal por unidad de ancho $P_{al}=(N/A_p)*D_p$, siendo D_p el diámetro del pin. d.)

Fuerza tangencial de rozamiento (F). e.) Coeficiente de rozamiento o fricción $\mu = F/N$; f.) Velocidad de deslizamiento $V = 2\pi nR_D$. Derivadas de los citados indicadores se obtienen para normalizar. g.) Variable adimensional de Hersey $H_s = \eta * V / Pa$ siendo η la viscosidad dinámica del lubricante a la temperatura T del ensayo.

Se observó en las curvas coeficiente de rozamiento (μ) versus velocidad de deslizamiento (V), para los recubrimientos proyectados a los pins en base a la aleación: 1.) 40%WC/60%Ni, figuras 4.101, 4.102, 4.104, 4.105, 4.106, 4.108, 4.109 y 4.110, 2.) 30%WC/70%Ni, figuras 4.112, 4.113, 4.114, 4.116, 4.117 y 4.118, 3.) 87%Al₂O₃/13%TiO₂, figuras 4.120, 4.121, 4.122, 4.124, 4.125 y 4.126, Apéndice A.4, entre ellas las obtenidas para radio de disco, $R_D = 10, 20$ y 30 mm, deslizando los pins recubiertos sobre los discos de acero DC01, acero inoxidable AISI 304 y aluminio AA1060, en general, que: a.) Para la misma velocidad de deslizamiento (V) que al ir aumentando la carga aplicada (peso W) se incrementaba el coeficiente de rozamiento (μ). b.) Para una misma carga aplicada (W) el coeficiente de rozamiento (μ) disminuirá al ir aumentándose la velocidad de deslizamiento (V).

Se obtuvo el mayor coeficiente de rozamiento en el par rozantes (pin sobre disco) para la velocidad de deslizamiento (V) menor y la carga aplicada (W) mayor. Resultando el mayor coeficiente de rozamiento (μ) dependiente de los materiales del par rozantes.

El régimen de lubricación mixta promedia la parte de superficie que se encuentra en régimen hidrodinámico con aquella que se encuentra en régimen de capa límite, de contacto entre las superficies. La influencia sobre el coeficiente de rozamiento (μ) está forzada por la superficie que se halla en régimen de capa límite, afectada por los fenómenos interferenciales, o desgaste abrasivo, Capítulo I, punto 1.1.1. a, Coulomb, y/o Adhesivos, Capítulo I, punto 1.1.1.2 y punto 1.4.2.5.

Se analizó como indicador de la variable adimensional de Hersey (H_s), en las graficas el coeficiente de rozamiento (μ) versus la presión aparente (Pa^n) por la velocidad de deslizamiento (V^m), se ilustran en las figuras 4.103, 4.107, 4.111, 4.115, 4.119, 4.123, 4.127, 4.128, 4.129, 4.130, 4.131 y 4.132 para los discos de acero de bajo contenido de carbono DC01, acero inoxidable AISI 304 y aluminio AA1060 con $R_D = 10, 20$ y 30 mm y los recubrimientos proyectados a los pins de WC/Ni y Al_2O_3/TiO_2 en dos composiciones, y con lubricante abundante en el recipiente del equipo 90 ml de aceite de corte CUT – MAX 110. Observa la influencia de la variable modificada de Hersey “ H_s ” correlacionada en lubricación mixta y se tabularon, Tabla 4.37 mediante indicadores de la función de correlación $\mu = f(V, Pa)$ y de los extremos de la lubricación mixta, la limite (μ_0) y la hidrodinámica (V_h). Se evidencia un nivel de correlación medio, R^2 ; lo que justifica una cierta influencia de la presión aparente (Pa) y la velocidad (V) a través del parámetro de Hersey modificado (H_s), para el lubricante ensayado. También las correlaciones entre el coeficiente de rozamiento y la presión aplicada (Pa) y la velocidad de deslizamiento (V) para el régimen de lubricación mixta, tal como analíticamente se ha justificado en las Tabla

4.37, pero en sentido diferenciado a lo que sucede para el régimen hidrodinámico.

En efecto la velocidad de deslizamiento (V) influye en sentido de disminuir el coeficiente de rozamiento (μ) por cuanto esta variable es potenciadora de evolucionar desde el régimen límite al hidrodinámico por la acumulación de la capa de lubricante entre los pares rozantes, Capítulo III, punto 3.3.3.6. Por contra la presión (P_a) aumenta el rozamiento por cuanto esta variable es potenciadora de evolucionar desde el régimen hidrodinámico al límite por la tendencia a disminuirle espesor de la capa de lubricante entre los pares rozantes. También la viscosidad dinámica del lubricante (η), y los aditivos de extrema presión, actúan en el sentido de disminuir el coeficiente de rozamiento (μ) en este régimen mixto por su tendencia a evitar las microsoldaduras superficiales por cohesión en los pares rozantes; si bien en nuestro estudio esta permanecerá constante. De forma general la mayor tendencia a la cohesión entre dos pares rozantes puede ser identificado a través de los parámetros de la función potencial $\mu = C_i * x^{-n}$ siendo $x = V^m * P_a^{-n}$ en el sentido que un comportamiento mas cohesivo implica: a.) Mayores coeficientes de rozamiento en el entorno de la lubricación límite. b.) Mayores velocidades de deslizamiento y menores presiones interfaciales para alcanzar el régimen hidrodinámico.

Se ha investigado el modelo genérico para la lubricación mixta por medio de la aplicación del tribómetro pin on disk actuando con diversos niveles de las variables presión aparente (P_a) y velocidades y un lubricante abundante (90 ml de aceite de corte CUT – MAX 110), que

caracterizaron la variable adimensional de Hersey (H_s) en la lubricación hidrodinámica.

El modelo en la lubricación mixta esta formado por una función exponencial ($\mu = C_i * e^{-px}$) o potencial ($\mu = C_i * x^{-p}$) que evolucionan desde el coeficiente de rozamiento en la lubricación límite " μ_{10} " hasta la lubricación hidrodinámica con la variable $x = V^m * Pa^{-n}$. Se han definido los indicadores: coeficiente "p" y "Ci" de la función elegida (potencial o exponencial), coeficiente de rozamiento límite " μ_{10} " y velocidad a la que se alcanzan el coeficiente de rozamiento de iniciación de la lubricación hidrodinámica " μ_h " para cuantificar la tendencia a la cohesión del par frotante.

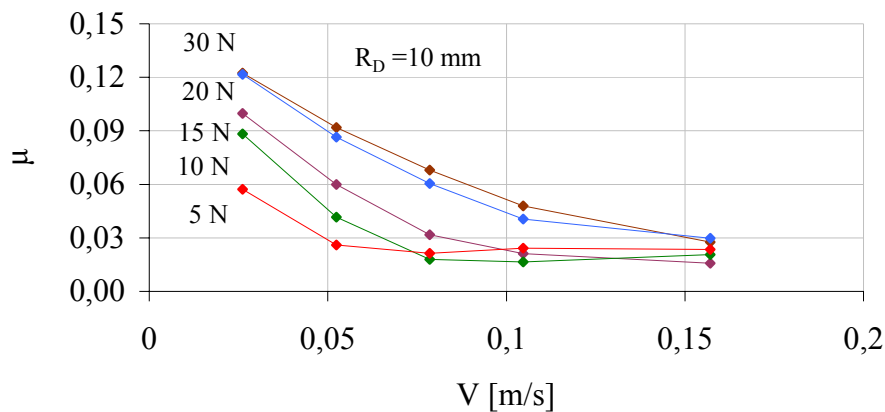


Figura 4.101. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Acero DC01, Radio del Disco o Brazo ($R_D = 10$ mm).

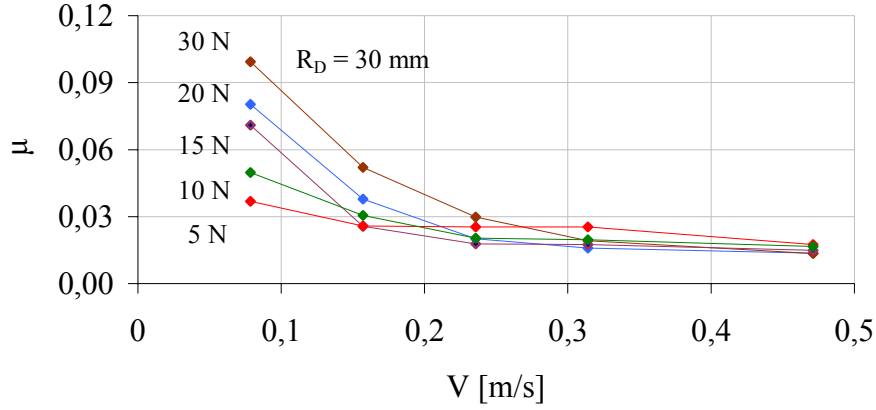


Figura 4.102. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Acero DC01, Radio del Disco ($R_D = 30$ mm).

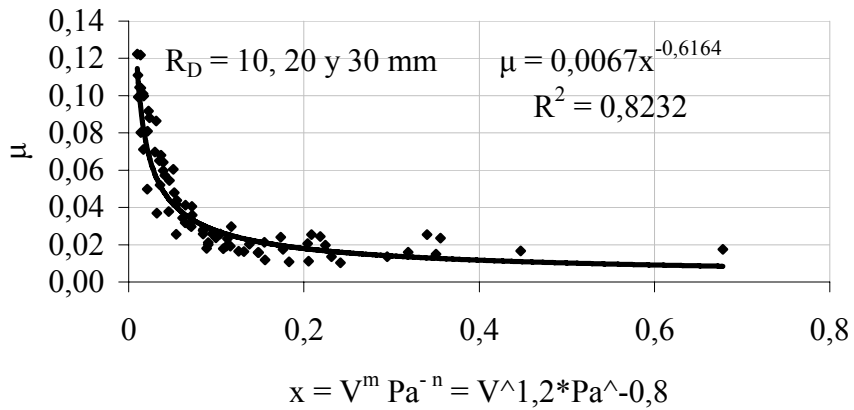


Figura 4.103. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-0,8}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,2}$), para el Recubrimiento 40%WC/60%Ni y Acero DC01, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

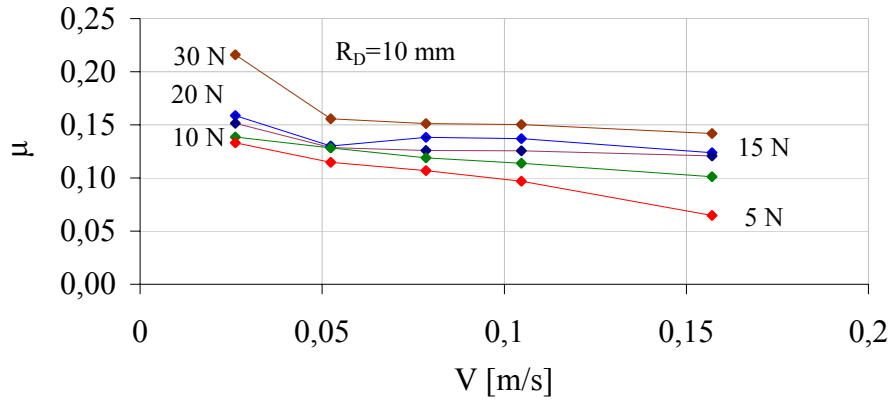


Figura 4.104. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Acero Inoxidable, Radio del Disco ($R_D = 10 \text{ mm}$).

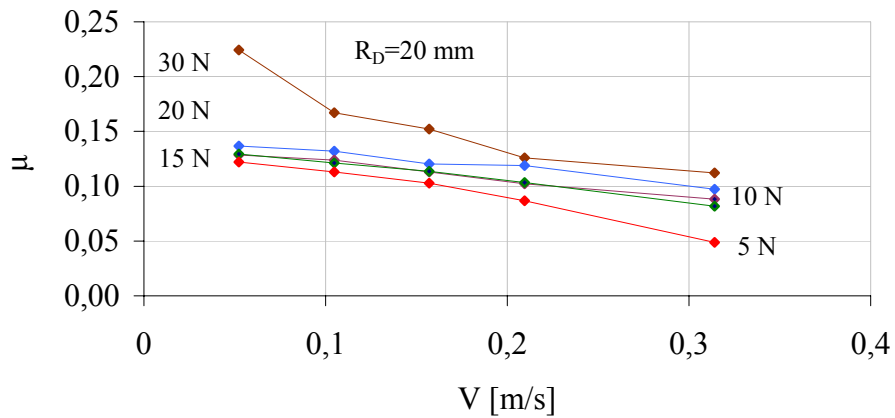


Figura 4.105. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Acero Inoxidable, Radio del Disco ($R_D = 20 \text{ mm}$).

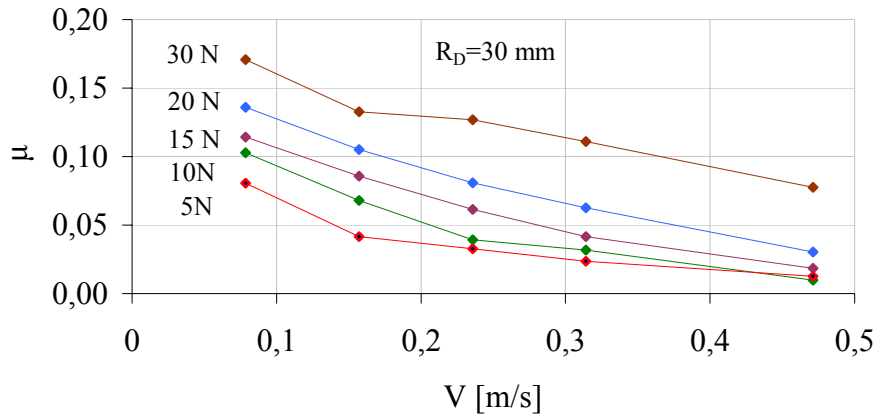


Figura 4.106. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Acero Inoxidable, Radio del Disco o Brazo ($R_D = 30$ mm).

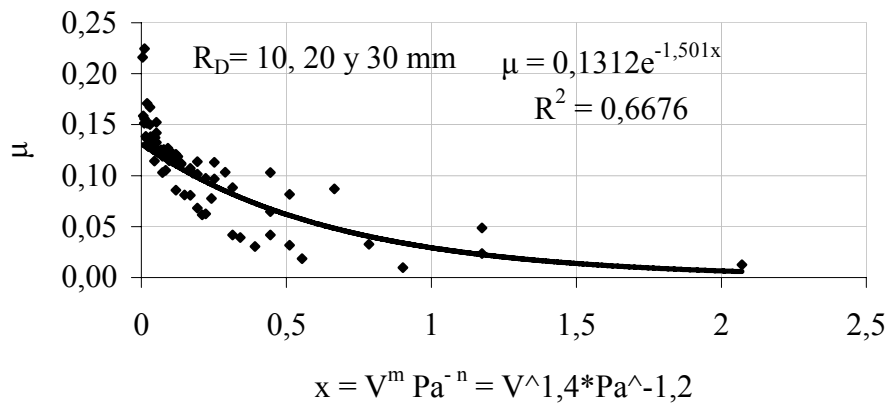


Figura 4.107. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($Pa^{-1,2}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,4}$), para el Recubrimiento 40%WC/60%Ni y Acero Inoxidable, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

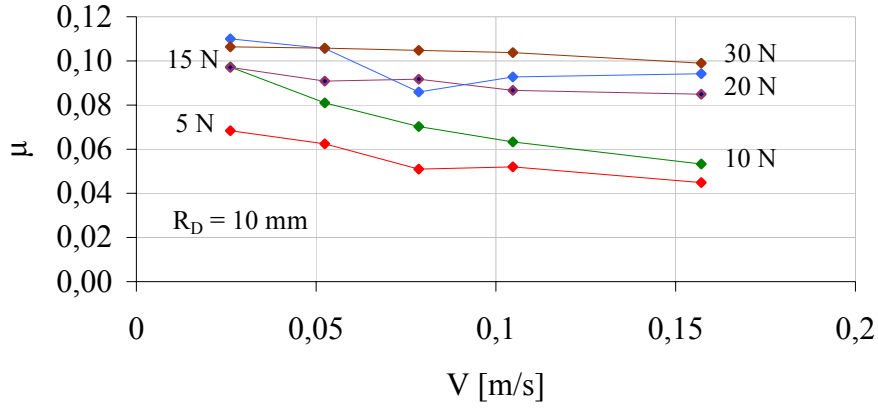


Figura 4.108. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Aluminio AA1060, Radio del Disco ($R_D = 10$ mm).

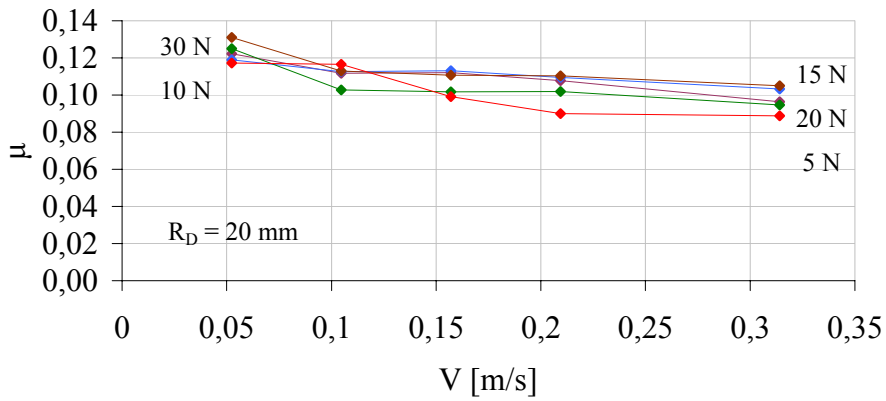


Figura 4.109. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Aluminio AA1060, Radio del Disco ($R_D = 20$ mm).

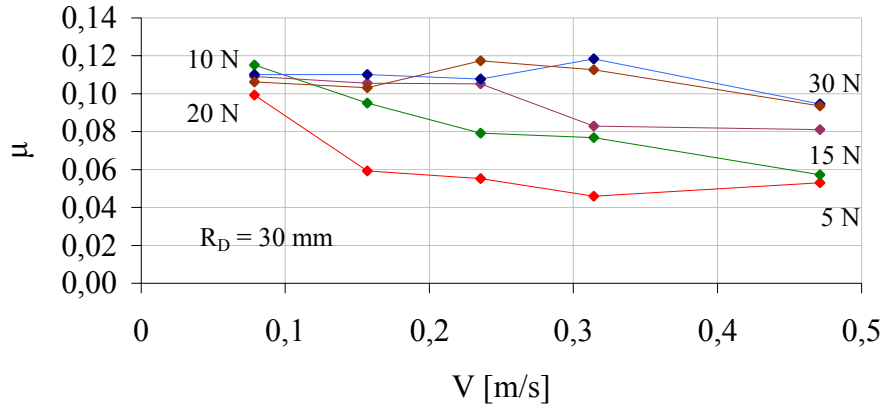


Figura 4.110. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 40%WC/60%Ni y Aluminio AA1060, Radio del Disco ($R_D = 30$ mm).

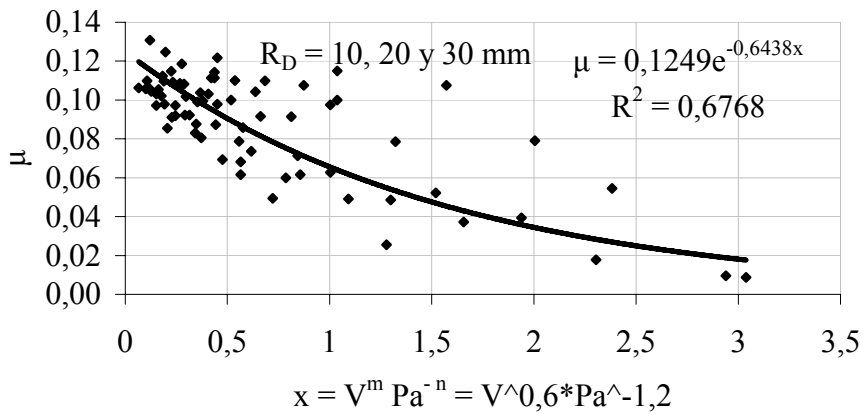


Figura 4.111. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-1,2}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{0,6}$), para el Recubrimiento 40%WC/60%Ni y Aluminio AA1060, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

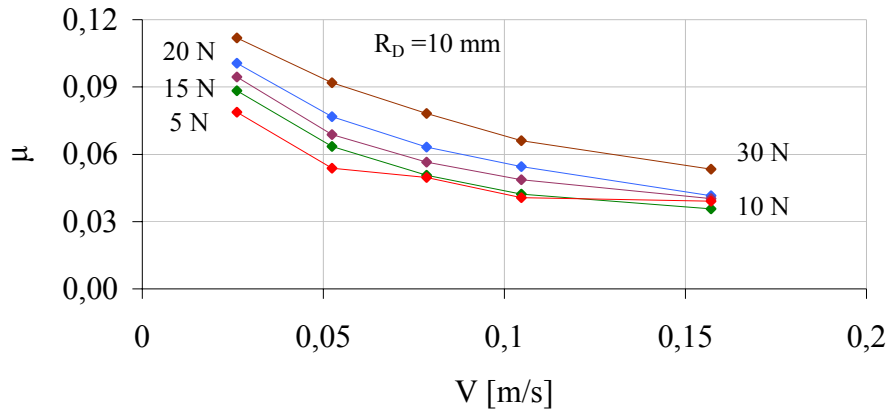


Figura 4.112. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Acero DC01, Radio del Disco ($R_D = 10$ mm).

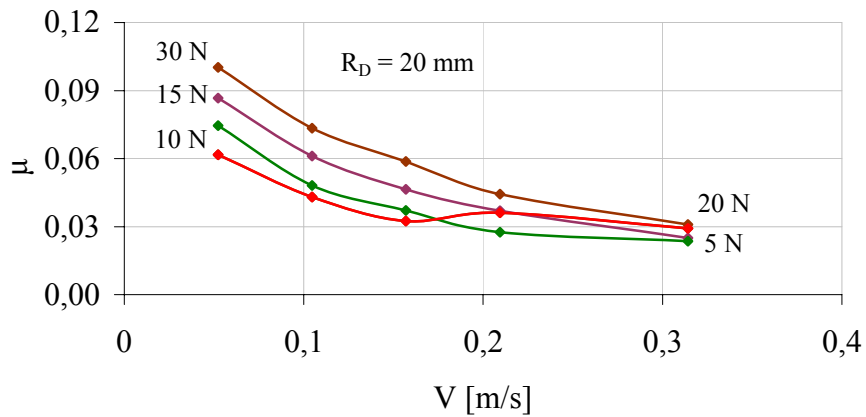


Figura 4.113. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Acero DC01, Radio del Disco ($R_D = 20$ mm).

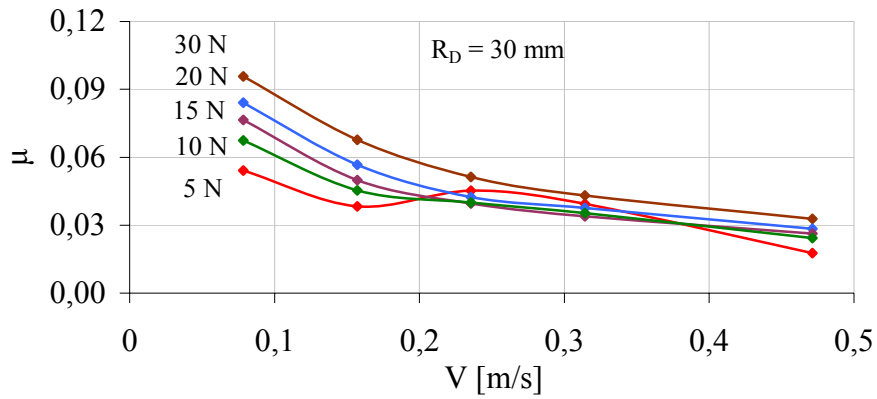


Figura 4.114. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Acero DC01, Radio del Disco ($R_D = 30$ mm).

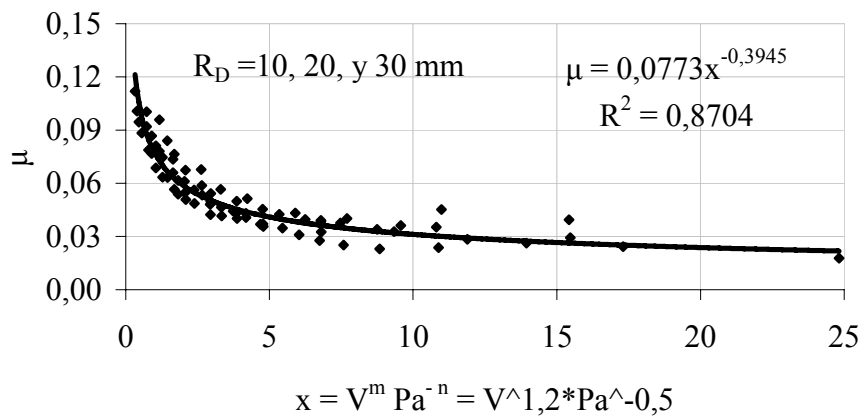


Figura 4.115. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($Pa^{-0,5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,2}$), para el Recubrimiento 30%WC/70%Ni y Acero DC01, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

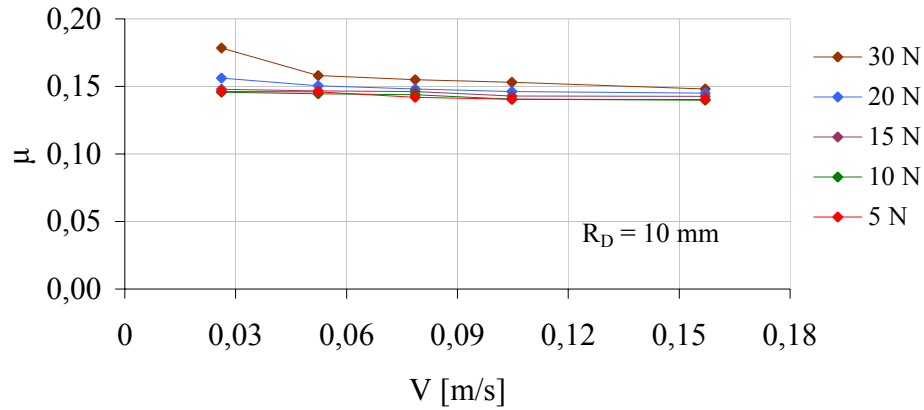


Figura 4.116. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Acero Inoxidable, Radio del Disco ($R_D = 10$ mm).

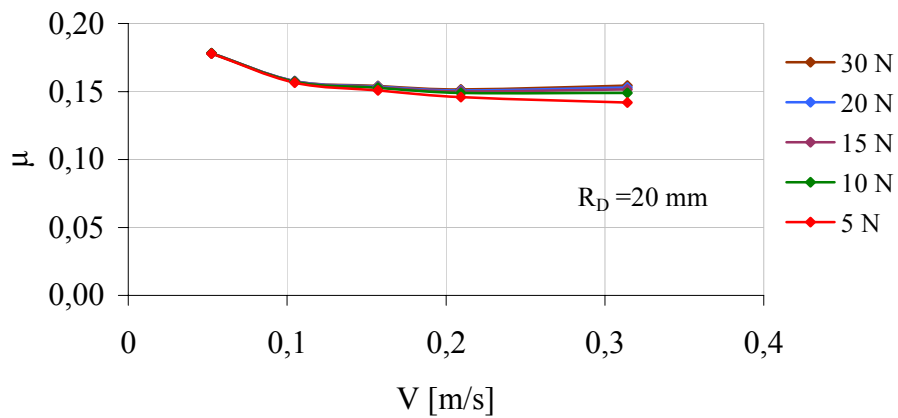


Figura 4.117. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Acero Inoxidable, Radio del Disco ($R_D = 20$ mm).

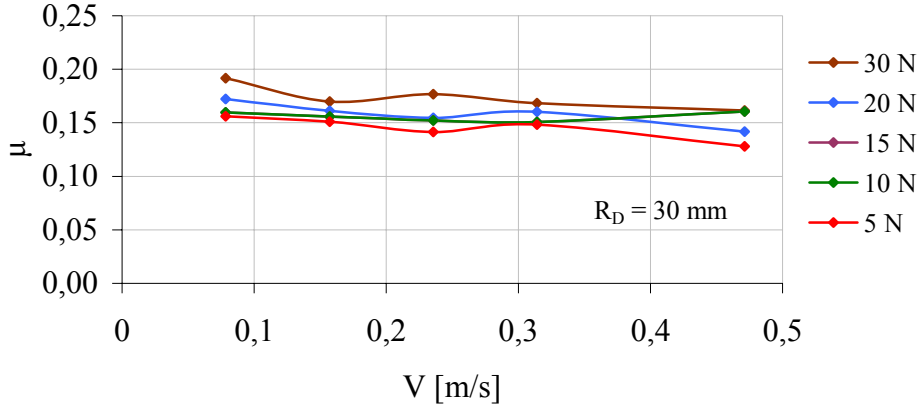


Figura 4.118. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Acero Inoxidable, Radio del Disco ($R_D = 30$ mm).

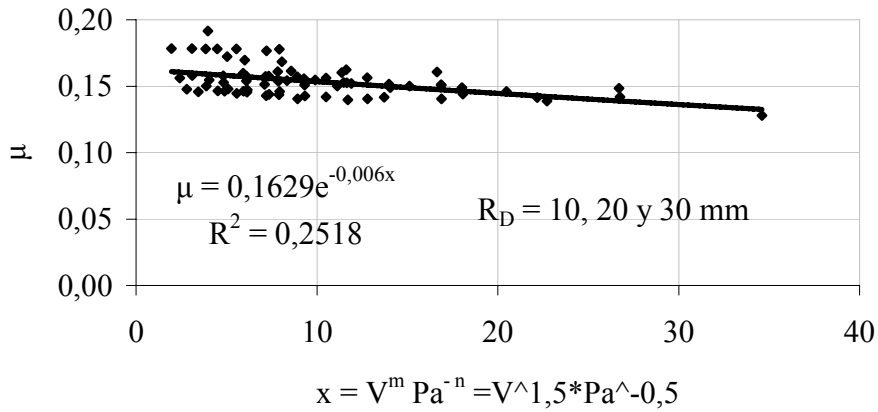


Figura 4.119. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-0,5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,5}$), para el Recubrimiento 30%WC/70%Ni y Acero Inoxidable, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

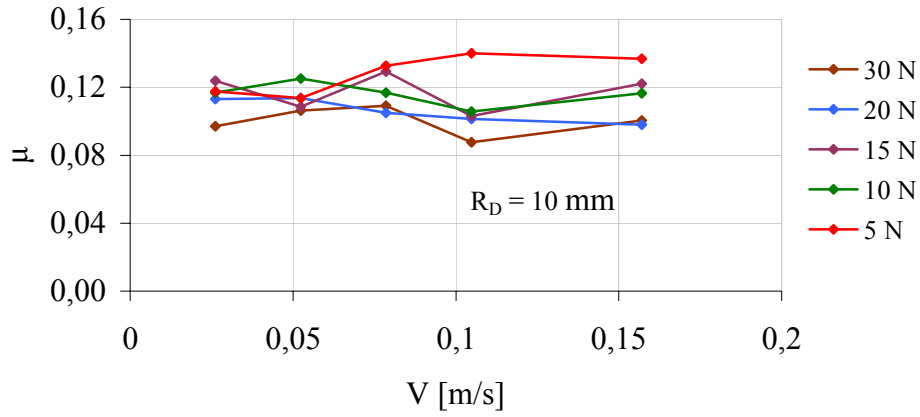


Figura 4.120. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Aluminio AA1060, Radio del Disco ($R_D = 10 \text{ mm}$).

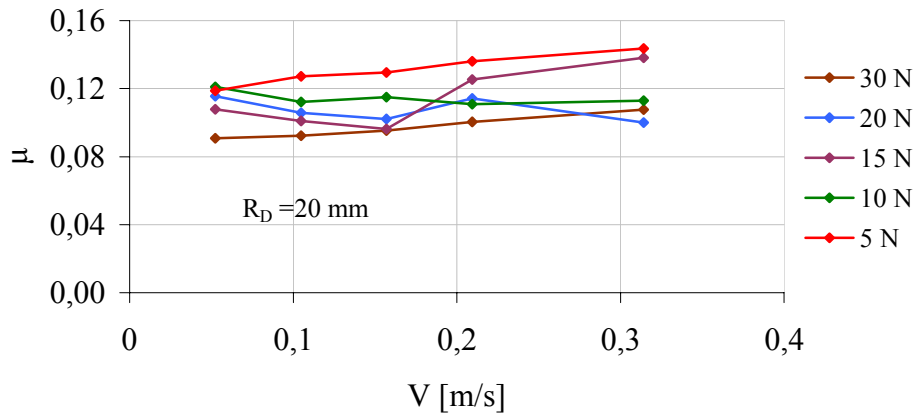


Figura 4.121. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Aluminio AA1060, Radio del Disco ($R_D = 20 \text{ mm}$).

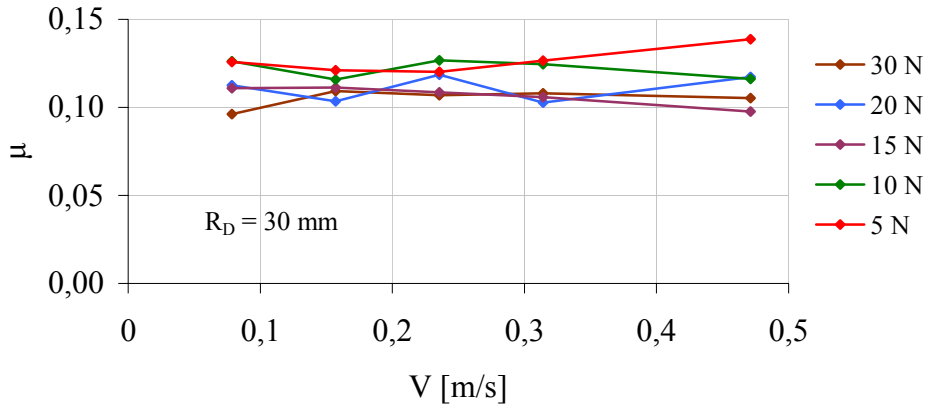


Figura 4.122. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 30%WC/70%Ni y Aluminio AA1060, Radio del Disco ($R_D = 30$ mm).

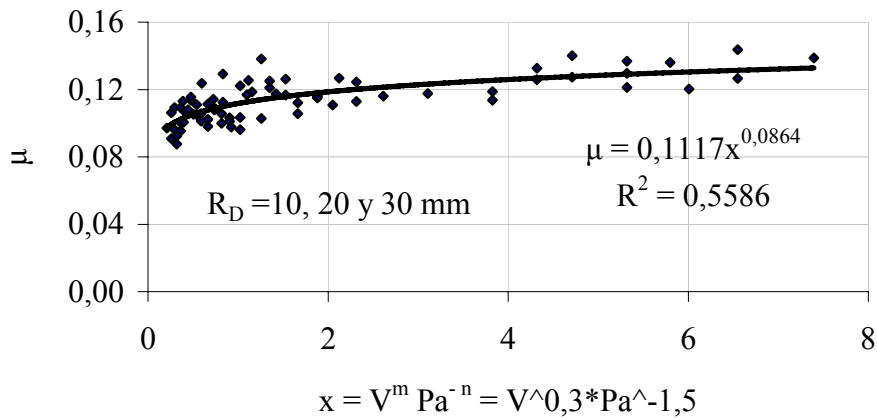


Figura 4.123. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-1.5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{0.3}$), para el Recubrimiento 30%WC/70%Ni y Aluminio AA1060, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

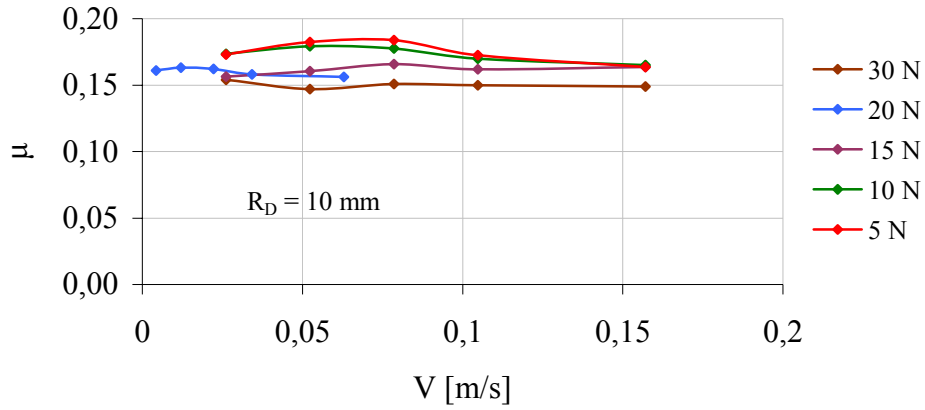


Figura 4.124. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$ y Acero DC01, Radio del Disco ($R_D = 10$ mm).

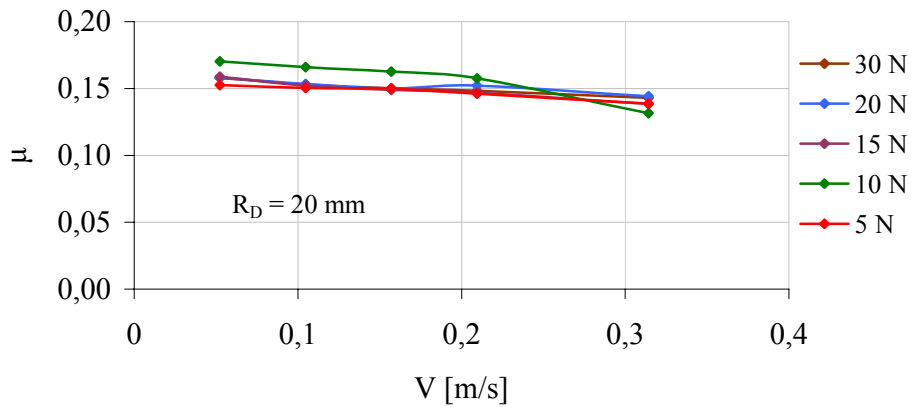


Figura 4.125. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$ y Acero DC01, Radio del Disco ($R_D = 20$ mm).

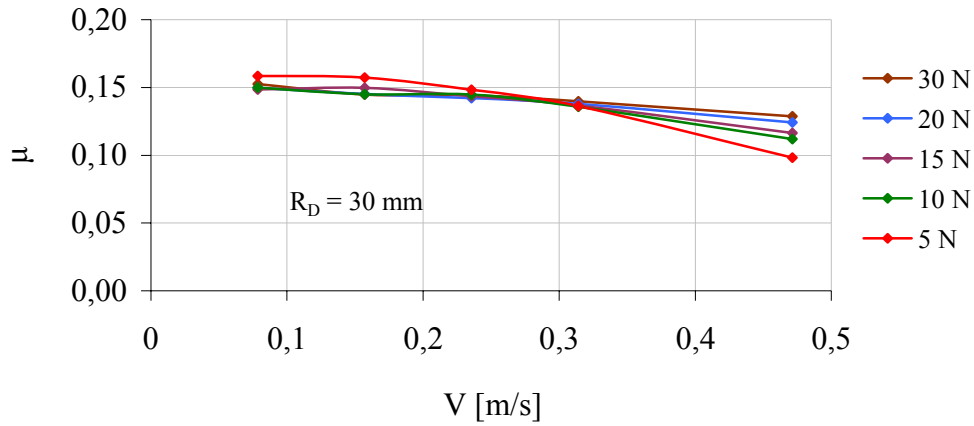


Figura 4.126. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Velocidad para el Recubrimiento (V) 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y Acero DC01, Radio del Disco ($R_D = 20$ mm).

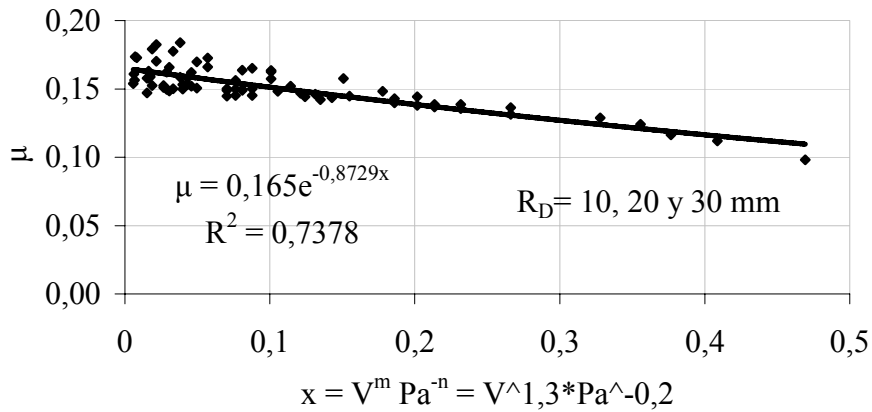


Figura 4.127. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-0,2}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,3}$), para el Recubrimiento 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y Acero DC01, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

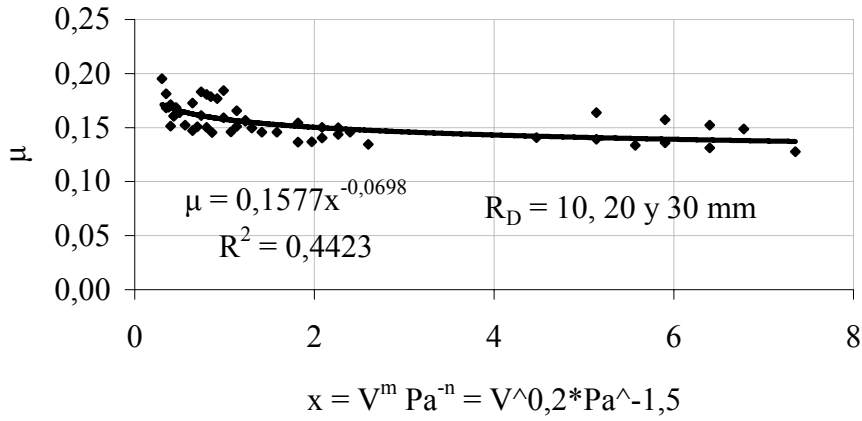


Figura 4.128. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-1,5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{0,2}$), para el Recubrimiento 87% Al_2O_3 /13% TiO_2 y Acero Inoxidable, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20 \text{ y } 30 \text{ mm}$).

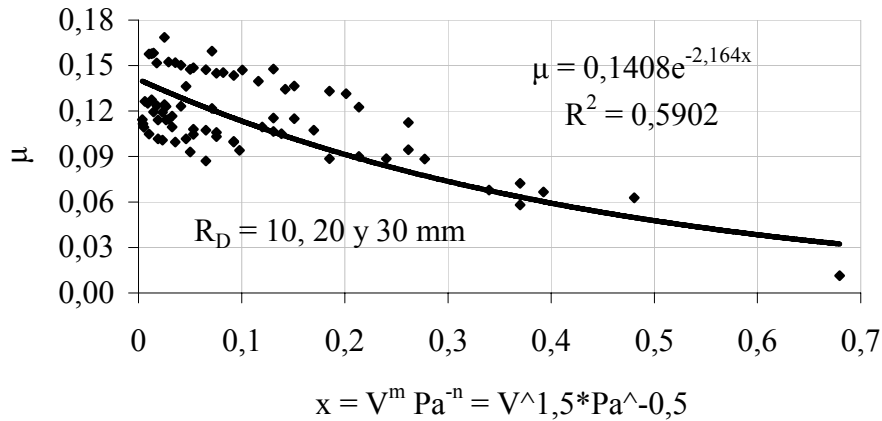


Figura 4.129. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-0,5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,5}$), para el Recubrimiento 87% Al_2O_3 /13% TiO_2 y Aluminio AA1060, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20 \text{ y } 30 \text{ mm}$).

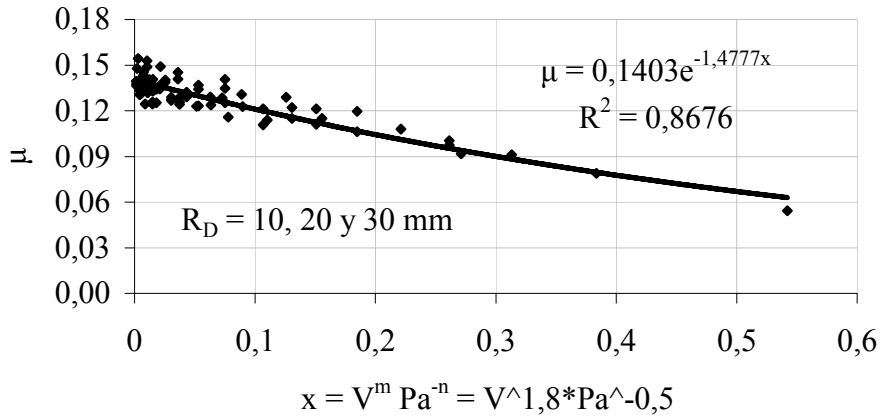


Figura 4.130. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-0,5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,8}$), para el Recubrimiento $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y Acero DC01, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

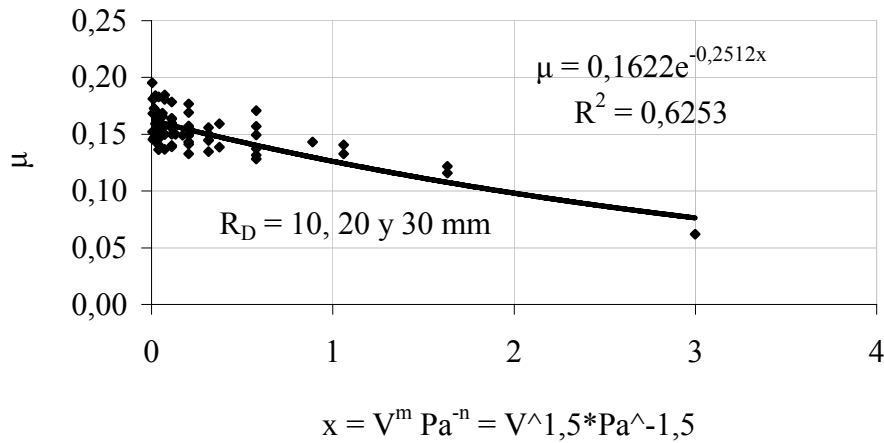


Figura 4.131. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($\text{Pa}^{-1,5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{0,2}$), para el Recubrimiento $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ y Acero Inoxidable, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

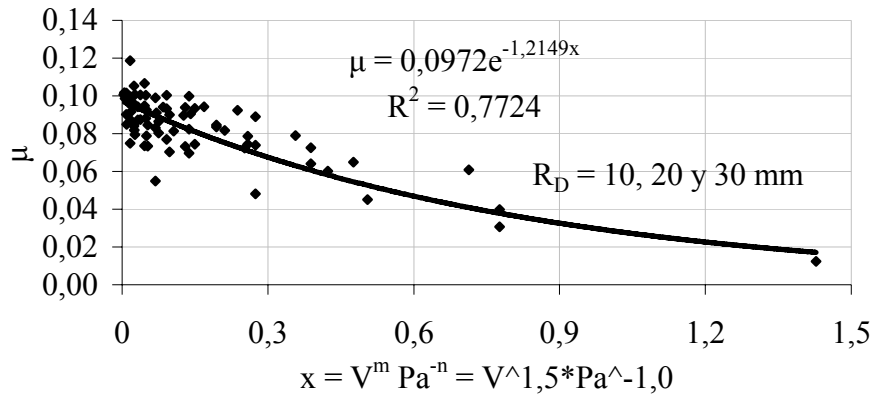


Figura 4.132. Correlación Coeficiente de Rozamiento (μ) versus Presión ($Pa^{-0,5}$) por Velocidad de Deslizamiento ($V^{1,5}$), para el Recubrimiento 97% Al_2O_3 /3% TiO_2 y Aluminio AA1060, Radios del Disco o Brazo ($R_D = 10, 20$ y 30 mm).

a.) Indicadores de la Adhesión del Rozamiento entre Recubrimiento y Chapa de Embutición.

El modelo de la Tabla 4.37 se complementa con las Tablas 4.38 y 4.39, donde a través de las macroscopía óptica a 10x, se examinaron las huellas producidas en el ensayo pin on disk por el par rozantes en contacto, pins recubiertos y discos; se observó la huella o relieve dejado por el par rozantes al concluir el ensayo obteniéndose que en: a.) Las aleaciones en base de WC/Ni la menor tendencia a la adhesión, desgaste abrasivo por rayado, la tiene el disco de material de acero de bajo contenido de carbono DC01. b.) Las aleaciones en base Al_2O_3/TiO_2 la menor tendencia a la adhesión la tiene el disco de material de acero de bajo contenido de carbono

DC01. c.) Las aleaciones de WC/Ni y $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ la mayor tendencia adhesiva la tiene el disco de material de acero inoxidable AISI 304.

El macado de la huella mostró comparativamente cual recubrimiento tuvo menor adhesión cuando el par rozantes actúa dejando menor rugosidad en la superficie del material del disco después de concluido el ensayo, los recubrimientos que dejaron menores relieve debido al desgaste abrasivo por rayado tuvieron características no afines con los materiales de los discos en este caso se aprecia en las Tablas 4.38 y 4.39. Además considerando el modelo Tabla 4.37, para cada tipo de aleación las composiciones depositadas sobre el pin que tuvieron menor adhesión fueron las 30%WC/70%Ni y 97% Al_2O_3 /3% TiO_2 .

Observó menor relieve o huella para cualquier par rozantes pin sobre disco de acero de bajo contenido de carbono DC01 en contacto y, por lo tanto menor adhesión en las aleaciones que no son afines. Se obtuvo que los pins recubiertos con las aleaciones 30%WC/70%Ni y 97% Al_2O_3 /3% TiO_2 tuvieron menor adhesión; en cuanto el disco con mayor adhesión fue de acero inoxidable AISI 304 por tener afinidad con las aleaciones de los pins.

Tabla 4.37. Modelo en Función Potencial o Exponencial, Indicadores Coeficiente de Rozamiento Límite (μ_0) y Coeficiente de Correlación para cada Recubrimiento, Apéndice A.4.

Clase			Coeficiente de la Función Elegida		Indicadores	
Pin	Disco	Función	p	C _i	R ² [%]	μ_0
40%WC/60%Ni	Acero DC01	Potencial	-0,6164	0,0067	82,32	0,12
	Acero Inoxidable AISI 304	Exponencial	-1,5010	0,1312	66,76	0,22
	Aluminio AA1060	Exponencial	-0,6438	0,1249	67,68	0,12
30%WC/70%Ni	Acero DC01	Potencial	-0,3945	0,0773	87,04	0,11
	Acero Inoxidable AISI 304	Exponencial	-0,0060	0,1629	25,18	0,18
	Aluminio AA1060	Potencial	0,0864	0,1117	55,86	0,12
87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂	Acero DC01	Exponencial	-0,8729	0,1650	73,78	0,15
	Acero Inoxidable AISI 304	Potencial	-0,0698	0,1577	44,23	0,20
	Aluminio AA1060	Exponencial	-2,1640	0,1408	59,02	0,12
97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂	Acero DC01	Exponencial	-1,4777	0,1403	86,76	0,15
	Acero Inoxidable AISI 304	Exponencial	-0,2512	0,1622	62,53	0,20
	Aluminio AA1060	Exponencial	-1,2149	0,0972	77,24	0,11

Tabla 4.38. Huellas dejada por los Pins Recubiertos de WC/Ni sobre los Discos. Macroscopía Óptica 10x.


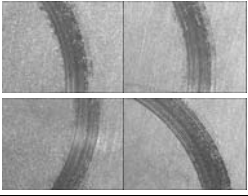
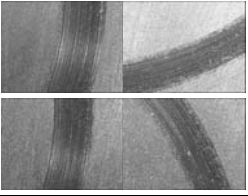
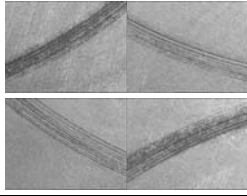
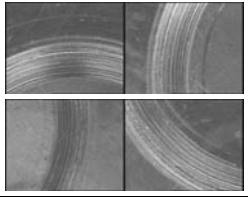
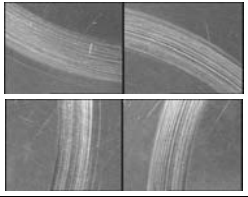
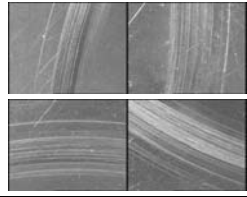
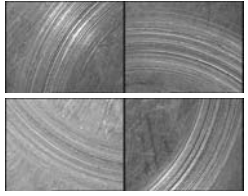
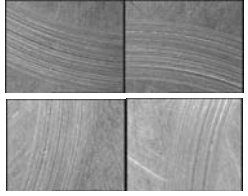
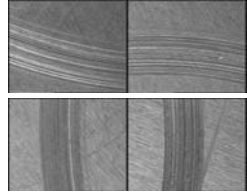
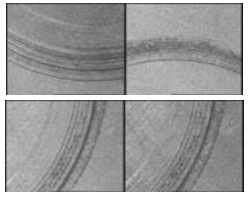
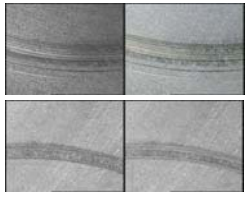
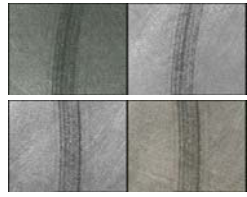
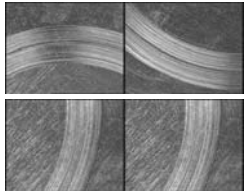
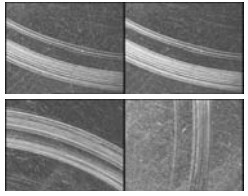
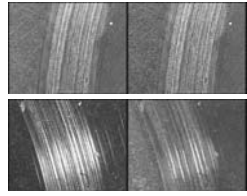
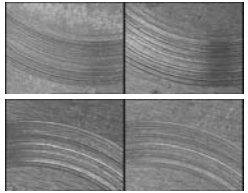
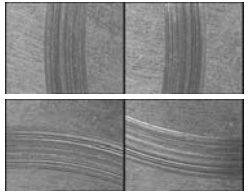
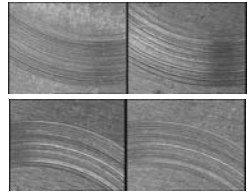

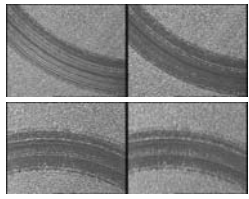
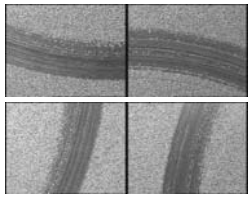
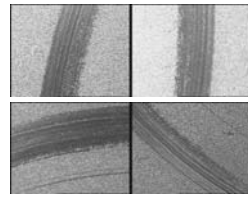
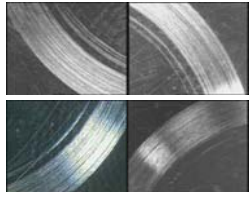
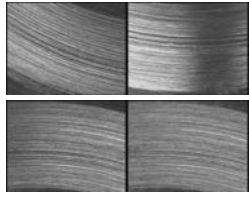
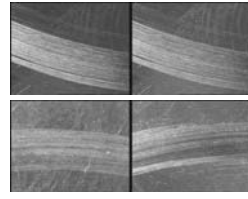
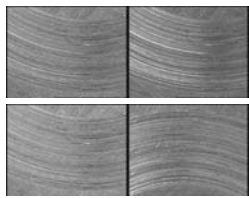
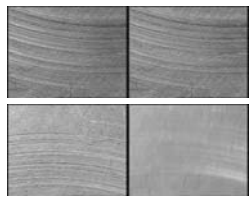
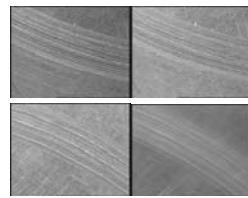
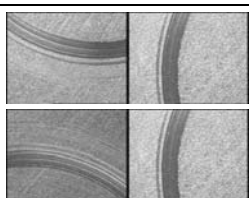
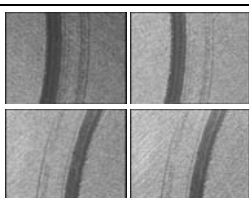
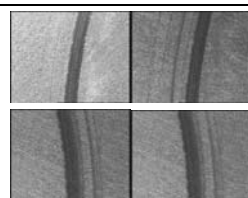
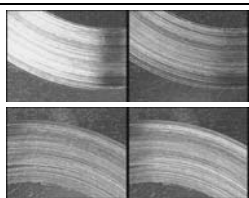
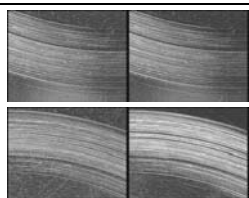
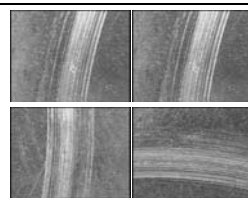
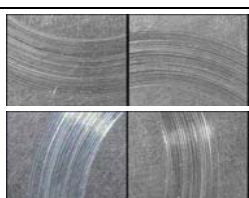
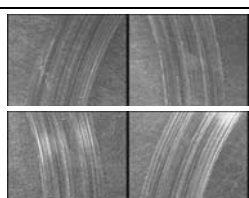
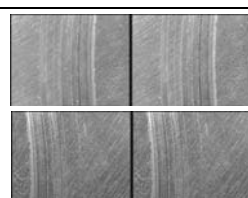
Pin	Radio del Disco o Brazo (R_D [mm]) y Escala 10x 			Disco
	10	20	30	
40%WC/%60Ni				Acero DC01
40%WC/%60Ni				Acero Inoxidable AISI 304
40%WC/%60Ni				Aluminio AA1060
30%WC/%70Ni				Acero DC01
30%WC/%70Ni				Acero Inoxidable AISI 304
30%WC/%70Ni				Aluminio AA1060

Tabla 4.39. Huellas de los Pins Recubiertos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ sobre los Discos. Macroscopía Óptica 10x.

Pin	Radio del Disco o Brazo (R_D [mm]) y Escala 10x 			Disco
	10	20	30	
87% Al_2O_3 / 13% TiO_2				Acero DC01
87% Al_2O_3 / 13% TiO_2				Acero Inoxidable AISI 304
87% Al_2O_3 / 13% TiO_2				Aluminio AA1060
97% Al_2O_3 / 3% TiO_2				Acero DC01
97% Al_2O_3 / 3% TiO_2				Acero Inoxidable AISI 304
97% Al_2O_3 / 3% TiO_2				Aluminio AA1060

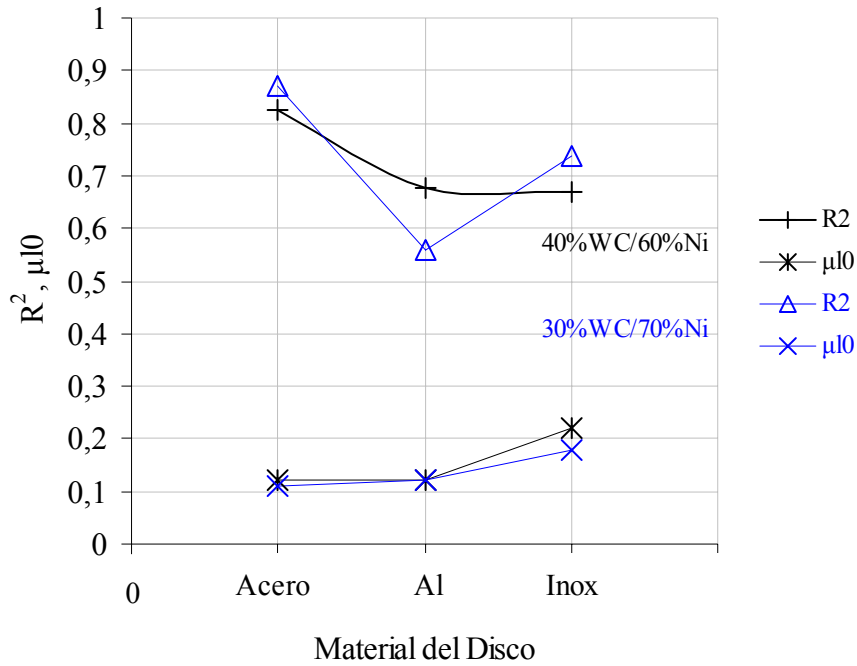


Figura 4.133. Indicadores R^2 , μ_{l0} versus Material del Disco (Acero=Acero de bajo Contenido de Carbono DC01, Al=Aluminio AA1060 y Inox=Acero Inoxidable 304) para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni.

En las figuras 4.133 y 4.134 se ilustran las curvas para los indicadores de adhesión el coeficiente de rozamiento límite (μ_{l0}) y el coeficiente de correlación (R^2) versus material de disco, acero de bajo contenido de carbono DC01, aluminio AA1060 y acero inoxidable AISI 304, para las aleaciones de los pins 40%WC/60%Ni, 30%WC/70%Ni, 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂. En la figura 4.133 se observaron que para las aleaciones las 40%WC/60%Ni, 30%WC/70%Ni los efectos de adhesión para los materiales de los discos va en el siguiente orden el material de acero con menor adhesión que el material de aluminio y el

material de aluminio menor adhesión que el material de acero inoxidable, expresándose en forma de desigualdad considerando los materiales de los discos como: Acero < Al < Inox. En la figura 4.134 se observaron que para las aleaciones $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$ y $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$ los efectos de adhesión para los materiales de los discos va en el siguiente orden el material de aluminio con menor adhesión que el material de acero y el material de acero menor adhesión que el material de acero inoxidable, expresándose en forma de desigualdad considerando los materiales de los discos como: Acero < Al < Inox.

Resultando del ensayo pin on disk, que el disco de acero inoxidable AISI 304 tuvo mayor tendencia de adhesión y fue independiente de, las cuatros aleaciones proyectadas sobre el pin y que completaron conjuntamente con el disco el par rozantes, las aleaciones fueron: $40\%WC/60\%Ni$, $30\%WC/70\%Ni$, $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$ y $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$.

Se obtuvo entre los efectos de adhesión o, fenómeno de desgaste del par rozantes que: 1.)Tuvieron un comportamiento semejante en el efecto de adhesión cuando el material del disco es de acero inoxidable AISI 304 y fue independencia de las cuatro aleaciones depositada sobre el pin $40\%WC/60\%Ni$, $30\%WC/70\%Ni$, $87\%Al_2O_3/13\%TiO_2$ y $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$. 2.) La afinidad entre los materiales del par rozantes determinaron la tendencia adhesiva para: a.) Las aleaciones $40\%WC/60\%Ni$ y $30\%WC/70\%Ni$ el material del disco menos adhesivo fue el acero de bajo contenido de carbono DC01. b.) Las aleaciones

87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂ el material del disco menos adhesivo fue el acero de bajo contenido de carbono DC01.

Los indicadores de la adhesión del rozamiento fueron el coeficiente de rozamiento límite “ μ_{l0} ” y el coeficiente de correlación “ R^2 ” señalaron que las aleaciones en base WC/Ni en su dos composiciones 40/60 y 30/70 en tanto por ciento en peso tuvieron menor efecto de adhesión que las aleaciones en base Al₂O₃/TiO₂ en su dos composiciones 87/13 y 97/3 en tanto por ciento en peso.

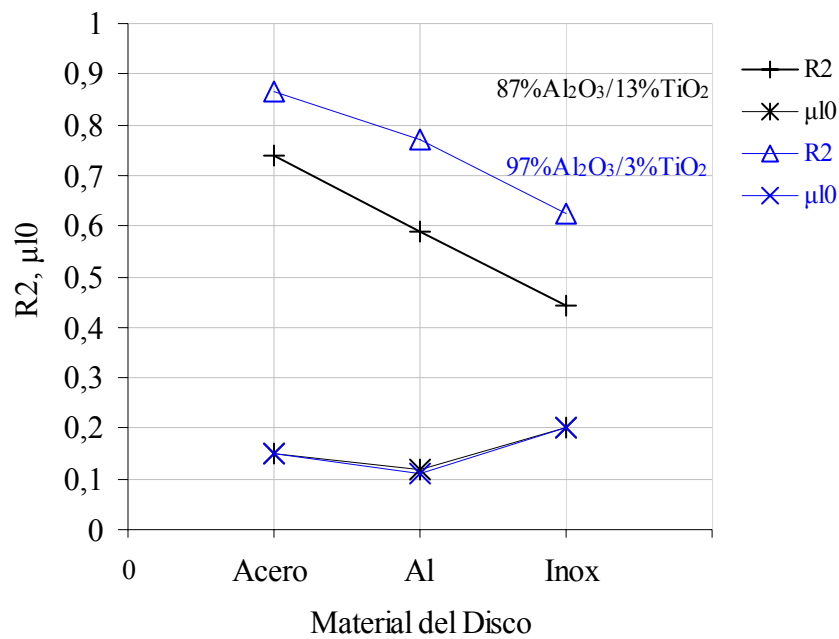


Figura 4.134. Indicadores R^2 , μ_{l0} versus Material del Disco (Acero=Acero de bajo Contenido de Carbono DC01, Al=Aluminio AA1060 y Inox=Acero Inoxidable 304) para las aleaciones 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

4.4. Fractografía y Adhesión del Recubrimiento – Sustrato

Por medio de la microscopía electrónica de barrido (SEM) referida en el Capítulo III, punto 3.1.1 y punto 3.3.1.2, Apéndice A.4, empleando el microscopio electrónico con incorporación de espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS) y usando el software el INCA Microanalysis Suite para observar la imagen del microscopio y procesar los datos adquirido del microanálisis EDS. Las condiciones de adquisición de los datos fueron: a.) Voltaje de aceleración de electrones de 20 kV. b.) Distancia de trabajo en el intervalo de 13 mm a 20 mm. Se estudiaron áreas muy pequeñas en las probetas recubiertas con proyección térmica por llama de las aleaciones de WC/Ni y Al₂O₃/TiO₂ en dos proporciones, además se realizaron microanálisis de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) con los detectores de imágenes de electrones secundarios y a los aumentos de: 20x, 50x, 400x, 2000x, para imágenes y realización de espectros puntuales a muestras extraídas de la probeta de cizalladura y sin atacar con reactivo, se puntualizó el proceso de fractura y los mecanismos de difusión presentes.

a.) Proceso de Fractura.

El proceso de fractura se observó en las imágenes de las figuras 4.135 a la 4.150, encontrándose: 1.) Líneas de deslizamientos en la dirección axial de aplicación de la carga, es decir en el área perimetral de anclaje donde actúa la intensidad de carga obligada por la pieza hueca,

matriz, útil que sirve para direccional tangencialmente el cizallamiento forzado del recubrimiento. 2.) Material adherido al sustrato después de realizarse el ensayo de cizallamiento del recubrimiento en la probeta proyectada. 3.) Planos provocados de deslizamientos escalonados producidos por la propagación de grietas que cruzan bordes alabeados con diferentes pendientes e inclinaciones, quedando dibujada la forma escalonada de clivaje por el resto del material depositado que ha quedado adherido en forma de aglomerado de partículas irregulares aplastadas, cuyas paredes verticales se distinguen de las facetas principales por las diferencias de coloraciones grisácea y por el reflejo luminoso. 4.) Presencia de brillo en la superficie cizallada reflejan iluminación en el material del recubrimiento adherido con distinción de tonalidad grisácea. 5.) Microrrelieves creado por la evolución o propagación de grietas se dibujan en los rectos del material adherido al sustrato, en serie de planos paralelos como corrientes de ríos orientada a lo largo del deslizamiento. 6.) La apariencia de la superficie después de la ruptura por cizallamiento del material proyectado en la probeta es de arrastre de material o deslizamiento. 7.) Hay presencia de lenguas que emergen en forma de triángulos producto de fracturas locales. 8.) Se observaron comportamiento de transición entre la fractura dúctil y la frágil, es decir la microfractura de pseudodescohesión en las que las facetas aparecen menos delimitadas, con superficies menos planas, con o sin escalones y espinazos desgarrado. 9.) La ruptura o fractura es de tipo frágil como se ha descrito en el punto 4.1.1.1 para las dos aleaciones en base de WC/Ni o punto 4.1.3.2.1 para las dos aleaciones en base de Al_2O_3/TiO_2 .

Resultando la fractura de las aleaciones cerámicas en base WC/Ni o Al_2O_3/TiO_2 en sus dos composiciones cada una de tipo frágil verificándose por los procesos observados como arrastre y deslizamientos por cizallamiento del recubrimiento, evolución de grietas, diferencia de tonalidad grisácea, brillo por reflejo, presencia de resto de material de recubrimiento formas escalonada, pendientes e inclinaciones.

Se observo el comportamiento de transición entre la ductilidad y la fragilidad en las microfracturas de pseudodescohesión por la presencia de escalones y espinazos desgarrado en las aleaciones cerámicas en base WC/Ni o Al_2O_3/TiO_2 en sus dos composiciones.

b.) Mecanismo de Difusión.

El fenómeno de los mecanismos de difusión se forma en el contacto de la superficie del sustrato de acero F-1110 de composición química 0,169 % C; 0,669 % Mn; 0,187 % Si, 0,008 % P y 0,023 % S, Capítulo III, punto 3.2.3.1.1, la superficie de la primera capa proyectada de enganche o anclaje de aleación en base Ni de composición química: 0,07 % C; 6,04 % Al; 0,19 % Si; 0,22 % Cr; 0,38 % Fe; balance Ni y 5,25 % Mo, Capítulo III, punto 3.2.3.1.2, siendo dos materiales compatibles sustrato-capas de anclaje, y cumpliendo la preparación superficial Capítulo I, punto 1.3.1.1 y punto 1.5.1.2, libres de capas de óxidos, existe la posibilidad de formarse enlaces metalúrgicos o químicos entre los átomos vecino de las superficies en contactos.

La temperatura de la primera capa proyectada de anclaje en base aleación de Ni y sobre ésta capa se proyectaron después y en forma repetida cinco capas de aleación cerámica WC/Ni o Al₂O₃/TiO₂ en dos composiciones, se incrementa la medida de la temperatura originando un rápido crecimiento del área de contacto, dilatación, y disminución del límite elástico del metal sustrato. Posteriormente, sigue aumentando el área de contacto, aunque a menor velocidad, ya que está controlado por mecanismo de fluencia (creep). De acuerdo a lo que se ha venido exponiendo en las cuatro aleaciones de WC/Ni y Al₂O₃/TiO₂ en dos proporciones, se ha encontrado zonas puntuales de penetración de elementos de la primera capa proyecta de enganche o anclaje, proceso de difusión, en el sustrato. Evidenciándose la presencia de estos elementos a través del análisis con el espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS), realizado a las muestras de probetas proyectadas con distintas aleaciones de recubrimientos utilizadas, en los espectros de las figuras 4.135 a la 4.150, se encuentran componentes penetrados “difundidos” en zonas puntuales dentro del sustrato, probablemente por efectos de mecanismo de difusión, entre los componentes difundidos se hallaron el níquel (Ni) y el aluminio (Al) elementos que pertenecen a la capa de anclaje.

Se observó penetración de elementos perteneciente a la capa de anclaje en zonas puntuales del sustrato de la probeta recubierta por proyección térmica por llama, probablemente por efectos de mecanismo de difusión, entre los elementos difundidos se hallaron el níquel (Ni), y el aluminio (Al).

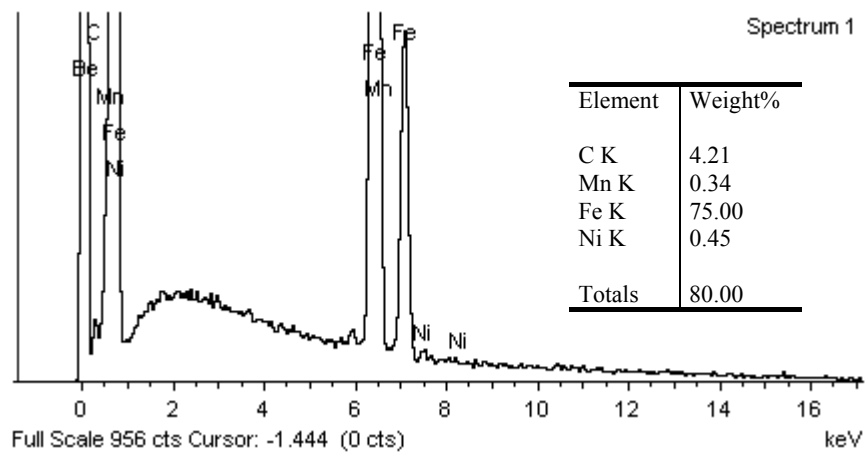
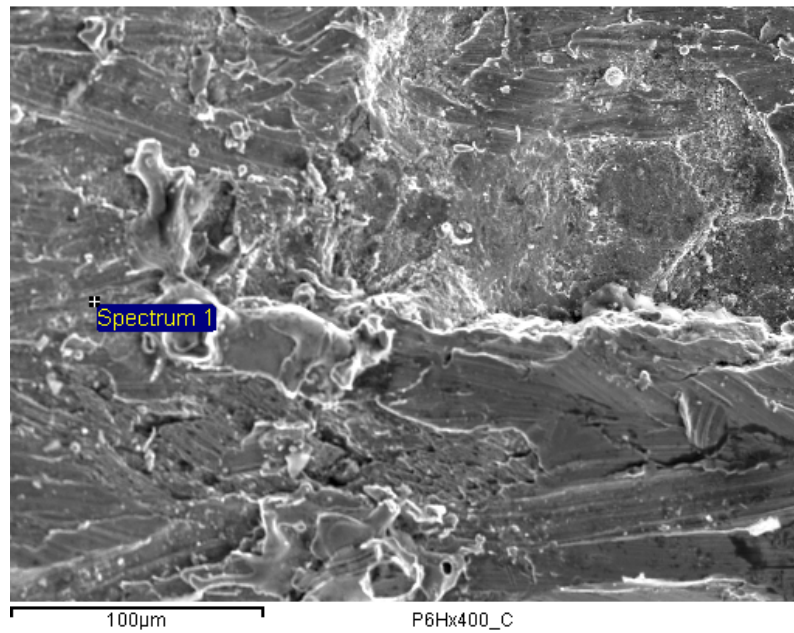


Figura 4.135. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Cresta de un Filete, x400, SEM y EDS.

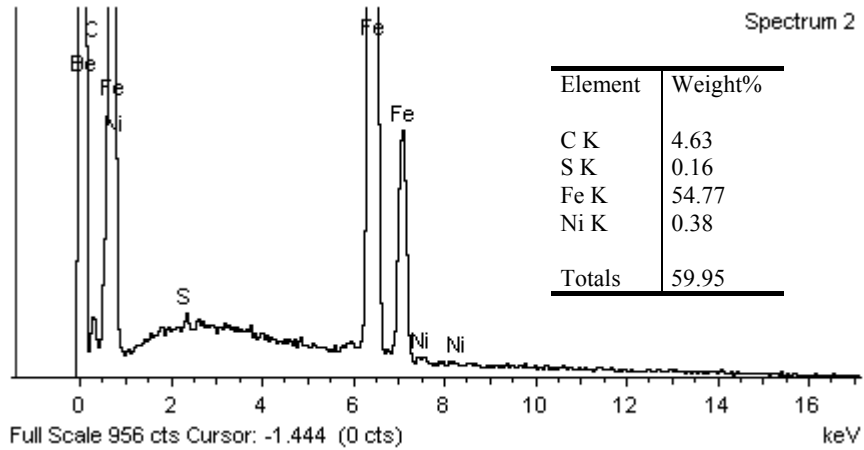
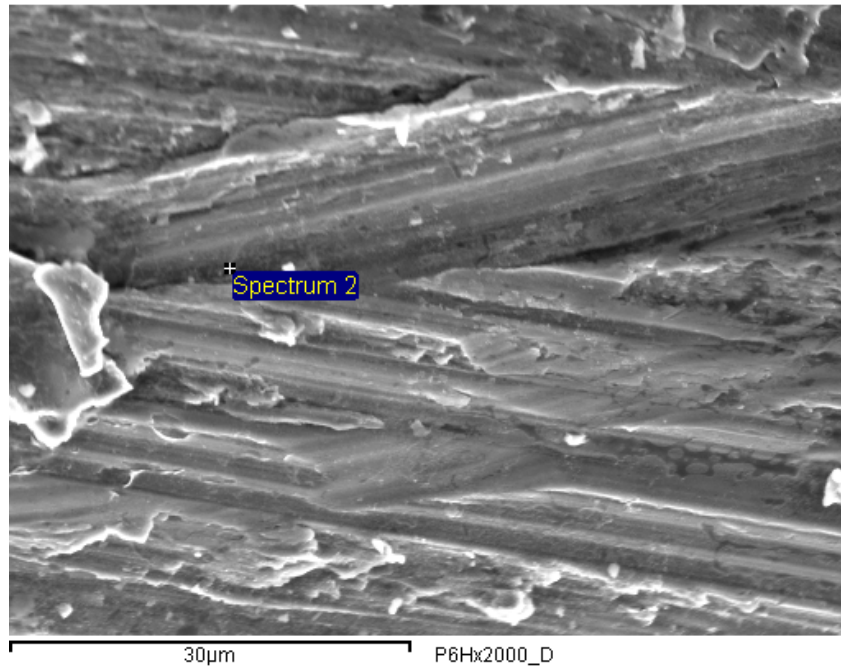


Figura 4.136. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS.

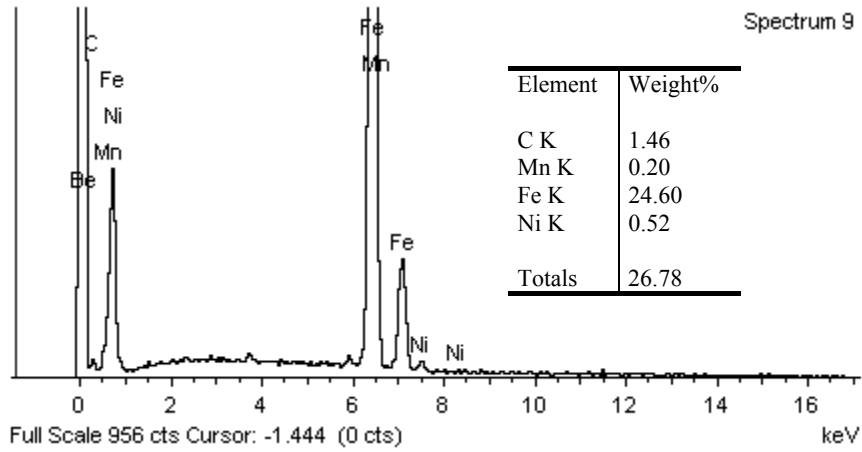
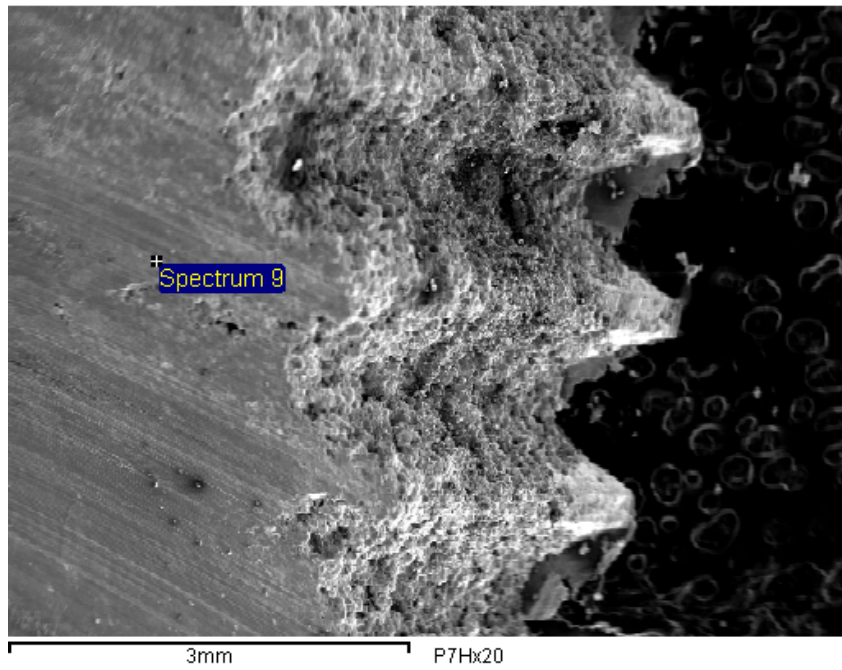


Figura 4.137. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS.

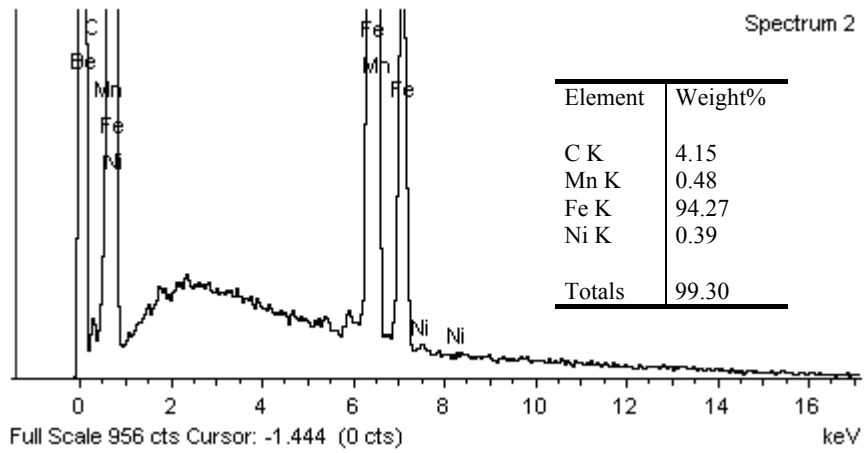
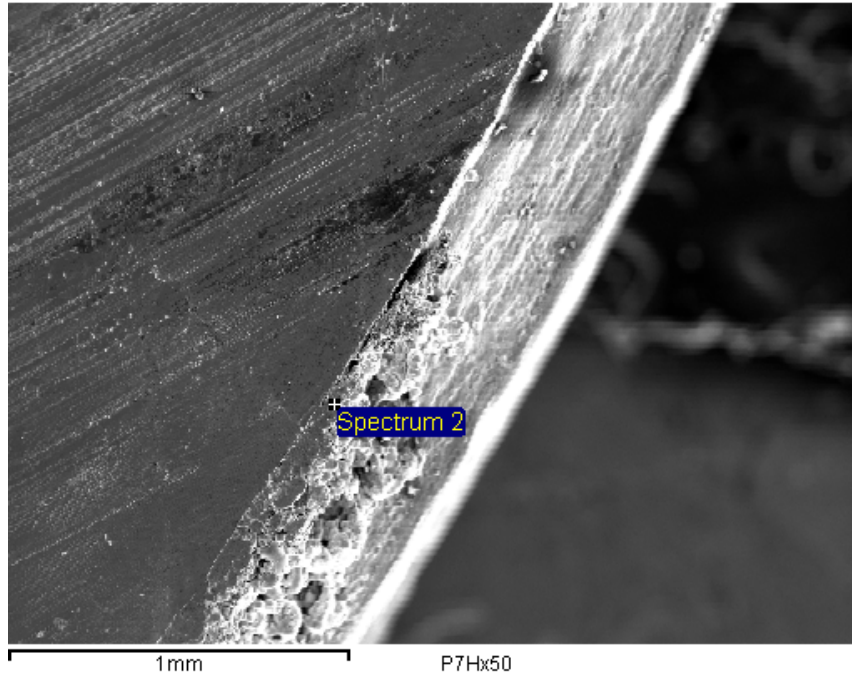


Figura 4.138. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x50, SEM y EDS.

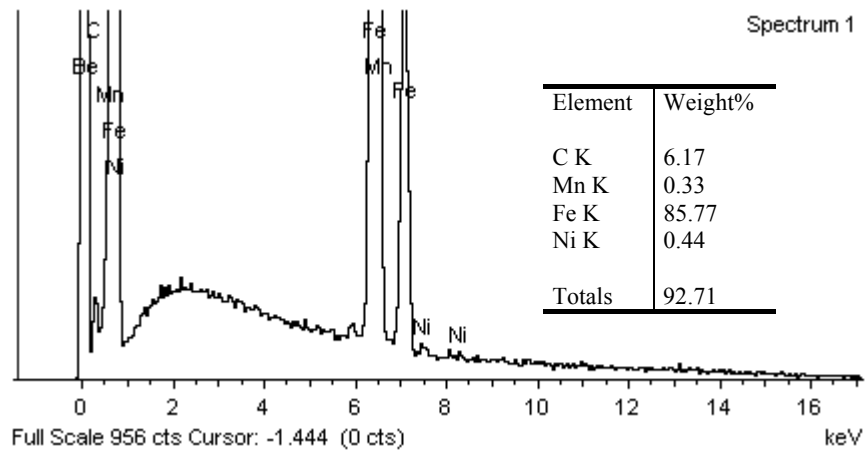
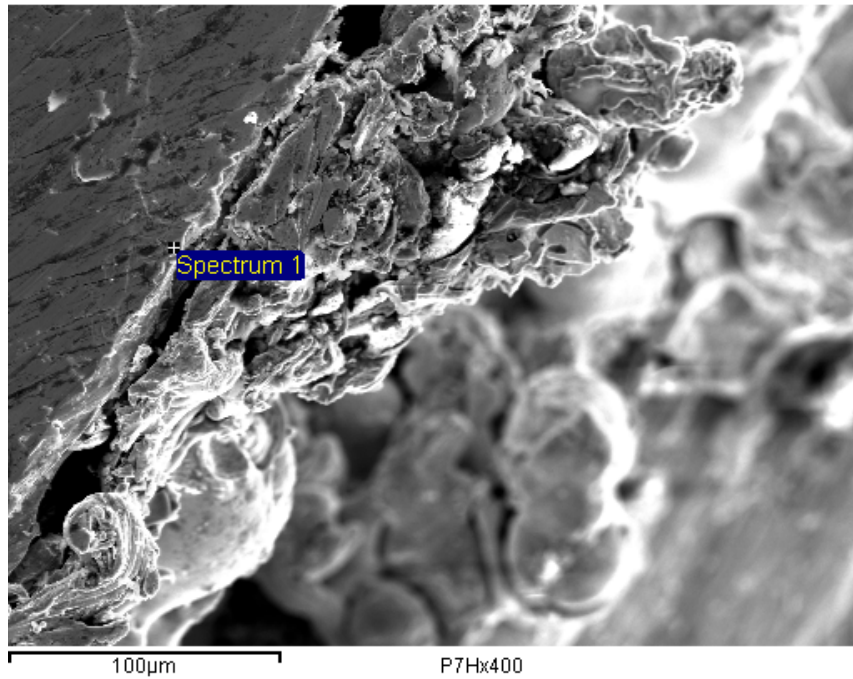


Figura 4.139. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS.

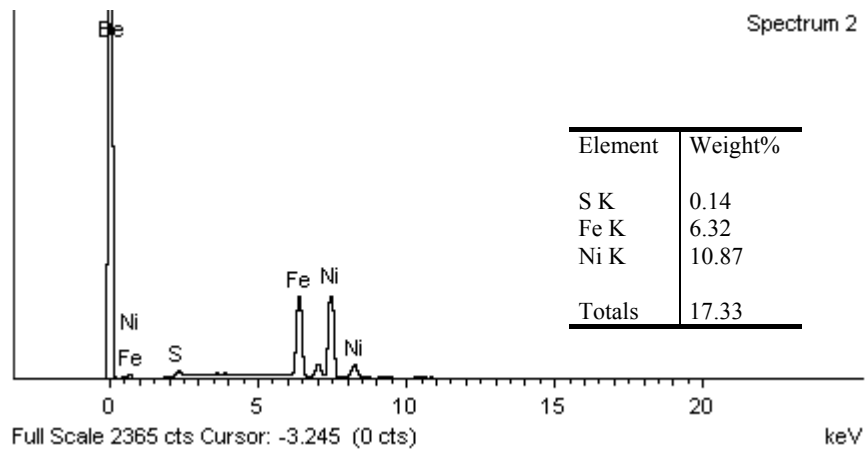
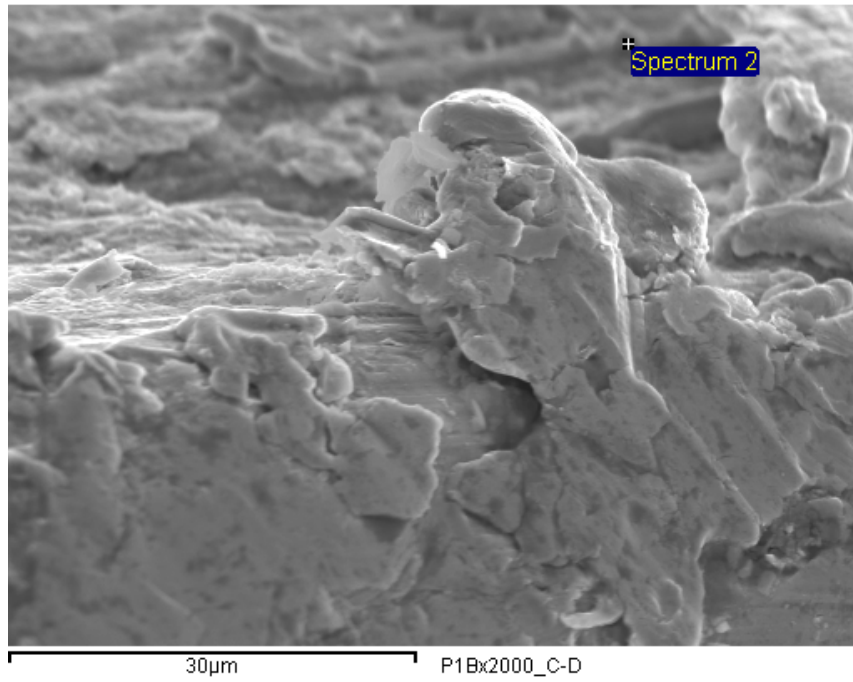


Figura 4.140. Probeta P1B, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS.

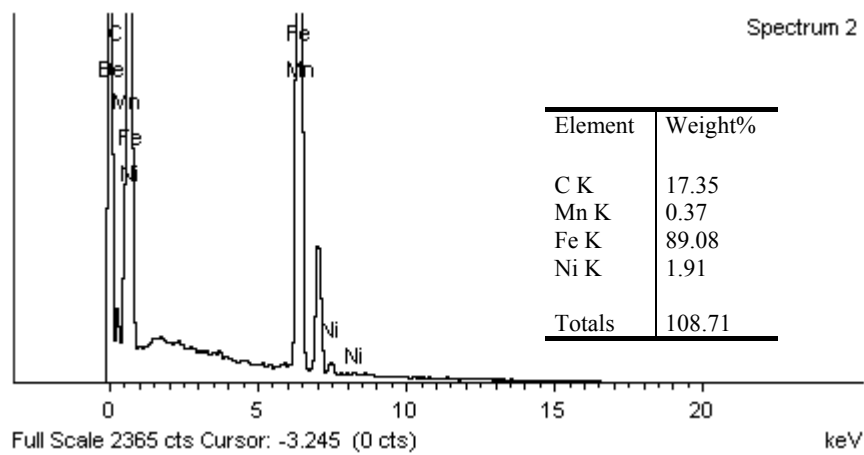
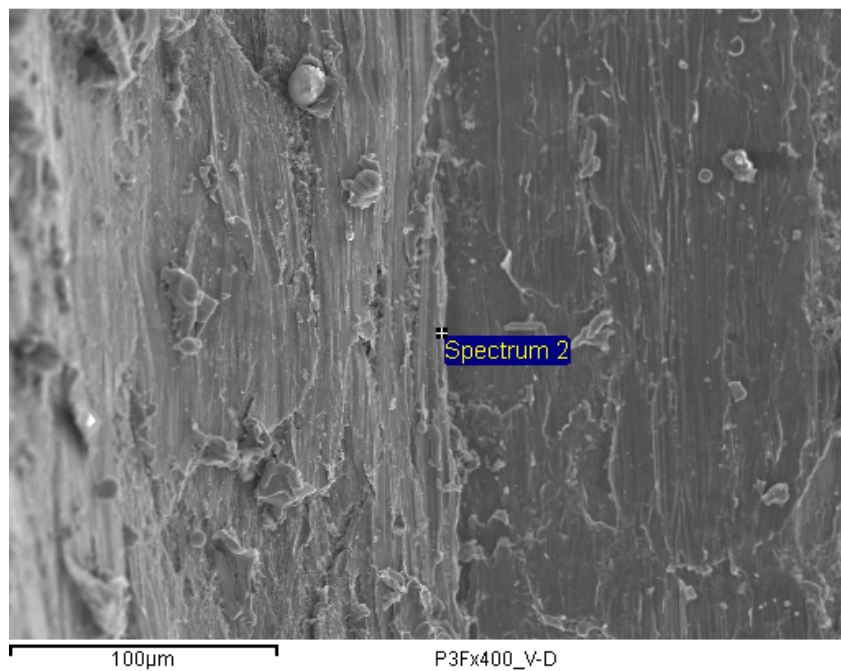


Figura 4.141. Probeta P3F, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS.

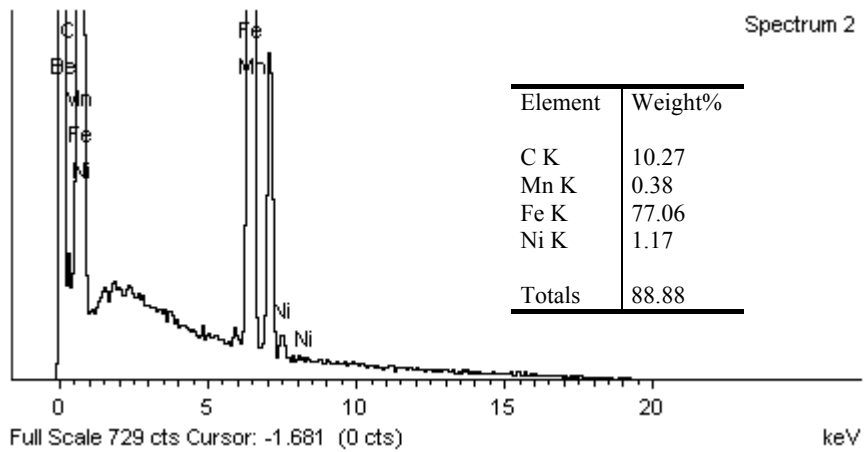
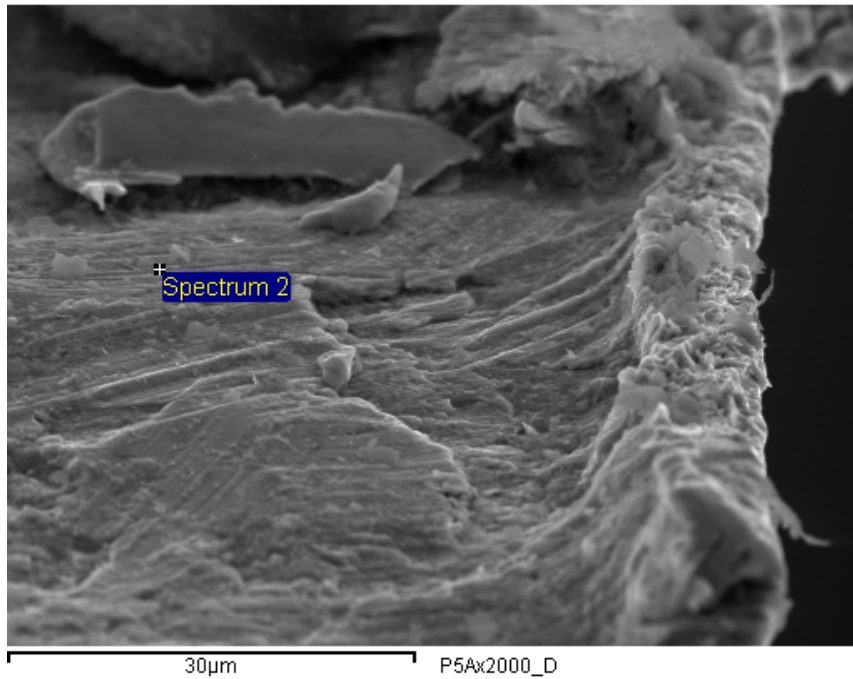


Figura 4.142. Probeta P5A, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS.

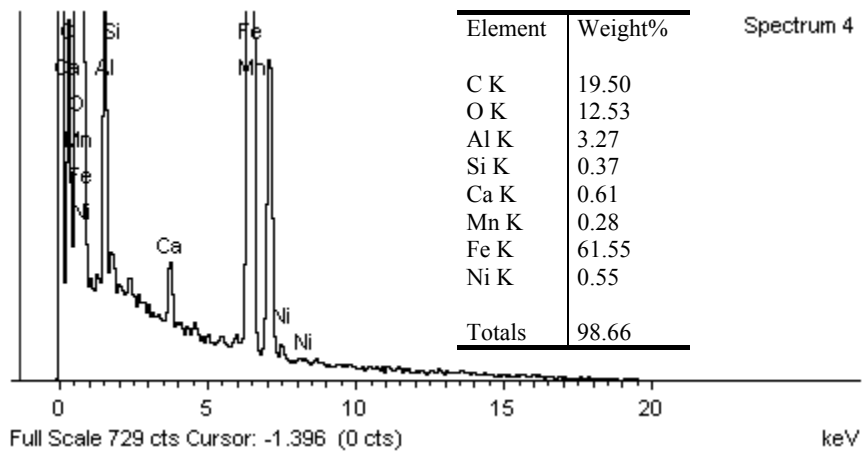
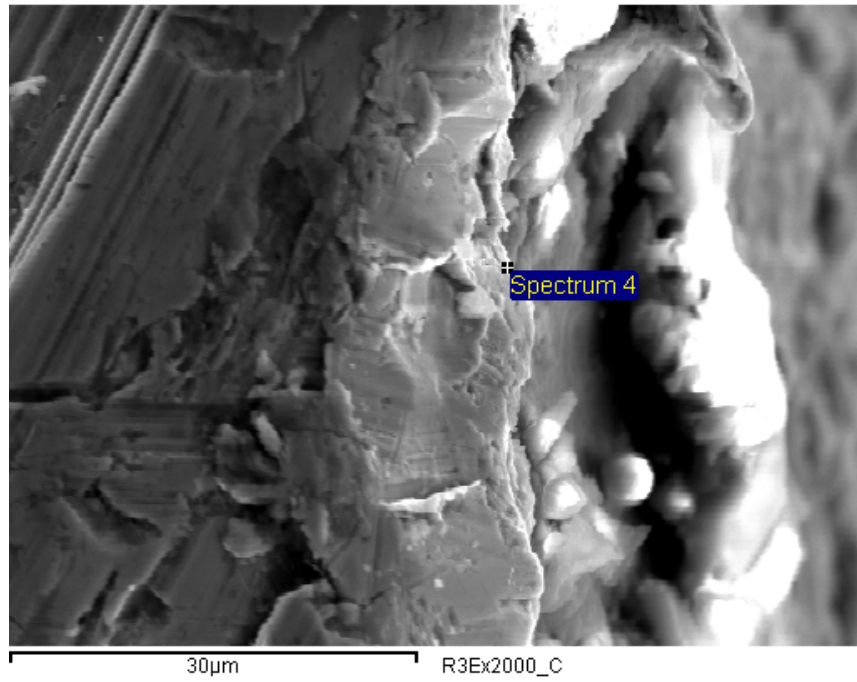


Figura 4.143. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS.

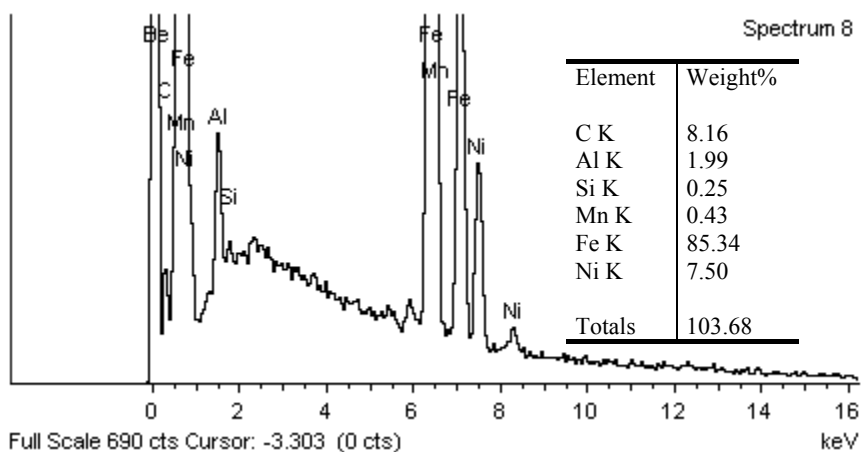
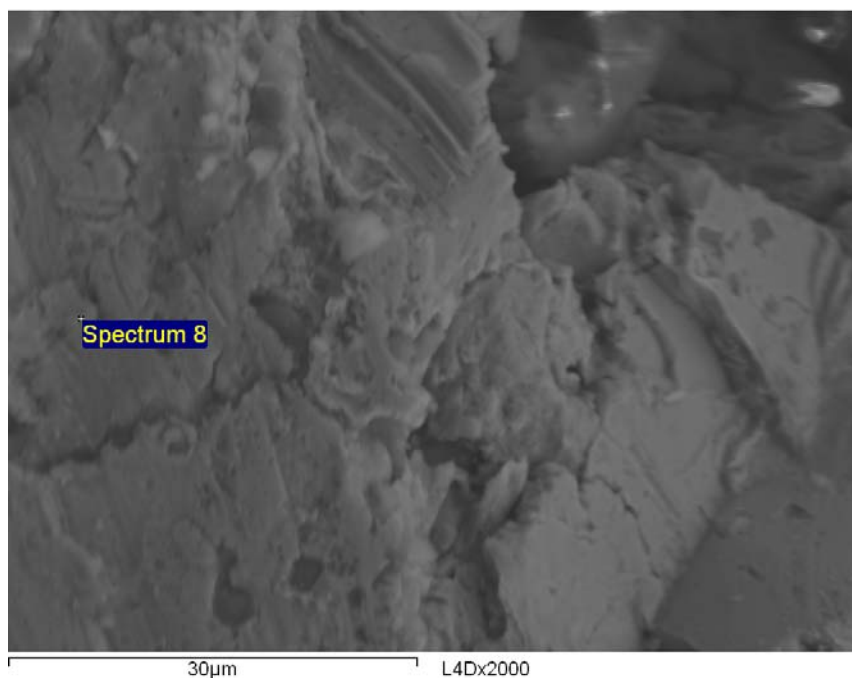


Figura 4.144. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS.

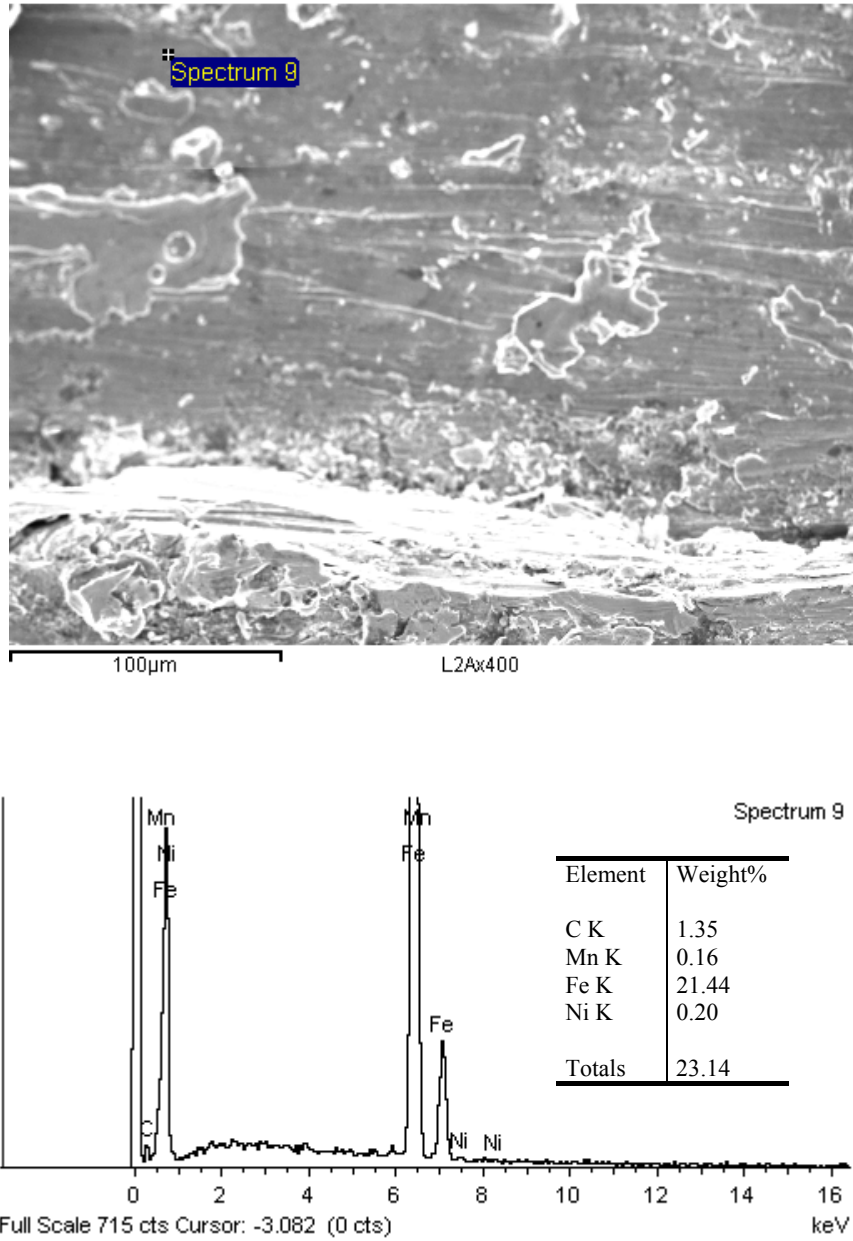


Figura 4.145. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS.

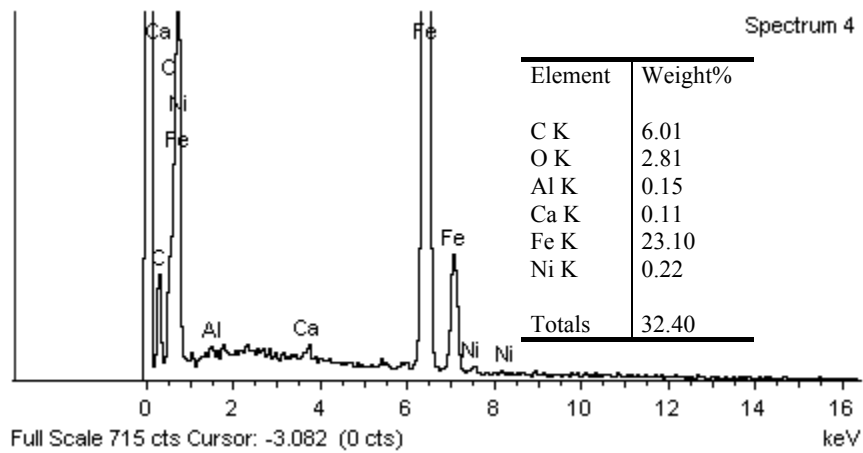
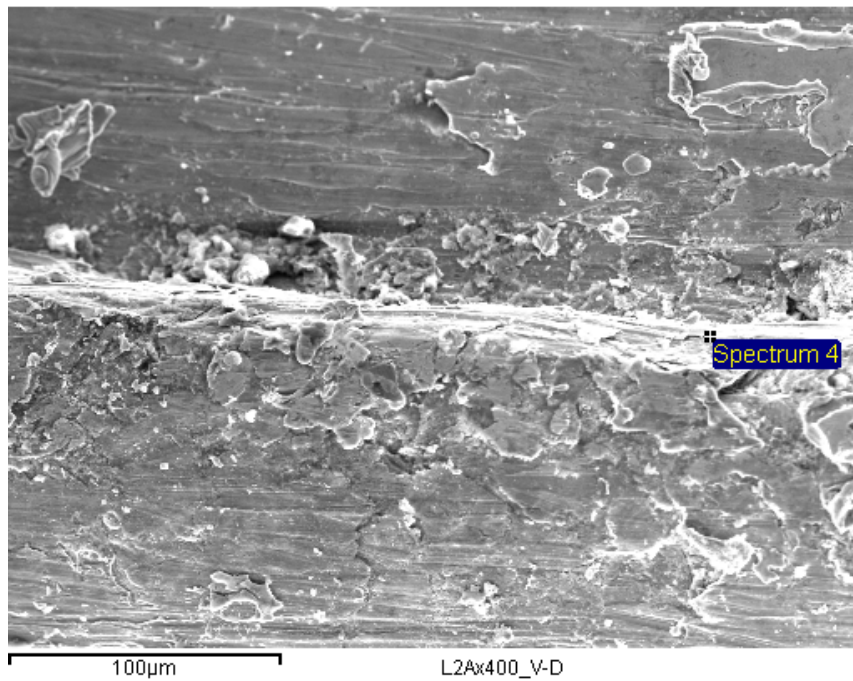


Figura 4.146. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS.

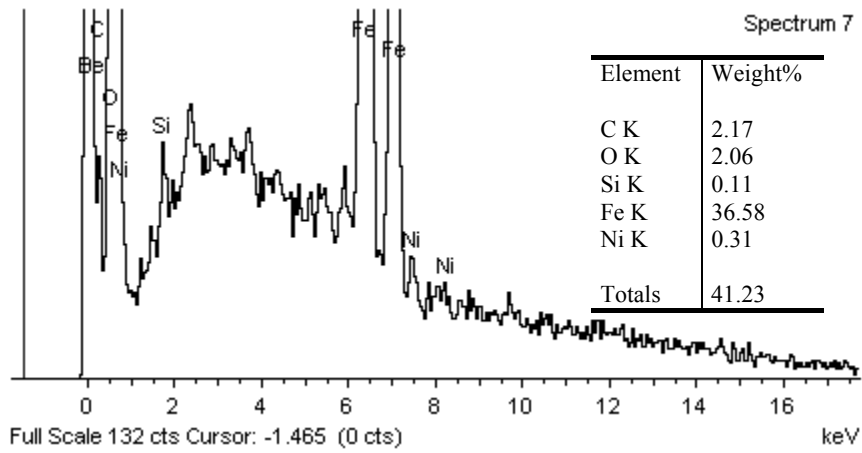
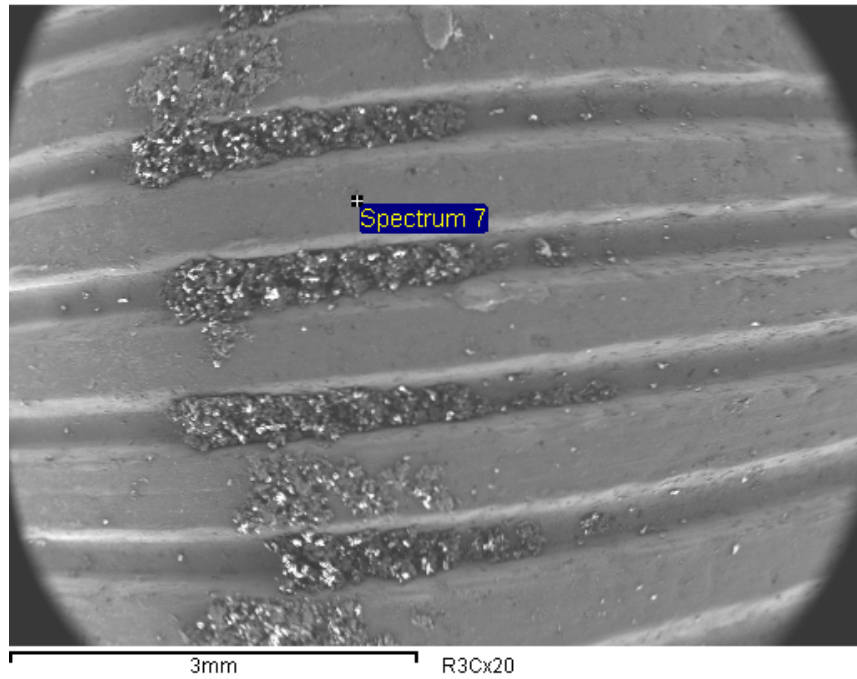


Figura 4.147. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS.

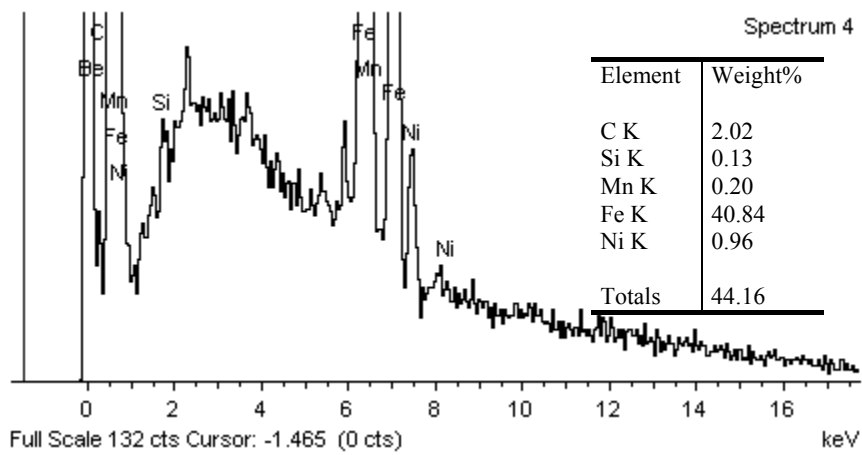
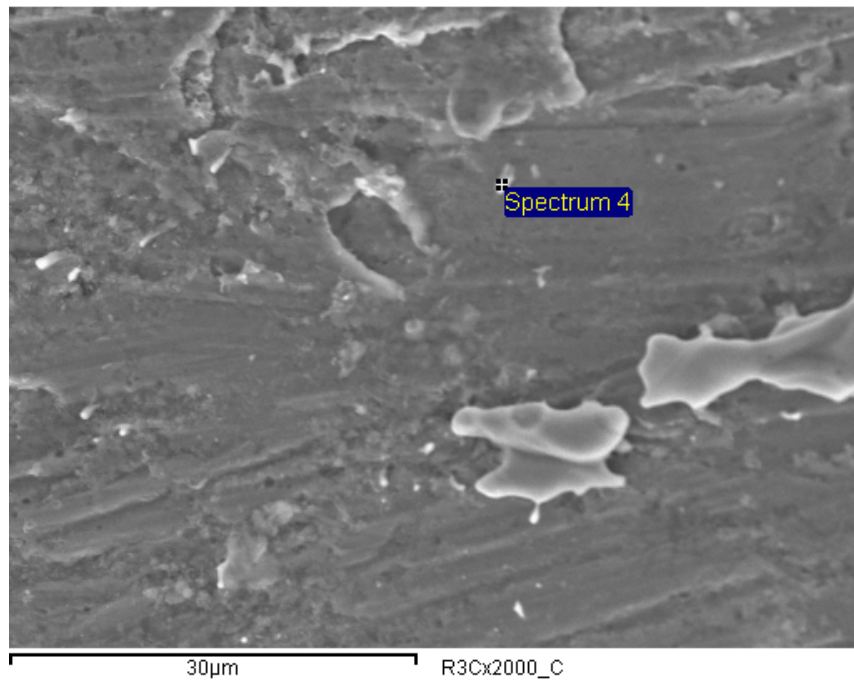


Figura 4.148. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS.

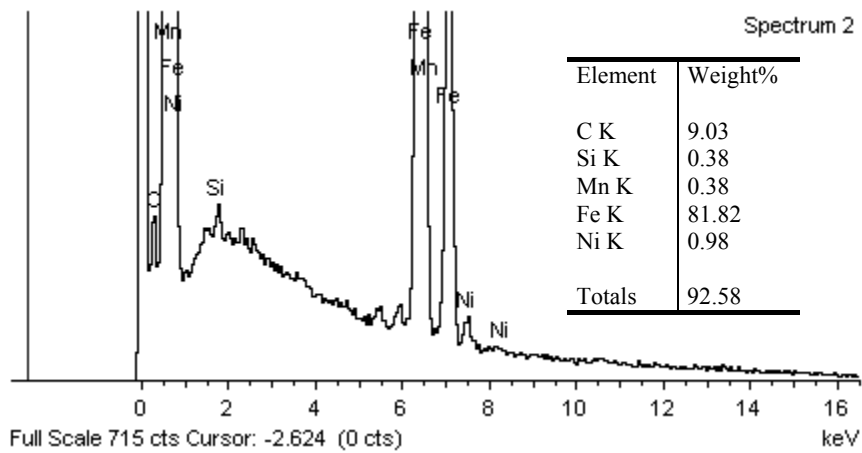
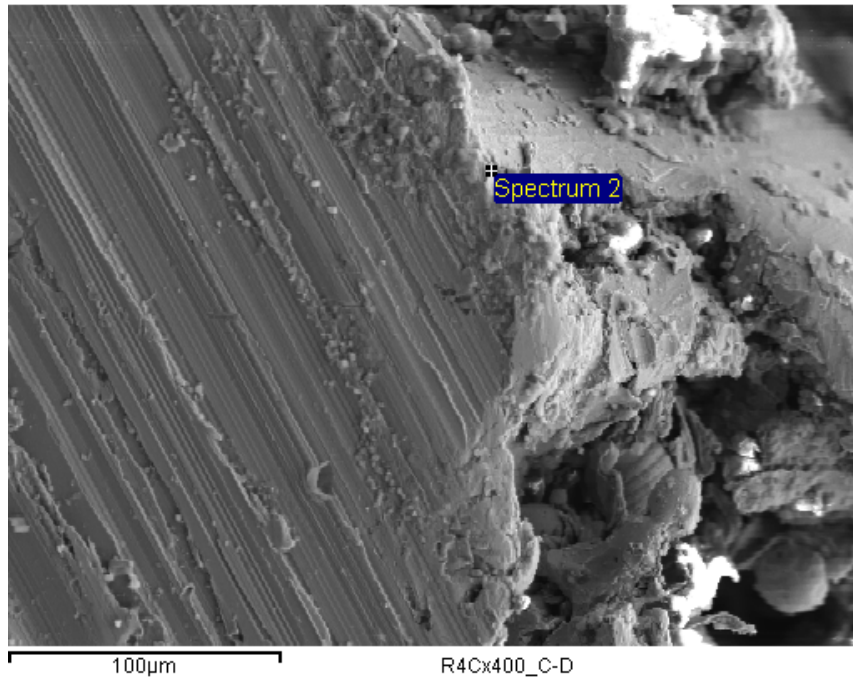


Figura 4.149. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS.

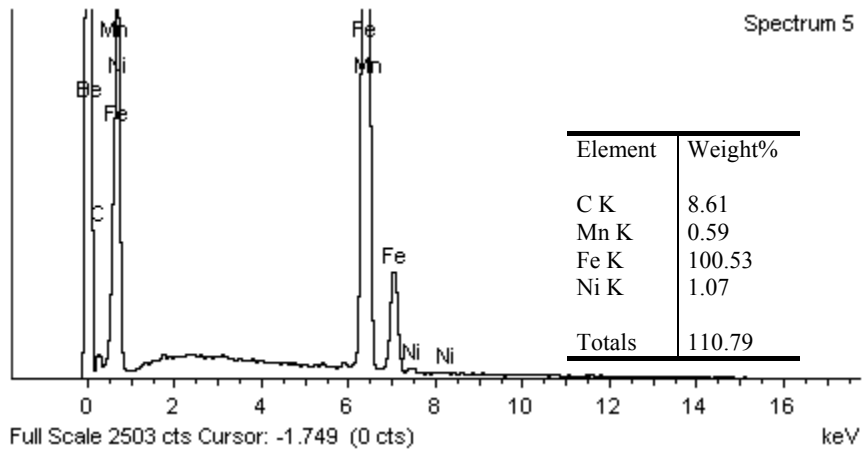
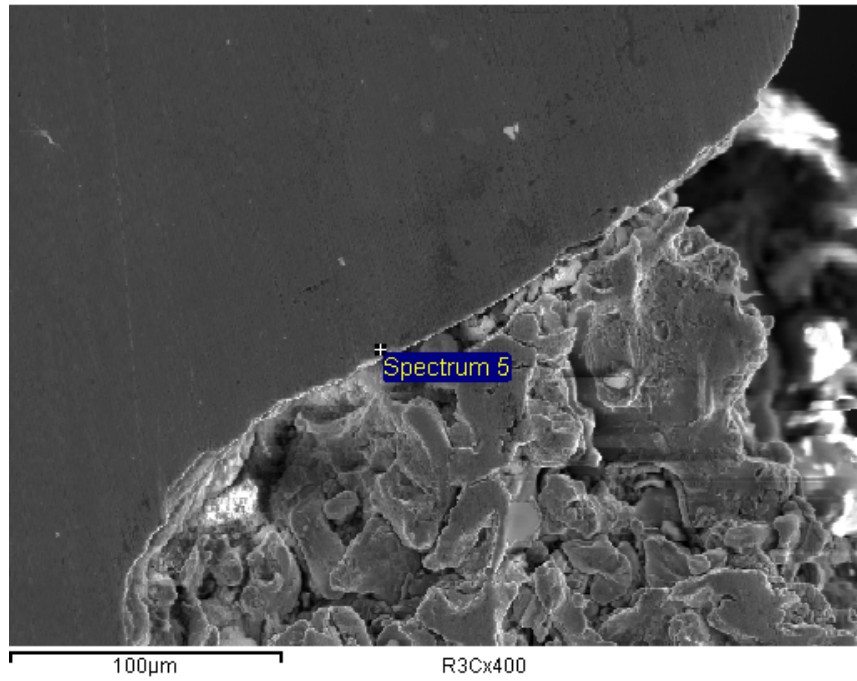


Figura 4.150. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS.

Capítulo V

Conclusiones y Aportaciones

5.1. Conclusiones.

Fundamentado en los Capítulos anteriores las conclusiones a que se llegaron se plasmaran en los apartados: 1.) Recubrimiento Total. 2.) Recubrimiento en Cuatro Partes. 3.) Recubrimiento en Tres Partes. 4.) Análisis Relativos a las Variables Controladoras de la Adherencia. 5.) Comportamiento Tribológico. 6.) Fractografía y Adhesión de los Recubrimiento – Sustrato.

5.1.1. Recubrimiento Total.

El recubrimiento total es depositado usando proyección térmica por llama sobre el sustrato en forma de banda periférica (a lo largo del diámetro) continua y cerrada con altura constante de 20 mm y 15 mm;

estudiándose tres variables la temperatura, la rugosidad y el material del recubrimiento aleaciones de polvos micro-pulverizados.

- Se obtuvo con la macroscopía óptica las superficies naturales sin y con aumento 10x, el acabado mecanizado del sustrato, la presencia de óxidos, el color del depósito gris claro en la aleación comercial 40%WC/60%Ni y gris oscuro en la aleación preparada 30%WC/70%Ni, la aglomeración de partículas irregulares aplastadas y adheridas una sobre otras en los recubrimientos, el espesor macro de las capas superpuestas y la fractura tipo frágil por cada condición de experimentos.

- Resultando con la microscopía óptica observar las superficies atacadas usando aumento de 400x, la microestructura de la aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni, identificación de formas y colores, zonas diluidas y límites de zonas, granos y poros.

- Se obtuvo del análisis de la emisión acústica en conjunto con el ensayo de cizalladura para los recubrimientos de aleación de WC/Ni, tanto la curva de impactos versus deformaciones como impactos acumulados versus deformaciones, dos zonas se distinguen: 1.) Zona de acomodamiento y pre-compresión donde suceden pocos impactos o señales. 2.) Zona pseudo-elástica donde aumentan los impactos por la formación progresivamente de micro-fisuras y deformaciones hasta la ruptura por cizalladura lo que determina la adherencia del recubrimiento.

- Se identificaron dos zonas por analogía del ensayo de cizallamiento y de emisión acústica adquirida conjuntamente cuando se realiza el ensayo de la probeta recubierta: 1.) La zona de acomodamiento y pre-compresión los esfuerzos de cizalladura, las deformaciones, los impactos e impactos acumulados son de bajo energía y además las señales de impactos son pocas debido al acomodo que sucede. 2.) La zona pseudo-elástica los esfuerzos de cizalladura e impactos acumulados son directamente proporcionales a las deformaciones. Con relación a los impactos primero aumentan, luego varían poco y finalmente disminuyen hasta ocurrir la ruptura. En ésta zona pseudo-elástica se verifica mediante la emisión acústica que en la probeta ensayada ocurren internamente procesos de microdeformaciones y deformaciones que se desarrollan repetidamente causando microfisuraciones, microsaltos, o discontinuidades y deformaciones, incrementándose la concentración de esfuerzos residuales y finalmente se produce la fractura o la ruptura por corte del recubrimiento, lo que cuantifica la medida adherencia o fijación por cizallamiento.

- Se observó que las mejores condiciones de adherencia o fijación a cizalladura en la intercara sustrato – recubrimiento se obtienen para los valores de nivel alto (positivo), es decir, para las variables temperatura 100 °C y el recubrimiento de aleación 30%WC/70%Ni y la combinación del producto de las variables rugosidad en función del ángulo del filete por el recubrimiento (90° * 30%WC/70%Ni).

- Indicó el análisis de varianza para los esfuerzos de cizalladura que tres efectos, la temperatura, el recubrimiento y la rugosidad en función del ángulo del filete por el recubrimiento, tuvieron los valores de la probabilidad inferiores a 0,05, es decir, las medias para los niveles de las variables temperatura, recubrimiento y la interacción rugosidad por recubrimiento son diferentes significativamente, con 95,0 % de nivel de confianza. Los demás efectos, la rugosidad, la rugosidad por la temperatura y la temperatura por el recubrimiento, no tuvieron medias con diferencia estadística significativa, los valores de la probabilidad fueron mayores a 0,05.

- La adherencia a la cizalladura en la intercara sustrato-recubrimiento aumenta con la temperatura. La temperatura óptima en función de los esfuerzos de cizalladura ha sido de 100 °C.

- La adherencia entre sustrato – recubrimiento en función del esfuerzo de cizalladura, es mayor cuando el contenido de níquel está en mayor proporción, es decir, en la aleación 30%WC/70%Ni y la rugosidad con ángulo de filete de 90 °.

- Los esfuerzos de cizalladura en este caso tienen relación proporcional de acuerdo a las condiciones de cada experimento estudiado para recubrimiento total.

- Se obtuvo una relación proporcional semejante para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel de la aleación de WC/Ni.

Resultando el mayor esfuerzo de cizalladura en el material WC/Ni con la proporción 30/70 en por ciento de peso.

- Las condiciones dominantes de las rigideces para la adherencia al sustrato del recubrimiento las proporcionan los valores de nivel alto (positivo) de las variables: rugosidad en función del ángulo de filete (90 °), la temperatura (100 °C), el recubrimiento aleación 30%WC/70%Ni y la combinación de las variables rugosidad por la temperatura (90 ° * 100 °C).

- Resultando para las rigideces que cuatro de los efectos, la rugosidad en función del ángulo del filete, la temperatura, el recubrimiento, y la rugosidad por la temperatura, tuvieron los valores de la probabilidad inferiores a 0,05, es decir, las medias para los niveles de las variables rugosidad, temperatura, recubrimiento y la interacción rugosidad por temperatura son significativamente diferentes, con 95,0 % de confiabilidad. En los restante efectos (rugosidad por recubrimiento y temperatura por recubrimiento) no se observaron medias con diferencias significativas, los valores de la probabilidad son mayores a 0,05.

- La adherencia entre sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, es superior cuando el contenido de níquel está en mayor proporción, o sea, la aleación del recubrimiento 30%WC/70%Ni°.

- La adherencia entre sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, aumenta con la temperatura óptima de 100 °C y para una rugosidad roscada con ángulo de filete de 90 °.

Conclusiones y Aportaciones

- Se obtuvo una relación semejante para las rigideces en función de contenido de carburos de wolframio. Resultando la mejor rigidez en el material 40%WC/60%Ni.

- Se observó una tendencia para las microdurezas de los efectos para los valores de: nivel bajo (negativo) de la variable recubrimiento para la aleación 40%WC/60%Ni y nivel alto (positivo) de la interacción de las variables rugosidad en función del ángulo del filete por el recubrimiento (90 ° * 30%WC/70%Ni).

- Señaló el análisis de varianza para las microdurezas que el efecto recubrimiento posee el valor de probabilidad menor a 0,05, es decir, las medias para los niveles de la variable recubrimiento son diferentes significativamente, con 95,0 % de nivel de confianza. En los otros efectos no se observaron medias con diferencias significativas, los valores de la probabilidades son mayores a 0,05.

- Se obtuvo mayor microdureza Vickers en función de contenido de carburo de wolframio. Resultando la mejor microdurezas en el material 40%WC/60%Ni.

- Se observó para las porosidades una tendencia del efecto con valor de nivel bajo de la variable recubrimiento la aleación 40%WC/60%Ni.

- Indicó el análisis de varianza para las porosidades que en los efectos no se observaron medias con diferencias significativas los valores de las probabilidades son mayores a 0,05. Resultando que la porosidad no es función del contenido de la aleación de WC/Ni.

5.1.2. Recubrimiento en Cuatro Partes.

El recubrimiento en cuatro partes es depositado usando proyección térmica por llama en forma discontinua o parcial en cuatros partes iguales sobre el sustrato a lo largo del diámetro de 30 mm con altura constante de 15 mm; estudiándose tres variables la temperatura, la rugosidad y el recubrimiento.

- Se observó en el recubrimiento en cuatro partes los mismos resultados de macroscopía y microscopía óptica para las aleaciones en base 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni que en el recubrimiento total.

- Se identificó en el recubrimiento en cuatro partes por analogía del recubrimiento total usando el ensayo de cizalladura y de emisión acústica simultáneamente en las curvas de impactos o en otro caso impactos acumulados versus deformaciones igualmente dos zonas: una de acomodamiento y pre-compresión y otra pseudo-elástica donde la liberación de energía se manifiesta en señales y deformaciones.

- Se lograron los efectos a la adherencia a la cizalladura sustrato – recubrimiento para las variables: recubrimiento la aleación 30%WC/70%Ni y rugosidad roscada en función del ángulo de filete 90 °.

- Mostró el análisis de varianza para los esfuerzos de cizalladura que dos efectos la rugosidad en función del ángulo de filete y el recubrimiento tuvieron los valores de las probabilidades menores a 0,05, es decir, las medias para los niveles de las variables: rugosidad en función del ángulo del filete, recubrimiento son diferentes significativamente, con 5 % de errores.

- Se obtuvo mayor adherencia en la intercara sustrato-recubrimiento cuando mayor es el ángulo del filete fue el de 90 °.

- La adherencia en la intercara sustrato-recubrimiento en función del esfuerzo de cizalladura, es alta cuando la proporción del contenido de níquel (Ni) es mayor, en este caso está en la aleación 30%WC/70%Ni.

- Se obtuvo por correlación entre los esfuerzos de cizalladura y el conjunto de condiciones de los experimentos relación proporcional.

- Se logró una relación proporcional para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel. Resultando el mayor esfuerzo de cizalladura para la aleación 30%WC/70%Ni. El ajuste de regresión lineal indicó que las aleaciones de WC/Ni tuvieron las mismas características en el punto común de cruce dentro del área explorada experimentalmente.

- Se observó para las rigideces que la adherencia en la intercara sustrato – recubrimiento se relacionaron con los valores de nivel positivo de las variables: recubrimiento de aleación 30%WC/70%Ni y rugosidad roscada con ángulo de filete de 90 °.

- Resultando para las rigideces que dos de los efectos la rugosidad en función del ángulo de filete y el recubrimiento tuvieron los valores de las probabilidades inferiores a 0,05, es decir, las medias para los niveles de las variables rugosidad y recubrimiento son significativamente diferentes, con 95,0 % de seguridad.

- La adherencia o fijación en la intercara sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, es mayor cuando mayor es el contenido de níquel (Ni) en la aleación del recubrimiento, es decir, en el recubrimiento de aleación 30%WC/70%Ni.

- La adherencia entre el sustrato – recubrimiento en función de la rigidez, es alta cuando la relación en el contenido de níquel es mayor, en este caso está en la aleación 30%WC/70%Ni.

- Se obtuvo una relación análoga para las rigideces en función de contenido de carburos. Resultando la mejor rigidez para el recubrimiento de aleación 40%WC/60%Ni.

5.1.3. Recubrimiento en Tres Partes.

El recubrimiento en tres partes es depositado usando proyección térmica por llama en forma discontinua o parcial en tres partes o zonas iguales sobre el sustrato o probeta cilíndrica a lo largo del diámetro de 30 mm con altura constante de 15 mm. La conclusiones se realizaran en los apartados: 5.1.3.1. Diseño Estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60) y 5.1.3.2. Diseño Estadístico II para Al₂O₃/TiO₂ (87/13, 97/3); estudiándose tres variables el proceso térmico, la rugosidad y el recubrimiento.

- Se identificó en el recubrimiento en tres partes por analogía del recubrimiento total y recubrimiento en cuatro partes usando el ensayo de cizalladura y de emisión acústica simultáneamente en las curvas de impactos o en otro caso impactos acumulados versus deformaciones igualmente dos zonas: una de acomodamiento y pre-compresión y otra pseudo-elástica donde la liberación de energía se manifiesta en señales y deformaciones.

5.1.3.1. Diseño Estadístico I para WC/Ni (30/70, 40/60).

- Se observaron para el recubrimiento en tres partes los mismos resultados de macroscopía y microscopía óptica para las aleaciones en base 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni en el recubrimiento total y el recubrimiento en cuatro partes.

- Se observó que los efectos a la adherencia en la intercara sustrato – recubrimiento se consiguen para las variables: rugosidad (rosca de paso 1 mm y ángulo de filete de 60 °) y proceso térmico en baño de sales a base de nitrito sódico más nitrato potásico al 50 % a la temperatura aproximada de 400 °C.

- Mostró el análisis de varianza que dos efectos la rugosidad en función del ángulo de filete de 60 ° y el proceso térmico tuvieron los valores de las probabilidades menores a 0,05, es decir, las medias para los niveles de las variables: rugosidad y proceso térmico son diferentes significativamente, con 5 % de riesgos.

- Se logró mayor adherencia en función de los esfuerzos de cizalladura cuando la rugosidad es roscada sobre la superficie del sustrato.

- La adherencia en la intercara sustrato – recubrimiento en función del esfuerzo de cizalladura, es alta cuando se realiza un proceso térmico con sales a base de nitrito sódico más nitrato potásico al 50 % a la temperatura aproximada de 400 °C a los recubrimientos proyectados en aleaciones de WC/Ni.

- Se obtuvo entre los esfuerzos de cizalladura y las condiciones experimentales relación proporcional.

- Se logró una relación proporcional para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel del recubrimiento en base WC/Ni. Resultando el mayor esfuerzo de cizalladura para la aleación 30%WC/70%Ni.
- Se observó que las condiciones dominantes para la adherencia al sustrato – recubrimiento la proporciona la variable: rugosidad en su nivel alto la rosca de paso 1 mm y ángulo de filete de 60 °.
- Resultando que un efecto la rugosidad en función del ángulo del filete de 60 ° tuvo el valor de la probabilidad inferior a 0,05, es decir, las medias para los niveles de la variable rugosidad son significativamente diferentes, con 95,0 % de confiabilidad.
- La adherencia entre sustrato – recubrimiento en función de las rigideces, es mayor cuando la rugosidad del sustrato es el roscado.
- Se obtuvo relación directamente proporcional de las rigideces versus las condiciones experimentales.
- Se alcanzó una relación directamente proporcional para las rigideces en función de contenido de carburo. Resultando la mejor rigidez en el material 30%WC/70%Ni. El ajuste de regresión lineal indicó que las aleaciones de WC/Ni tuvieron las mismas características en el punto común de cruce dentro del área de experimentación.

- Se observó que las variables rugosidades en función del ángulo del filete, el proceso térmico y el producto de la rugosidad por el recubrimiento tuvieron efectos sobre las microdurezas, la aumentan las variables rugosidad y el proceso térmico y la disminuyen la interacción el producto de las variables rugosidad por recubrimiento.

- Resultando del análisis de varianza que tres efectos la rugosidad en función del ángulo del filete, el proceso térmico y la interacción rugosidad por recubrimiento tuvieron las probabilidades menores a 0,05, es decir, las medias para las variables: recubrimiento, proceso térmico y la interacción rugosidad por recubrimiento son diferentes significativamente, con 5 % de riesgos.

- Se logró mayor microdureza Vickers en función del proceso térmico.

- Se obtuvieron las mayores microdurezas para la rugosidad roscada en el recubrimiento 40%WC/60%Ni.

- Se observó que las porosidades están en función del proceso térmico y el recubrimiento.

- Se obtuvo del análisis de varianza que en la interacción proceso térmico por recubrimiento las medias se diferencian significativas, tuvo el valor de la probabilidad inferior a 0,05. Resultando que la porosidad está influenciada por el producto proceso térmico por recubrimiento.

- Se obtuvieron las menores porosidades con el proceso térmico para el recubrimiento 30%WC/70%Ni.

5.1.3.2. Diseño Estadístico II para Al₂O₃/TiO₂ (87/13, 97/3).

- Se obtuvo con la macroscopía óptica las superficies naturales sin y con aumento 10x, el acabado mecanizado del sustrato, la presencia de óxidos, el color del deposito gris azulado en la aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂ y de color gris oscuro en la aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, la aglomeración de partículas irregulares aplastadas y adheridas una sobre otras en los recubrimientos, el espesor macro de las capas superpuestas y la ruptura tipo frágil por cada condición de experimentos.

- Resultando con la microscopía óptica observar las superficies atacadas usando aumento de 400x, la microestructura de la aleaciones: 97%Al₂O₃/3%TiO₂ y 87%Al₂O₃/13%TiO₂, identificación de formas y colores, regiones de componentes de elementos disueltos y limites de regiones, granos y poros.

- Mostrando el análisis de varianza que no hay efecto, los valores de las probabilidades son superiores a 0,05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos, implicando que ambas aleaciones de Al₂O₃/TiO₂ tienden a comportarse de manera semejantes.

- Se obtuvo entre los esfuerzos de cizalladura y las condiciones experimentales relación proporcional.
- Se logró una relación directamente proporcional para los esfuerzos de cizalladura en función de contenido de titanio. Resultando el mayor esfuerzo de cizalladura para la aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂. El ajuste de regresión lineal indicó que las aleaciones de Al₂O₃/TiO₂ tuvieron las mismas características en el punto común de cruce dentro del área de experimentación.
- Observó para las rigideces que no hay condiciones dominantes para la adherencia entre sustrato – recubrimiento.
- Resultando del análisis de varianza que no hay efecto los valores de la probabilidad son mayores a 0,05, los residuos no son significativamente diferentes, implicando que ambas aleaciones de Al₂O₃/TiO₂ tienden a comportarse de modo parecido.
- Se logró relación directamente proporcional de las rigideces versus las condiciones experimentales.
- Se obtuvo una relación directamente proporcional para las rigideces en función de contenido de titanio. Resultando la mejor rigidez para la aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂.

- Se observó que las variables proceso térmico, recubrimiento y el producto rugosidad por proceso térmico tuvieron efectos de aumentar las microdurezas cuando el recubrimiento está en función del porcentajes de del óxido de aluminio, si el material proyectado es tratado por proceso térmico en baño de sales a base de nitrito sódico más nitrato potásico al 50 % a la temperatura aproximada de 400 °C, y cuando sucede el nivel alto de la interacción de las variables rugosidad por proceso térmico.

- Resultando del análisis de varianza que tres efectos el proceso térmico, el recubrimiento y la interacción de la rugosidad por proceso térmico tuvieron los valores de las probabilidades inferiores a 0,05, es decir, las medias para las variables: proceso térmico, recubrimiento y la interacción rugosidad por proceso térmico son diferentes significativamente, con 5 % de errores.

- Se obtuvo mayor microdureza Vickers en función del porcentajes de óxido de aluminio. Resultando la mejor microdurezas en el material $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$.

- Las mayores microdurezas se logran cuando hay proceso térmico y la rugosidad es roscada en el recubrimiento $97\%Al_2O_3/3\%TiO_2$.

- Se observó para las porosidades una tendencia del efecto con valor de nivel alto de las variables rugosidad roscada (rosca de paso 1 mm y ángulo de filete de 60 °) y con proceso térmico.

- Señaló el análisis de varianza para las porosidades que no hay efectos no se observaron medias con diferencias significativas, los valores de las probabilidades son superiores a 0,05.

5.1.4. Análisis Relativos a las Variables Controladoras de la Adherencia.

En los análisis relativos a las variables controladoras de la adherencia se realizaron comparaciones entre experimentos considerando las variables y sus niveles.

- Se obtuvo una correlación directamente proporcional para los esfuerzos de cizalladura de ruptura en función de la geometría depositada en el sustrato, es decir la probeta cilíndrica recubierta a un tercio, a un cuarto y total con las aleaciones 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni.

- Resultó una relación proporcional análoga para los esfuerzos de cizalladura en función del contenido de níquel de la aleación en base WC/Ni y de la geometría depositada del recubrimiento en el sustrato, siendo mayor el esfuerzo de cizalladura en el material WC/Ni con la proporción 30/70 en tanto por ciento en peso.

- Se obtuvo del ensayo de cizalladura que: a.) Los mayores valores de esfuerzos de cizalladura fueron para la probeta con recubrimiento total, se debió a que el material depositado produce una unión cerrada, abrace completo a lo largo del perímetro. b.) Los menores valores de esfuerzos de

cizalladura fueron para la probeta con recubrimiento parcial a cuatro trozos, se debió a la no uniformidad de los trozos de material proyectado, ocurriendo inestabilidad de apoyo en el contacto del recubrimiento con la pieza hueca utilizada para la cizalladura del recubrimiento, es decir probablemente solo dos o tres partes tienen contacto con la pieza hueca cuando se realizó el ensayo de cizalladura a la probeta recubierta.

- Se obtuvo para recubrimiento total una relación directamente proporcional para la energía de deformación de ruptura en función de los impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando la condición dominante para: la temperatura de 100 °C y la rugosidad roscada en función del ángulo del filete de 90 ° para las aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni .

- Se logró para el recubrimiento a cuatro partes por analogía del recubrimiento total una relación directamente proporcional para la energía de deformación de ruptura en función de los impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando la condición dominante para: la temperatura de 100 °C y la rugosidad roscada en función del ángulo del filete de 90 ° para las aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni .

- Resultando en ambos diseño factorial 2^3 para recubrimiento total y recubrimiento a cuatro partes relación directamente proporcional de la energía de deformación de ruptura en función de los impactos acumulados hasta la ruptura y la mejor condición experimental para: la temperatura de 100 °C y la rugosidad roscada en función del ángulo del filete de 90 ° para las aleaciones: 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni .

- Se obtuvo para el recubrimiento en tres partes por semejanza de los recubrimiento total y recubrimiento en cuatro partes una relación directamente proporcional para la energía de deformación de ruptura en función de los impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando las mayores pendientes positivas por la cantidad de energía liberada y señales acústicas generadas fueron para los materiales según la rugosidad: a.) Roscado en función del ángulo del filete de 60 ° y moleteado para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin o con proceso térmico. b.) Limado para las aleaciones 40%WC/60%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO sin proceso térmico y 30%WC/70%Ni y 97%Al₂O₃/3%TiO₂ con proceso térmico. c.) Roscado en función del ángulo del filete de 90 ° para las aleaciones 30%WC/70%Ni y 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sin proceso térmico.

- Se logró para el recubrimiento en tres partes por analogía semejanza del recubrimiento total y el recubrimiento en cuatro partes una relación directamente proporcional para la energía de deformación de ruptura en función de los impactos acumulados hasta la ruptura. Resultando las pendientes positivas por la cantidad de energía liberada y señales acústicas generadas fueron según tipo de recubrimiento: a.) 40%WC/60%Ni para el limado y el moleteado. b.) 30%WC/70%Ni para el roscado de 90 ° y el limado. c.) 87%Al₂O₃/13%TiO₂ para el moleteado y el roscado de 60 °. c.) 97%Al₂O₃/3%TiO₂ para el moleteado y el roscado de 60 °.

5.1.5. Comportamiento Tribológico.

- Se obtuvo el mayor coeficiente de rozamiento en el par rozantes (pin sobre disco) para la velocidad de deslizamiento menor y la carga aplicada mayor. Resultando el mayor coeficiente de rozamiento dependiente de los materiales del par rozantes.

- Se ha investigado el modelo genérico para la lubricación mixta por medio de la aplicación del tribómetro pin on disk actuando con diversos niveles de las variables presión aparente y velocidades y un lubricante abundante, 90 ml de aceite de corte, que caracterizaron la variable adimensional de Hersey en la lubricación hidrodinámica.

- El modelo en la lubricación mixta esta formado por una función exponencial ($\mu = C_i * e^{-px}$) o potencial ($\mu = C_i * x^{-p}$) que evolucionan desde el coeficiente de rozamiento en la lubricación límite “ μ_{l0} ” hasta la lubricación hidrodinámica con la variable $x = V^m * Pa^{-n}$. Se han definido los indicadores: coeficiente “p” y “ C_i ” de la función elegida (potencial o exponencial), coeficiente de rozamiento límite “ μ_{l0} ” y velocidad a la que se alcanzan el coeficiente de rozamiento de iniciación de la lubricación hidrodinámica “ μ_h ” para cuantificar la tendencia a la cohesión del par frotante.

- Se observó menor relieve o huella para cualquier par rozantes pin sobre disco de acero de bajo contenido de carbono DC01 en contacto y, por lo tanto menor adhesión en las aleaciones que no son afines. Se obtuvo que los pins recubiertos con las aleaciones 30%WC/70%Ni y

97%Al₂O₃/3%TiO₂ tuvieron menor adhesión; en cuanto el disco con mayor adhesión fue de acero inoxidable AISI 304 por tener afinidad con las aleaciones de los pins.

- Resultando del ensayo pin on disk, que el disco de acero inoxidable AISI 304 tuvo mayor tendencia de adhesión y fue independiente de, las cuatros aleaciones proyectadas sobre el pin y que completaron conjuntamente con el disco el par rozantes, las aleaciones fueron: 40%WC/60%Ni, 30%WC/70%Ni, 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

- Se obtuvo entre los efectos de adhesión o, fenómeno de desgaste del par rozantes que: 1.)Tuvieron un comportamiento semejante en el efecto de adhesión cuando el material del disco es de acero inoxidable AISI 304 y fue independencia de las cuatro aleaciones depositada sobre el pin 40%WC/60%Ni, 30%WC/70%Ni, 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂. 2.) La afinidad entre los materiales del par rozantes determinaron la tendencia adhesiva para: a.) Las aleaciones 40%WC/60%Ni y 30%WC/70%Ni el material del disco menos adhesivo fue el acero de bajo contenido de carbono DC01. b.) Las aleaciones 87%Al₂O₃/13%TiO₂ y 97%Al₂O₃/3%TiO₂ el material del disco menos adhesivo fue el acero de bajo contenido de carbono DC01.

- Los indicadores de la adhesión del rozamiento fueron el coeficiente de rozamiento límite “ μ_{10} ” y el coeficiente de correlación “R²” señalaron que las aleaciones en base WC/Ni en su dos composiciones 40/60

y 30/70 en tanto por ciento en peso tuvieron menor efecto de adhesión que las aleaciones en base $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ en sus dos composiciones 87/13 y 97/3 en tanto por ciento en peso.

5.1.6. Fractografía y Adhesión del Recubrimiento – Sustrato.

- Resultando la fractura de las aleaciones cerámicas en base WC/Ni o $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ en sus dos composiciones cada una de tipo frágil verificándose por los procesos observados como arrastre y deslizamientos por cizallamiento del recubrimiento, evolución de grietas, diferencia de tonalidad grisácea, brillo por reflejo, presencia de resto de material de recubrimiento formas escalonada, pendientes e inclinaciones.

- Se observó el comportamiento de transición entre la ductilidad y la fragilidad en las microfracturas de pseudodescohesión por la presencia de escalones y espinazos desgarrado en las aleaciones cerámicas en base WC/Ni o $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ en sus dos composiciones.

- Se observó penetración de elementos perteneciente a la capa de anclaje en zonas puntuales del sustrato de la probeta recubierta por proyección térmica por llama, probablemente por efectos de mecanismo de difusión, entre los elementos difundidos se hallaron el níquel (Ni), y el aluminio (Al).

5.2. Aportaciones.

El trabajo realizado en esta tesis contribuye a dar una solución al problema de recubrimientos aplicados a matrices mediante las técnicas de proyección térmica por llama (flame spray) y de emisión acústica desde el punto de vista moderno o estadístico.

Los recubrimientos realizados a través de la técnica de proyección térmica por llama resultan en general muy económicos para aplicaciones de las industrias de específicamente la de matricería de embuticiones.

La metodología usada para la técnica de proyección térmica por llama presentada en la tesis es muy original para realizar recubrimientos a lo largo de la zona diametral a un sustrato giratorio en forma completa o parcial y además acotando su altura, los recubrimientos resultantes obtenidos empleando esta metodología tienen las dimensiones deseadas y un buen acabado sin necesidad de un mecanizado final, pudiéndose usarse directamente para una aplicación concreta. El acotamiento para lograr las medidas en el recubrimiento proyectado se hizo en el sustrato antes de recubrirse de manera que utilizándose un utillaje original para tapar las zonas que no deben recubrirse en el sustrato.

El trabajo presentado ha contribuido con importantes aportaciones originales, entre las que se destacan:

La demostración de la aplicabilidad práctica de la técnica de proyección térmica por llama en la resolución del problema basado en recubrimientos para matrices de embuticiones.

El desarrollado de una metodología para realizar a través de la técnicas de proyección térmica por llama recubrimientos a lo largo de una zona periférica completa o parcial y, además de altura acotada.

Se ha mostrado cómo se puede emplear la técnica de emisión acústica para la resolución del problema de fallos en los recubrimientos realizados a través de la proyección térmica por llama sometidos a cizalladura en las aplicaciones de procesos industriales de matricería.

Se ha presentado la utilidad de la estadística en la solución de todo tipo de problema, en este caso aplicada a la investigación de las características de adherencia en la interfase del sustrato con el recubrimiento.

Todas esta aportaciones se han visto refrendadas por las publicaciones que se relacionan a continuación:

Ferrer, C.; P. A. Maita, P.A., Guillamón, M. P.; Perez-Puig, M. A.; Corbí, A.; Salas, F.; Habib, K.A. y Orozco, J.; Análisis del Proceso de Deformación y Fractura por Tensiones Cortantes del Recubrimientos Níquel y Carburo de Wolframio sobre Sustrato de Acero Aplicado por Técnicas de Proyección a la Llama Mediante Técnicas de Emisión Acústica. IX

Congreso Nacional de Materiales, SEMAT, Volumen I, Vigo 2006, p. 377 – 380.

C. Ferrer, C.; Maita, P. A.; Guillamón, M. P.; Salas, F.; Orozco, J.; Corbí, A. y Giner, B. A.; Pérez-Puig, M.A. y Habib, K. A.; Estudio de las Deformaciones y Microfisuraciones en Recubrimientos Cerámicos Obtenidos por Proyección Térmica por Llama Empleando Pruebas de Emisión Acústica; XXIV Encuentro del Grupo Español de Fractura; Anales de Mecánica de Fractura, Volumen II, Burgos, 21, 22 y 23 de Marzo de 2007, p. 537 – 542.

C. Ferrer, P. A. Maita, J. J. Saura, K. A. Razzaq, M. A. Pérez, F. Salas, M. P. Guillamón. Análisis del modelo del coeficiente de rozamiento en la Lubricación Límite y Mixta, curva de Stribeck, mediante el ensayo Pin on Disk. Aplicación al acero F-1110 recubierto con Ni-CW y los pares: A) Acero Embutición DC 5 EN-10130. B) Acero Inox AISI 304. IV Congreso Ibérico de Tribología (IBERTRIB), Resumen de Las Comunicaciones. Bilbao, 21 y 22 de Julio, 2007, p. 17.

Ferrer, C.; Maita, P. A.; Guillamón, M. P.; Salas, F.; Orozco, J.; Corbí, A.; Pérez-Puig, M. A.; Habib, K. A. y Saura, J. J.; Análisis de la Adherencia por Tensiones Cortantes del Recubrimiento de Níquel y Carburo de Wolframio Aplicado por Técnicas de Proyección a la Llama Mediante Técnicas de Emisión Acústica; XXIV Encuentro del Grupo Español de Fractura; Anales de Mecánica de Fractura, Volumen II, Burgos, 21, 22 y 23 de Marzo de 2007, p. 543 – 548.

Conclusiones y Aportaciones

También es muy importante recalcar que sus resultados han tenido una gran aceptación tanto nacional como internacional, como así lo refrendan las numerosas publicaciones a que ha dado lugar.

Capítulo VI

Investigaciones Futuras

La síntesis del campo de conocimiento estudiado aplicado a recubrimientos elaborados a través de la técnica de proyección térmica por llama (flame spray) y las experiencias adquiridas en el transcurso del presente trabajo doctoral, en el que se investigaron las características de adherencia sobre matrices de embutición de acero con bajo contenido de carbono (F-1110), y análisis mediante ensayos de emisión acústica, de recubrimientos de níquel-óxidos y carburos cerámicos, aplicados por proyección térmica, y de las características adhesivas con aleaciones metálicas de embutición, conllevan a proponer los trabajos futuros siguientes:

- La influencia de las variables de la adherencia (clase de materiales, preparación superficial del sustrato y temperatura superficial del sustrato) en el proceso de proyección térmica por llama usando polvo de la defectología inherente porosidad y microestructura, en aleaciones determinadas.

- La influencia de las variables de la proyección (distancia de proyección, ángulo de proyección, potencia del dardo, naturaleza de la llama y el tratamiento de post-proyección) en el proceso de proyección térmica por llama usando polvo de la defectología inherente porosidad y microestructura, en composiciones de aleaciones establecida tanto comerciales como preparadas.

- La influencia de las variables de la resistencia mecánica (resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la cizalladura, dureza y tenacidad) en el proceso de proyección térmica por llama usando polvo de la defectología inherente porosidad y microestructura, en composiciones de materiales de recubrimiento establecidas

- La adherencia al sustrato de recubrimientos con proporciones variables en función de las variables de proyección (distancia de proyección, ángulo de proyección, potencia del dardo, naturaleza de la llama y el tratamiento de post-proyección) teniendo en cuenta: a) Rugosidad diseñada. b) Temperatura del sustrato. c) Temperatura de post-proceso.

- La tendencia a la adhesión mediante el ensayo pin on disk que pueden tener con las chapas los recubrimientos con proporciones variables.

- Los procesos de microfisuración en la interfase sustrato-recubrimiento con proporciones variables, representativo de los valores de adherencia, mediante técnicas no destructivas de emisión acústica.

- La influencia de las variables de la resistencia al desgaste (coeficiente de fricción y desgaste abrasivo) en el proceso de proyección térmica por llama usando polvo de la defectología inherente porosidad y microestructura, en aleaciones acordadas.

- La influencia del ensayo de cizalladura en probetas cilíndricas y planas con recubrimientos proyectados mediante la técnica de flame spray, considerando el recubrimiento parciales o a trozos en las periferias de las probetas y empleando la emisión acústica como técnica no destructiva.

- Evaluación por métodos estadísticos resultados del conjunto de ensayos de cizalladura simultáneamente con la técnica de emisión acústica y la adherencia al sustrato de recubrimientos con proporciones variables en función de las variables de proyección térmica por llama. Estudiando las variables: rugosidad diseñada, temperatura del sustrato y temperatura de post-proceso.

- La influencia del ensayo de cizalladura y la emisión acústica en probetas cilíndricas y planas con recubrimientos proyectados parcial y total en la periferia de la probeta. Comparando los distintos recubrimientos proyectados por flame spray.

- Determinación de un modelo matemático que simules el proceso de proyección térmica por llama considerando las variables de proyección: distancia de proyección, ángulo de proyección, potencia del dardo, naturaleza de la llama y el tratamiento de post-proyección.

- Evaluación de la influencia de las resistencias al desgaste y la corrosión en diferentes recubrimientos que modifican el comportamiento de las superficies del material sustrato.

- La adherencia al sustrato de recubrimientos en el proceso de proyección térmica por llama usando polvo considerando como variables:
a) Rugosidad diseñada. b) Temperatura del sustrato. c.) Capas de anclaje.
d) Proceso térmico.

Referencias Bibliográfica

1. Carreras V., Lluís; Bueno S., Sandra y Mòntala G., Francesc, Recubrimiento Duros Obtenidos por Procesos C.V.D., T.R.D.D., P.V.D., 1998.
2. Grupo TTC, Deposición Química en Fase Vapor, Tratamiento Térmicos, Recubrimientos Avanzados, 2002, pp.1 – 8.
3. Fumás F., David y Montalà G., Francesc, Evaporador para Reactor de Recubrimientos, Proyecto, 30 de Junio de 1998.
4. Carreras V., Lluís; Mòntala G., Actualidad Industrial de las Técnicas de Recubrimientos de Capas Duras Finas, 2003.
5. Guilemany C., José M., Una Nueva Técnica al Servicio de la Industria y del Desarrollo Tecnológico, Centro de Proyección Térmica.
6. Reverón, Helen, Guía Tecnología Cerámica II, 2004.
7. Luosa, A.; Romero, J.; Martínez, E.; Esteve, J.; Montalà. G., Francesc y Carreras V., Lluís, Recubrimiento Multicapa Cr/CrN para Aplicaciones Mecánicas Obtenidas por PVD, IX Congreso Nacional de Tratamiento Térmicos y de Superficie TRATERMAT 2003, San Sebastián, 28 y 29 de Mayo de 2003.
8. Guilemany C., José M.; Vizcaíno, Sonia; Espallargas, N.; Montalà G., Francesc; Carreras V., L. y Bueno Sandra, S., Evolución del Comportamiento al Desgaste de Capas de TiCN de ultrabajo Coeficiente de Fricción Obtenidas por PVD, 2003.

Referencias Bibliográfica

9. Carreras V., Lluís; Bueno Sandra, S.; Montalà G., Francesc; Rodríguez, R.; García, J. A.; Martínez, A.; Esteve, J.; Guilemany C., José M.; Vizcaíno, Sonia; Esteve, Joan y Martínez, E., Nuevo Reactor CVD a baja Presión (LPCVD) para Obtención de Capas Duras Finas, 2003.
10. Carreras V., Lluís; Bueno S., Sandra.; Montalà G., Francesc.; Rodríguez, R.; García, J. A.; Martínez, A.; Esteve, J.; Guilemany C., José M.; Vizcaíno, Sonia; Esteve, Joan y Martínez, E., Estado Actual de los Recubrimiento PVD: Mejoras de los Compuestos Convencionales y Nuevos Compuestos, 2003.
11. Grupo TTC, Deposición Física en Fase Vapor, Tratamiento Térmicos, Recubrimientos Avanzados, 2000, pp. 1 - 7.
12. Carreras V., Lluís; Bueno S., Sandra y Montalà G., Francesc, Aplicaciones Decorativas de las Técnicas de PVD, 2003.
13. Albella M., José M., Láminas Delgadas y Recubrimientos, 2003.
14. Carreras V., Lluís; Bueno S., Sandra y Montalà G., Francesc, Recubrimientos CVD para Estampación de Chapas de Alta Resistencia, Deformación Metálica Vol. 267 Nov-Dic. 2002, pp. 84 – 87.
15. Vilana A., José R., Recubrimiento de Superficies por Proyección Térmica, Revista Habitat, 2002.
16. Pawlowski, Lech, The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, 1995.
17. Tipton, Anthony, The Effect of HVOF Thermal Spray on the Elevated Temperature High Cycle Fatigue Behavior of a Martensitic Stainless Steel, 2002, TP101.
18. Herman, H. y Sampath, S., Thermal Spray Coating, 1996.
19. Guilemany C., José M., Mejora Energética en Motorizaciones de Elevadas Prestaciones Mediante Recubrimientos con Materiales Compuestos de Estructura Gradual y Multicapa, Obtenida por Proyección Térmica, Centro de Proyección Térmica.

20. Juárez M., Carlos; Barba P., Arturo; Vázquez V., Alfonso; Valdés, Enrique y Damborenea G., Juan, Modificación de Recubrimientos Obtenidos por Proyección Térmica Mediante Haces de Alta Densidad Energética, Simposio: La Investigación en la Facultad de Ingeniería, Madrid - España, 2004.
21. Guilemany C., José M. y Miguel, J. R., La Proyección Térmica en la Ingeniería de Superficies: Posibilidades y Aplicaciones, Jornada Sobre Recubrimientos y Tratamientos Superficiales de Aplicación en Moldes y Matrices, CPT-UB, 26 de Junio de 1997.
22. Hermanek, Frank J., Thermal Spraying, 2004.
23. Abello Linde, S. A., Proyección Térmica, 2004, pp. 1 - 20.
24. Quaranta, Nancy; Caligaris, Marta y Mansilla, Graciela, Recubrimientos de Alumina y Titania Aplicados por Spray Térmico sobre Aluminio, 1era Jornadas UTN de Ciencia y Tecnología de Materiales, 1 y 2 de Junio de 2004.
25. Van Den Berge, Frank M. J., Thermal Spray Processes, July 14, 1998.
26. Zambrano, Gustavo; Riascos, Henry y Prieto, Pedro, Multicapas de Metal – Cerámico – Carbono Tipo Diamante (DLC): Un Camino para la Obtención de Recubrimientos Superduros, Rev. Acad. Colomb. Cienc.: Volumen XXVII, No. 103, Junio de 2003, pp. 225 - 231.
27. Lai, Jeseoph, Thermal Spray Coating Processes, April 2, 2004.
28. Mitsubichi Carbide, Nuevo y Mejorado Recubrimiento CVD para el Torneado de aceros, 2002, pp. 1 - 14.
29. Pérez B., Joseba; Alberdi, Goretti y López, Patxi, Herramientas para Mecanizado a Alta Velocidad, Centro de Aplicaciones del Mecanizado de Alta Velocidad de Tekniker, 2004, I_196.
30. Wan, Y. P.; Fincke, J. R.; Jiang, X. Y.; Sampath, S.; Prasad, V. and Herman, H., Modeling of Oxidation of Molybdenum Particles during Plasma Spray Deposition, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 32B, June 2001, pp. 475.

Referencias Bibliográfica

31. Cheng, D.; Xu, Q.; Trapaga, G. and Lavernia, E. J., A Numerical Study of High-Velocity Oxygen Fuel Thermal Spraying Process. Part I: Gas Phase Dynamics, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 32A, July 2001, pp. 1609.
32. Guilemany C., José M.; Miguel, J. M. y Vizcaino, Sonia, Evolución de Propiedades Mecánicas en Recubrimientos Obtenidos por Proyección Térmica, VII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandia, 2002, pp. 443 – 450.
33. Knight, R.; Smith, R. W.; Xiao, Z. and Hoffman, T. T., Particle Velocity Measurements in HVOF and APS Systems, Thermal Spray Industrial Applications Conference Proceedings, ASM International, Materials Park, Ohio, 1994, pp 331 – 336.
34. Carreras, L.; Bueno, S. and Mántala, F.; Advanced Coatings for Automotive Industry Forming Dies, 7th International Research / Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2003, Lloret de Mar, Barcelona, Spain, 15 –16 September, 2003.
35. Oseguera, Joaquín, Procesos Asistidos por Plasmas Avances en Superficies, 2003.
36. Halldearn, Richard, Flame Spraying, 2001.
37. MetalUnivers, Recubrimientos PVD en el Procesado de Chapa y Plástico, Reportajes, 23 de Abril de 2004.
38. García G., L.; Espinoza B., F. J.; Morales H., J. y Zelaya A., O., Influencia de la Temperatura de Sustrato sobre la Dureza de las Películas de (Ti, Al) N Preparadas por Co-erosión Catódica Reactiva por Radiofrecuencia, Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío, Vol. 14, 2002, pp. 38 - 43.
39. Bousson, S.; Fouaidy, M.; Gassot, H.; Junquera, T.; Lesrel, J.; Borne, J. L.; Marini, J. ; Antoine, C. ; Charrier, J. P. and Safa, H., An Alternative Scheme for Stiffening SRF Cavities by Plasma Spraying, Proceeding of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999, pp. 919 - 921.

40. Breen, D.; Coyle, E. and Kennedy, D. M., Thermal Robotic Arm Controlled Spraying (TRACS), Control 2004, University of Bath, UK, September 2004, ID – 212.
41. Bhat, Deepak G., Application of CVD and PVD Technologies to Cutting Tools, and Evaluation of Tool Failure Modes, II Jornadas de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad Central de Venezuela, November 1997.
42. Shi, Shanghao and Hwang, Jiann-Yang, Plasma Spray Fabrication of Near-Shape Ceramic Objects, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. Vol. 2, No 2, 2003, pp. 145 - 150.
43. Stokes, Joseph, The Theory and Application of the Suelker Metco Diamond Jet HVOF Thermal Spray Process, 2003.
44. Das, S.; Bandyopadhyay, P. P.; Grosh, S.; Bandyopadhyay, T. K. and Chattopadhyay, A. B., Processing and Characterization of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings on Steel Substrate: Part II. On Coating Performance, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 34A, September 2003, pp. 1919.
45. Wang, G-X; Prasad, V. and Sampath, S., An Integrated Model for Dendritic and Planar Interface Growth and Morphological Transition in Rapid Solidification, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 31A, March 2000, pp. 735.
46. Chief, Barbara Fry and Manger, Jose G., 2003 Thermal Spraying Materials Survey. California Environmental Protection Agency, Final Report, March 2004.
47. He, Jianhong; Liu, Yourong; Qiao, Yunfei; Fischer, Traugott and Lavernia, Enrique J., Near-Nanostructured WC-18 Pct Co Coatings with Low Amounts of Non-WC Carbide Phase: Part I. Synthesis and Characterization, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 33A, January 2002, pp. 145.
48. Guilemany, J.M.; Armada, S. y Paco, de J.M.; Recubrimientos de Estructura Gradual Resistentes a Altas Temperaturas Obtenidos por Proyección Térmica, CPT, Abril 2001, pp. 1 – 11.

Referencias Bibliográfica

49. Liu, Yourong; Qiao, Yunfei; He, Jianhong; Lavernia, Enrique J. and Fischer, Traugott, Near-Nanostructured WC-18 Pct Co Coatings with Low Amounts of Non-WC Carbide Phase: Part II. Hardness and Resistance to Sliding and Abrasive Wear, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 33A, January 2002, pp. 159.
50. Guilemny, J. M.; De Paco, J. M. Nutting, J. And Miguel, J. R., Characterization of the W₂C Phase Formed during the High Velocity Oxygen Fuel Spraying of a WC + 12 Pct Co Powder, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 30A, August 1999, pp. 1913.
51. Molera S., Pere, Recubrimientos de los Metales, 1989.
- 52 Burns, R. M. y Bradley, W. W., Recubrimientos Protectores de los Metales, 1964.
53. Stokes, Joseph, Production of Coated and Free - Standing Engineering Components Using the HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) Process, Ph. D. Thesis, Materials Processing Research Centre, Dublin City University, Ireland, 2003.
54. Genetti, Albert J., Engineering and Design, Thermal Spraying: New Construction and Maintenance, 29 January 1999.
55. Ochoa C., Robell R. y Otro Autor, Aspectos Teóricos sobre el Desgaste Abrasivo en los Elementos de Trabajo de las Maquinas Agrícolas en Cuba, Wednesday 5 de November de 2003.
56. Suárez, M., Staia, M., E. Carrasquero, E. y González, W., Estudio sobre la Resistencia al Desgaste de Recubrimientos Depositados por Termorrociado Utilizando la Técnica HVOF, Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Vol. 19, N° 2, 2004, pp. 99 – 106.
57. Leonetti, Roberto, Desgaste de Cojinetes de Contacto Plano – 1 ° parte, Revista N ° 1, Junio 2000, pp. 6 – 8.
58. Genescá, Joan, Más Allá de la Herrumbre III. Corrosión y Medio Ambiente, 1995.

59. Cardellach R., Marta y Alcalá, Jorge, High temperature contact response of cemented carbides, Desgaste de Carburos Cementados, Proyecto de fin de carrera, ETSEIB-EEIGM.
60. Ahmaniemi, Samppa; Vuoristo, Petri and Mäntylä, Tapio, Corrosion and Wear Properties Corrosion and Wear Properties of Thermally Sprayed Oxide of Thermally Sprayed Oxide Coatings Coatings, Tampere University of Technology, EUROCERAM seminar, 27/10/2000.
61. Schubert & Salzer, Cavitación en Válvulas de Control, IBERICA, S.L. - Dpto. Técnico- Copyright 2002, pp.1 – 6.
62. Monterroso, C. y Macías, F., Aguas de Drenaje de Mina Afectadas por la Oxidación de Sulfuros. Variaciones Estacionales de su Composición, Edafología, Volumen 5, Diciembre 1998, pp. 71 – 82.
63. Van Dijk, Piet and Van Meijl, Frank; Contact Problems Due to Fretting and Their Solutions, AMP Journal of Technology, Vol. 5, June, 1996, pp. 14 – 18.
64. Horn, Jochen; Kourimsky, Fritz; Baderschneider, Kurt and Lutsch, Harald; Avoiding Fretting Corrosion, AMP Journal of Technology, Vol. 4, June, 1995, pp. 4 – 7.
65. Corman, Ned, Fretting Performance of Lead Free Surface Finishes, Tyco Electronics Test Report, 2004, pp. 1 – 4.
66. Tomanik, Eduardo e Baccaro N., Francisco E.; Modelamento do Desgaste por Deslizamiento em Anéis de Pistão de Motores de Combustão Interna, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para Obtenção do Título de Doctor em Engenharia, Julio 2000.
67. Kunot, M.; Dinsdale, K.; Pearsoni, B. R.; Ottewell, B. and Waterhouse, R. B.; A New Fretting Wear Test Apparatus, J. Phys. E: Sci. Instrum. 21, 1988, pp. 929 – 931.
68. Zhu, M. H. and Zhou, Z. R., An Experimental Study on Radial Fretting Behaviour, Tribology International 34, 2001, pp. 321 – 326.

Referencias Bibliográfica

69. Zhu, M. H. and Zhou, Z. R., An Investigation of Molybdenum Disulfide Bonded Solid Lubricant Coatings in Fretting Conditions, Surface and Coatings Technology 141, 2001, pp. 240 – 245.
70. Arnoldt, J. C. and Hutchings, I. M., A Model for the Erosive Wear of Rubber at Oblique Impact Angles, J. Phys. D: Appl. Phys. 25, 1992, pp. A222 – A229.
71. Smith, R.W. and Mohanty, M., Lightweight TiC/Ti Alloy Wear Resistant Coatings for Lightweight Materials in Aerospace Applications, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 73 – 77.
72. Daniel, R. L. and Sanders, H. L., Replacement of Environmentally Hazardous Corrosion Protection Paints on the Space Shuttle Main Engine Using Wire Arc Sprayed Aluminum, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 93 – 98.
73. Khor, K. A. and Cheang, P., Effect of Powder Feedstock Thermal Sprayed Hydroxyapatite Coatings, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 147 – 152.
74. Khor, K. A. and Cheang, P., Laser Post-Treatment of Thermally Sprayed Hydroxyapatite Coatings, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 153 – 157.
75. Eberhardt, A. W.; Zhou, C. and Rigney, E. D.; Bending and Thermal Stresses in a Fatigue Experiment of Hydroxyapatite Coated Titanium Rods, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 165 – 169.
76. Creffield, G. K.; Chapman, I. F.; Cole, M. A.; Page, W. J. and McDonough, T.; Process Gases for High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spraying, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 233 – 238.
77. Ramm, D. A. J.; Clyne, T. W.; Sturgeon, A. J. and Dunkerton, S.; Correlations Between Spraying Conditions and Microstructure for Alumina Coatings Produced by HVOF and VPS, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 239 – 243.
78. Di Lalla, N. y Tarulla, R., Avances en la Elaboración de Películas Selectivas por Pigmentación Electrolítica de Aluminio Anodinado, Avances

en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 6, N° 2, 2002, pp. 08.01 – 08.05.

79. Wiff, J. P.; Fuenzalida, V. M.; Pacheco, C.; Sandes, A.; Redígalo, M.; Jiménez, J.; Baier, J. and Genske, R.; Titanato de Calcio Hidrotermal como Recubrimiento Biocompatible sobre Implantes de Titanio, pp. MC – 123.

80. Learra, Alfonso R., Aleaciones Ligeras para Luminarias. Sus Tratamientos versus Corrosión, XXVIII Simposium Nacional de Alumbrado, A Coruña, 22 al 25 de Mayo 2002.

81. Ramos C., José M., Presencia de Contaminantes Químicos en Diferentes Procesos Industriales, Higiene Industrial, IBERMUTUAMUR, Septiembre 1999, pp. 39 – 49.

82. Gómez C., Julio, Producción Limpia en el Campo de los Tratamientos Superficiales, CIDETEC, Jornadas de Producción Limpia, Universidad de La Rioja Logroño, 20 Febrero 2004, pp. 1 – 43.

83. Guilemany C., José M.; Nin, J. y Dosta, S.; Estudio de las Propiedades de Recubrimientos WC-Co Nanoestructurados, Obtenidos Mediante Proyección Térmica de Alta Velocidad (HVOF), VIII Congreso Nacional de Materiales © SPUPV 2004, pp. 567 – 574.

84. Guilemany C., José M.; J. Nin, S. Dosta y Miguel, J. R., Obtención de Formas Autosostenidas de Nuevos Materiales Mediante Proyección Térmica HVOF, VIII Congreso Nacional de Materiales © SPUPV 2004, pp. 637 – 644.

85. Berndt, Marita L. and Berndt, Christopher C., Thermal Spray Coatings, 2003, pp. 1 – 11.

86. Ekberg, Anders, Wear – Some Notes, Dep. of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, 1997, pp. 1 – 22.

87. Cáceres S., Daniel, Estudio de las propiedades mecánicas en monocristales y láminas delgadas de MgO mediante la técnica de nanoindentación, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, 2002.

Referencias Bibliográfica

88. El Felk, Zakia, Estudio Morfológico y Estructural del Crecimiento Epitaxial de Capas de Si y Si_{1-y}C_y, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona.
89. Knudsen, Ole Ø.; Steinar T., Bjørn; Bjørgum, Astrid; Mårdalen, Jostein and Hallenstvet, Merete, Anodising as pre-treatment before organic coating of extruded and cast aluminium alloys, Corrosion Science, 46, 2004, pp. 2081 – 2081.
90. Bjørgum, Astrid; Lapique, Fabrice; Walmsley, John and Redford, Keith, Anodising as pre-treatment for structural bonding, International Journal of Adhesion & Adhesives, 23, 2003, pp. 401 – 412.
91. Cerveró, Manuel, Residuos con Materiales Procedentes de Procesos Galvánicos, Parte I: Procesos Galvánicos, Revista N.º 8, 1.er trimestre 2001.
92. Castaño L., Óscar, Síntesis y Caracterización de Láminas Delgadas Superconductoras de Altas Corrientes Críticas de YBa₂Cu₃O_{7-δ} Obtenidas por M.O.D., Universitat Autònoma de Barcelona, Tesis Doctoral, Abril 2004.
93. Li, Chengming; He, Qi; Tang, Weizhong and Lu, Fanxiu; Carburising of steel AISI 1010 by using a cathode arc plasma process, Surface & Coatings Technology, 187, 2004, pp. 1 – 5.
94. Cheikh Larbi, A. Ben; Cherif, A. and Tarres, M.A.; Improvement of the adhesive wear resistance of steel by nitriding quantified by the energy dissipated in friction, Wear, 258, 2005, pp. 712 – 718.
95. Zhechevaa, Ani; Shaa, Wei; Savko, Malinob and Longa, Adrian; Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods, Surface & Coatings Technology, xx, 2004, pp. xxx – xxx.
96. Škorić, B.; Kakaš, D.; Rakita, M.; Bibić, N. and Peruškob, D.; Structure, hardness and adhesion of thin coatings deposited by PVD, IBAD on nitrided steels, Vacuum, 76, 2004, pp. 169 – 172.

97. Miyata, S; Watanabe, T.; Muroga, T; Iwai, H.; Yamada, Y. and Shiohara, Y.; Effects of assisting and sputtering beams in IBAD method for a long tape fabrication, Physica, C 412 – 414, 2004, pp. 824 – 828.
98. Bilurbina A., Luis; Liesa M., Francisco y Iribarren L., José I.; Corrosión y Protección, UPC, 2003.
99. Comisión Ambiental Metro de México, Manual de Minimización, Tratamiento y Disposición, Marzo 1997.
100. Guilemany, J.M.; Navarro, J.; Miguel, J.M. y Lorenzana, C.; Optimización de Recubrimientos Abradables con Propiedades Autolubricantes Obtenidos Mediante Tecnologías de Proyección Térmica Plasma Atmosférico (APS), Junio 2002.
101. Centro de Proyección Térmica, Proyección Térmica en la Industria de Automoción y sus Componentes, CPT report, 2001, pp. 1 – 3.
102. Guilemany, J.M.; Nin, J. y Miguel, J.R.; Recubrimientos de Ni20Cr Obtenidos Mediante Proyección Térmica: Optimización Mediante Monitorización On-Line, CPT, Marzo 2004, pp. 1 – 7.
103. Guilemany, J.M.; Navarro, J.; Miguel, J. M.; Fernández, A.; Miguel, J.R. y Fernández, J.; Optimización de recubrimientos de Ni-Grafito con propiedades autolubricantes obtenidos mediante tecnologías de proyección térmica plasma atmosférico (APS), CPT, Mayo 2003, pp. 1 – 4.
104. Guilemany, J.M.; Nin, J. y Miguel, J.R.; Optimización On-line de procesos de obtención de recubrimientos por proyección térmica, CPT, Agosto 2002, pp. 1 – 15.
105. Guilemany, J. M.; Fernández, J.; Delgado, J. y M^a Demestre, J.; Recubrimientos de Acero Inoxidable Obtenidos por Proyección Térmica HVOF y su Resistencia a la Corrosión, CPT, Junio 2002, pp. 1 – 13.
106. Guilemany, J.M.; Espallargas, N.; Suegama, P.H. y Botifoll, A.; Estudio Comparativo de Recubrimientos de Cr₃C₂-NiCr obtenidos Mediante Proyección Térmica de Alta Velocidad (HVOF) Frente a Recubrimientos de Cromo Duro, CPT, Marzo 2004, pp. 1 – 7.

Referencias Bibliográfica

107. Guilemany, J. M.; Fernández, D. y Buchaca, E.; Evaluación de la resistencia a la corrosión y de las propiedades tribológicas de recubrimientos compuestos de matriz polimérica obtenidos por proyección térmica, CPT, Mayo 2003, pp. 1 – 4.
108. Benmessaoud, Alí, Caracterización de subóxidos de silicio obtenidos por la técnica PECVD, Universitat Autònoma de Barcelona, Tesis Doctoral, Diciembre 2001.
109. Guilemany, J.M. y Fernández, D.; Corrosion and tribological behaviour of polyamide-nitride composite coatings, CPT, Mayo 2005, pp. 1 – 4.
110. Pascual, M.; Ferrer, C; Cembrero, J y Perales, M.; Modificación superficial del acero F-1110 por proyección térmica de CW-Ni, VIII Congreso Nacional de Materiales © SPUPV, UPV, 2004, pp. 627 – 636.
111. Koon, Aw Poh, Low Friction Wear Resistant Composite Coating, Surface Technology Group, Process Technology Division, 2000, pp. 1 – 8.
112. Bousson, S.; Fouaidy, M.; Gassot, H.; Junquera, T.; Lesrel, J.; Borne, J. L. and Marini, J.; An Alternative Scheme For Stiffening SRF Cavities By Plasma Spraying, Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999. pp. 919 – 921.
113. Xua, J. L.; Khora, K. A.; Dongb, Z. L.; Guc, Y. W.; Kumarc, R. and Cheang, P.; Preparation and characterization of nano-sized hydroxyapatite powders produced in a radio frequency (rf) thermal plasma, Materials Science and Engineering A 374, 2004, pp. 101 – 108.
114. García Costales, F. E. y Cuetos Mejido, J. M., Recubrimientos de Proyección por Plasma, Encuentro de Tribología (20, 21 Septiembre 2001) Área de Ingeniería Mecánica, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, 2001, pp. 1 – 10.
115. Domingo Sánchez, Eka Chemicals, Producción de sílice para HPLC, SFC y SMB, Cromatografía, 2002, pp. 6, 27 – 28.
116. Cicoria R., Franco; Plaza E., David; Ugarte B., Cristóbal; Poblete, Victor y Pilleux, Mauricio; Recubrimientos duros de materiales, Universidad de Chile, 15 Junio 2001.

117. De la Torre, Juan Ramón, Tratamientos Térmicos Carreras desarrolla un nuevo equipo de recubrimientos duros por CVD, Boletín Tecnológico, N° 46, 4° Trimestre 2001.

118. Benavidez, E.; Caruso, R.; O. de Sanctis, O.; Pellegrini, N.; Frattini, A. y Trbojevich, R. ; Obtención y Caracterización de Recubrimientos de PZT por el Proceso Sol-Gel, CONICET, pp. 1 – 7.

119. Karoonboonyanan, Satit, Wear Characteristics and Wear Resistance of Thermal-sprayed Rotary Tiller Blades, Thesis, AIT 28 July 2004.

120. Da Silva B., Carlos A., Estudo da Interface Ti-6Al-4V/TiO₂ por Microscopia Eletrônica de Varredura, Universidade de Sao Paulo, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Sao Carlos 2000.

121. Espinoza B., Francisco J. y Hernández, Jesús G., Nuevos materiales superduros, Avance y Perspectiva vol. 21, Septiembre-octubre de 2002, pp. 346 – 354.

122. Caballero M., Jaime V., Películas Delgadas de Titanato de Bario Amorfo Depositadas sobre Silicio Oxidado, Universidad de Chile, Tesis Doctoral, Chile Diciembre 2002.

123. De Vries, S.; Rauhorst, J. W.; Plasse, B. & Kemeling, F.; What to do? Electroplating or Metal Spraying?, Technische Universiteit Delft, Artkel, IDE442 Materialiseren 1999, pp. 1 – 5.

124. Sun, L.; Berndt, C. C. and Gross, K. A.; Characterization and Mechanical Properties of Flame Sprayed Hydroxyapatite / Polymer Composite Coatings, Thermal Spray 2001, pp. 325 – 326.

125. Margadant, N.; Bürki, G. and Siegmann, S.; Towards Fracture Mechanics of Thermally Sprayed Metallic Coatings Using Indentation Technique for Edge Chipping on a Micron Scale, ITSC 2002 International Thermal Spray Conference, Essen, 2002, pp. 610 – 616.

126. Duarte, Luciana T.; Paula e Silva, Evando M.; Branco, Jose R.T. and Lins, Vanessa F.C.; Production and characterization of thermally sprayed polyethylene terephthalate coatings, Surface and Coatings Technology 182, 2004, pp. 261 – 267.

Referencias Bibliográfica

127. Kim, Hyung-Jun; Hwang, Soon-Young; Lee, Chang-Hee and Juvanon, Philippe; Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based Coatings, Surface and Coatings Technology 172, 2003, pp. 262 – 269.
128. Kahraman, Nizamettin and Gulenc, Behcet; Abrasive wear behaviour of powder flame sprayed coatings on steel substrates, Materials and Design 23, 2002, pp. 721 – 725.
129. Rodríguez, J.; Martín, A.; Fernández, R. and Fernández, J. E.; Communication An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings, Wear 255, 2003, pp. 950 – 955.
130. Volker, Höllein; Matthew, Thornton; Quicker, Peter and Dittmeyer, Roland; Preparation and characterization of palladium composite membranes for hydrogen removal in hydrocarbon dehydrogenation membrane reactors, Catalysis Today 67, 2001, pp.33 – 42.
131. Zhao, Lidong; Maurer, Matthias; Fischer, Falko and Lugscheider, Erich; Study of HVOF spraying of WC–CoCr using on-line particle monitoring, Surface & Coatings Technology 185, 2004, pp. 160 – 165.
132. Kear, B. H.; Skandan, G. and Sadangi, R. K.; Factors Controlling Decarburization In HVOF Sprayed Nano-Wc/Co Hardcoatings, Scripta mater. 44, 2001, pp. 1703 – 1707.
133. Dent, A.H.; Patel, A.; Gutleber, J.; Tormey, E.; Sampath, S. and Herman, H.; High velocity oxy-fuel and plasma deposition of BaTiO₃ and (Ba,Sr)TiO₃, Materials Science and Engineering B87, 2001, pp. 23 – 30.
134. Wang, Bu-Qian and Verstak, Andrew; Elevated temperature erosion of HVOF Cr₃Cr₂/TiC–NiCrMo cermet coating, Wear 233–235, 1999, pp. 342 – 351.
135. Li, Chang-Jiu and Li, Wen-Ya; Effect of sprayed powder particle size on the oxidation behavior of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition, Surface and Coatings Technology 162, 2002, pp. 31 – 41.

136. Zhao, Lidong; Maurer, Matthias; Fischer, Falko and Lugscheider, Erich; Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of HVOF coating of WC-CoCr, Wear 257, 2004, pp. 41 – 46.

137. Jia, Gang; Elkedimc, Omar and Grosdidier, Thierry; Deposition and corrosion resistance of HVOF sprayed nanocrystalline iron aluminide coatings, Surface & Coatings Technology 190, 2005, pp. 406 – 416.

138. Devi, M. Uma, Microstructure of Al₂O₃-SiC nanocomposite ceramic coatings prepared by high velocity oxy-fuel flame spray process, Scripta Materialia 50, 2004, pp. 1073 – 1078.

139. Nakajima, A.; Mawatari, T.; Yoshida, M.; Tani, K. and Nakahira, A.; Effects of coating thickness and slip ratio on durability of thermally sprayed WC cermet coating in rollingsliding contact, Wear 241, 2000, pp. 166 – 173.

140. Qiao, Yunfei; Fischer, Traugott E. and Dent, Andrew; The effects of fuel chemistry and feedstock powder structure on the mechanical and tribological properties of HVOF thermal-sprayed WC-Co coatings with very fine structures, Surface and Coatings Technology 172, 2003, pp.24 – 41.

141. Sari, N. Y. and Yilmaz, M.; Investigation of abrasive + erosive wear behaviour of surface hardening methods applied to AISI 1050 steel, Materials and Design xxx, 2004, pp. xxx – xxx.

142. Thomas, Keller; Margadant, Nikolaus; Pirling, Thilo; Riegert-Escribano, María J. and Wagner, Werner; Residual stress determination in thermally sprayed metallic deposits by neutron diffraction, Materials Science and Engineering A 373, 2004, pp. 33 – 44.

143. Planche, M. P.; Liao, H.; Normand, B. and Coddet, C.; Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes, Surface & Coatings Technology xx, 2004, pp. xxx – xxx.

144. Li, C. J.; Ohmori, A. and Harada, Y.; Formation of an Amorphous Phase in Thermally Sprayed WC-Co, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 5(1), March 1996, pp. 69 – 73.

Referencias Bibliográfica

145. Li, ChangJiu; Ohmori, A. and Harada, Y.; Effect of WC Particle Size on the Formation of HVOF Sprayed WC-Co Coatings, Proceeding of ITSC'95 Kote, May 1995, pp. 869 – 875.
146. Li, C. J.; Sonoya, K.; Ji, G.-C. and Wang, Y.-Y.; Effect of Power Type on the Relationship between Spray Parameters and Properties of HVOF Spray Cr₃C₂-NiCr Coatings, Proceeding of the 15th International Thermal Spray Conference, 25 – 29 May 1998, pp. 287 – 292.
147. Li, C. J. and Li, H.; Effect of WC–Co Addition on the Adhesion of HVOF Ni–based coatings, Proceeding of the 15th International Thermal Spray Conference, 25 – 29 May 1998, Nice, France, pp. 723 – 723.
148. Gangchang, Ji; Yuyue, Wang; Changjiis, Li and Sonaya, Keiji; Erosion Performance of HVOF Cr₃C₂-NiCr Coatings, International Conference on Advanced Manufacturing Technology, 1999, pp. 1277 – 1280.
149. Wang, Y. Y.; Li, C. J.; Wu, T. and Ohmori, A.; Factors Influencing the Adhesive Strength of HVOF Sprayed Coatings, 3rd International Conference on Surface Engineering, pp. 169 – 173.
150. Li, C.-J.; Wang, Y.-Y. and Ji, G.-C.; Between Abrasive Wear and Microstructure of HVOF Cermet Coatings, Thermal Spray 2003 Advancing the Science & Applying the Technology, (Ed.) C. Morea Published by ASM International Materials Park Ohio, USA 2003, pp. 434 – 441.
151. Babilius, A., Influence of Temperature on the Phases Changes of HVOF Sprayed Tungsten Carbide Coatings, ISSN 1392 – 1320 Materials Science (Medziagotyra). Vol. 9, No. 3, 2003, pp. 183 – 186.
152. Schiefler Filho, M. F. O.; Buschinelli, A. J. A.; Gärtner, F.; Kirsten, A.; Voyer, J. and Kreye, H.; Influence of Process Parameters on the Quality of Thermally Sprayed X46Cr13 Stainless Steel Coatings, ABCM, January-March 2004, Vol. XXVI, No. 1, pp. 98 – 106.
153. Stokes, J. and Looney, L.; HVOF system definition to maximise the thickness of formed components, Surface and Coatings Technology 148, 2001, pp. 18 – 24.

154. Kawakita, Jin; Fukushima, Takeshi; Kuroda, Seiji and Kodama, Toshiaki; Corrosion behaviour of HVOF sprayed SUS316L stainless steel in seawater, Corrosion Science 44, 2002, pp. 2561 – 2581.
155. Sundararajan, T.; Kuroda, S.; Itagaki, T. and Abe, F.; Steam Oxidation Resistance of Ni–Cr Thermal Spray Coatings on 9Cr–1Mo Steel. Part 1: 80Ni–20Cr, ISIJ International, Vol. 43, 2003, No. 1, pp. 95 – 103.
156. Michels, D.; Hadelor, J. and Lienhard V., J. H.; High Heat Flux Resistance Heaters from VPS and HVOF Thermal Spraying, Experimental Heat Transfer, Vol. 11, 1998, pp. 1 – 29.
157. Jin, Kawakita; Kuroda, Seiji and Fukushima, Takeshi; Acid Resistance of HastelloyC Coatings Formed by Modified HVOF Spraying with A Gas Shroud, JCSE The Journal of Corrosion Science and Engineering, Volume 6, Paper C047, pp. 1 – 17.
158. Guilemany, J. M.; Miguel, J. M.; Armada, S.; Vizcaino, S and Climent, F.; Use of scanning white light interferometry in the characterization of wear mechanisms in thermal-sprayed coatings, Materials Characterization 47, 2001, pp. 307 – 314.
159. Brandt, O. C.; Siegmann, S. and Isch, H.-P.; HVOF-and VPS-Coatings Using Nanostructured Iron-Based Alloys, 1st United Thermal Spray Conference – Thermal Spray: A United for Scientific and Technological Advances, Indianapolis, 1997, pp. 875 – 876.
160. Bousson, S.; Fouaidy, M.; Gassot, H.; Junquera, T.; Scornet, J-C.Le and Lesrel, J.; IPN, Orsay, France; SRF Cavity Stiffening By Thermal Spraying, Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria, pp. 2043 – 2045.
161. Bernard, D.; Yokota, O.; Grimaud, A.; Fauchais, P.; Usmani, S.; Chen, Z. J.; Berndt, C. C.; and Herman, H.; Mechanofused Metal-Carbide-Oxide Cermet Powers for Thermal Spraying, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 171 – 178.
162. Knotek, O.; Lugscheider, E.; Jokiel, P.; Schnaut, U. and Wiemers, A.; Chromium Coatings by HVOF Thermal Spraying: Simulation and Practical Results, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 179 – 184.

Referencias Bibliográfica

163. Shaw, K. G.; Gruninger, M. F. and Jarosinski, W. J.; Chromium Coatings by HVOF Thermal Spraying: Simulation and Practical Results, Thermal Spray Industrial Applications, 1994, pp. 185 – 190.
164. Feliu, Sebastián y Andrade, Carmen; Corrosión y Protección Metálicas, Consejo Superior de investigación Científicas, Vol. I, 1991.
165. Marcus, Philippe; Corrosion Mechanisms in Theory and Praticce, 2002.
166. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Corrosión, 1999.
167. Chawla, Sohan and Gupta, Rajeshwar; Materials Selection for Corrosion Control, 1993.
168. Fontana, Mars; Corrosion Engineering, 1988.
169. Molera S., Pere, Metales Resistentes a la Corrosión, 1990.
170. Mills, B. and Redford, A. H.; Machinability of Engineering Materials, 1983.
171. Feirer, John L. y Lindbeck, John R.; Metal Tecnología y Proceso, 2000.
172. Malishev, A.; Nikolaiev, G. y Shuvalov, Y.; Tecnología de los Metales, 1994.
173. Mangiavacca, Marcello; La matriz: Influencia del tratamiento térmico y prestaciones que se pueden obtener, Moldes, 2005, pp. 22 – 26.
174. Coca R. Pedro y Rosique J., José; Conocimiento de Materiales (Teoría, Ensayo y Tratamiento de los Mismos), Editorial COSMOS, 1971.
175. Dpto. de CONSULTING TÉCNICO – METALÚRGICO de TEY, S. L., Tratamientos de endurecimiento superficial. Nitruración con tecnología PULSE- PLASMA, Moldes, 2005, pp. 36 – 40.
176. Ferrer G., Carlos y Amigó B., Vicente; Características Mecánicas de los Materiales, Tomo II, Universidad Politécnica de Valencia, 1993.

177. Ferrer G., Carlos y Amigó B., Vicente; Tecnología de Materiales, Tomo I, Universidad Politécnica de Valencia, 1998.
178. Sárkar, A. D.; Desgaste de Metales, 1990.
179. Casanovas, Jordi y Alemán, Carlos; Introducción a la Ciencia de los Materiales, 2002.
180. Pero-Sanz E., José A.; Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2000.
181. Ferrer G., Carlos; Amigó B., Vicente; Salvador M. Dolores M.; Cárcel G., Alfonso C. y Segovia L., Emilio F.; Fundamentos de Ciencias de los Materiales, Tomo II, Universidad Politécnica de Valencia, 2000.
182. Apraiz B., José; Tratamientos Térmicos de los Aceros, 2002.
183. Smith, William F.; Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, 1997.
184. Reina G., Manuel; Soldadura de los Aceros, Weld-Work, S. L., 2003.
185. Michaeli, W.; Wegener, M. y Capella, F.; Tecnología de los Composites / Plásticos Reforzados, 1992.
186. Illig, Adolf; Thermoforming, A Practical Guide, HANSER, 2001.
187. Michaeli, Walter; Greif, Helmut; Kaufmann, Hans y Vossebürger, Franz-Josef ; Tecnología de los Plásticos, 2000.
188. DeGarmo, E. Paul; Black, J. Temple y Kohser, Roser A.; Materiales y Procesos de Fabricación, Vol. 2, 2002.
189. Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven R.; Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Prentice Hall Inc., 2002.
190. Muccio, Edward A.; Plastics Processing Technology, ASM International, 1997.
191. Palmer, Frank R.; Luerssen, George V. y Pendleton, Joseph S.; Acero para Herramientas, 1986.

Referencias Bibliográfica

192. Bayer, Raymond G.; Design for Wear Resistance, ASM Handbook, Materials Selection and Design, Vol. 20, 1997, pp. 603 – 614.
193. Mangonon, Pat L.; Ciencia de Materiales, Selección y Diseño, 2001.
194. Lasheras E., José M. y Sánchez-Marín P., José M.; Tecnología de los Materiales Industriales, 1971.
195. Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R.; Diseño en Ingeniería Mecánica, 2002.
196. Pérez B., Joseba; Alberdi, Goretti y López, Patxi, Herramientas para Mecanizado a Alta Velocidad, Centro de Aplicaciones del Mecanizado de Alta Velocidad de Tekniker, 2004.
197. Crawford, R. J.; Plastics Engineering, 2001.
198. Morral, F. R., Jimeno, E. y Molera, P; Metalurgia General, Tomo 2, Editorial Reverte, 1985.
199. Hernández R., Germán; Manual del Soldador, 2002.
200. Rodríguez S., David; Soldadura, Tecnología y Técnica de los Procesos de Soldadura, 2002.
201. Philip, Mathew and Bolton, Bill; Technology of Engineering Materials, Butterworth – Heinemann, 2002.
202. Jacobs, James A. and Kilduff, Thomas F.; Engineering Materials Technology, Structures, Processing, Properties and Selection; Prentice Hall, 2001.
203. UNE 112-023-94, Tratamientos de superficie y recubrimientos metálicos, Clasificación general de térmicos, Enero 1994, pp. 1 – 2.
204. Coca R. Pedro y Rosique J., José; Ciencia de los Materiales (Teoría, Ensayos y Tratamientos), Editorial COSMOS, 1976.

205. UNE-EN 13507, Proyección térmica, Tratamiento previo de las superficies de piezas metálicas y componentes para proyección térmica, Enero 2002, pp. 1 – 12.
206. Stüdemann, Hans y Zaluskowski, L. Calvo; Ensayo de Materiales y Control de Defectos en la Industria del Metal, Manuales del Ingeniero, Vol. III, Urmo, S. A., 1979.
207. Coca R. Pedro y Rosique J., José; Tecnología Mecánica y Metrología, 1969.
208. Arias S., Héctor y Laceras E., José; Tecnología Mecánica y Metrotecnica, 1964.
209. Camarero de la T., Julián y Martínez P., Arturo; Matrices Moldes y Utillajes, 2003.
210. ASM, Forming, Metals Handbook, Vol. 4, 1969.
211. Rossi, Mario; Estampado en Frío de la Chapa, Editorial DOSSAT, S. A., 1979.
212. Apraiz B., José; Aceros Especiales y otras Aleaciones, 1971.
213. Fortinox, Aceros Especiales, Copyright © Fortinox, S. A., Una empresa del grupo ThyssenKrupp Services, 2003.
214. ASM, Welding and Brazing, Metals Handbook, Vol. 6, 1971.
215. Giachino, Joseph W. y Weeks, Willian; Técnica y Práctica de Soldadura, 2001.
216. Cueto, José; Manual de Soldadura MIG – MAG (Hilo Continuo), Editorial Técnica CEYSA, 2002.
217. Esteller L., Gabriel; Ramos de C., José A.; García M., Adolfo y Ortiz U., Jesús M. S.; Recuperación de Matrices para Forja mediante Recubrimiento con Técnica Láser, 2004, pp. 1 – 5.

Referencias Bibliográfica

218. Martínez B., Manuel A.; Palacios, José M. y Sánchez C., Rodolfo; Procesos de nitruración aplicados a matrices para la extrusión en caliente del aluminio y sus aleaciones (1ª parte), Moldes, 2005, pp. 43 – 48.
219. Venteo, Leoncio; Propiedades de los Materiales, 2001, pp. 1 – 8.
220. Escudero, Javier; Estructura, 2000.
221. Zolotarevski, V.; Pruebas Mecánicas y Propiedades de los Metales, Editorial Mir Moscú, 1976.
222. Martínez B., Manuel A. y Palacios, José M.; Algunas Consideraciones sobre los Aceros de Herramientas, su utilización y Tratamiento Térmico, Tratamiento Térmico, 2005, pp. 31 – 44.
223. UNE-EN ISO 4516, Recubrimientos Metálicos y otros Recubrimientos no Orgánicos, Ensayos de Microdureza Vickers y Knoop (ISO 4516:2002), Diciembre 2002, pp 1 - 20.
224. UNE-EN ISO 6507-1, Materiales Metálicos, Ensayo de Dureza Vickers, Parte 1: Método de Ensayo (ISO 6507-7-1:1997), Octubre 1998, pp. 1 - 115.
225. Esteller L., Gabriel; Aceros de Herramientas en la Fabricación de Moldes y Matrices, Centre de Disseny d'equips industrials CDEI-UPC, 2001.
226. UNE-EN ISO 4957, Aceros Herramientas, Julio 2000, pp. 1 – 2.
227. UNE-EN ISO 4957, Aceros Herramientas, Noviembre 2001, Erratum, pp. 1 – 38.
228. UNE-EN 1274, Proyección Térmica, Polvo, Composición, Condiciones Técnicas de Suministro, Diciembre 1996, pp. 1 – 28.
229. Castolin Eutectic, Aleaciones Micropulverizadas para Proyección Térmica en Frío y a Fusión, con los Sopletes CDS 8000 y RotoTec 80, 2005.

230. Castolin Eutectic, Eutalloy SuperJet, Manual de Utilización y Piezas de Repuesto, 2005.
231. Castolin Eutectic, Aleaciones Micropulverizadas para Recargues de Protección Anti-Desgaste Realizados por Proyección y Fusión, 2001.
232. UNE-EN 657, Proyección Térmica, terminología, Clasificación, Abril 1996, pp. 1 – 18.
233. UNE-EN ISO 9220, Recubrimientos Metálicos, Medida del Espesor del Recubrimiento, Método de Microscopía de Barrido (ISO 9229:1988), Octubre 1996, pp. 1 - 16.
234. UNE-EN 14923, Proyección Térmica, Caracterización y Ensayo de los Recubrimientos por Proyección Térmica, Mayo 2004, pp. 1 – 19.
235. ASTM B 748 – 90 (Reapproved 2001), Standard Test Method for Measurement of Thickness of Metallic Coating by Measurement of Cross Section with a Scanning Electron Microscope, 02 – 23 – 1990, pp. 1 – 4.
236. ASTM E 1920 – 97, Standard Guide Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings, 12 – 10 – 1997, pp. 1 – 5.
237. ASTM G 99 – 03, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, 05-10-2003, pp. 1 – 5.
238. ASTM F 1375 – 92, Standard Test Method for Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDX) Analysis of Metallic Surface Condition for Gas Distribution System Components, 1999, pp. 1 – 4.
239. UNE-EN 13477-1, Ensayo no Destructivos, Emisión Acústica, Caracterización del equipo, Parte 1: Descripción del Equipo, Septiembre 2001, pp. 1 – 12.
240. UNE-EN 13477-2, Ensayo no Destructivos, Emisión Acústica, Caracterización del Equipo, Parte 2: Verificación de las Características de Funcionamiento, Septiembre 2001, pp. 1 – 18.

Referencias Bibliográfica

241. UNE-EN 1330-9, Ensayo no Destructivos, Terminología, Parte 9: Términos Utilizados en Ensayos por Emisión Acústica, Mayo 2000, pp. 1 – 16.
242. UNE-EN 13554, Ensayo no Destructivos, Emisión Acústica, Principios Generales, Octubre 2002, pp. 1 – 18.
243. ASTM E 3 – 01, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, 04-10-2001, pp. 1 – 12.
244. Wikipedia La Enciclopedia Libre, <http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>, Página Web en Internet, 2007.
245. Hayden, Wayne; Moffatt, William G. y Wulff, John; Propiedades Mecánicas, Editorial Limusa, 1982.
246. Jankovich, John Pad; Structural Development of Bone in the Rat Under Earth Gravity, Simulated Weightlessness, Hypergravity and Mechanical Vibration; National Aeronautics And Space Administration (NASA), Contract or Report; 1972. pp 33 – 37.
247. Gundlach, Carsten; Recovery in aluminium; Ph.D. thesis; University of Copenhagen; March, 2006; pp. 23 – 24.
- 248 Podchibiakin, D.; Marks, E.; Nanclares, J.; Rapallini, U.; Faure, O. y Ansaldi, J.; Comparación de Diferentes Métodos de Medición de la Impronta de la Imagen de Microdurómetros; Jornadas Sam/ Conamet/ Simposio Materia 2003, p. 1070 – 1082.
249. Prat Bartés, Albert; Tort-Martorell Llabrés, Xavier; Grima Cintas, Pere y Pozueta Fernández, Lourdes; Métodos Estadísticos Control y Mejora de la Calidad, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 1995.
250. Montgomery, Douglas C. y Runger, George; Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería; McGraw-Hill, 1996.
251. Hicks, Charles R.; Fundamental Concepts in the Design of Experiments, Holt, Rinehart and Winston, March ,1973.

252. Navidi, William; Estadística para Ingenieros y Científicos, McGraw-Hill, 2006.
253. Romero Villafranca, Rafael; Zúnica Ramajo, Luisa Rosa; Estadística (Proyecto de Innovación Educativa), Universidad Politécnica de Valencia, 1993.
254. Novo Sanjurjo, Vicente; Problemas de Cálculo de Probabilidades y Estadística, Universidad Nacional de Educación a Distancia – Madrid, 1993.
255. Montgomery, Douglas C., Control Estadístico de la Calidad, Limusa Wiley, 2004.
256. Little, Thomas M. y Hills, F. Jackson, Métodos Estadísticos para la Investigación en la Agricultura, Editorial Trillas, 1990.
257. Rodríguez del Ángel, Jaime Moisés, Métodos de Investigación Pecuaria, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Editorial Trillas, 1991.
258. Emilio, Luís y Márquez, Castillo; Introducción a la Estadística Experimental, Universidad Autónoma Chapingo, 2003.
259. Pascual G., Manuel, Investigación de la Adherencia en la Interfase Aceros de Moldeo con Capas Cerámicas de WC-Ni, Cr-Ni-Mo, Depositadas por Proyección Térmica, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2005.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MATERIALES

INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ADHERENCIA SOBRE MATRICES DE EMBUTICIÓN DE ACERO F-1110, Y ANÁLISIS MEDIANTE ENSAYOS DE EMISIÓN ACÚSTICA, DE RECUBRIMIENTOS DE NÍQUEL-ÓXIDOS Y CARBUROS CERÁMICOS, APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA, Y DE LAS CARACTERÍSTICAS ADHESIVAS CON ALEACIONES METÁLICAS DE EMBUTICIÓN.

APÉNDICE

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR: D. PEDRO ANTONIO MAITA

DIRIGIDA POR:

Dr. D. CARLOS FERRER GIMÉNEZ

Dr. D. MANUEL PASCUAL GUILLAMÓN

VALENCIA, 2007

Índice del Apéndice

	Página
Título	451
Índice del Apéndice.....	453
Apéndice.....	455
A.1. Casos de Aplicaciones Concretas.....	455
A.2. Tablas de Investigaciones de Flame Spray y HVOF Spray....	461
A.3. Aceros Aleados de Herramientas para Trabajo en Frío.....	472
A.4. Experimentos.....	474
A.4.1. Experimentos de Proyección Térmica.....	474
A.4.2. Experimentos Tribológicos.....	574
A.4.3. Experimentos de Metalografía, Fractografía y Microanálisis.....	614

Apéndice

A.1. Casos de Aplicaciones Concretas.

En la Tabla A.1. desde la A a la F se muestran algunos ejemplos concretos ilustrativos, indicándose el método, dependiendo del tipo de recubrimiento superficial, con los objetivos de recuperar, reparar, decorar y asegurar la producción en serie, en sectores industriales y afines.

Tabla A.1.A. Aplicaciones Concretas.


Aplicación	Requisitos							Espesor [µm]	Recubrimiento / Sustrato	Método	Referencia
	Desgaste					Corrosión					
	Abrasión	Adhesión	Fretting	Erosión	Cavitación	Húmeda	Seca				
 <p style="text-align: center;">Matrices</p> <p style="text-align: center;">Alabes</p>	√	√		√	√	√	√	≤ 20	CrN / HSS, Metal duro, Acero inoxidable (AISI 420), Acero de trabajo en caliente (F-5318), Aceros pretratados	PVD	1, 3, 7, 10, 55, 72

Tabla A.1.B Aplicaciones Concretas.

Aplicación	Requisitos							Espesor [µm]	Recubrimiento / Sustrato	Método	Referencia		
	Desgaste					Corrosión							
	Abrasión	Adhesión	Fretting	Erosión	Cavitación	Húmeda	Seca						
 <p>Postizos</p>  <p>Tijeras</p>  <p>Moldes</p>  <p>Fresas</p>  <p>Bujes</p>  <p>Matrices</p>		√	√					√	1 – 5	TiAlN / Metal duro	PVD	1, 3, 13, 38	
 <p>Matrices</p>	√	√					√	√	√	1 – 5	TiCN / Acero de trabajo en frío (F-520 A), HSS, Metal duro	PVD	1, 3, 8, 13, 29
 <p>Molde</p>	√							√	3 – 10	TiC / Acero inoxidable, Aceros pretratados	CVD	13, 14, 29	
 <p>Molde</p>	√	√					√	√	√	3 – 10	TiC – TiCN – TiN / Acero inoxidable, Aceros pretratados	CVD	9, 13, 14, 29

Tabla A.1.C. Aplicaciones Concretas.

Aplicación	Requisitos							Espesor [µm]	Recubrimiento / Sustrato	Método	Referencia	
	Desgaste					Corrosión						
	Abrasión	Adhesión	Fretting	Erosión	Cavitación	Húmeda	Seca					Efecto Decorativo
 Fresa  Matriz  Punzones  Molde  Anillos	√	√				√	√	√	1 – 5	TiN / Acero de trabajo en frío (F-520 A), HSS, Metal duro, Acero inoxidable (AISI 420), Acero de trabajo en caliente (F-5318, F-5211), Acero pretratados	PVD	1, 3, 11, 13, 29, 38
 Matriz de embutición	√	√				√	√	√	10	TiC-TiCN / Acero de trabajo en frío (1.2379)	CVD	2, 13, 14, 29
 Matrices de Conformado  Troquel	√	√				√	√	√	8	TiC – TiN / Acero de trabajo en frío. (F-520 A, F-5227, F-5229)	CVD	1, 2, 9, 13, 14, 29, 117
 Inyector	√					√	√		200 – 1000	ZrO / YO / CeO / Acero	APS	13
 Matriz de conformado	√	√				√	√	√	8	TiC-TiCN / HSS (1.3343)	CVD	2, 13, 14, 29

Tabla A.1.D. Aplicaciones Concretas.











Aplicación	Requisitos							Espesor [μm]	Recubrimiento / Sustrato	Método	Referencia
	Desgaste					Corrosión					
	Abrasión	Adhesión	Fretting	Erosión	Cavitación	Húmeda	Seca				
 Aro  Bielas  Rotores  Placas  Ventilador  Disco  Rodillos  Rodillos		√	√	√	√			100 – 500	WC / Co / Metal y cerámica refractaria , súper aleación	HVO F Spray	18, 47, 50, 56, 71
 Camisas y Émbolos  Turbina  Rodillos  Pernos	√					√	√	200 – 1000	TiO ₂	APS	13, 15, 18
 Guías  Barras Guías  Rodillos	√	√				√	√	200 – 1000	Al ₂ O ₃ / TiO ₂	APS	15, 18, 40, 44, 60

Tabla A.1.E. Aplicaciones Concretas.















Aplicación	Requisitos							Espesor [μm]	Recubrimiento / Sustrato	Método	Referencia	
	Desgaste					Corrosión						
	Abrasión	Adhesión	Fretting	Erosión	Cavitación	Húmeda	Seca					Efecto Decorativo
 <p>Casquillos Bobina Columnas Camisa Poleas Turbina</p>	√	√		√	√	√	√	√	200 – 1000	Cr_2O_3	APS	15, 18, 55, 72
 <p>Cabezales de Pistones Cámara Colector Válvulas</p>	√					√	√	200 – 1000	$\text{ZrO}_2 / \text{CaO} / \text{Acero}$	APS	13	
 <p>Secador Válvula Hélice Tornillo Sinfin Hélice Tubos Émbolo</p>	√	√				√	√	200 – 1000	Al_2O_3	APS	13, 15, 18, 40, 44	

Tabla A.1.F. Aplicaciones Concretas.

Aplicación	Requisitos							Espesor [µm]	Recubrimiento / Sustrato	Método	Referencia	
	Desgaste					Corrosión						
	Abrasión	Adhesión	Fretting	Erosión	Cavitación	Húmeda	Seca					Efecto Decorativo
 Rodillo	√					√	√		200 – 5000	NiAl	EAW S	15, 18, 40
 Bielas y Camisas	√	√		√	√	√	√	√	200 – 1000	Cr2O3 – TiO2	APS	15, 18, 55, 60, 72
 Rodillos	√	√		√	√	√	√	√	200 – 5000	Acero 13% Cr	EAW S	13, 15, 18, 55, 72
  Tornillo Sinfin Pistones  Válvulas   Bielas y Obturadores Bielas	√	√		√	√	√	√	√	200 – 5000	NiCrMo	EAW S	13, 15, 18, 55, 72
   Anillos Cámara Alabes	√					√	√		200 – 1000	ZrO2 / Y2O3 / Acero	APS	13

A.2. Tablas de Investigaciones de Flame Spray y HVOF Spray.

En las Tablas A.2.1. de A – D y A.2.2. de A – H se muestran las referencias de investigaciones considerándose en la Tabla A.2.1. los trabajos sobre flame spray y en la Tablas A.2.2. las variables del proceso y del recubrimiento sobre flame spray y HVOF spray:

Tabla A.2 1.A. Referencias de investigaciones sobre los trabajos FS.

Objetivos	Metodologías	Resultados	Ref.
Evaluar la resistencia a la corrosión y las propiedades tribológicas de capas de polímeros.	LS, MOCC, SEM, AI, RW y SSF.	Se obtiene la resistencia a la corrosión si hay % alto de Al ₂ O ₃ y lo contrario si el % alto es de poliamida 11, por el aislamiento de éste. La temperatura de precalentamiento del sustrato afecta la resistencia a la abrasión.	107
Estudiar proyección por llama de mezcla de polvo de poliamida con volúmenes diferentes de Si ₃ N ₄ y BN.	LS, BoD, SEM, OM, SWLI, RW y SSF	Los coeficientes de fricción aumentan con la carga pero disminuyen con los volúmenes de Si ₃ N ₄ y BN. La resistencia al desgaste abrasiva baja con la cantidad de relleno. La resistencia a la corrosión no se afecta por la cantidad de relleno.	109
Modificar la superficie del acero F-1110 por flame spray de CW-Ni.	Adherencia a cizalladura y a tracción, HV y desgaste por rozamiento.	Modificación del acero F-1110 por FS de CW-Ni. Aumento de HV en el acero. El comportamiento es superior al menor espesor de recubrimiento. A mayor rugosidad en el sustrato más esfuerzo soporta	110
Modificar recubrimientos obtenidos por proyección térmica mediante haces de alta densidad energética.	OM, SEM, HV, Horno eléctrico, Energía solar y EDS para Análisis químico por microsonda.	Se modificaron las capas obtenidas por FS, disminuyéndose la porosidad del recubrimiento a través de: a.) Haces de alta densidad energética. b.) Energía solar. Las aplicaciones de la capa, en hornos eléctricos, requiere de una atmósfera protectora, que impida reacciones químicas que alteren su aspecto y afecten sus propiedades.	20
Estudiar la producción y caracterización por proyección térmica de las capas de polietileno tereftalato.	SEM, OM, DSC, FTIR, XRD, IV y Prueba de corrosión.	Se pueden producir por FS capas de PET. Con el precalentamiento se afecta la capa, fundición y degradación de las partículas PET, pero ocurre la mayor unión de estas. Según las técnicas analíticas la degradación del PET se debe al proceso FS y a un mecanismo de fractura de cadena, manteniéndose la estructura química y reduciéndose el peso molecular. Es posible la degradación del PET, la corrosión, la picadura y el aumento de calor en las muestras sumergidas en gasolina, aceite y alcohol no ocurren.	126

Tabla A.2 1.B. Referencias de investigaciones sobre los trabajos FS.

Objetivos	Metodologías	Resultados	Ref.
Investigar las propiedades mecánicas y caracterizar las capas de HA / polímero por flame sprayed.	SEM, XRD, Prueba de tracción (ASTM D638-98).	Las capas de HA/EMAA por FS tienen buena adherencia y dureza, elevado módulo Young, y biocompatibilidad. Con el %HA la biocompatibilidad y el módulo de la capa aumenta y el alargamiento disminuye. La superficie de fractura de las capas se inició en las partículas HA y la cohesión pobre entre las partículas de HA y la matriz de EMMA no se transfiere el esfuerzo durante la prueba de tracción. Durante la proyección hay pérdida de HA formándose capas heterogéneas y reducida en la proporción de HA / EMMA.	124
Estudiar las mecánicas de fractura de capas metálicas por proyección térmica usando técnica de indentación de prueba de impacto en escala micro.	SEM, HV, HR, Prueba de impacto.	En dimensión micro se puede aplicar la prueba de impacto en las capas de propiedades anisotrópicas paralela y perpendicular a la superficie del sustrato. La distancia de fractura del borde y la fuerza cortante es el criterio mejor para caracterizar la dureza del borde de las capas. El método de prueba de impacto es más conveniente para capas cerámicas.	125
Estudiar experimentalmente la acción del desgaste de capas de NiCrBSi por proyección térmica.	HV y PoD	Las aleaciones de NiCrBSi depositadas por FS: a.) Mantiene las acciones de resistencia al desgaste hasta temperaturas > 500 °C. b.) Con fusión tienen mejor resistencia al desgaste que las depositada por PS. c.) La presencia de WC en los polvos no es beneficioso en la acción de desgaste. La carga es más influyente que la temperatura en los rangos analizados.	129
Investigación de métodos de endurecimiento superficiales y el comportamiento de los desgastes erosivo y abrasivo en el acero AISI 1050.	HV, SEM, EDX y Prueba de desgaste abrasiva.	En el material cerámico pueden aparecer micro-grietas aumentando el desgaste por el impactos de las partículas, se observa en las muestras con nitruración y boronización. La resistencia de desgaste: 1.) Puede aumentar en capas de materiales compuestos proyectada. En la proyección por llama, la pérdida de peso en el sustrato disminuye en un: a.) 59 % en el Ni-Cr-B-Si, b.) 61 % en el WC-Ni-Cr-B-Si, c.) 69% en el Cr-Ni-B-Si y d.) 80% en el 35%WC+65%(Cr-Ni-B-Si). 2.) En el sustrato aumenta en el 3,36 %, poniéndole en la proyección 35% WC. La característica de desgaste es afectada por la energía sobre la capa en el sustrato durante y después de la proyección. Cualquier aumento de energía causa difusión entre capa y superficie, incrementándose la adherencia y anulándose entre las capas superpuesta, pudiéndose eliminar el desgaste y dar mejor penetración, lograda por proceso de fusión después de la proyección.	141

Tabla A.2 1.C. Referencias de investigaciones sobre los trabajos FS.

Objetivos	Metodologías	Resultados	Ref.
Evaluar en la proyección por llama, la acción del desgaste y las capas fundida en base Ni.	OM, XRD, SEM, EDS, WDS, HV, RW, EPMA, PoD, Horno y Prueba de desgaste Sugaru.	La capa de 35 % WC con NiCrBSiC mostraron la mejor calidad en términos de dureza y porosidad. La resistencia al desgaste es mejor con WC del: a.) 25 % en la prueba de Sugaru. b.) 40 % en la prueba RW con arena seca. La resistencia al desgaste deslizante seco de capas compuestas WC–NiCrBSiC con 20 % (y / o 30 %) es mejor \approx 10 veces que la del sustrato de acero.	127
Evaluar el esfuerzo residual en proyección térmica de depósitos metálico por difracción neutrónica.	XRD, Prueba de flexión y Difracción neutrónica.	En la proyección de NiCrAlY los esfuerzos residuales se determinan por difracción neutrónica, transformándose en resultados espaciales que dan el estado del esfuerzo dentro del sistema depósito y sustrato. En las diferentes técnicas de proyección, los esfuerzos residuales son similares en la capa y en el espesor del sustrato, difiriendo de otros en el esfuerzo medio y magnitud del gradiente de esfuerzo.	142
Investigar las relaciones entre las características de las partículas de NiCrBSi y las propiedades de la capa usando diferentes procesos de proyección térmica.	SEM y XRD	Las capas de NiCrBSi pueden proyectarse por: llama, plasma y HVOF. Los datos del DPV 2000, indican que el diámetro más grande da una temperatura más baja y la velocidad más baja para cada proceso, y permaneciendo la temperatura por encima de la de fusión en todos los casos. La velocidad de partícula más alta se da en HVOF y está a más de 10 veces por encima de la dada por llama y \approx 3 por encima que la de plasma. Con el DPV 2000, la temperatura y la velocidad se usaran para las correlaciones entre las propiedades de las partículas y las características de la capa como microestructura, porosidad, nivel de óxido, composición de la fase, dureza, adherencia y módulo Young. La estructura de capa por llama es amorfa, la morfología cristalizada presentada por plasma y HVOF está relacionada a la solidificación de las partículas en el sustrato. Las propiedades de las capas de HVOF como dureza, porosidad o módulo Young son mejores que las capas por llama o plasma.	143
Investigar el comportamiento del desgaste abrasivo de capas de polvos de proyección por llama sobre sustratos de acero.	HV, HR, Ra y SEM.	La velocidad de rapidez de desgaste en las probetas disminuyo después de un tiempo. Cuando los parámetros, excepto la entrada de calor, cambiaron, la resistencia al desgaste en las probetas caliente aumento. La resistencia al desgaste abrasivo de las capas FS dependen de la composición química, de las características del material y condiciones del recubrimiento. No hubo diferencia marcada entre las microestructuras de las capas frías y calientes.	128

Tabla A.2 1.D. Referencias de investigaciones sobre los trabajos FS.

Objetivos	Metodologías	Resultados	Ref.
<p>Realizar un análisis e investigación sobre el comportamiento tribológico y adherente en la interfase de aceros de moldeo y los recubrimientos de carburo de tungsteno WC-Ni y aleación de Cr-Ni- Mo, obtenidos mediante la proyección térmica, puesto que estos tipos de recubrimientos superficiales se pueden considerar como una fuente de alternativa s a procedimientos ya instituidos, por su gran sencillez de aplicación en el contexto industrial, y aplicados a numerosos campos tales como recargues, recubrimientos empleados en prótesis para uso médico, industria naval, etc.</p> <p>Observar el comportamiento de adherencia y de desgaste de la fundición gris, comparándolos con aceros de forja (al carbono), mediante proyección térmica de carburo de tungsteno y aleación Cr-Ni-Mo a partir de su microestructura y de sus características resistentes.</p>	<p>Adherencia a cizalladura y a tracción, HV y desgaste por rozamiento (PoD), MO, SEM, EDS.</p>	<p>El carburo de tungsteno WC-Ni tiene un comportamiento superior en cuanto a dureza y desgaste que la aleación Cr-Ni-Mo. Se verifica a través del ensayo de cizalladura que la mejor respuesta resultó para el recubrimiento de WC-Ni, depositado por proyección térmica por llama sobre sustrato de fundición gris, cuando las variables respuestas son las tensiones de rotura a cizalladura. En cuanto al ensayo de tracción la mejor respuesta se obtuvo para recubrimiento de aleación cromo, níquel y molibdeno Cr-Ni-Mo depositado por proyección térmica por llama sobre sustrato de fundición gris. El carburo de tungsteno WC-Ni proyectado sobre sustrato de acero F-1110: aumento la microdureza Vickers HV, se obtuvo superior comportamiento a menor espesor de recubrimiento y el mayor esfuerzo para mayor profundidad de rugosidad en el sustrato.</p>	<p>259</p>

Tabla A.2.2.A. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.

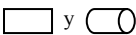

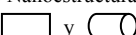






Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
Cr ₃ C ₂ -NiCr /	77 C ₃ H ₆ , 253 O ₂ , 375 Aire [l/min] – DJ2700 – HVOF Spray	300 / / < 1,0	32
	60 C ₃ H ₆ , 420 O ₂ [l/min] – CDS100 – HVOF Spray	300 / / 2,0	
WC-Co /	77 C ₃ H ₆ , 253 O ₂ [l/min] – DJ2700 – HVOF Spray	300 / / < 1,0	
	55 C ₃ H ₆ , 420 O ₂ , 375 Aire [l/min] – CDS100 – HVOF Spray	300 / / 2,0	
WC-12Co /	– JP 5000 – HVOF Spray	/ 400 ± 10 /	56
WC-10Ni /		/ 670 ± 10 /	
WC-12Co Microestructurado / 42CrMo6  y 	2HC, O ₂ , N ₂ , Aire – DJH 2700 – HVOF Spray	/ 150 /	83
WC-12Co Nanoestructurado / 42CrMo6  y 		/ 170 /	
WC-12Co y WC-12Co + Stellite 6 ® / SS Mandril 	50 – 100 2HC, 300 – 400 O ₂ , 300 – 400 Aire [SLPM] – DJ/DJH 2700 – HVOF Spray	200 – 350 / 300 – 1500 / 1 – 4	84
SS UNS S31600 Diamalloy 1003/ Acero ferrítico 42CrMo6	150 O ₂ , 700 H ₂ , 400 Aire [l/min] – DJH – HVOF Spray	300 / 350 /	105
Cr ₃ C ₂ -NiCr (Diamalloy-3007 75Cr ₃ C ₂ -25NiCr) / 34CrMo4  y 	2HC, N ₂ , Aire – DJH 2700 – HVOF Spray	/ 220 /	106
Poliamida 11 Castoplast 31200G y Al ₂ O ₃ Metco 101SF / Acero	100/6 O ₂ , 95/6 C ₂ H ₂ , 33/6 Gas portador (O ₂), Aire [NI/min] – DS8000 – FS	/ /	107
Poliamida 11– Castoplast 3200G, Eutectic-Castolin y relleno de Si ₃ N ₄ y BN / Acero 	O ₂ , C ₂ H ₂ – DS8000 – FS	/ /	109
CW-Ni / Acero F-1110 	10 O ₂ , 0,7 C ₂ H ₂ [bar] – Castodyn DS-8000 – FS	200 / 90 y 150 /	110

Tabla A.2.2.B. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.








Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
WC-17Ni + PTFE / SS304 	O ₂ , H ₂ , N ₂ – – FS	/ 0,4 /	111
10Cr-2,5B-2,5Si-2,5Fe-0,15C y balance Ni Metco 12C / AISI1018 	– – FS	200 – 250 / /	20
HA y EMAA / Metálico 	C ₃ H ₈ , Aire – – FS	/ 500 – 1000 /	124
NiCr 80/20, NiCrBSi, NiCrAlY y Mo / Acero 	– – FS	/ 3000 – 4500 /	125
PET / Acero 1020 	(20,5; 29,1 y 38,6 O ₂ , 7,4; 10,2 y 14,2 6 C ₃ H ₈)[(x10 ⁻⁶ m ³ /s) ³], (100 N ₂ , 50 Aire) [psi] – Diamond Jet DJ y Metco DJP – FS	140, 300 y 320 / /	126
0,5C-4Si-4B-2,5Fe-16Cr-3Cu-3Mo y balance Ni Metco 16C/Acero de bajo % C	1,7 O ₂ ; 1,0 C ₂ H ₂ [bar] – Metco 5P-II – FS	220 / / 5,9	127
0,5C-4Si-3,4B-2,6Fe-15,6Cr-2,7Cu-2,8Mo y balance Ni HMSP 1355-20 A / Acero de bajo % C		220 / /	
0,9C-4,3Si-3,3B-4,2Fe-16,3Cr y balance Ni HMSP 1360-20 B / Acero de bajo % C		220 / / 2,7	
0,5C-2,5Si-2,5B-2,5Fe-11Cr -46Ni y 35(WC-12Co) Metco 31C / Acero de bajo % C	2,1 O ₂ ; 1,0 C ₂ H ₂ [bar] – Metco 5P-II – FS	120 / / 14	
Aleación de Ni (A(B)+WC), usando polvo WOKA 8812-Co (100%WC)/Acero de bajo % C		120 / /	
Convencional – WC/15Co y Nanoestructurado – WC/12Co/	– Metco DJ gun – HVOF Spray	/ / 3,3	132
Pd / SS 	316 – 631 H ₂ , 600 – 1800N ₂ [ml/min] – – HVOF Spray	260 / ≈ 60 /	130
BaTiO ₃ / 	273 O ₂ , 21 N ₂ , 75 HC [l/min] – Praxair HV2000 – HVOF Spray	200 / 25 – 150 /	133

Tabla A.2.2.C. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.



Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
17Cr-12Ni-2,5Mo-1Si-0,1C y balance Fe (Metco 41C); 3Mo-3Al-0,3B-3C y balance Fe (Metco 449P); 8Fe-16Cr y balance Ni (Metco 44); 9Cr-7Al-5,5Mo-5Fe y balance Ni (Metco 444) / 0,362C-0,84Mn-0,036P-0,038S-0,281Si-0,073Al-0,142Ni-0,003Ti y balance Fe 	28 O ₂ ; 30 C ₂ H ₂ [psi] – Metco 5P-II – FS	150 / 2,5 – 10000 /	128
WC-CoCr WOKA 9010Cr / 	231O ₂ , 609 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	290 / 300 / 0,5;	131 y
		1,0 y 1,2	136
		250 / / 0,5	
	545 O ₂ , 175 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	290 / / 4,0	131
	652 O ₂ , 228 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	270 / / 0,2	
	578 O ₂ , 202 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	270 / / 1,2	
	175 O ₂ , 545 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	290 / 300 / 4,0	136
	228 O ₂ , 652 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	270 / 300 / 0,2	
	202 O ₂ , 578 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	270 / 300 / 1,1 y 1,2	
	204 O ₂ , 636 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	250 / 300 / 1,2	
176 O ₂ , 504 H ₂ , 20 N ₂ [l/min] – Metco DJ 2600 – HVOF Spray	270 / 300 / 1,5		
Fe-40Al Nanocristales, polvos: -100+20, -63+40 y -40+20 / Al	400 O ₂ , 30 Aire y 180 Gas Natural CH ₄ [l/min] – CDS 100 Metco – HVOF Spray	/ 300 – 400 / 5,8 ± 0,7; 7,8 ± 1,1 y 6,3 ± 0,9	137

Tabla A.2.2.D. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.

Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
WC-Co 15C;67,5WC;14,5W ₂ C;13W y 5 Fase amorfa /	Combustible / O ₂ = 0,23 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 1,7	140
WC-Co 15C;70,5WC;19W ₂ C;8W y 2,5 Fase amorfa /	Combustible / O ₂ = 0,17 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 2,9	
WC-Co 15C;89,2WC;9,3W ₂ C; y 1,5 Fase amorfa /	Combustible / O ₂ = 0,29 – Metco DJ2700 – HVOF Spray		
WC-Co 12C;87WC;13W ₂ C /	Combustible / O ₂ = 0,23 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 1,9	
WC-Co 12C;99,5WC;0,5W ₂ C /	Combustible / O ₂ = 0,17 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 2,1	
WC-Co 12C;98,5WC;W ₂ C; y 0,5 Fase amorfa /	Combustible / O ₂ = 0,29 – Metco DJ2700 – HVOF Spray		
WC-Co 12C;80WC;11,2W ₂ C;8,8W /	Combustible / O ₂ = 0,23 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 1,6	
WC-Co 12C;86,3WC;8,7W ₂ C;5W /	Combustible / O ₂ = 0,17 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 2,4	
WC-Co 12C;97,6WC;1,4W ₂ C;W /	Combustible / O ₂ = 0,29 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 2,0	
WC-Co 12C;72,4WC;27,4W ₂ C /	Combustible / O ₂ = 0,23 – Metco DJ2700 – HVOF Spray	/ / 1,8	
15,2Cr-3,6Fe-4Si-3,1B-0,6C y balance Ni (Castolin CPS 1235); 35WC-11Cr-2,5Fe-2,5Si-2,5B-2,5C y balance Ni (Metco 36C) / SAE 1045 0,15C-0,55Mn-0,27Si-0,035P-0,035S y balance Fe <input type="checkbox"/>	170 O ₂ ; 100 C ₂ H ₂ [kPa] – – FS	/ 175 – 200 /	129
Al ₂ O ₃ – SiC Nanocompuesto, capa de anclaje Ni20Cr [20μm] / Acero	C ₂ H ₄ : O ₂ , = 1,3, N ₂ – Metco 105 SF – HVOF Spray	180 / 250 /	138
Al ₂ O ₃ , capa de anclaje Ni20Cr [20μm] / Acero		200 / 250 /	

Tabla A.2.2.E. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.















Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
Cr ₃ Cr ₂ /TiC–25(Ni40CrMo) DS-300 / Acero 1018  y 	C ₂ H ₂ – Zulser-Metco Diamond Jet – HVOF Spray	/ 300 – 350 / < 2	134
Cr ₃ Cr ₂ –25(Ni44CrSi) DS-200 / Acero 1018  y 		/ 225 – 275 / < 2	
WC-17Co DS-128 / Acero1018  y 		/ 300 / < 1	
900Cr ₂ O ₃ 6SiO ₂ 4Al ₂ O ₃ ^Y Rokide C / Acero 1018  y 	– – FS	/ 490 / 4	
NiCrAlY /	483 O ₂ y 42 C ₃ H ₈ [l/min], 0,55 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	200 / /	135
WC-Cr-Ni / Acero carburizado 	0,7 O ₂ y 0,5 C ₃ H ₆ [MPa] – – HVOF Spray	/ 40 y 90 /	139
Ni-Cr-B-Si y WC-Ni-Cr-B-Si / Aisi 1050 	34 O ₂ ; 34 C ₂ H ₂ [PSI] – Metco 5P-II – FS	150 / 70 – 90 /	141
35WC- 65(Ni-Cr-B-Si) / Aisi 1050 	140O ₂ ; 50N ₂ ; 150Kerosen [PSI] – Metco JP-500 HP/HVOF – HVOF Spray	350 / 70 – 90 /	
NiCrAlY / Acero 	– – FS, HVOF Spray	/ 0,9 – 1,3 /	142
NiCrBSi / 	400 O ₂ ; 70 C ₂ H ₂ ; 350 Aire [kPa] – Castodyn 8000 – FS	170 / 300 / 5,0± 0,20	143
NiCrBSi / 	440 O ₂ ; 220 CH ₄ [l/min] – Metco CDS 100 – HVOF Spray	280 / 300 / 0,5 ± 0,02	
WC-12Co /	0,54 O ₂ ; 0,39 (30%C ₂ H ₂ + ₂ HC) [MPa] – Jet-Kote – HVOF Spray	185 / 2,27±0,95 /	145
WC-17Co /		185 / 2,37±0,95 /	
WC-18Co /		185 / 2,93±0,95 /	
WC-18Co /		185 / 1,55±0,77 /	


Tabla A.2.2.F. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.

Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
Cr3C2-NiCr Zigong YFG-20 /	0,55 O ₂ ; 0,4 C ₃ H ₈ ; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	180 / /	146
Cr3C2-NiCr Amdry 5260 /	0,55 O ₂ ; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 (C ₂ H ₂ +30%C ₃ H ₄); N ₂ y 0,55 O ₂ ; 0,4 C ₃ H ₈ ; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000, Jet-Kote – HVOF Spray	150 y 180 / /	
Cr3C2-NiCr Metco 81VF-NS /	0,55 O ₂ ; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 (C ₂ H ₂ +30%C ₃ H ₄); N ₂ [MPa] – CH-2000, Jet-Kote – HVOF Spray	150 / /	
Cr3C2-NiCr Diamalloy 3003NS /	0,55 O ₂ ; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 (C ₂ H ₂ +30%C ₃ H ₄); N ₂ [MPa] – CH-2000, Jet-Kote – HVOF Spray		
NiCrBSi /	491 O ₂ ; 42,7 C ₃ H ₈ [l/min]; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	258,6 / 300 /	147
NiCrBSi-17WC-Co /	479 O ₂ ; 41,4 C ₃ H ₈ [l/min]; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	250 / 300 /	
NiCrBSi-10(WC-17Co), NiCrBSi-25(WC-17Co), NiCrBSi-40(WC-17Co) /	419 O ₂ ; 35,5 C ₃ H ₈ [l/min]; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	210 / 300 /	
NiCrBSi-40WC-Co, WC-17Co /	359 O ₂ ; 29,6 C ₃ H ₈ [l/min]; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	170 / 300 /	
WC-17Co /	346 O ₂ ; 28,3 C ₃ H ₈ [l/min]; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	161,4 / 300 /	

Tabla A.2.2.G. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.

Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
WC-18Co /	0,54 O ₂ ; 0,345 (C ₂ H ₂ +30%C ₃ H ₄); 0,196 N ₂ [MPa] – Metco 75F – HVOF Spray	150 / /	144
WC-17Co /	0,54 O ₂ ; 0,345 (C ₂ H ₂ +30%C ₃ H ₄); 0,196 N ₂ [MPa] – Metco 73F – HVOF Spray		
Cr ₃ C-NiCr /	526, 510, 447, 382 y 368 O ₂ ; 45,8; 44,3; 37; 29,6 y 28,1 C ₃ H ₈ [l/min]; 3,5 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	258,6; 250; 210; 170 y 161,4 / /	148
WC-17C, Cr ₂ C ₃ -20NiCr y Inconel 625 / AISI 403 SS	– JetKote – HVOF Spray	/ 200 y 400 /	17
WC-Co, SiC-Co, TiC-Co (o Ni), Al ₂ O ₃ -Ni y W-Ni /	439 O ₂ ; 28, 35 y 39 C ₃ H ₈ [l/min]; 0,35 N ₂ [MPa] – CH-2000 – HVOF Spray	210 / /	149
WC-Co /	0,55 O ₂ , 0,35 C ₂ H ₂ -30%C ₃ H ₆ [MPa] – JetKote – HVOF Spray	150 / /	150
Cr ₃ C ₂ -25NiCr /	0,4 O ₂ , 0,55 C ₃ H ₈ ; N ₂ [MPa] – CH-8000 – HVOF Spray	368, 382, 447, 510 y 526 / /	151
WC-12Co /	– – HVOF Spray	/ ≈ 300 /	152
WC-Co Diamalloy 2003 /	265,4 O ₂ ; 73,1 C ₂ H ₂ ; 325 Aire [l/min] – – HVOF Spray	200 / /	153
16,8Cr; 10,8Ni; 2,05Mo; 0,131N; 0,026O y balance Fe SUS316L /	Kerosen/O ₂ = 0,7; y N ₂ – JP-5000 – HVOF Spray	380 / 400 /	154
80Ni-20Cr / Acero 9Cr-1M	861 O ₂ [sl/min] y 0,379 Combustible [l/min] – – HVOF Spray	380 / 50 y 120 /	155
80Ni-20Cr /	O ₂ y Combustible – – HVOF Spray	/ 75 – 300 /	156

Tabla A.2.2.H. Referencias de estudios de Flame Spray y HVOF Spray teniendo en cuenta las variables del proceso y del recubrimiento.

Recubrimiento / Sustrato y Forma	Gases – Pistola – Método	Distancia de proyección [mm] / Espesor [μm] / Porosidades [%]	Ref.
16,95Mo; 16,57Cr; 6,21Fe; 4,52W; 0,72Mn; 0,31Co; 0,73Si y balance Ni TAFA 1268F / SS400	Combustible/O ₂ = 1,3; y N ₂ – JP-5000 – HVOF Spray	482 / 400 /	157
Cr ₃ C ₂ —NiCr /	420 O ₂ , 60 C ₂ H ₄ [l/min] – Metco DJ2700 – HVOF Spray	300 / /	158
WC-Co /	420 O ₂ , 55 C ₂ H ₄ [l/min] – Metco DJ2700 – HVOF Spray		
Aleación base Fe /	45 – 60 O ₂ [m ³ /h], 15 – 25 Kerosen [l/h] – GTV-Top Gun K – HVOF Spray	200 – 325 / /	159
Cu / 	– – HVOF Spray	/ /	160
NiCrAl-11TiC-16ZrO ₂ /	75O ₂ , 60 Combustible y 65 N ₂ [psi] –Jet Kote – HVOF Spray	20 – 23 / /	161
CrO ₃ /	O ₂ /C ₃ H ₈ = 8,2; N ₂ – CDS – HVOF Spray	/ 100 – 250 /	162
WC-17Co, WC-12NiAl, Cr ₃ C ₂ -25(Ni-20Cr) y Cr ₃ C ₂ -20NiAl /	– Jet Kote – HVOF Spray	150 / 250 /	163

A.3. Aceros Aleados de Herramientas para Trabajo en Frío.

Los aceros aleados de herramientas para trabajo en frío cumplen los requisitos de aplicaciones a matrices de embutición, su división comprende a los aceros estándar y de composición especial, algunos descritos en la Tabla A.3. especificándose su composición química, según la norma UNE-EN 4957 [15, 63, 103, 104].

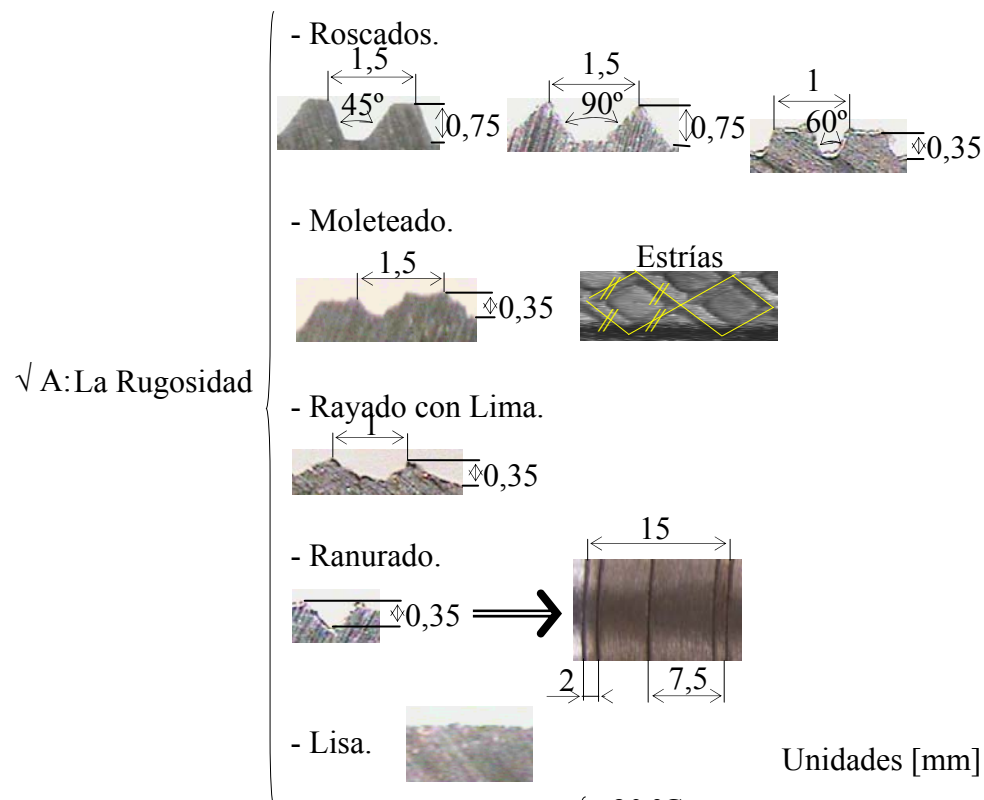
Tabla A.3. Aceros Aleados de Herramientas para Trabajo en Frío.

Aceros Aleados de Herramientas	NORMA EN/UNE	Composición Química [%]								
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	
Aceros Estándar	90MnCrW5 (F-5220)	0,95	0,25	1,10	0,50	-	-	0,10	0,60	
	90MnCrV8 F-5229	0,85-0,95	0,10-0,40	1,80-2,20	0,20-0,50	-	-	0,05-0,20	-	
	X100CrMoV5 F-5227	0,95-1,05	0,10-0,40	0,40-0,80	4,80-5,50	0,90-1,20	-	0,15-0,35	-	
	X210Cr12 (F-5212)	1,90-2,20	0,10-0,60	0,10-0,60	11,00-13,00	-	-	-	-	
	X155CrVMo12.1 F-5211	1,55	-	-	12,00	0,70	-	1,00	-	
Aceros de Composición Especial	Resistentes al Desgaste	105WCr5 (F-5233)	1,15	0,20	0,30	0,30	-	-	-	1,00
		X100CrMoV5 F-5227	0,95-1,05	0,10-0,40	0,40-0,80	4,80-5,50	0,90-1,20	-	0,15-0,35	-
		X210CrW12 F-5213	1,60	0,25	0,30	11,50	-	-	-	0,80
	Resistentes a los Choques	X45NiCrMo4	0,45	0,30	0,30	1,40	0,30	4,00	-	-
		60WCrV7 (F-5242)	0,60	0,60	0,30	1,10	-	-	0,20	2,00
		40NiCrMo16 F-5307	0,40	0,25	0,50	1,50	0,30	4,00	0,15	-

A.4. Experimentos.

A.4.1. Experimentos de Proyección Térmica.

En el Capítulo III, punto 3.4 y Capítulo IV, para la investigación se consideraron tres variables experimentales:



√ B: {

- La Temperatura de Pre-proyección {
 - 20 °C
 - 100 °C.
- El Proceso Térmico Post-proyección en Baño de Sales ≈ 400 °C.

√ C: {

- El Recubrimiento en Dos Proporciones:
 - Carburo de Wolframio + Níquel, WC/Ni
 - Óxido de Aluminio + Óxido de Titanio, Al₂O₃/TiO₂.

Tabla A.4.1.A. Variables Experimentales Recubrimiento Total (ExpT.) o Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes (ExpP4.).

ExpT. o ExpP4.	α [°]	T [°C]	WC/Ni [%/%]
1	45	20	40/60
2	90		
3	45	100	
4	90		
5	45	20	30/70
6	90		
7	45	100	
8	90		

ExpT.=Experimento para Recubrimiento Total, ExpP4.=Experimento para Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes o Trozos, T =Temperatura 20 °C y 100 °C, WC/Ni =Carburo de Wolframio más Níquel en Relación 40/60 y 30/70 en tanto % Peso y Rugosidad: Rosca: α =Ángulo de Filete 45 ° para ExpT. o ExpP4. (1, 3, 5 y 7) y 90 ° para ExpT. o ExpP4. (2, 4, 6 y 8), y Paso=P=1,5 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.B. Repeticiones de las Mediciones de: los Espesores (e), las Porosidades (Po) y las Microdurezas Vickers (HV), para Recubrimiento Total (ExpT.), Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes (ExpP4.) y Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Recubrimientos	Espesores (e)	Porosidades (Po)	Microdurezas (HV)
ExpT.	Doce (12)	Ocho (8)	Seis (6)
ExpP4.	Doce (12)	Cuatro (4)	Seis (6)
ExpP3.	Cuatro (4)	Cuatro (4)	Tres (3)

Tabla A.4.1.1.A. Datos de los Experimentos Recubrimiento Total (ExpT.).

Recubrimiento: 40%WC/60%Ni Roscado									
ExpT.	h [mm]	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV V	α [°]	T [°C]
1A	20	1,50	0,18	9,73	2,34	987,8	47,7	45	20
1B	15	1,49	0,18	15,36	5,25	986,8	46,0		
1C		1,07	0,13	11,66	2,83	967,0	50,0		
1D		1,45	0,18	8,64	1,21	957,1	49,4		
1E	20	1,26	0,15	8,74	2,02	988,2	60,7		
1F		1,48	0,18	12,91	1,64	990,4	58,2		
1G		1,46	0,18	14,86	1,04	982,3	57,1		
2A	20	1,98	0,24	19,64	2,41	967,7	46,1		
2B		1,07	0,13	6,61	0,51	971,2	56,9		
2C		1,15	0,14	10,07	1,84	972,3	34,0		
2D		0,88	0,11	6,39	0,81	977,8	36,4		
2E	15	1,33	0,16	12,94	2,05	970,6	50,0		
2F		1,16	0,14	10,28	0,96	974,2	54,3		
2G	20	0,58	0,08	12,12	1,16	977,4	53,7		
2H		0,92	0,11	8,09	1,35	981,7	64,2		
2I		1,49	0,18	10,31	1,65	985,3	49,9		
3A	15	1,75	0,21	13,73	2,18	988,0	60,5		
3B		0,93	0,12	13,88	2,03	978,8	49,1		
3C		1,60	0,20	10,17	2,50	983,5	52,1		
3D		1,27	0,16	15,68	1,28	968,5	81,6		
3E	20	1,58	0,19	12,72	2,96	980,4	57,9		
3F	15	1,47	0,18	7,50	1,67	971,0	43,1		
3G	20	1,66	0,20	9,89	1,63	967,4	60,2		
4A	15	1,50	0,18	11,62	2,73	976,5	64,7		
4B	20	1,55	0,19	10,51	2,18	973,0	43,3		
4C		1,47	0,18	11,28	1,60	977,2	45,7		
4D	15	1,28	0,16	18,98	0,81	973,3	72,0		
4E	20	0,86	0,13	10,33	1,33	973,4	51,7		
4F		1,53	0,22	10,28	2,60	979,4	83,4		
4G		1,49	0,18	12,54	1,71	977,0	71,0		

Los experimentos ExpT. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento Total: h=Altura. e=Promedio del Espesor. σe =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σHV =Desviación de la Microdureza Vicker. Rugosidad: Rosca: α =Ángulo de Filete 45 ° para ExpT. (1, 3) y 90 ° para ExpT. (2, 4), Paso=P=1,5 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.1.B. Datos de los Experimentos Recubrimiento Total (ExpT.).

Recubrimiento: 30%WC/70%Ni Roscado									
ExpT.	h [mm]	e [mm]	σ_e [mm]	Po [%]	σ_{Po} [%]	HV	σ_{HV}	α [°]	T [°C]
5A	15	1,50	0,18	11,66	2,71	963,1	63,6	45	20
5B		1,45	0,18	13,27	2,98	967,4	61,1		
5C		1,43	0,18	9,71	2,32	967,5	63,7		
5D		1,05	0,13	12,64	1,19	951,9	81,4		
5E		1,55	0,19	6,25	0,53	951,0	55,4		
5F		1,53	0,19	9,76	1,63	938,6	57,4		
5G		2,02	0,25	8,04	2,10	965,4	59,9		
6A		1,03	0,13	8,07	2,28	968,8	61,7	90	
6B		1,14	0,14	10,75	2,52	968,9	56,6		
6C		1,42	0,17	9,95	1,75	956,6	61,1		
6D		1,20	0,15	16,84	1,57	958,9	72,9		
6E		1,20	0,15	9,40	1,60	963,4	52,8		
6F		0,92	0,12	5,74	1,49	968,8	71,9		
6G		1,23	0,15	7,65	1,03	965,7	69,7		
7A	1,43	0,17	8,25	2,14	967,5	55,3	45	100	
7B	1,73	0,21	9,77	1,37	968,6	53,2			
7C	1,48	0,18	9,71	1,46	965,0	49,0			
7D	1,09	0,13	16,25	1,75	963,0	96,1			
7E	1,23	0,15	6,28	1,53	963,1	62,5			
7F	1,21	0,15	8,86	2,92	962,7	47,9			
7G	1,31	0,16	7,22	2,07	959,6	53,6			
8A	1,27	0,16	9,09	1,48	973,3	51,8	90		
8B	1,20	0,15	13,07	2,18	973,8	49,6			
8C	0,98	0,12	10,26	1,92	966,6	66,0			
8D	1,01	0,12	12,92	1,51	960,2	74,0			
8E	1,42	0,17	6,32	0,75	967,3	66,9			
8F	1,29	0,16	10,39	1,10	960,2	68,7			
8G	1,35	0,17	14,12	1,99	967,5	46,3			

Los experimentos ExpT. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento Total: h=Altura. e=Promedio del Espesor. σ_e =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σ_{Po} =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σ_{HV} =Desviación de la Microdureza Vicker. Rugosidad: Rosca: α =Ángulo de Filete 45 ° para ExpT. (5 y 7) y 90 ° para ExpT. (6 y 8), Paso=P=1,5 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.2.A. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes (ExpP4.).

Recubrimiento: 40%WC/60%Ni Roscado									
ExpP4.	h [mm]	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV V	α [°]	T [°C]
P1A	15	1,02	0,04	8,23	1,30	973,6	55,2	45	20
P1B		0,97	0,08	12,48	3,17	940,0	53,9		
P1C		0,94	0,04	18,22	0,75	956,6	45,7		
P1D		1,19	0,02	10,72	0,55	979,1	76,3		
P1E		0,91	0,04	17,18	2,08	958,3	76,5		
P1F		0,97	0,08	20,64	1,53	971,4	67,6		
P1G		1,18	0,00	18,58	1,73	975,0	51,4		
P1H		1,18	0,01	12,84	0,20	967,2	53,9		
P1I		1,07	0,03	18,70	0,50	961,7	53,8		
P2A		1,14	0,03	10,18	0,64	978,5	75,4	90	
P2B		0,79	0,07	12,10	2,23	987,4	67,9		
P2C		0,91	0,04	14,63	0,70	939,9	39,9		
P2D		0,90	0,03	15,42	0,48	994,6	58,6		
P2E		1,06	0,06	8,47	0,95	972,0	61,4		
P2F		0,80	0,03	12,82	1,39	940,2	53,4		
P2G		0,72	0,03	16,27	0,76	985,4	67,9		
P2H		0,92	0,05	12,05	0,24	974,0	56,2		
P2I		1,12	0,04	6,82	0,16	936,2	63,3		

Los experimentos ExpP4. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Cuatro Trozos: h=Altura. e=Promedio del Espesor. σe =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σHV =Desviación de la Microdureza Vicker. Rugosidad: Rosca: α =Ángulo de Filete 45 ° para ExpP4. (1) y 90 ° para ExpP4. (2), Paso=P=1,5 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.2.B. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes (ExpP4.).

Recubrimiento: 40%WC/60%Ni Roscado										
ExpP4.	h [mm]	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV	α [°]	T [°C]	
P3A	15	1,23	0,06	9,40	0,90	976,7	44,0	45	100	
P3B		1,00	0,07	12,00	1,47	967,1	64,6			
P3C		0,59	0,00	13,29	1,65	962,3	70,0			
P3D		1,15	0,10	13,41	1,08	933,5	47,6			
P3E		1,13	0,07	9,38	0,60	978,5	64,5			
P3F		1,25	0,01	19,81	0,74	986,8	89,3			
P3G		1,25	0,01	15,96	0,78	957,0	68,7			
P3H		1,03	0,02	15,63	0,78	961,3	54,5			
P3I		1,40	0,03	19,32	0,79	935,0	61,9			
P3J		1,18	0,01	16,70	1,65	934,2	57,8			
P4A		1,05	0,07	13,53	0,43	980,3	62,8			90
P4B		0,99	0,03	10,09	0,43	969,8	46,6			
P4C	1,10	0,05	11,06	0,51	990,2	62,3				
P4D	0,65	0,03	7,85	0,59	969,5	55,9				
P4E	0,40	0,07	13,94	0,89	980,8	56,2				
P4F	0,43	0,06	12,87	2,07	983,8	49,0				
P4G	0,39	0,04	14,17	0,70	939,1	66,3				
P4H	0,73	0,02	16,21	2,60	964,4	69,2				
P4I	1,00	0,02	20,92	1,21	944,1	57,3				
P4J	0,99	0,03	10,87	1,78	968,9	60,6				

Los experimentos ExpP4. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Cuatro Trozos: h=Altura. e=Promedio del Espesor. σe =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σHV =Desviación de la Microdureza Vicker. Rugosidad: Rosca: α =Ángulo de Filete 45 ° para ExpP4. (3) y 90 ° para ExpP4. (4), Paso=P=1,5 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.2.C. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes (ExpP4.).

Recubrimiento: 30%WC/70%Ni Roscado									
ExpP4.	h [mm]	e[mm]	σ_e [mm]	Po [%]	σ_{Po} [%]	HV	σ_{HV}	α [°]	T [°C]
P5A	15	1,21	0,03	13,34	0,71	986,4	56,3	45	20
P5B		1,24	0,01	9,86	0,53	984,6	65,1		
P5C		1,11	0,11	10,57	0,81	968,9	94,9		
P5D		1,68	0,03	7,89	0,35	958,6	61,2		
P5E		0,55	0,02	13,45	0,40	984,9	75,8		
P5F		1,48	0,06	11,21	1,01	966,0	33,8		
P5G		1,30	0,02	14,53	0,58	974,7	59,5		
P5H		1,34	0,05	15,98	1,30	976,5	87,5		
P5I		1,18	0,03	11,78	1,20	960,1	61,0		
P5J		0,93	0,11	14,42	0,53	954,9	47,5		
P5K		1,00	0,01	13,17	1,28	949,8	55,3		
P5L		0,85	0,04	18,99	0,32	936,9	55,1		
P5M		0,83	0,05	16,91	0,54	963,8	65,8		
P5N		1,04	0,04	13,73	0,68	946,9	44,4		
P5Ñ		0,94	0,02	11,82	0,07	974,7	83,6		
P6A	15	1,19	0,03	9,20	1,12	957,7	94,9	90	20
P6B		0,77	0,05	9,54	1,45	977,6	67,4		
P6C		0,99	0,04	9,38	0,37	978,5	57,2		
P6D		1,00	0,07	14,40	0,65	966,7	43,5		
P6E		1,11	0,04	11,31	0,68	977,7	72,4		
P6F		1,40	0,09	10,49	0,40	958,6	102,7		
P6G		1,24	0,09	6,62	0,59	982,6	51,1		
P6H		1,22	0,05	17,65	0,82	938,8	84,0		
P6I		1,19	0,03	16,88	1,03	986,9	46,5		
P6J		0,97	0,03	10,04	0,14	965,9	73,2		

Los experimentos ExpP4. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Cuatro Trozos: h=Altura. e=Promedio del Espesor. σ_e =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σ_{Po} =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σ_{HV} =Desviación de la Microdureza Vicker. Rugosidad: Rosca: α =Ángulo de Filete 45 ° para ExpP4. (5) y 90 ° para ExpP4. (6), Paso=P=1,5 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.2.D. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes (ExpP4.).

Recubrimiento: 30%WC/70%Ni Roscado												
ExpP4.	h [mm]	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV	α [°]	T [°C]			
P7A	15	1,00	0,07	8,08	0,27	960,3	59,8	45	100			
P7B		1,09	0,06	13,28	0,72	978,9	59,1					
P7C		1,59	0,06	12,40	0,90	980,9	83,6					
P7D		1,40	0,05	11,56	0,74	976,3	58,1					
P7E		1,35	0,03	12,29	0,38	985,7	43,3					
P7F		1,26	0,02	13,53	0,93	961,7	63,4					
P7G		1,41	0,08	12,58	0,32	982,8	72,2					
P7H		1,00	0,04	12,34	0,75	986,5	36,7					
P7I		1,40	0,07	9,13	0,67	966,7	66,7					
P7J		1,42	0,03	12,17	1,19	956,5	45,2					
P7K		0,93	0,12	9,88	0,59	962,5	83,9					
P8A		15	0,99	0,03	8,68	0,65	982,3			37,8	90	100
P8B			0,78	0,06	11,54	0,33	956,8			57,7		
P8C	1,06		0,06	13,54	0,86	960,1	50,3					
P8D	0,88		0,08	14,34	0,26	950,4	58,3					
P8E	1,11		0,07	10,79	0,33	952,5	88,0					
P8F	1,19		0,04	10,10	0,55	984,0	88,4					
P8G	1,03		0,03	9,71	0,17	986,3	56,7					
P8H	1,12		0,03	11,31	0,85	961,2	64,6					
P8I	1,07		0,03	11,73	0,48	952,7	53,6					
P8J	0,74		0,05	12,14	2,21	953,0	71,2					
P8K	1,14		0,07	15,47	0,76	950,8	75,4					
P8L	0,81		0,02	15,49	0,54	956,9	35,1					
P8M	0,85		0,01	13,78	1,34	978,5	52,1					
P8N	0,81		0,02	14,77	0,41	950,5	76,1					

Los experimentos ExpP4. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Cuatro Trozos: h=Altura. e=Promedio del Espesor. σe =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σHV =Desviación de la Microdureza Vicker. Rugosidad: Rosca: α =Ángulo de Filete 45 ° para ExpP4. (7) y 90 ° para ExpP4. (8), Paso=P=1,5 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.3.A. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Roscado							
ExpP 3	e [mm]	σ_e [mm]	Po [%]	σ_{Po} [%]	HV	σ_{HV}	Recubrimiento
R1A	0,96	0,00	13,55	0,80	973,0	75,8	40%WC/60%Ni
R1B	1,28	0,00	7,79	0,35	964,3	52,3	
R1C	1,18	0,00	7,94	0,29	970,8	76,2	
R1D	1,00	0,00	9,91	0,41	930,7	64,0	
R1E	0,84	0,00	8,12	0,26	967,5	94,2	
R1F	1,16	0,00	7,87	0,16	980,6	69,7	
R1G	1,26	0,00	9,66	1,44	975,3	58,0	
R2A	1,00	0,00	14,38	0,98	947,3	59,4	30%WC/70%Ni
R2B	1,18	0,00	14,37	0,56	959,3	15,2	
R2C	1,18	0,00	12,98	0,77	948,4	58,4	
R2D	1,18	0,00	13,40	0,63	952,9	36,0	
R2E	1,18	0,00	12,60	0,95	958,0	54,7	
R2F	1,08	0,00	13,08	0,99	955,8	82,2	
R2G	1,08	0,00	15,64	0,89	955,2	66,3	
R3A	1,78	0,00	33,40	0,80	1229,5	197,4	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂
R3B	1,48	0,00	28,00	3,96	1236,0	174,4	
R3C	1,18	0,00	36,93	2,78	973,7	243,8	
R3D	1,78	0,00	23,96	1,48	1518,9	154,0	
R3E	1,48	0,00	30,00	4,46	1142,9	168,5	
R3F	1,78	0,00	31,79	1,65	1349,9	276,9	
R3G	1,68	0,00	28,74	2,85	1304,5	133,6	
R4A	1,30	0,03	35,05	3,55	1340,0	127,0	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂
R4B	1,18	0,00	37,00	0,48	1317,1	201,1	
R4C	1,18	0,00	37,12	5,48	1080,9	150,0	
R4D	1,18	0,00	38,54	1,73	1288,3	149,5	
R4E	1,68	0,00	31,58	0,27	1813,8	99,0	
R4F	1,18	0,00	39,93	1,13	1249,8	151,6	
R4G	1,75	0,04	39,60	4,72	1429,0	256,8	
R4H	2,06	0,00	25,27	0,97	1582,9	212,8	

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σ_e =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σ_{Po} =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σ_{HV} =Desviación de la Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm, Temperatura =T=100 °C. Rugosidad: Roscado (Rosca): Ángulo de filete $\alpha=60^\circ$, Paso=P=1 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.3.B. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Moletado							
ExpP 3	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV	Recubrimiento
M1A	1,44	0,00	18,22	0,90	930,0	72,3	40%WC/60%Ni
M1B	0,98	0,03	13,00	0,75	959,3	77,6	
M1C	1,18	0,00	20,05	1,11	960,4	55,8	
M1D	1,18	0,00	17,14	1,27	915,5	63,2	
M1E	1,18	0,00	11,72	0,56	923,9	8,5	
M1F	1,18	0,00	10,09	0,48	961,3	56,7	
M1G	1,18	0,00	11,07	1,24	878,6	66,4	
M2A	1,18	0,00	16,47	0,69	955,3	63,0	30%WC/70%Ni
M2B	1,18	0,00	13,63	0,63	948,9	14,7	
M2C	1,18	0,00	11,56	0,41	943,9	72,9	
M2D	1,18	0,00	17,07	0,48	875,2	13,0	
M2E	1,18	0,00	9,41	0,76	878,5	54,1	
M2F	1,18	0,00	14,23	0,28	949,1	74,8	
M2G	1,18	0,00	13,18	0,85	949,9	49,2	
M2H	1,33	0,04	11,67	1,65	959,4	73,9	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂
M3A	1,38	0,00	24,56	1,50	1250,7	145,1	
M3B	1,68	0,00	25,14	5,45	1301,9	252,7	
M3C	1,68	0,00	23,62	2,56	1491,3	223,3	
M3D	1,88	0,00	36,88	0,67	1230,8	17,8	
M3E	1,85	0,04	32,26	3,94	1234,7	127,0	
M3F	1,38	0,00	31,43	2,39	1293,6	248,9	
M3G	1,38	0,00	18,35	0,63	1273,2	70,8	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂
M4A	1,85	0,10	36,52	3,41	1260,1	100,1	
M4B	1,75	0,04	30,45	2,16	1399,1	61,0	
M4C	1,58	0,00	39,62	0,81	1489,5	155,1	
M4D	1,58	0,00	39,11	2,92	1485,8	40,1	
M4E	1,58	0,00	36,63	2,14	1684,5	66,5	
M4F	1,58	0,00	32,48	1,91	1559,5	142,4	
M4G	2,06	0,00	36,59	3,85	1509,3	175,2	

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σe =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σHV =Desviación de la Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm, Temperatura =T=100 °C. Rugosidad: Moletado: Paso=P=1,5 mm de estrías cruzadas de las moletas, Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.3.C. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Limado							
ExpP 3	e [mm]	σ_e [mm]	Po [%]	σ_{Po} [%]	HV	σ_{HV}	Recubrimiento
L1A	1,18	0,00	12,76	1,32	930,5	46,2	40%WC/60%Ni
L1B	1,38	0,00	7,79	0,40	946,4	23,3	
L1C	1,48	0,00	9,26	0,35	939,9	46,2	
L1D	1,38	0,00	11,03	0,20	921,4	48,2	
L1E	1,58	0,00	11,27	0,61	926,9	41,1	
L1F	1,58	0,00	10,08	0,45	955,3	75,9	
L2A	2,16	0,00	35,16	1,49	1225,5	71,3	30%WC/70%Ni
L2B	1,78	0,00	34,47	0,63	1415,7	98,9	
L2C	1,68	0,00	33,72	1,02	1114,9	99,4	
L2D	1,98	0,00	38,98	1,26	1413,4	94,5	
L2E	1,78	0,00	35,20	1,25	1272,6	80,4	
L2F	1,68	0,00	37,98	0,49	1372,7	103,4	
L3A	2,16	0,00	35,16	2,11	1225,5	120,0	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂
L3B	1,78	0,00	34,47	0,44	1415,7	43,3	
L3C	1,68	0,00	33,72	0,37	1114,9	155,8	
L3D	1,98	0,00	38,98	2,36	1413,4	149,6	
L3E	1,78	0,00	35,20	1,98	1272,6	284,9	
L3F	1,68	0,00	37,98	2,03	1372,7	31,8	
L3G	1,80	0,00	36,51	1,39	1264,3	109,2	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂
L4A	1,78	0,00	39,75	1,80	1623,6	237,3	
L4B	1,78	0,00	42,54	2,65	1465,8	56,8	
L4C	1,78	0,00	41,81	2,21	1525,8	27,8	
L4D	1,68	0,00	40,17	2,44	1636,4	200,5	
L4E	1,78	0,00	42,18	2,07	1480,6	201,4	
L4F	1,58	0,00	41,97	0,95	1636,4	52,1	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂
L4G	1,88	0,00	43,17	1,55	1505,9	39,6	

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σ_e =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σ_{Po} =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de Microdureza Vicker. σ_{HV} =Desviación de Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm, Temperatura =T=100 °C. Rugosidad: Limado o Rayado con lima: Paso=P=1 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.3.D. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Rosado con Proceso Térmico								
ExpP3	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV	t [hr]	Recubrimiento
R5A	1,04	0,00	10,19	0,76	1053,6	77,8	8	40%WC/60%Ni
R5B	1,00	0,00	9,78	0,97	1065,3	31,4	4	
R5C	1,00	0,00	9,67	0,89	982,7	26,8	2	
R5D	1,00	0,00	13,78	0,97	1004,5	77,2	6	
R5E	1,18	0,00	17,11	0,58	953,7	95,4	10	
R6A	1,18	0,00	17,93	1,19	951,7	120,9	8	30%WC/70%Ni
R6B	1,08	0,00	13,82	0,65	976,2	113,7	4	
R6C	1,38	0,00	12,98	0,85	978,0	60,3	2	
R6D	1,48	0,00	11,35	0,50	973,3	96,7	6	
R6E	1,00	0,00	12,93	0,47	967,1	20,0	10	
R7A	1,48	0,00	35,81	2,53	1576,4	265,0	8	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂
R7B	1,48	0,00	34,96	1,78	1690,3	112,7	4	
R7C	1,38	0,00	39,51	1,37	1582,8	78,1	2	
R7D	1,56	0,00	36,14	1,16	1625,6	283,9	6	
R7E	1,18	0,00	34,41	1,72	1170,1	253,9	10	
R8A	1,78	0,00	39,02	1,95	1667,9	171,9	8	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂
R8B	1,58	0,00	39,85	1,94	1804,5	264,1	4	
R8C	1,78	0,00	38,67	2,37	1768,4	133,8	2	
R8D	1,58	0,00	38,63	1,40	1638,3	179,7	6	
R8E	1,48	0,00	39,86	1,61	1508,9	402,8	10	

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σe=Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo=Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σHV=Desviación de la Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm, Temperatura =T=100 °C, t =tiempo. Rugosidad: Roscado (Rosca): Ángulo de filete α=60 °, Paso=P=1 mm y Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.3.E. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Rosado con Proceso Térmico								
ExpP3	e [mm]	σ_e [mm]	Po [%]	σ_{Po} [%]	HV	σ_{HV}	t [hr]	Recubrimiento
M5A	1,18	0,00	10,88	1,68	951,9	13,7	8	40%WC/60%Ni
M5B	1,18	0,00	13,24	1,92	954,4	44,5	4	
M5C	1,48	0,00	11,85	1,91	919,4	64,9	2	
M5D	1,48	0,00	13,77	0,99	984,0	34,2	6	
M5E	1,04	0,00	10,61	0,91	926,4	69,3	10	
M6A	1,38	0,00	12,65	2,54	953,7	31,0	8	30%WC/70%Ni
M6B	1,18	0,00	17,10	2,40	958,3	92,8	4	
M6C	1,38	0,00	14,92	1,06	969,6	59,7	2	
M6D	1,18	0,00	11,97	1,17	963,3	46,4	6	
M6E	1,06	0,00	13,21	1,46	931,6	86,0	10	
M7A	1,38	0,00	34,16	1,89	1352,9	107,3	8	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂
M7B	1,78	0,00	41,86	0,93	1478,4	187,8	4	
M7C	1,98	0,00	34,12	1,90	1355,5	139,5	2	
M7D	1,98	0,00	38,89	1,04	1427,2	195,1	6	
M7E	1,56	0,00	34,49	2,87	1419,9	134,0	10	
M8A	1,58	0,00	41,01	3,35	1482,4	113,2	8	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂
M8B	1,48	0,00	42,35	3,01	1582,9	315,8	4	
M8C	1,58	0,00	39,07	3,53	1685,9	150,2	2	
M8D	1,38	0,00	42,85	3,15	1529,8	247,5	6	
M8E	2,10	0,00	39,82	1,19	1437,3	99,6	10	

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σ_e =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σ_{Po} =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σ_{HV} =Desviación de la Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm, Temperatura =T=100 °C, t =tiempo. Rugosidad: Moleteado: Paso=P=1,5 mm de estrías cruzadas de las moletas, Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.3.F. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Rosgado con Proceso Térmico								
ExpP3	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV	t [hr]	Recubrimiento
L5A	1,38	0,00	11,55	0,31	978,1	53,2	8	40%WC/60%Ni
L5B	1,38	0,00	11,62	0,11	963,2	42,1	4	
L5C	1,38	0,00	15,84	2,01	968,1	37,1	2	
L5D	1,18	0,00	17,37	1,76	950,5	67,0	6	
L5E	1,38	0,00	11,17	1,70	924,1	33,7	10	
L6A	1,18	0,00	16,73	0,40	949,9	50,9	8	30%WC/70%Ni
L6B	1,00	0,00	11,92	0,35	975,9	79,2	4	
L6C	1,00	0,00	15,35	2,26	907,3	68,6	2	
L6D	1,00	0,00	17,96	0,47	946,5	51,2	6	
L6E	1,08	0,00	15,54	1,98	890,7	65,8	10	
L7A	1,78	0,00	38,42	4,16	1608,0	161,2	8	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂
L7B	1,58	0,00	35,81	1,64	1393,2	69,5	4	
L7C	1,78	0,00	35,29	0,70	1589,2	186,6	2	
L7D	1,78	0,00	34,65	3,13	1613,0	167,5	6	
L7E	1,78	0,00	34,08	0,79	1613,5	93,0	10	
L8A	1,48	0,00	38,40	2,07	1634,6	165,5	8	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂
L8B	1,58	0,00	38,57	2,17	1642,7	183,8	4	
L8C	1,58	0,00	38,71	1,78	1459,3	32,4	2	
L8D	1,78	0,00	38,67	1,52	1594,4	83,9	6	
L8E	1,68	0,00	39,28	2,41	1618,1	117,9	10	

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σe=Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo=Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de Microdureza Vicker. σHV=Desviación de Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm, Temperatura =T=100 °C, t =tiempo. Rugosidad: Moleteado: Paso=P=1,5 mm de estrías cruzadas de las moletas, Profundidad=0,35 mm.

Tabla A.4.1.3.G. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Roscado								
ExpP3	e [mm]	σ_e [mm]	Po [%]	σ_{Po} [%]	HV	σ_{HV}	Recubrimiento	T [°C]
PR1A	1,00	0,00	11,38	0,31	942,5	54,4	40%WC/60%Ni	100
PR1B	0,80	0,00	7,51	0,46	982,5	44,3		
PR1C	1,18	0,00	10,12	1,30	983,4	61,2		
PR1D	0,80	0,00	9,49	0,23	970,6	55,9		
PR1E	1,00	0,00	12,28	0,32	986,8	46,8		
PR1F	0,80	0,00	11,51	0,85	975,4	51,6		
PR1G	1,18	0,00	15,05	0,76	947,3	59,0		
PR1H	1,00	0,00	8,14	0,80	974,6	72,7		
PR2A	1,00	0,00	10,04	2,23	935,9	114,1	30%WC/70%Ni	
PR2B	1,00	0,00	8,95	0,28	937,9	89,1		
PR2C	0,80	0,00	10,70	0,37	949,3	37,6		
PR2D	0,80	0,00	11,02	0,55	955,8	41,7		
PR2E	0,80	0,00	9,33	0,70	958,7	30,8		
PR2F	1,00	0,00	8,61	0,32	959,2	55,4		
PR2G	1,18	0,00	9,84	0,40	940,4	44,2		
PR3A	1,48	0,00	34,63	1,16	1628,7	96,1	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂	
PR3B	1,58	0,00	34,14	3,02	1553,1	173,7		
PR3C	1,00	0,00	33,55	1,82	1326,2	167,4		
PR3D	1,58	0,00	33,01	1,38	1497,7	161,6		
PR4A	1,58	0,00	42,58	2,47	1684,9	142,8	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂	
PR4B	0,80	0,00	39,85	2,45	1777,5	288,7		
PR4C	1,58	0,00	40,44	1,96	1770,2	116,2		
PR4D	1,18	0,00	39,70	1,85	1553,6	17,6		
PR5A	1,38	0,00	33,66	0,99	1178,2	72,5	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂	20
PR5B	1,18	0,00	34,29	1,77	1711,7	129,4		
PR5C	1,38	0,00	34,69	3,13	1679,3	138,7		
PR5D	1,38	0,00	36,80	3,31	1307,8	88,5	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂	
PR6A	1,38	0,00	38,62	2,57	1584,6	391,3		
PR6B	1,48	0,00	38,82	1,89	1762,3	64,5		
PR6C	1,58	0,00	40,39	1,89	1798,7	83,5		
PR6D	1,58	0,00	38,43	1,89	1465,6	213,0		

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σ_e =Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σ_{Po} =Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de la Microdureza Vicker. σ_{HV} =Desviación de la Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm. y Rugosidades: Roscado Profundidad 0,75 mm, Ángulo del Filete= $\alpha=90^\circ$ y Paso=P=1,5 mm.

Tabla A.4.1.3.H. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Lisa								
ExpP3	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV	Recubrimiento	T [°C]
LI1	1,58	0,00	14,14	0,98	859,5	47,3	40%WC/60%Ni	100
LI2	1,18	0,00	10,53	1,30	909,6	28,5	30%WC/70%Ni	
LI3	1,58	0,00	35,46	0,94	1416,3	173,2	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂	
LI4	2,16	0,00	38,94	1,88	1589,6	14,7	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂	

Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento en Tres Trozos: e=Promedio del Espesor. σe=Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo=Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de Microdureza Vicker. σHV=Desviación de Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm. y Rugosidades: Lisas sin mecanizar obtenida directamente de la barra calibrada de 30 mm de diámetro.

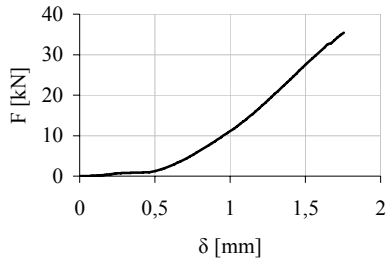
Tabla A.4.1.3.H. Datos de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Tres Partes (ExpP3.).

Rayado								
ExpP3	e [mm]	σe [mm]	Po [%]	σPo [%]	HV	σHV	Recubrimiento	T [°C]
RA1	1,58	0,00	11,94	0,46	921,0	84,1	40%WC/60%Ni	100
RA2	1,18	0,00	8,35	0,67	919,4	91,7	30%WC/70%Ni	
RA3	1,78	0,00	35,37	1,27	1414,6	211,5	87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂	
RA4	1,78	0,00	37,41	1,08	1808,0	166,4	97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂	

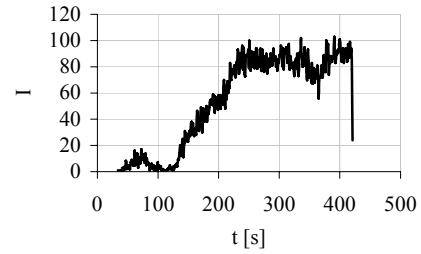
Los experimentos ExpP3. se designan con números, y las probetas que los forman se designan con letras mayúsculas. Recubrimiento: e=Promedio del Espesor. σe=Desviación del Espesor. Po=Promedio de la Porosidad. σPo=Desviación de la Porosidad. HV=Promedio de Microdureza Vicker. σHV=Desviación de Microdureza Vicker. Altura=h=15 mm. y Rugosidades: Rayado o Ranurado cilíndrico a lo largo del eje axial en una distancia de 15 mm, torneándose cinco ranuras circulares completas con profundidades de 0,35 mm, una central y otras dos pares en el extremos de la distancia de 15 mm con espaciamento de 2 mm,y Ángulo de la herramienta de 60 °

Las Curvas Cargas F [kN] versus Deformaciones Lineales δ [mm] e Impactos I versus Tiempo t [s], de los Experimentos de Proyección Térmica se Grafican para Recubrimiento Total, Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes y Recubrimiento Parcial en Tres Partes.

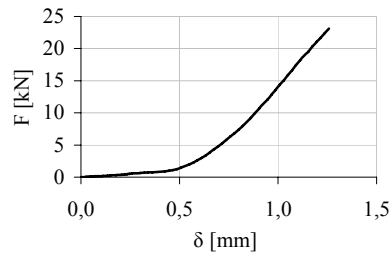
A.4.1.4.A. Graficas de los Experimentos Recubrimiento Total.



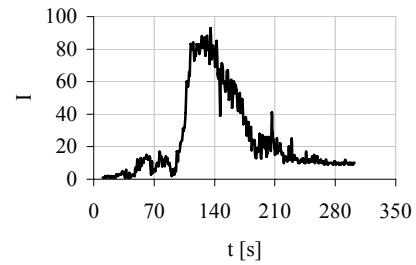
1A



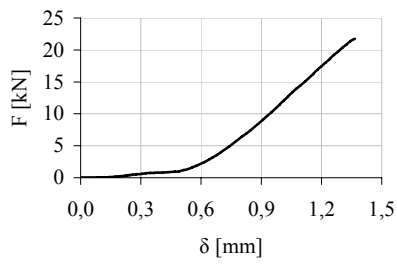
1A



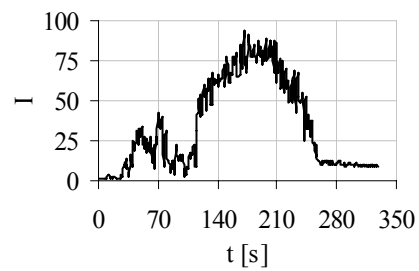
1B



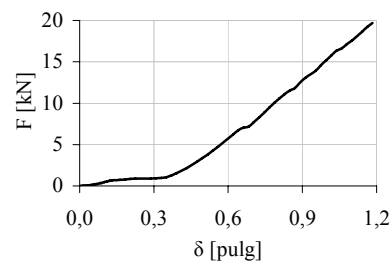
1B



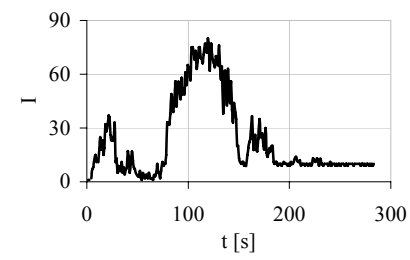
1C



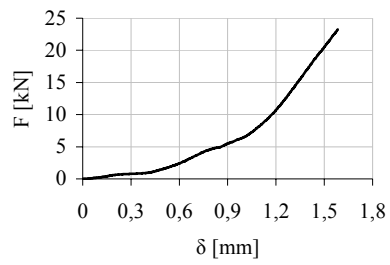
1C



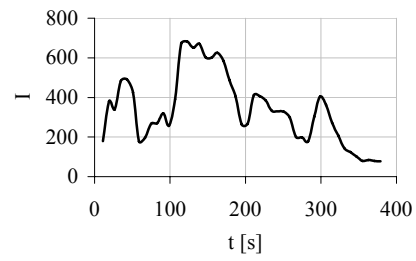
1D



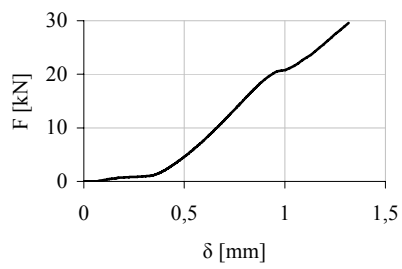
1D



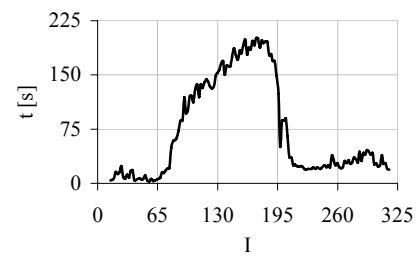
1E



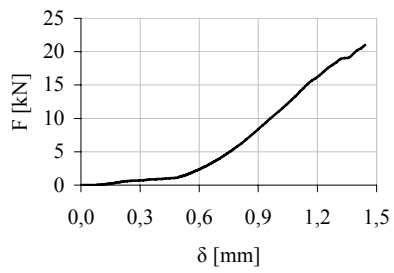
1E



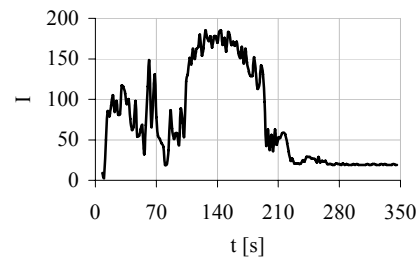
1F



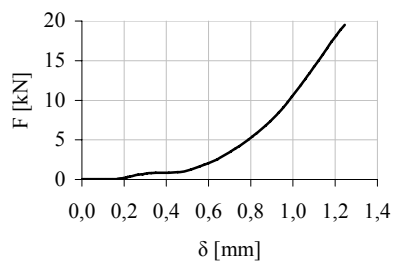
1F



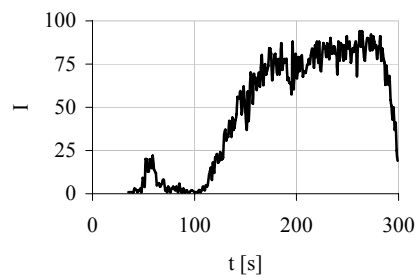
1G



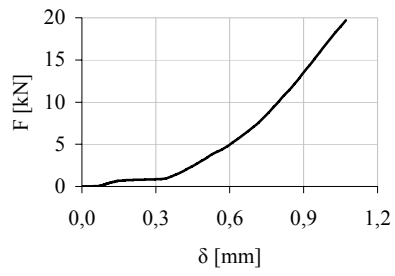
1G



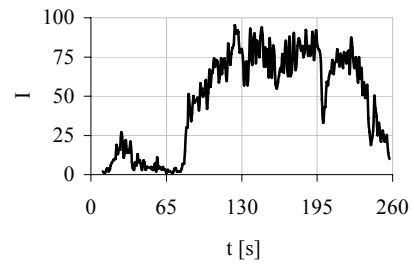
2 A



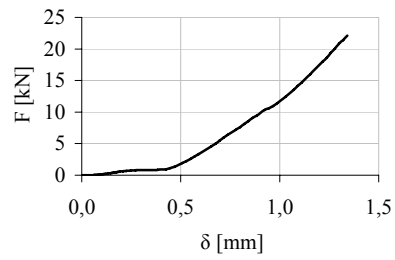
2 A



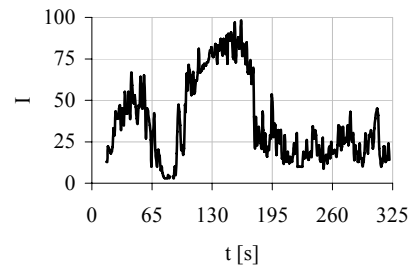
2 B



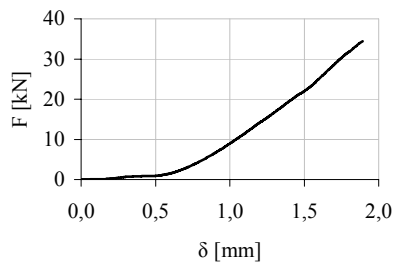
2 B



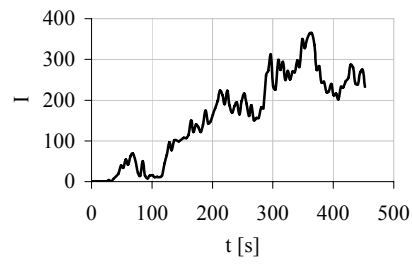
2 C



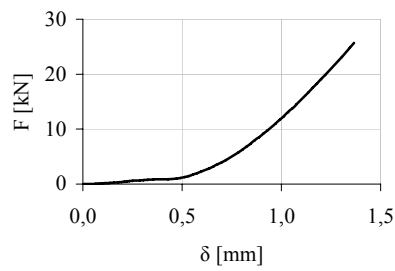
2 C



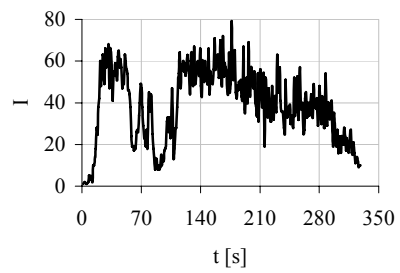
2 D



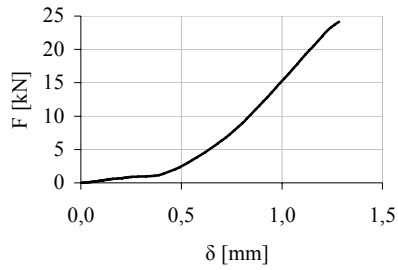
2 D



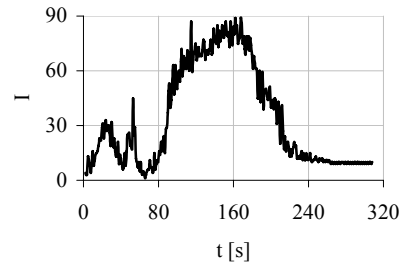
2 E



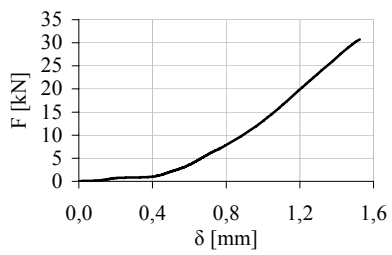
2 E



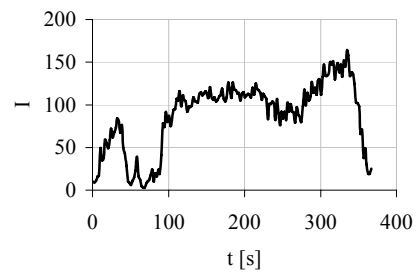
2 F



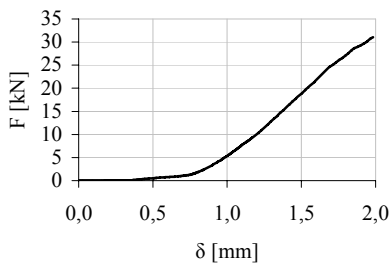
2 F



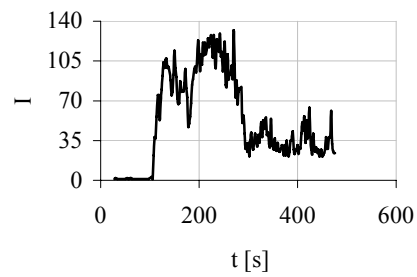
2 G



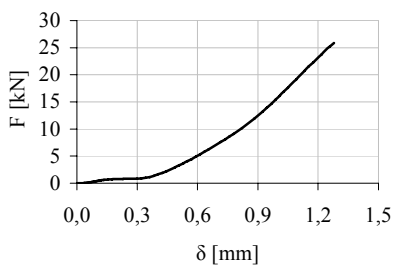
2 G



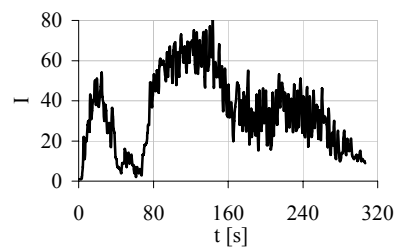
2 H



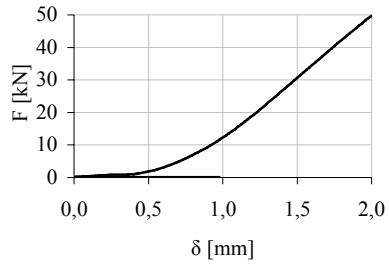
2 H



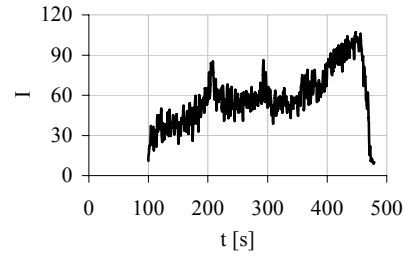
2 I



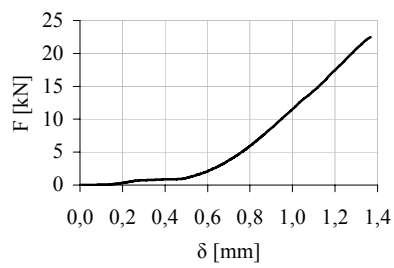
2 I



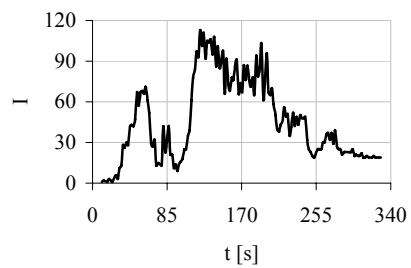
3 A



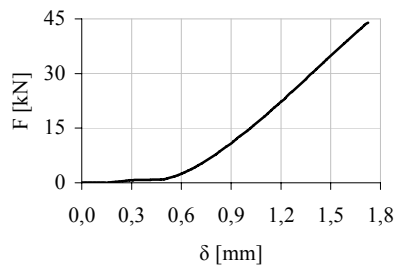
3 A



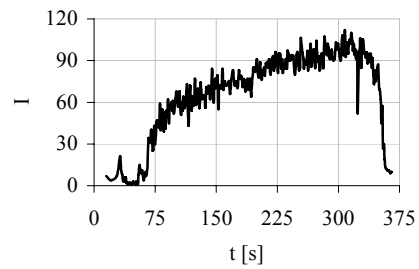
3 B



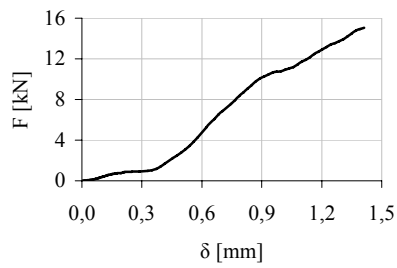
3 B



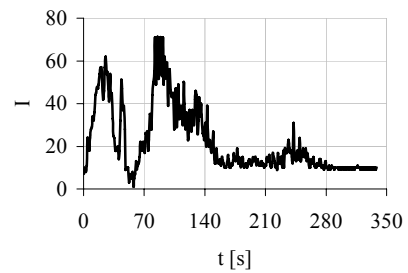
3 C



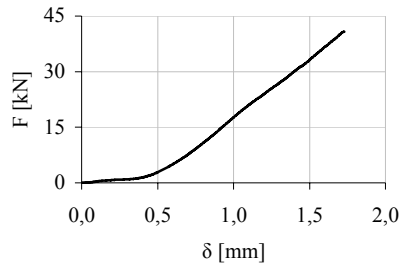
3 C



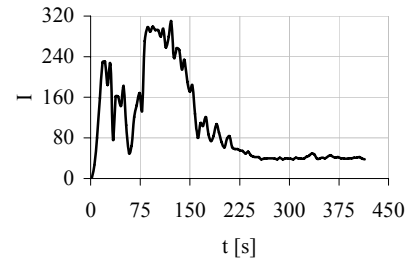
3 D



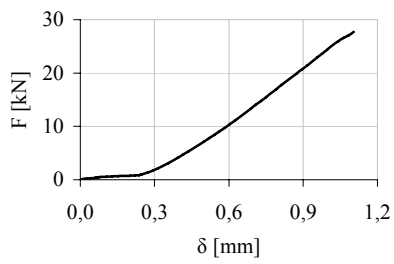
3 D



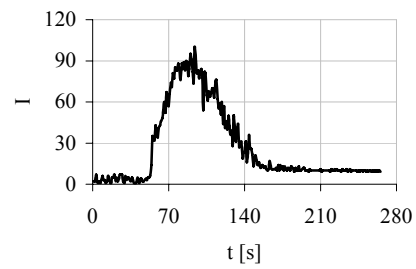
3 E



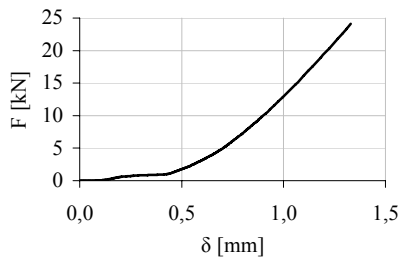
3 E



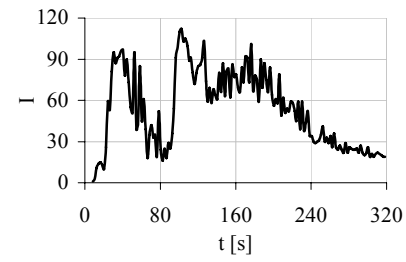
3 F



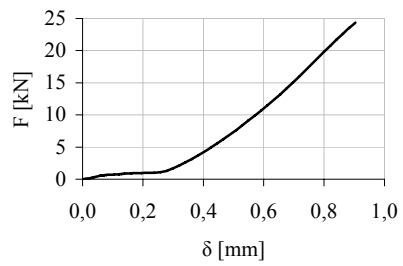
3 F



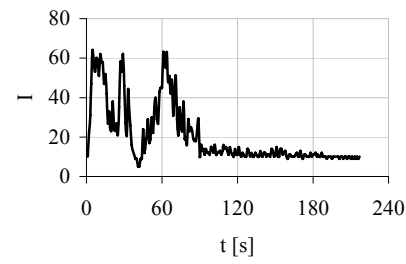
3 G



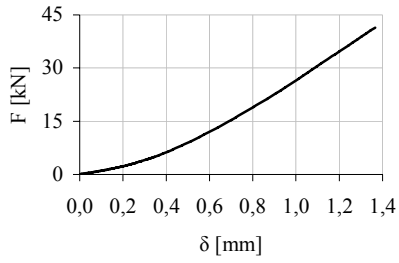
3 G



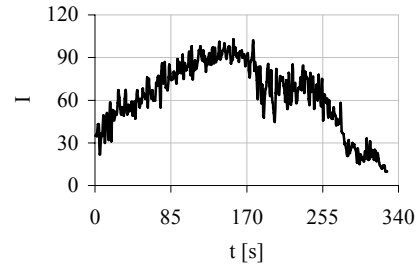
4 A



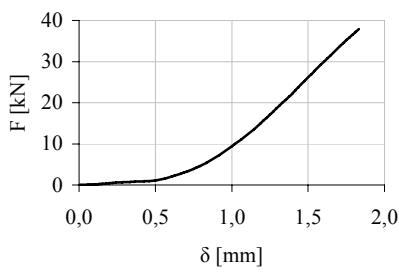
4 A



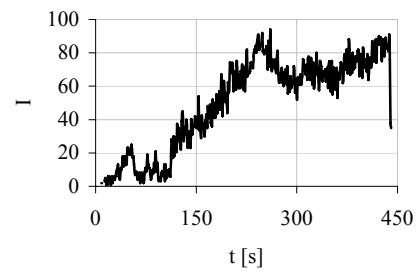
4 B



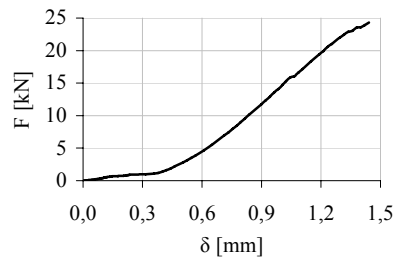
4 B



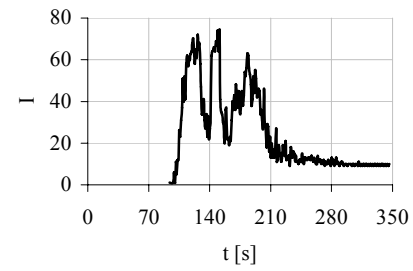
4 C



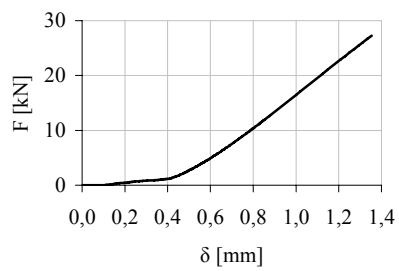
4 C



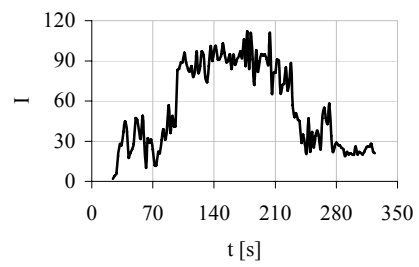
4 D



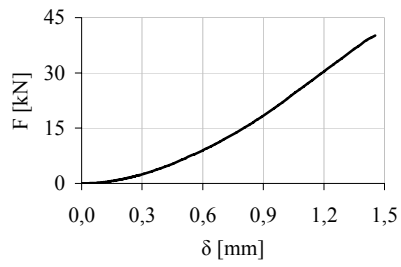
4 D



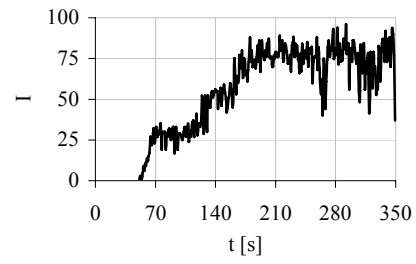
4 E



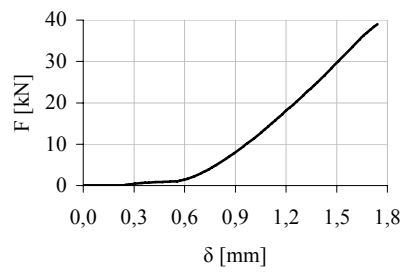
4 E



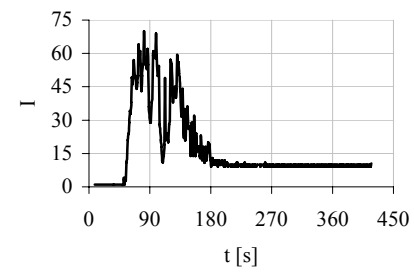
4 F



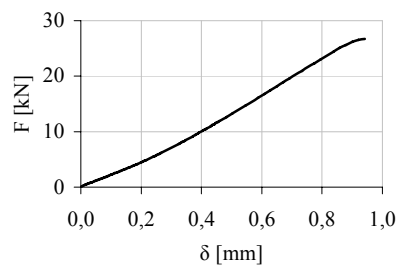
4 F



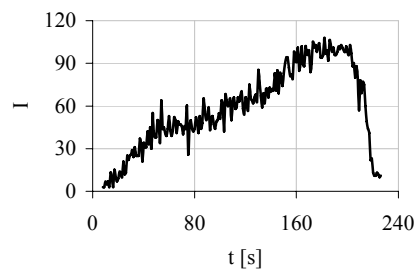
4 G



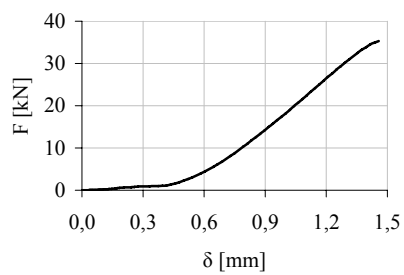
4 G



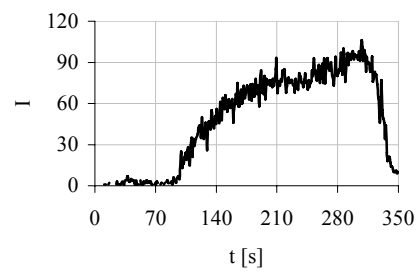
5 A



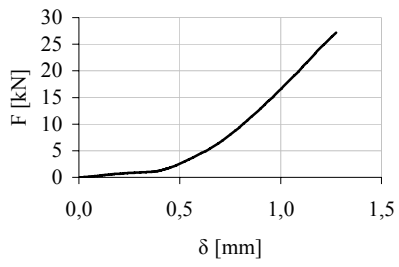
5 A



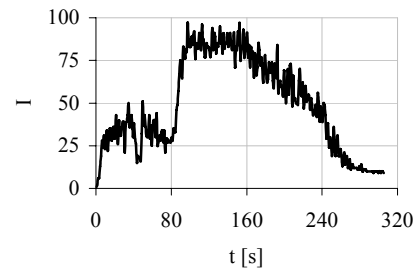
5 B



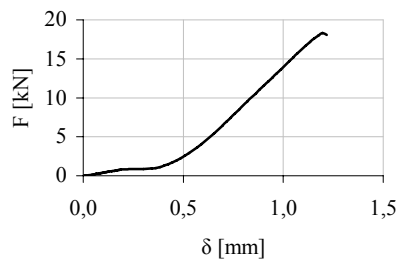
5 B



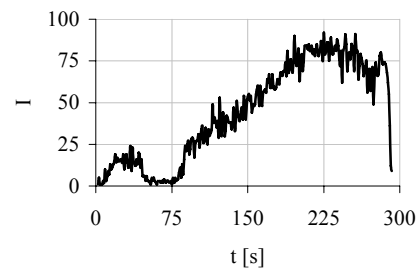
5 C



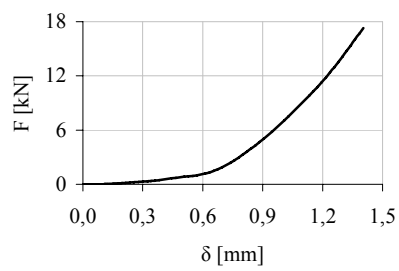
5 C



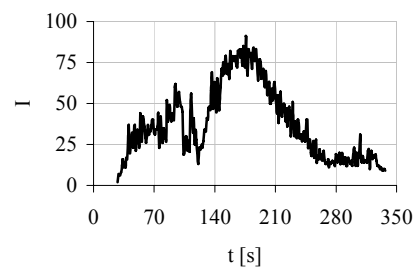
5 D



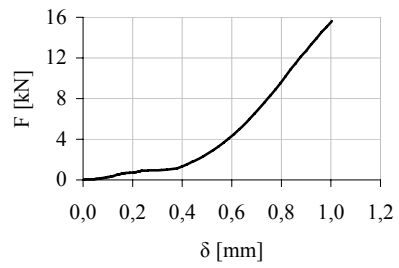
5 D



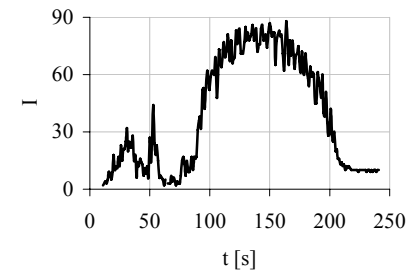
5 E



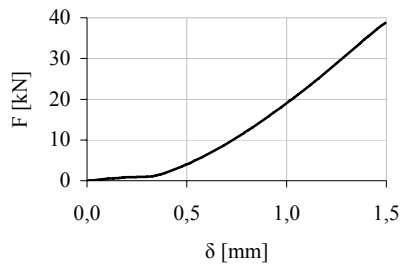
5 E



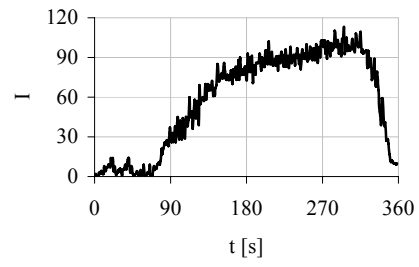
5 F



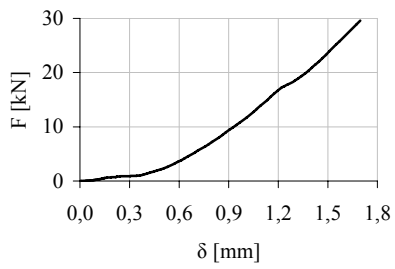
5 F



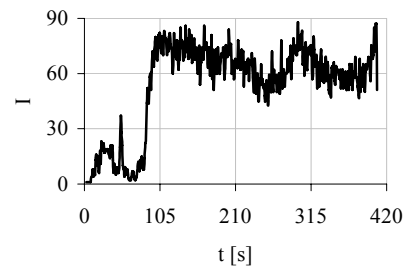
5 G



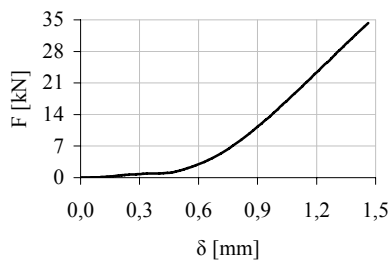
5 G



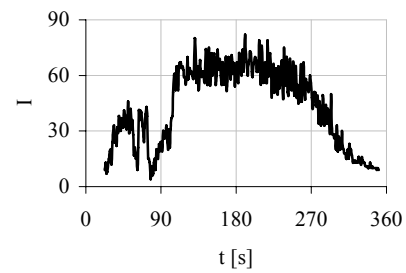
6 A



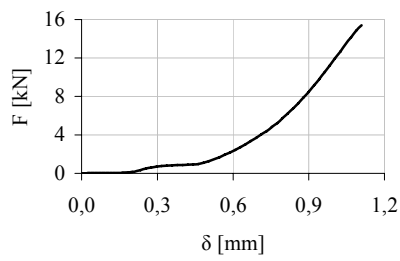
6 A



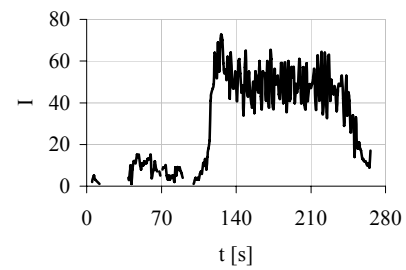
6 B



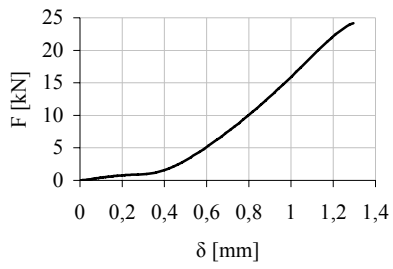
6 B



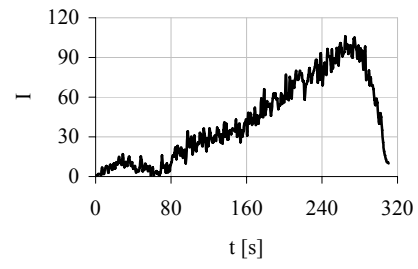
6 C



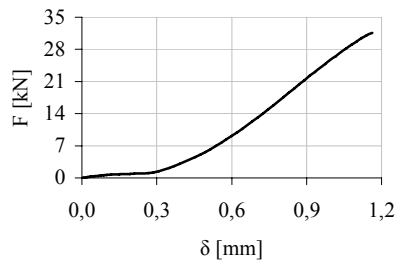
6 C



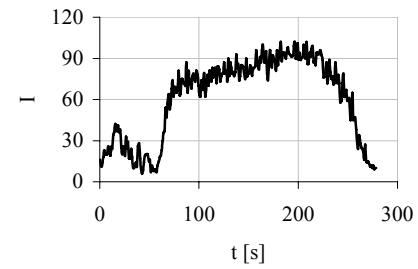
6 D



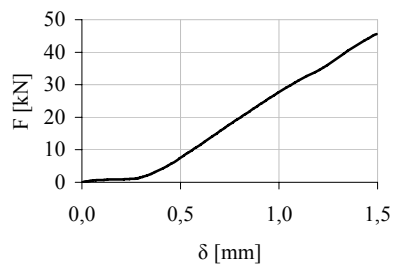
6 D



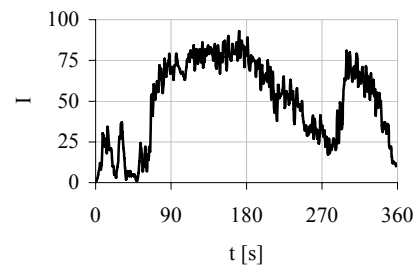
6 E



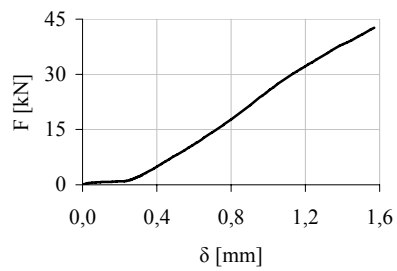
6 E



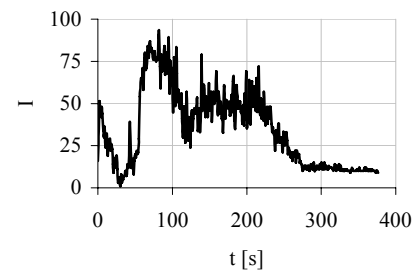
6 F



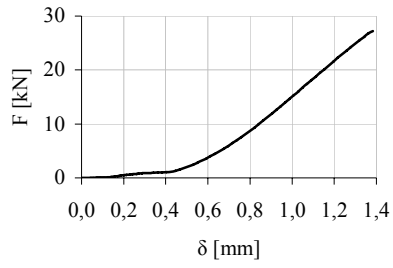
6 F



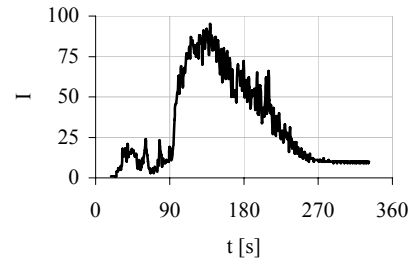
6 G



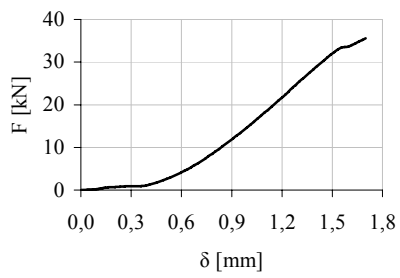
6 G



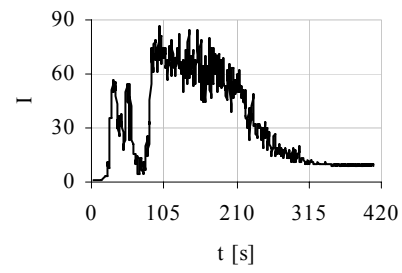
7 A



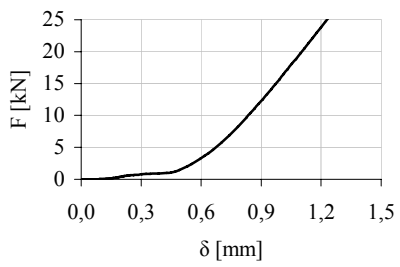
7 A



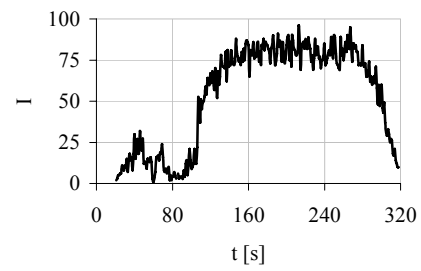
7 B



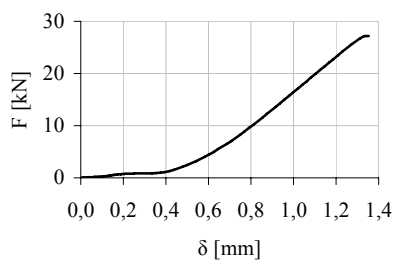
7 B



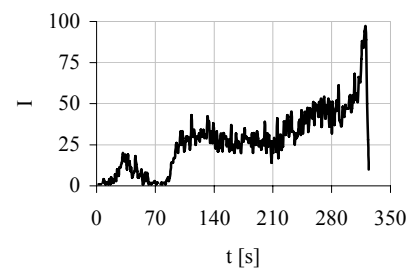
7 C



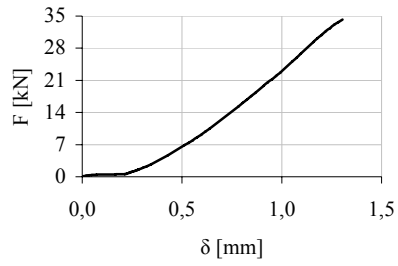
7 C



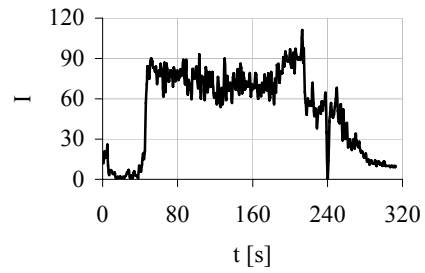
7 D



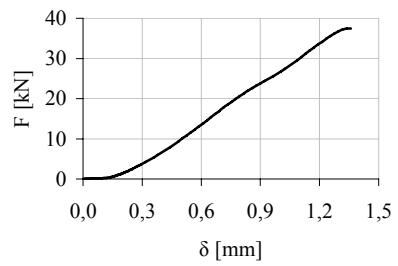
7 D



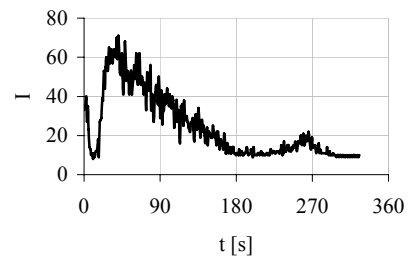
7 E



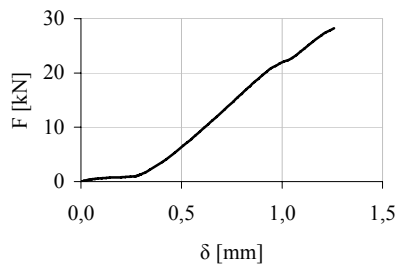
7 E



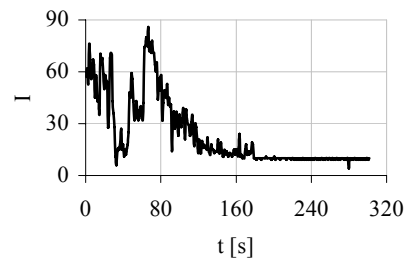
7 F



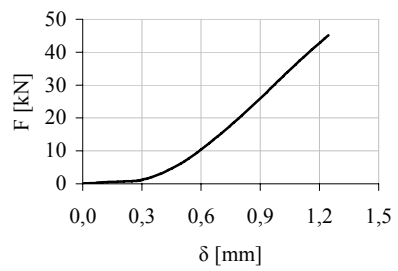
7 F



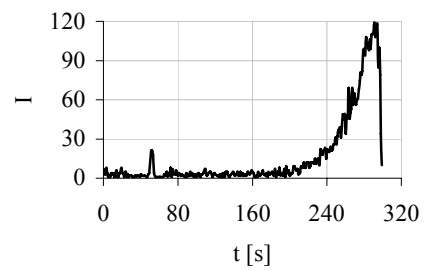
7 G



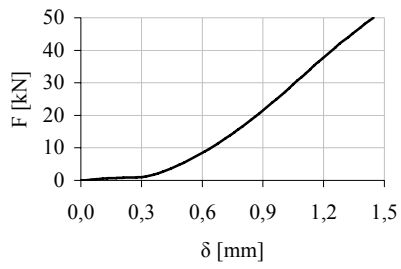
7 G



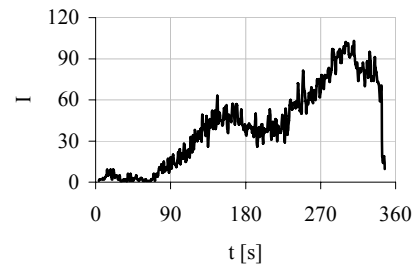
8 A



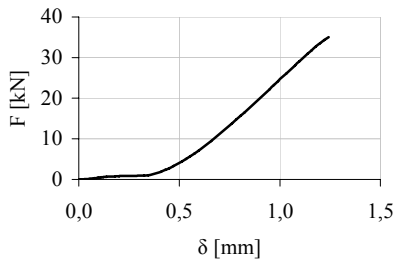
8 A



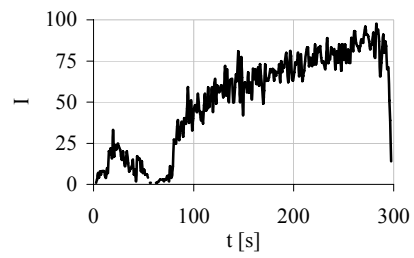
8 B



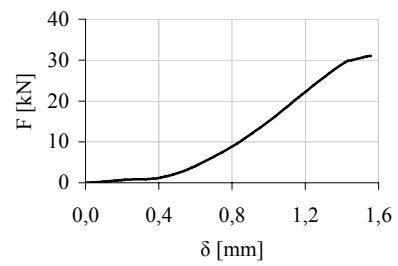
8 B



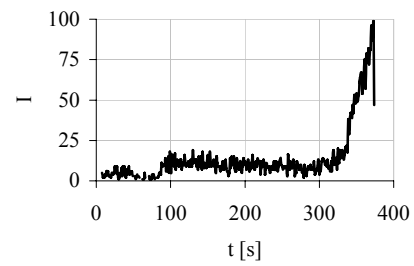
8 C



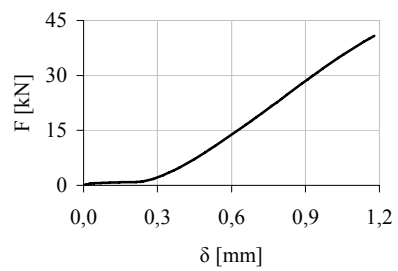
8 C



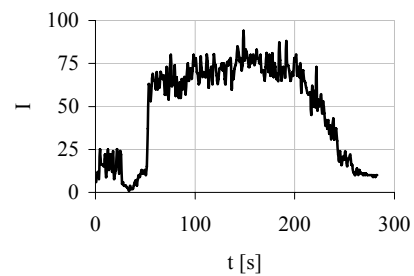
8 D



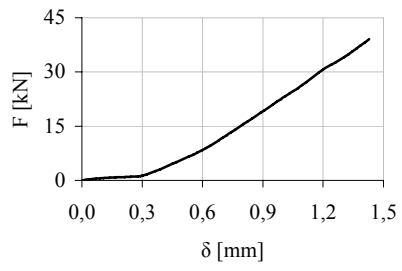
8 D



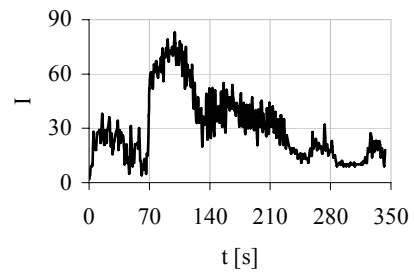
8 E



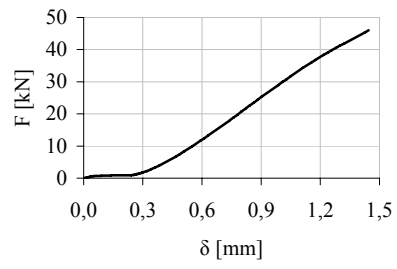
8 E



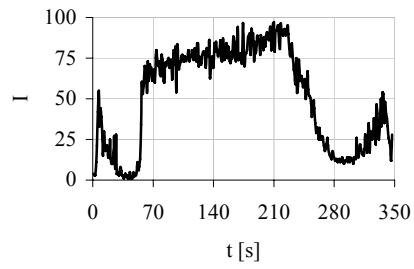
8 F



8 F

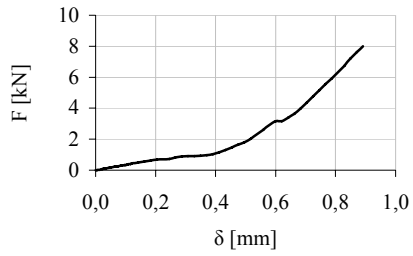


8 G

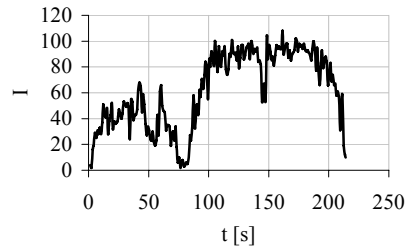


8 G

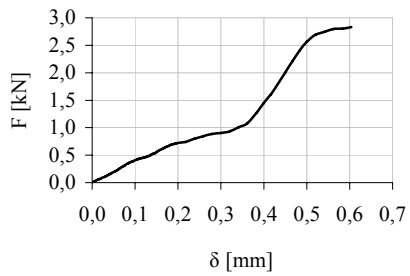
A.4.1.4.B. Graficas de los Experimentos Recubrimiento Parcial en Cuatro Partes o Trozos.



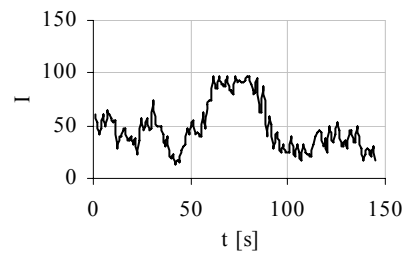
P1A



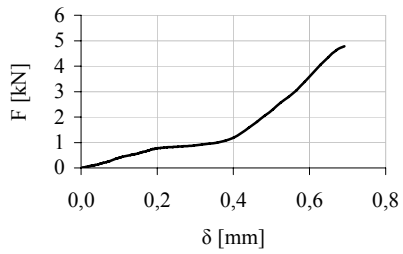
P1A



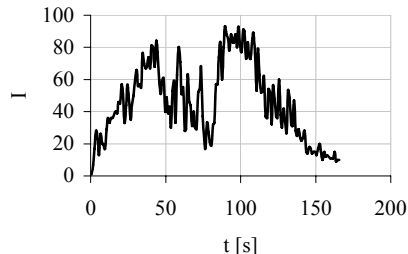
P1B



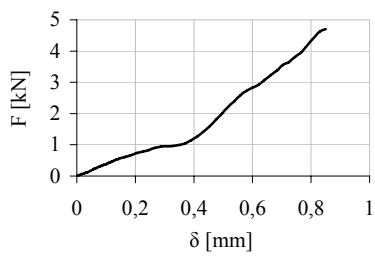
P1B



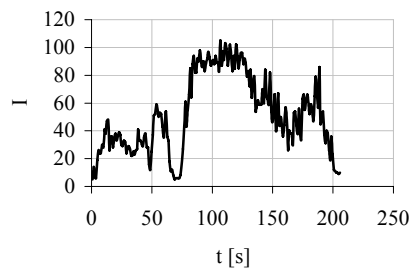
P1C



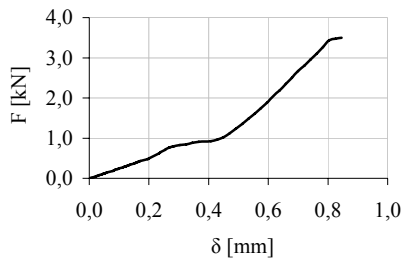
P1C



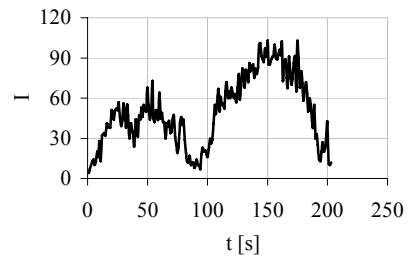
P1D



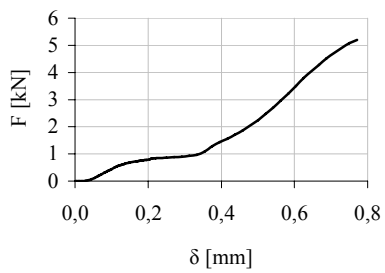
P1D



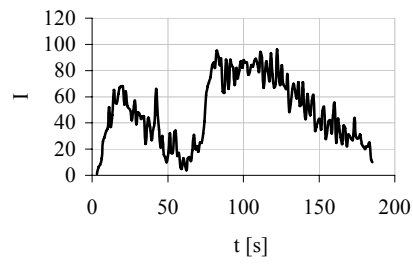
P1E



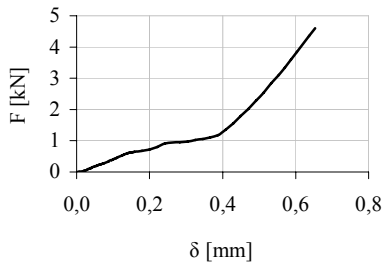
P1E



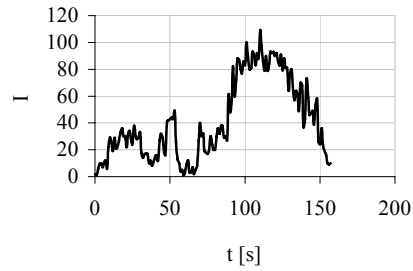
P1F



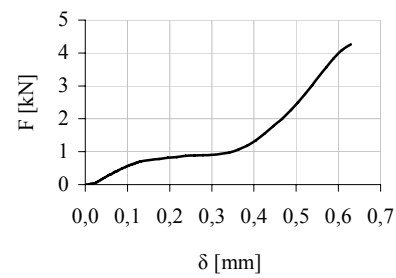
P1F



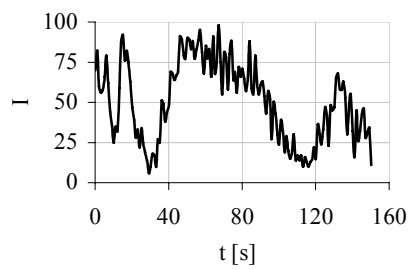
P1G



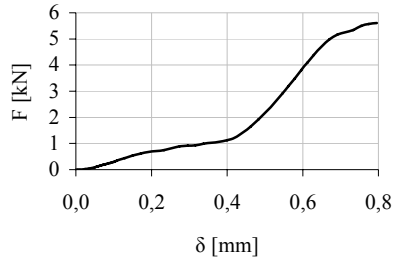
P1G



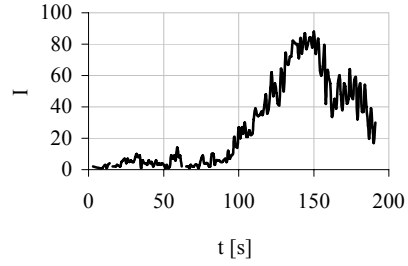
P1H



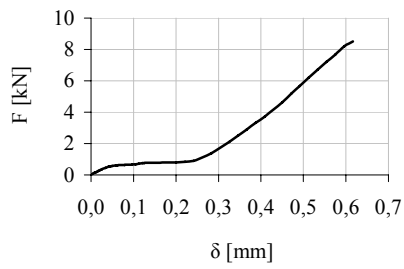
P1H



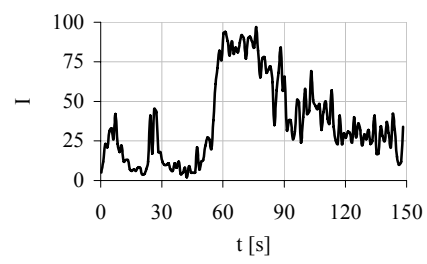
P1I



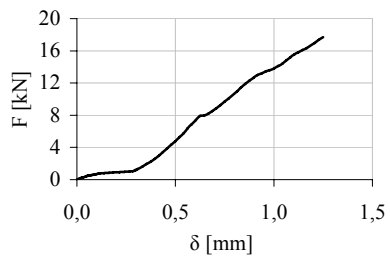
P1I



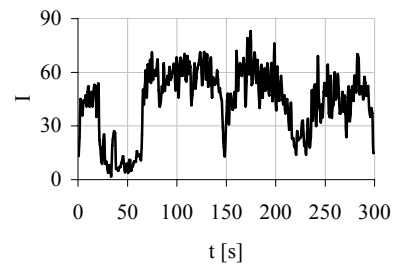
P2A



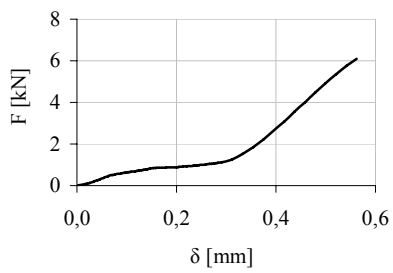
P2A



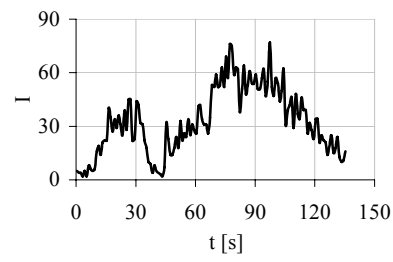
P2B



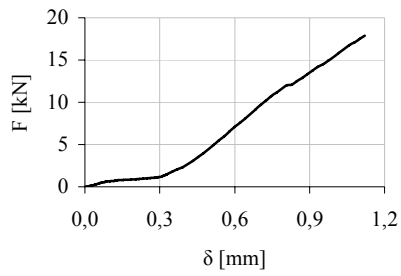
P2B



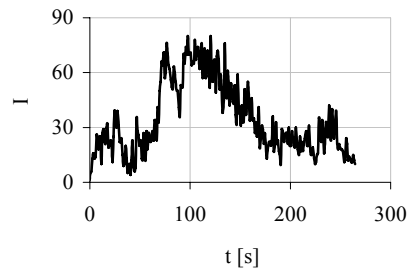
P2C



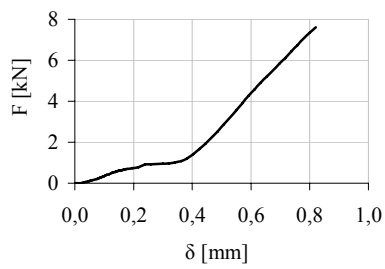
P2C



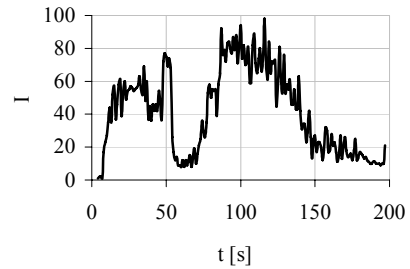
P2D



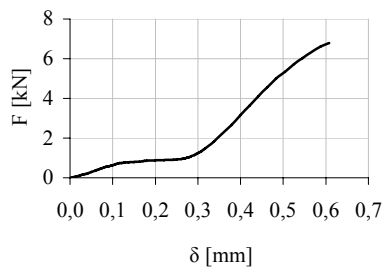
P2D



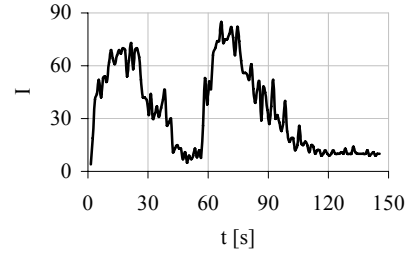
P2E



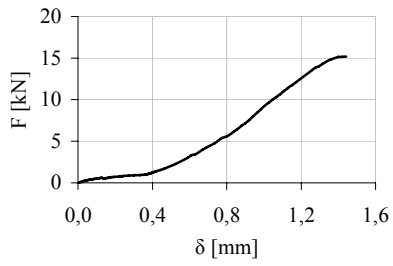
P2E



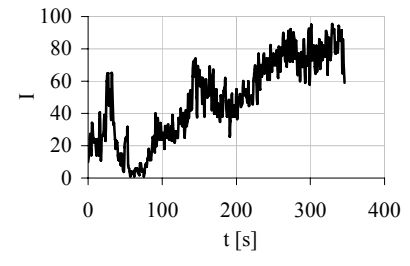
P2F



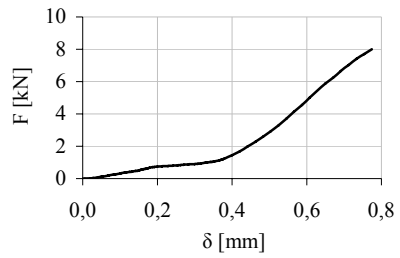
P2F



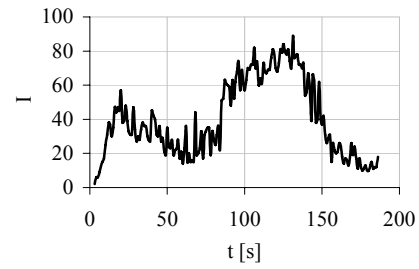
P2G



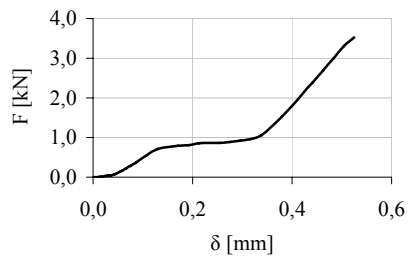
P2G



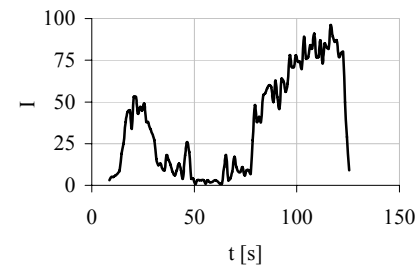
P2H



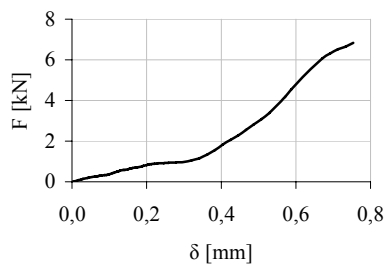
P2H



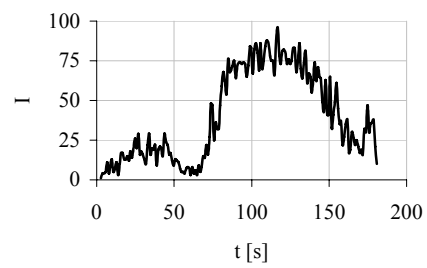
P2I



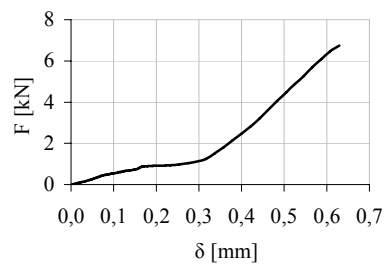
P2I



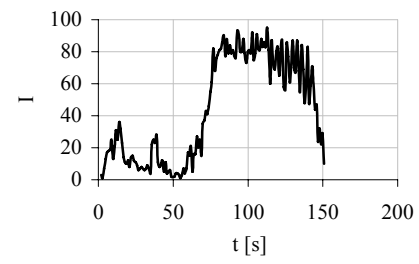
P3A



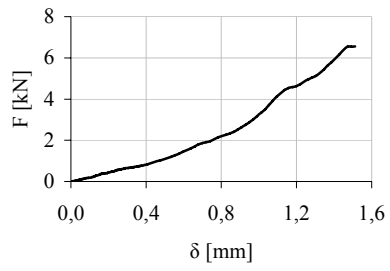
P3A



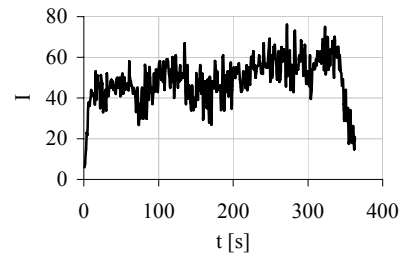
P3B



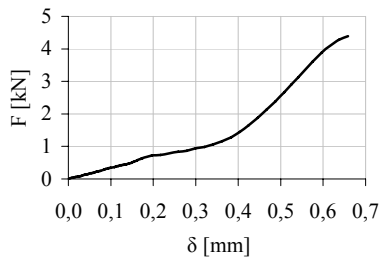
P3B



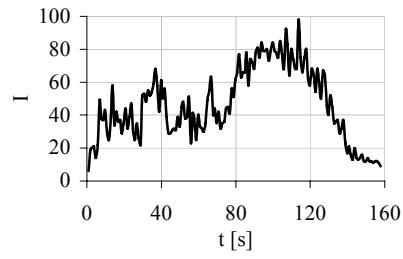
P3C



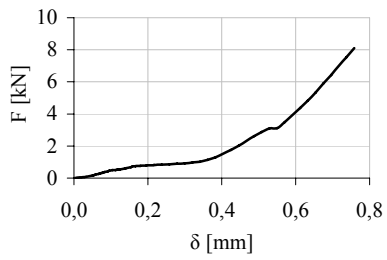
P3C



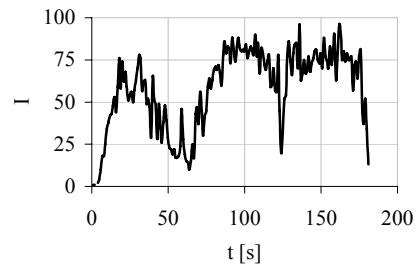
P3D



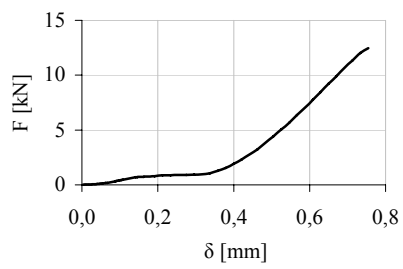
P3D



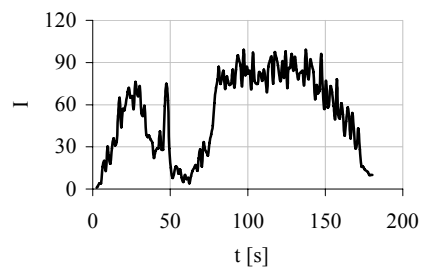
P3E



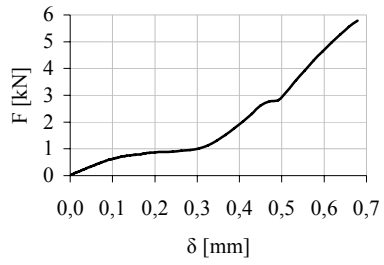
P3E



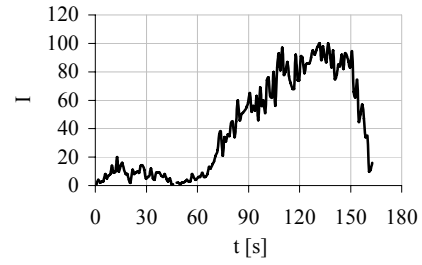
P3F



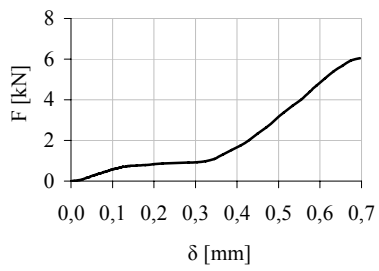
P3F



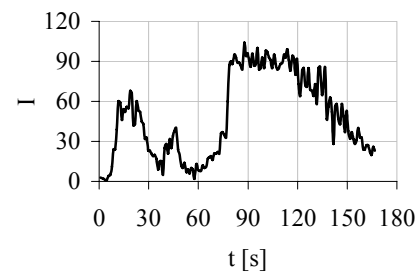
P3G



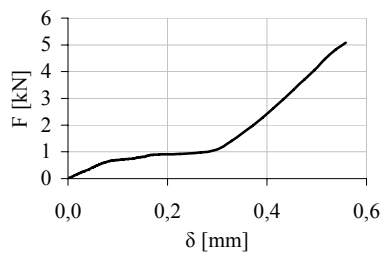
P3G



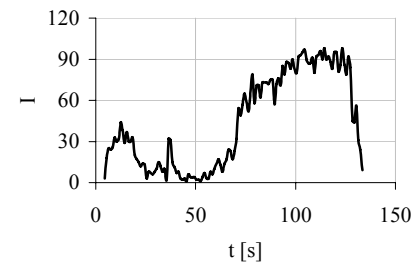
P3H



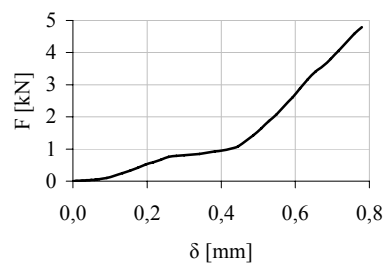
P3H



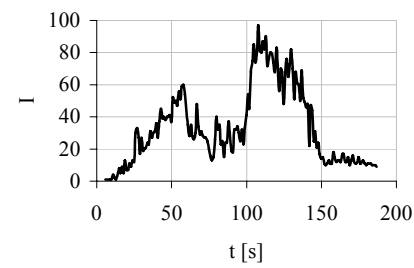
P3I



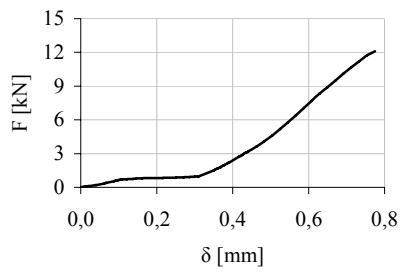
P3I



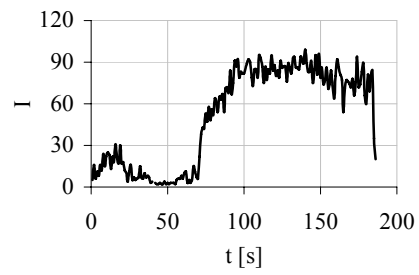
P3J



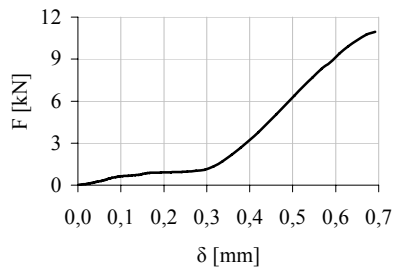
P3J



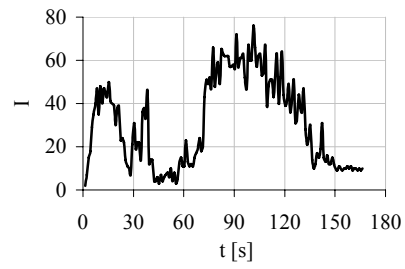
P4A



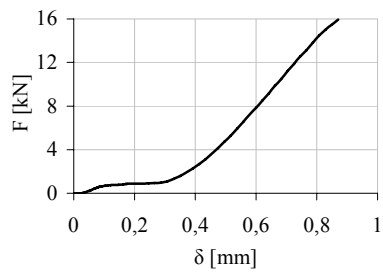
P4A



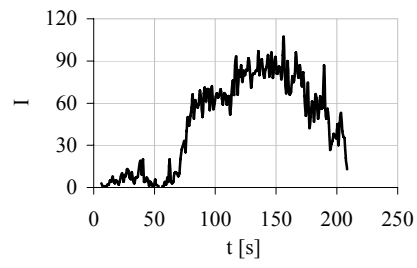
P4B



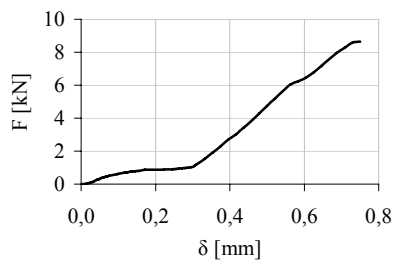
P4B



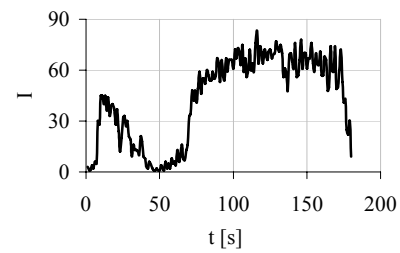
P4C



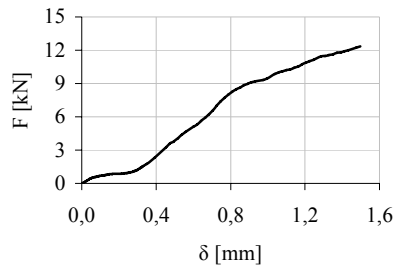
P4C



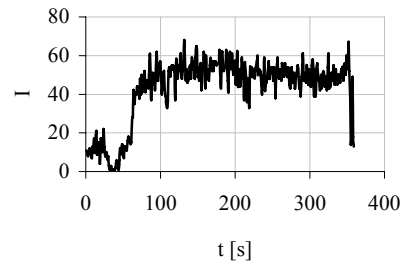
P4D



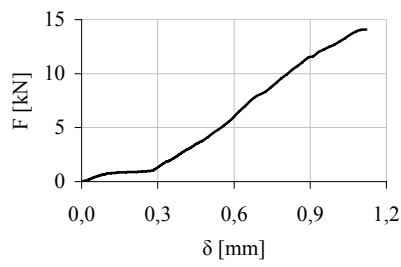
P4D



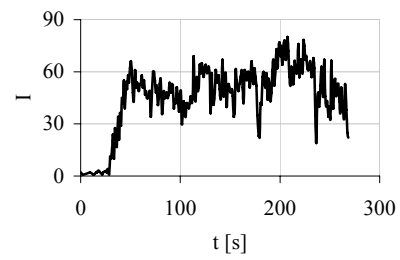
P4E



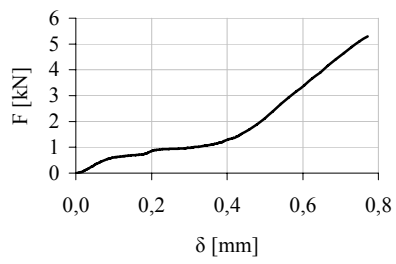
P4E



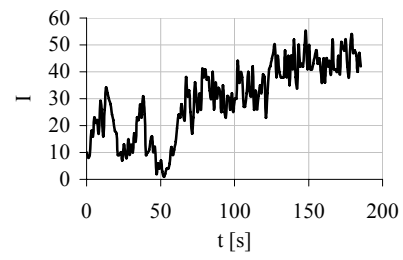
P4F



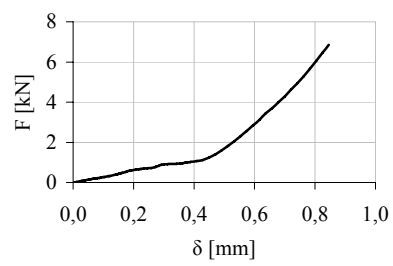
P4F



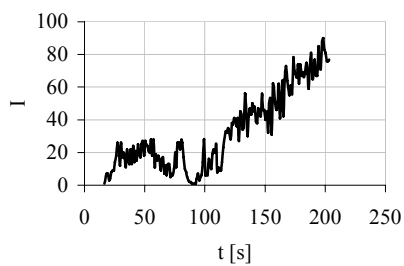
P4G



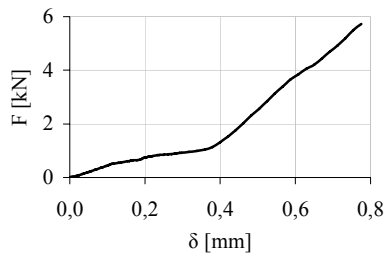
P4G



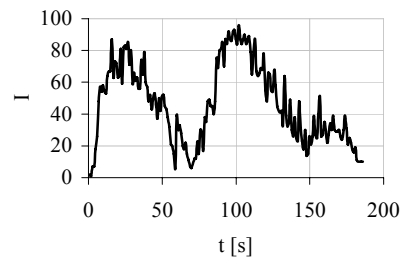
P4H



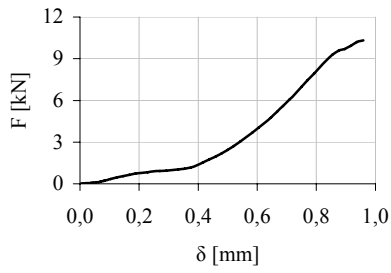
P4H



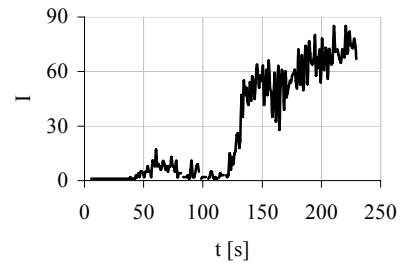
P4I



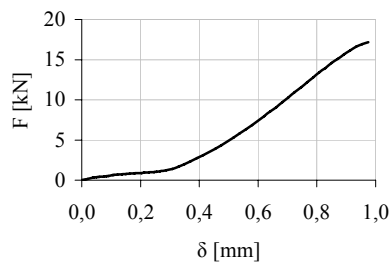
P4I



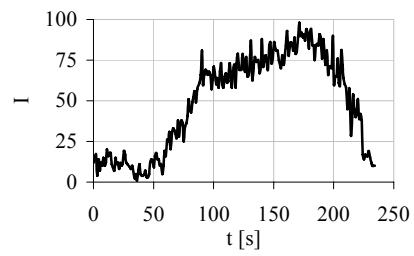
P4J



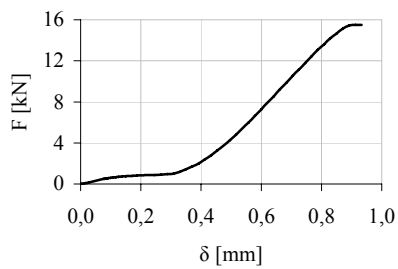
P4J



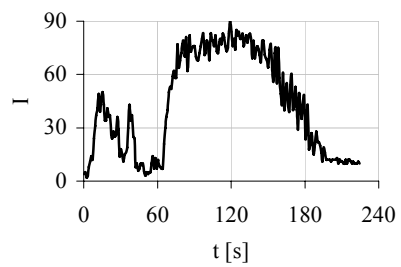
P5A



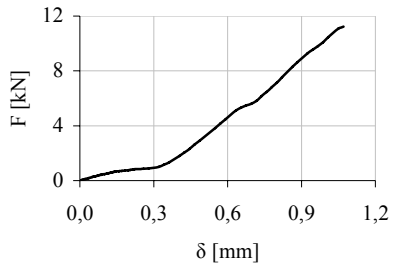
P5A



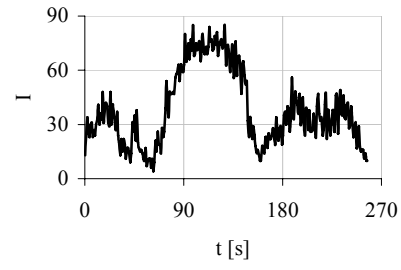
P5B



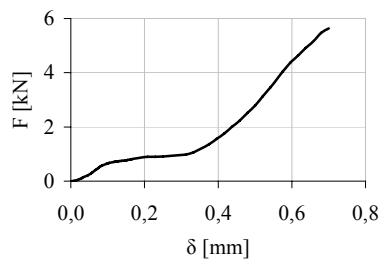
P5B



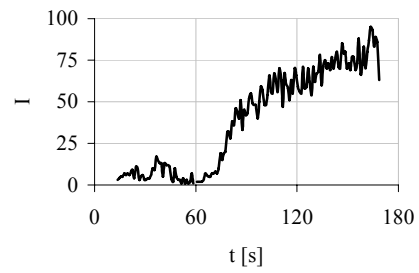
P5C



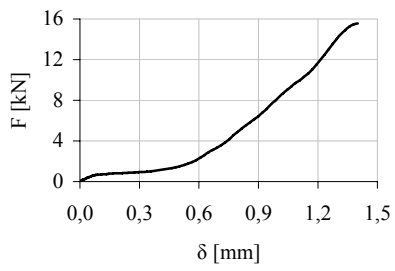
P5C



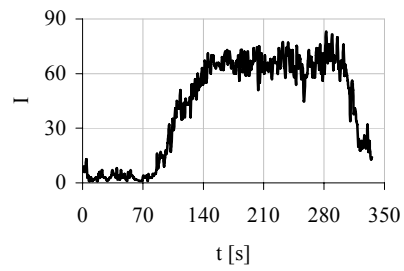
P5D



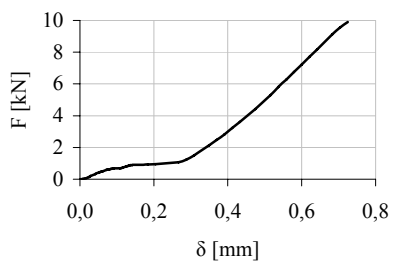
P5D



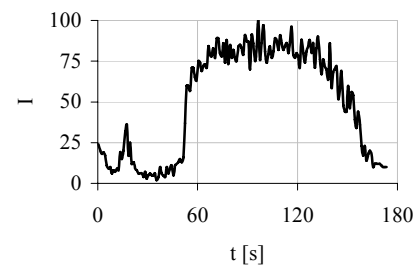
P5E



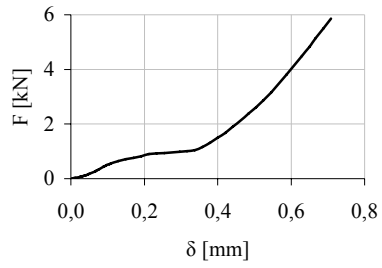
P5E



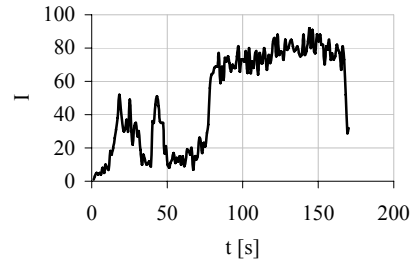
P5F



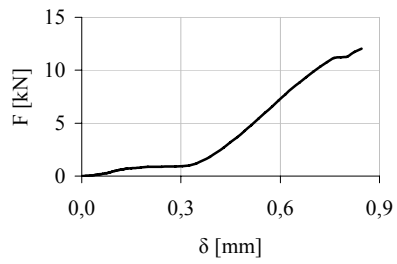
P5F



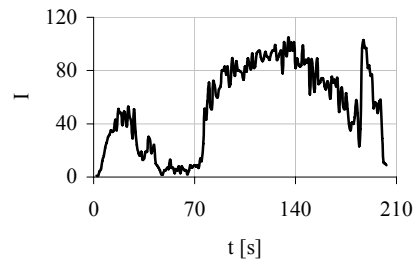
P5G



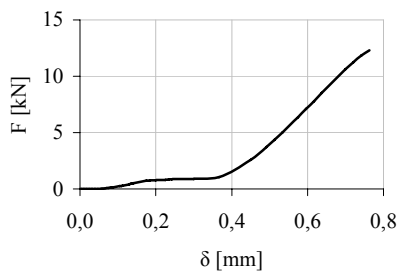
P5G



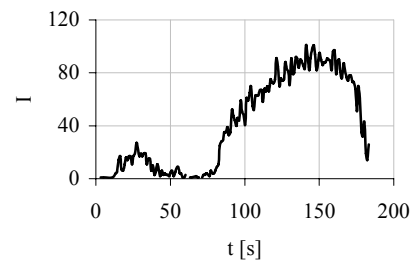
P5H



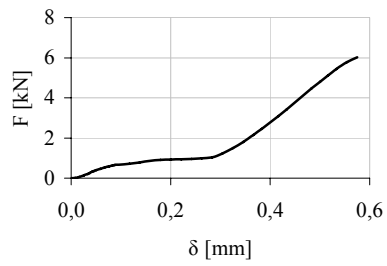
P5H



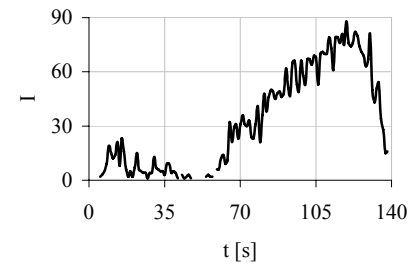
P5I



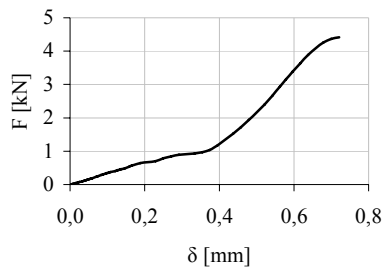
P5I



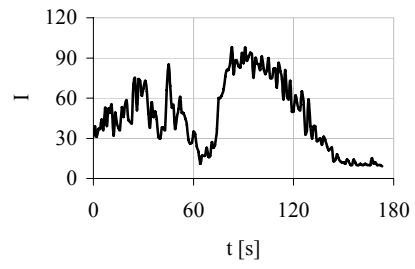
P5J



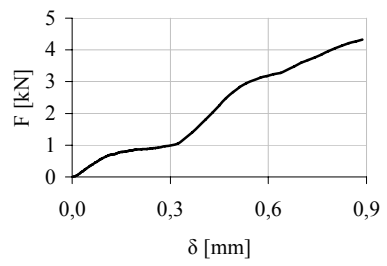
P5J



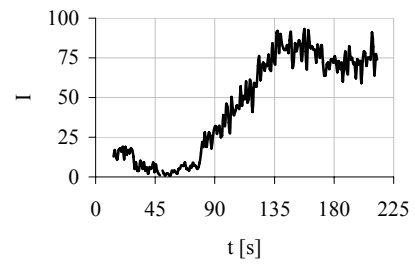
P5K



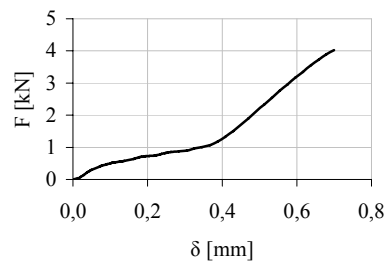
P5K



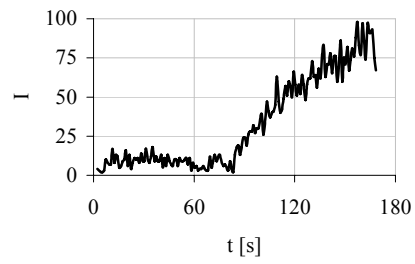
P5L



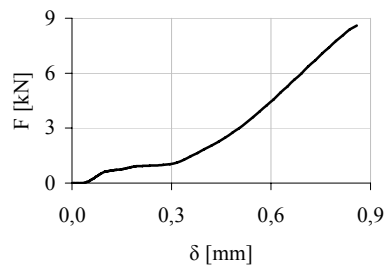
P5L



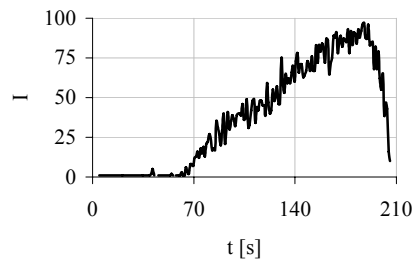
P5M



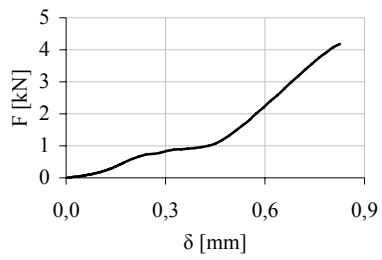
P5M



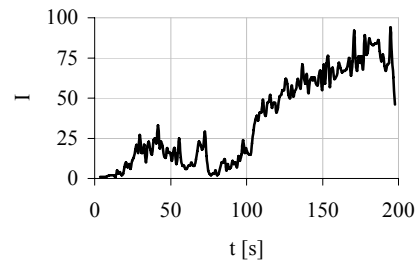
P5N



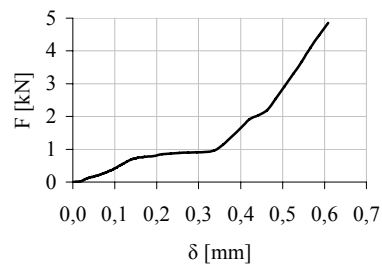
P5N



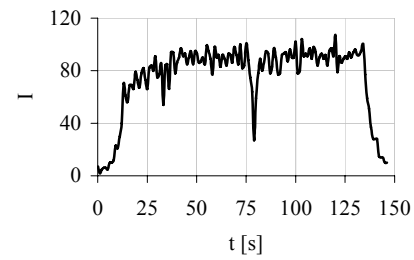
P5Ñ



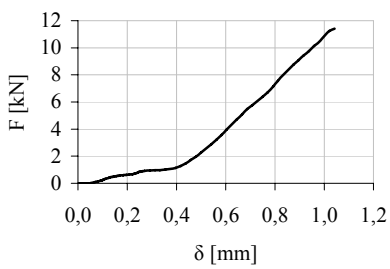
P5Ñ



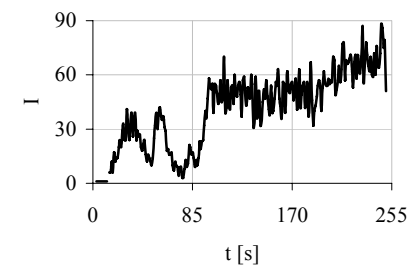
P6A



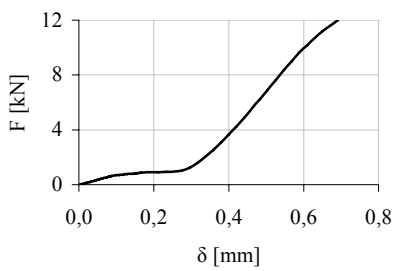
P6A



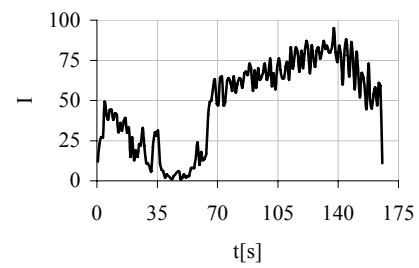
P6B



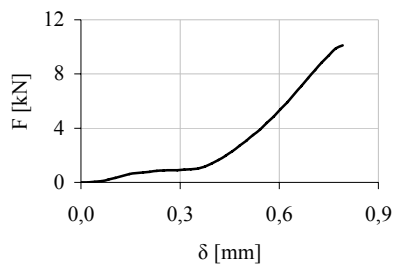
P6B



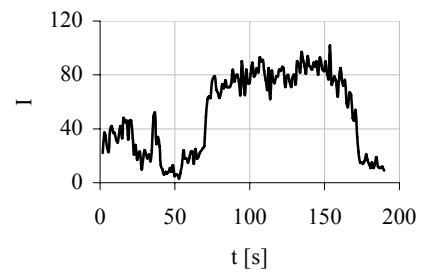
P6C



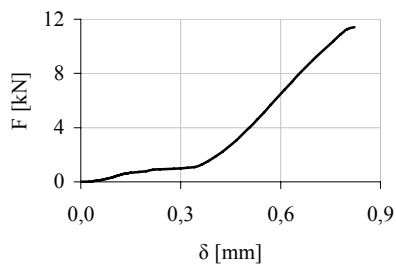
P6C



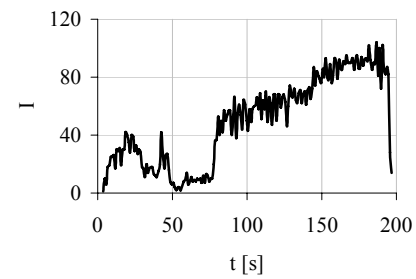
P6D



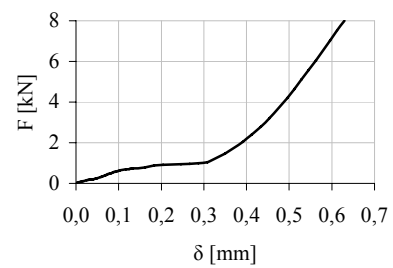
P6D



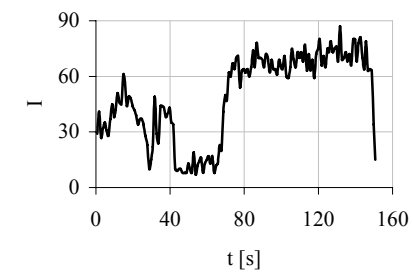
P6E



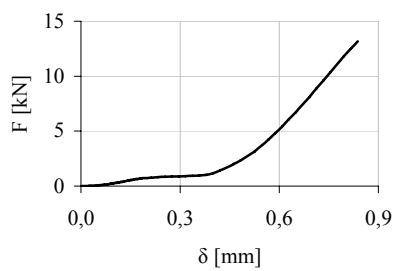
P6E



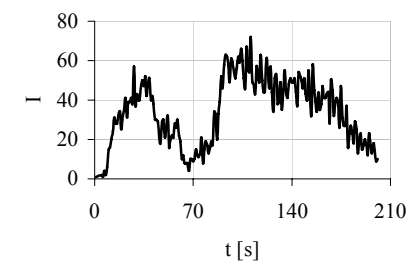
P6F



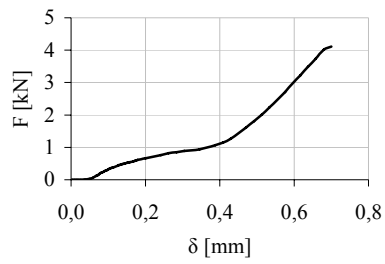
P6F



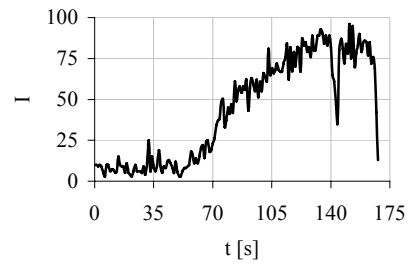
P6G



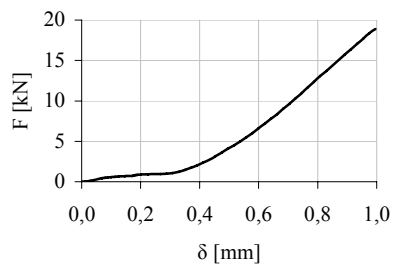
P6G



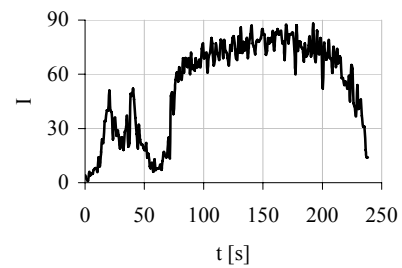
P6H



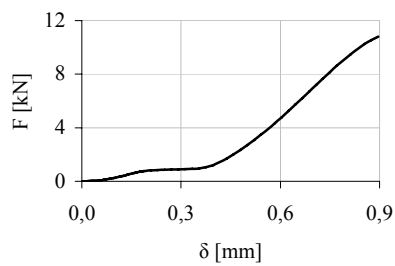
P6H



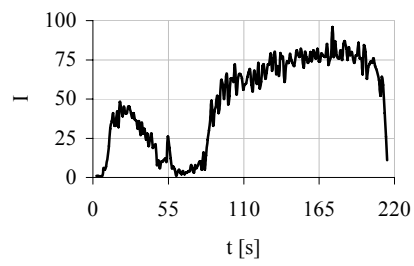
P6I



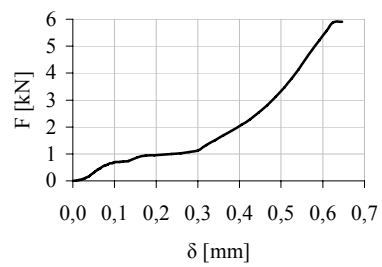
P6I



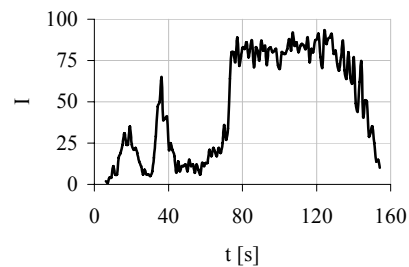
P6J



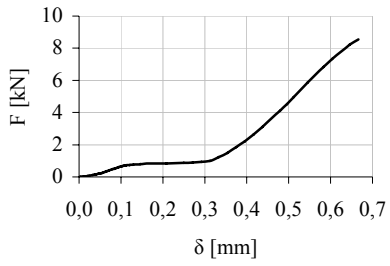
P6J



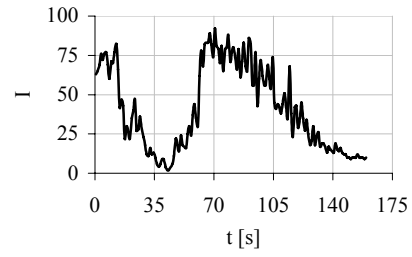
P7A



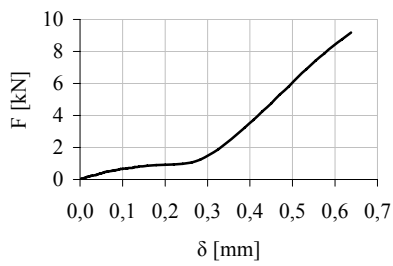
P7A



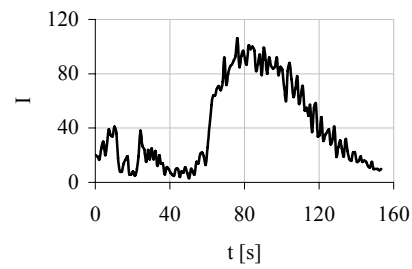
P7B



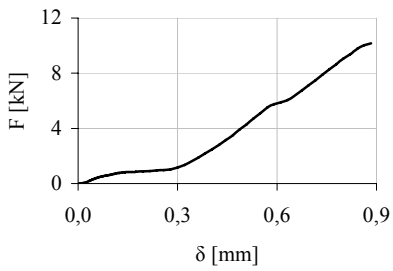
P7B



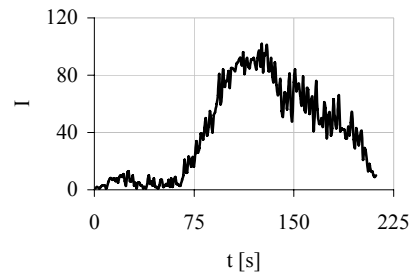
P7C



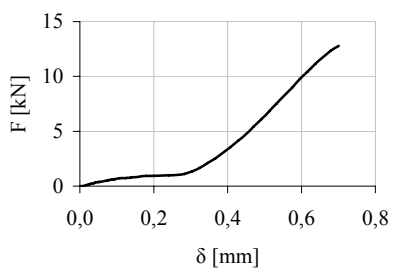
P7C



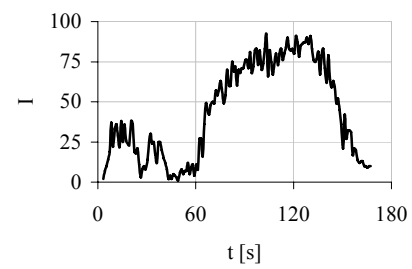
P7D



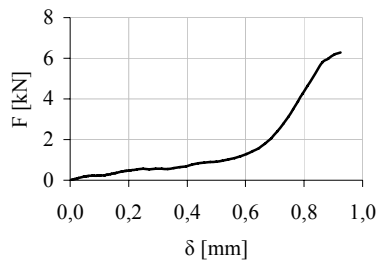
P7D



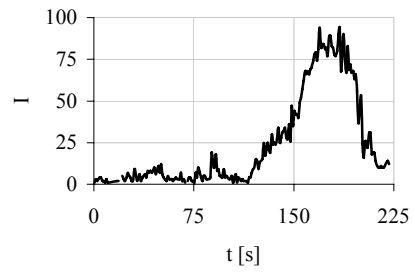
P7E



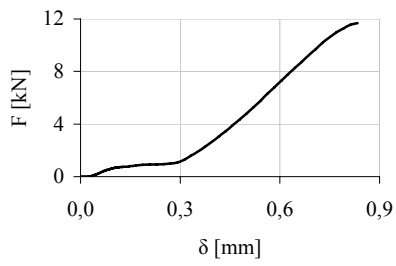
P7E



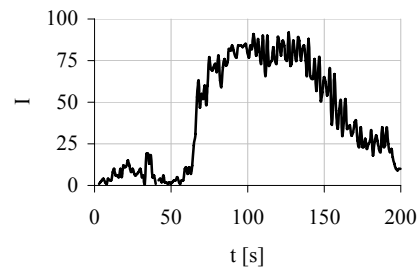
P7F



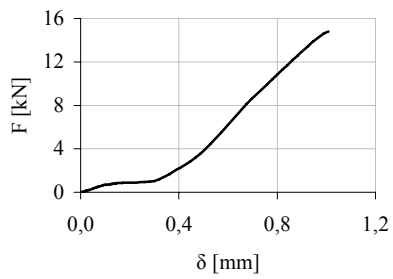
P7F



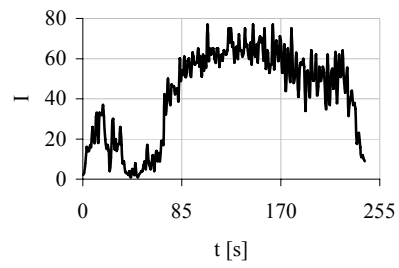
P7G



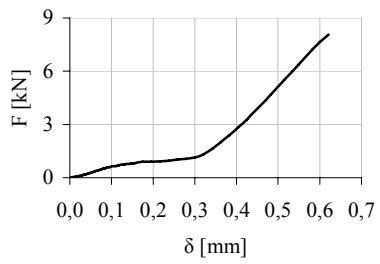
P7G



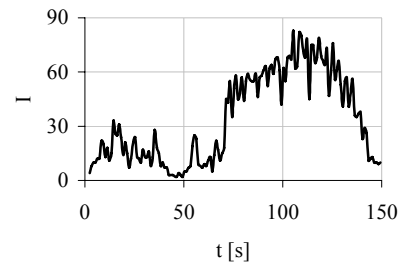
P7H



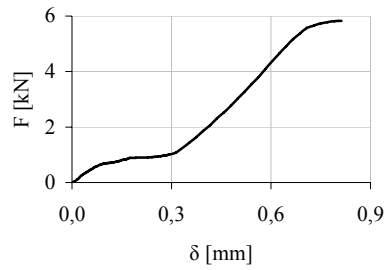
P7H



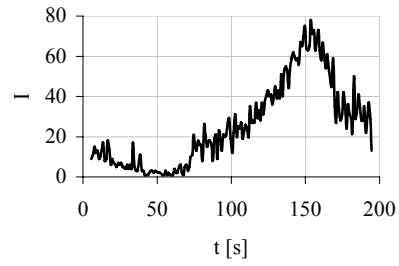
P7I



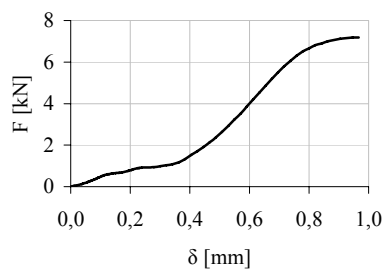
P7I



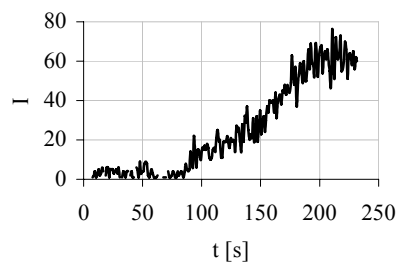
P7J



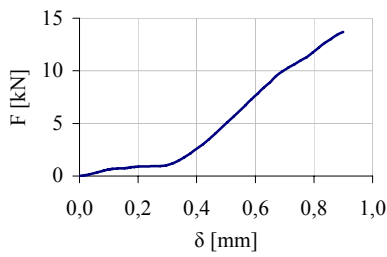
P7J



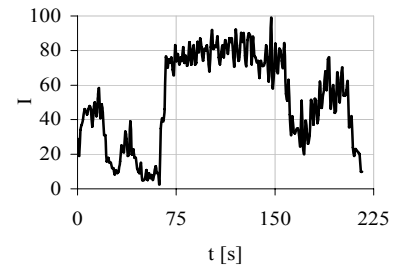
P7K



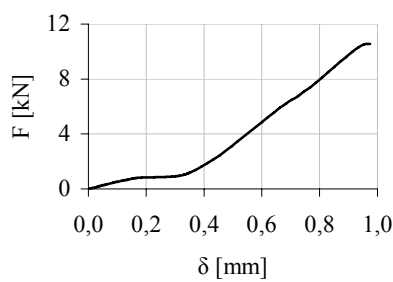
P7K



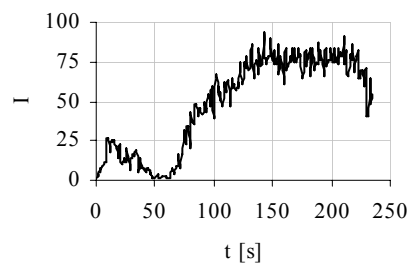
P8A



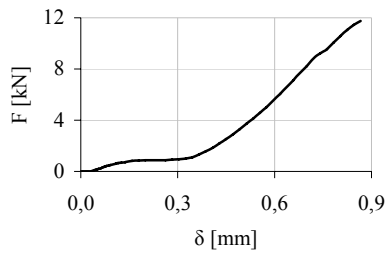
P8A



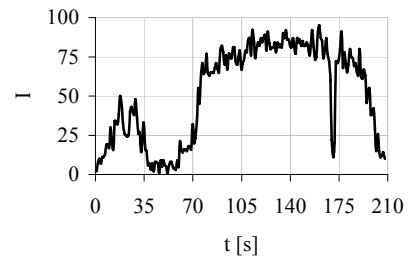
P8B



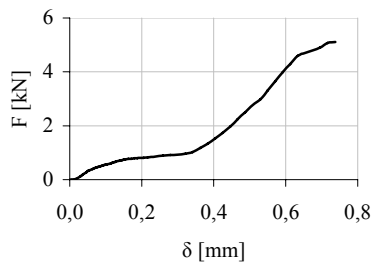
P8B



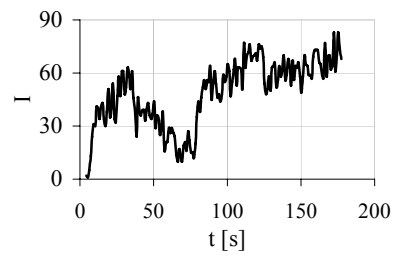
P8C



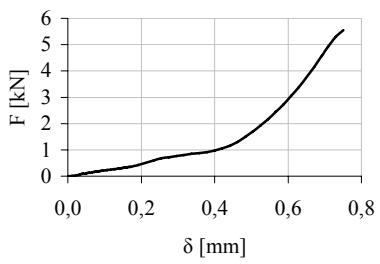
P8C



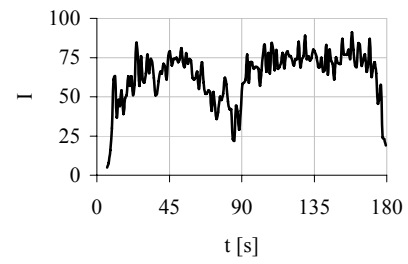
P8D



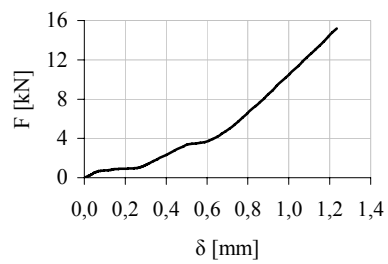
P8D



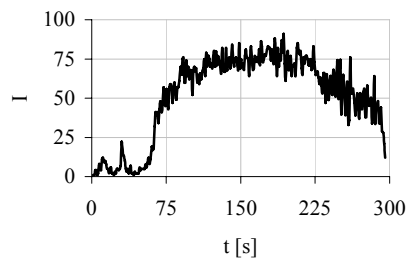
P8E



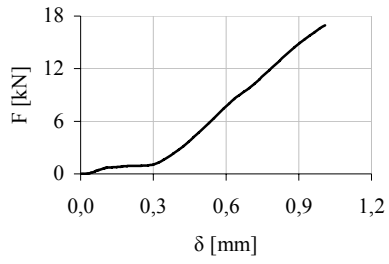
P8E



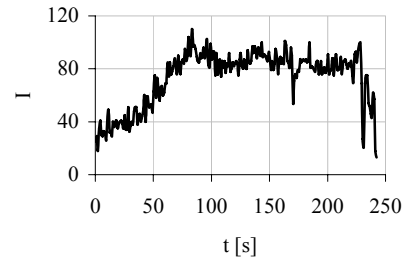
P8F



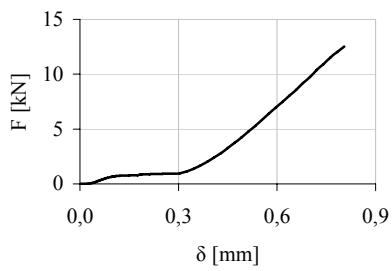
P8F



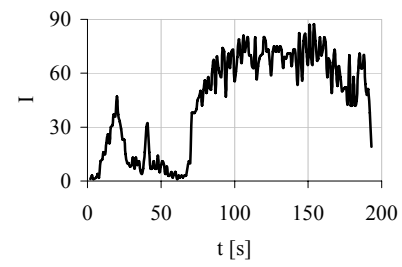
P8G



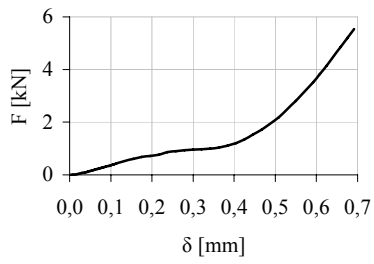
P8G



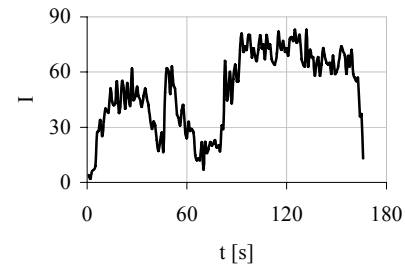
P8H



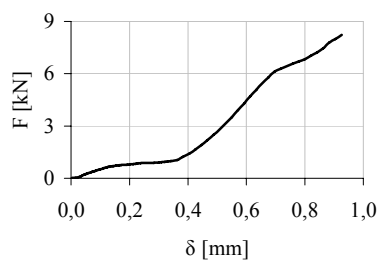
P8H



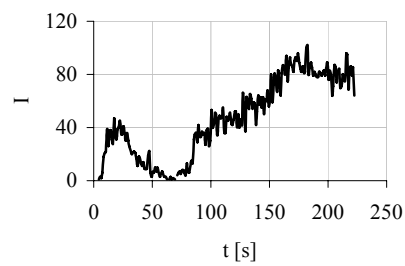
P8I



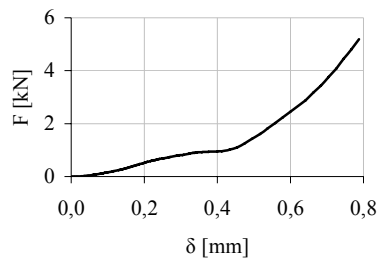
P8I



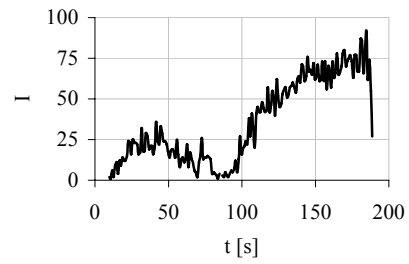
P8J



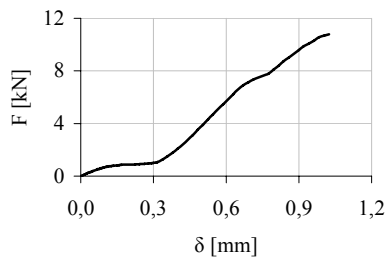
P8J



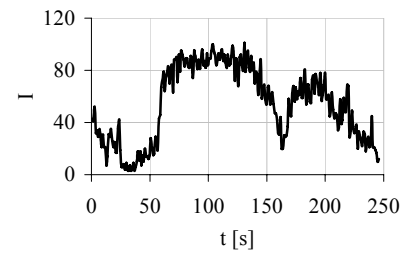
P8K



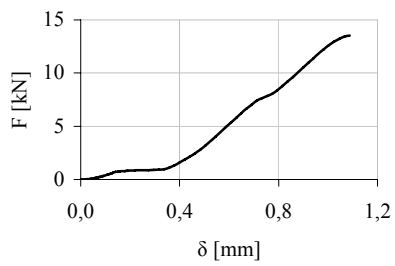
P8K



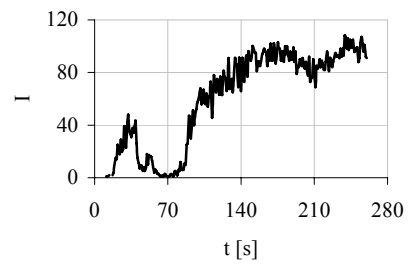
P8L



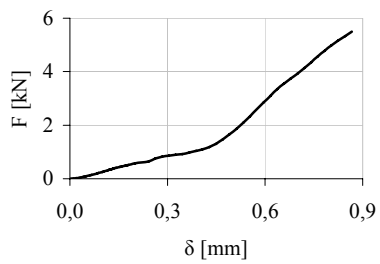
P8L



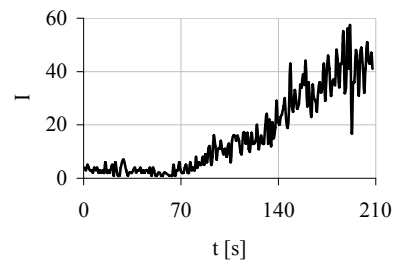
P8M



P8M

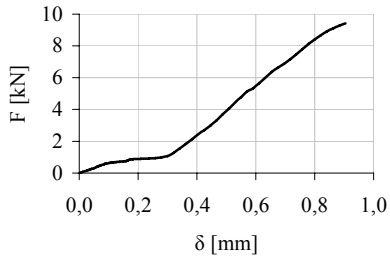


P8N

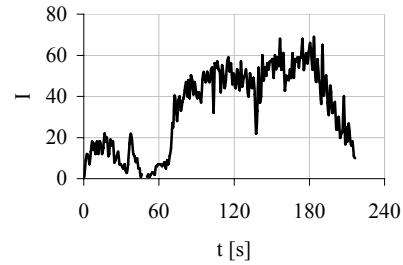


P8N

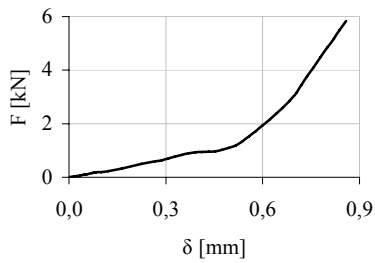
A.4.1.4.C. Graficas de los Experimentos Recubrimiento Parcial a Tres Trozos.



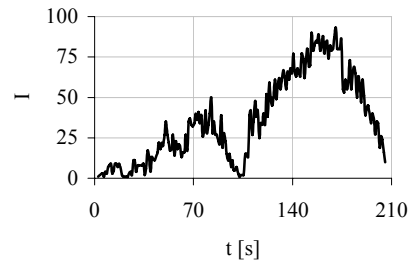
R1A



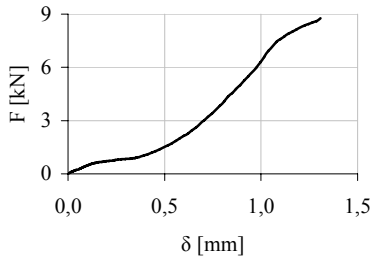
R1A



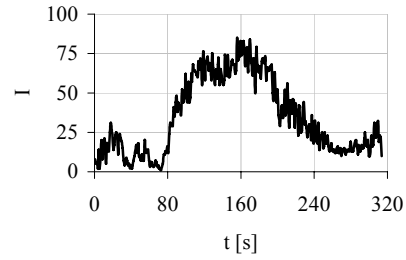
R1B



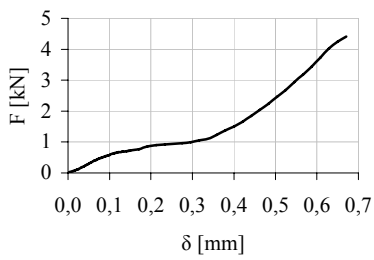
R1B



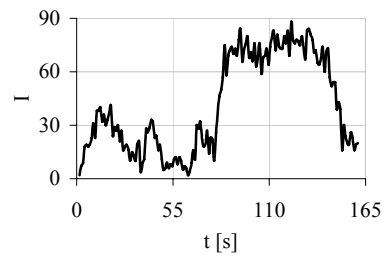
R1C



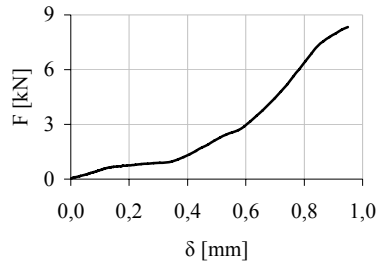
R1C



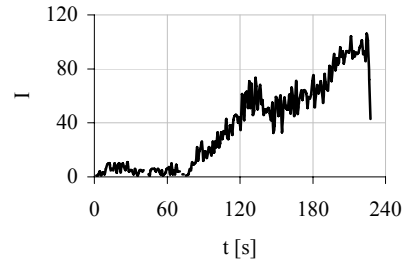
R1D



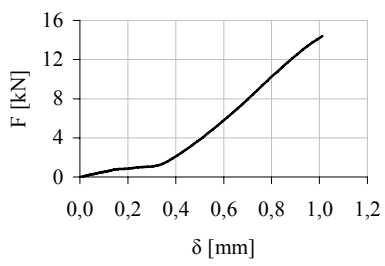
R1D



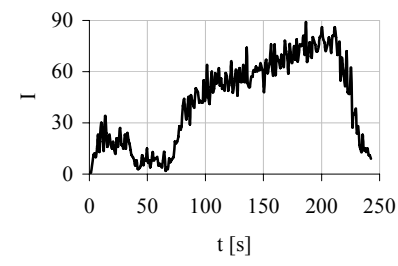
R1E



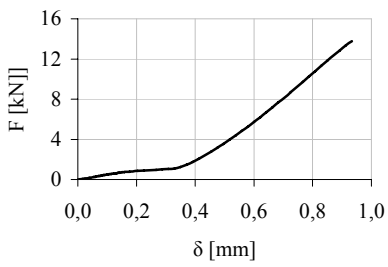
R1E



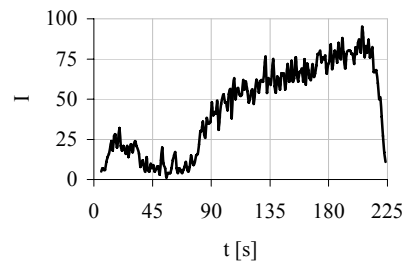
R1F



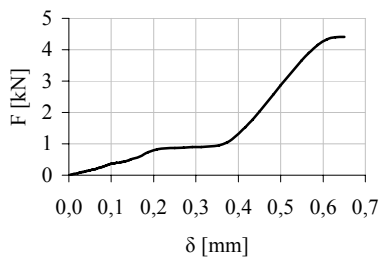
R1F



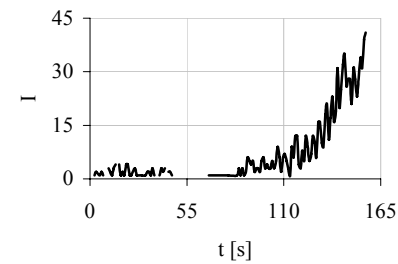
R1G



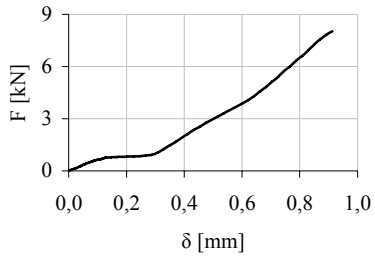
R1G



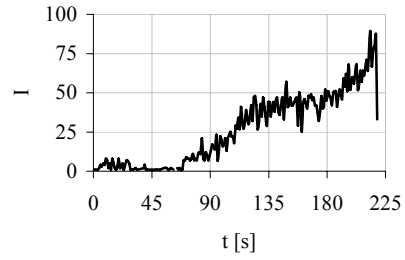
R2A



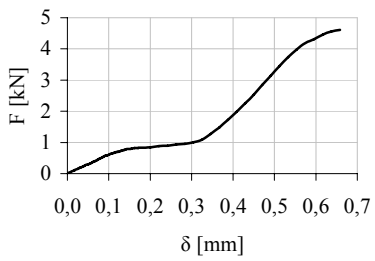
R2A



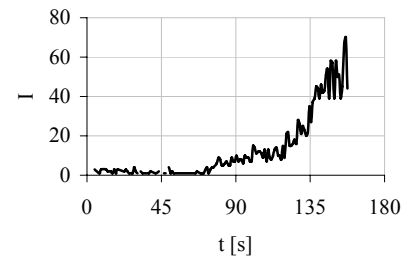
R2B



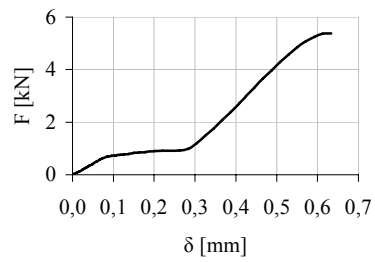
R2B



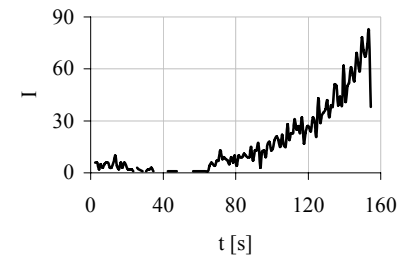
R2C



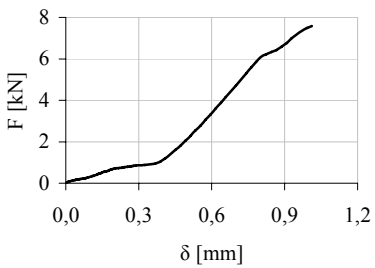
R2C



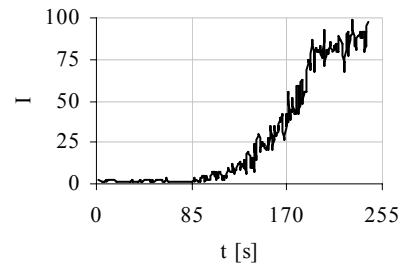
R2D



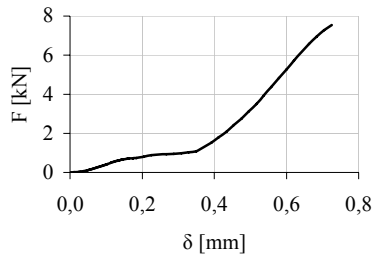
R2D



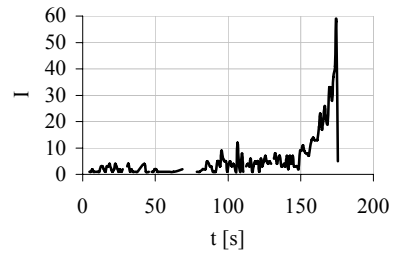
R2E



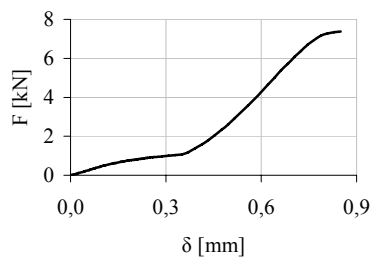
R2E



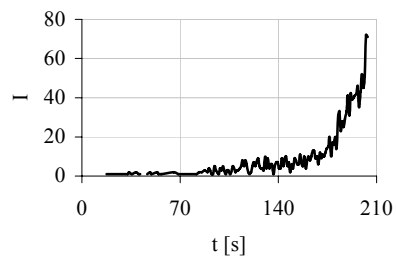
R2F



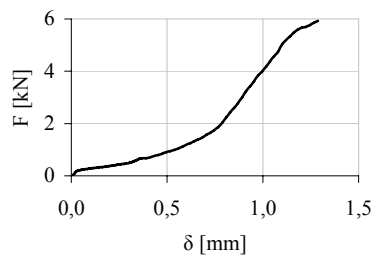
R2F



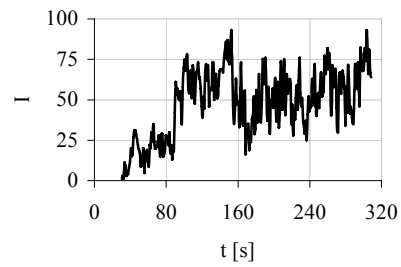
R2G



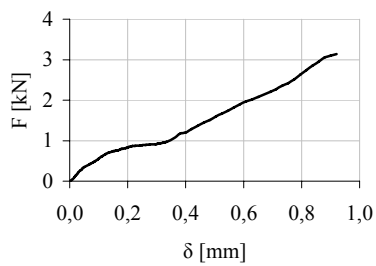
R2G



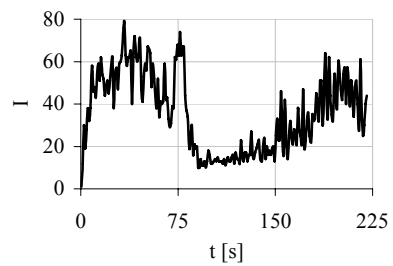
R3A



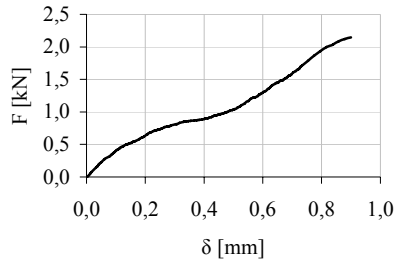
R3A



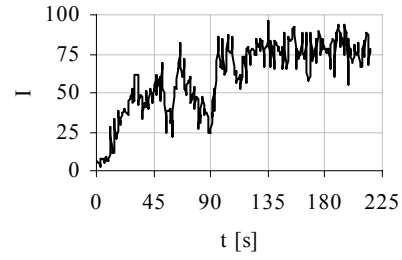
R3B



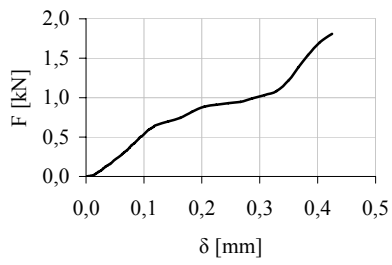
R3B



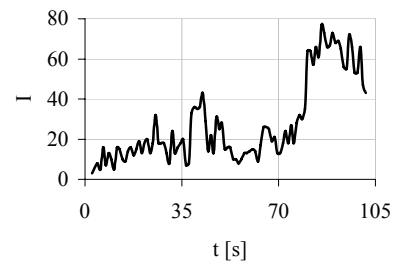
R3C



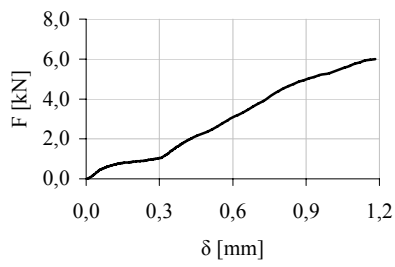
R3C



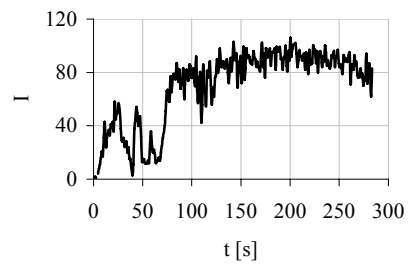
R3D



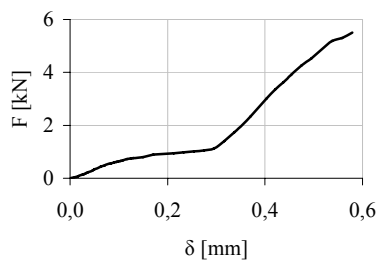
R3D



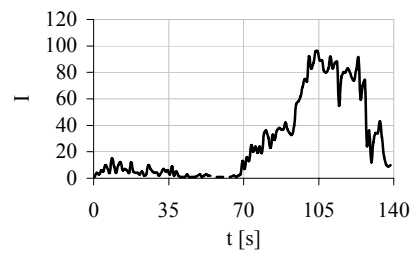
R3E



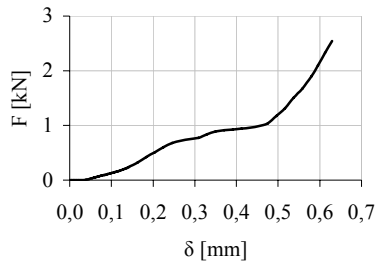
R3E



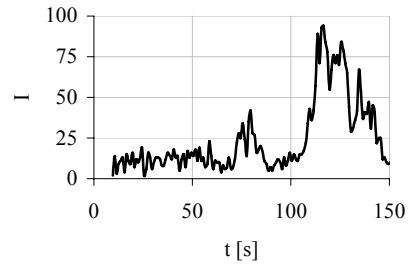
R3F



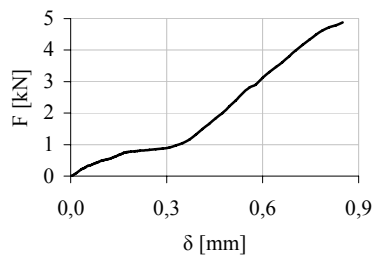
R3F



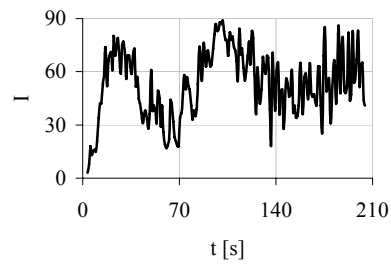
R3G



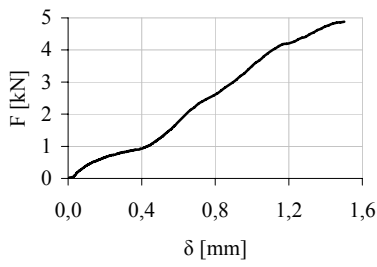
R3G



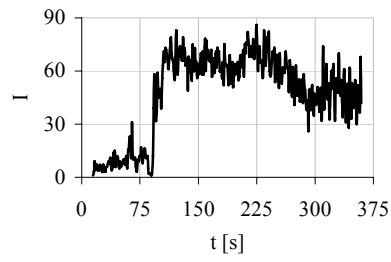
R4A



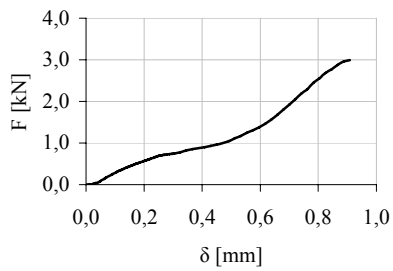
R4A



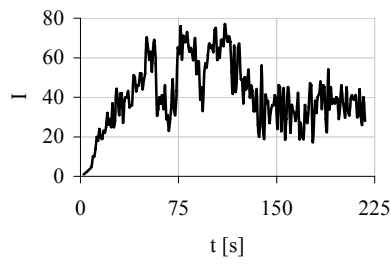
R4B



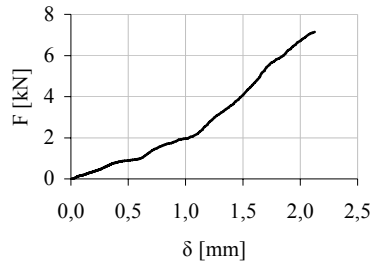
R4B



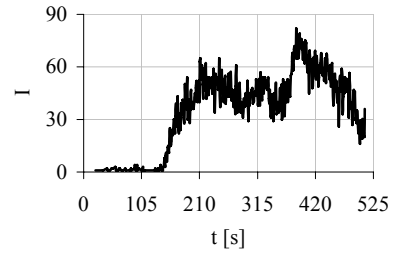
R4C



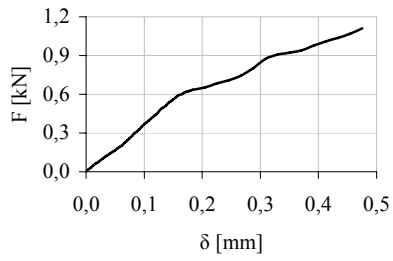
R4C



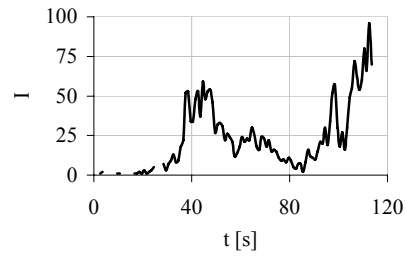
R4D



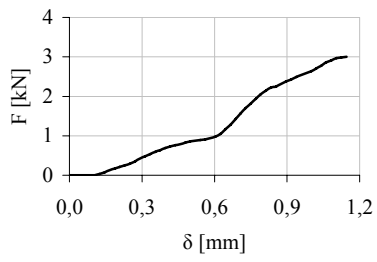
R4D



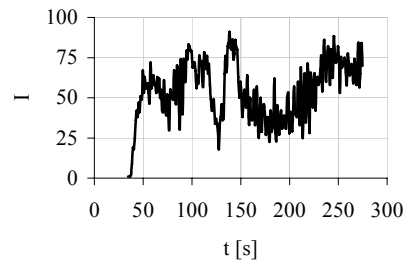
R4E



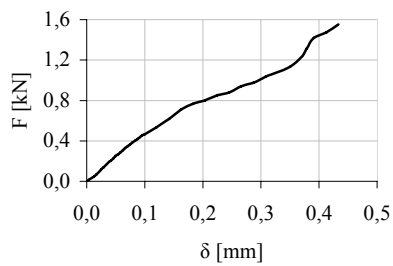
R4E



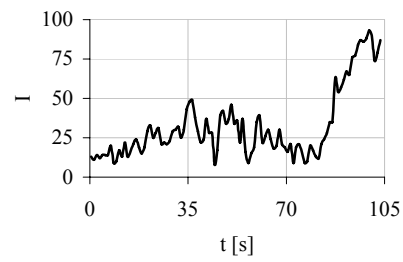
R4F



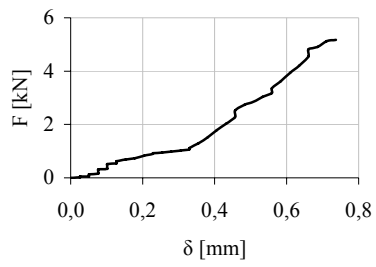
R4F



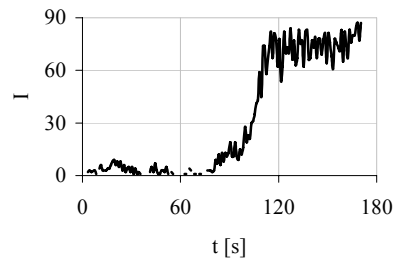
R4G



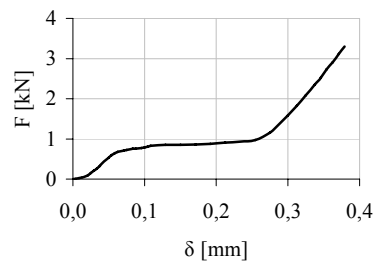
R4G



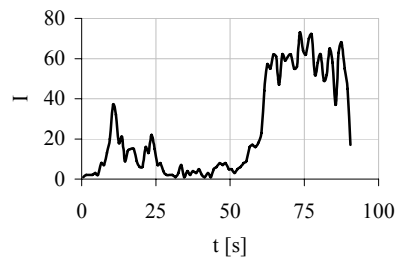
R4H



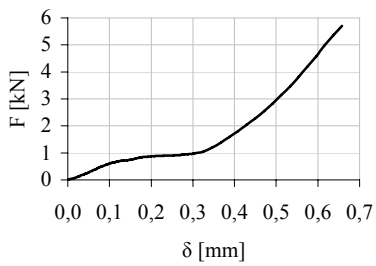
R4H



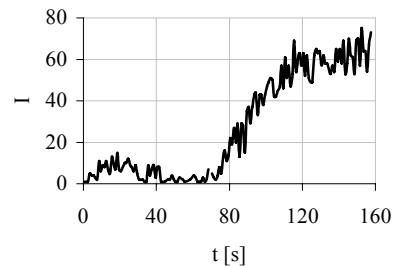
M1A



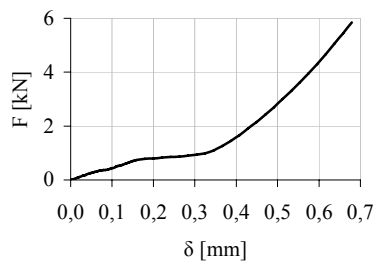
M1A



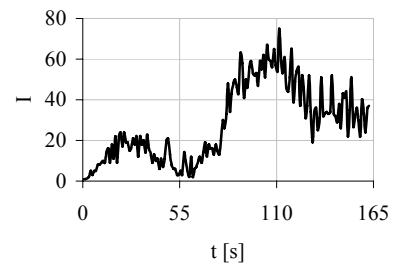
M1B



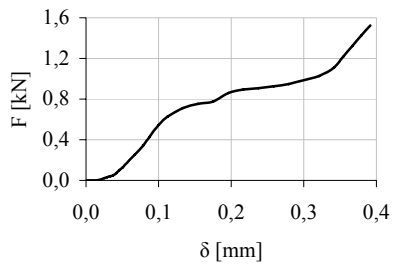
M1B



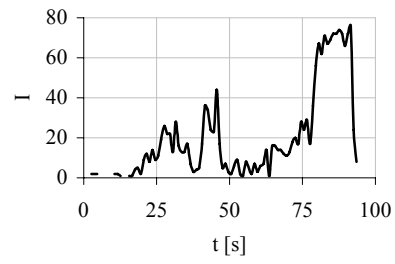
M1C



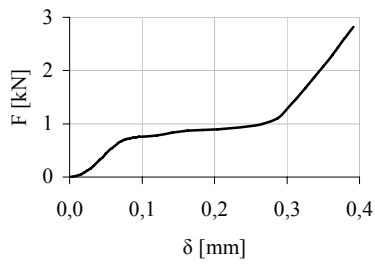
M1C



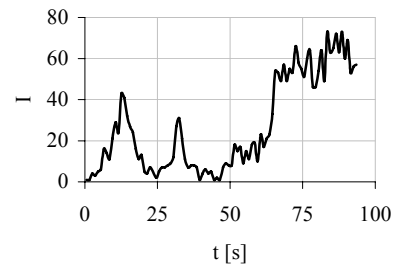
MID



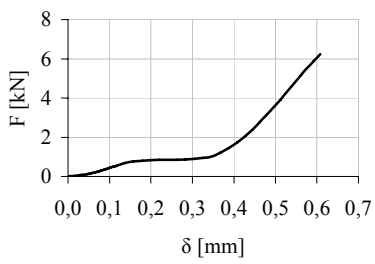
MID



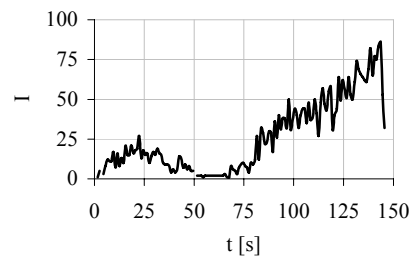
M1E



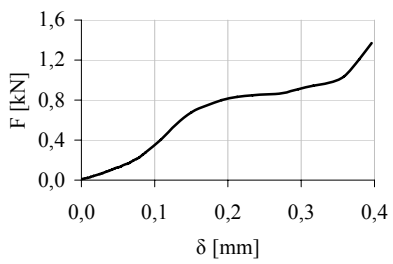
M1E



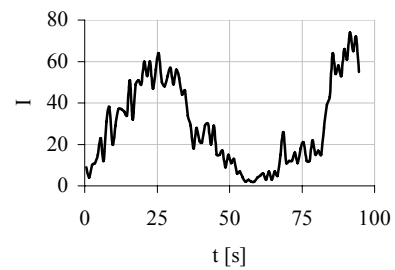
M1F



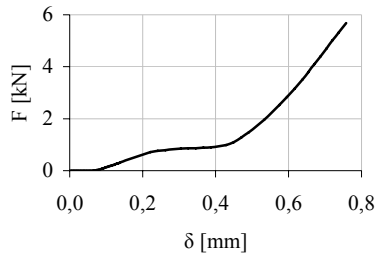
M1F



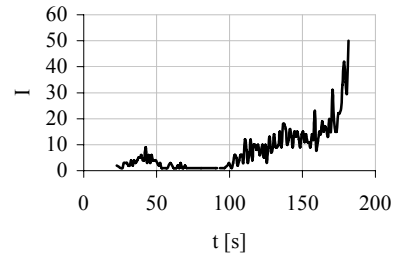
MIG



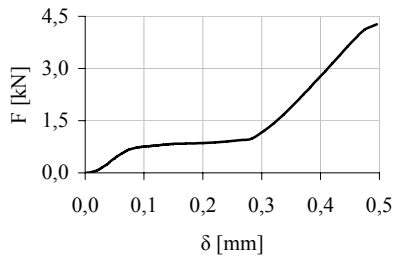
MIG



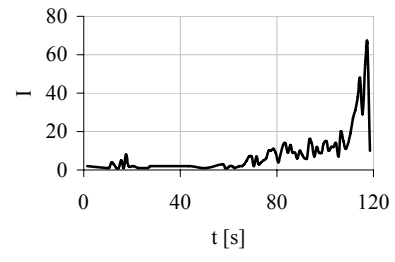
M2A



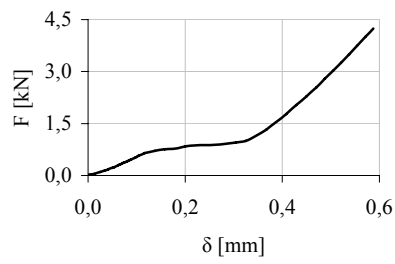
M2A



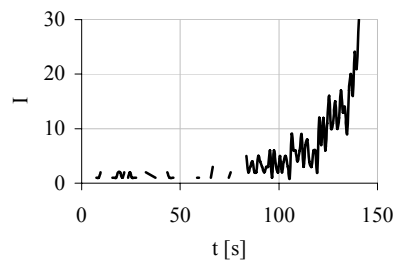
M2B



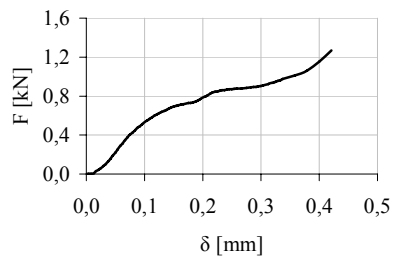
M2B



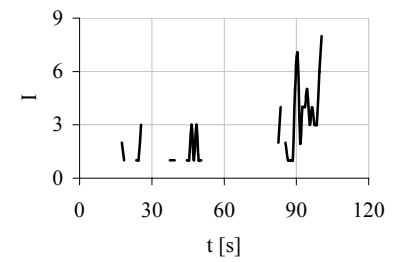
M2C



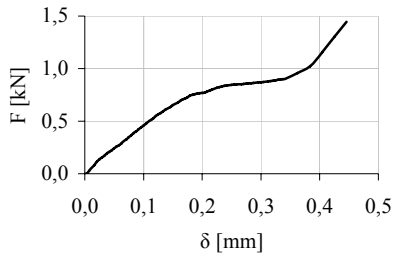
M2C



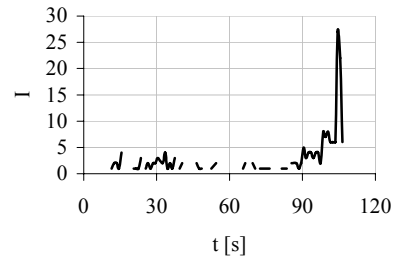
M2D



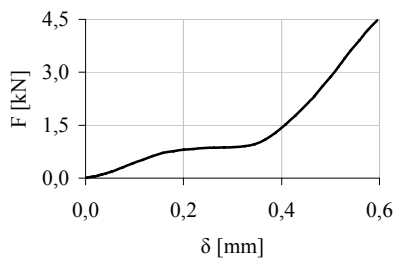
M2D



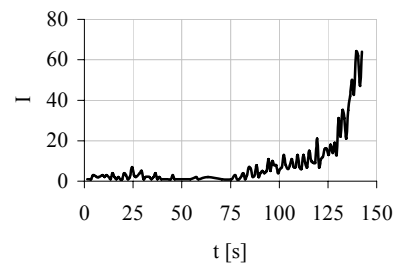
M2E



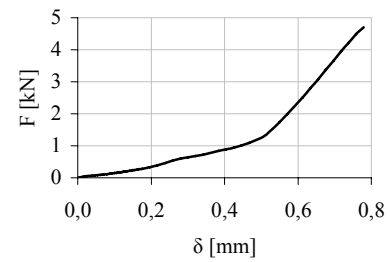
M2E



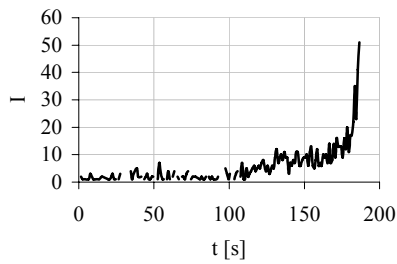
M2F



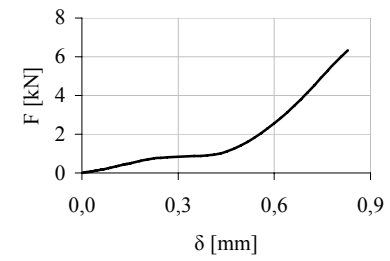
M2F



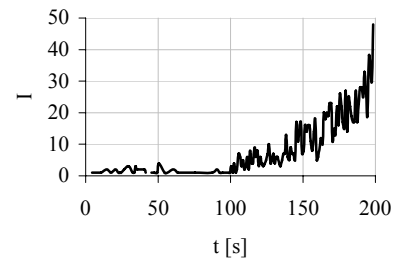
M2G



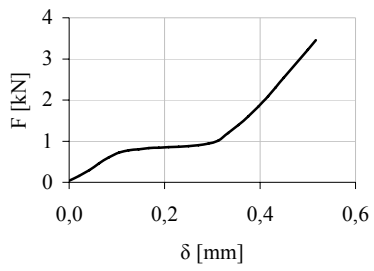
M2G



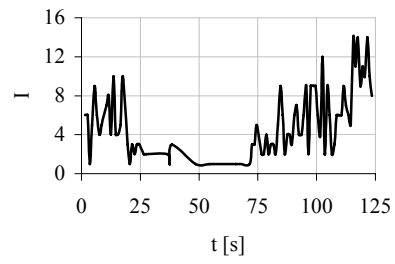
M2H



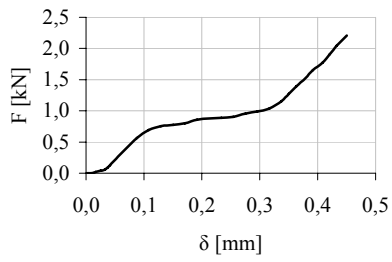
M2H



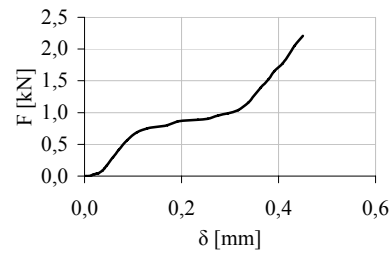
M3A



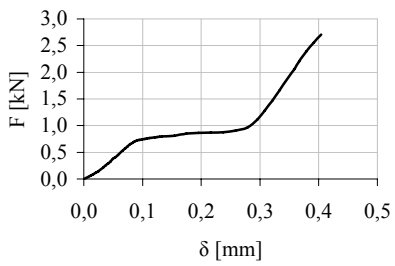
M3A



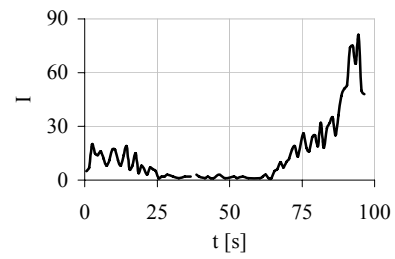
M3B



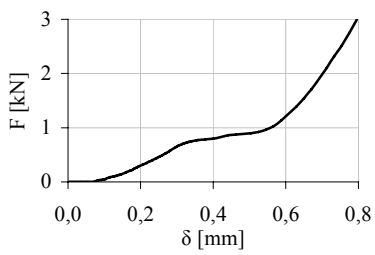
M3B



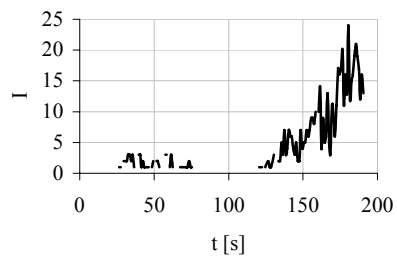
M3C



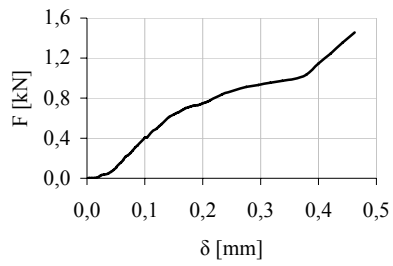
M3C



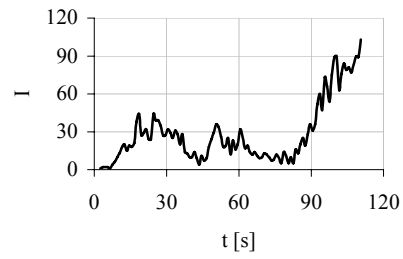
M3D



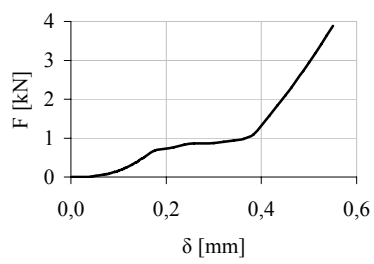
M3D



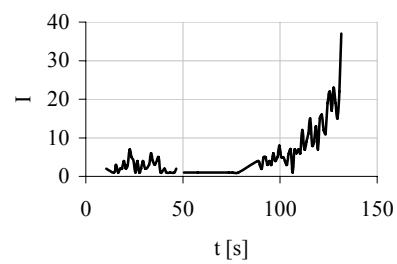
M3E



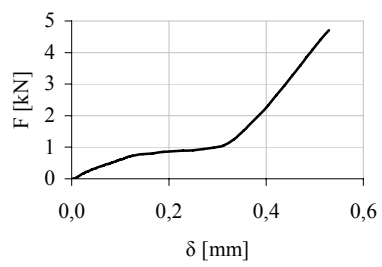
M3E



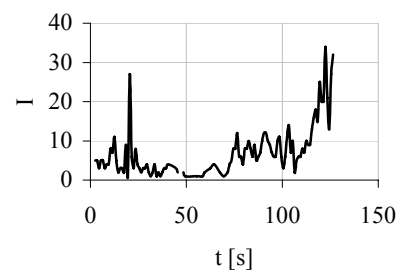
M3F



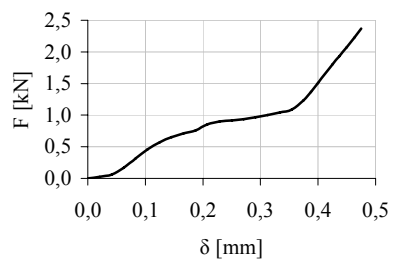
M3F



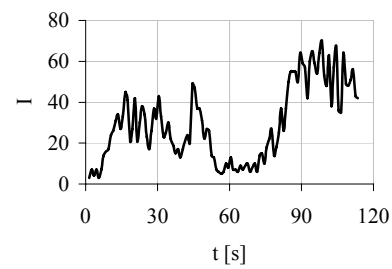
M3G



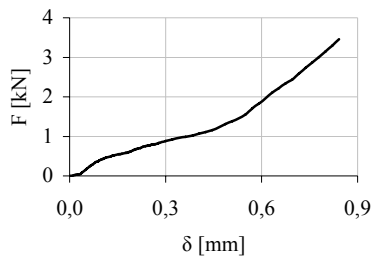
M3G



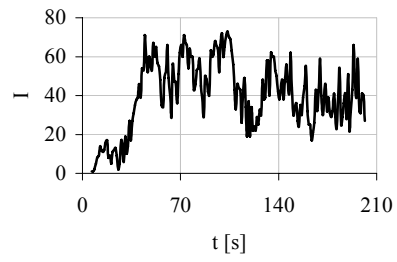
M4A



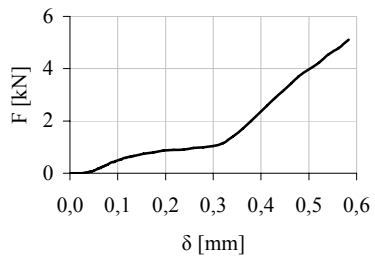
M4A



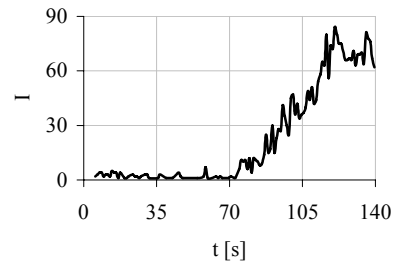
M4B



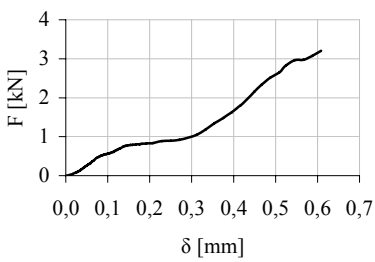
M4B



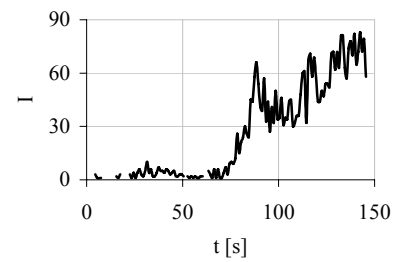
M4C



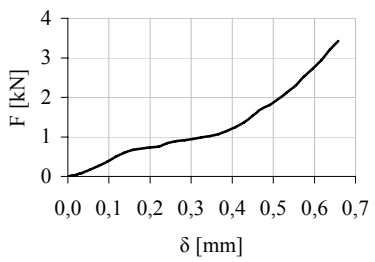
M4C



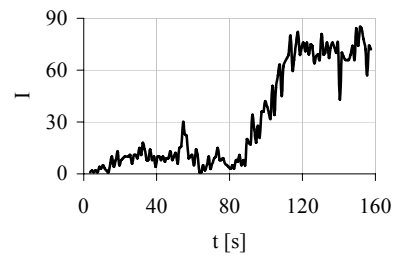
M4D



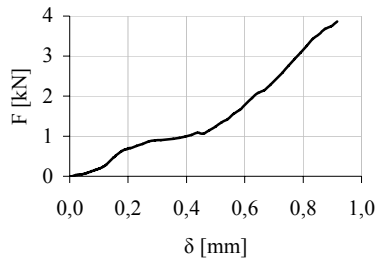
M4D



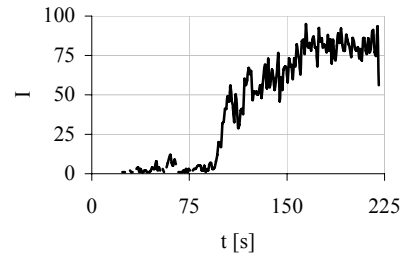
M4E



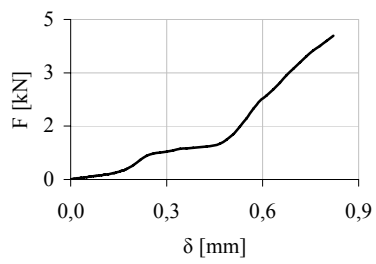
M4E



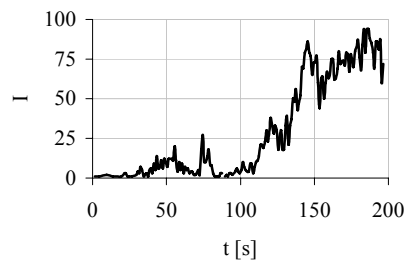
M4F



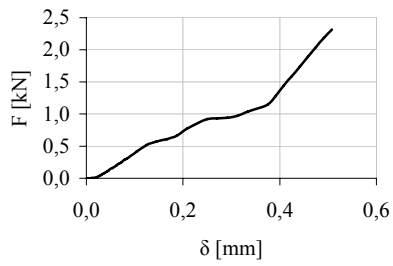
M4F



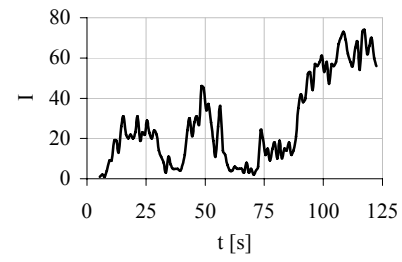
M4G



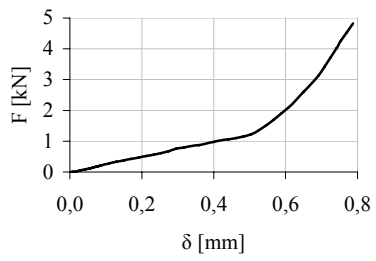
M4G



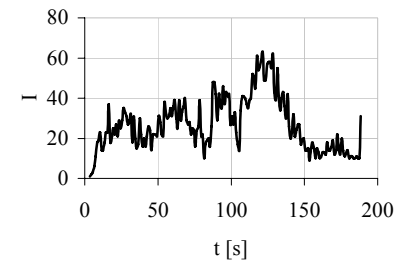
L1A



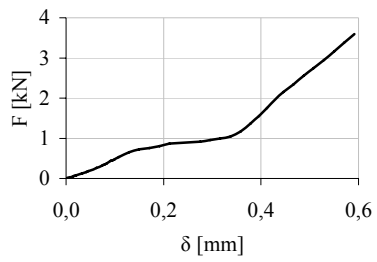
L1A



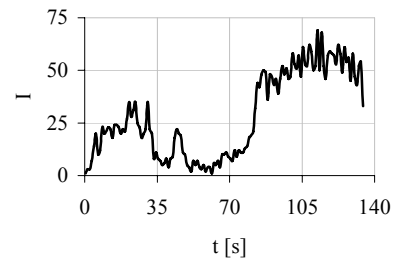
L1B



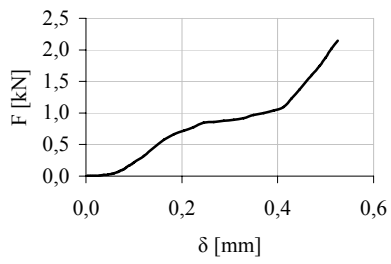
L1B



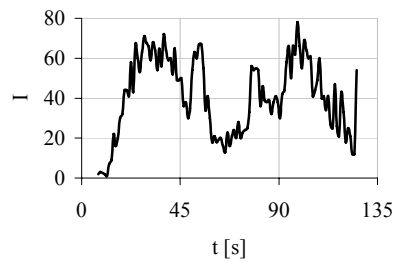
LIC



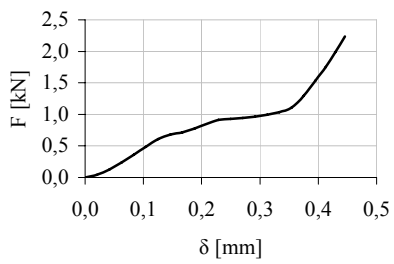
LIC



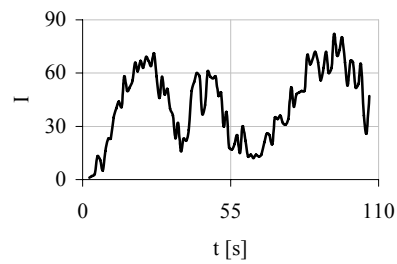
L1D



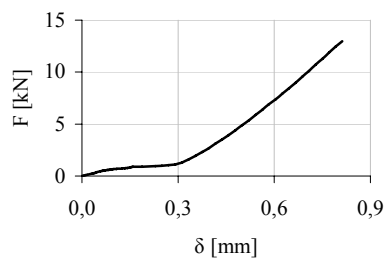
L1D



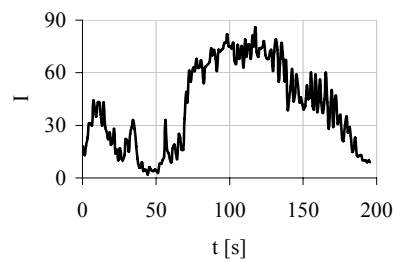
L1E



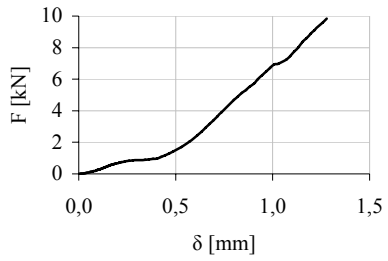
L1E



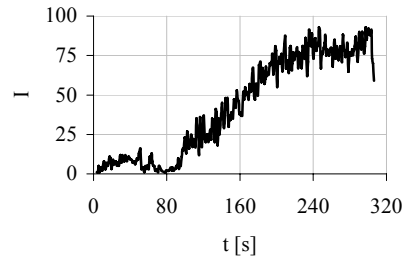
L1F



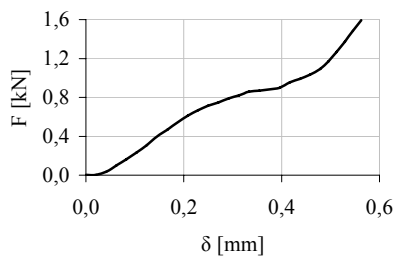
L1F



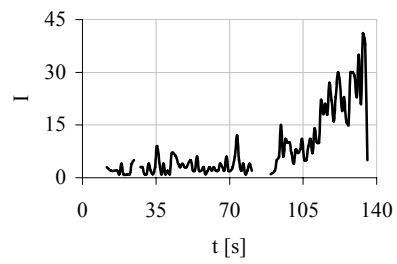
L2A



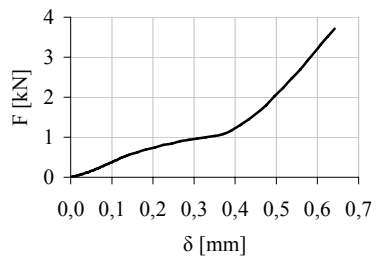
L2A



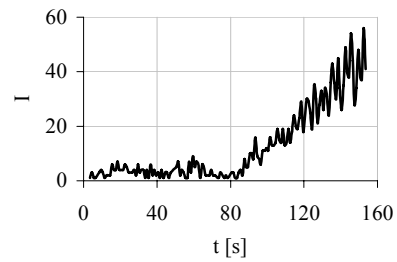
L2B



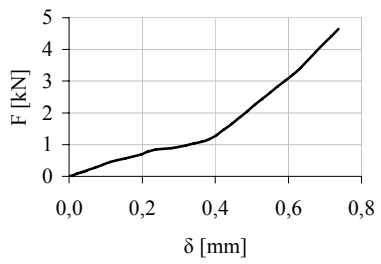
L2B



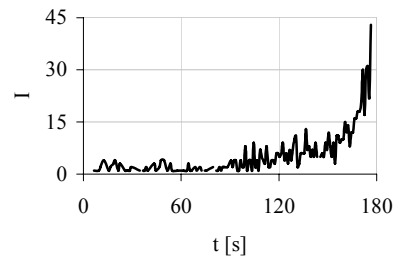
L2C



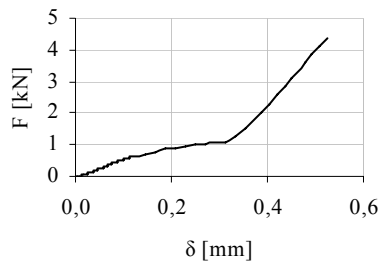
L2C



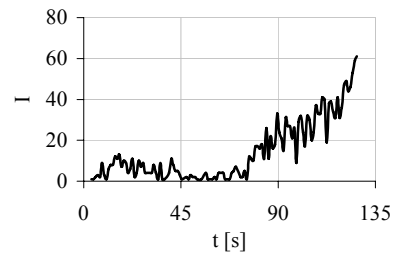
L2D



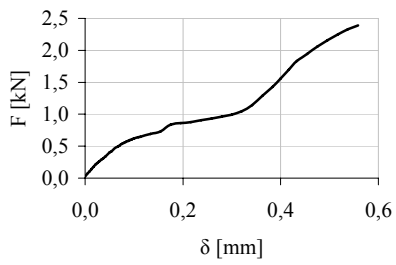
L2D



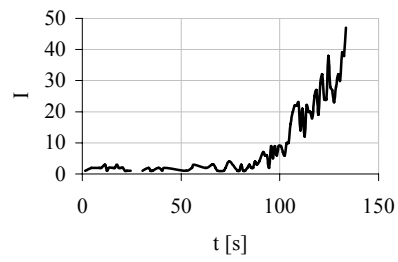
L2E



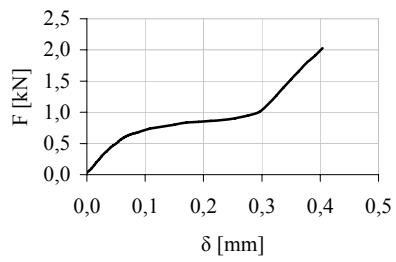
L2E



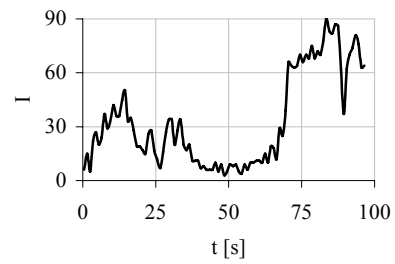
L2F



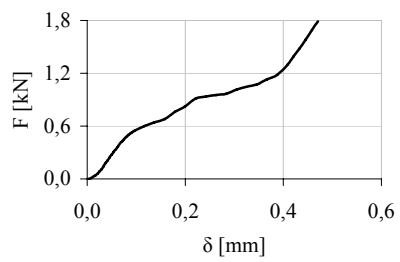
L2F



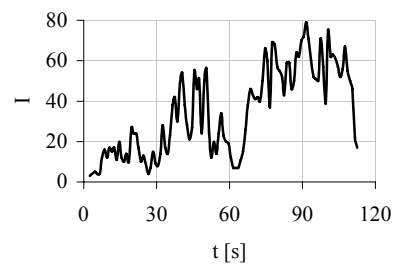
L3A



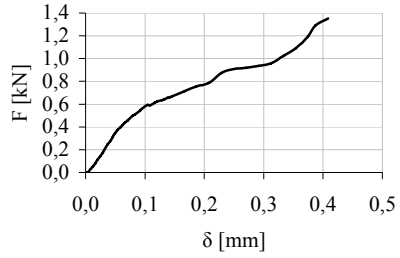
L3A



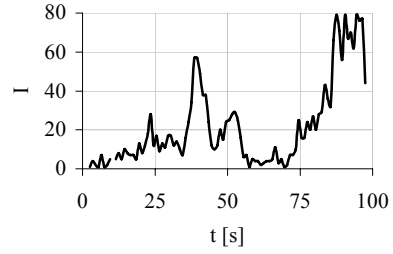
L3B



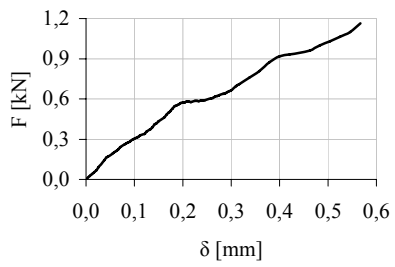
L3B



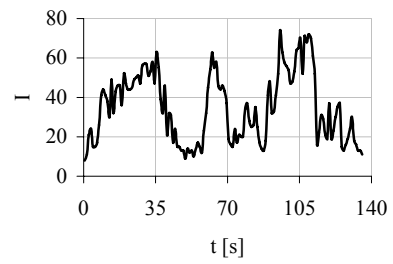
L3C



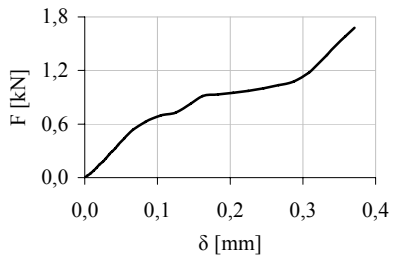
L3C



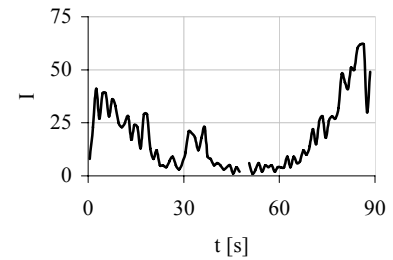
L3D



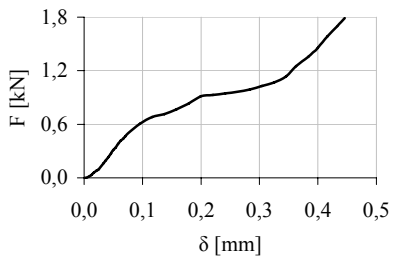
L3D



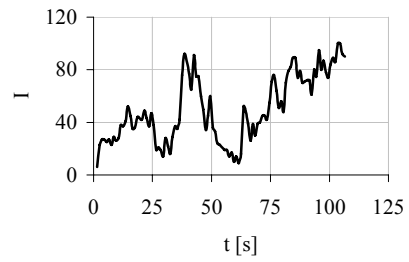
L3E



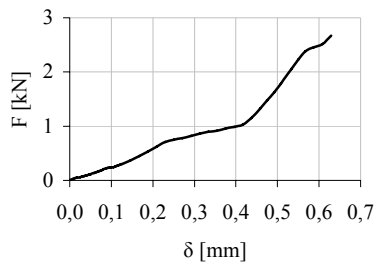
L3E



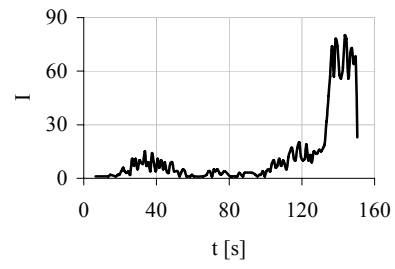
L3F



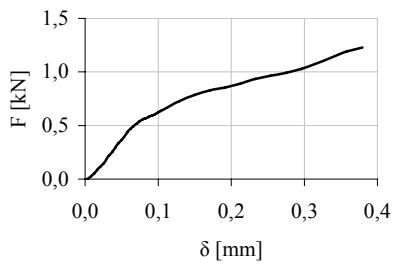
L3F



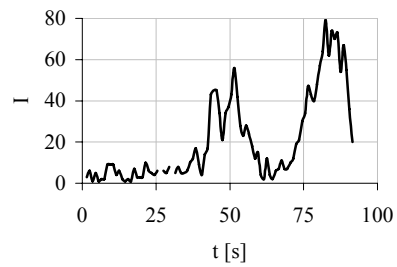
L3G



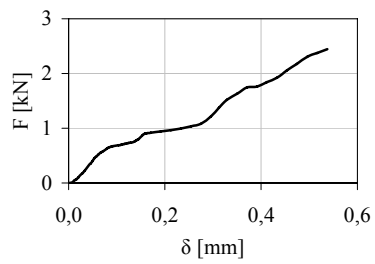
L3G



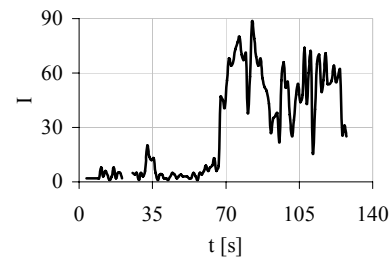
L4A



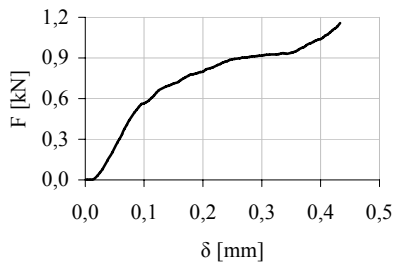
L4A



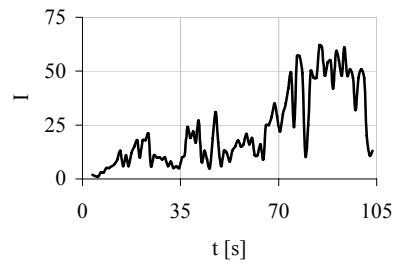
L4B



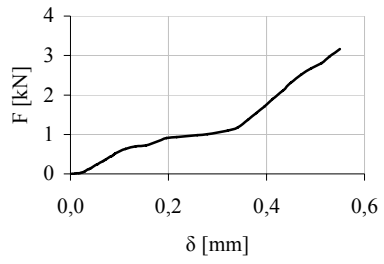
L4B



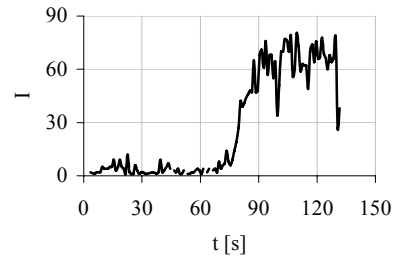
L4C



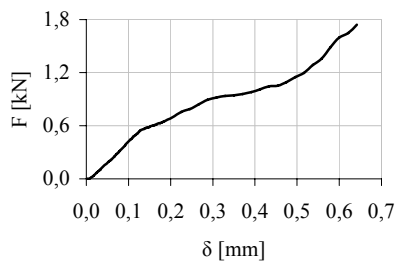
L4C



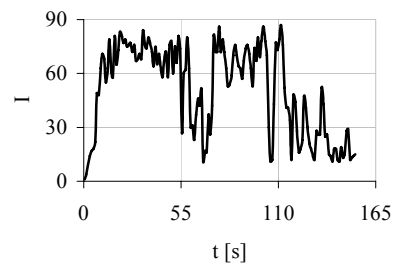
L4D



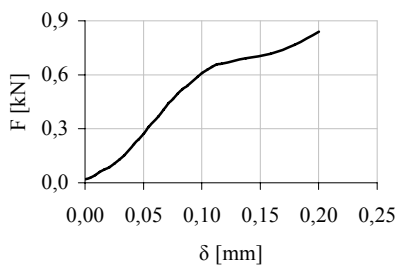
L4D



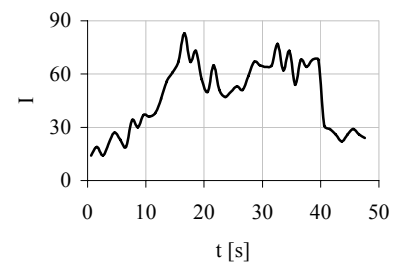
L4E



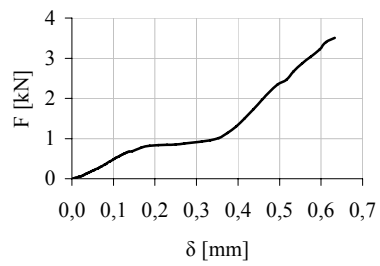
L4E



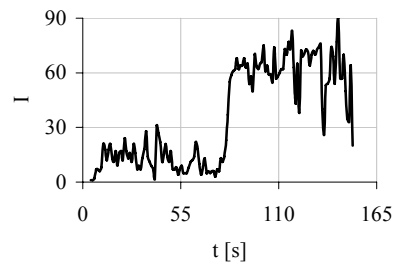
L4F



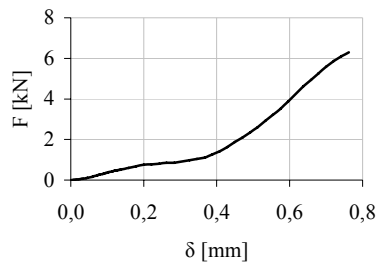
L4F



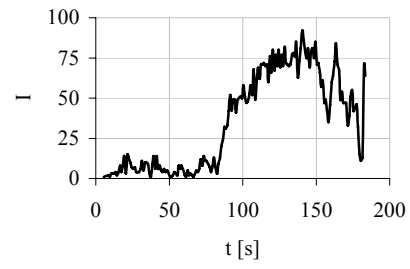
L4G



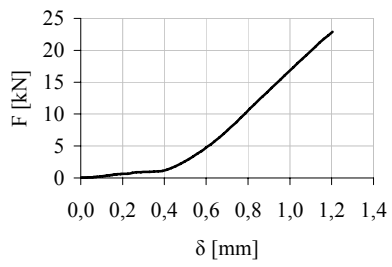
L4G



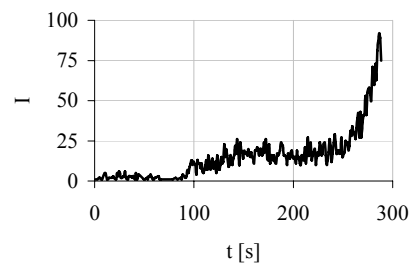
R5A



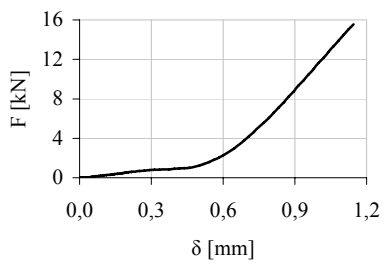
R5A



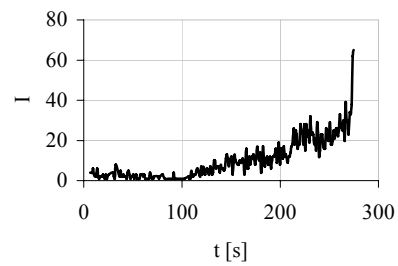
R5B



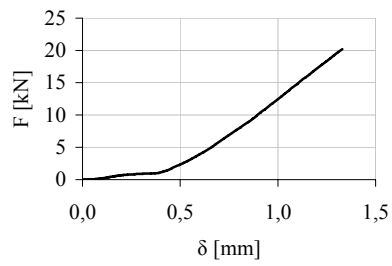
R5B



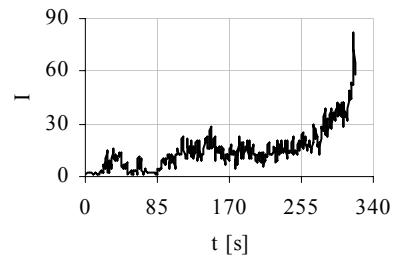
R5C



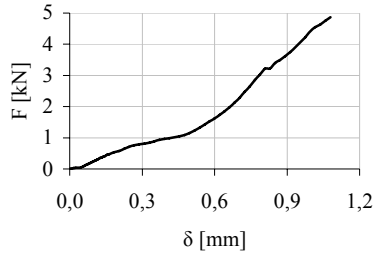
R5C



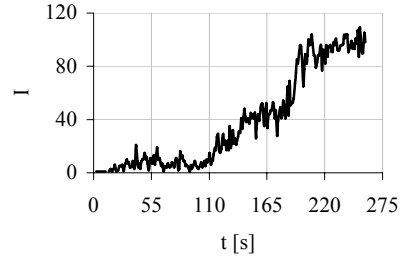
R5D



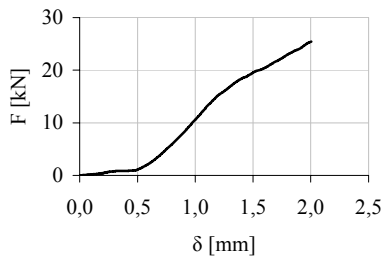
R5D



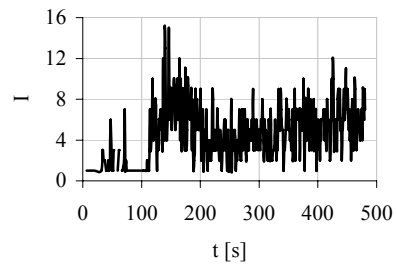
R5E



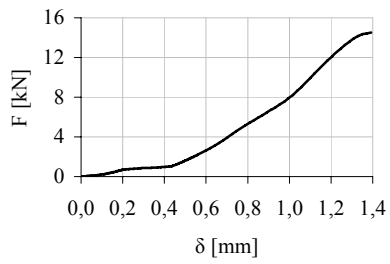
R5E



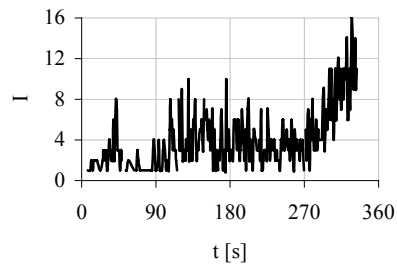
R6A



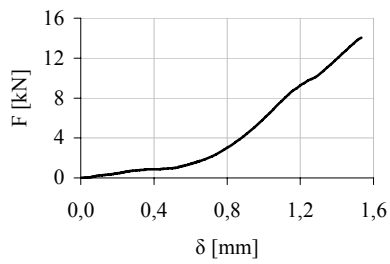
R6A



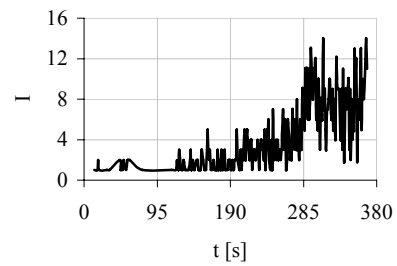
R6B



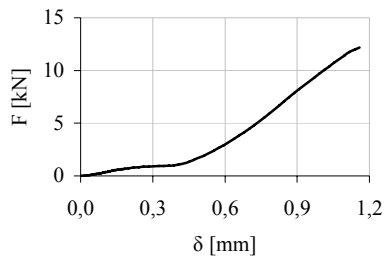
R6B



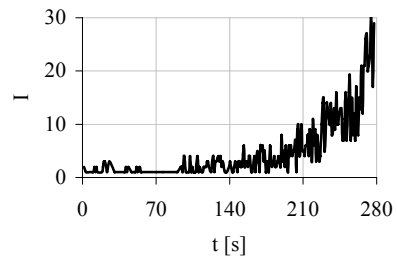
R6C



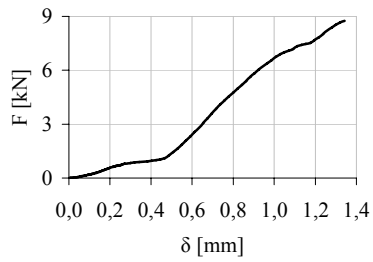
R6C



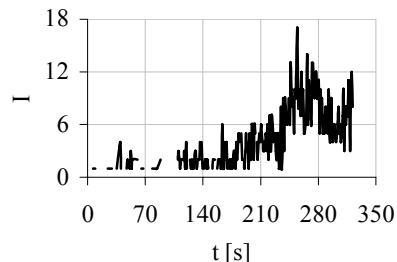
R6D



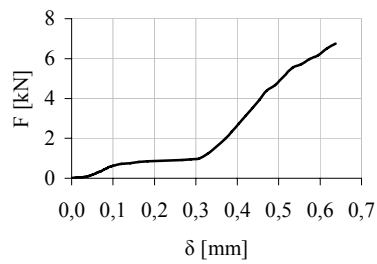
R6D



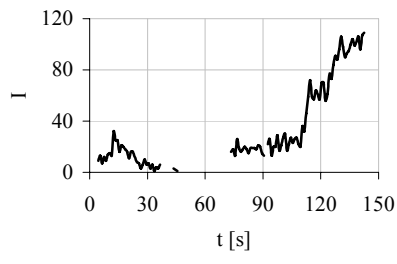
R6E



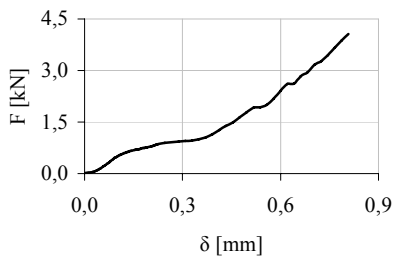
R6E



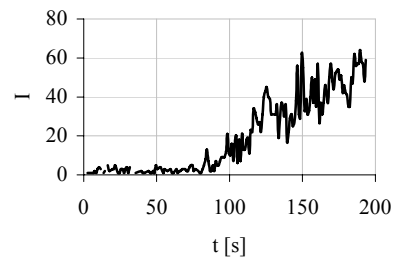
R7A



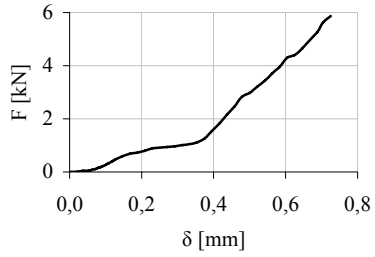
R7A



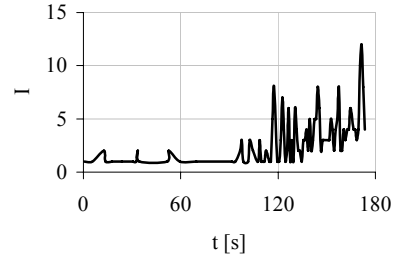
R7B



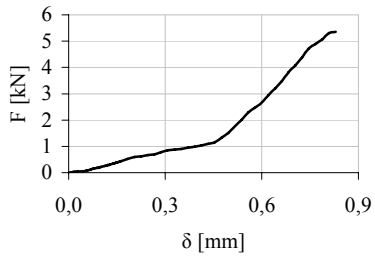
R7B



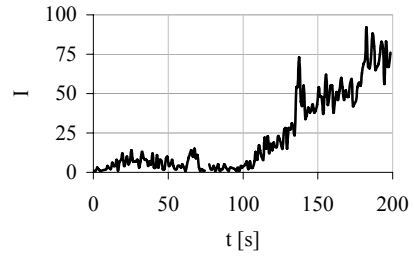
R7C



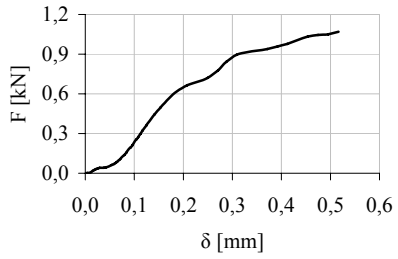
R7C



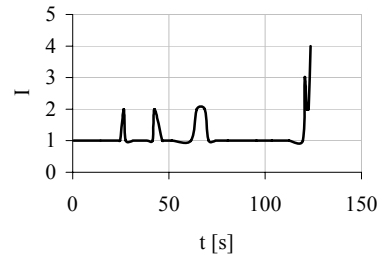
R7D



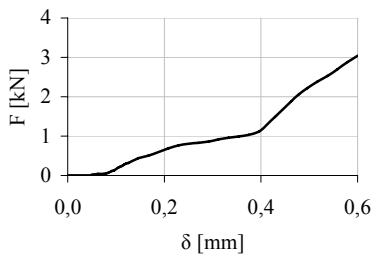
R7D



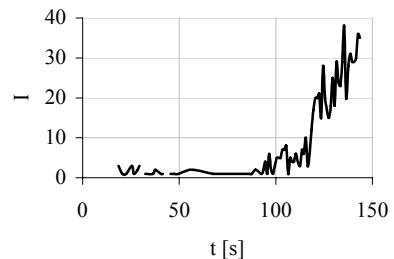
R7E



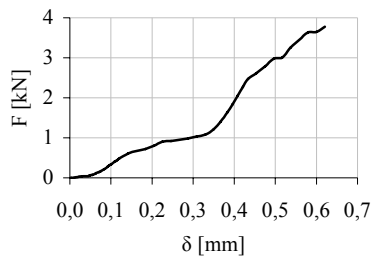
R7E



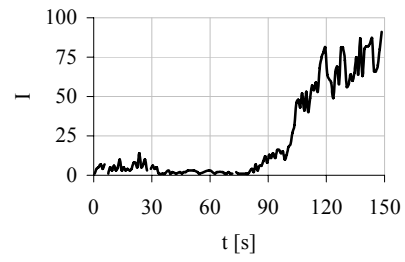
R8A



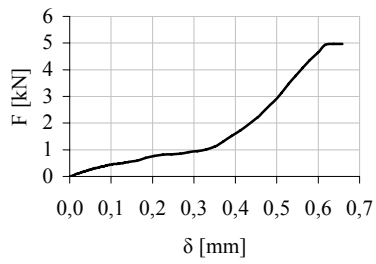
R8A



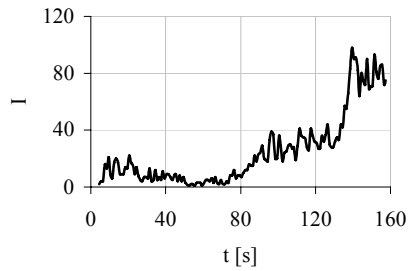
R8B



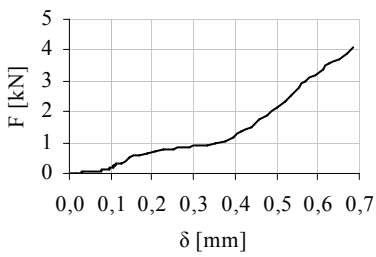
R8B



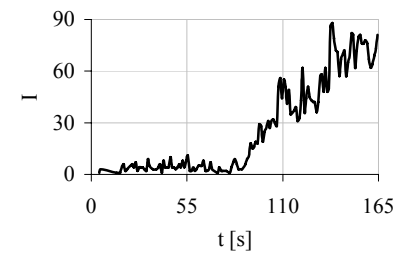
R8C



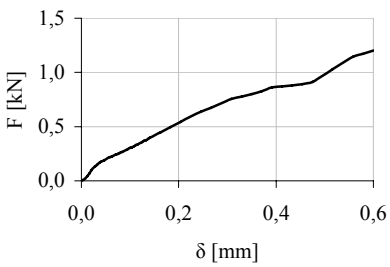
R8C



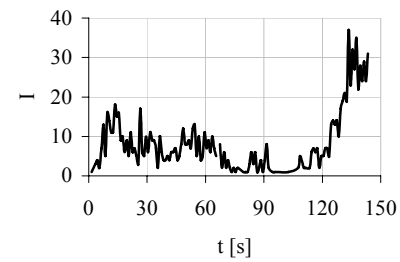
R8D



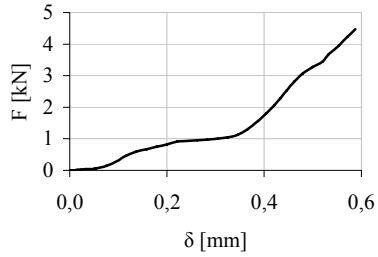
R8D



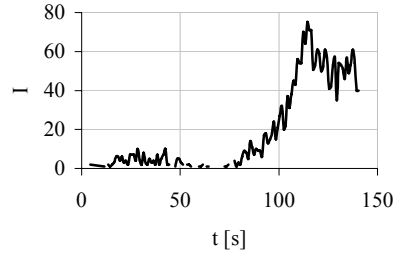
R8E



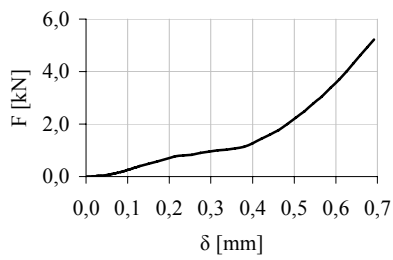
R8E



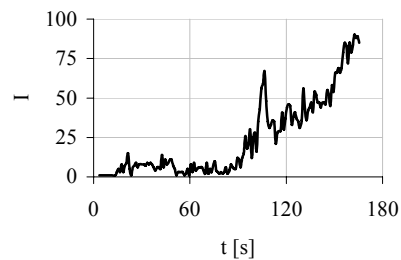
M5A



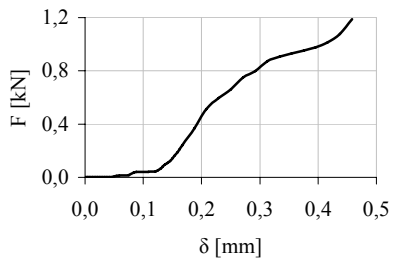
M5A



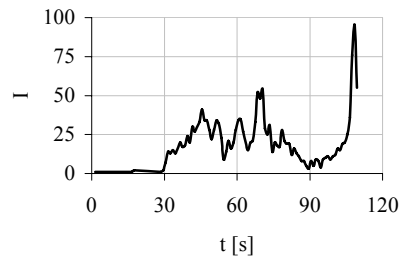
M5B



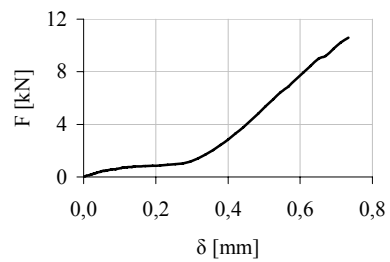
M5B



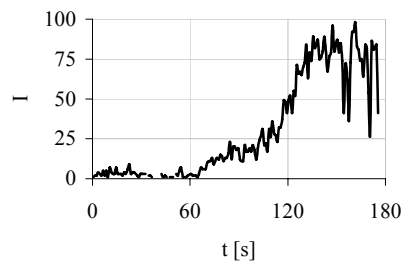
M5C



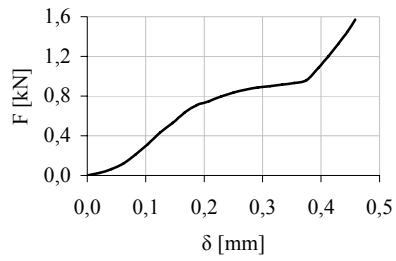
M5C



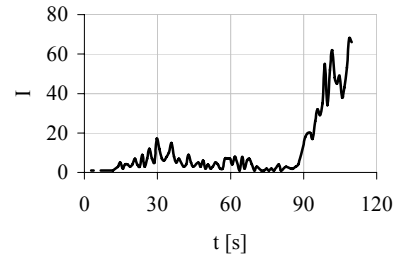
M5D



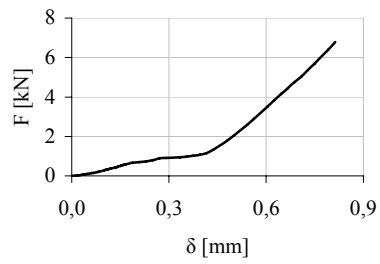
M5D



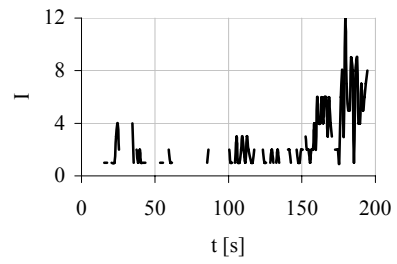
M5E



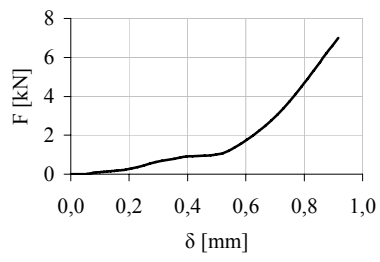
M5E



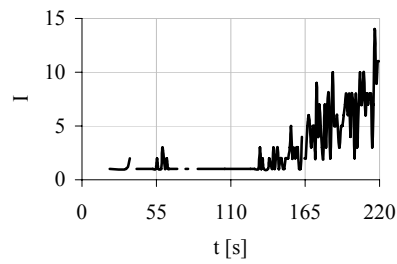
M6A



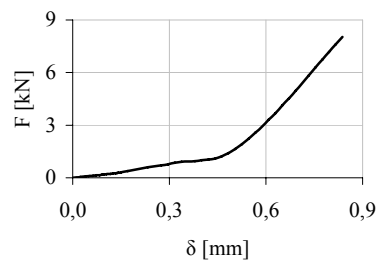
M6A



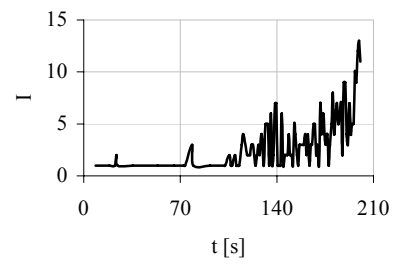
M6B



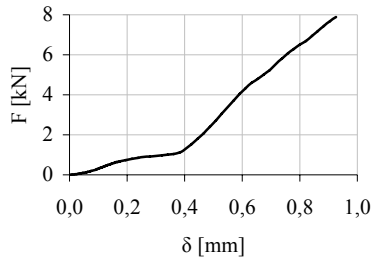
M6B



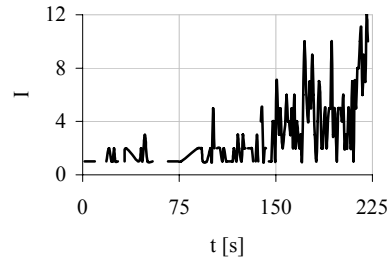
M6C



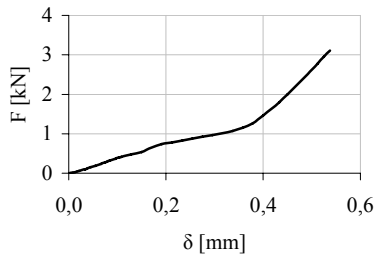
M6C



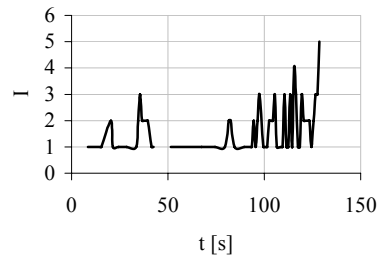
M6D



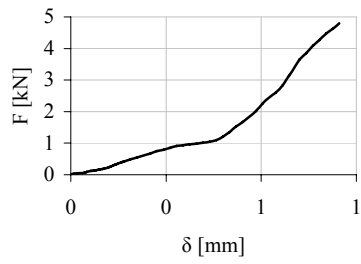
M6D



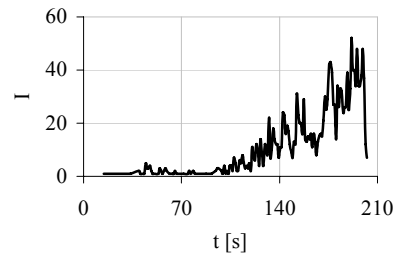
M6E



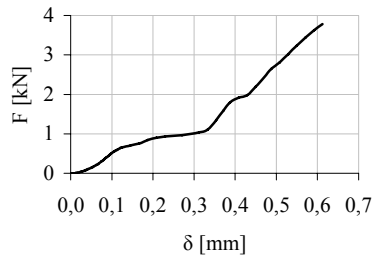
M6E



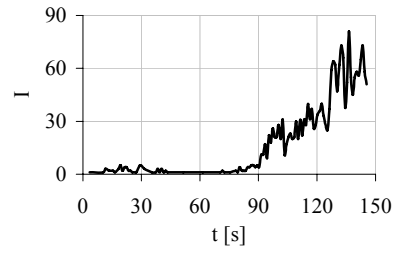
M7A



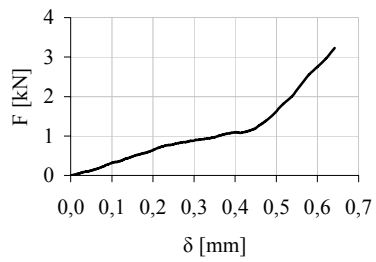
M7A



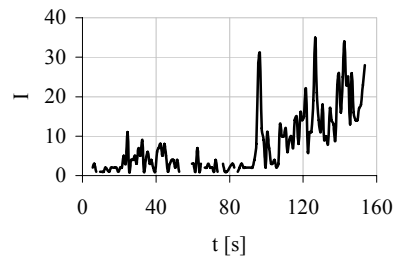
M7B



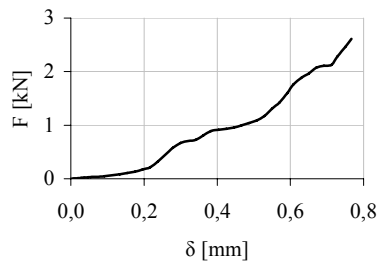
M7B



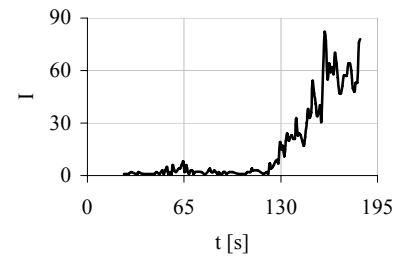
M7C



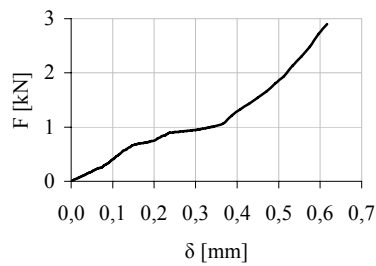
M7C



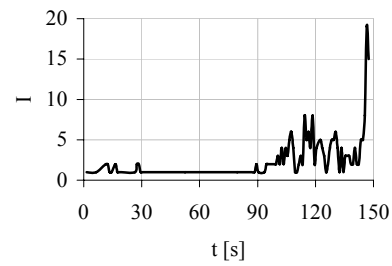
M7D



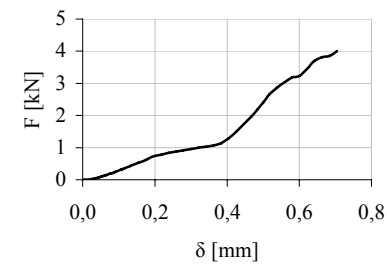
M7D



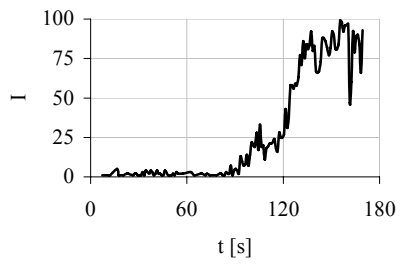
M7E



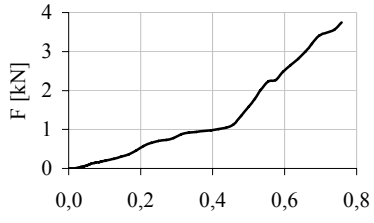
M7E



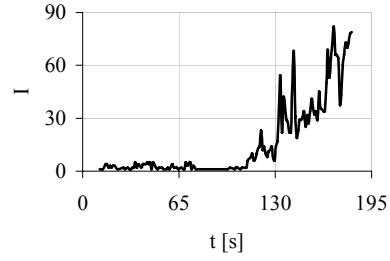
M8A



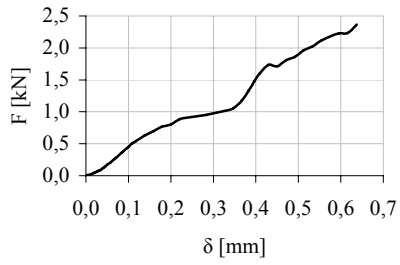
M8A



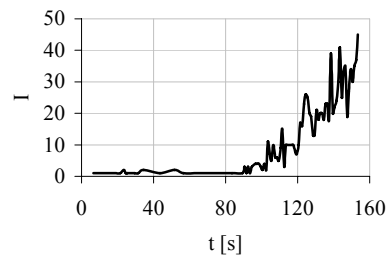
M8B



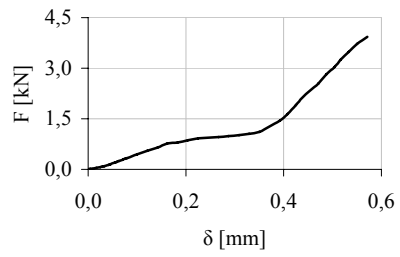
M8B



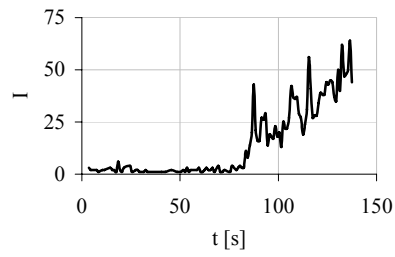
M8C



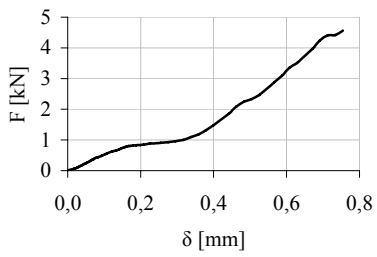
M8C



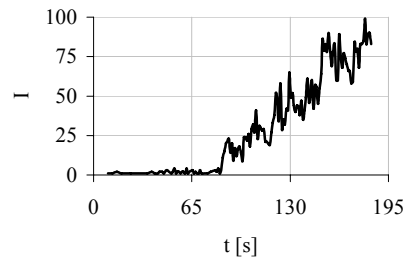
M8D



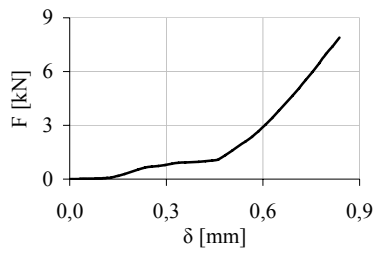
M8D



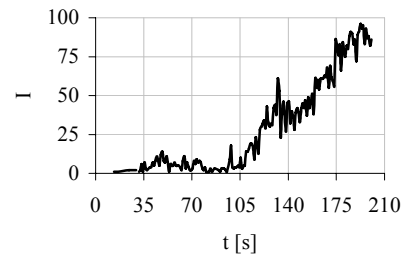
M8E



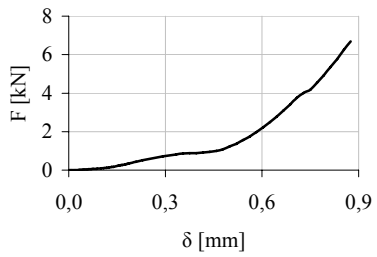
M8E



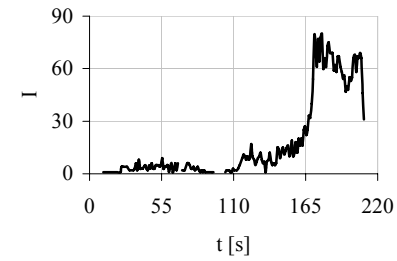
L5A



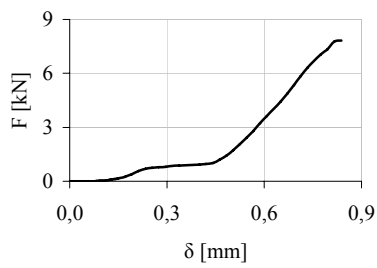
L5A



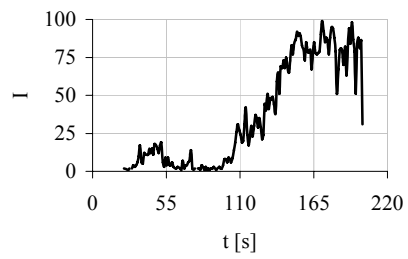
L5B



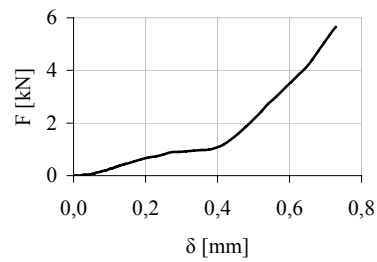
L5B



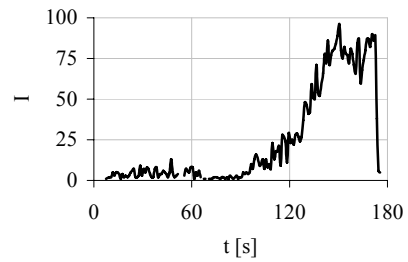
L5C



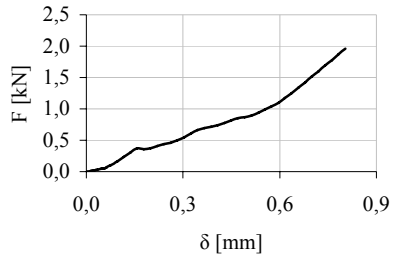
L5C



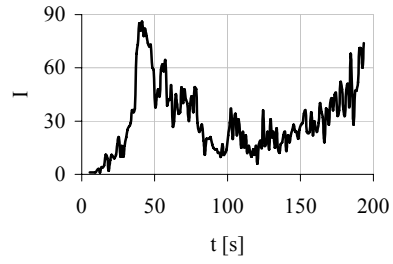
L5D



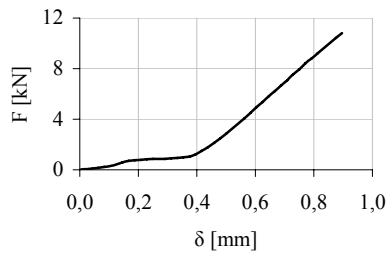
L5D



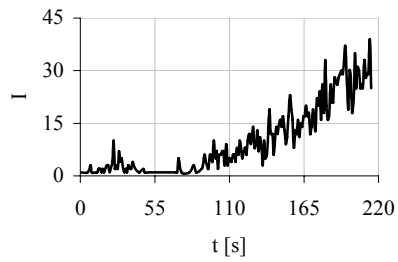
L5E



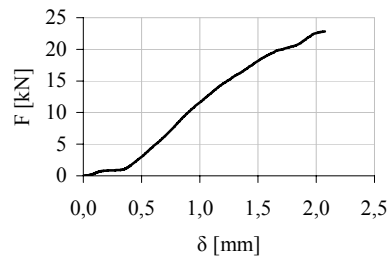
L5E



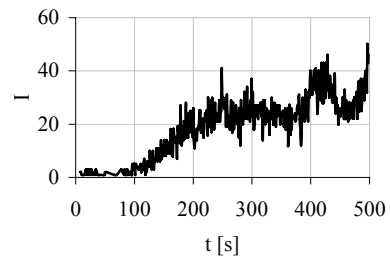
L6A



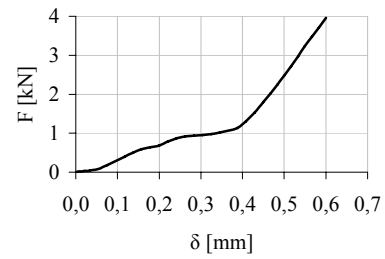
L6A



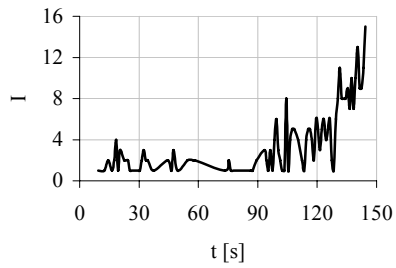
L6B



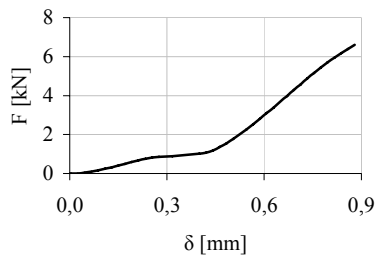
L6B



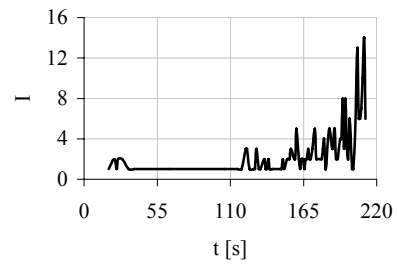
L6C



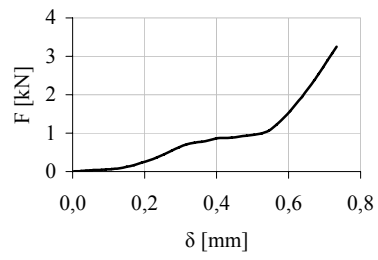
L6C



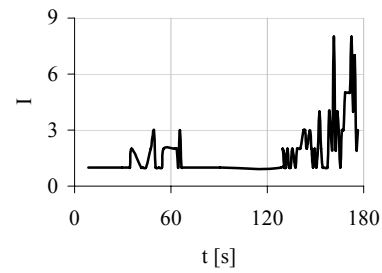
L6D



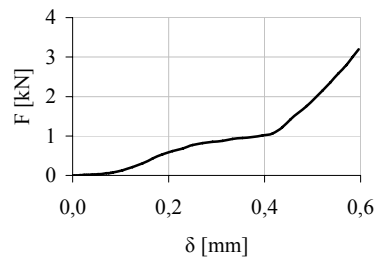
L6D



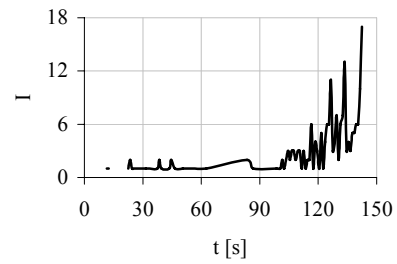
L6E



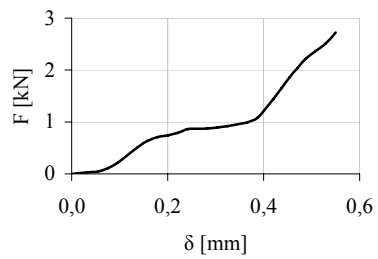
L6E



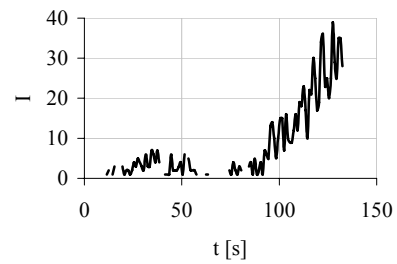
L7A



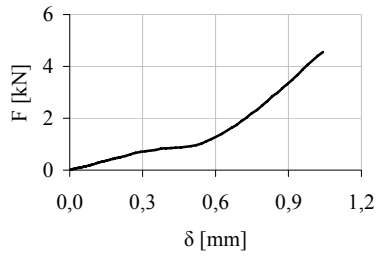
L7A



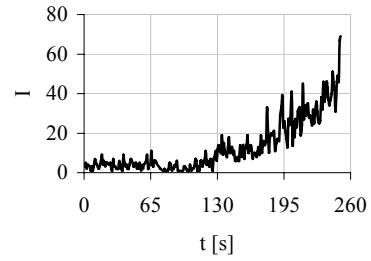
L7B



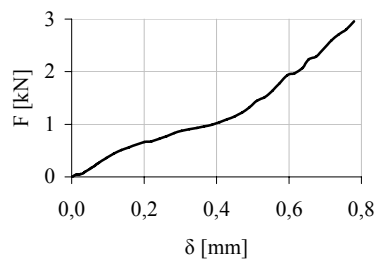
L7B



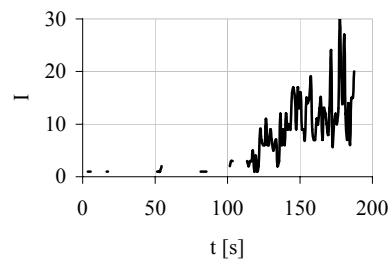
L7C



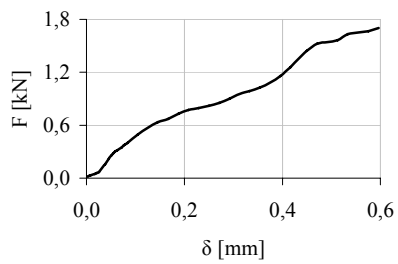
L7C



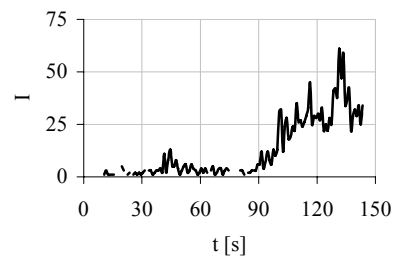
L7D



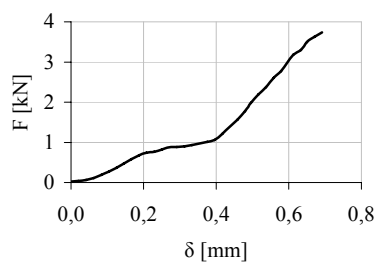
L7D



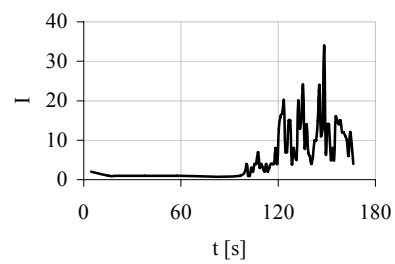
L7E



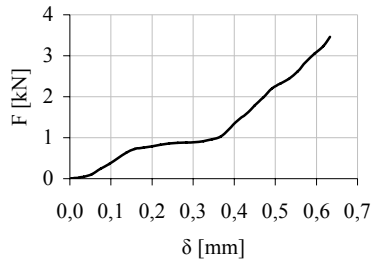
L7E



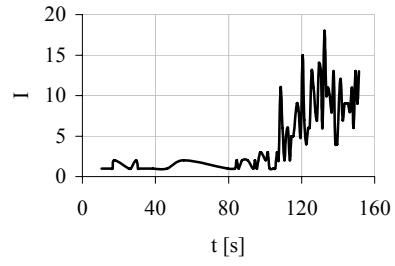
L8A



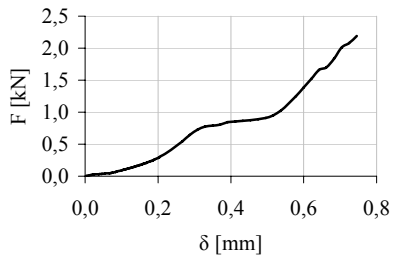
L8A



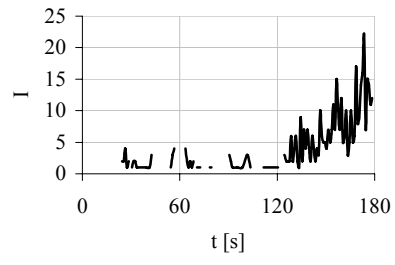
L8B



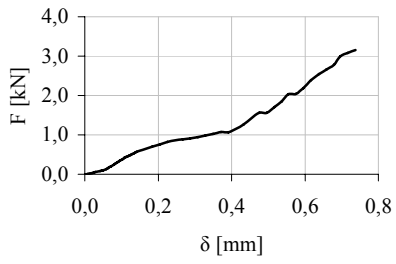
L8B



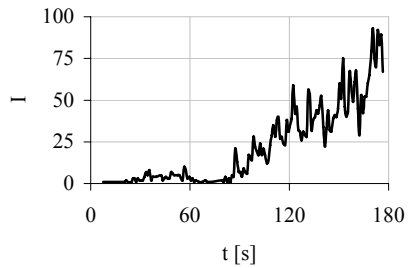
L8C



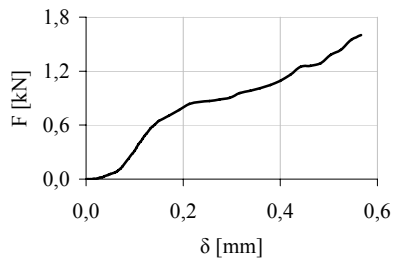
L8C



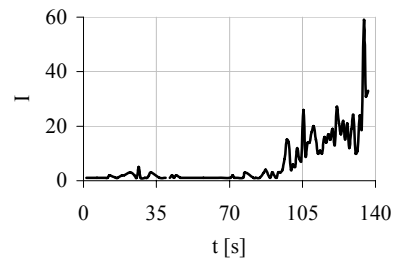
L8D



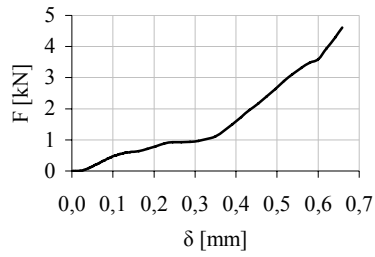
L8D



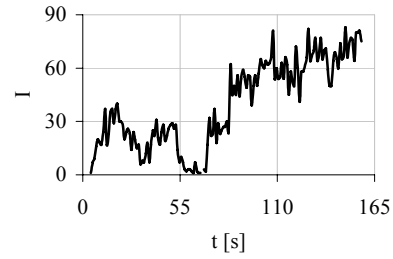
L8E



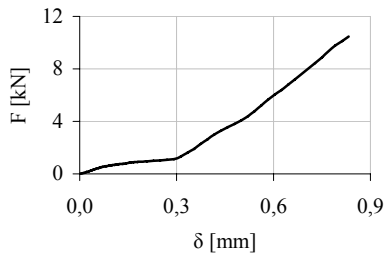
L8E



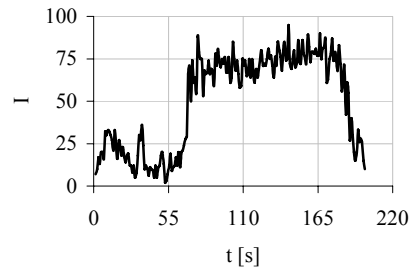
PR1A



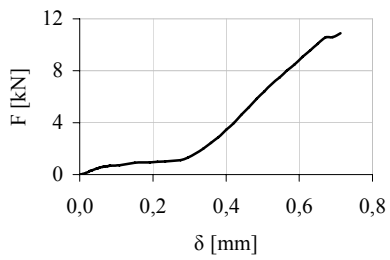
PR1A



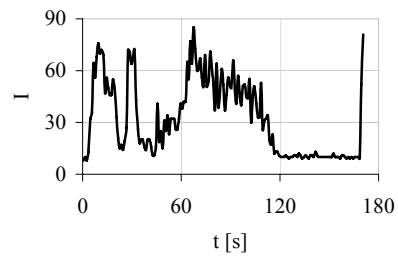
PR1B



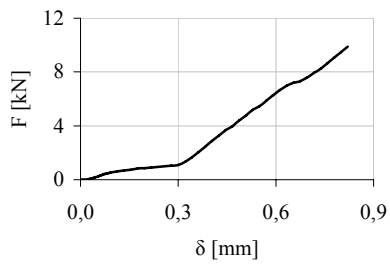
PR1B



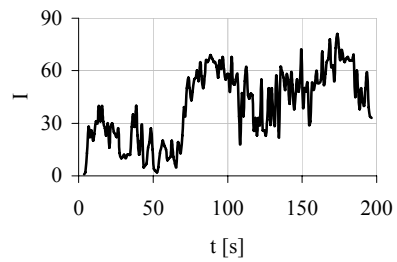
PR1C



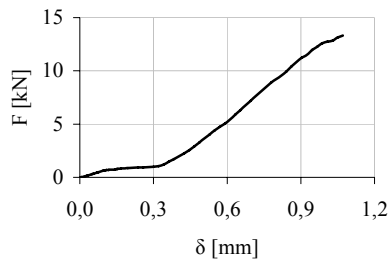
PR1C



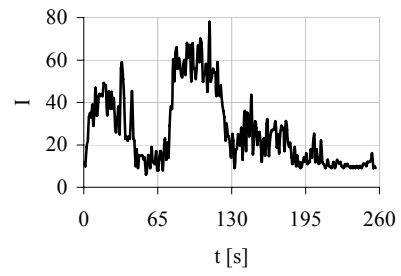
PR1D



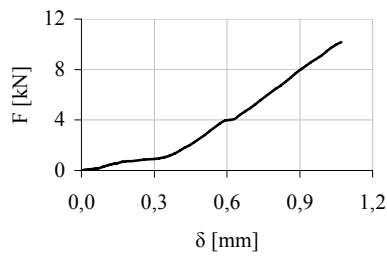
PR1D



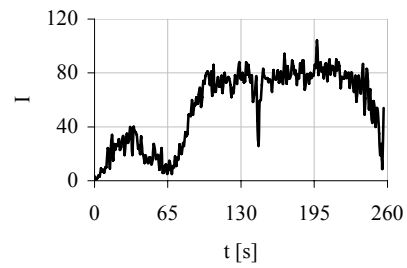
PR1E



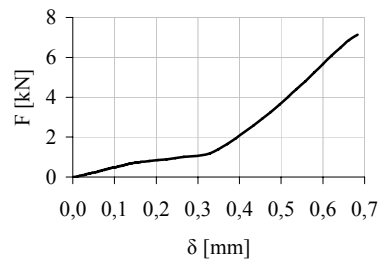
PR1E



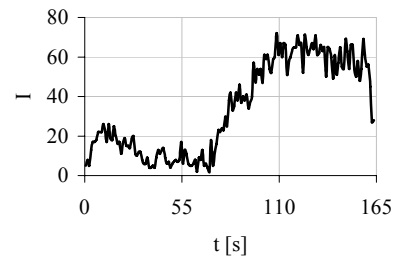
PR1F



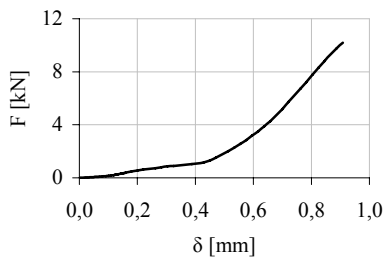
PR1F



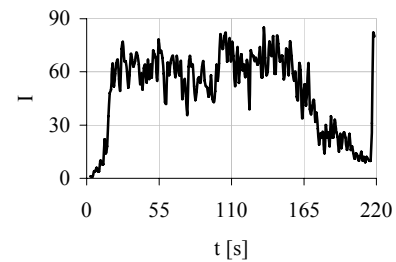
PR1G



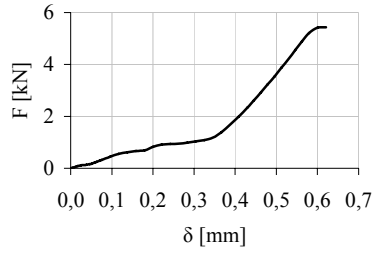
PR1G



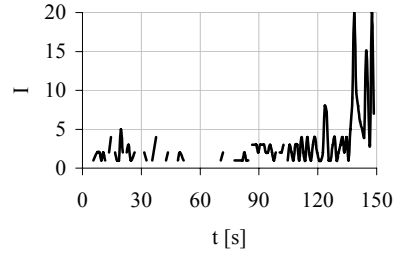
PR1H



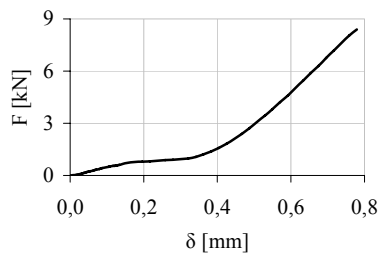
PR1H



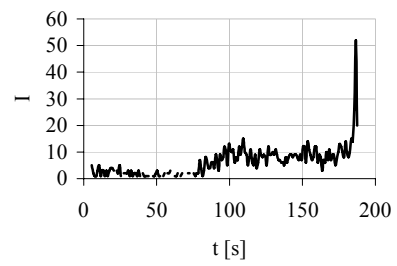
PR2A



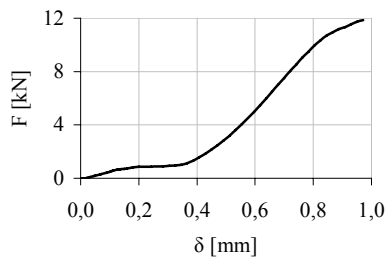
PR2A



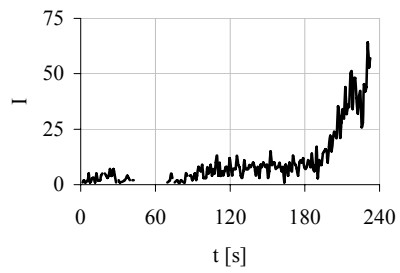
PR2B



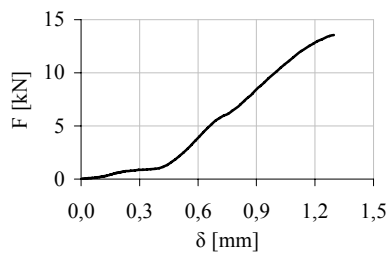
PR2B



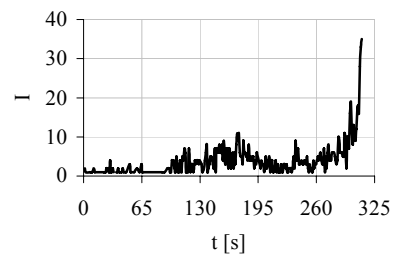
PR2C



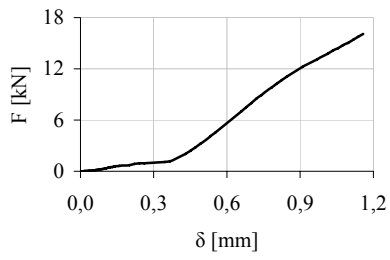
PR2C



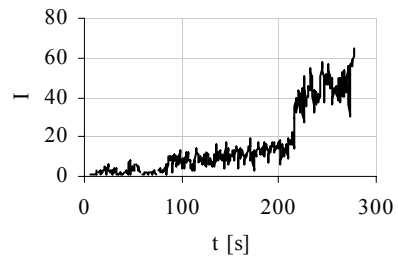
PR2D



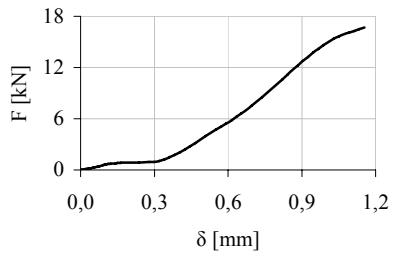
PR2D



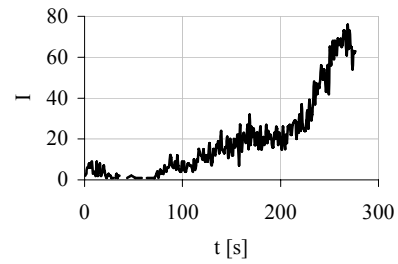
PR2E



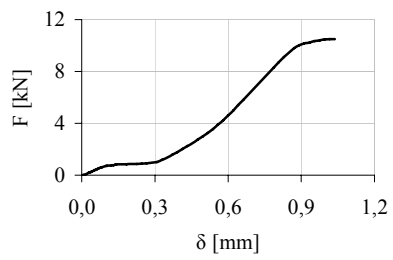
PR2E



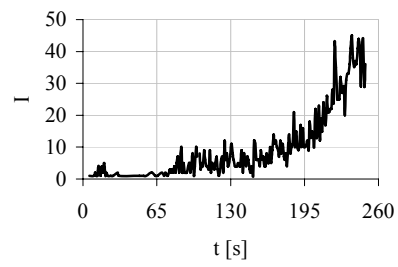
PR2F



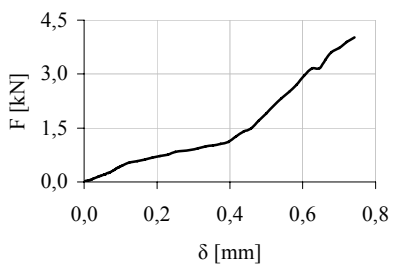
PR2F



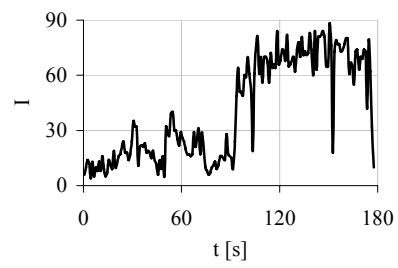
PR2G



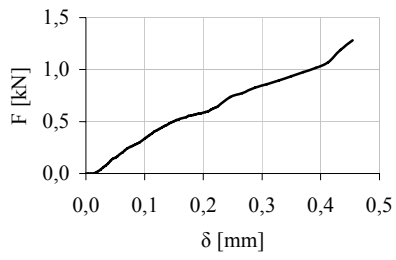
PR2G



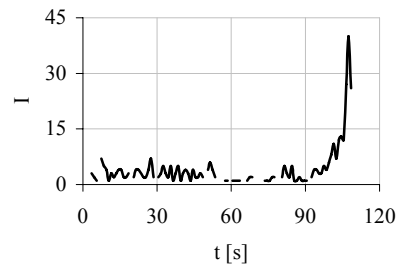
PR3A



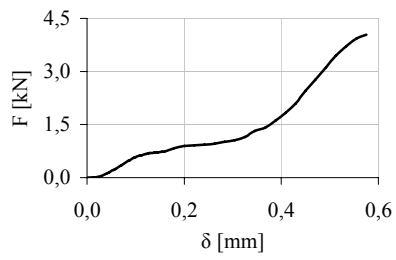
PR3A



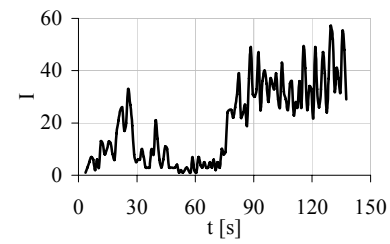
PR3B



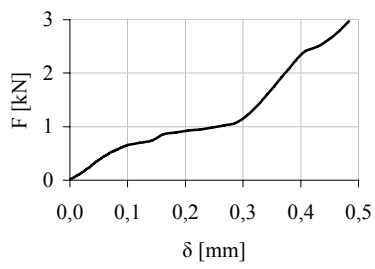
PR3B



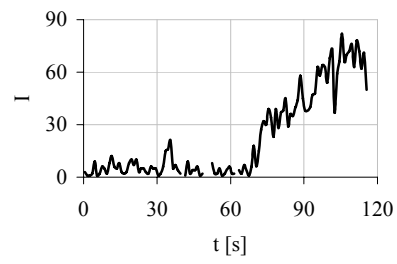
PR3C



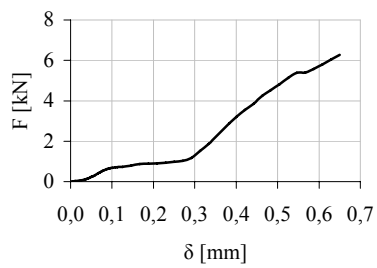
PR3C



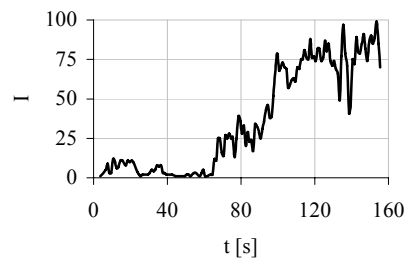
PR3D



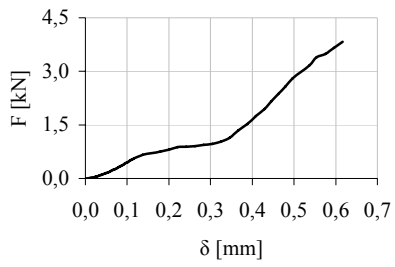
PR3D



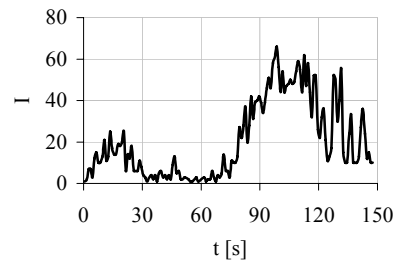
PR4A



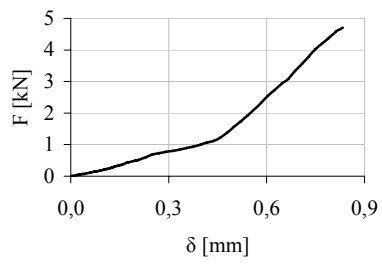
PR4A



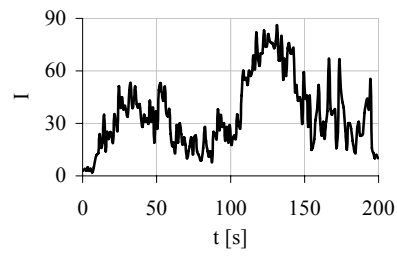
PR4B



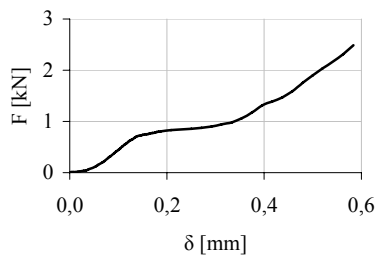
PR4B



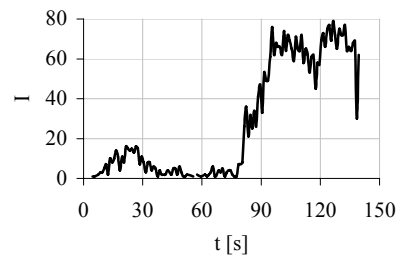
PR4C



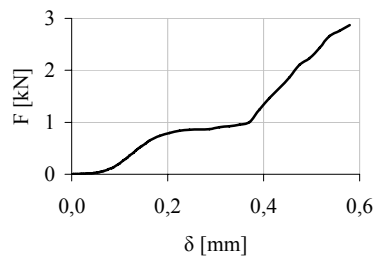
PR4C



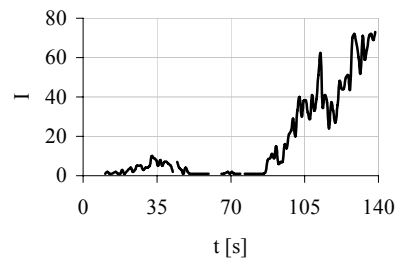
PR4D



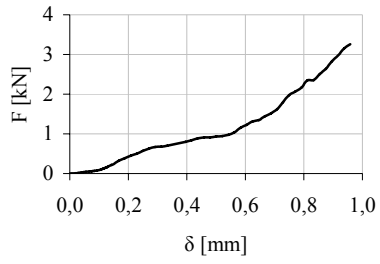
PR4D



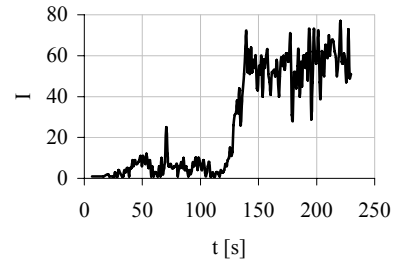
PR5A



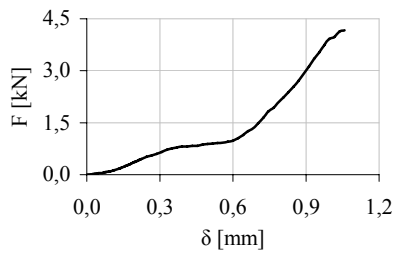
PR5A



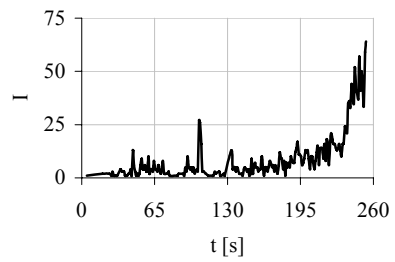
PR5B



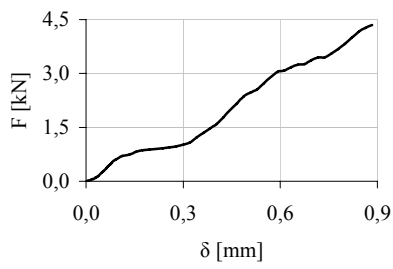
PR5B



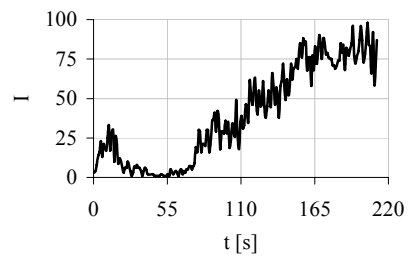
PR5C



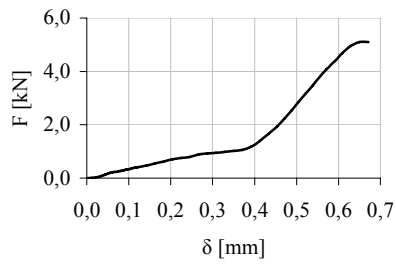
PR5C



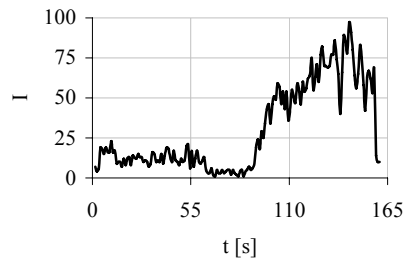
PR5D



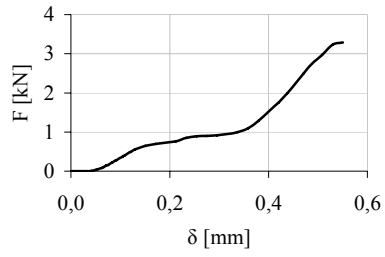
PR5D



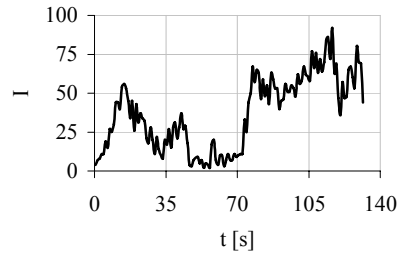
PR6A



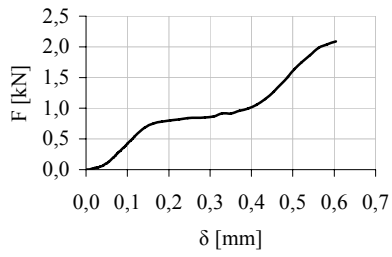
PR6A



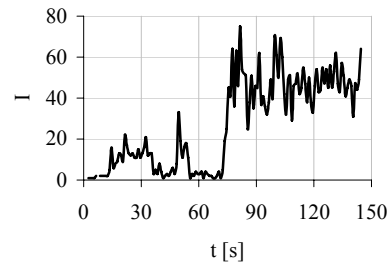
PR6B



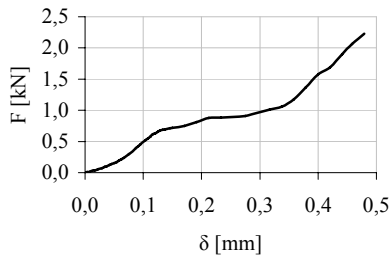
PR6B



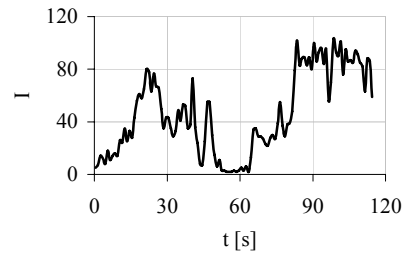
PR6C



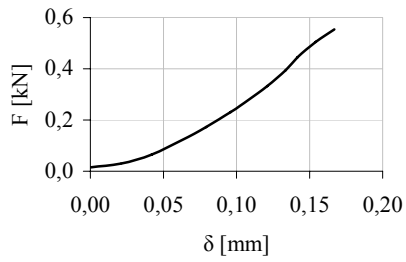
PR6C



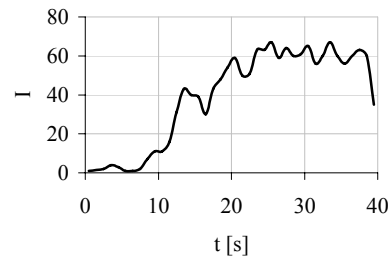
PR6D



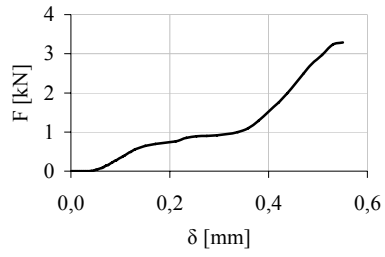
PR6D



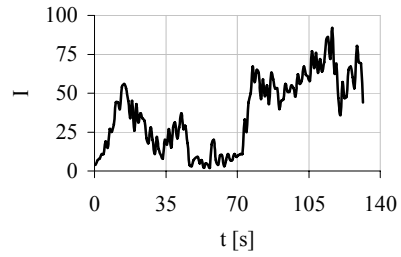
LI1



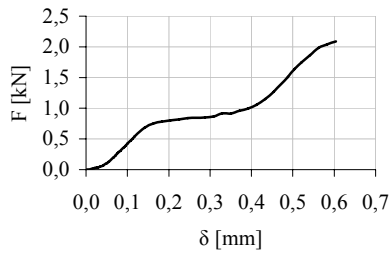
LI1



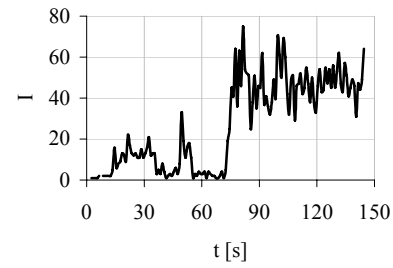
PR6B



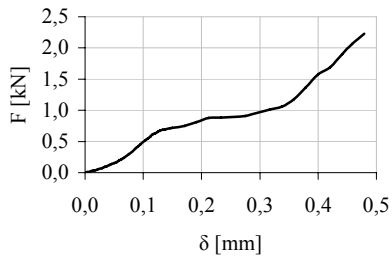
PR6B



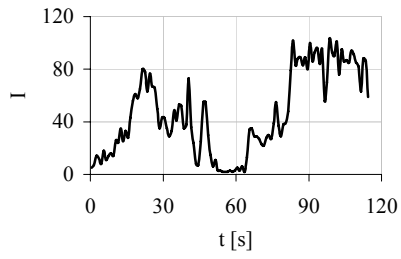
PR6C



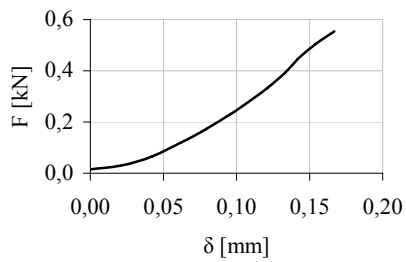
PR6C



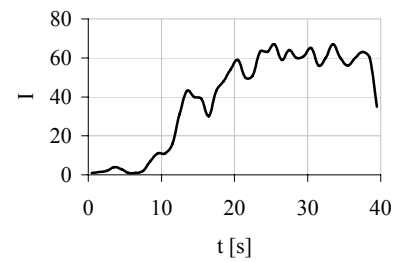
PR6D



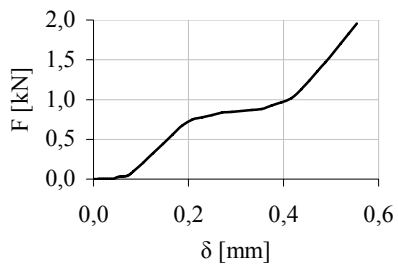
PR6D



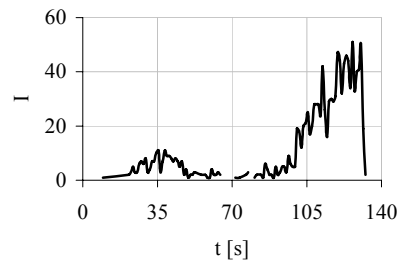
LI1



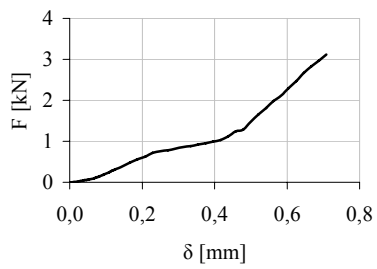
LI1



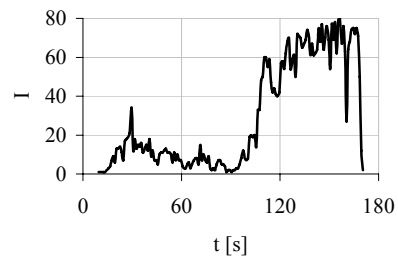
LI2



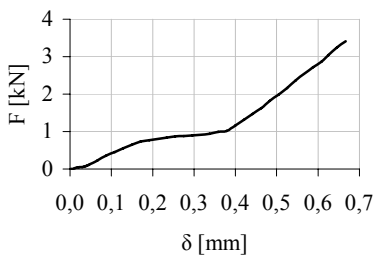
LI2



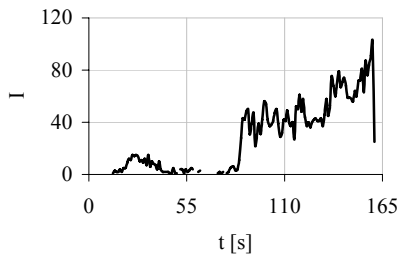
LI3



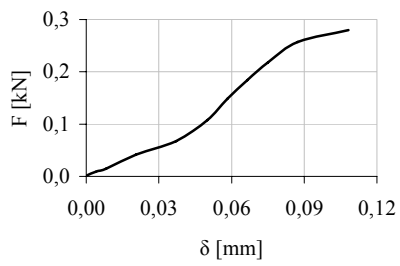
LI3



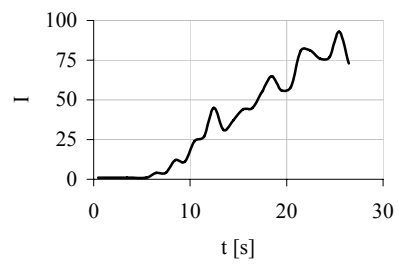
LI4



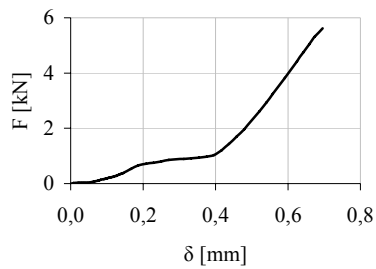
LI4



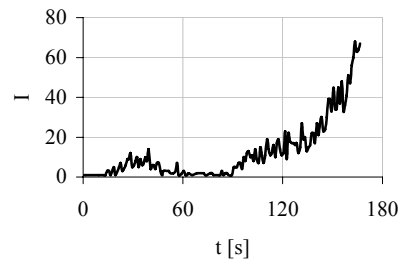
RA1



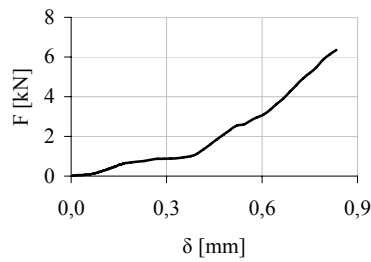
RA1



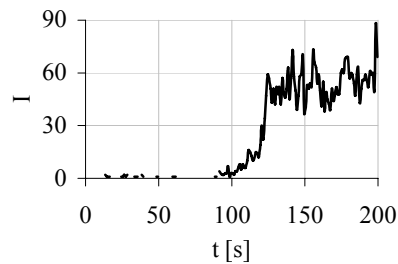
RA2



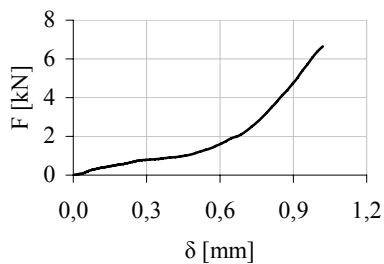
RA2



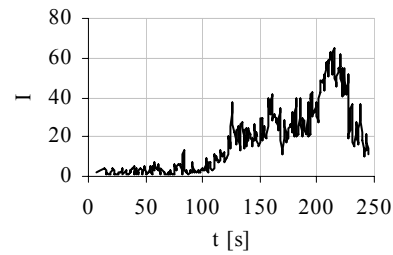
RA2



RA3



RA4



RA4

Procedimiento para la determinación de los impactos acumulados obtenidos a través de la técnica de emisión acústica, cuando se cizalla el recubrimiento proyectado a la probeta para la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura. Considerando el diagrama de impactos versus tiempos de cada probeta recubierta se procedió al cálculo de: 1.) El primer impacto acumulado por: $I_{a1} = I_1$ para $i = 1$. 2.) El segundo impacto

acumulado por: $Ia_2 = I_1 + I_2 = Ia_1 + I_2$ para $i = 2$. 3.) El tercer impacto acumulado por: $Ia_3 = I_1 + I_2 + I_3 = Ia_2 + I_3$ para $i = 3$. 4.) El cuarto impacto acumulado por: $Ia_4 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = Ia_3 + I_4$ para $i = 4$. 5.) El enésimo impacto acumulado por: $Ia_n = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_n = Ia_{(n-1)} + I_n$ para $i = n$.

6.) Resultando para los impactos acumulados la serie: $Ia_i = \sum_{j=1}^{j=i} I_j$.

A.4.2. Experimentos Tribológicos.

Los experimentos tribológicos a través de la prueba o ensayo pin on disk, se realizaron tres (3) repeticiones considerando: 1.) Lubricante líquido aceite Cut-Max 110, en la cantidad de 90 ml para cada uno de los ensayos. 2.) Los polvos para realizar el recubrimiento a los pins fueron micropulverizados de dos aleaciones en dos composiciones: WC/Ni en las proporciones 40/60 y 30/70 en tanto por ciento en peso y Al_2O_3/TiO_2 en las proporciones 87/13 y 97/3 en tanto por ciento en peso. 3.) Los pins fueron recubiertos por la técnica de proyección térmica por llama. 4.) Tres radios para el brazo o disco fueron: $R_D = 10, 20$ y 30 mm. 5.) Cinco cargas normales aplicadas o pesos $N=W = 5, 10, 15, 20$ y 30 N. 6.) Cinco velocidades de rotación $n = 25, 50, 75, 100$ y 150 RPM. 7.) Recorrido 10 m. 8.) Los pins tuvieron un diámetro aparente de $8,0$ mm y un diámetro real de contacto de $5,3$ mm 9.) Las Chapas para obtener los diferentes discos fueron de: Acero de bajo contenido de carbono, calidad DC01, Acero Inoxidable AISI 304 y Aleación de Aluminio AA1060.

La terminología designada en los experimentos tribológico: Ra=Rugosidad Media, σ Ra=Desviación de la Rugosidad Media, e_h =Espesor de Huella, n=Número de Revoluciones, μ =Coeficiente de Rozamiento, $\sigma\mu$ =Desviación del Coeficiente de Rozamiento, W=N=Carga Normal Aplicada (Peso).

A.4.2.1. Serie 1 de Ensayos Pino on Disk, Pin Recubierto con la Aleación 40%WC/60%Ni

Tabla A.4.2.1.A. Rugosidad del Pin recubierto con la Aleación 40%WC/60%Ni.

Pin	Antes	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]	Después	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]
		0,327	0,058		0,632	0,138

a.) Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 40%WC/60%Ni sobre Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01, Los Radios para el Brazo o Disco serán $R_D = 10, 20, \text{ y } 30 \text{ mm}$.

a.1.) Para el Radio de Disco $R_D=10$ mm.

Tabla a.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,781	0,042		0,278	0,083		1,9

Tabla a.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]		W [N]									
		5		10		15		20		30	
		μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,057	0,007	0,088	0,002	0,100	0,002	0,122	0,002	0,122	0,002	
50	0,027	0,005	0,042	0,002	0,060	0,001	0,087	0,002	0,092	0,001	
75	0,023	0,008	0,019	0,002	0,032	0,001	0,061	0,002	0,068	0,001	
100	0,027	0,004	0,018	0,001	0,022	0,001	0,041	0,001	0,048	0,002	
150	0,028	0,006	0,023	0,003	0,017	0,001	0,031	0,002	0,028	0,002	

a.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla a.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,781	0,042		0,220	0,056		2,5

Tabla a.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,082	0,006	0,101	0,004	0,104	0,003	0,105	0,002	0,111	0,007
50	0,037	0,009	0,056	0,002	0,065	0,002	0,066	0,001	0,070	0,004
75	0,030	0,003	0,031	0,002	0,038	0,002	0,043	0,002	0,045	0,002
100	0,036	0,004	0,022	0,001	0,023	0,001	0,027	0,001	0,028	0,001
150	0,042	0,005	0,023	0,001	0,020	0,000	0,017	0,000	0,016	0,001

a.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla a.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,781	0,042		0,398	0,096		1,4

Tabla a.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,028	0,003	0,050	0,003	0,071	0,003	0,080	0,003	0,099	0,003
50	0,029	0,004	0,022	0,001	0,027	0,001	0,039	0,001	0,053	0,004
75	0,037	0,003	0,024	0,001	0,021	0,001	0,022	0,001	0,031	0,001
100	0,050	0,005	0,027	0,001	0,022	0,001	0,020	0,001	0,022	0,001
150	0,050	0,001	0,033	0,001	0,026	0,000	0,022	0,001	0,019	0,000

b.) Disco de Acero Inoxidable AISI 304.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 40%WC/60%Ni sobre Disco de Acero Inoxidable AISI 304, Los Radios para el Brazo o Disco serán $R_D = 10, 20, \text{ y } 30 \text{ mm}$.

b.1.) Para Radio de Disco $R_D = 10 \text{ mm}$.

Tabla b.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σRa	Después	Ra	σRa	Huella	e_h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,059	0,003		0,564	0,172		2,5

Tabla b.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,133	0,005	0,139	0,003	0,151	0,004	0,159	0,011	0,216	0,034
50	0,115	0,007	0,129	0,003	0,129	0,002	0,130	0,002	0,156	0,019
75	0,108	0,005	0,120	0,002	0,126	0,002	0,139	0,005	0,152	0,015
100	0,099	0,005	0,115	0,002	0,126	0,002	0,138	0,009	0,151	0,007
150	0,070	0,003	0,104	0,002	0,123	0,001	0,125	0,005	0,143	0,004

b.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla b.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,059	0,003		0,469	0,125		2,5

Tabla b.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,123	0,004	0,130	0,003	0,129	0,004	0,137	0,003	0,225	0,023
50	0,116	0,013	0,122	0,003	0,125	0,006	0,133	0,007	0,168	0,029
75	0,108	0,005	0,116	0,003	0,115	0,004	0,122	0,006	0,153	0,018
100	0,097	0,004	0,108	0,002	0,106	0,003	0,121	0,010	0,127	0,008
150	0,071	0,005	0,093	0,003	0,095	0,002	0,103	0,003	0,116	0,003

b.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla b.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,059	0,003		0,398	0,091		2,7

Tabla b.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,082	0,006	0,104	0,003	0,115	0,003	0,136	0,006	0,171	0,014
50	0,047	0,004	0,071	0,002	0,088	0,002	0,107	0,003	0,134	0,007
75	0,045	0,004	0,045	0,002	0,066	0,001	0,084	0,003	0,129	0,009
100	0,045	0,003	0,043	0,002	0,049	0,002	0,068	0,005	0,115	0,006
150	0,062	0,005	0,034	0,002	0,035	0,003	0,043	0,001	0,086	0,003

c.) Disco de Aleación de Aluminio AA1060.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 40%WC/60%Ni sobre Disco de Aleación de Aluminio AA1060, Los Radios para el Brazo o Disco serán $R_D = 10, 20, \text{ y } 30 \text{ mm}$.

c.1.) Para Radio de Disco $R_D=10 \text{ mm}$.

Tabla c.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σRa	Después	Ra	σRa	Huella	e_h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,386	0,111		0,695	0,232		2,9

Tabla c.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,068	0,005	0,097	0,006	0,097	0,005	0,110	0,003	0,106	0,007
50	0,062	0,007	0,081	0,004	0,091	0,007	0,106	0,010	0,106	0,009
75	0,051	0,004	0,070	0,002	0,093	0,006	0,086	0,003	0,105	0,011
100	0,052	0,007	0,063	0,002	0,089	0,004	0,093	0,005	0,104	0,007
150	0,045	0,003	0,053	0,001	0,090	0,003	0,094	0,008	0,099	0,008

c.2.) Para Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla c.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,386	0,111		0,469	0,123		3,4

Tabla c.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,116	0,004	0,122	0,012	0,119	0,007	0,098	0,011	0,110	0,009
50	0,112	0,006	0,112	0,006	0,113	0,007	0,103	0,006	0,113	0,004
75	0,088	0,008	0,112	0,010	0,113	0,005	0,102	0,005	0,111	0,006
100	0,070	0,004	0,108	0,005	0,110	0,005	0,102	0,006	0,110	0,006
150	0,044	0,002	0,096	0,006	0,103	0,009	0,095	0,006	0,105	0,005

c.3.) Para Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla c.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,386	0,111		0,339	0,129		2,7

Tabla c.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,099	0,009	0,115	0,004	0,109	0,006	0,110	0,007	0,106	0,008
50	0,059	0,010	0,095	0,009	0,106	0,006	0,110	0,006	0,103	0,006
75	0,055	0,008	0,079	0,005	0,105	0,006	0,108	0,007	0,117	0,006
100	0,046	0,005	0,077	0,003	0,083	0,003	0,118	0,004	0,113	0,008
150	0,053	0,003	0,057	0,003	0,081	0,002	0,095	0,003	0,094	0,010

A.4.2.2. Serie 2 de Ensayos Pino on Disk, Pin Recubierto con la Aleación 30%WC/70%Ni.

Tabla A.4.2.2.A. Rugosidad del Pin recubierto con la Aleación 30%WC/70%Ni.

Pin	Antes	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]	Después	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]
		0,348	0,012		1,760	0,206

a.) Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 30%WC/70%Ni sobre Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01, Los Radios para el Brazo o Disco serán $R_D = 10, 20, \text{ y } 30 \text{ mm}$.

a.1.) Para el Radio de Disco $R_D=10 \text{ mm}$.

Tabla a.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,911	0,058		0,617	0,075		1,8

Tabla a.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,079	0,015	0,088	0,010	0,095	0,007	0,101	0,005	0,112	0,006
50	0,054	0,006	0,064	0,004	0,069	0,003	0,077	0,003	0,092	0,003
75	0,051	0,005	0,051	0,004	0,057	0,003	0,064	0,003	0,078	0,003
100	0,043	0,004	0,043	0,003	0,049	0,003	0,055	0,004	0,066	0,005
150	0,045	0,003	0,038	0,003	0,042	0,003	0,043	0,002	0,054	0,003

a.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla a.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,911	0,058		0,590	0,095		1,8

Tabla a.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,062	0,009	0,075	0,006	0,081	0,005	0,087	0,005	0,100	0,006
50	0,045	0,008	0,049	0,002	0,057	0,003	0,062	0,003	0,074	0,004
75	0,038	0,010	0,040	0,002	0,045	0,002	0,048	0,003	0,060	0,004
100	0,046	0,004	0,032	0,002	0,038	0,002	0,039	0,002	0,046	0,004
150	0,051	0,003	0,034	0,001	0,030	0,001	0,030	0,001	0,035	0,002

a.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla a.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,911	0,058		0,628	0,117		1,5

Tabla a.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,055	0,010	0,068	0,009	0,077	0,008	0,084	0,006	0,096	0,006
50	0,044	0,010	0,048	0,004	0,052	0,004	0,058	0,004	0,069	0,003
75	0,057	0,007	0,046	0,004	0,044	0,003	0,046	0,004	0,053	0,004
100	0,061	0,008	0,046	0,004	0,041	0,003	0,043	0,005	0,047	0,004
150	0,067	0,006	0,049	0,001	0,043	0,002	0,041	0,001	0,041	0,002

b.) Disco de Acero Inoxidable AISI 304.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 30%WC/70%Ni sobre Disco de Acero Inoxidable AISI 304, Los Radios para el Brazo o Disco serán $R_D = 10, 20, \text{ y } 30 \text{ mm}$.

b.1.) Para Radio de Disco $R_D=10 \text{ mm}$.

Tabla b.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,050	0,008		0,787	0,080		2,2

Tabla b.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,146	0,006	0,146	0,007	0,148	0,004	0,156	0,006	0,178	0,018
50	0,146	0,005	0,147	0,003	0,147	0,002	0,150	0,003	0,158	0,005
75	0,143	0,004	0,144	0,002	0,147	0,002	0,148	0,002	0,155	0,002
100	0,142	0,005	0,142	0,002	0,144	0,001	0,153	0,003	0,153	0,003
150	0,144	0,003	0,152	0,002	0,144	0,001	0,145	0,002	0,158	0,003

b.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla b.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,050	0,008		0,647	0,089		1,5

Tabla b.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,142	0,005	0,143	0,003	0,144	0,005	0,158	0,006	0,176	0,016
50	0,155	0,013	0,141	0,002	0,143	0,001	0,149	0,002	0,163	0,006
75	0,147	0,006	0,139	0,001	0,139	0,001	0,146	0,009	0,156	0,004
100	0,148	0,005	0,138	0,002	0,140	0,003	0,146	0,001	0,162	0,008
150	0,149	0,004	0,145	0,002	0,142	0,002	0,143	0,002	0,150	0,004

b.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla b.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,050	0,008		0,460	0,078		3,8

Tabla b.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,157	0,009	0,158	0,004	0,160	0,008	0,173	0,007	0,192	0,027
50	0,155	0,006	0,165	0,003	0,157	0,002	0,162	0,003	0,171	0,013
75	0,151	0,006	0,155	0,003	0,156	0,002	0,158	0,002	0,179	0,027
100	0,165	0,005	0,153	0,003	0,157	0,004	0,166	0,001	0,156	0,010
150	0,158	0,003	0,160	0,003	0,176	0,001	0,154	0,002	0,154	0,001

c.) Disco de Aleación de Aluminio AA1060.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 30%WC/70%Ni sobre Disco de Aleación de Aluminio AA1060, Los Radios para el Brazo o Disco serán $R_D = 10, 20, \text{ y } 30 \text{ mm}$.

c.1.) Para Radio de Disco $R_D=10 \text{ mm}$.

Tabla c.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,316	0,048		0,840	0,125		3,4

Tabla c.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,118	0,005	0,117	0,007	0,124	0,006	0,113	0,005	0,097	0,005
50	0,114	0,008	0,125	0,014	0,109	0,010	0,114	0,007	0,106	0,007
75	0,134	0,009	0,117	0,006	0,130	0,007	0,105	0,008	0,109	0,008
100	0,152	0,009	0,107	0,005	0,104	0,006	0,102	0,005	0,088	0,006
150	0,172	0,004	0,119	0,007	0,124	0,009	0,099	0,005	0,101	0,005

c.2.) Para Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla c.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,316	0,048		0,856	0,159		2,5

Tabla c.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,119	0,007	0,121	0,008	0,108	0,006	0,116	0,006	0,091	0,005
50	0,130	0,009	0,113	0,004	0,102	0,005	0,106	0,005	0,093	0,003
75	0,135	0,009	0,118	0,004	0,098	0,005	0,104	0,006	0,096	0,005
100	0,146	0,007	0,116	0,005	0,129	0,006	0,117	0,005	0,102	0,005
150	0,165	0,007	0,124	0,007	0,145	0,005	0,105	0,004	0,111	0,004

c.3.) Para Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla c.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,316	0,048		0,666	0,181		2,9

Tabla c.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,127	0,008	0,127	0,006	0,113	0,004	0,111	0,008	0,096	0,004
50	0,127	0,008	0,118	0,004	0,105	0,005	0,113	0,004	0,110	0,004
75	0,124	0,005	0,133	0,006	0,123	0,003	0,112	0,006	0,109	0,004
100	0,148	0,003	0,135	0,006	0,110	0,003	0,111	0,004	0,112	0,005
150	0,138	0,005	0,141	0,006	0,134	0,005	0,110	0,005	0,113	0,004

A.4.2.3. Serie 3 de Ensayos Pino on Disk, Pin Recubierto con la Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂.

Tabla A.4.2.3.A. Rugosidad del Pin recubierto con la Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂.

Pin	Antes	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]	Después	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]
		3,841	0,476		2,707	0,245

a.) Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sobre Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01, Los Radios para el Brazo o Disco serán R_D = 10, 20, y 30 mm.

a.1.) Para el Radio de Disco R_D=10 mm.

Tabla a.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σRa	Después	Ra	σRa	Huella	e _h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		1,332	0,062		0,825	0,166		2,4

Tabla a.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ
25	0,173	0,006	0,174	0,005	0,156	0,003	0,161	0,003	0,154	0,006
50	0,183	0,005	0,180	0,002	0,161	0,001	0,163	0,001	0,147	0,004
75	0,186	0,004	0,179	0,002	0,167	0,001	0,163	0,001	0,151	0,002
100	0,176	0,005	0,172	0,002	0,163	0,001	0,159	0,001	0,151	0,002
150	0,171	0,004	0,169	0,002	0,167	0,001	0,159	0,001	0,151	0,001

a.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla a.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		1,332	0,062		0,488	0,055		2,3

Tabla a.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,171	0,007	0,153	0,002	0,159	0,002	0,158	0,002	0,158	0,006
50	0,169	0,006	0,152	0,002	0,153	0,002	0,154	0,001	0,154	0,002
75	0,170	0,006	0,154	0,002	0,152	0,001	0,153	0,001	0,152	0,001
100	0,170	0,007	0,154	0,002	0,153	0,002	0,157	0,002	0,152	0,003
150	0,159	0,003	0,156	0,001	0,151	0,003	0,155	0,001	0,151	0,002

a.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla a.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		1,332	0,062		0,525	0,136		2,3

Tabla a.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,160	0,005	0,151	0,003	0,149	0,003	0,150	0,003	0,153	0,008
50	0,164	0,008	0,149	0,002	0,153	0,003	0,148	0,001	0,147	0,002
75	0,164	0,004	0,154	0,002	0,151	0,003	0,148	0,001	0,149	0,002
100	0,164	0,005	0,153	0,002	0,150	0,001	0,148	0,001	0,148	0,001
150	0,151	0,003	0,150	0,001	0,146	0,000	0,148	0,001	0,147	0,001

b.) Disco de Acero Inoxidable AISI 304.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sobre Disco de Acero Inoxidable AISI 304, Los Radios para el Brazo o Disco serán R_D = 10, 20, y 30 mm.

b.1.) Para Radio de Disco R_D=10 mm.

Tabla b.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σRa	Después	Ra	σRa	Huella	e _h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,060	0,004		0,413	0,092		2,4

Tabla b.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ
25	0,195	0,009	0,183	0,007	0,191	0,011	0,194	0,008	0,197	0,018
50	0,195	0,007	0,179	0,003	0,188	0,010	0,200	0,007	0,185	0,019
75	0,193	0,006	0,185	0,003	0,197	0,005	0,193	0,003	0,163	0,012
100	0,191	0,006	0,184	0,002	0,194	0,004	0,179	0,006	0,170	0,008
150	0,212	0,005	0,190	0,003	0,190	0,004	0,184	0,008	0,162	0,009

b.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla b.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,060	0,004		0,992	0,138		5,3

Tabla b.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]		W [N]									
		5		10		15		20		30	
		μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25		0,186	0,009	0,172	0,007	0,186	0,006	0,187	0,004	0,188	0,022
50		0,191	0,007	0,187	0,004	0,183	0,004	0,183	0,007	0,175	0,009
75		0,185	0,005	0,199	0,005	0,177	0,006	0,184	0,007	0,184	0,009
100		0,189	0,004	0,204	0,004	0,194	0,011	0,170	0,007	0,174	0,009
150		0,206	0,005	0,191	0,004	0,201	0,014	0,174	0,004	0,169	0,007

b.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla b.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,060	0,004		0,370	0,072		2,6

Tabla b.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,168	0,006	0,165	0,004	0,176	0,006	0,181	0,005	0,202	0,012
50	0,174	0,013	0,163	0,002	0,169	0,002	0,182	0,003	0,197	0,011
75	0,182	0,008	0,162	0,002	0,168	0,002	0,181	0,003	0,182	0,006
100	0,191	0,004	0,166	0,002	0,166	0,002	0,179	0,003	0,183	0,002
150	0,186	0,005	0,169	0,002	0,165	0,001	0,172	0,003	0,184	0,003

c.) Disco de Aleación de Aluminio AA1060.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂ sobre Disco de Aleación de Aluminio AA1060, Los Radios para el Brazo o Disco serán R_D = 10, 20, y 30 mm.

c.1.) Para Radio de Disco R_D=10 mm.

Tabla c.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σRa	Después	Ra	σRa	Huella	e _h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,162	0,006		1,077	0,128		4,3

Tabla c.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ
25	0,126	0,011	0,127	0,011	0,109	0,005	0,112	0,009	0,114	0,011
50	0,127	0,009	0,125	0,009	0,120	0,006	0,128	0,007	0,105	0,004
75	0,142	0,004	0,112	0,009	0,125	0,008	0,121	0,006	0,115	0,006
100	0,131	0,005	0,098	0,007	0,126	0,009	0,102	0,005	0,116	0,005
150	0,177	0,004	0,110	0,005	0,113	0,005	0,092	0,003	0,108	0,009

c.2.) Para Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla c.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,162	0,006		1,143	0,155		2,4

Tabla c.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,107	0,006	0,119	0,007	0,116	0,006	0,102	0,005	0,102	0,008
50	0,128	0,009	0,111	0,006	0,110	0,006	0,113	0,006	0,111	0,003
75	0,137	0,009	0,132	0,006	0,121	0,006	0,122	0,006	0,102	0,005
100	0,145	0,006	0,138	0,006	0,119	0,005	0,110	0,005	0,129	0,007
150	0,207	0,004	0,161	0,003	0,132	0,004	0,117	0,003	0,121	0,005

c.3.) Para Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla c.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,162	0,006		0,951	0,162		2,4

Tabla c.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,112	0,005	0,113	0,007	0,106	0,004	0,121	0,005	0,109	0,007
50	0,150	0,011	0,109	0,005	0,120	0,006	0,117	0,008	0,123	0,005
75	0,135	0,009	0,119	0,005	0,137	0,003	0,117	0,006	0,117	0,004
100	0,161	0,013	0,128	0,005	0,136	0,006	0,123	0,005	0,116	0,006
150	0,199	0,003	0,134	0,010	0,145	0,007	0,112	0,007	0,119	0,006

A.4.2.4. Serie 3 de Ensayos Pino on Disk, Pin Recubierto con la Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

Tabla A.4.2.3.A. Rugosidad del Pin recubierto con la Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂.

Pin	Antes	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]	Después	Ra [μ m]	σ Ra [μ m]
		2,580	0,233		2,815	0,273

a.) Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂ sobre Disco de Acero de Bajo Contenido de Carbono DC01, Los Radios para el Brazo o Disco serán R_D = 10, 20, y 30 mm.

a.1.) Para el Radio de Disco R_D=10 mm.

Tabla a.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σRa	Después	Ra	σRa	Huella	e _h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,962	0,071		0,566	0,153		1,2

Tabla a.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ
25	0,155	0,003	0,148	0,003	0,138	0,003	0,136	0,005	0,139	0,007
50	0,154	0,011	0,146	0,002	0,142	0,002	0,138	0,005	0,133	0,003
75	0,151	0,004	0,142	0,002	0,141	0,002	0,137	0,002	0,134	0,003
100	0,149	0,003	0,141	0,002	0,136	0,002	0,135	0,002	0,125	0,003
150	0,143	0,003	0,141	0,001	0,135	0,001	0,131	0,002	0,129	0,002

a.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla a.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,962	0,071		0,337	0,080		1,9

Tabla a.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,150	0,003	0,144	0,002	0,137	0,002	0,131	0,003	0,131	0,005
50	0,145	0,005	0,142	0,003	0,138	0,002	0,126	0,004	0,126	0,002
75	0,149	0,004	0,138	0,002	0,135	0,002	0,126	0,002	0,128	0,002
100	0,144	0,003	0,139	0,001	0,133	0,002	0,133	0,002	0,126	0,002
150	0,135	0,002	0,137	0,002	0,133	0,002	0,131	0,002	0,117	0,002

a.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla a.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,962	0,071		0,240	0,087		1,9

Tabla a.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,138	0,003	0,134	0,003	0,134	0,002	0,132	0,003	0,125	0,005
50	0,134	0,006	0,128	0,003	0,132	0,003	0,128	0,002	0,130	0,003
75	0,134	0,005	0,124	0,002	0,129	0,003	0,121	0,002	0,127	0,001
100	0,132	0,006	0,124	0,002	0,123	0,002	0,124	0,002	0,127	0,002
150	0,128	0,003	0,118	0,001	0,117	0,001	0,111	0,002	0,121	0,003

b.) Disco de Acero Inoxidable AISI 304.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂ sobre Disco de Acero Inoxidable AISI 304, Los Radios para el Brazo o Disco serán R_D = 10, 20, y 30 mm.

b.1.) Para Radio de Disco R_D=10 mm.

Tabla b.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σRa	Después	Ra	σRa	Huella	e _h
		[μm]	[μm]		[μm]	[μm]		[mm]
		0,053	0,008		0,388	0,080		3,8

Tabla b.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ
25	0,141	0,008	0,146	0,005	0,146	0,006	0,152	0,005	0,195	0,014
50	0,140	0,006	0,137	0,003	0,160	0,009	0,147	0,003	0,169	0,006
75	0,136	0,004	0,138	0,002	0,147	0,003	0,151	0,004	0,169	0,008
100	0,140	0,003	0,142	0,003	0,152	0,005	0,162	0,008	0,172	0,009
150	0,140	0,003	0,148	0,003	0,159	0,003	0,152	0,003	0,162	0,011

b.2.) Para el Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla b.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,053	0,008		0,350	0,125		3,8

Tabla b.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,165	0,006	0,155	0,003	0,184	0,009	0,173	0,005	0,181	0,015
50	0,161	0,006	0,152	0,003	0,167	0,003	0,184	0,009	0,152	0,009
75	0,161	0,004	0,154	0,002	0,160	0,006	0,183	0,007	0,162	0,007
100	0,164	0,004	0,154	0,004	0,155	0,004	0,182	0,005	0,171	0,009
150	0,163	0,004	0,152	0,006	0,157	0,003	0,186	0,006	0,169	0,004

b.3.) Para el Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla b.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,053	0,008		0,382	0,088		3,3

Tabla b.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,172	0,006	0,158	0,002	0,164	0,004	0,155	0,003	0,182	0,016
50	0,169	0,006	0,161	0,003	0,163	0,004	0,152	0,002	0,162	0,006
75	0,167	0,005	0,171	0,002	0,164	0,003	0,155	0,003	0,188	0,006
100	0,169	0,005	0,191	0,004	0,163	0,004	0,158	0,003	0,165	0,004
150	0,167	0,004	0,179	0,002	0,165	0,003	0,159	0,002	0,153	0,004

c.) Disco de Aleación de Aluminio AA1060.

Par Rozantes: Pin Recubierto con la Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂ sobre Disco de Aleación de Aluminio AA1060, Los Radios para el Brazo o Disco serán R_D = 10, 20, y 30 mm.

c.1.) Para Radio de Disco R_D=10 mm.

Tabla c.1.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σRa [μm]	Después	Ra [μm]	σRa [μm]	Huella	e _h [mm]
		0,388	0,061		0,639	0,101		3,4

Tabla c.1.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ	μ	σμ
25	0,093	0,009	0,086	0,010	0,099	0,005	0,102	0,005	0,101	0,008
50	0,077	0,007	0,102	0,006	0,100	0,006	0,097	0,003	0,091	0,007
75	0,097	0,007	0,103	0,006	0,089	0,008	0,085	0,004	0,076	0,003
100	0,103	0,011	0,090	0,009	0,095	0,007	0,089	0,006	0,097	0,004
150	0,105	0,005	0,107	0,008	0,098	0,003	0,058	0,003	0,075	0,005

c.2.) Para Radio de Disco $R_D=20$ mm.

Tabla c.2.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra	σ Ra	Después	Ra	σ Ra	Huella	e_h
		[μ m]	[μ m]		[μ m]	[μ m]		[mm]
		0,388	0,061		0,721	0,065		3,5

Tabla c.2.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,089	0,007	0,081	0,006	0,088	0,006	0,098	0,005	0,102	0,006
50	0,084	0,006	0,085	0,005	0,081	0,005	0,102	0,007	0,083	0,007
75	0,090	0,004	0,089	0,005	0,081	0,003	0,086	0,003	0,097	0,005
100	0,084	0,005	0,092	0,005	0,097	0,003	0,086	0,004	0,094	0,006
150	0,070	0,005	0,090	0,003	0,085	0,003	0,091	0,004	0,078	0,006

c.3.) Para Radio de Disco $R_D=30$ mm.

Tabla c.3.A. Rugosidad del Disco medida Antes y Después del Ensayo y el Espesor de la Huella dejada por el Par Rozantes.

Disco	Antes	Ra [μm]	σ Ra [μm]	Después	Ra [μm]	σ Ra [μm]	Huella	e_h [mm]
		0,388	0,061		0,538	0,092		2,7

Tabla c.3.B. Coeficiente de Rozamientos del Par Rozantes.

n [RPM]	W [N]									
	5		10		15		20		30	
	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$	μ	$\sigma\mu$
25	0,077	0,006	0,091	0,006	0,096	0,005	0,106	0,007	0,119	0,012
50	0,064	0,006	0,077	0,006	0,105	0,006	0,102	0,008	0,109	0,006
75	0,072	0,004	0,084	0,005	0,101	0,004	0,095	0,004	0,097	0,004
100	0,079	0,006	0,081	0,003	0,089	0,002	0,092	0,004	0,099	0,005
150	0,079	0,002	0,090	0,003	0,083	0,003	0,092	0,005	0,100	0,003

Tabla A.4.2.5. Indicador Coeficiente de Rozamiento Límite (μ_{10}) para cada Recubrimiento.

Pin	Disco	Función $\mu_{10}=f(\text{Pa})$ para $V=0,026 \text{ m/s}$	$\mu_{10}=f(\text{Pa})$ para $P_{am}=1,359 \text{ MPa}$
40%WC/60%Ni	Acero DC01	$\mu_{10}=-0,0698\text{Pa}^2+0,1681\text{Pa}+0,232$	0,12
	Acero Inoxidable AISI 304	$\mu_{10}=0,1556e^{0,4233\text{Pa}}$	0,22
	Aluminio AA1060	$\mu_{10}=-0,057\text{Pa}^2+0,0,1211\text{Pa}+0,0468$	0,12
30%WC/70%Ni	Acero DC01	$\mu_{10}=0,1034\text{Pa}^{0,1915}$	0,11
	Acero Inoxidable AISI 304	$\mu_{10}=0,1353e^{0,1818\text{Pa}}$	0,18
	Aluminio AA1060	$\mu_{10}=-0,0342\text{Pa}^2+0,0367\text{Pa}+0,1103$	0,12
87%Al ₂ O ₃ /13%TiO ₂	Acero DC01	$\mu_{10}=-0,018\text{Pa}+0,1765$	0,15
	Acero Inoxidable AISI 304	$\mu_{10}=0,0594\text{Pa}^2-0,0491\text{Pa}+0,1512$	0,20
	Aluminio AA1060	$\mu_{10}=-0,031\text{Pa}+0,1293$	0,12
97%Al ₂ O ₃ /3%TiO ₂	Acero DC01	$\mu_{10}=0,0311\text{Pa}^2-0,06351\text{Pa}+0,168$	0,15
	Acero Inoxidable AISI 304	$\mu_{10}=0,0593\text{Pa}^2-0,0488\text{Pa}+0,151$	0,20
	Aluminio AA1060	$\mu_{10}=0,087 e^{0,125\text{Pa}}$	0,11

μ_{10} =Coeficiente de Rozamiento Límite (μ_{10}), V=Velocidad de Deslizamiento, Pam=Presión Aparente Máxima.

Procedimiento para la determinación del indicador coeficiente de rozamiento límite “ μ_{l0} ”: 1.) Se gráfica considerando el número de revoluciones $n = 25 \text{ RPM} = \text{constante}$, es decir la velocidad lineal mínima $V=2\pi nR_D = 0,026 \text{ m/s} = \text{constante}$, cuando varía de forma creciente la carga normal aplicada (peso) $W = N = 5, 10, 15, 20, 30 \text{ N}$, se escogen la presión aparente ($Pa = W/A_p$) versus el coeficiente de rozamiento μ , figura A.1, donde A_p es el área del pin. 2.) Luego a través de la curva correlacionada usando regresión polinómica, para el disco de acero DC01 y el pin recubierto con la aleación 40%WC/60%Ni, se toma el valor del coeficiente de rozamiento límite “ μ_{l0} ” en el eje de las ordenadas para la presión aparente máximo $P_{am} = 1,359 \text{ MPa}$ en el eje de las abscisas, se ha señalado el punto en la figura A.1. con un círculo en trazos discontinuos de color rojo.

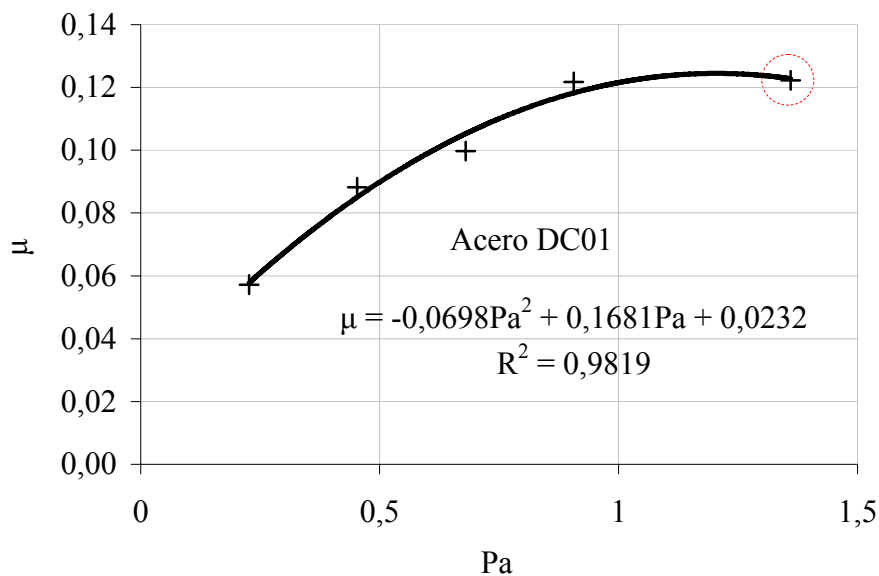


Figura A.1. Ecuación Correlacionada del Indicador Coeficiente de Rozamiento Límite (μ_{l0}) para cada Disco de Acero DC01, Recubrimiento 40%WC/60%Ni.

A.4.3. Experimentos de Metalografía, Fractografía y Microanálisis.

A través de los experimentos de metalografía, fractografía y microanálisis se estudió la adhesión en las probetas recubiertas con proyección térmica por llama con las aleaciones: 40% WC/60% Ni, 30% WC/70% Ni, 87% Al₂O₃/13% TiO₂ y 97% Al₂O₃/3% TiO₂, para la medida de la adherencia por ensayo de cizalladura. Empleando la metalografía con aumento de 10x (macroscopía óptica) se examinaron las probetas recubiertas antes de realizarse el ensayo de cizalladura en conjunto con la técnica de emisión acústica y después de efectuado el ensayo en conjunto nuevamente se examinaron las probetas con aumento de 10x (macroscopía óptica, Capítulo IV, puntos 4.1.1.1, 4.1.2 y 4.1.3.2.1) y 400x (microscopía óptica, Capítulo IV, puntos 4.1.1.2 y 4.1.3.2.2). Seguidamente se presenta el material complementario de microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando el microscopio electrónico con incorporación de espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS) y usando el software el INCA Microanalysis Suite para observar la imagen del microscopio y procesar los datos adquirido del microanálisis EDS. El microanálisis de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) con los detectores de imágenes de electrones secundarios y a los aumentos de: 20x, 50x, 400x, 2000x, para imágenes y realización de espectros puntuales a muestras extraídas de la probeta recubierta de cizalladura y si atacar con reactivo, se hizo hincapié en el proceso de fractura y los mecanismos de difusión presentes, Capítulo IV, punto 4.4.

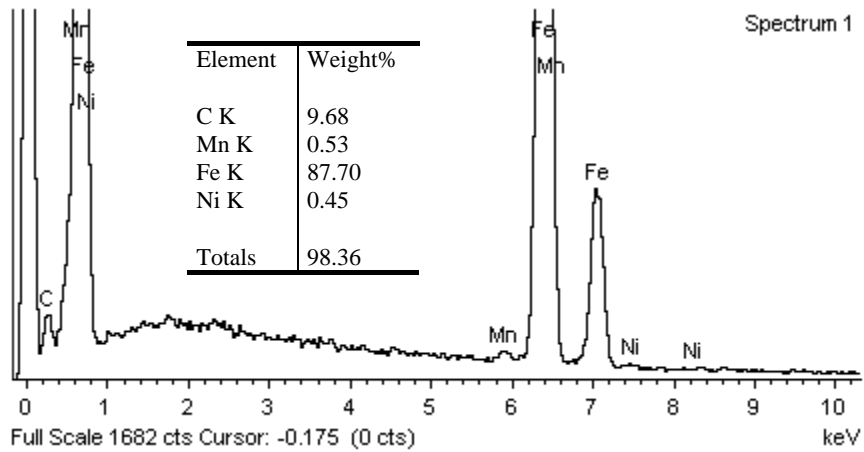
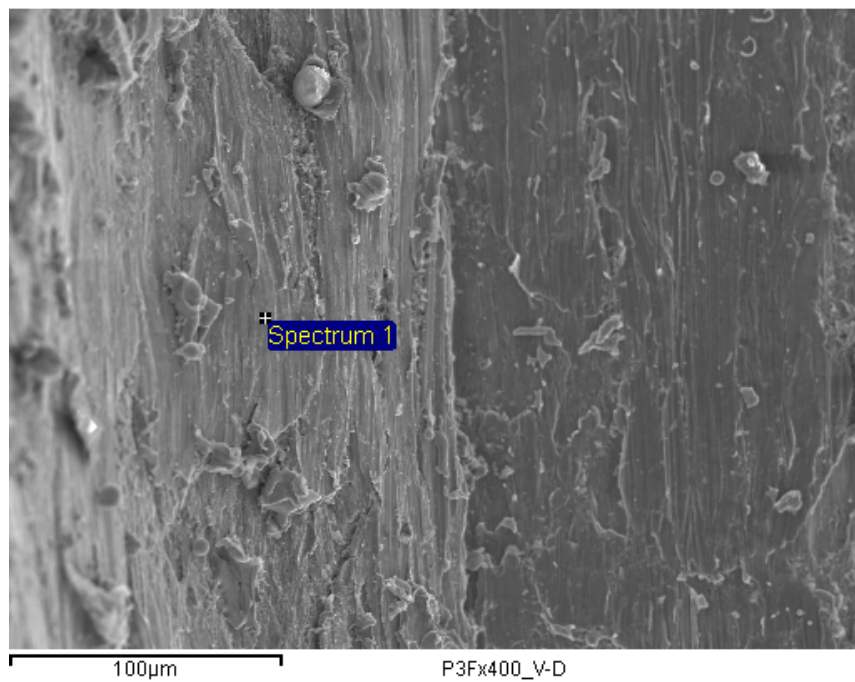


Figura A.2. Probeta P3F, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 1.

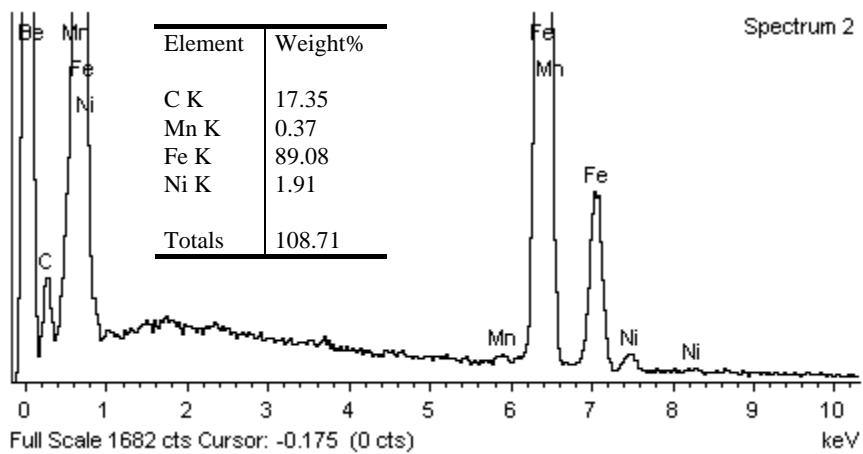
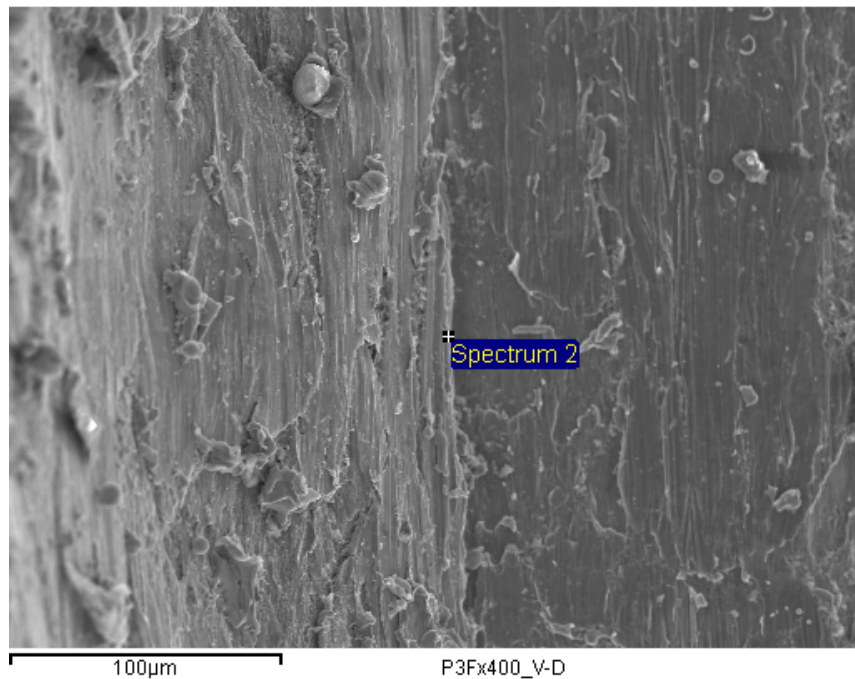


Figura A.3. Probeta P3F, Aleación 40% WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 2.

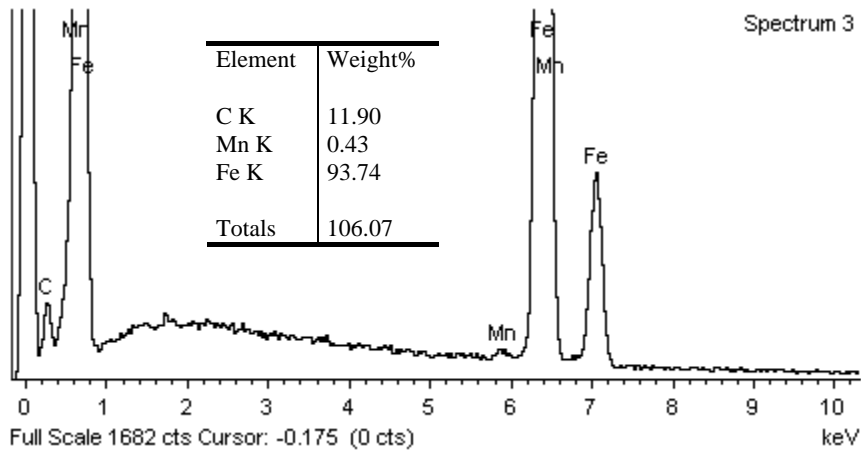
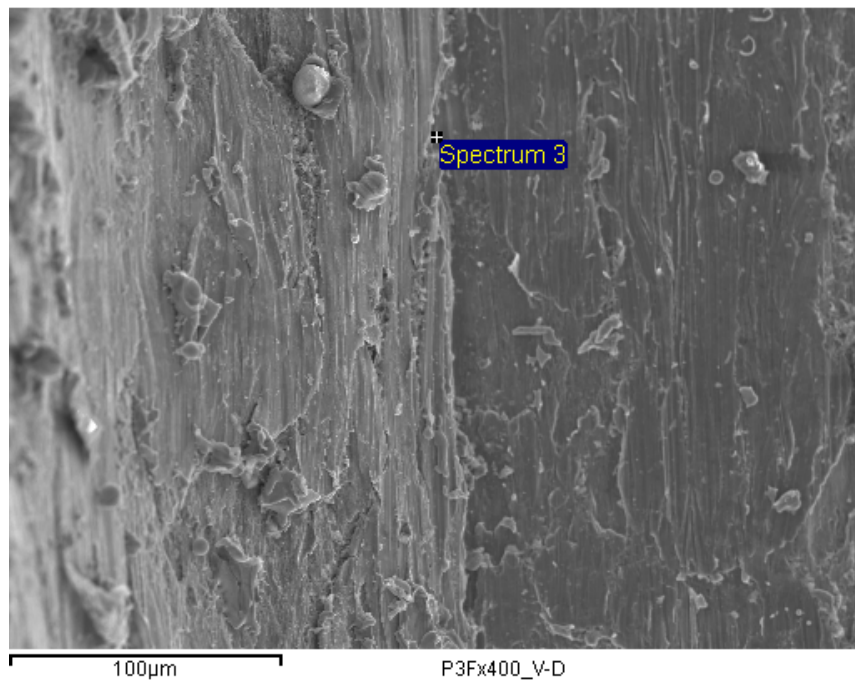


Figura A.4. Probeta P3F, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 3.

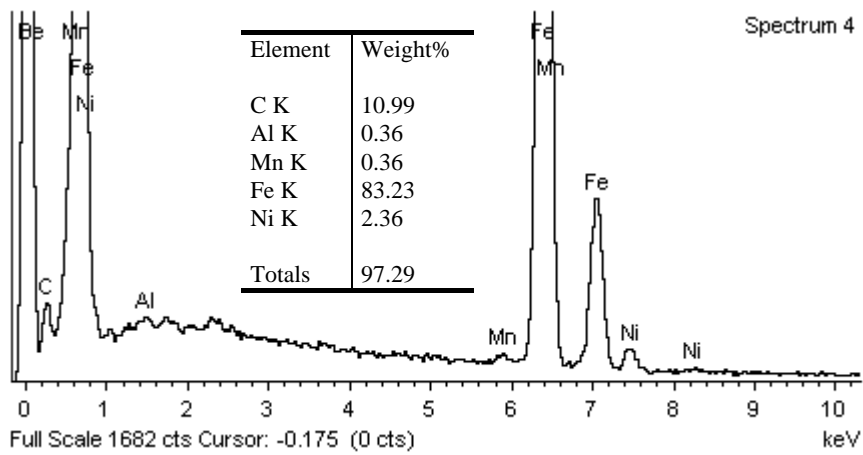
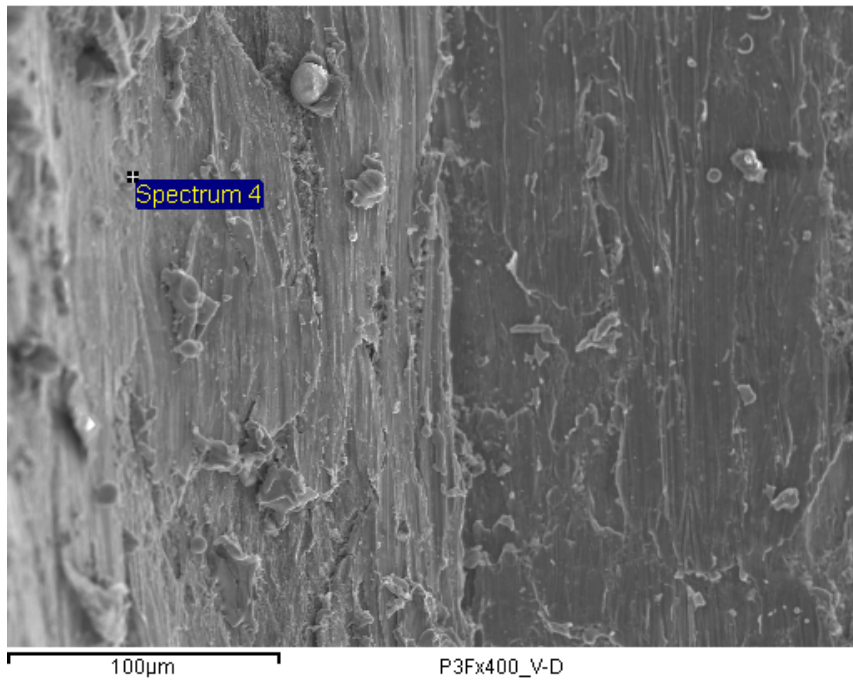


Figura A.5. Probeta P3F, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 4.

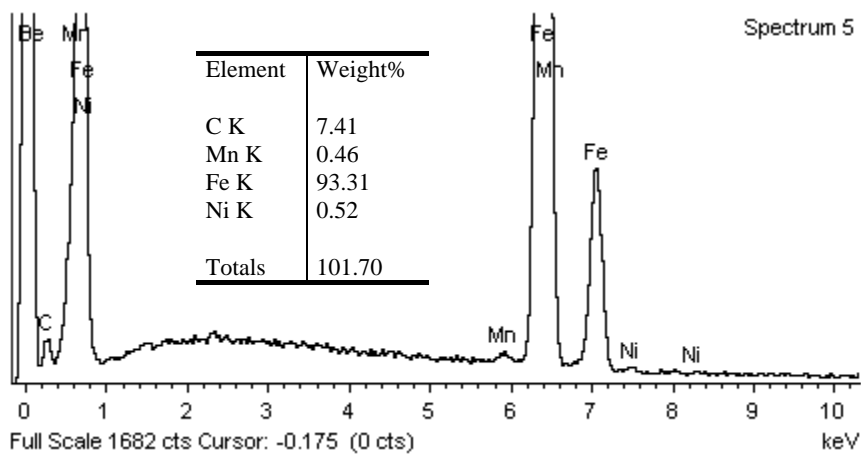
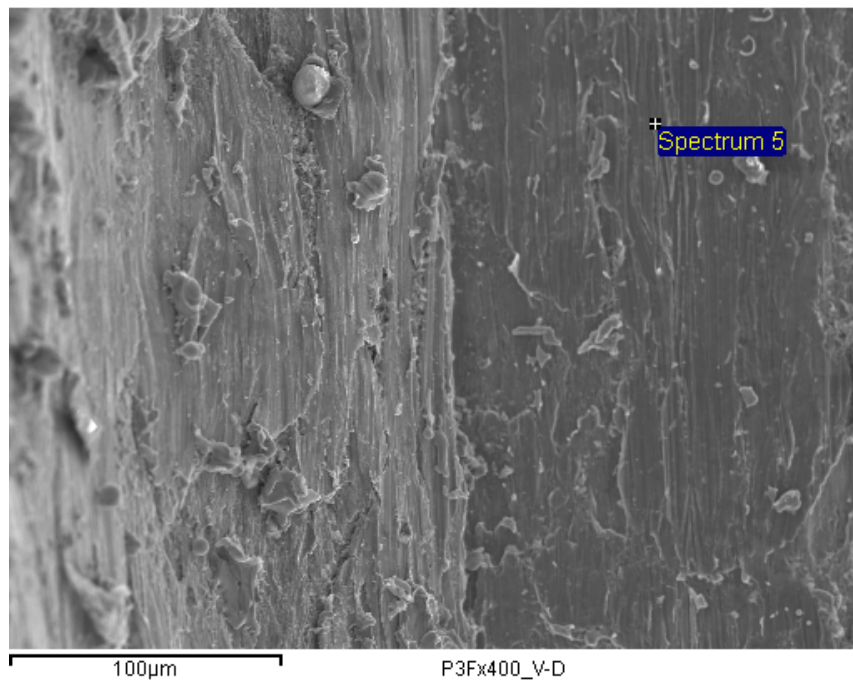


Figura A.6. Probeta P3F, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 5.

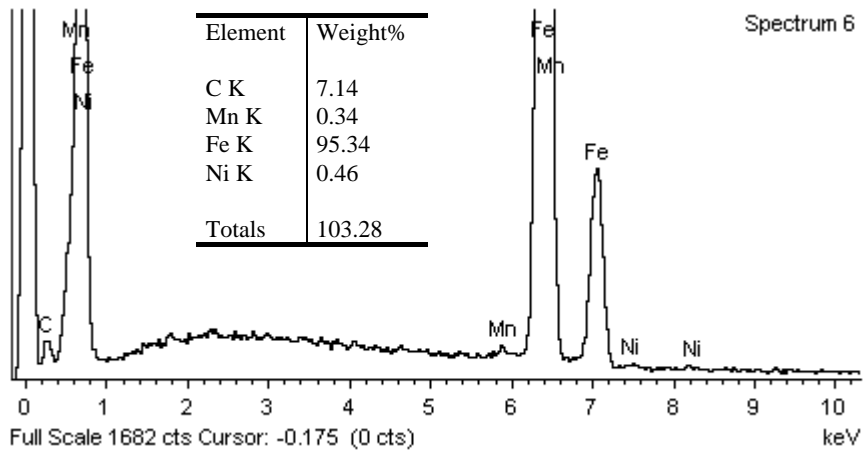
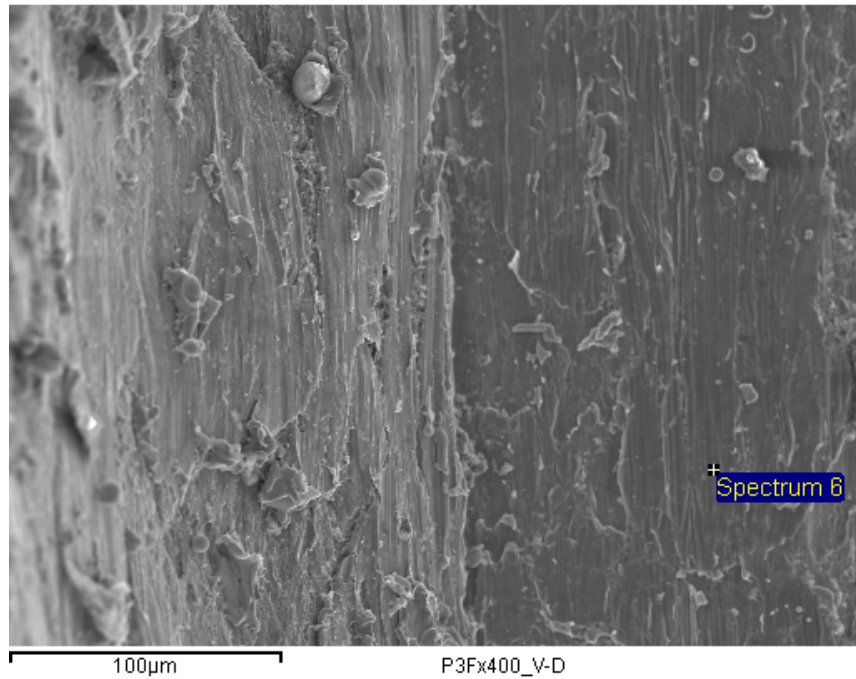


Figura A.7. Probeta P3F, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 6.

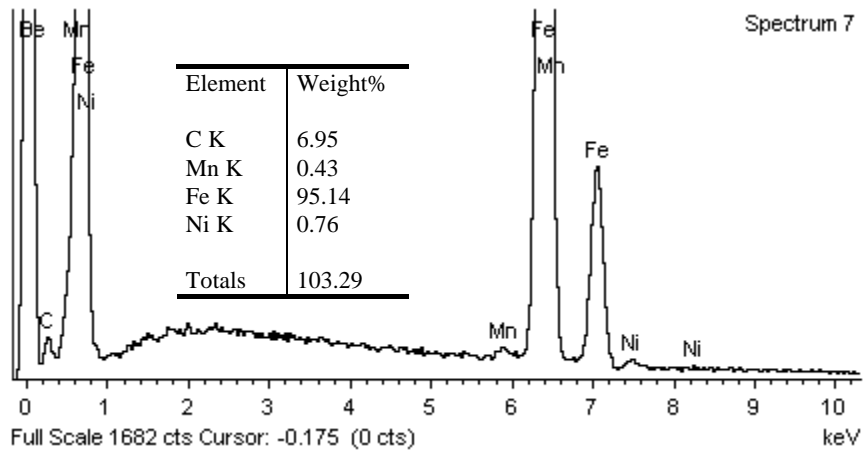
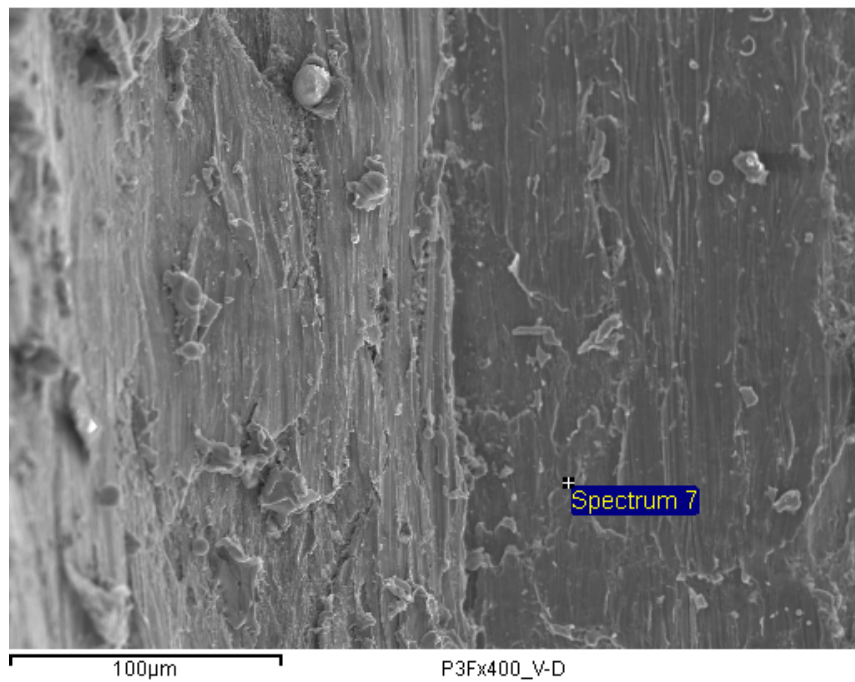


Figura A.8. Probeta P3F, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 7.

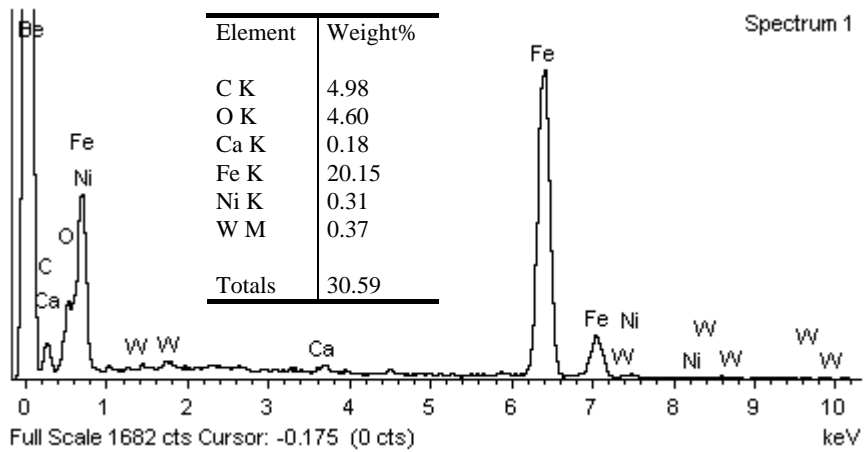
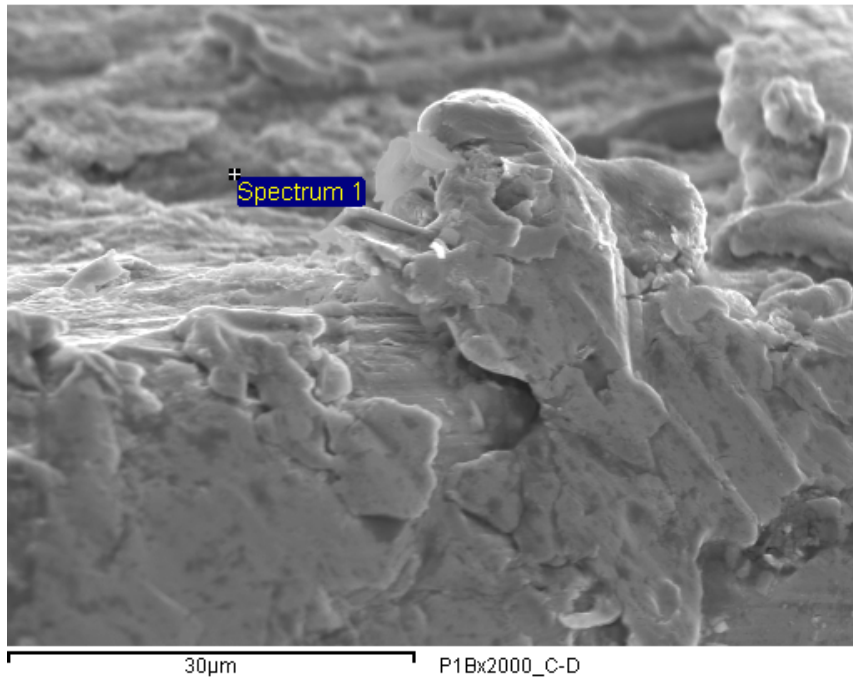


Figura A.9. Probeta P1B, Aleación 40% WC/60%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 1.

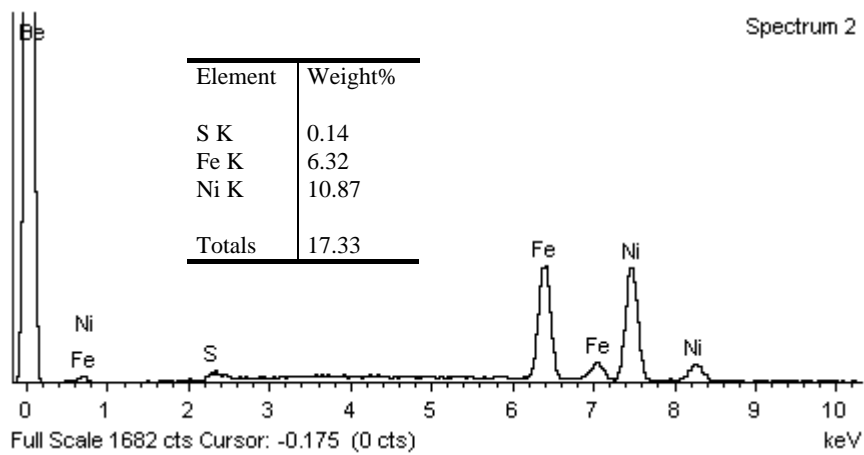
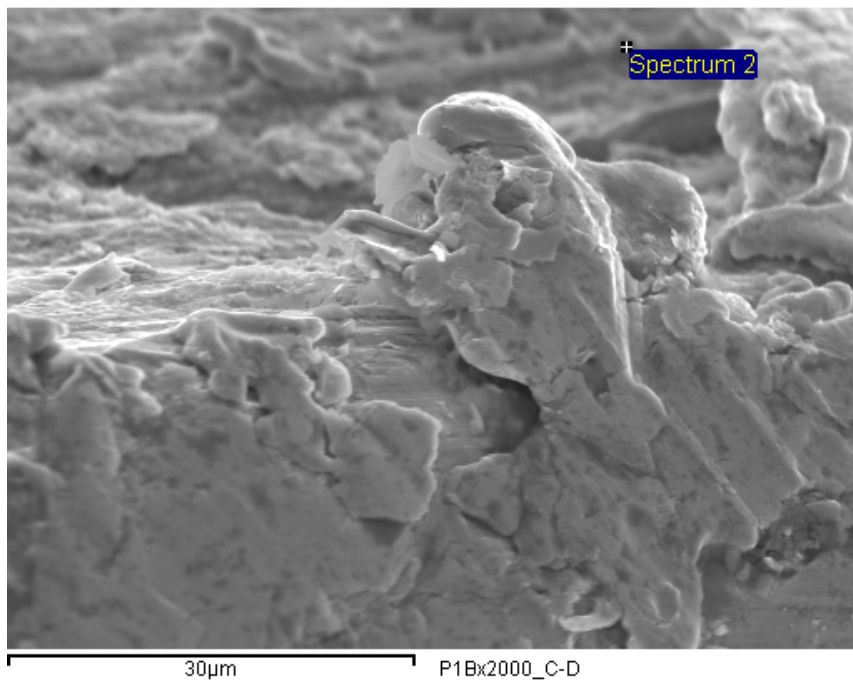


Figura A.10. Probeta P1B, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 2.

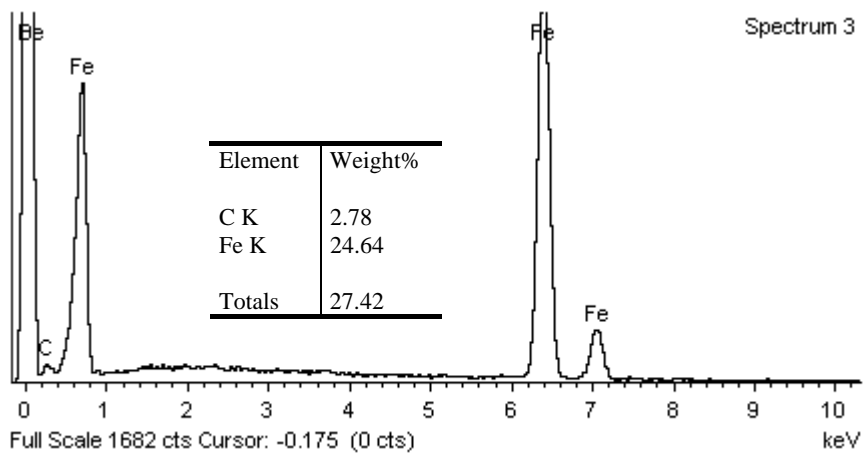
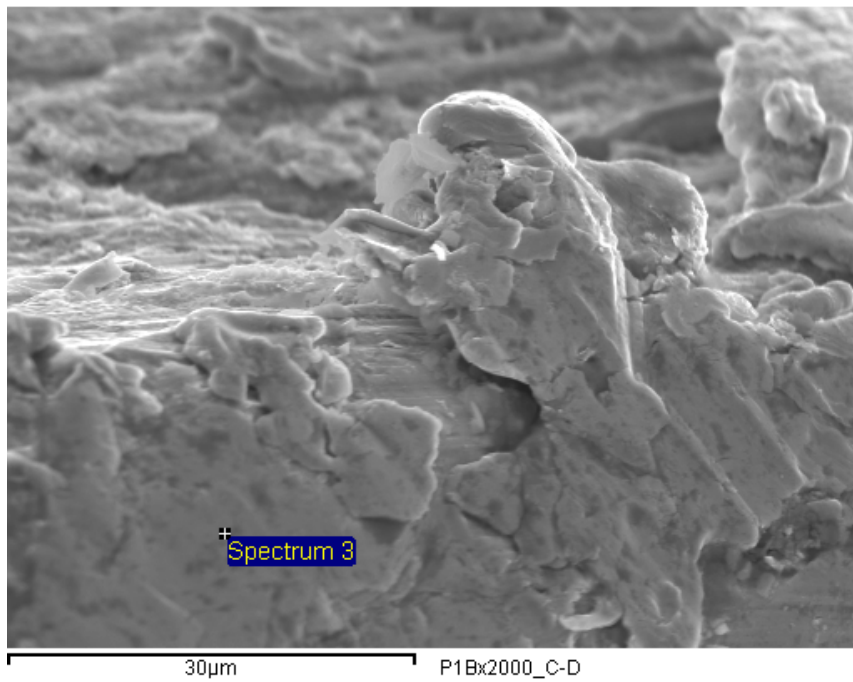


Figura A.11. Probeta P1B, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 3.

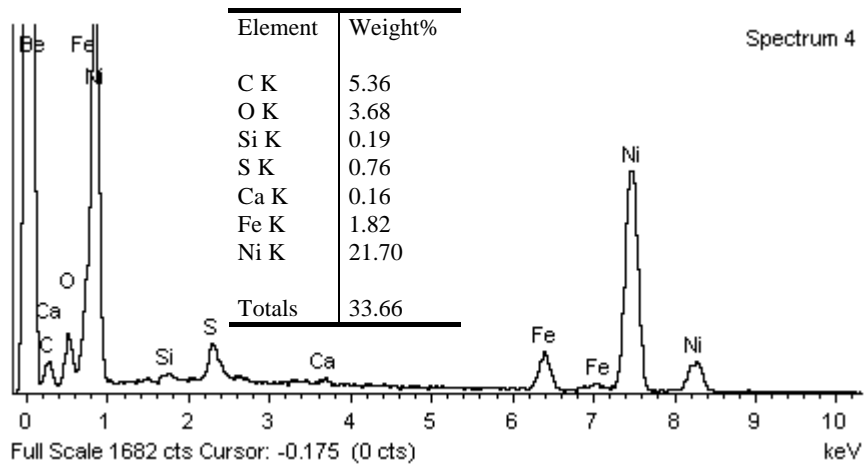
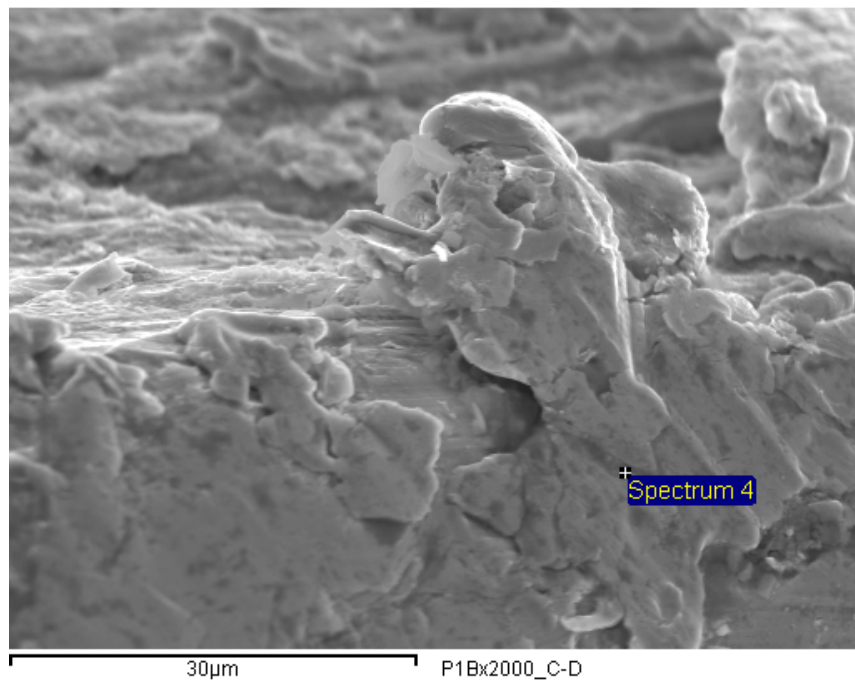


Figura A.12. Probeta P1B, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 4.

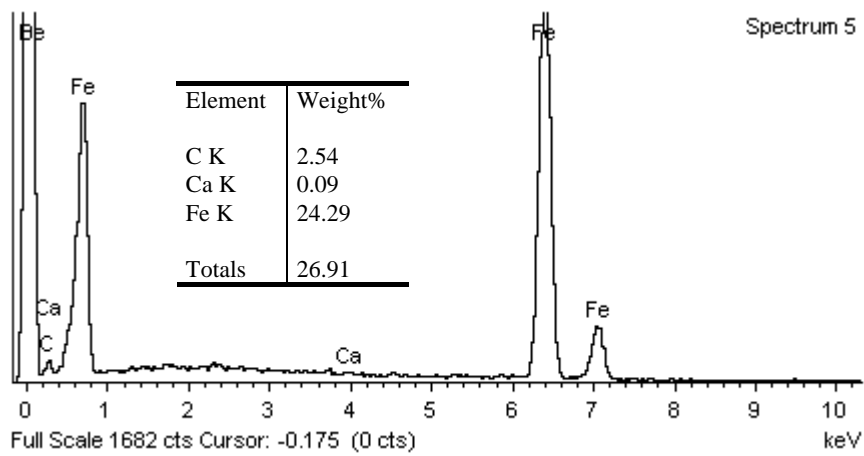
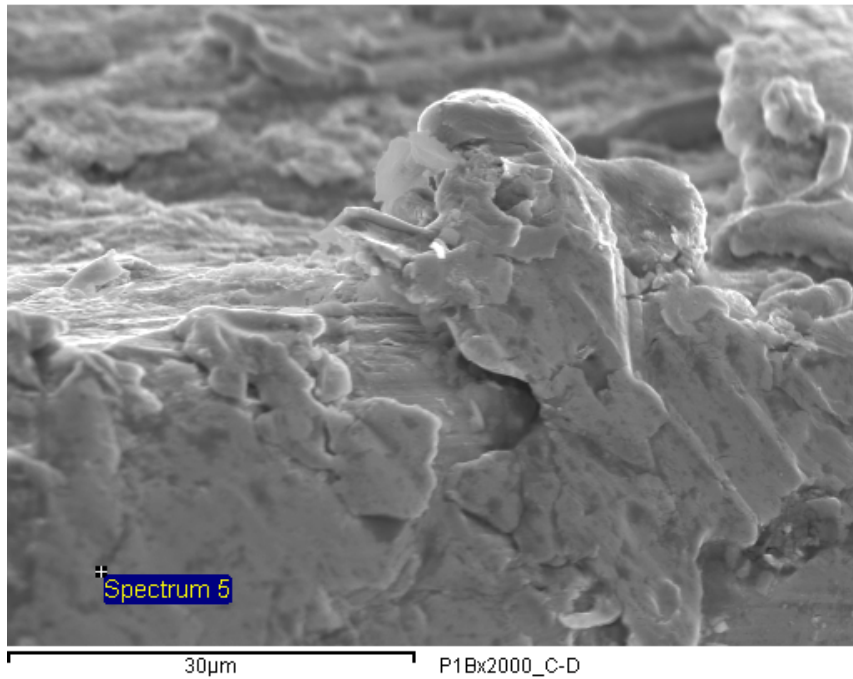


Figura A.13. Probeta P1B, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 5.

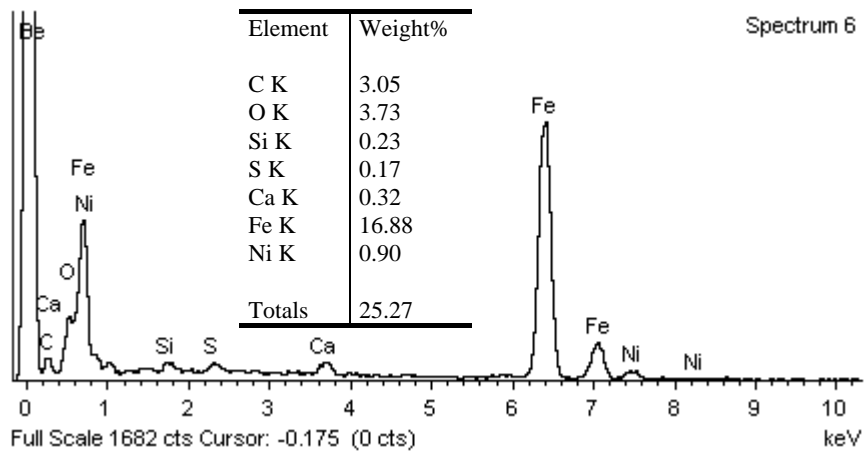
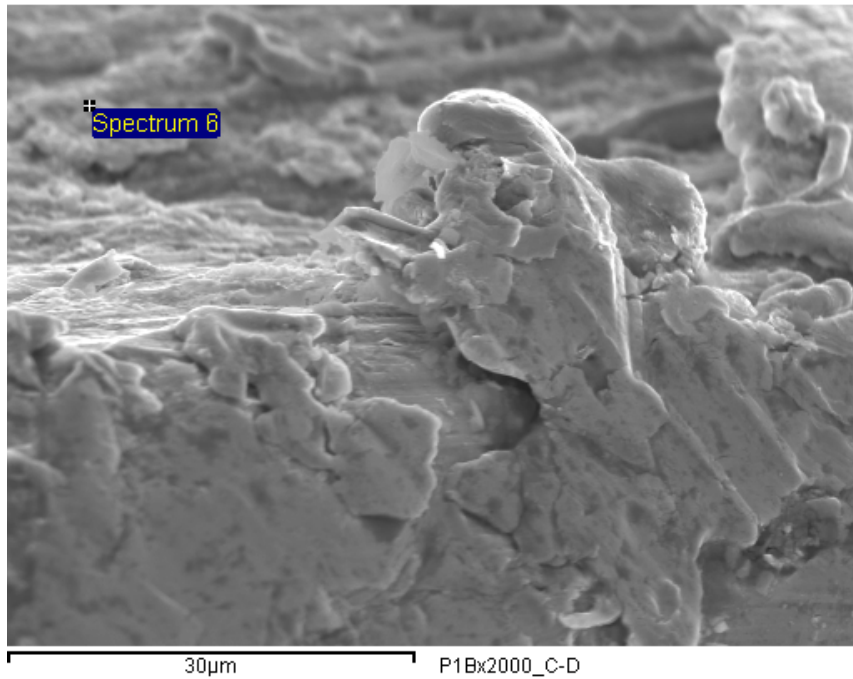


Figura A.14. Probeta P1B, Aleación 40%WC/60%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 6.

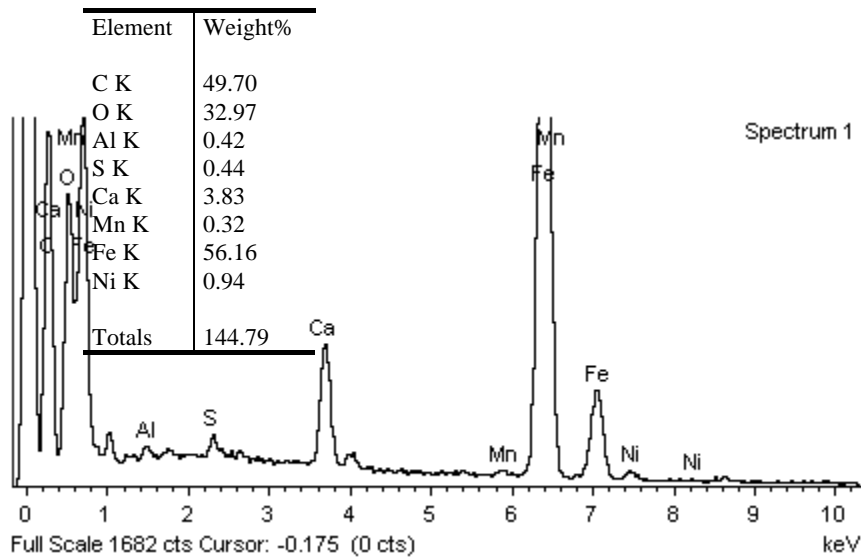
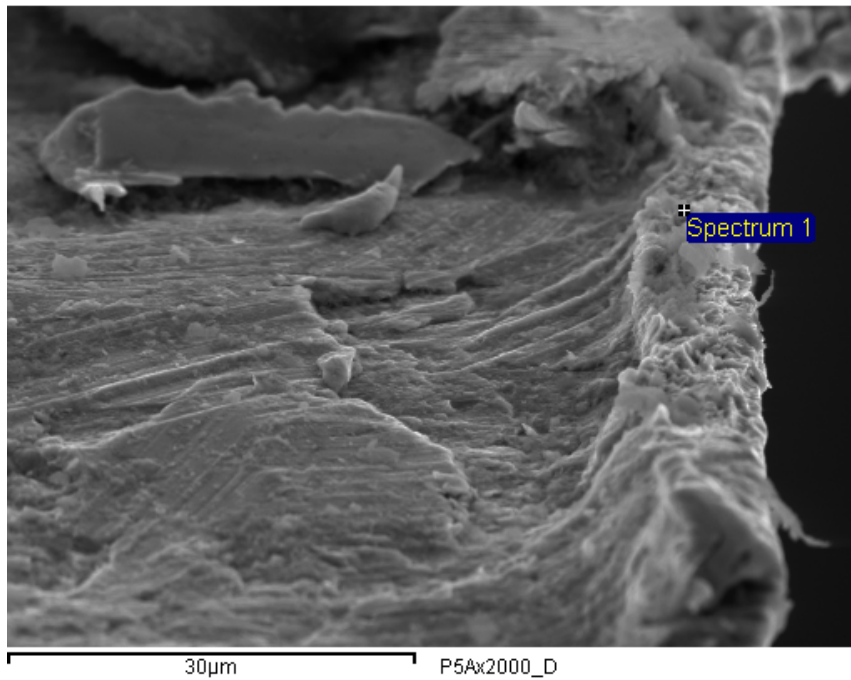


Figura A.15. Probeta P5A, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 1.

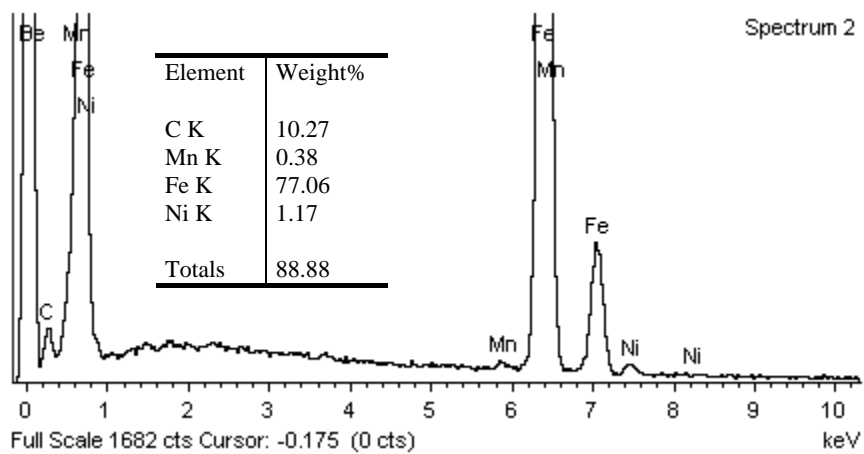
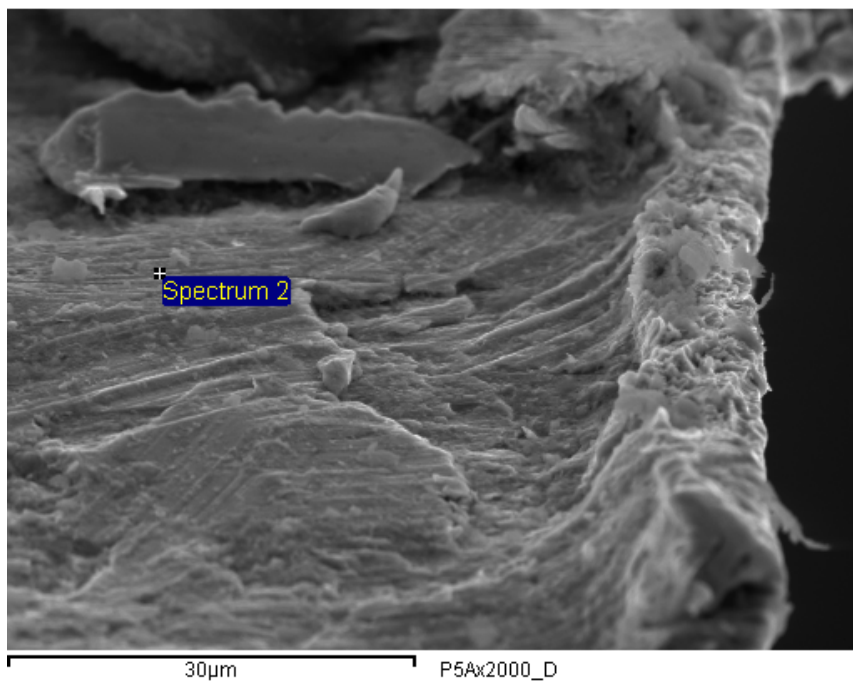


Figura A.16. Probeta P5A, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 2.

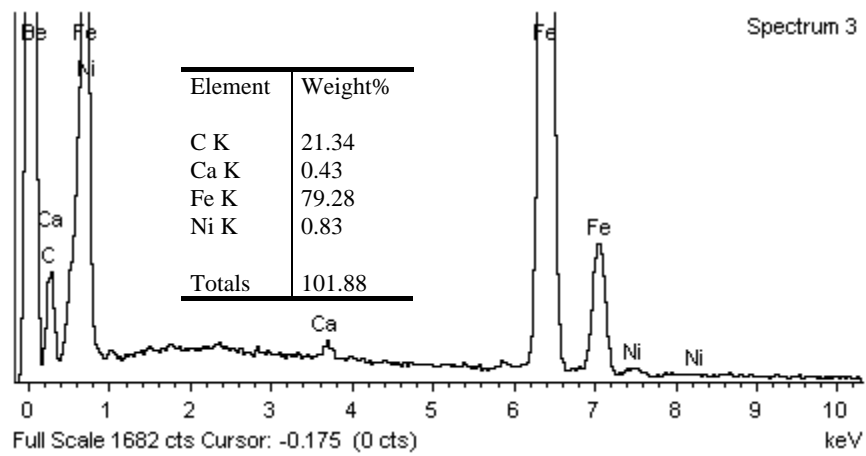
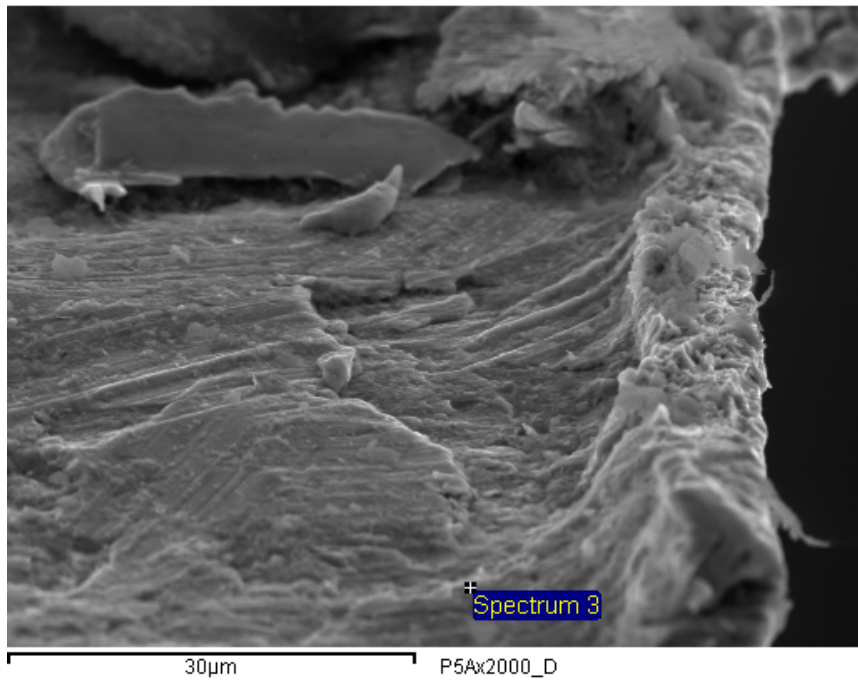


Figura A.17. Probeta P5A, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 3.

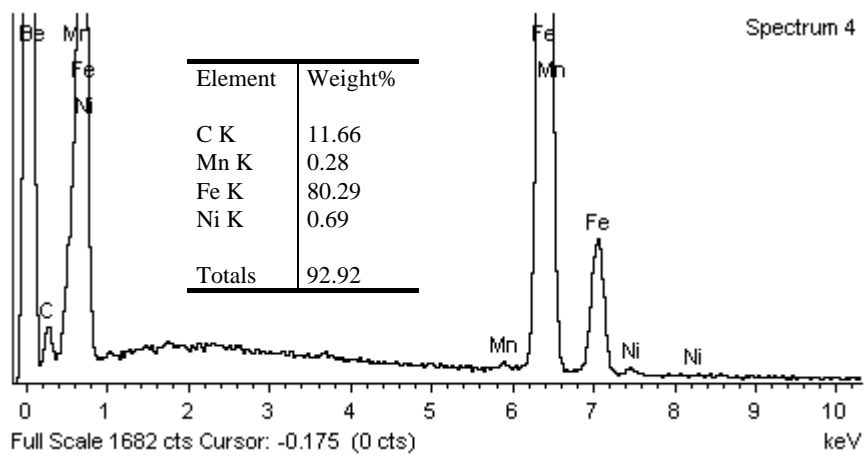
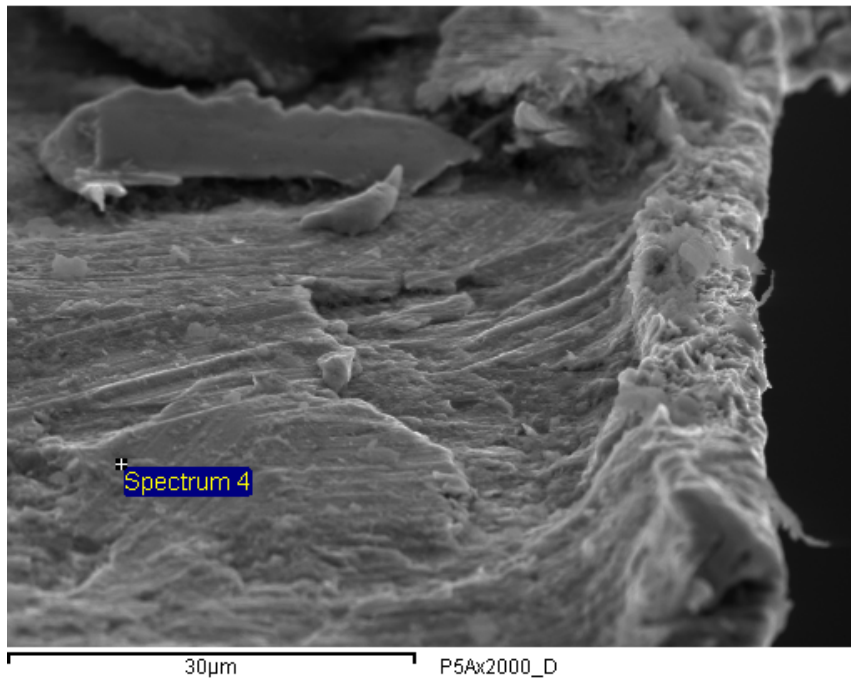


Figura A.18. Probeta P5A, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 4.

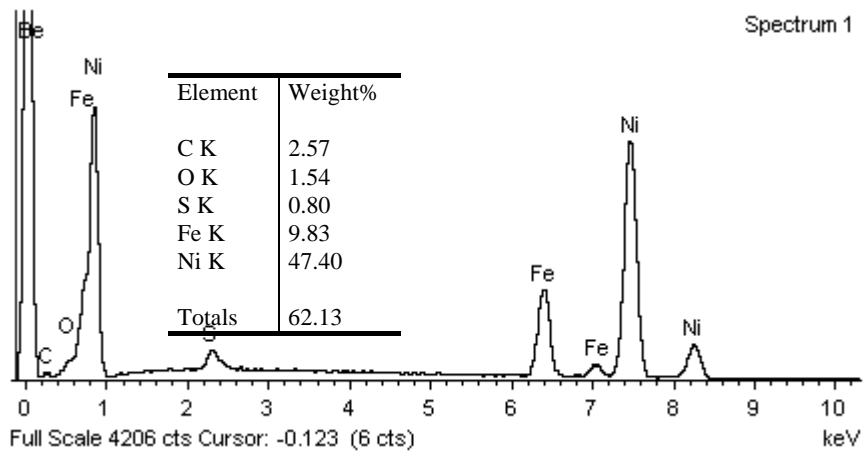
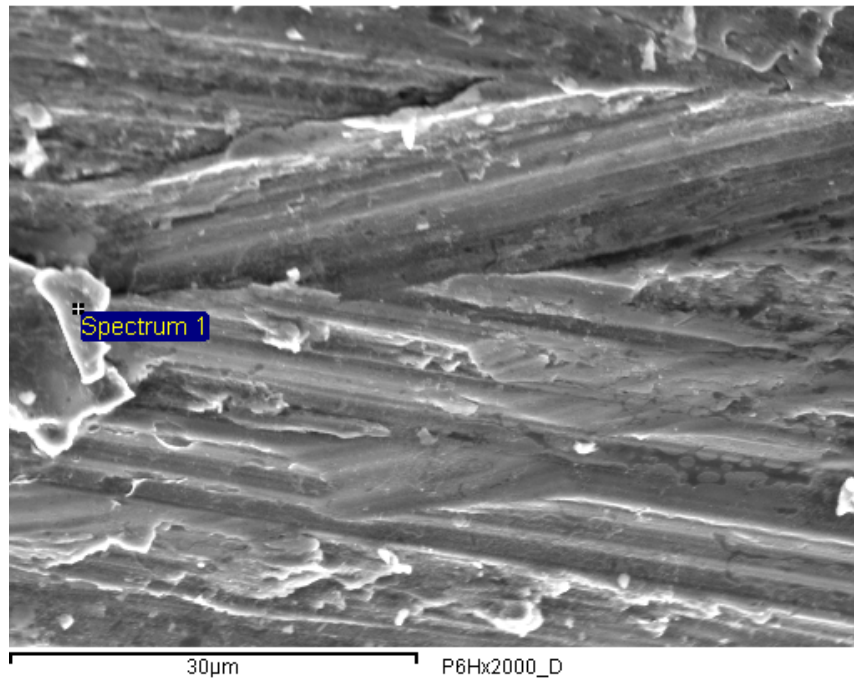


Figura A.19. Probeta P6H, Aleación 30% WC/70% Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 1.

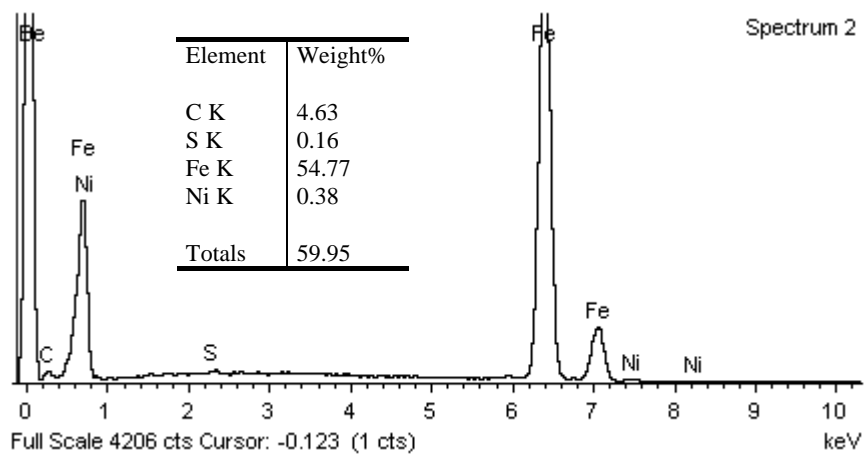
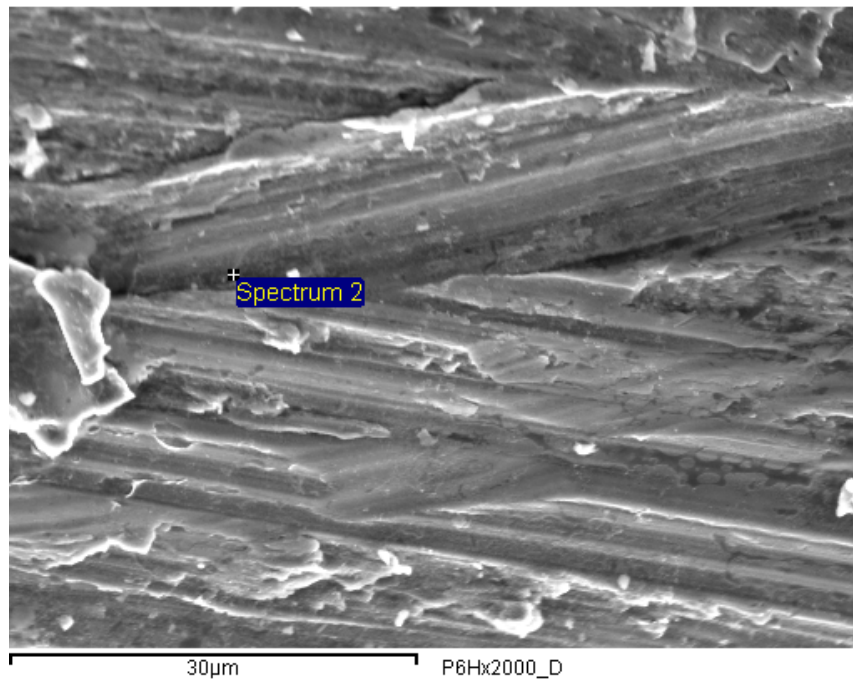


Figura A.20. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 2.

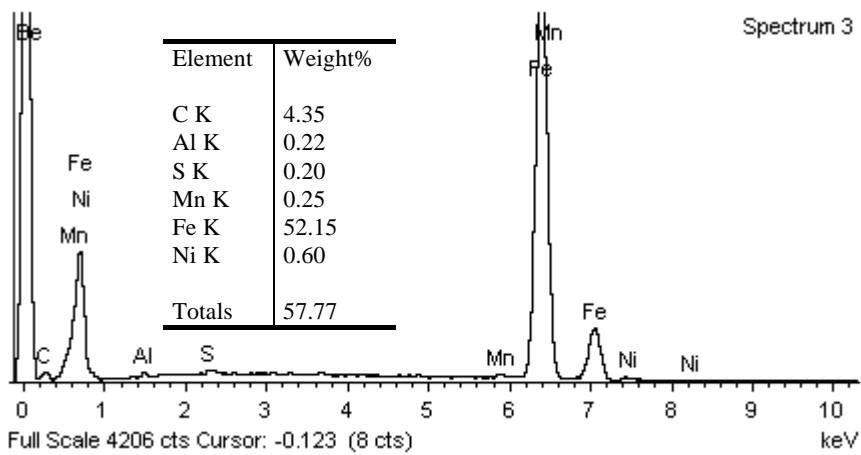
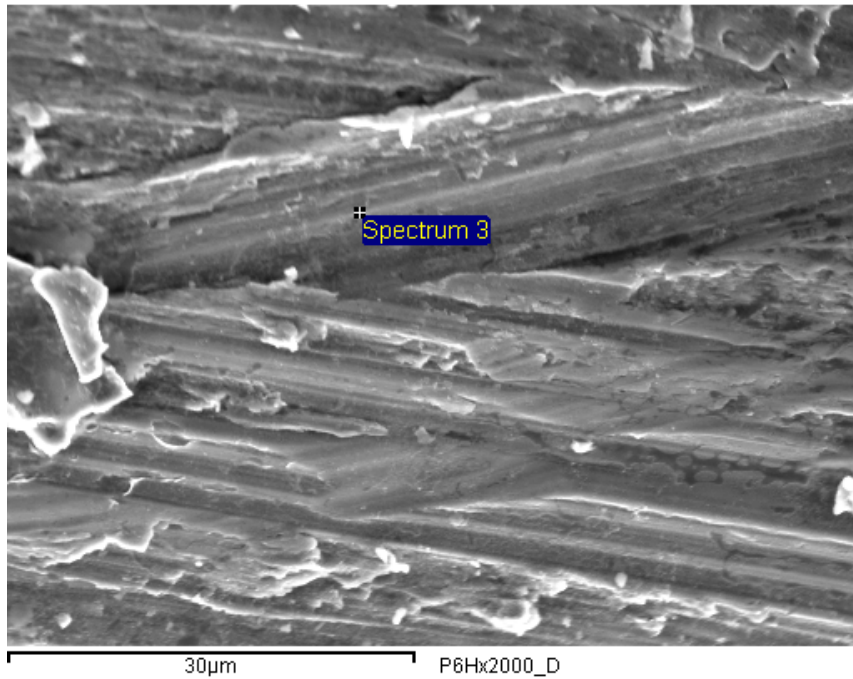


Figura A.21. Probeta P6H, Aleación 30% WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 3.

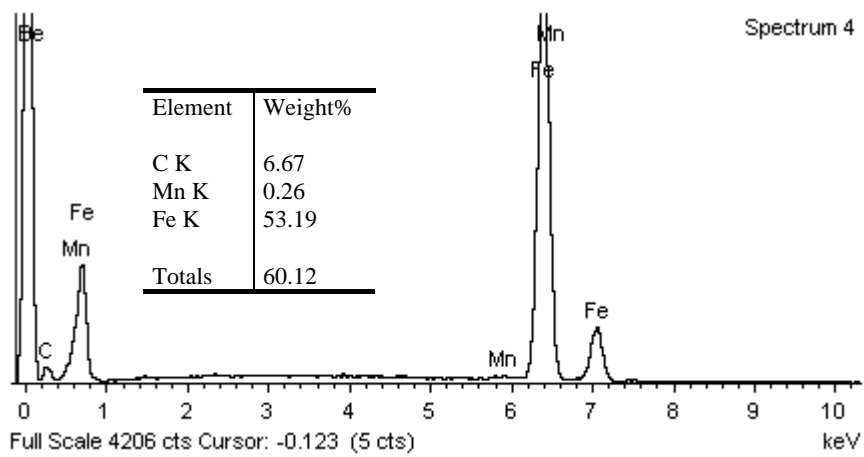
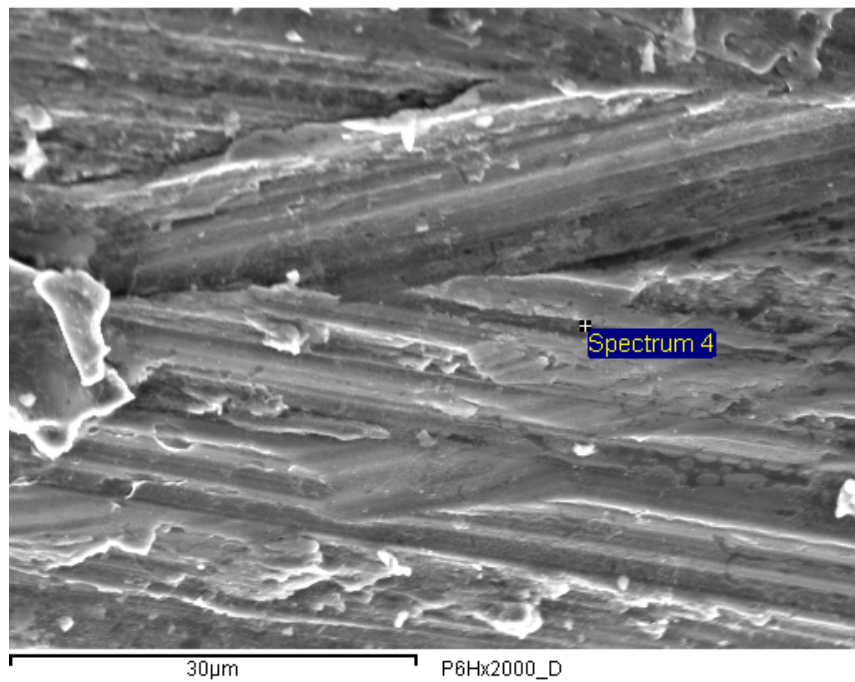


Figura A.22. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 4.

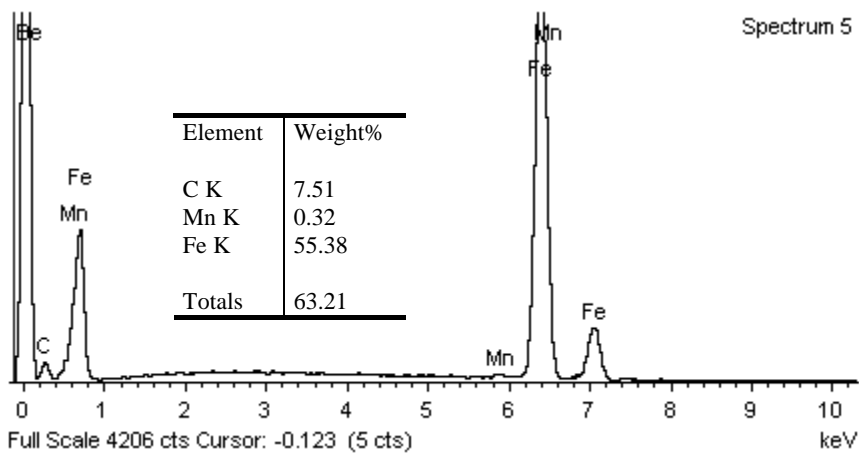
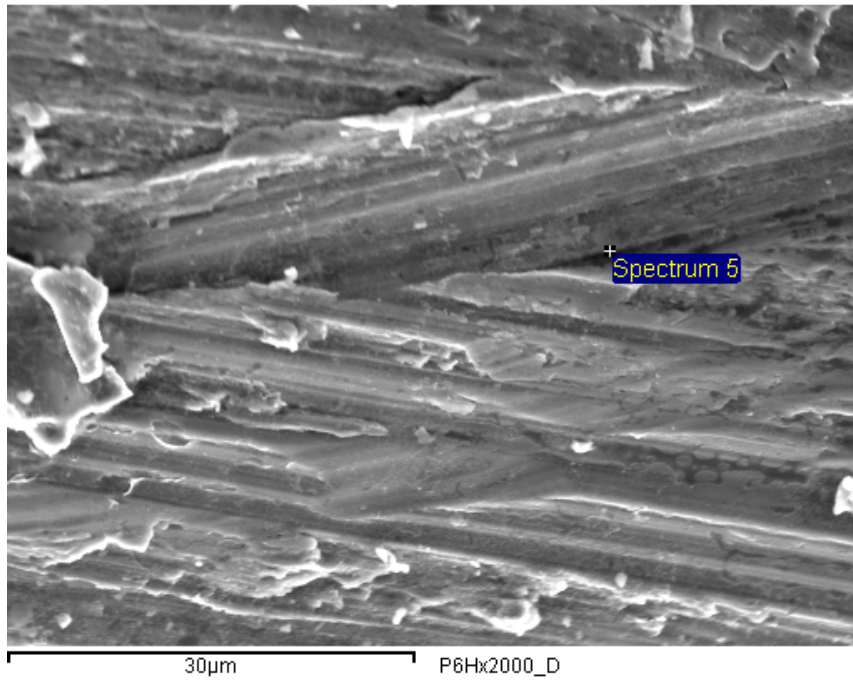


Figura A.23. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 5.

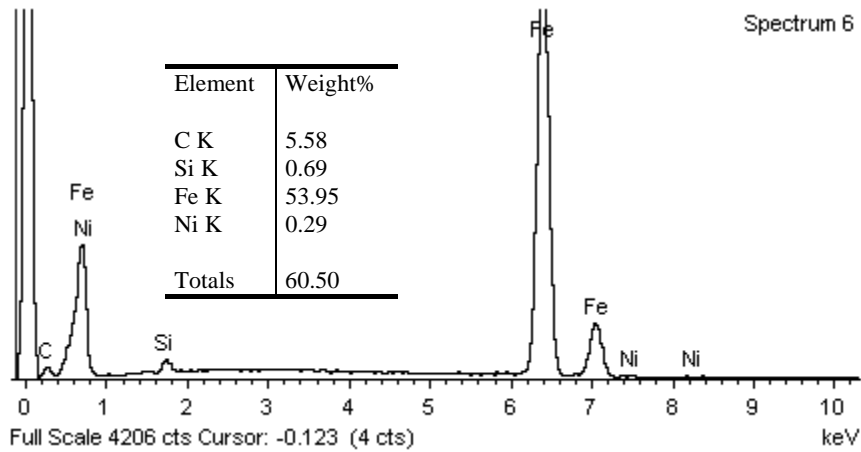
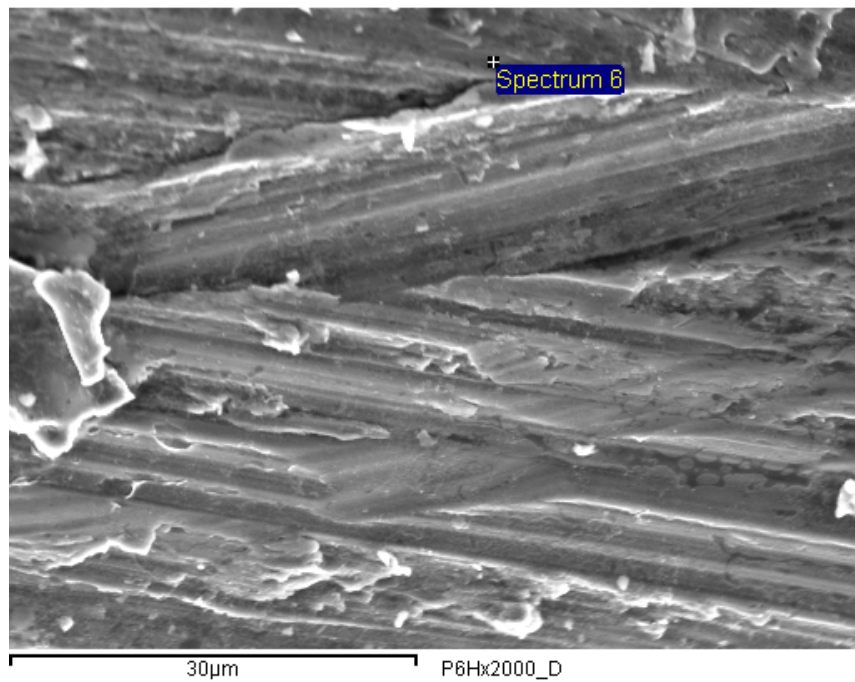


Figura A.24. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Diagonal de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 6.

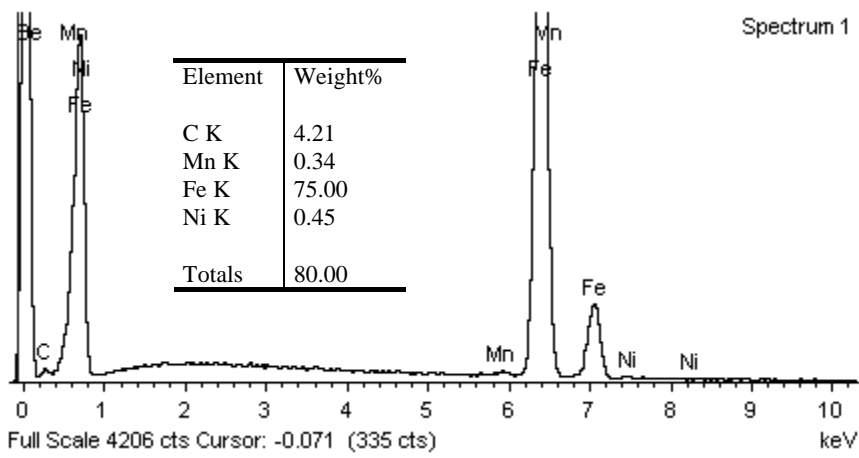
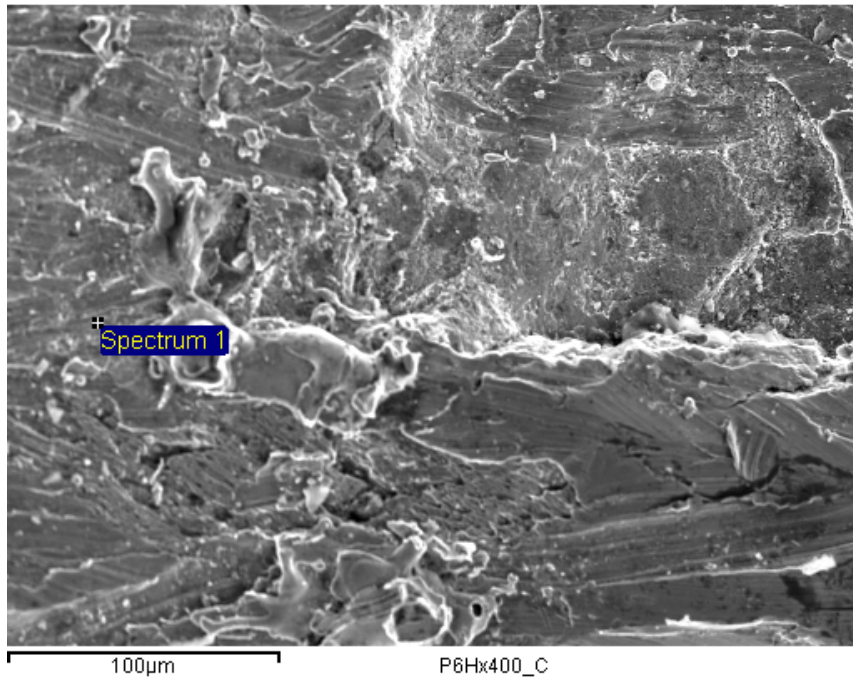


Figura A.25. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Cresta de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 1.

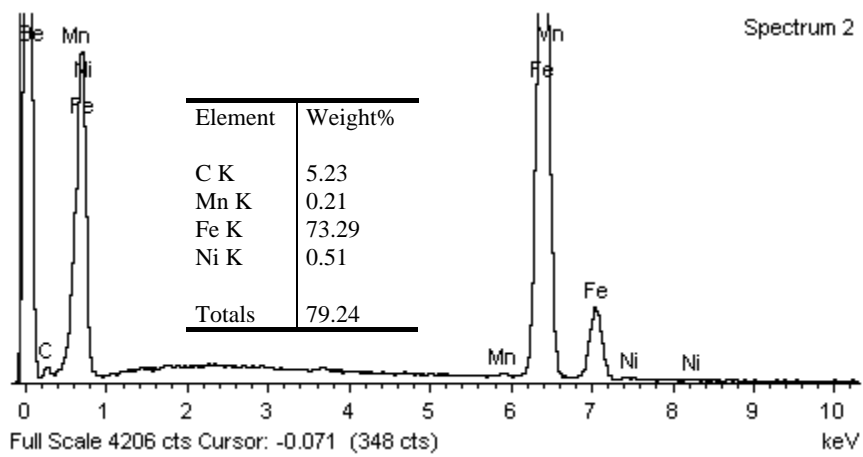
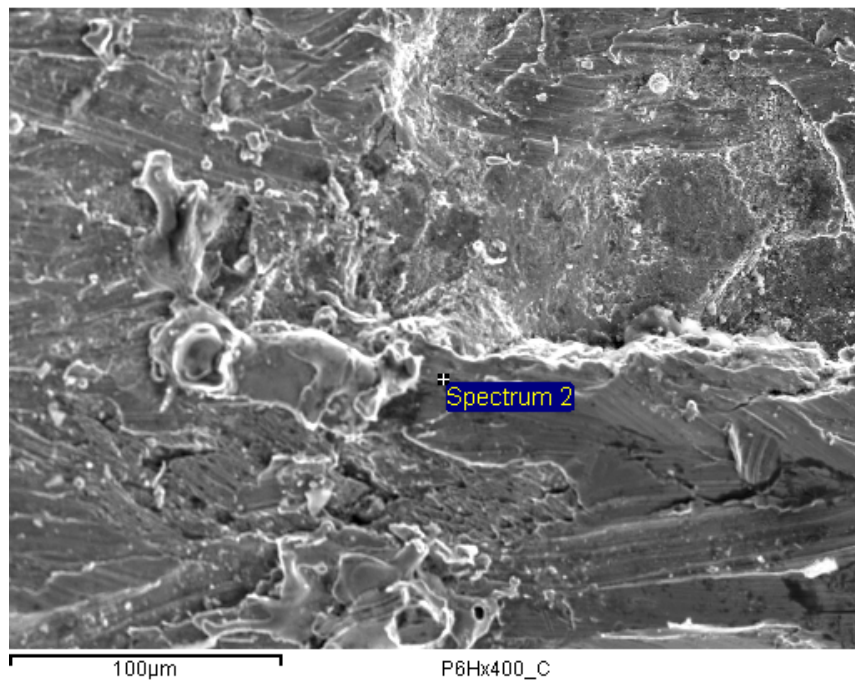


Figura A.26. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Cresta de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 2.

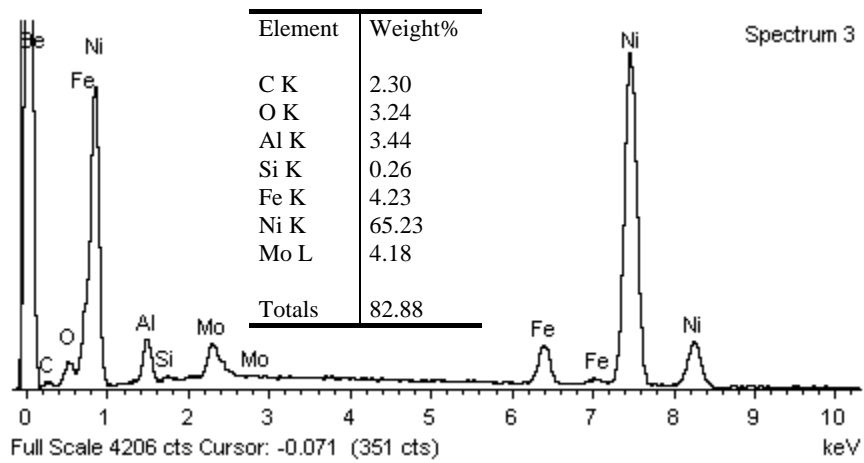
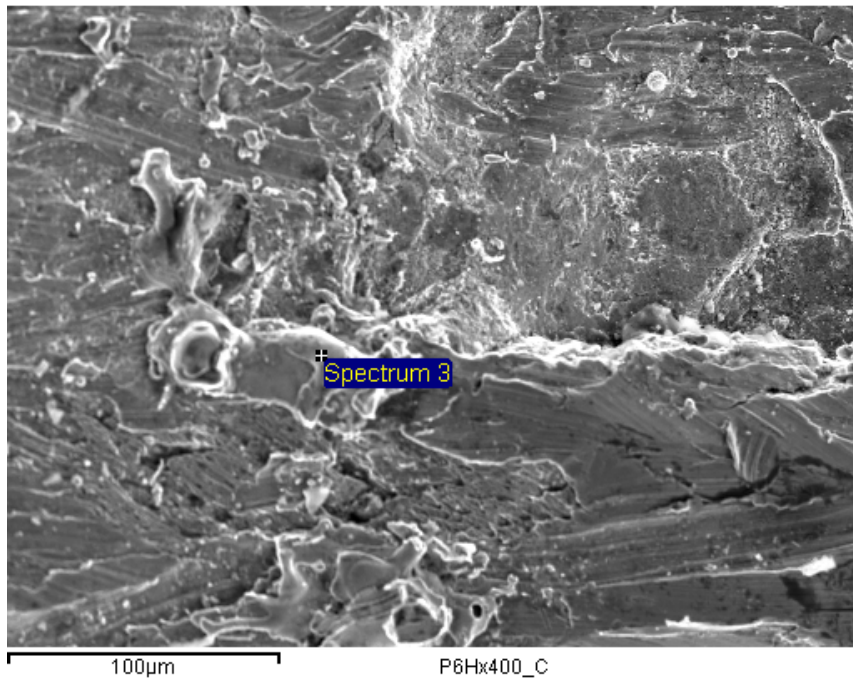


Figura A.27. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Cresta de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 3.

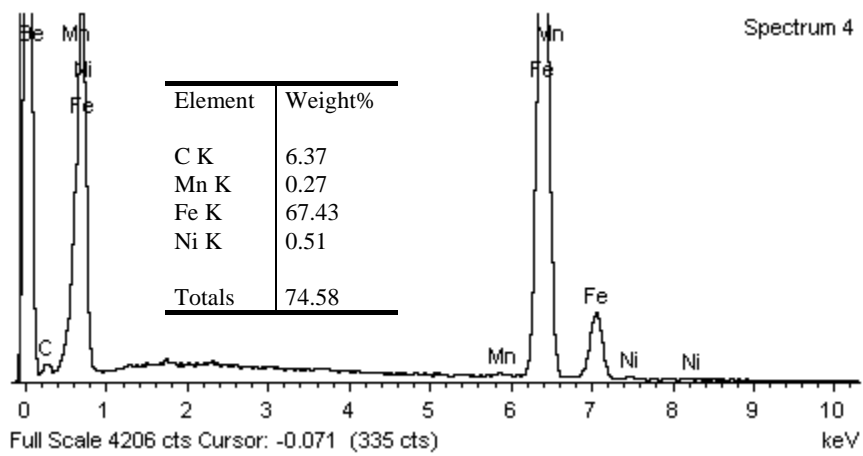
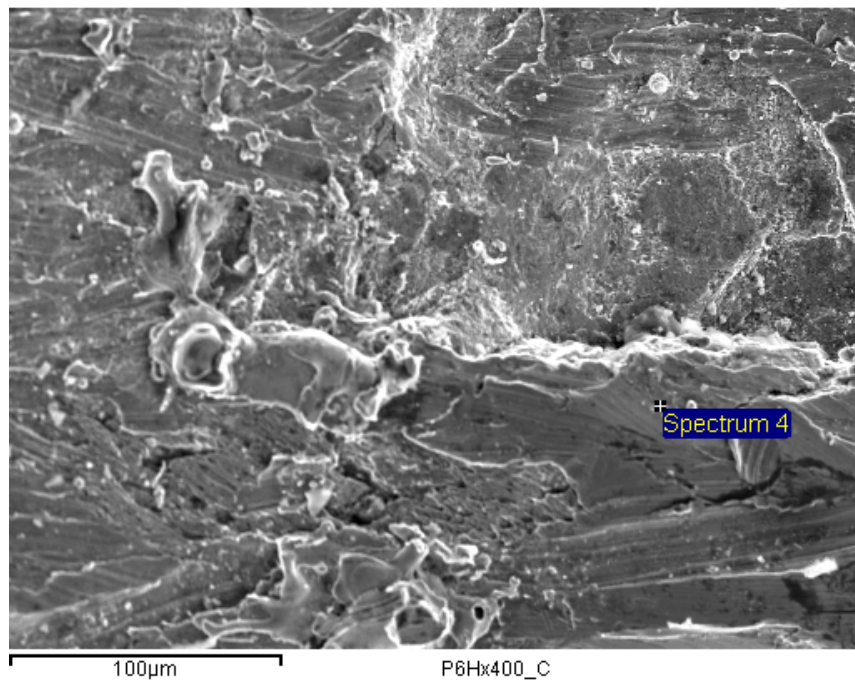


Figura A.28. Probeta P6H, Aleación 30% WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Cresta de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 4.

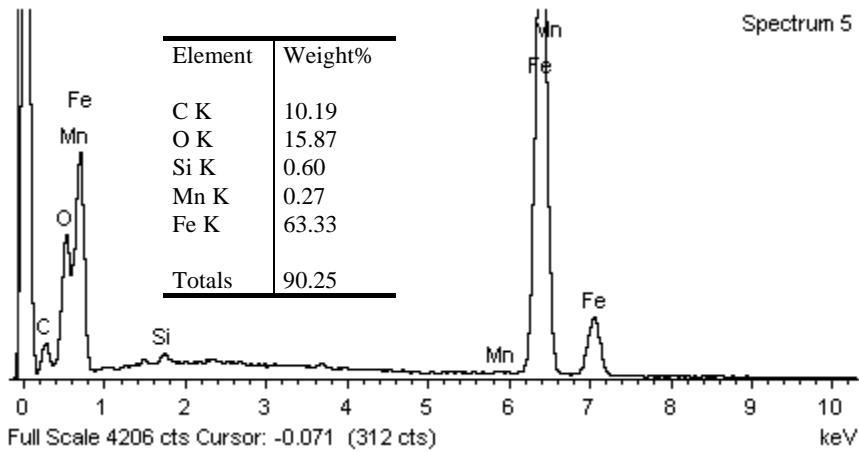
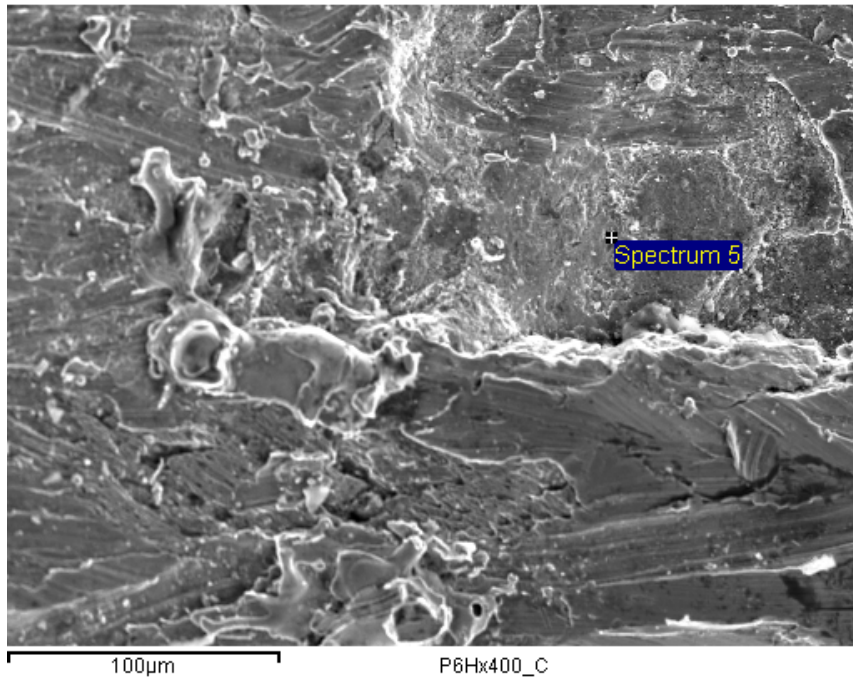


Figura A.29. Probeta P6H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 20 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 90 °, Cresta de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 5.

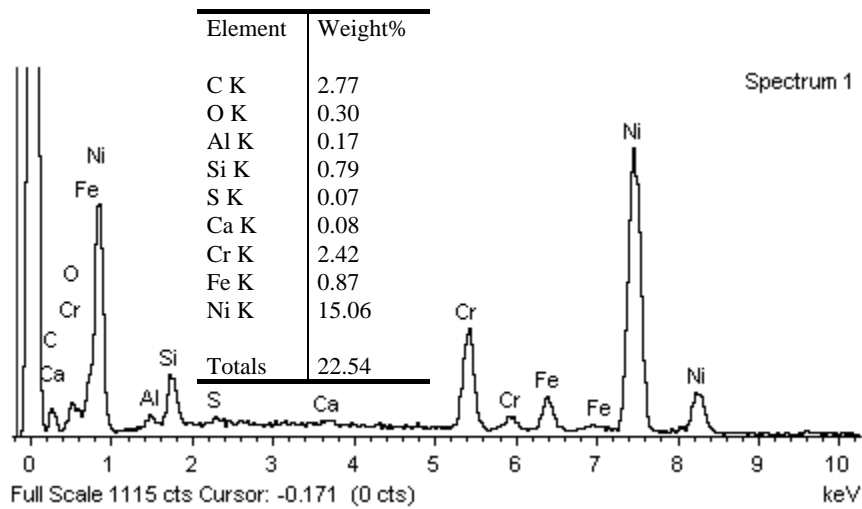
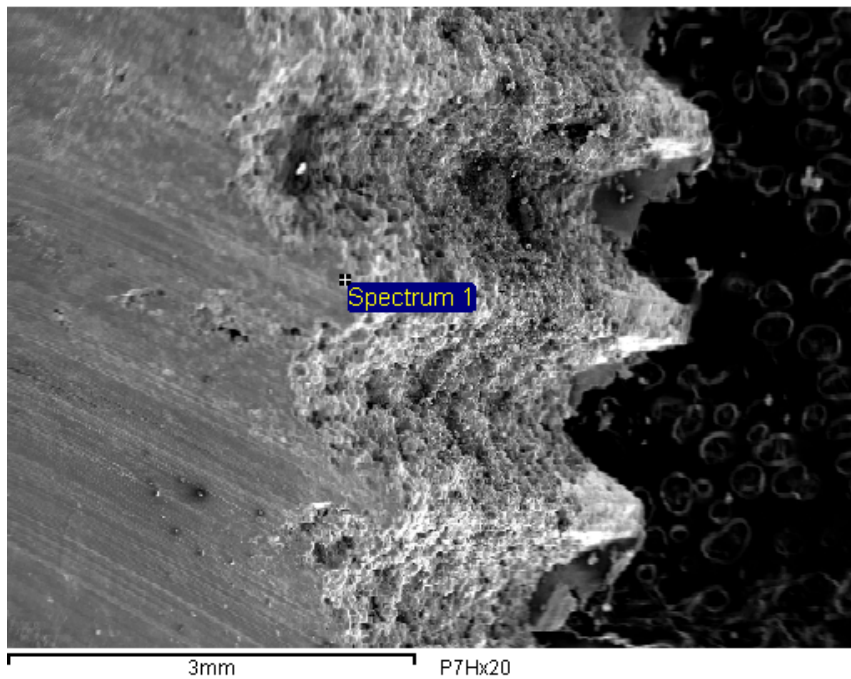


Figura A.30. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 1.

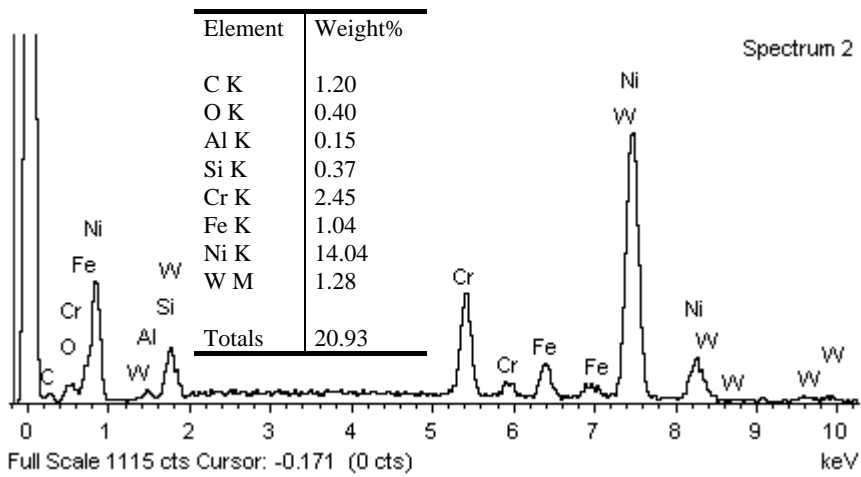
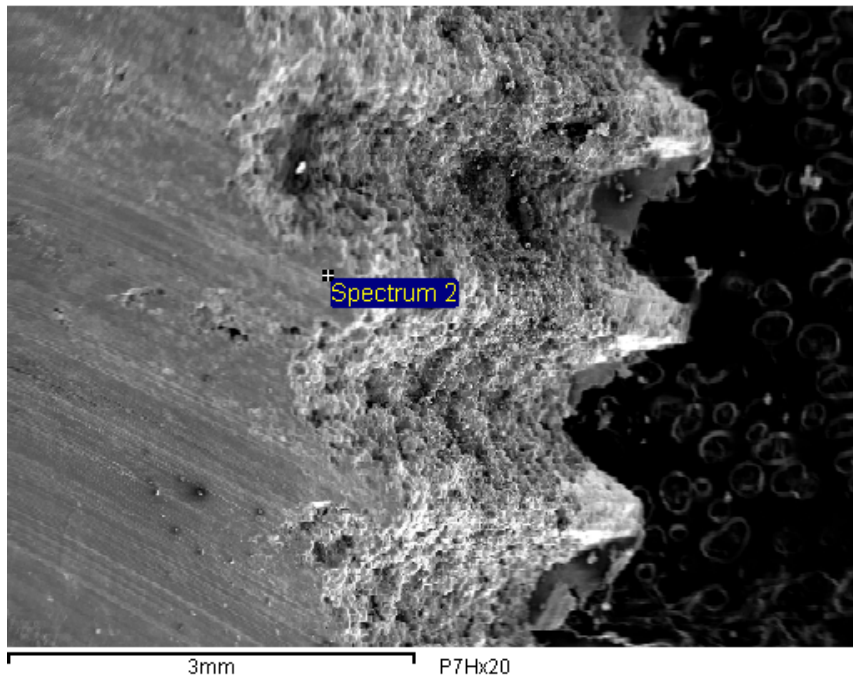


Figura A.31. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 2.

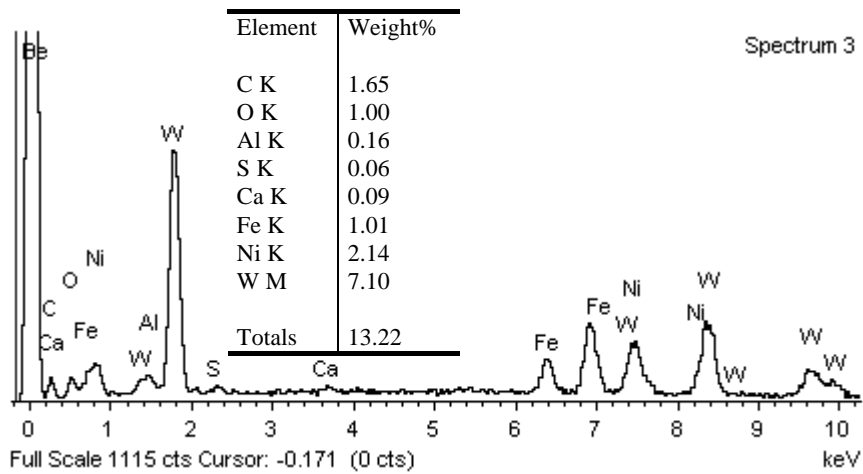
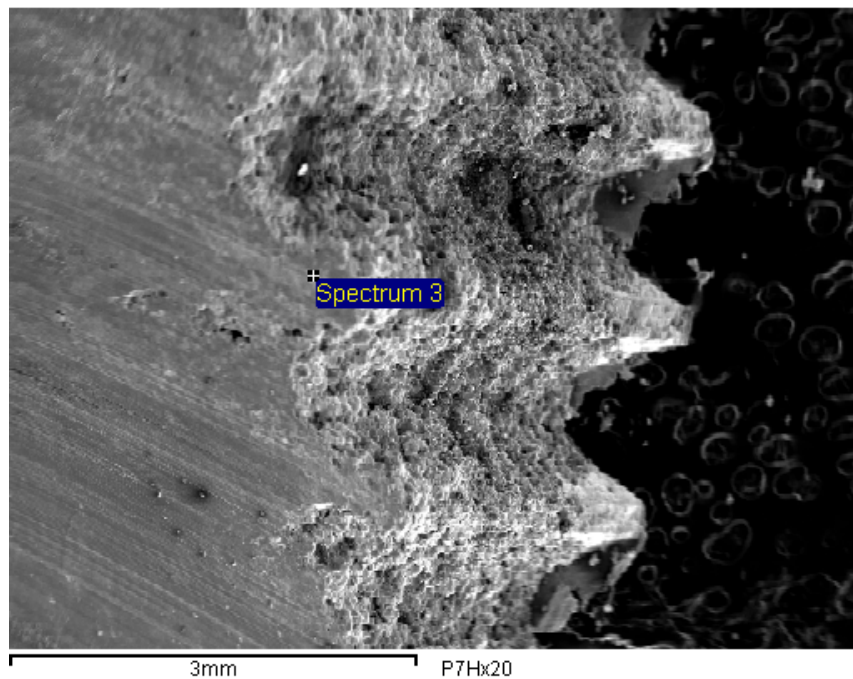


Figura A.32. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 3.

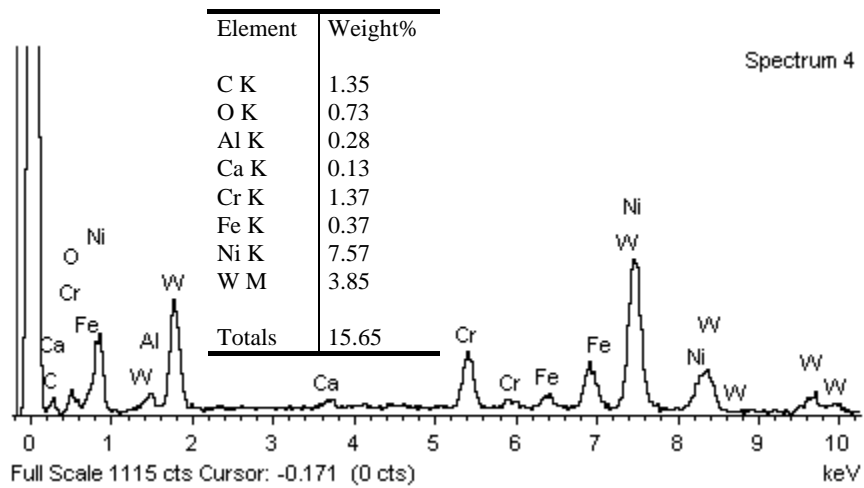
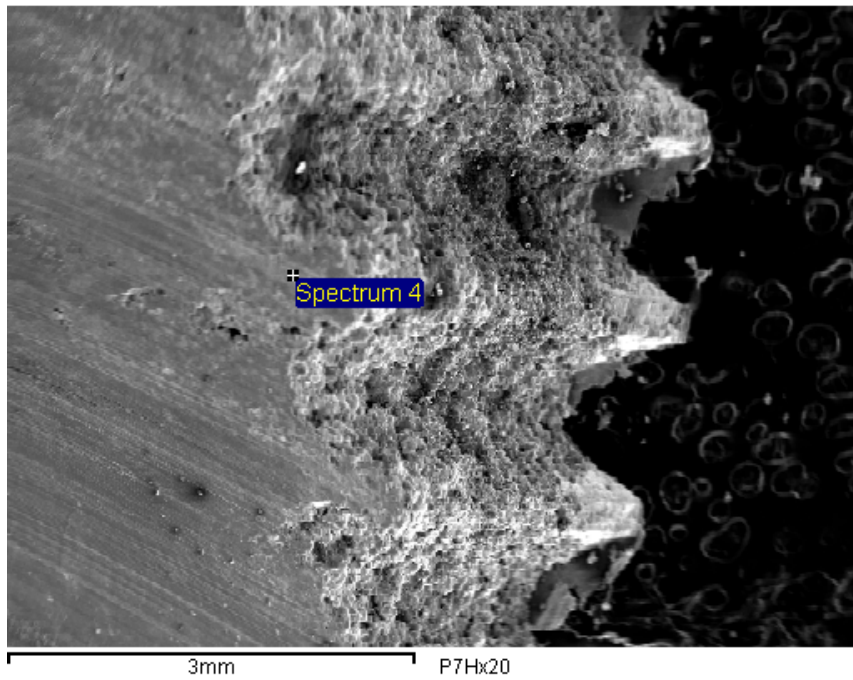


Figura A.33. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 4.

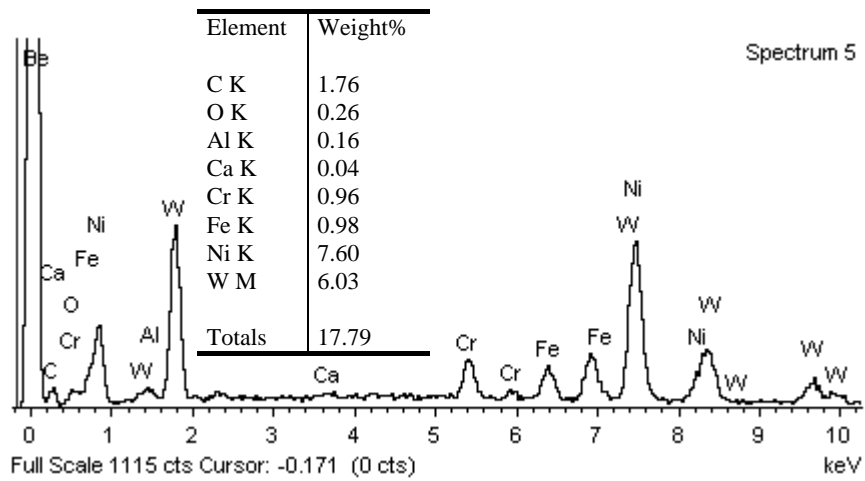
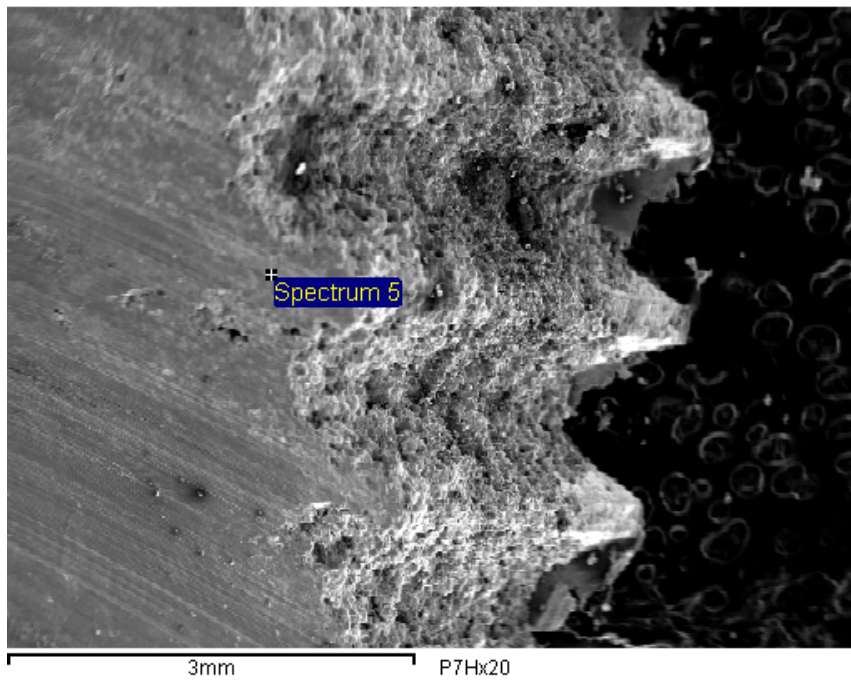


Figura A.34. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 5.

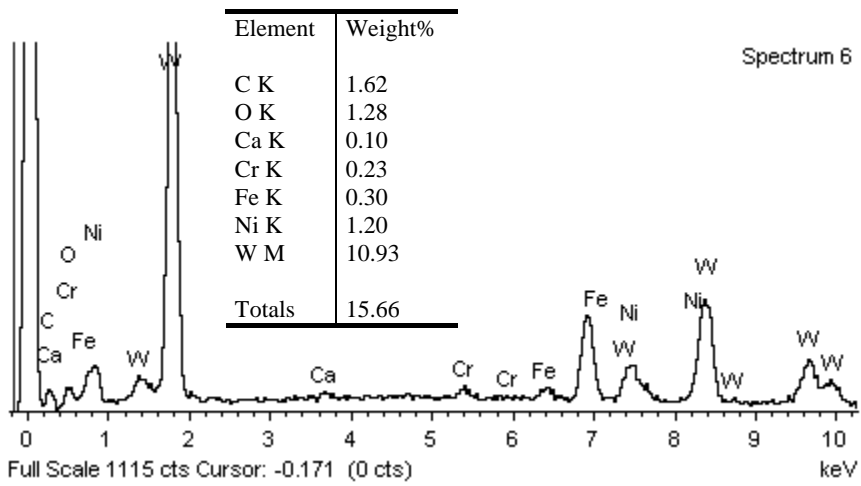
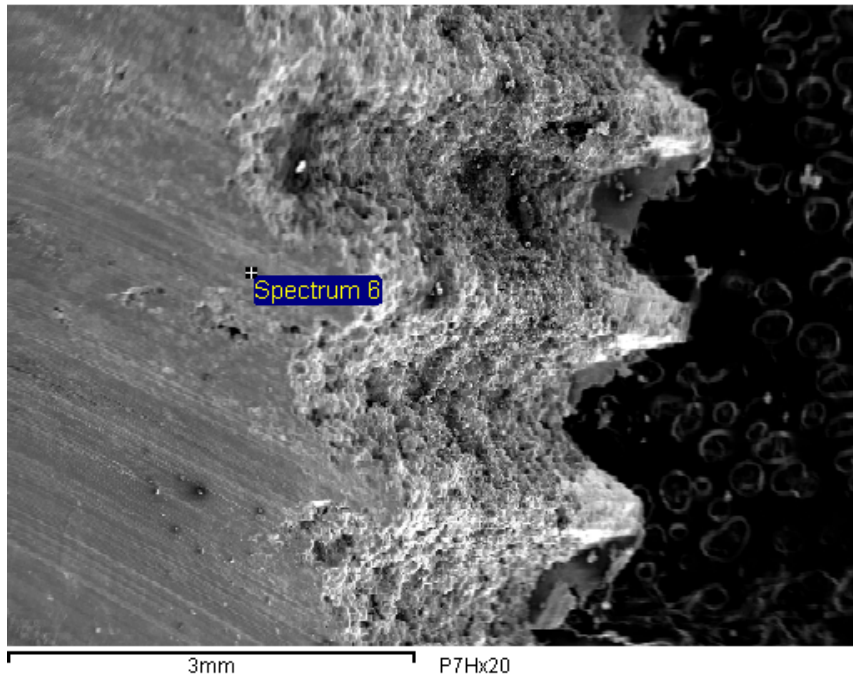


Figura A.35. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 6.

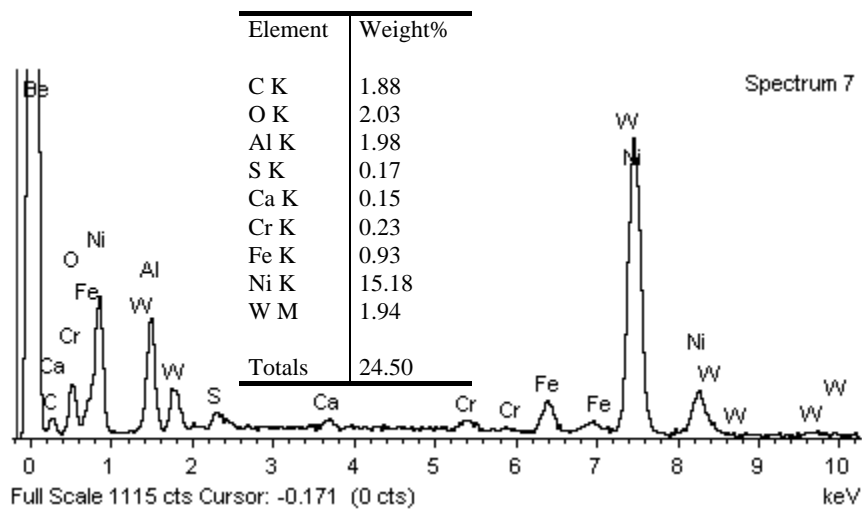
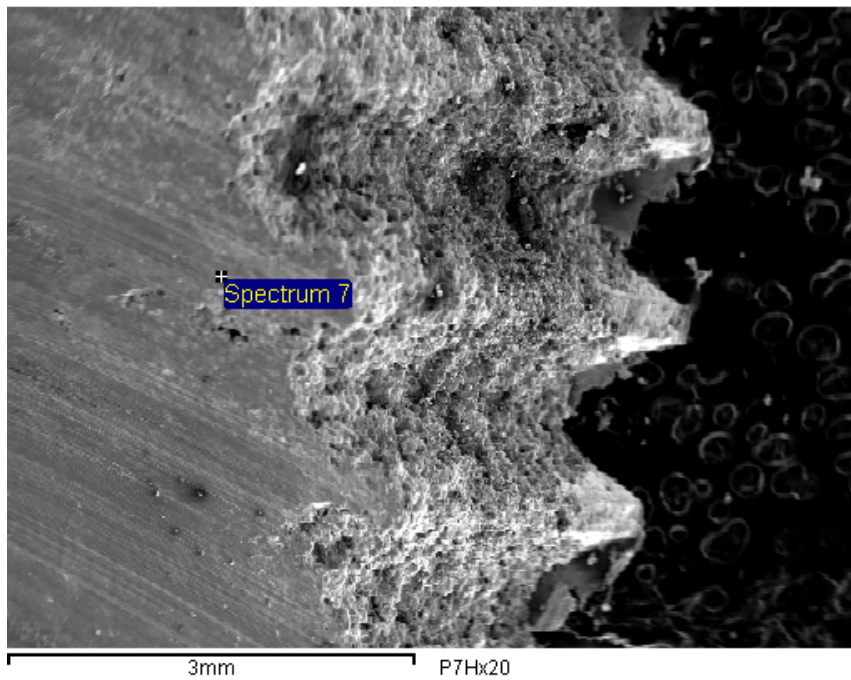


Figura A.36. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 7.

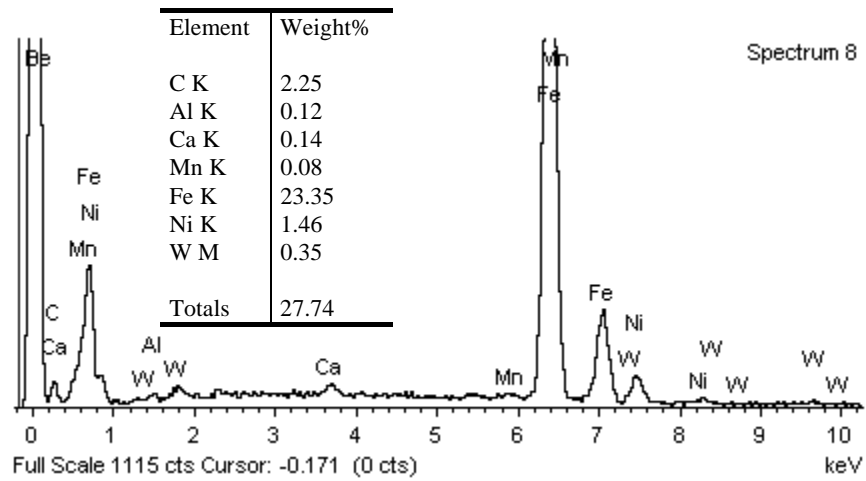
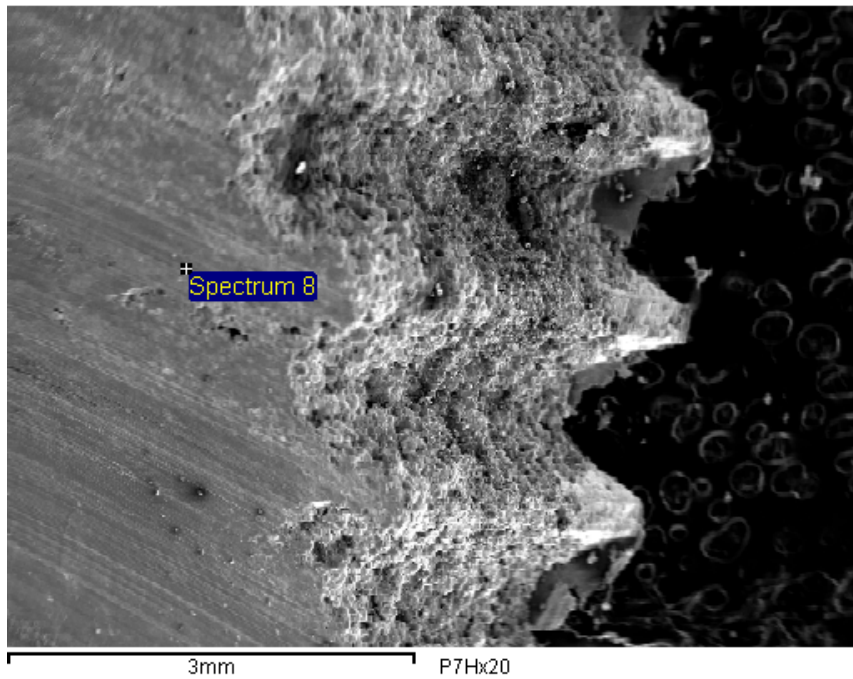


Figura A.37. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 8.

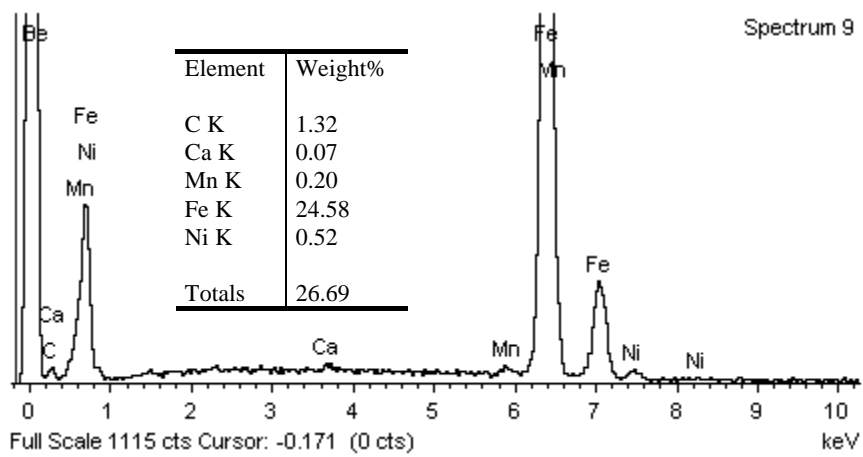
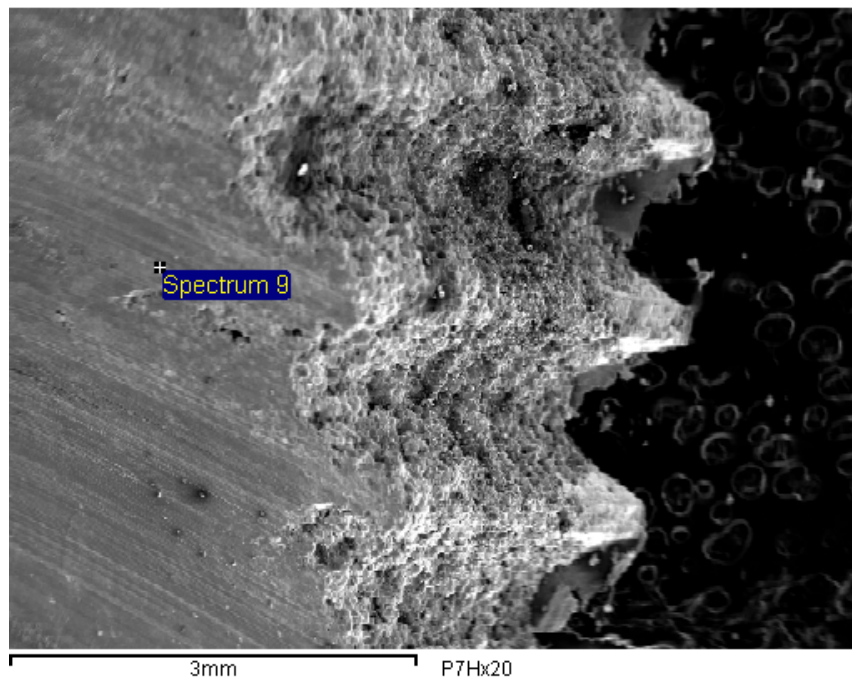


Figura A.38. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 9.

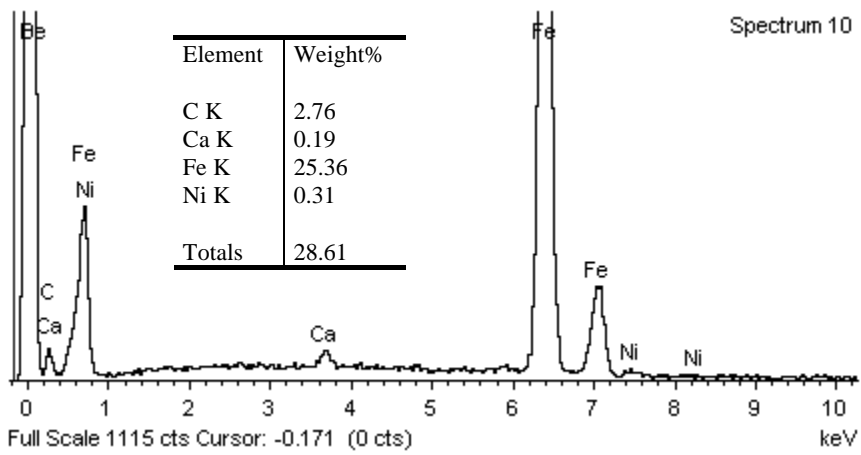
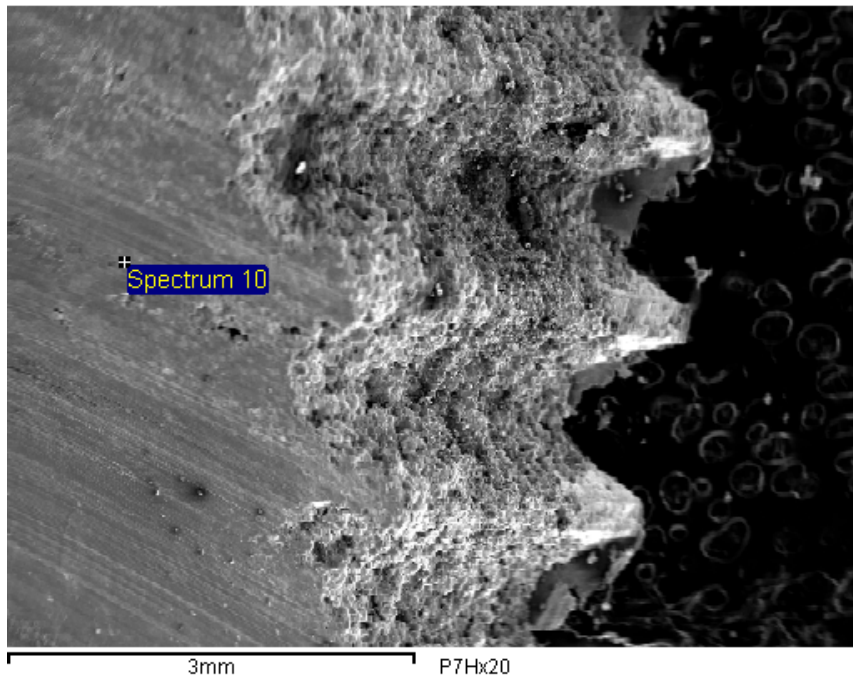


Figura A.39. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 10.

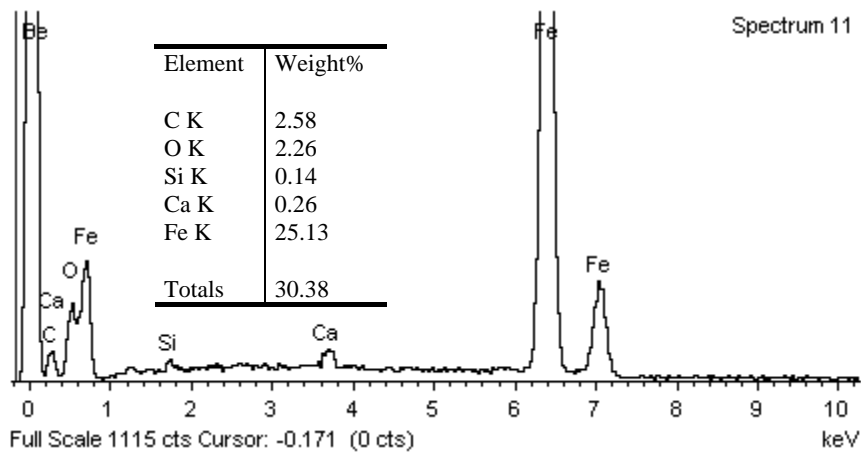
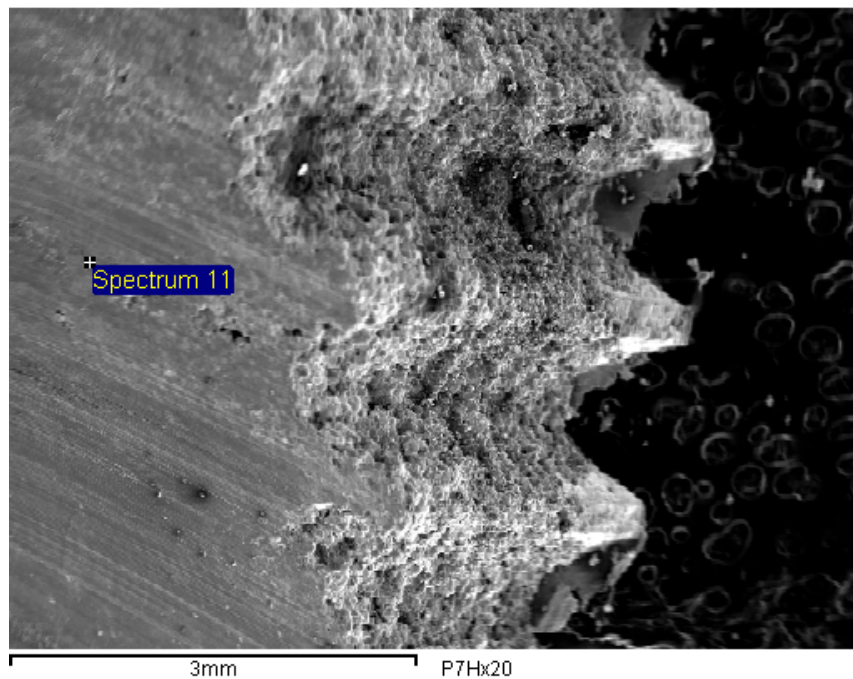


Figura A.40. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 11.

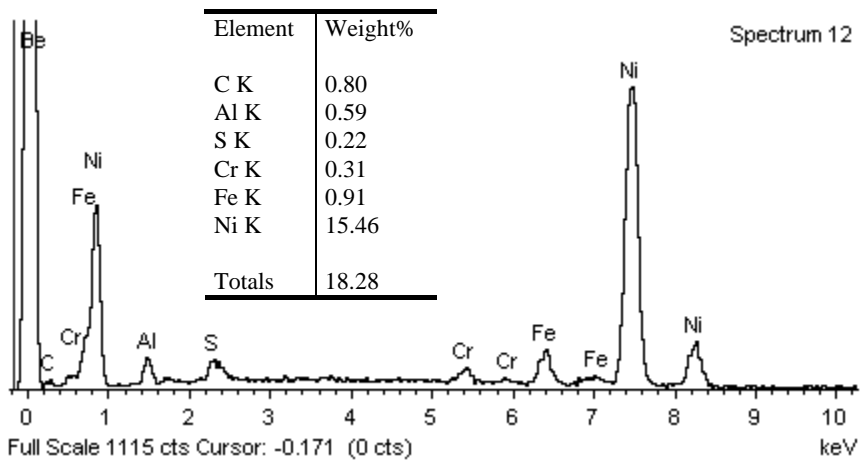
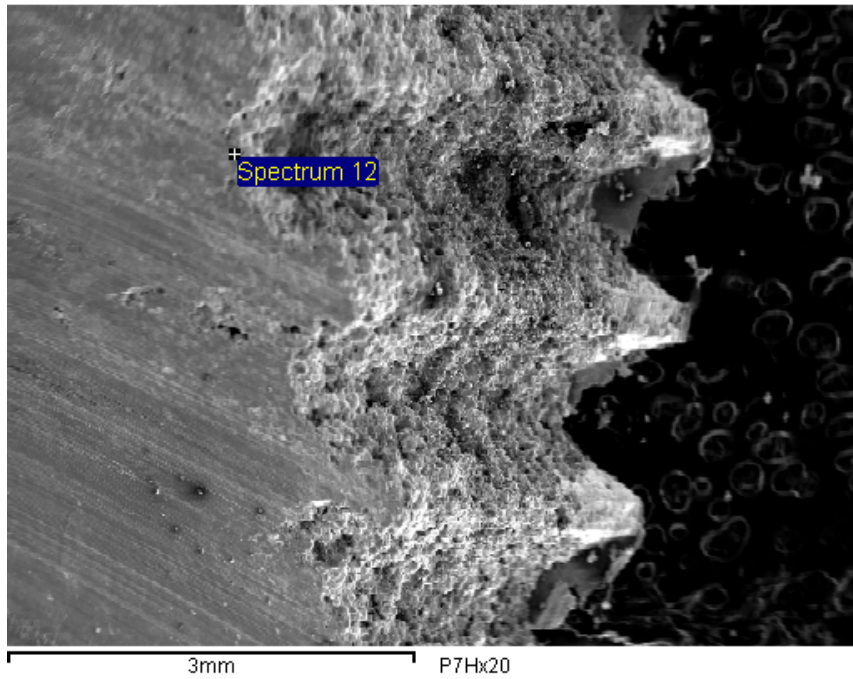


Figura A.41. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 12.

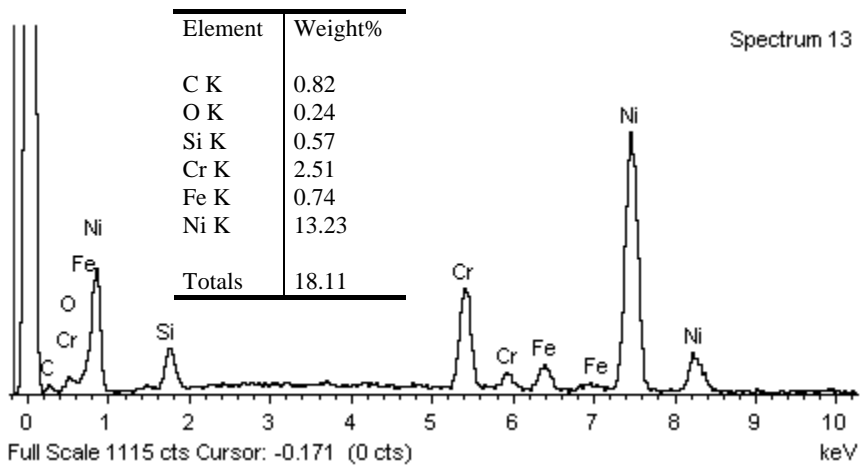
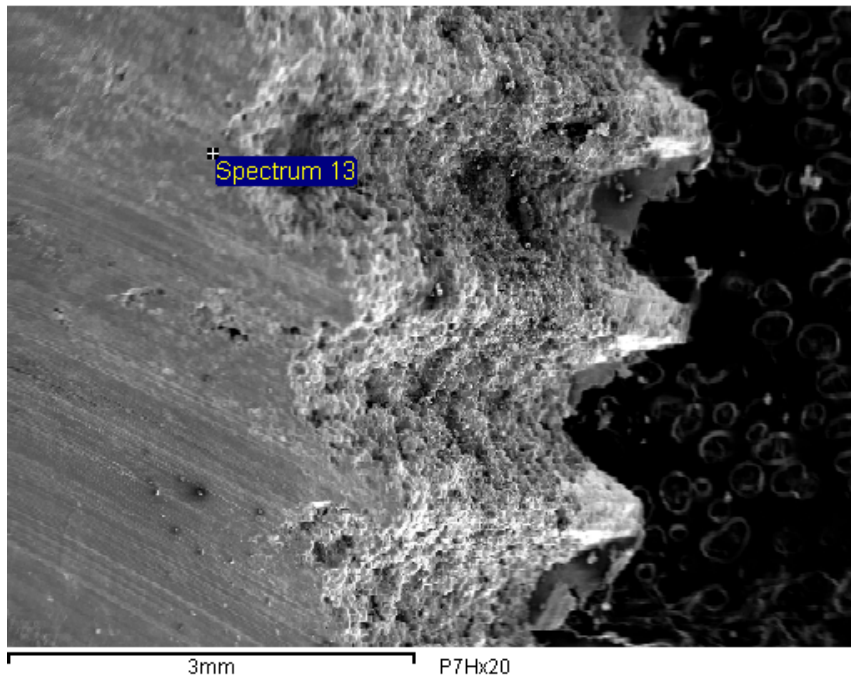


Figura A.42. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 13.

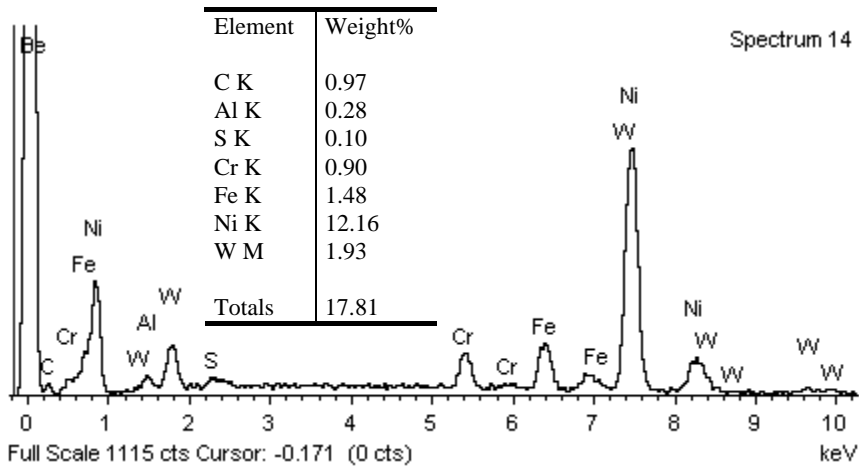
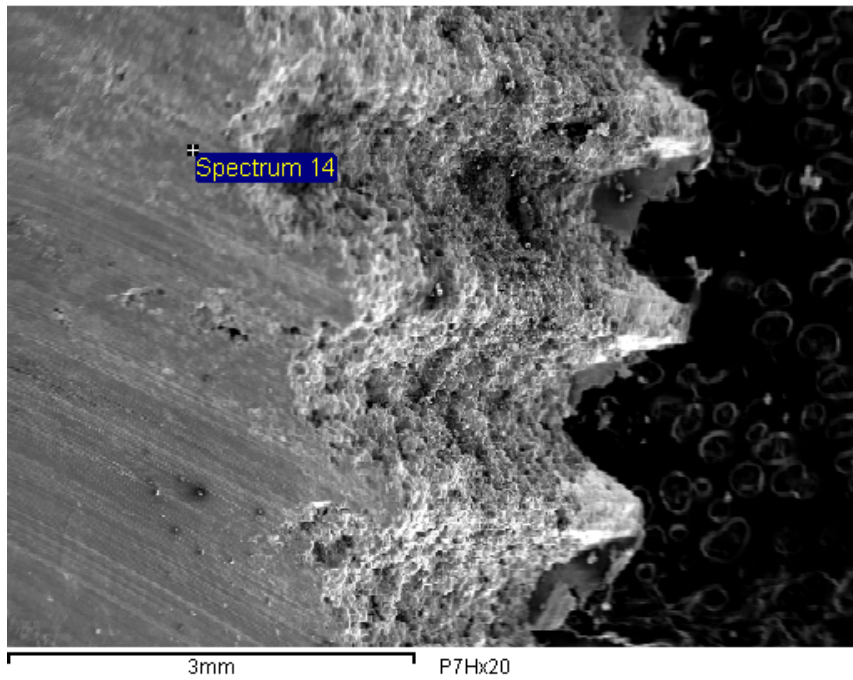


Figura A.43. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 14.

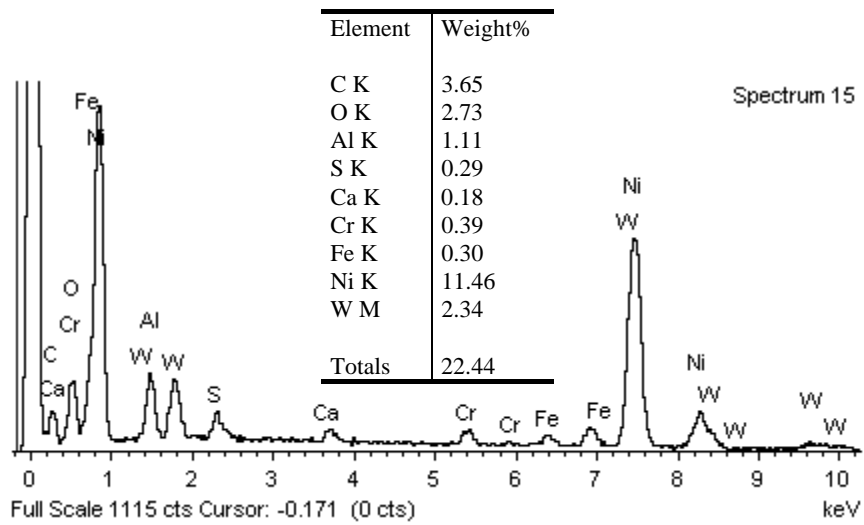
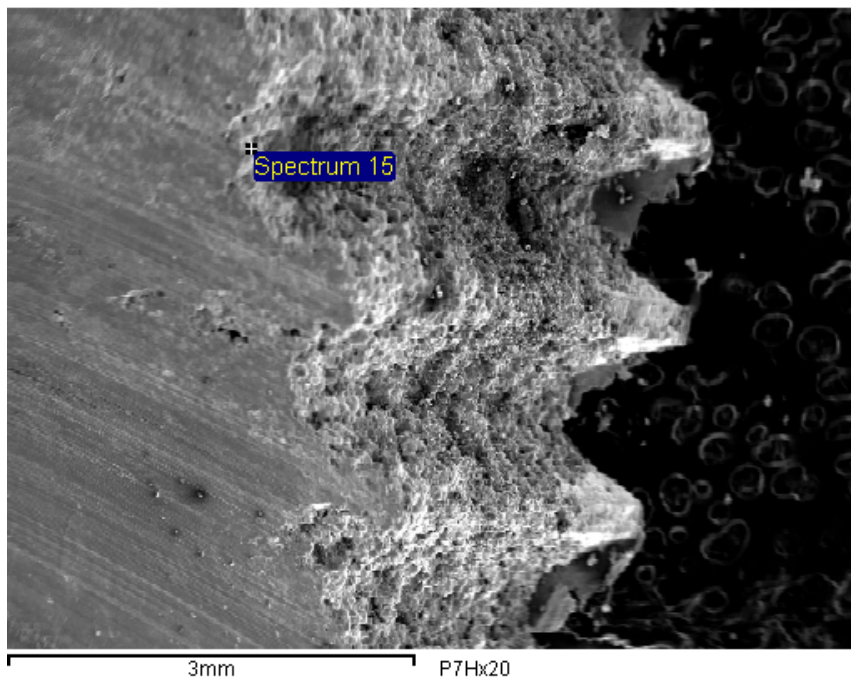


Figura A.44. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x20, SEM y EDS, Espectro 15.

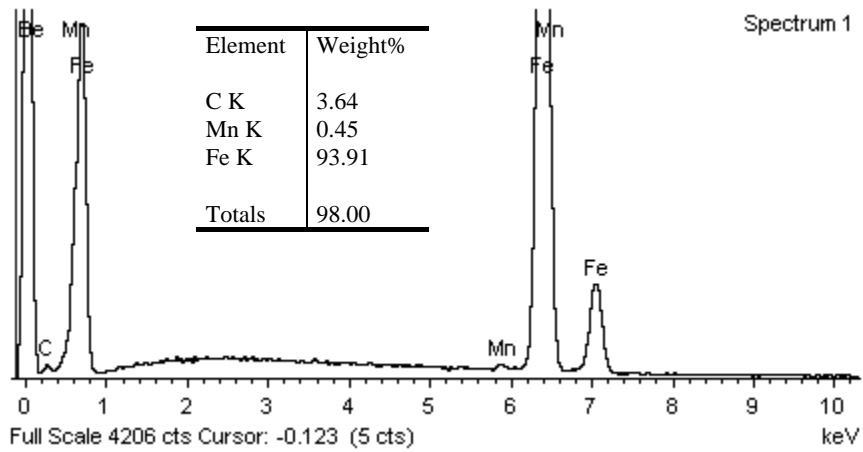
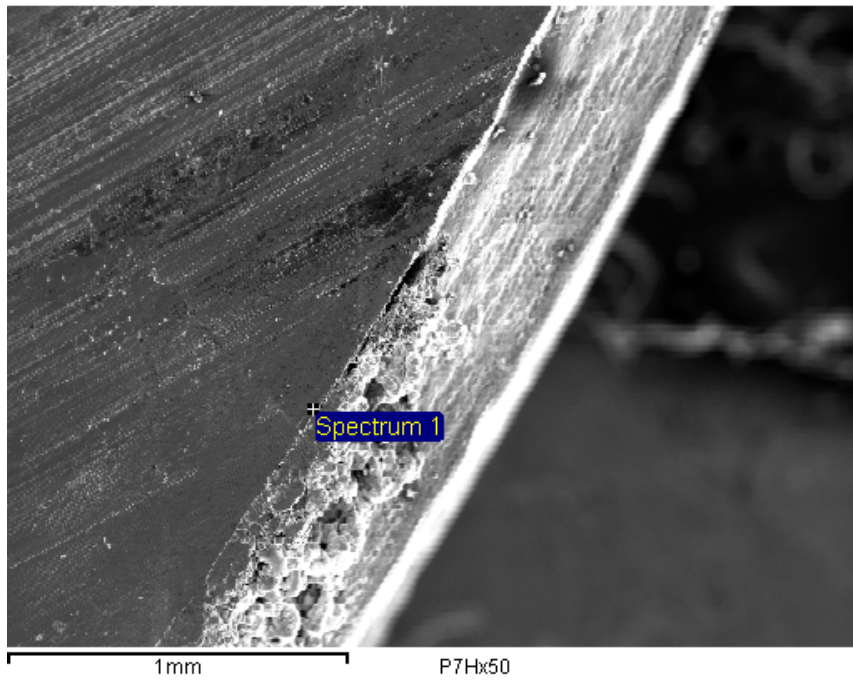


Figura A.45. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x50, SEM y EDS, Espectro 1.

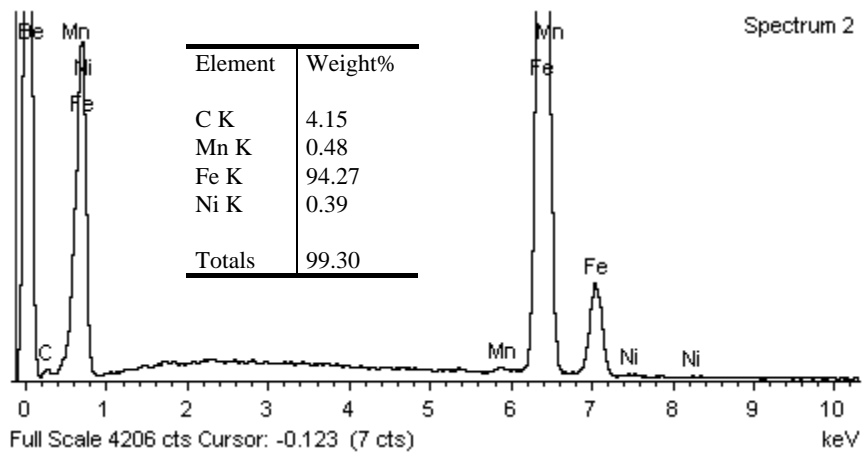
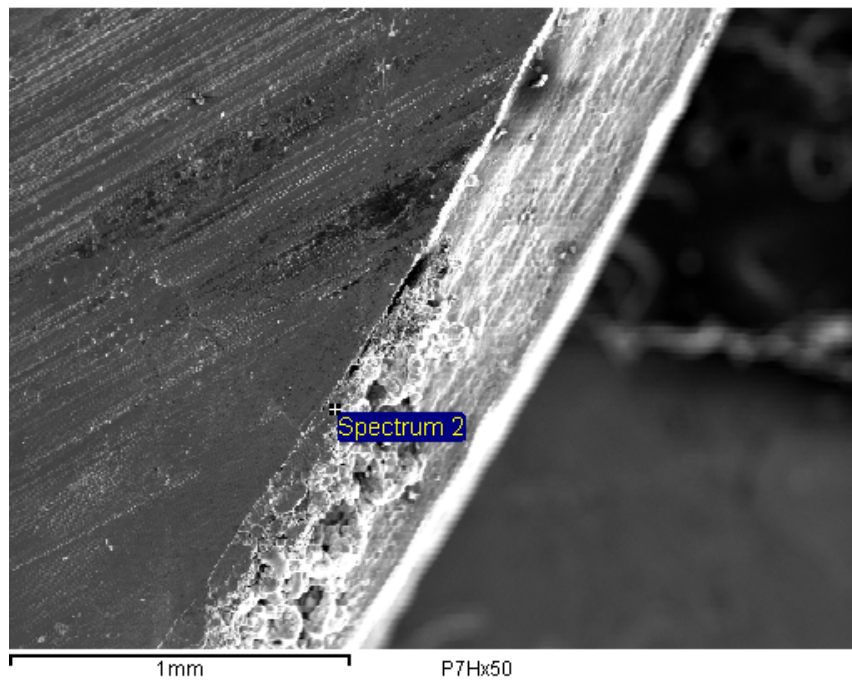


Figura A.46. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x50, SEM y EDS, Espectro 2.

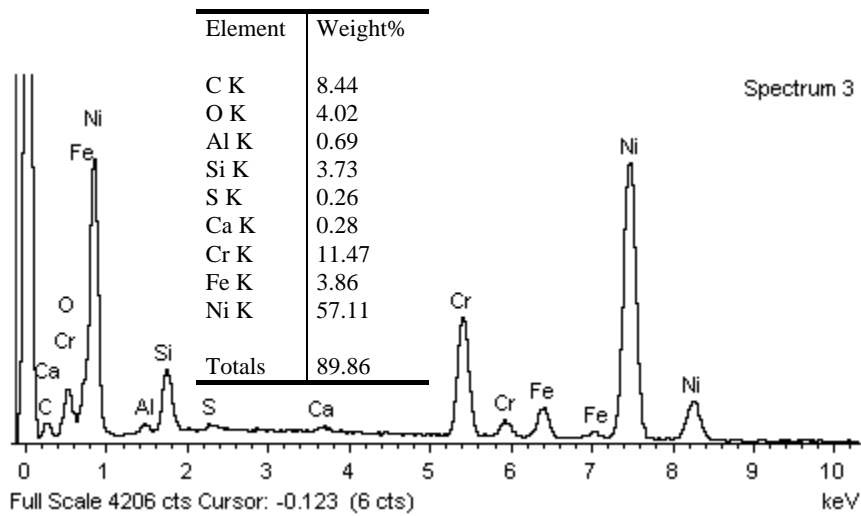
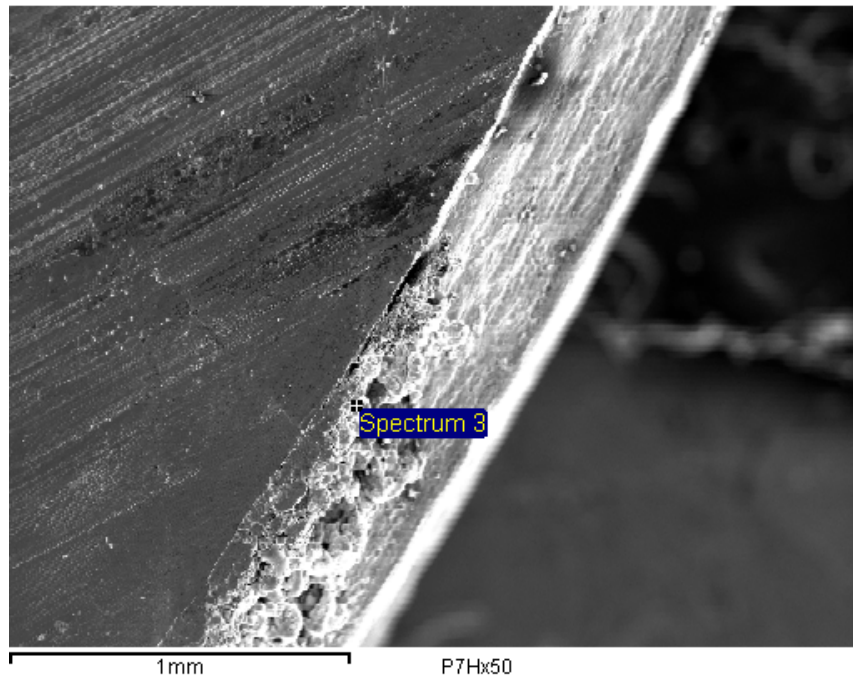


Figura A.47. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x50, SEM y EDS, Espectro 3.

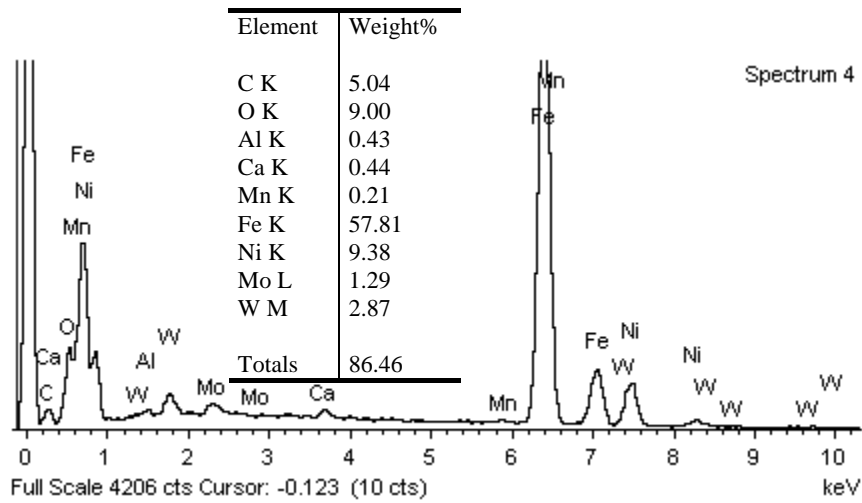
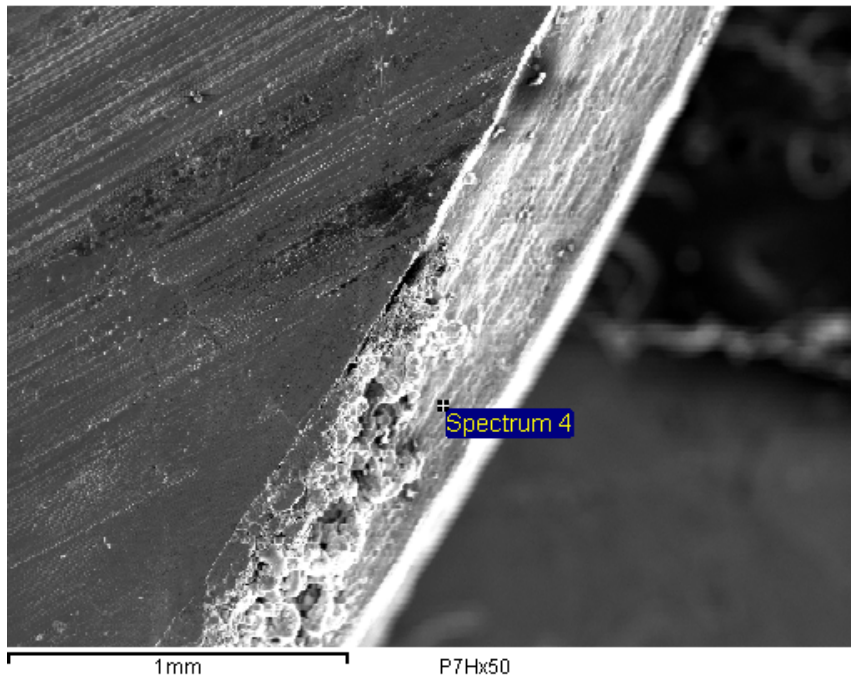


Figura A.48. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x50, SEM y EDS, Espectro 4.

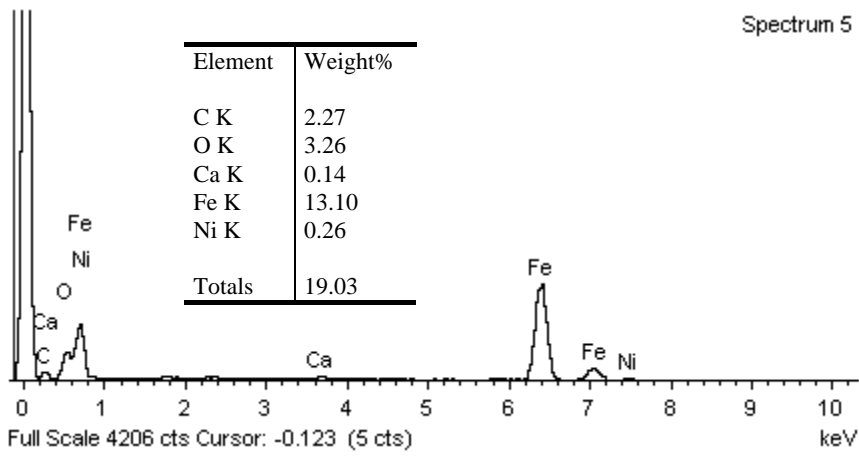
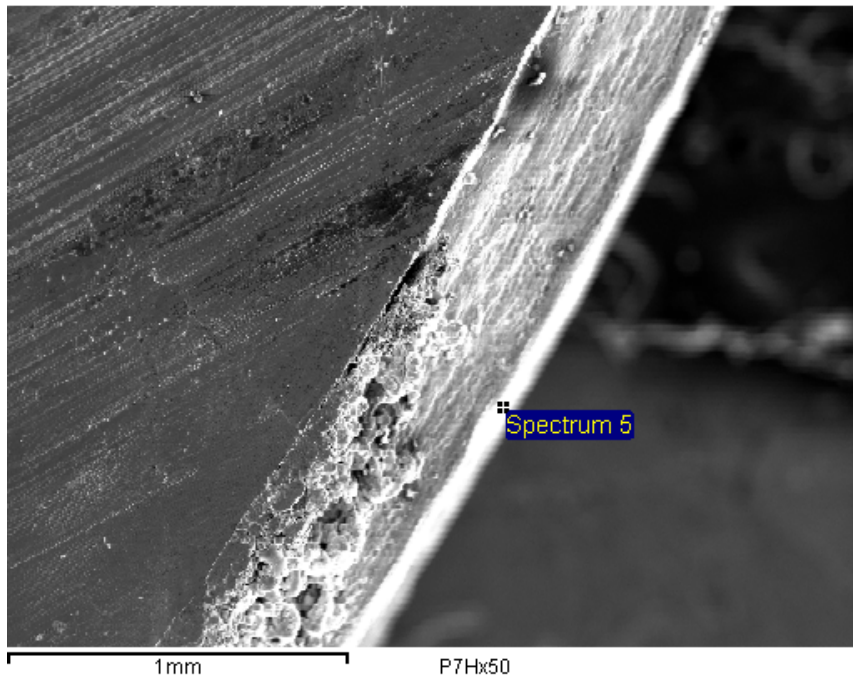


Figura A.49. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x50, SEM y EDS, Espectro 5.

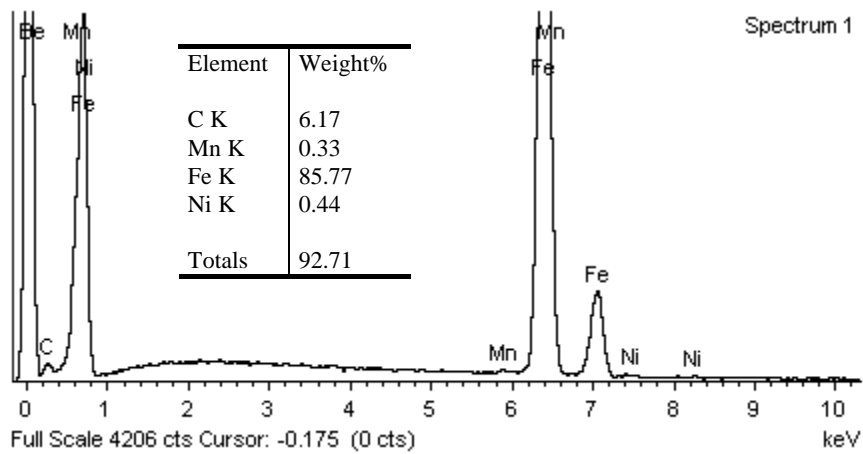
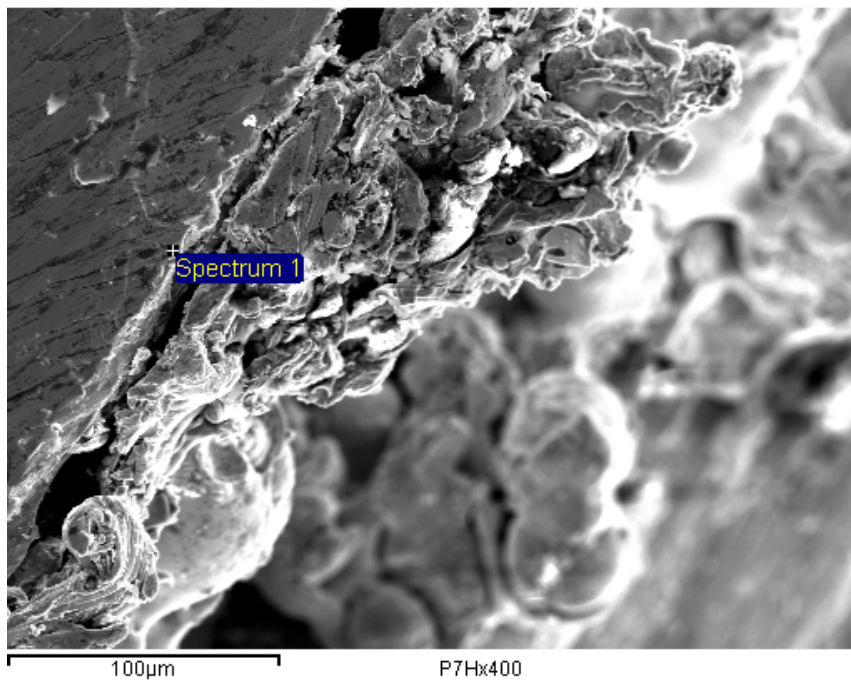


Figura A.50. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS, Espectro 1.

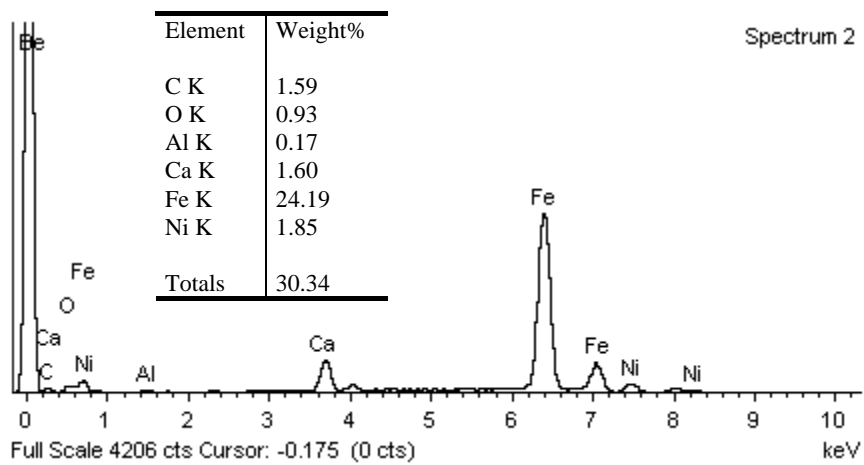
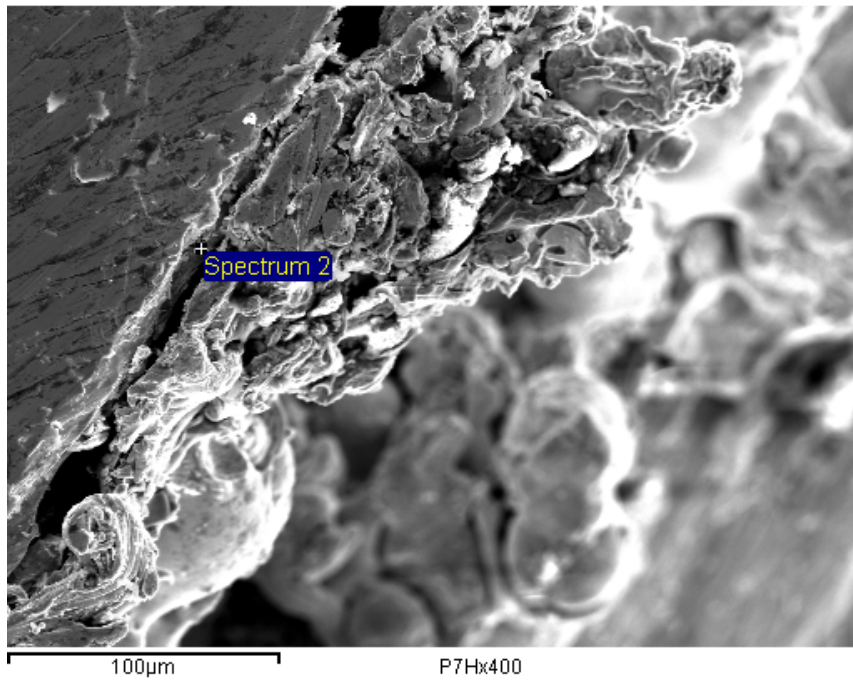


Figura A.51. Probeta P7H, Aleación 30% WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS, Espectro 2.

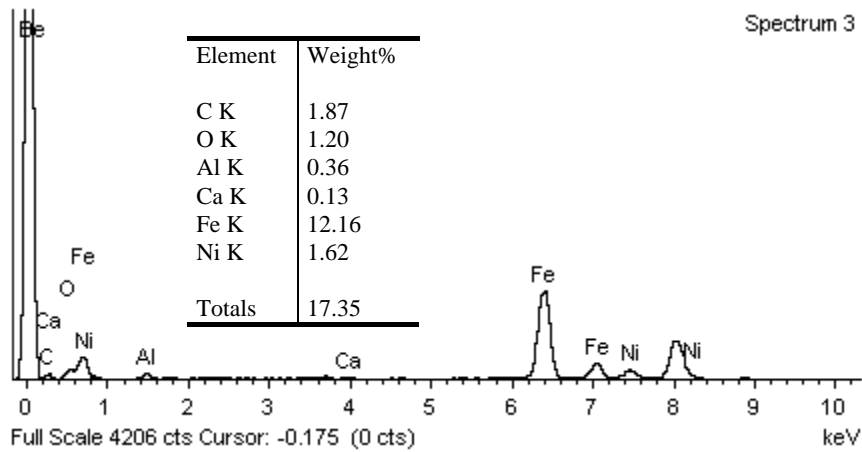
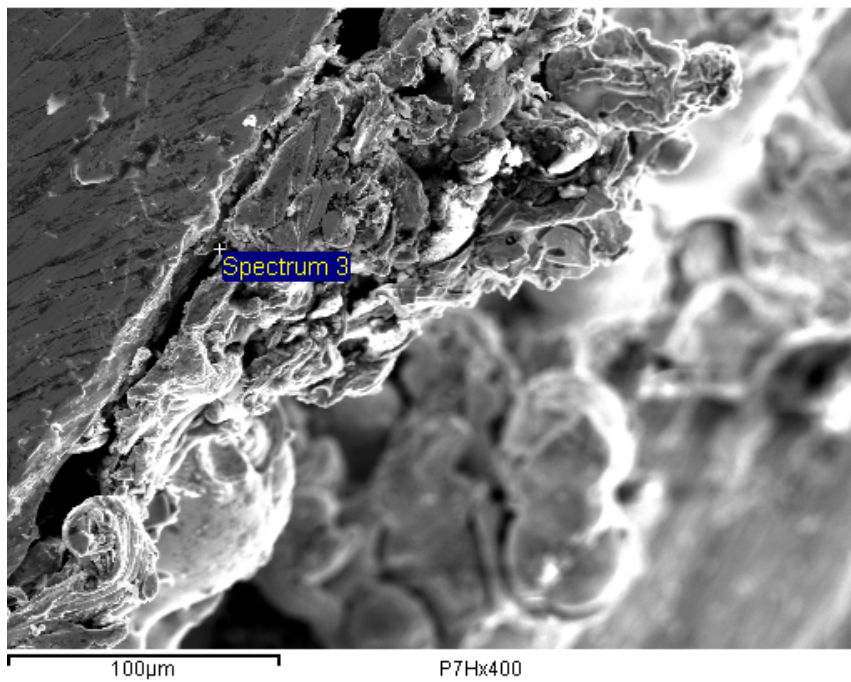


Figura A.52. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS, Espectro 3.

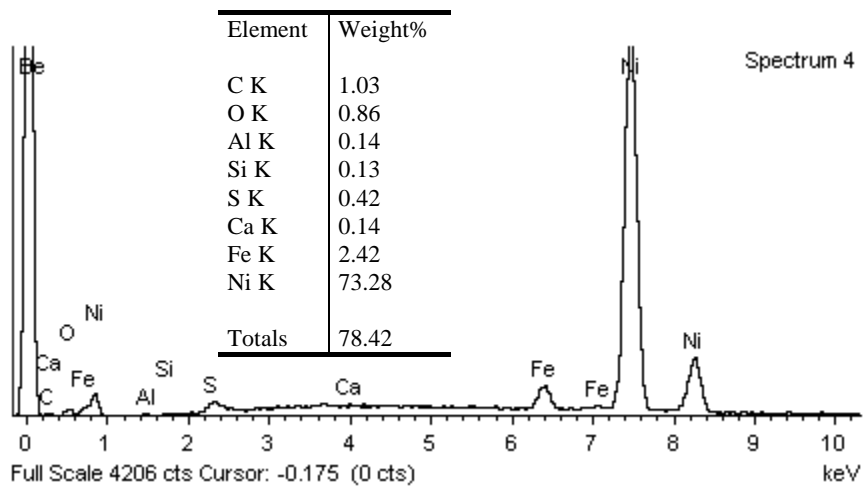
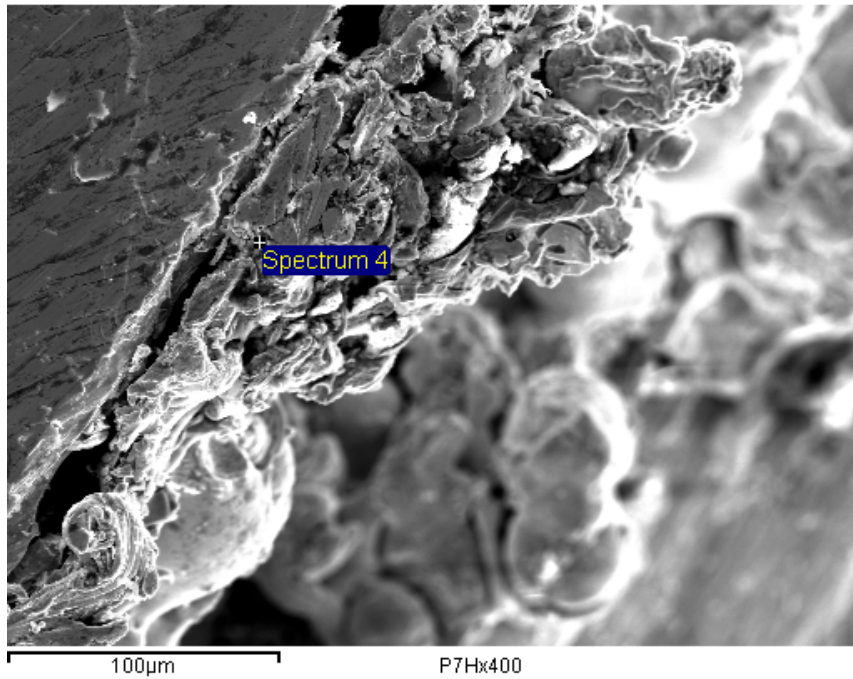


Figura A.53. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS, Espectro 4.

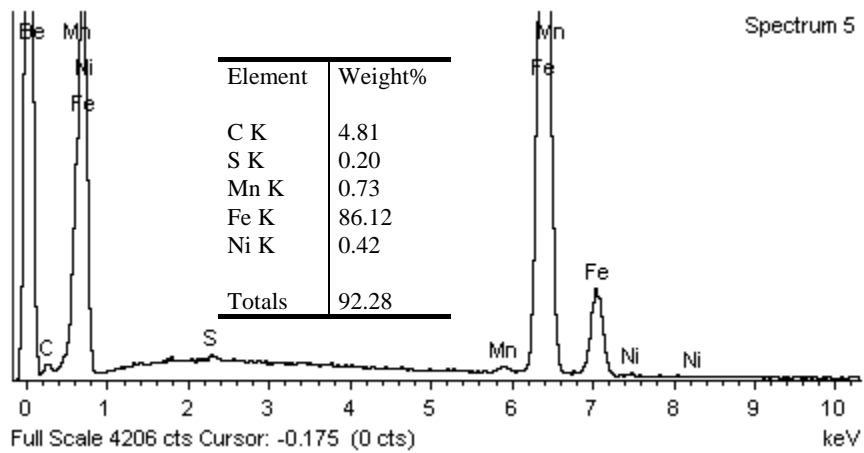
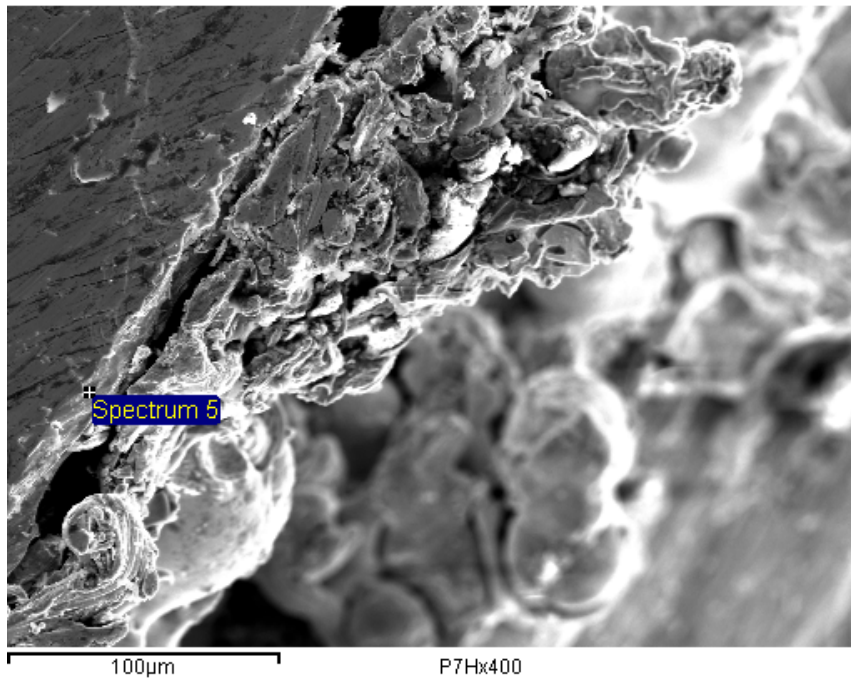


Figura A.54. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS, Espectro 5.

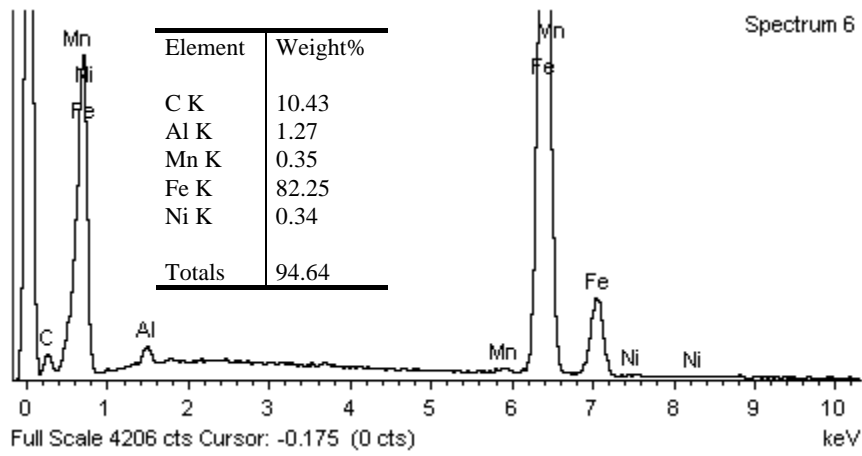
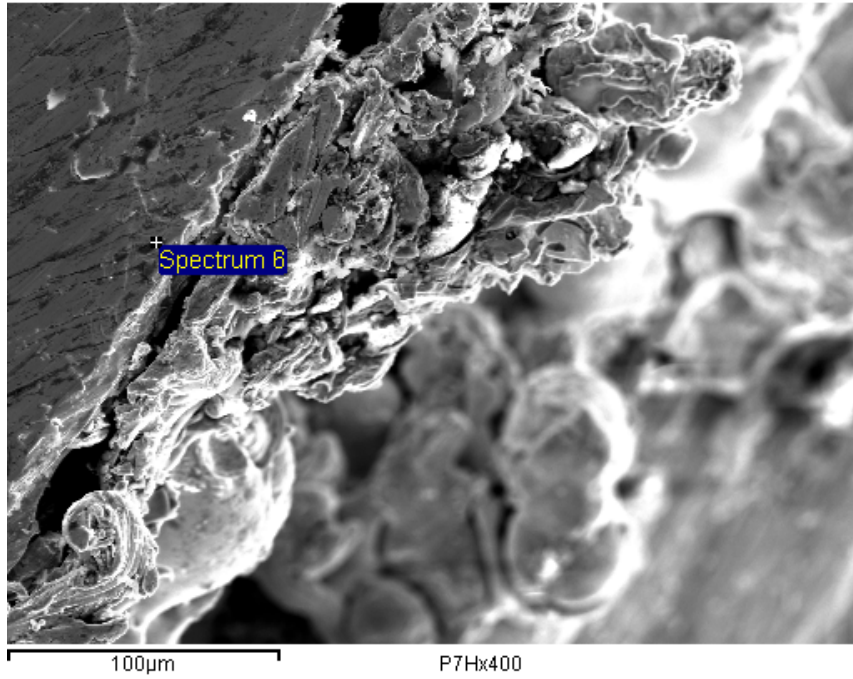


Figura A.55. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS, Espectro 6.

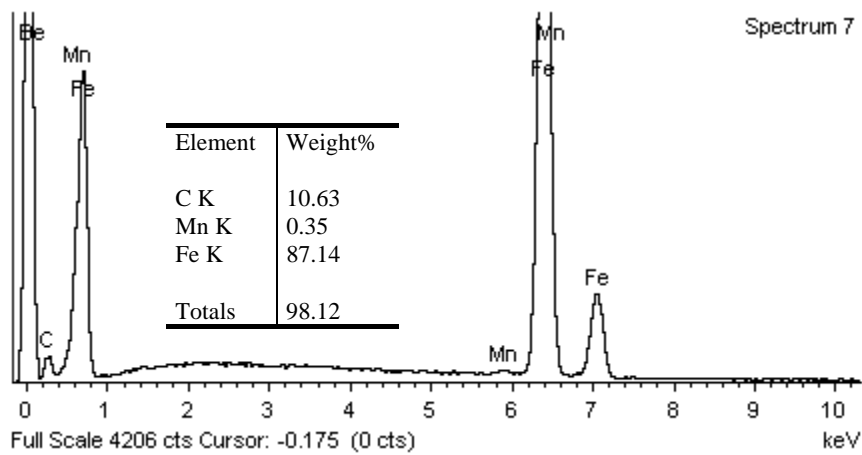
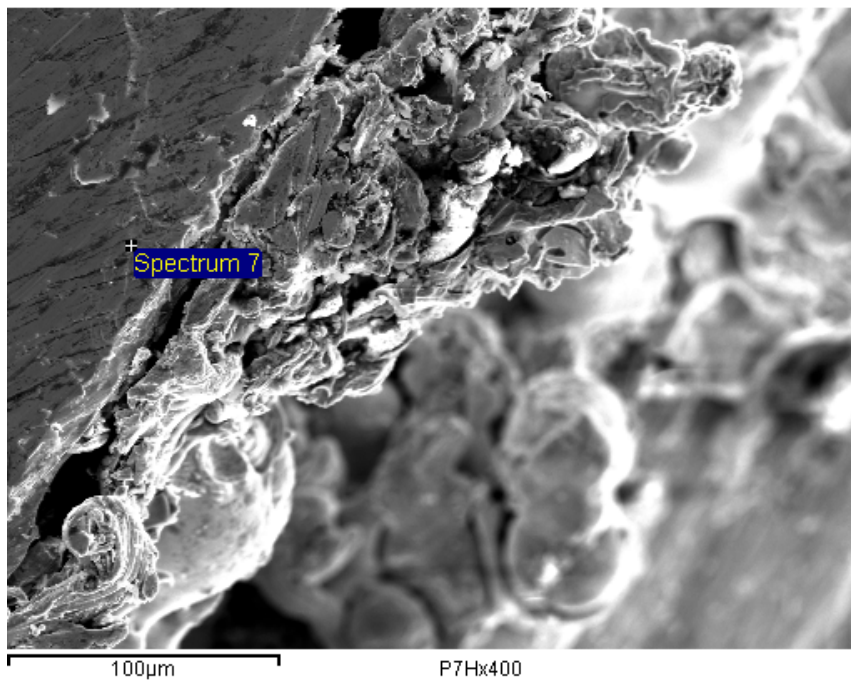


Figura A.56. Probeta P7H, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 45 °, x400, SEM y EDS, Espectro 7.

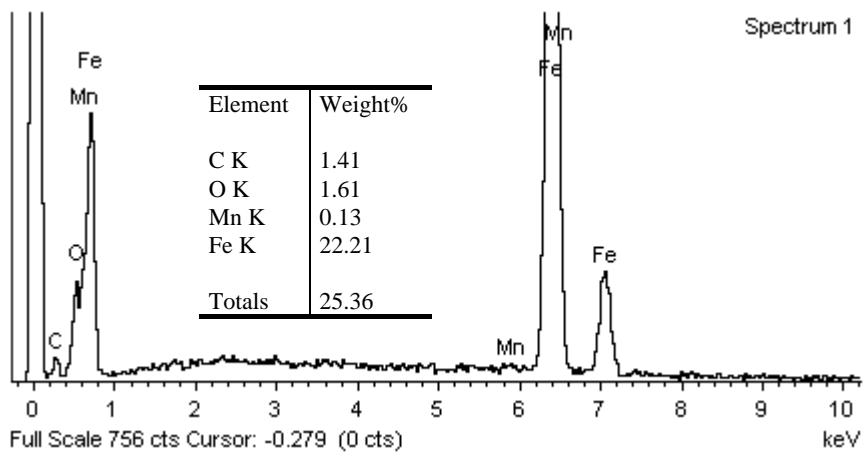
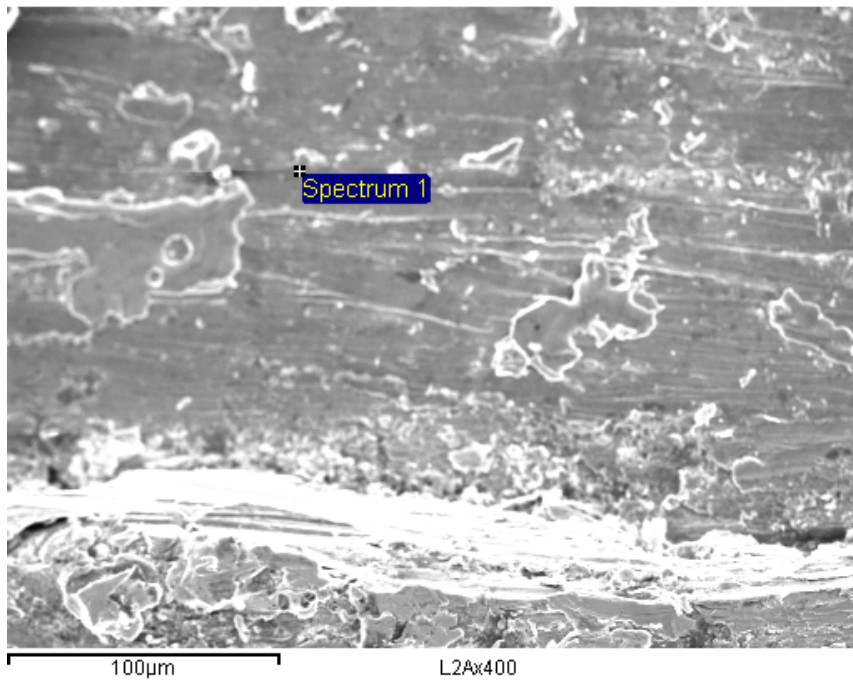


Figura A.57. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 1.

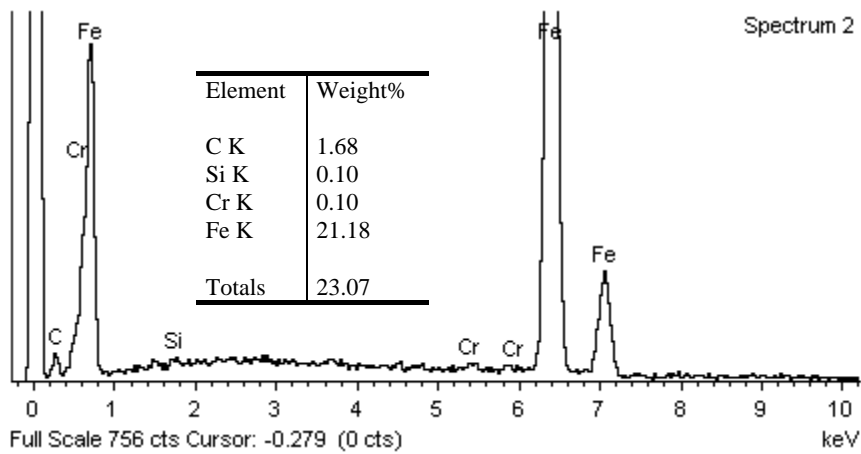
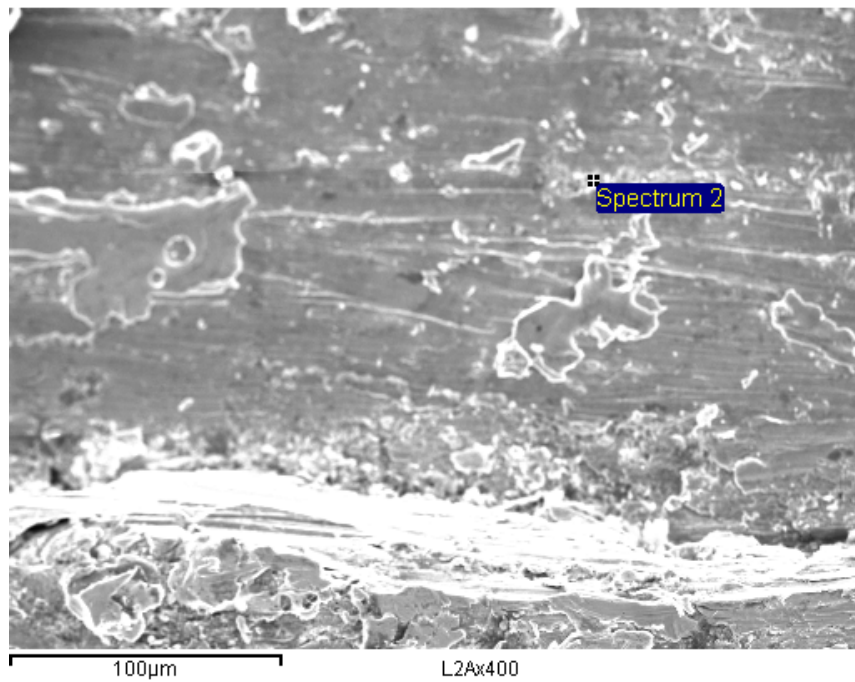


Figura A.58. Probeta L2D, Aleación 30% WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 2.

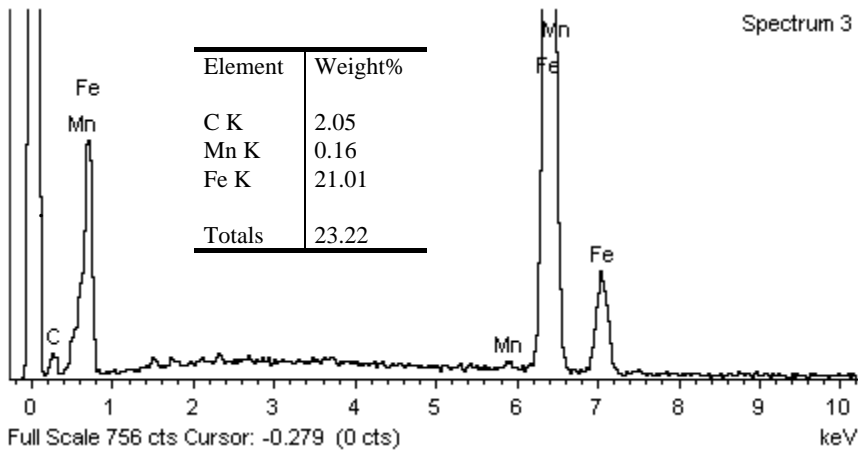
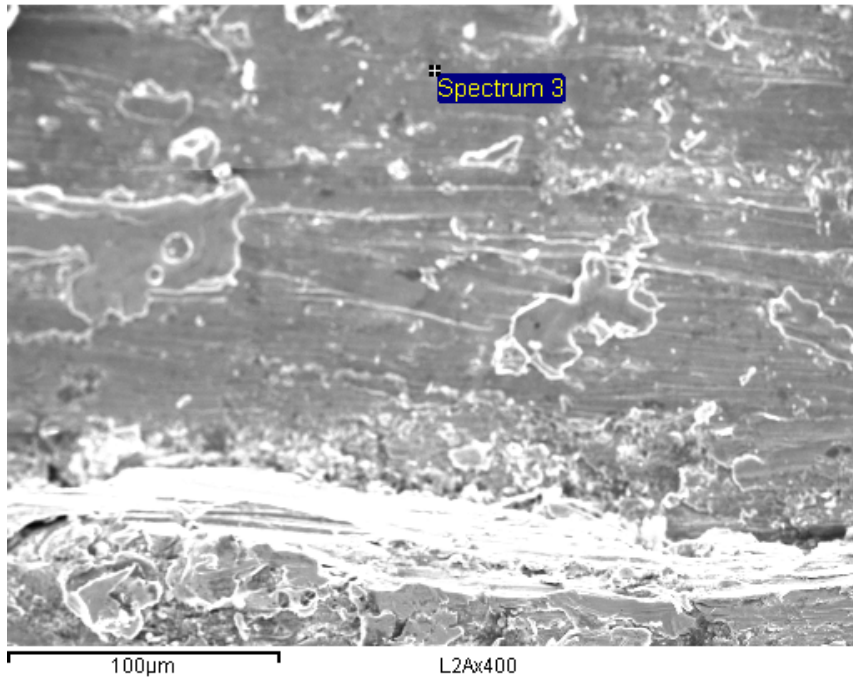


Figura A.59. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 3.

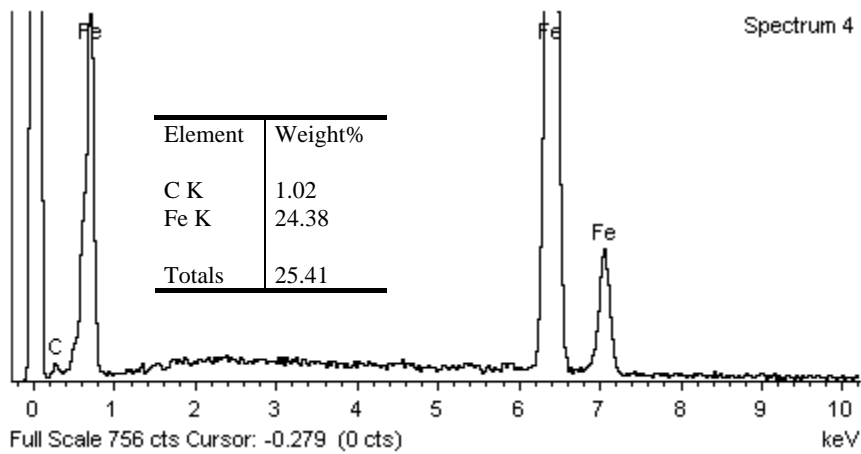
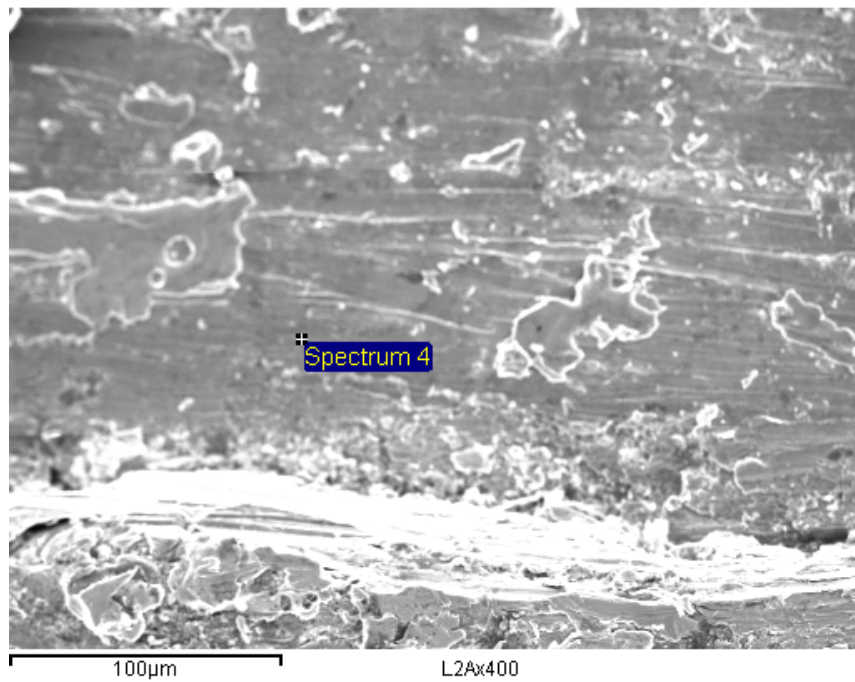


Figura A.60. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 4.

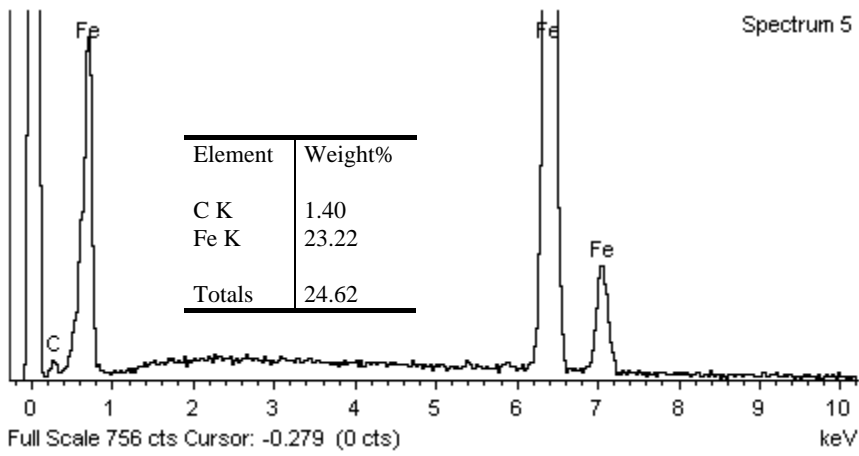
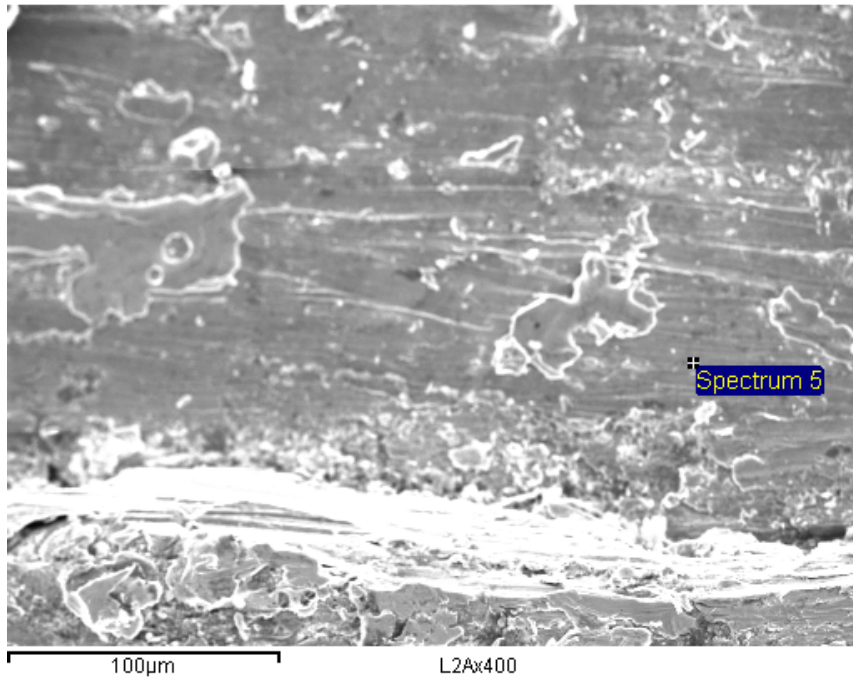


Figura A.61. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 5.

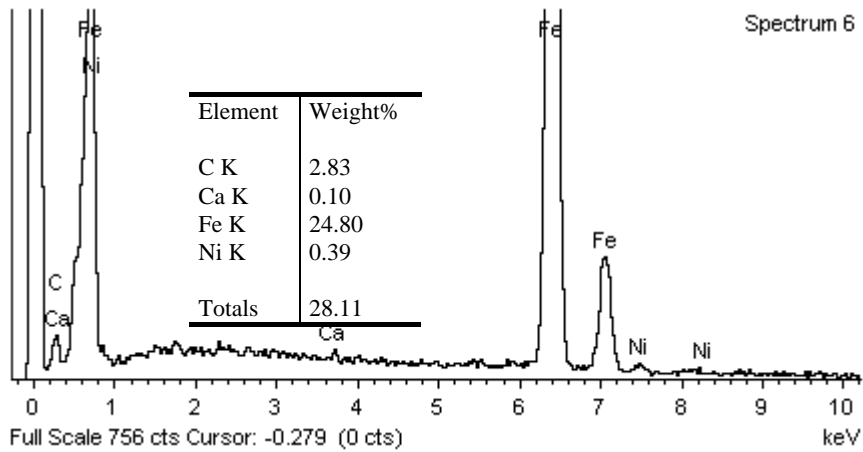
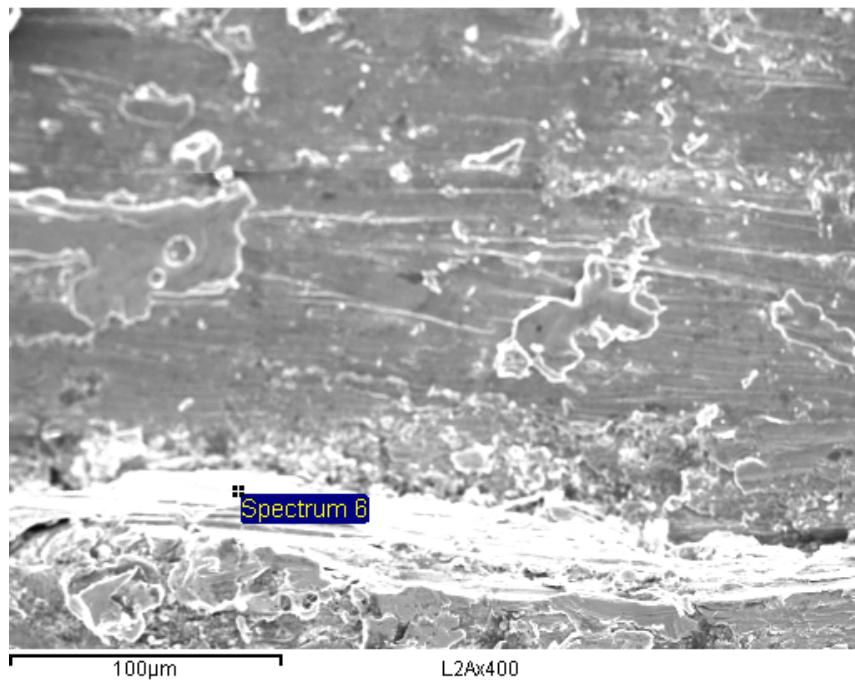


Figura A.62. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 6.

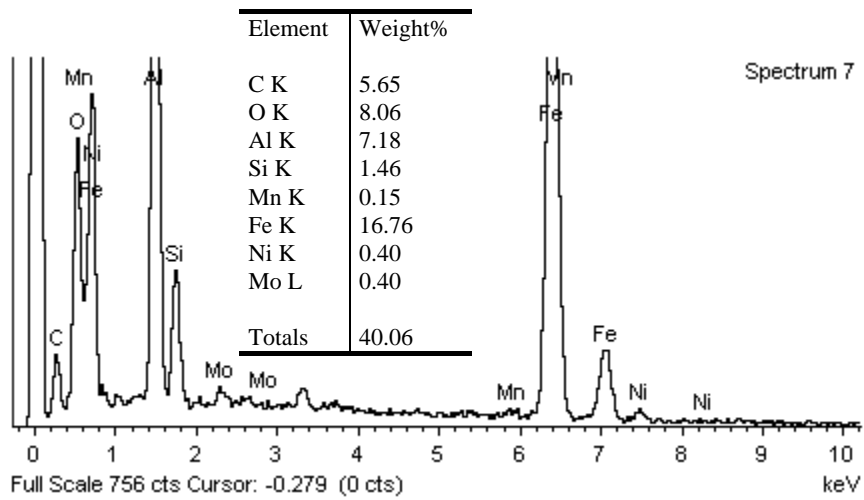
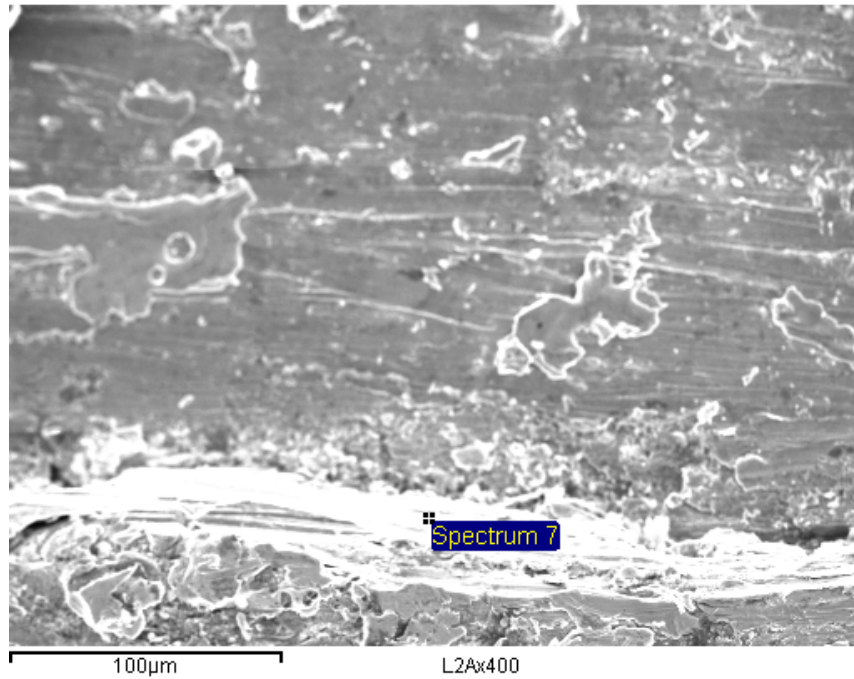


Figura A.63. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 7.

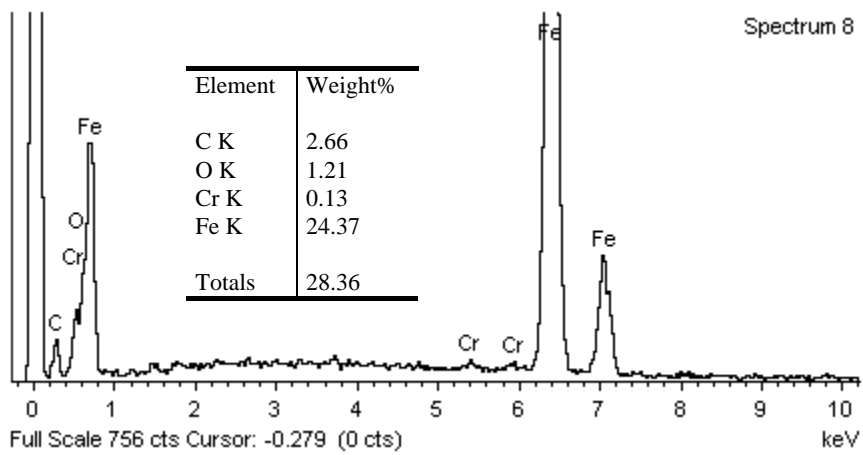
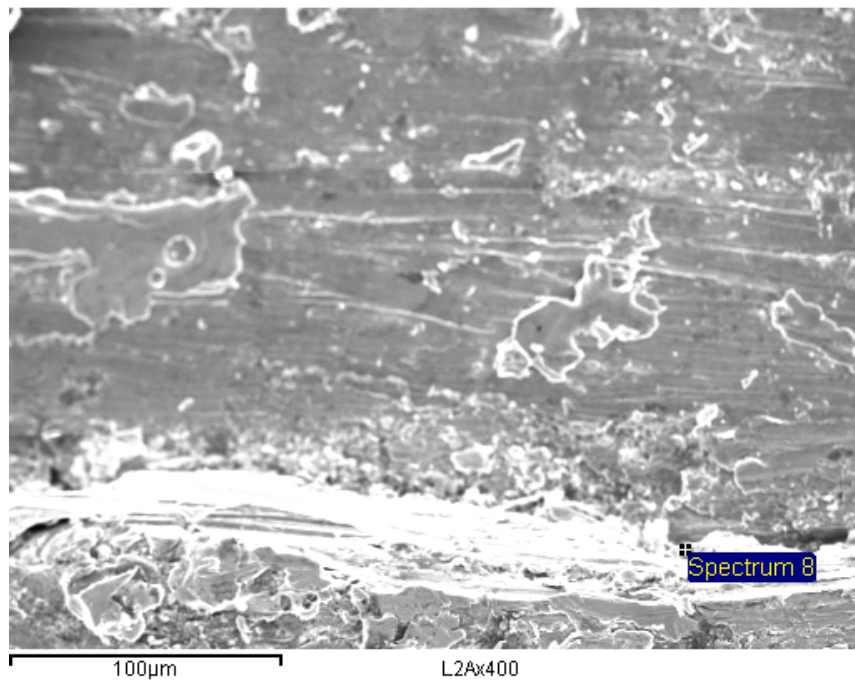


Figura A.64. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 8.

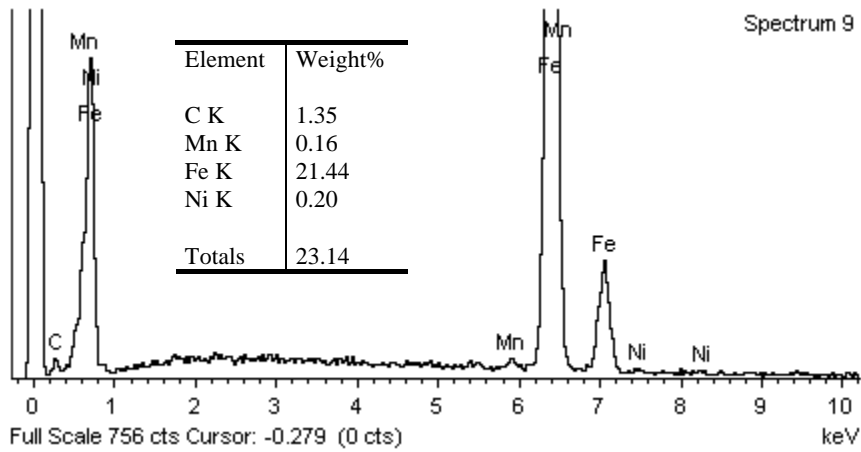
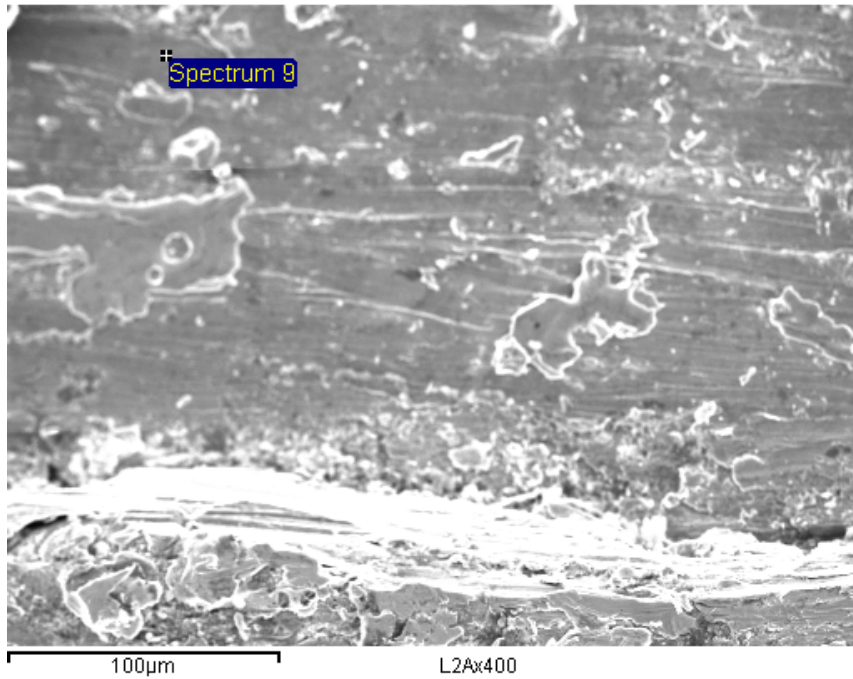


Figura A.65. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x400, SEM y EDS, Espectro 9.

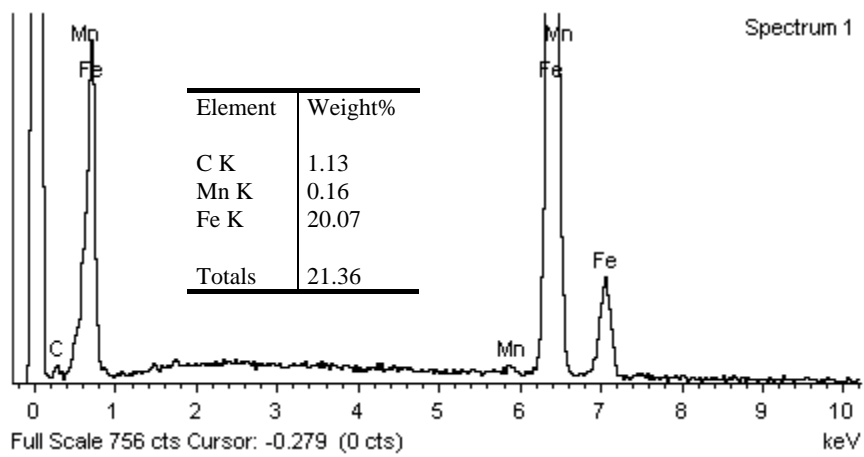
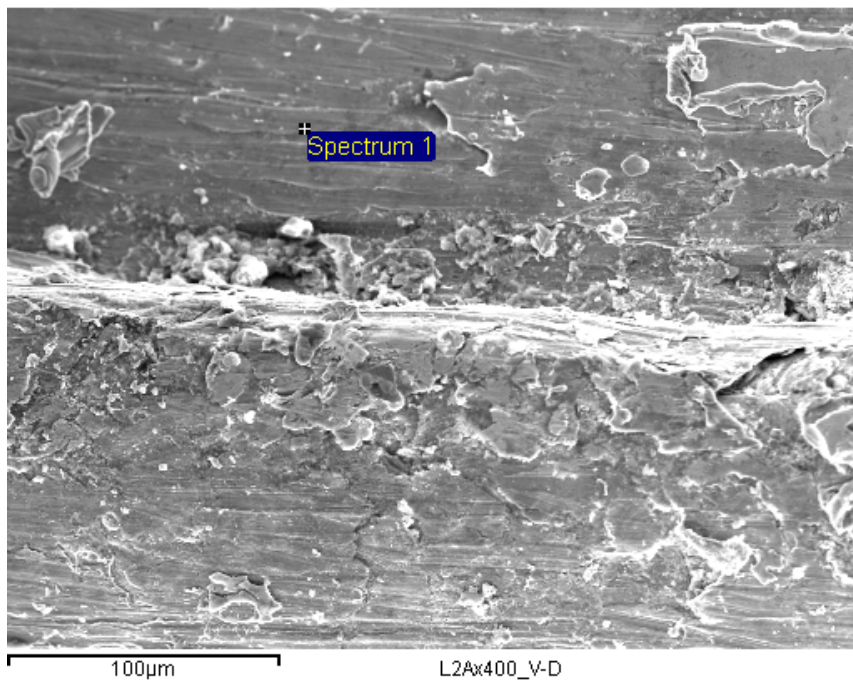


Figura A.66. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 1.

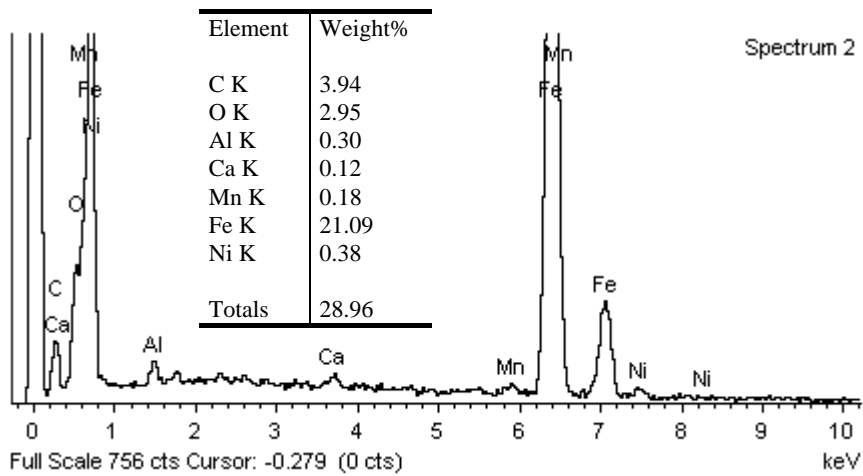
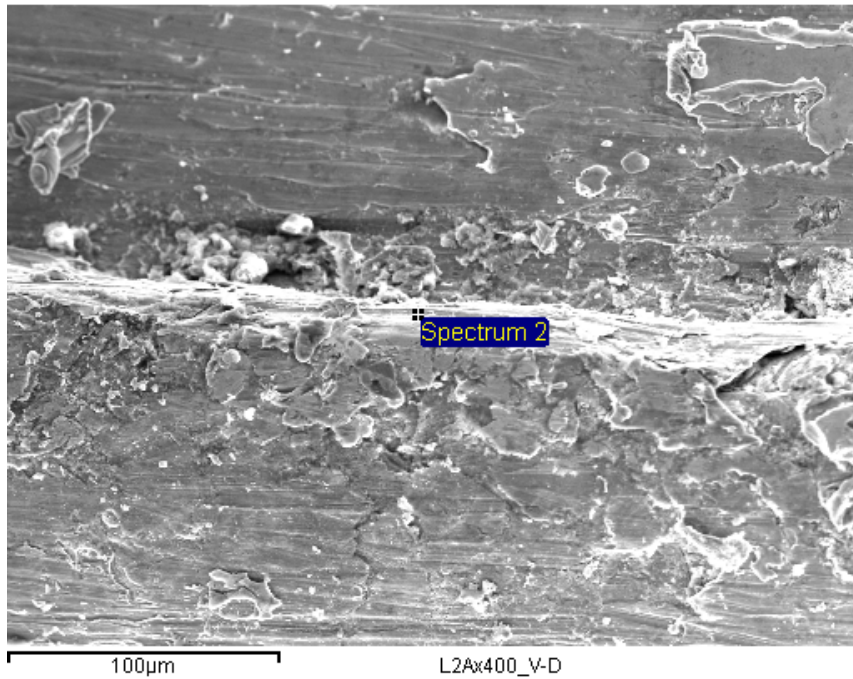


Figura A.67. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 2.

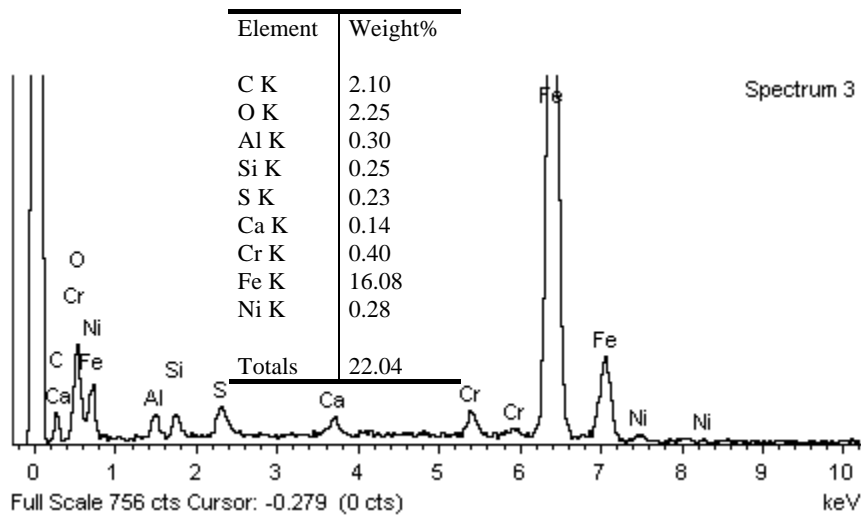
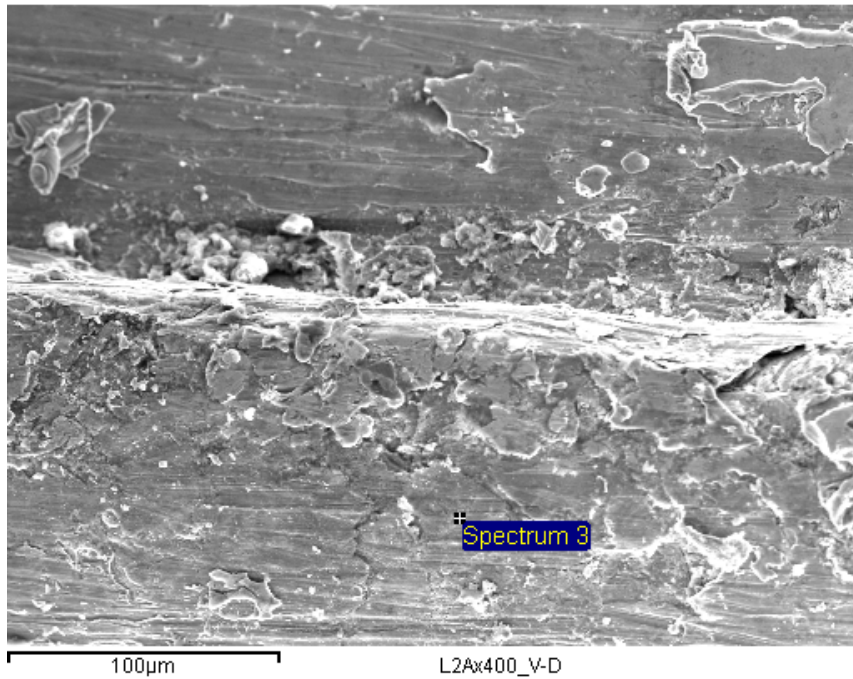


Figura A.68. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 3.

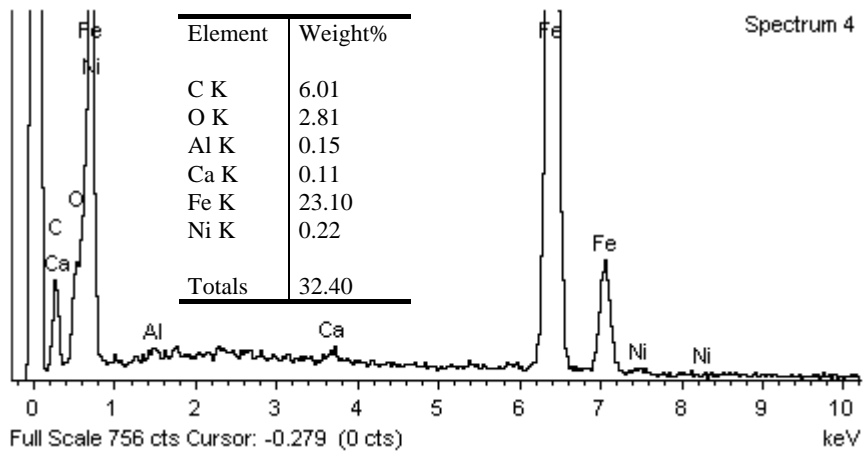
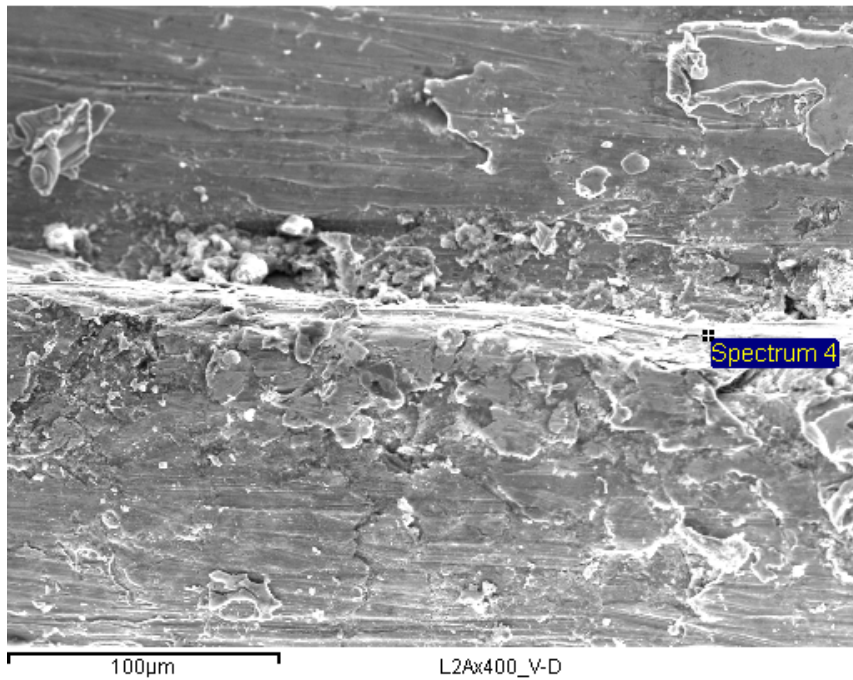


Figura A.69. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 4.

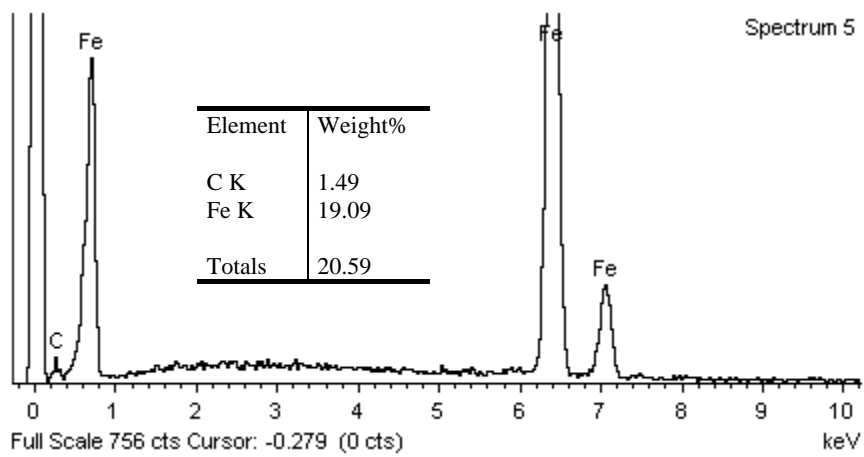
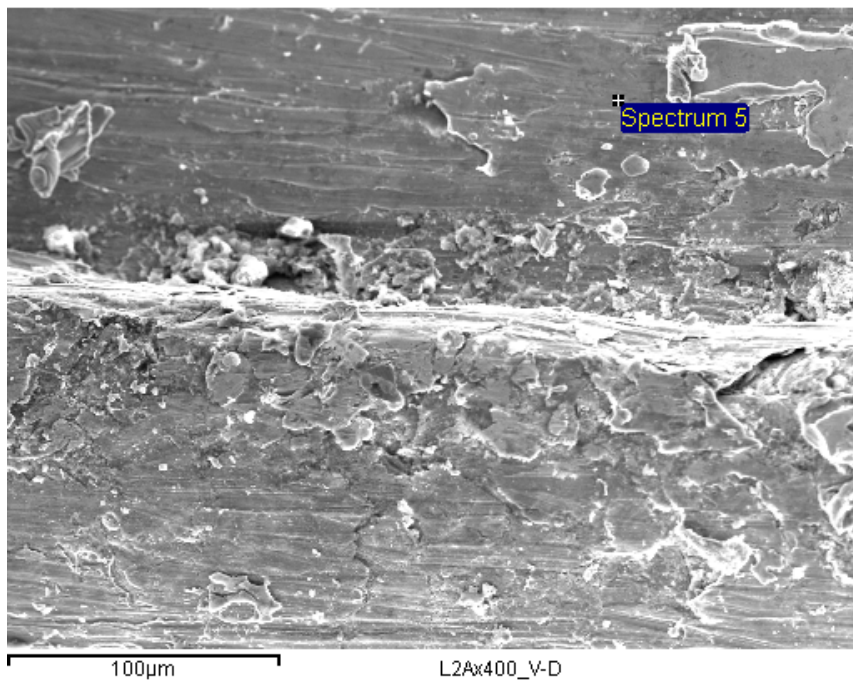


Figura A.70. Probeta L2D, Aleación 30%WC/70%Ni, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, Entre el Valle y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 5.

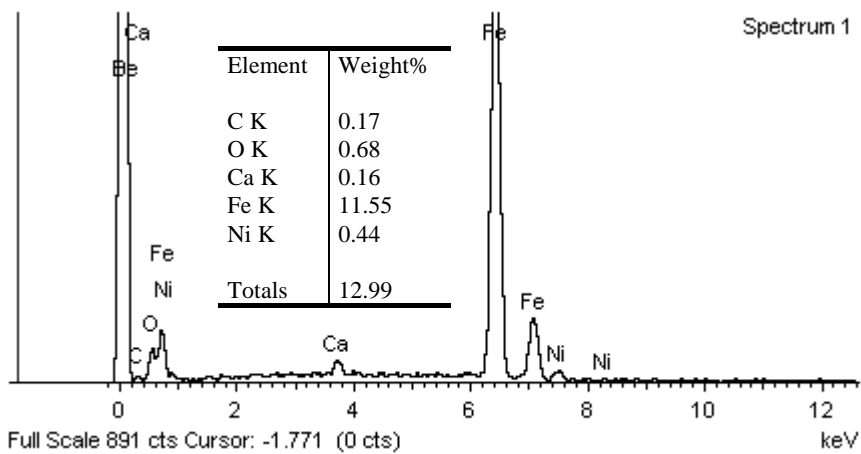
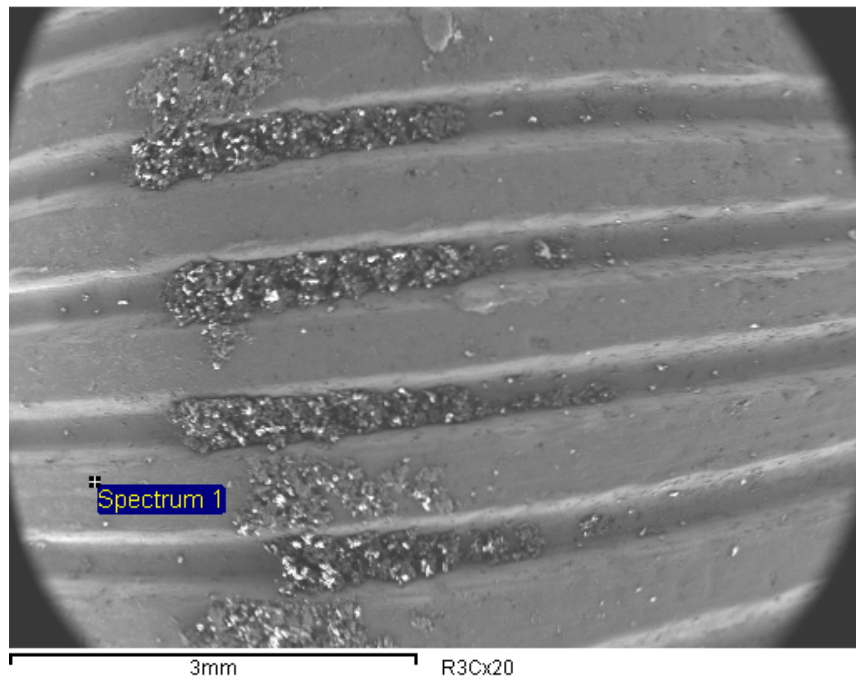


Figura A.71. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 1.

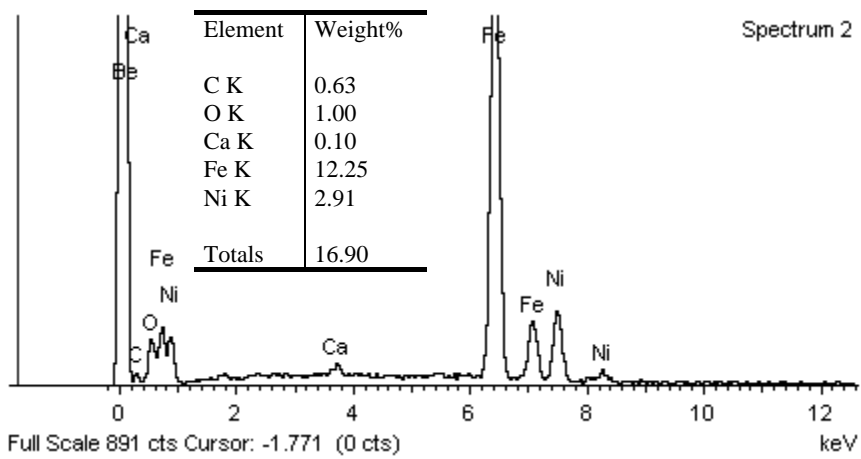
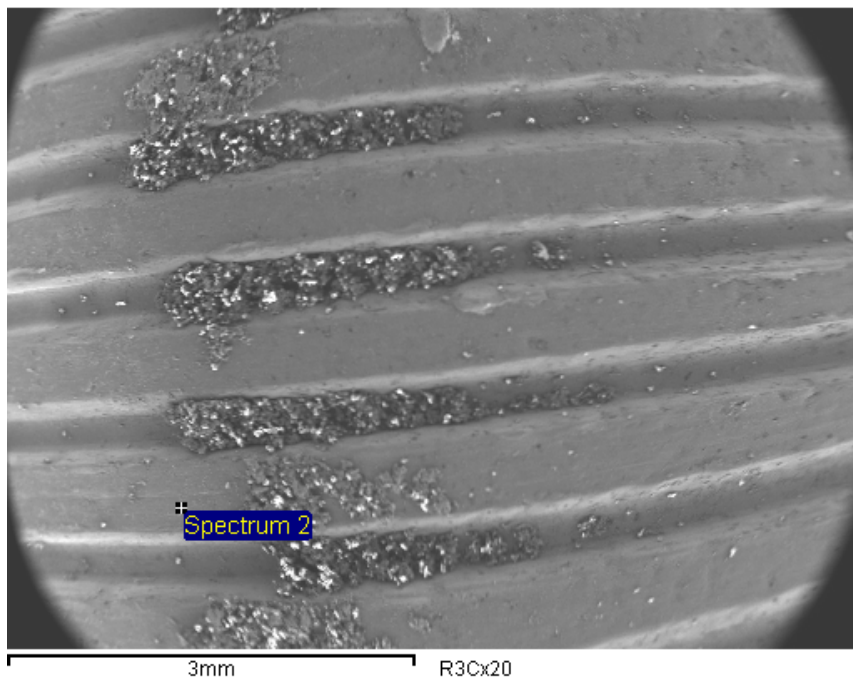


Figura A.72. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 2.

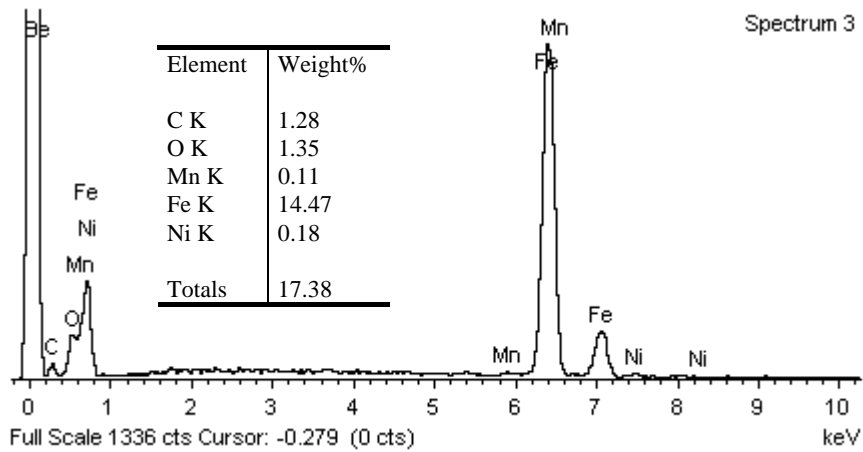
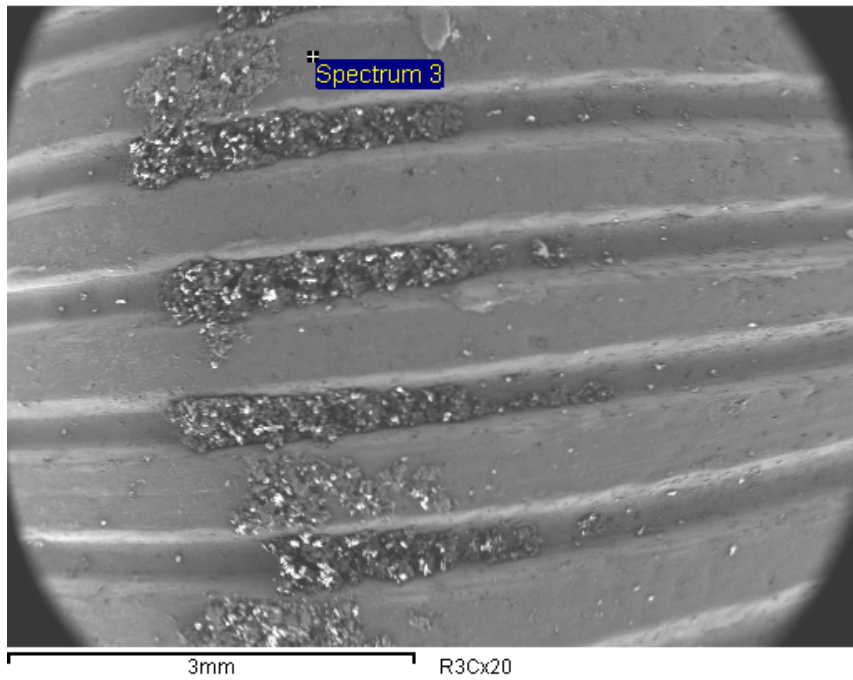


Figura A.73. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 3.

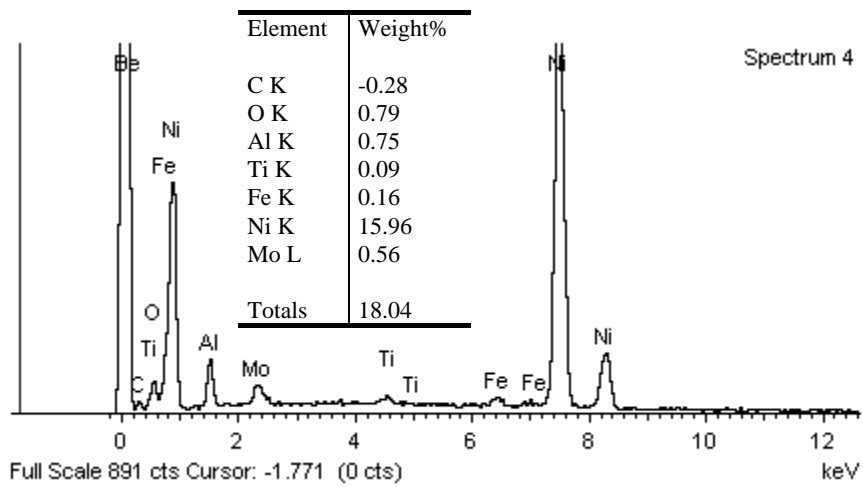
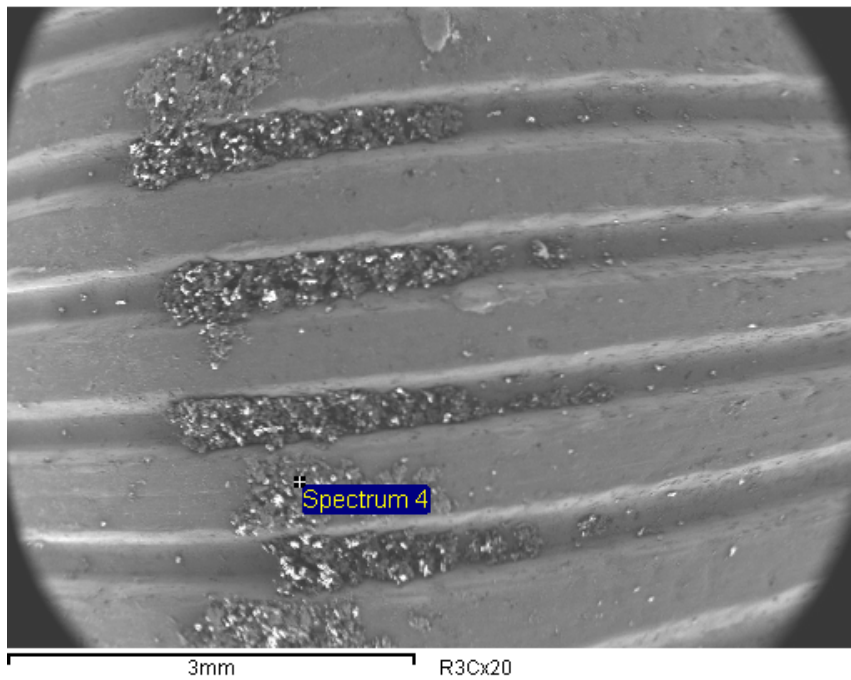


Figura A.74. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 4.

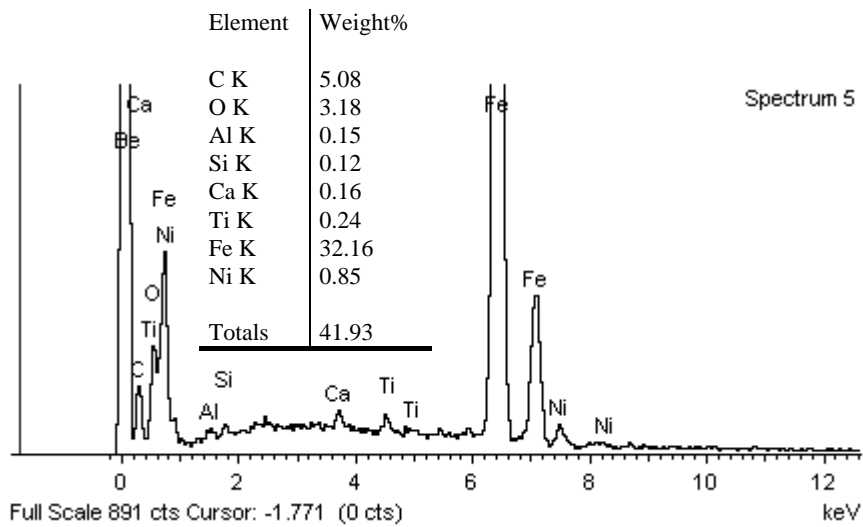
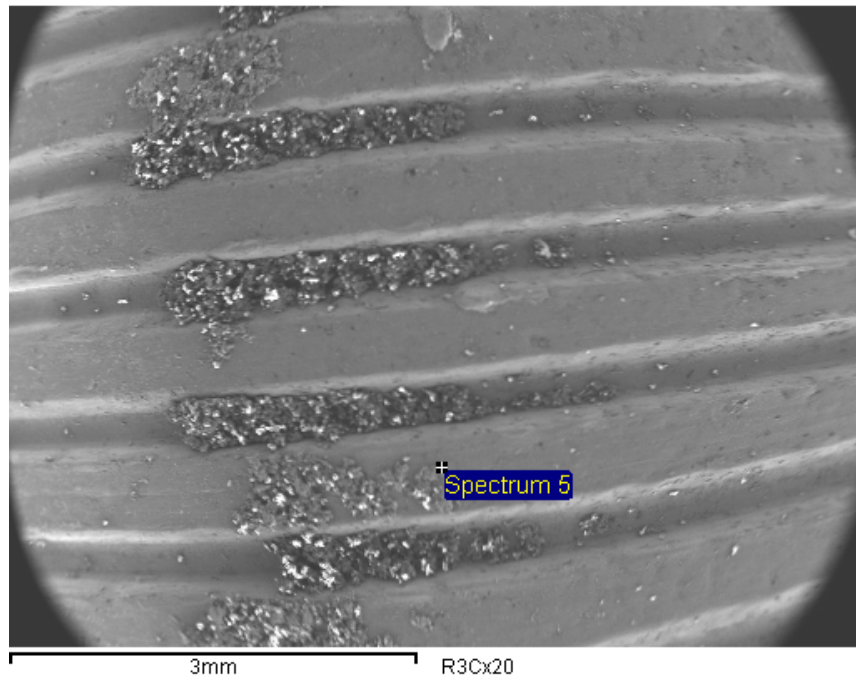


Figura A.75. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 5.

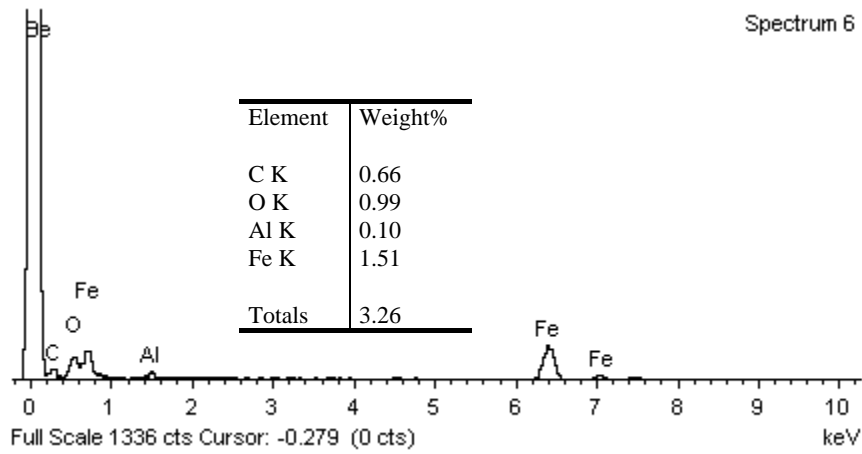
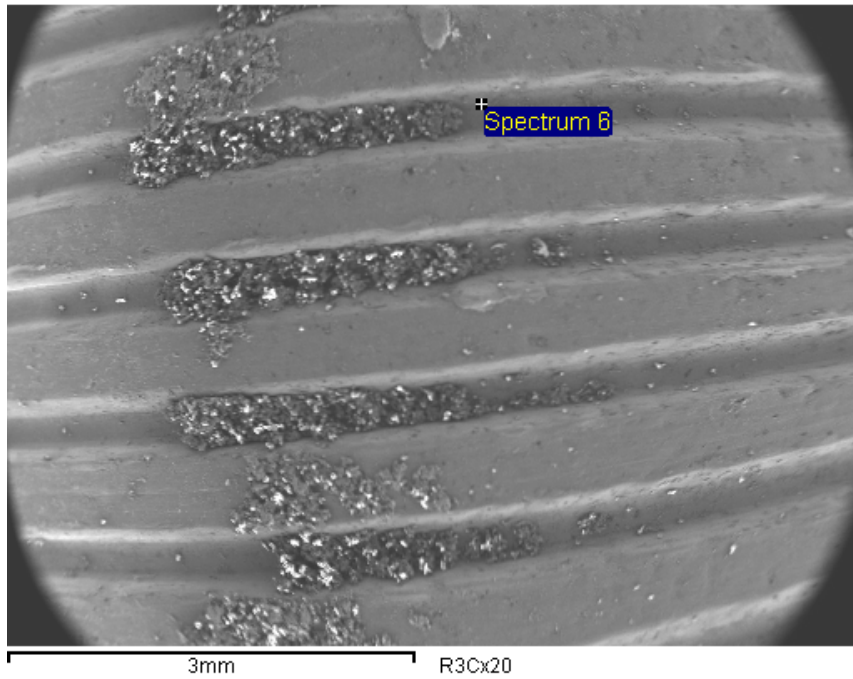


Figura A.76. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 6.

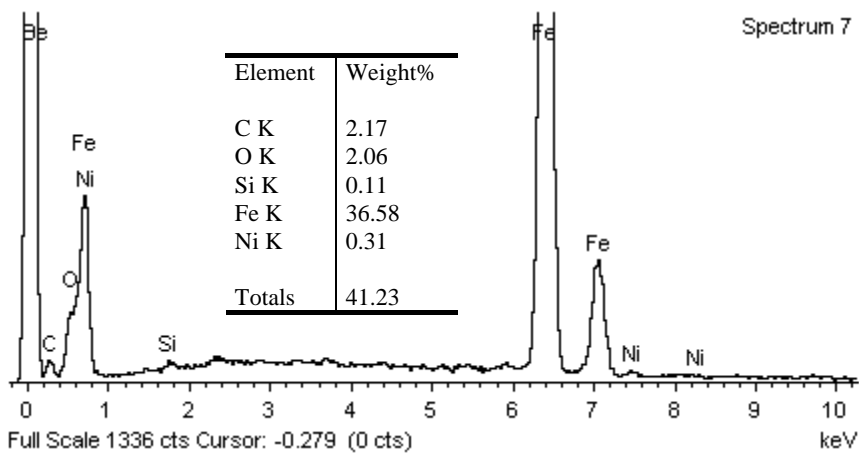
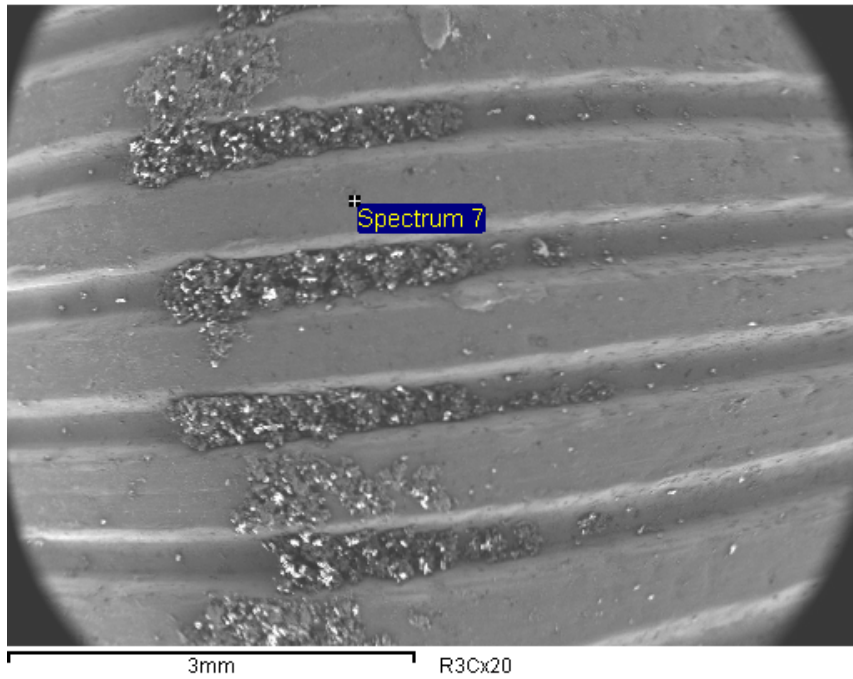


Figura A.77. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 7.

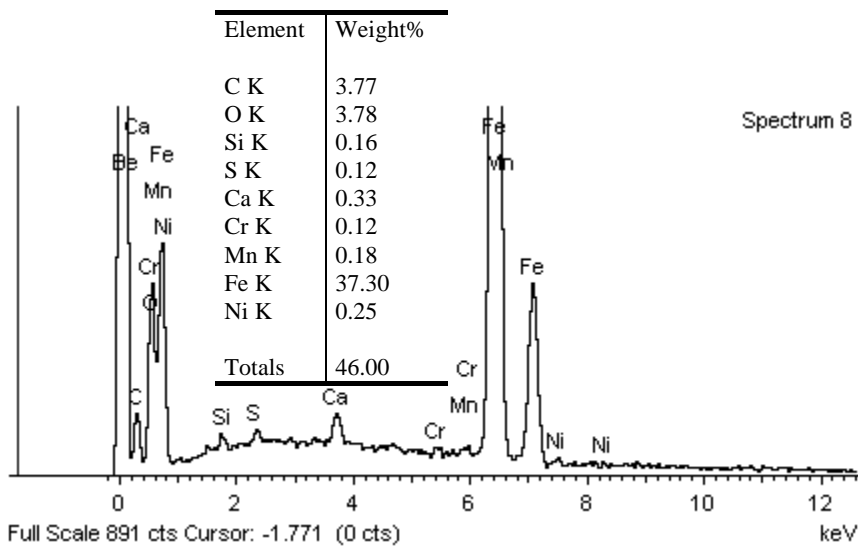
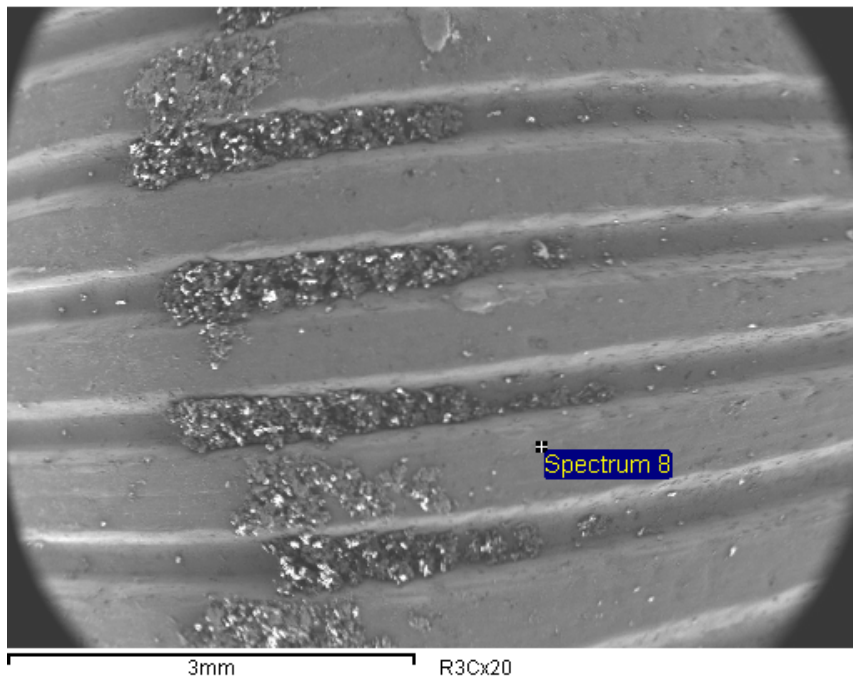


Figura A.78. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 8.

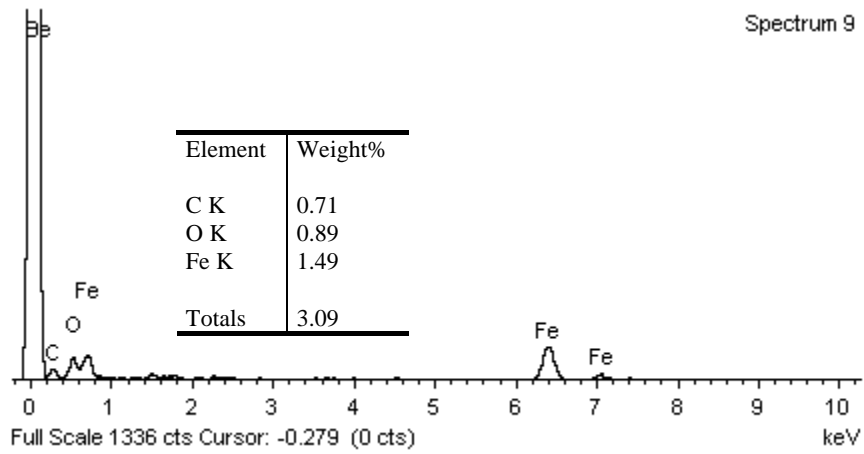
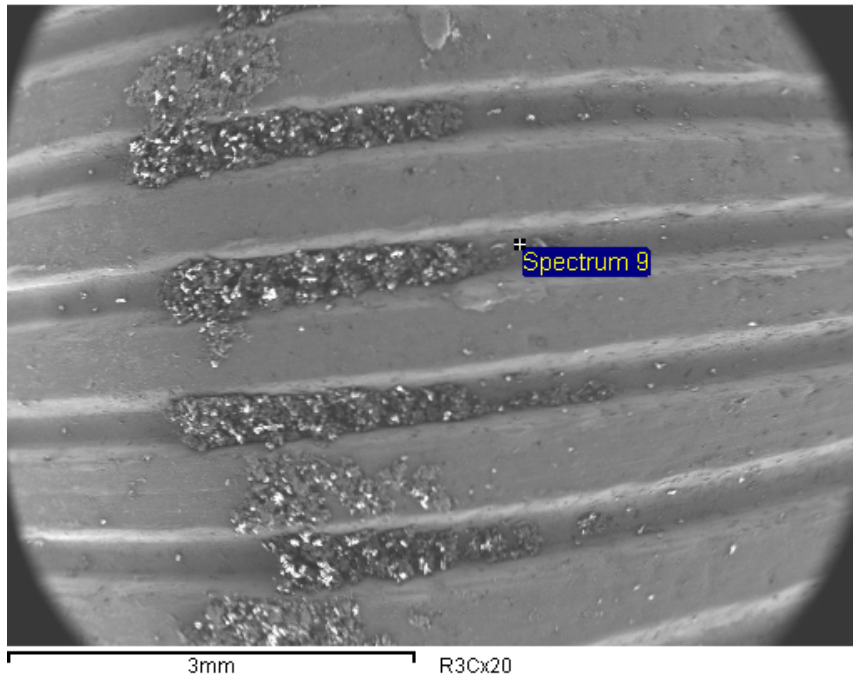


Figura A.79. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 9.

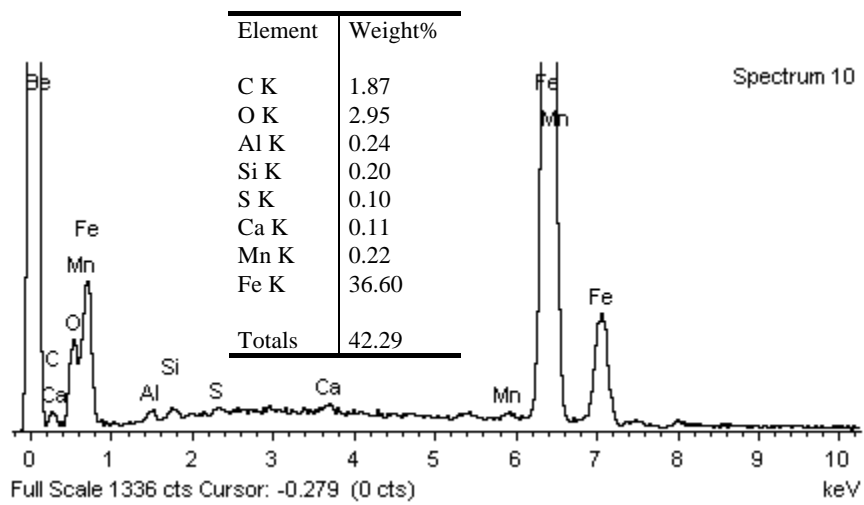
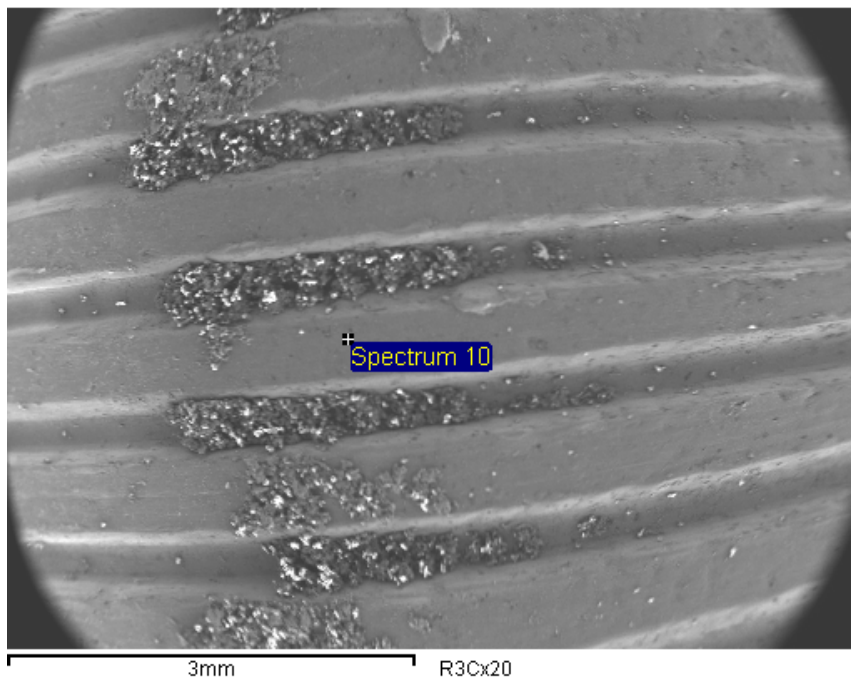


Figura A.80. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x20, SEM y EDS, Espectro 10.

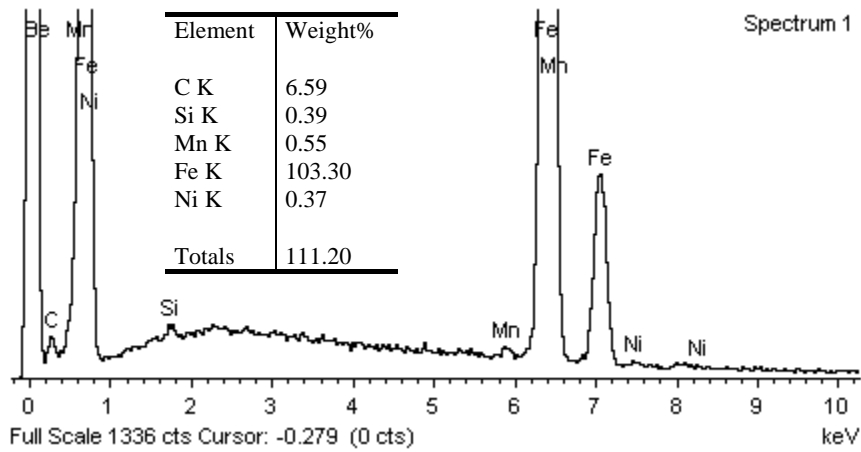
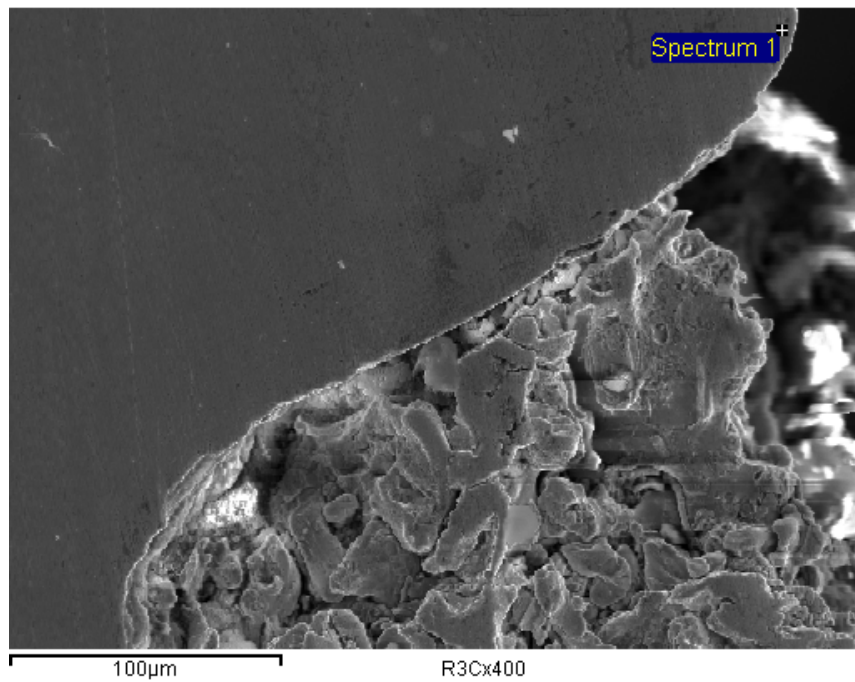


Figura A.81. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS, Espectro 1.

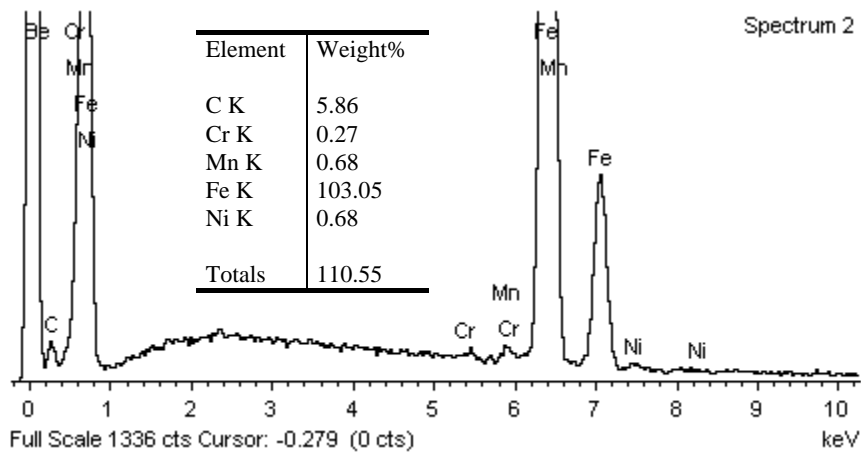
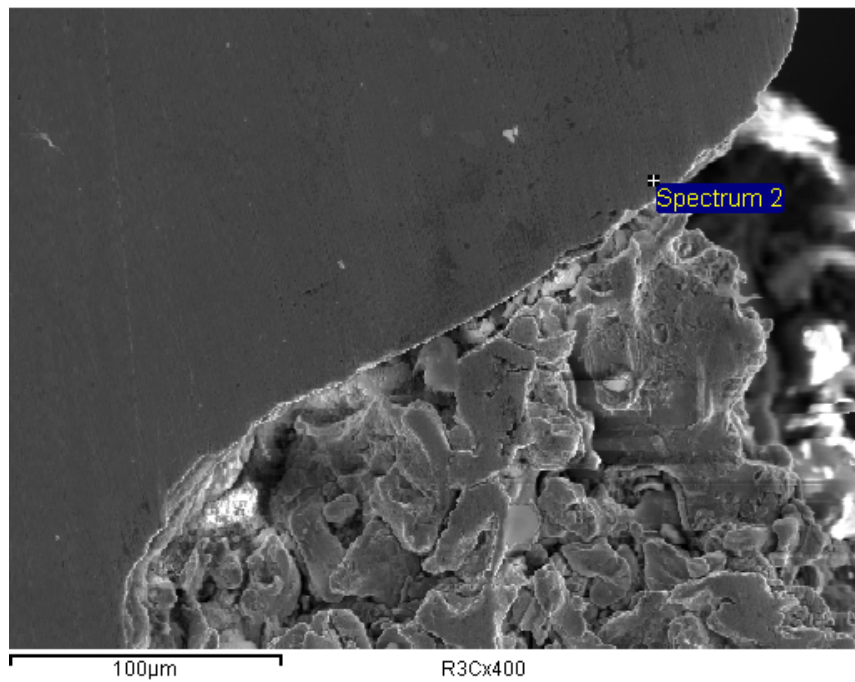


Figura A.82. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS, Espectro 2.

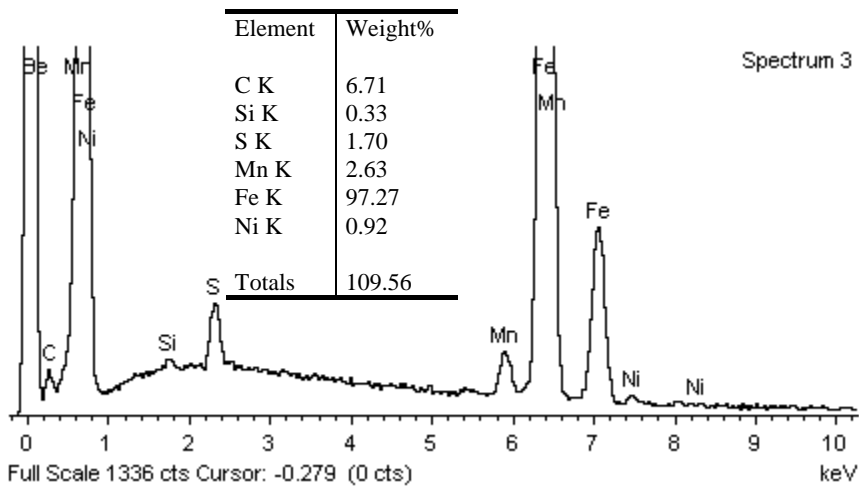
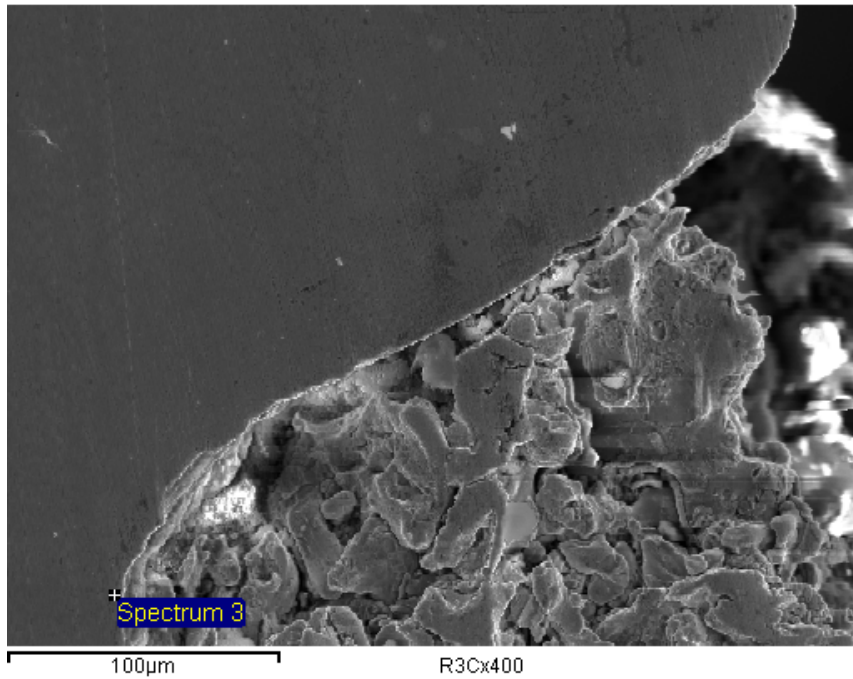


Figura A.83. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS, Espectro 3.

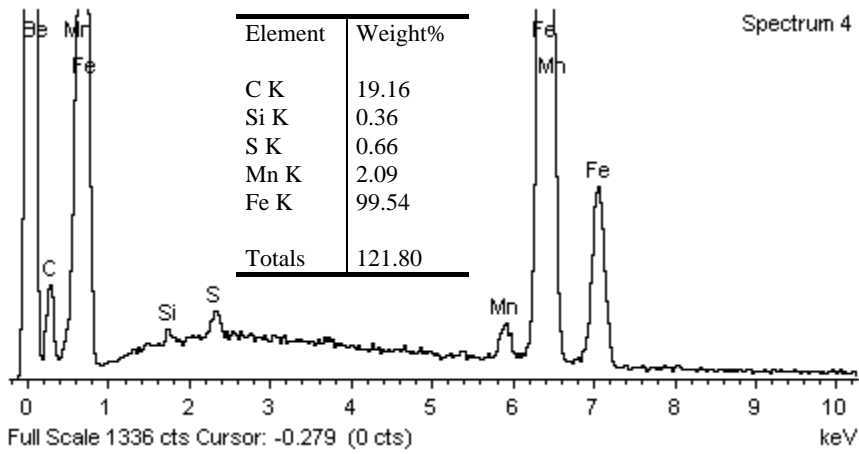
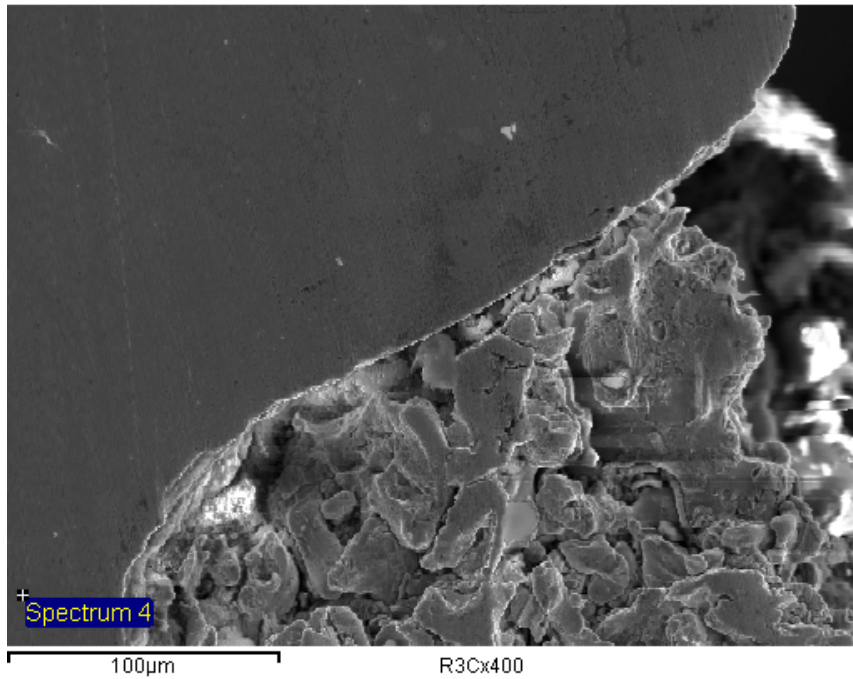


Figura A.84 Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS, Espectro 4.

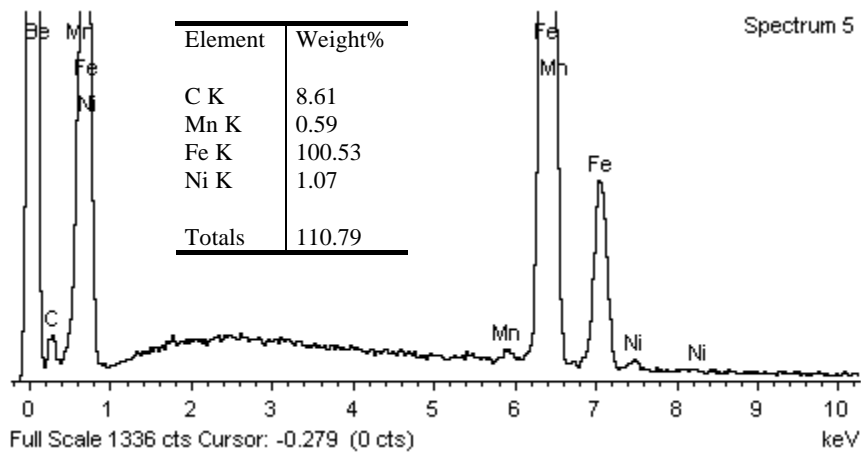
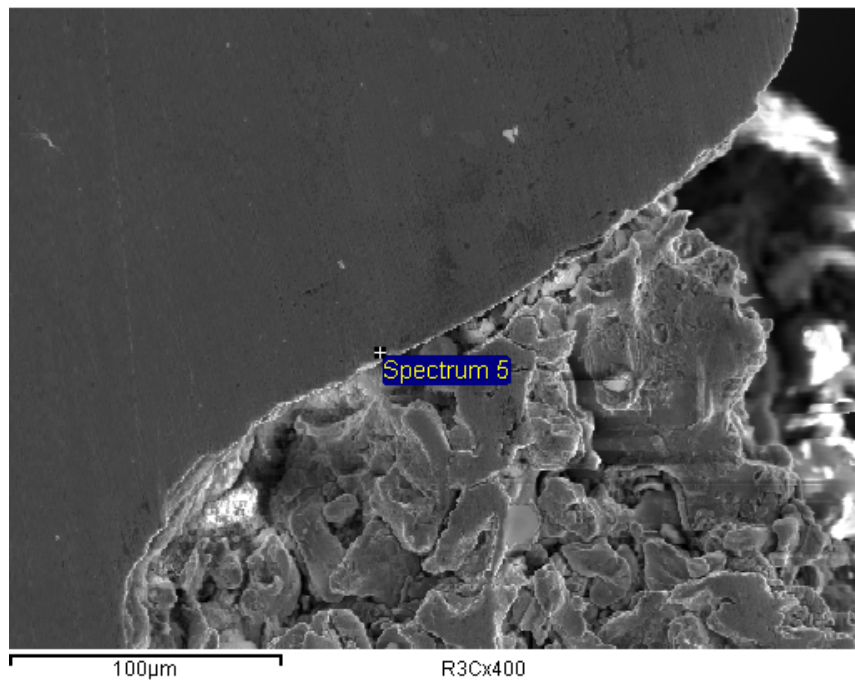


Figura A.85. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS, Espectro 5.

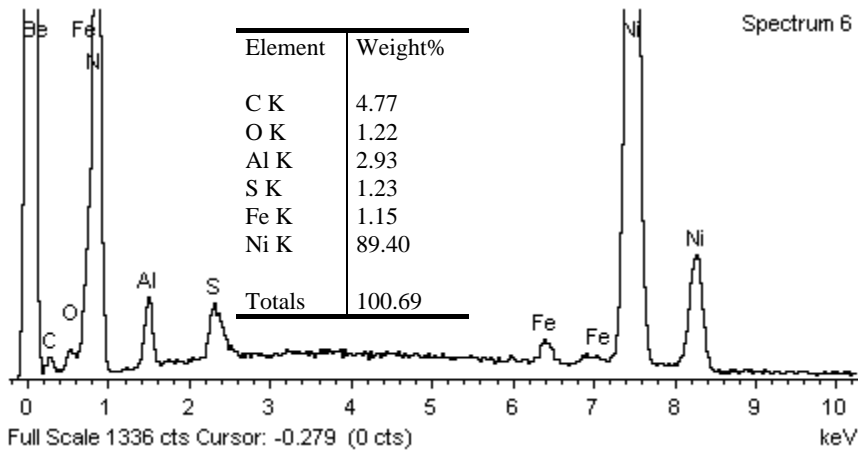
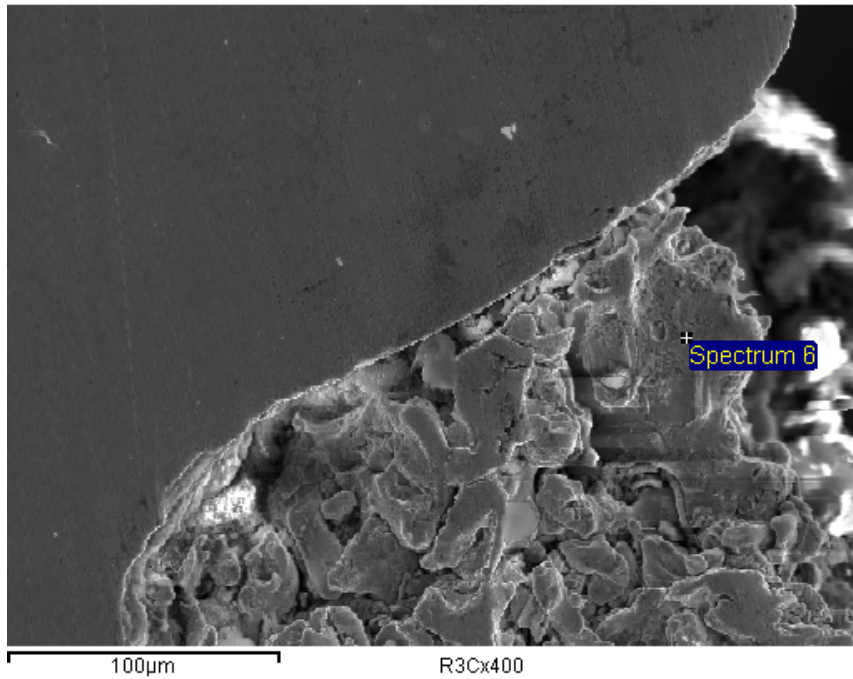


Figura A.86. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS, Espectro 6.

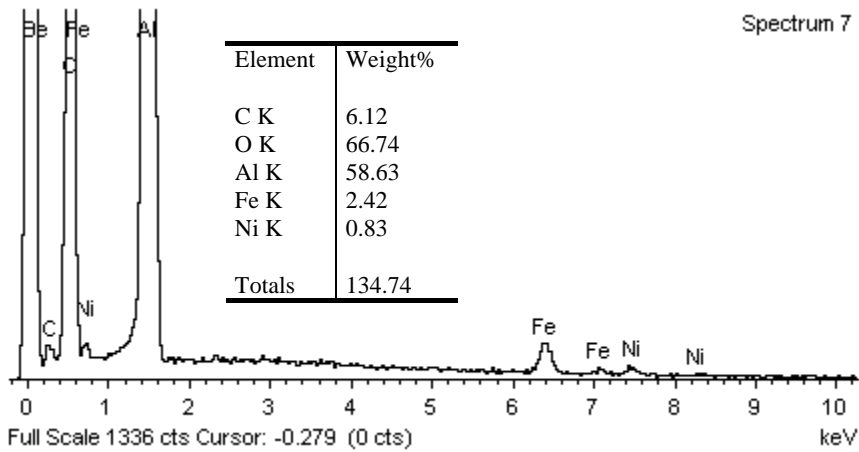
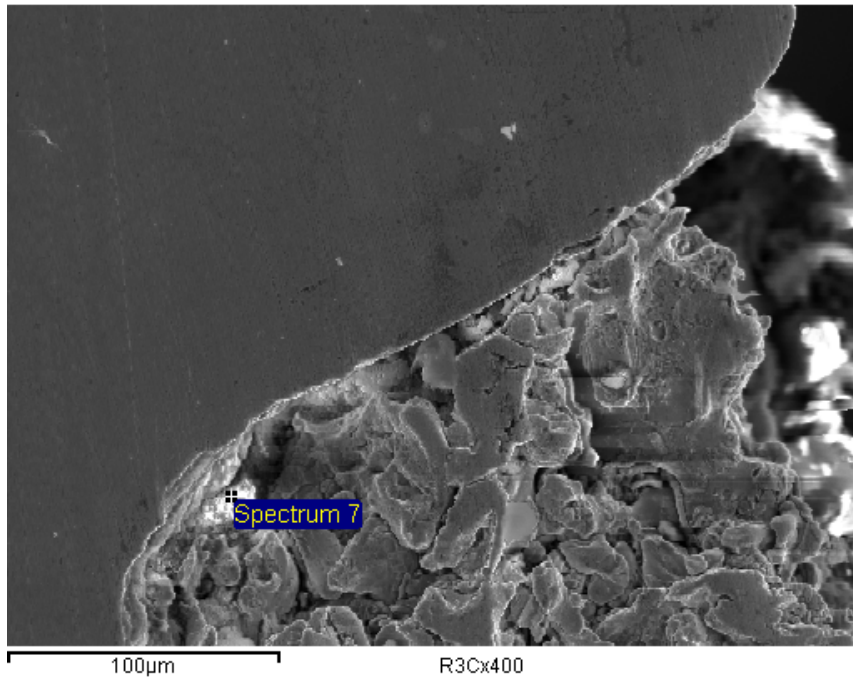


Figura A.87. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, x400, SEM y EDS, Espectro 7.

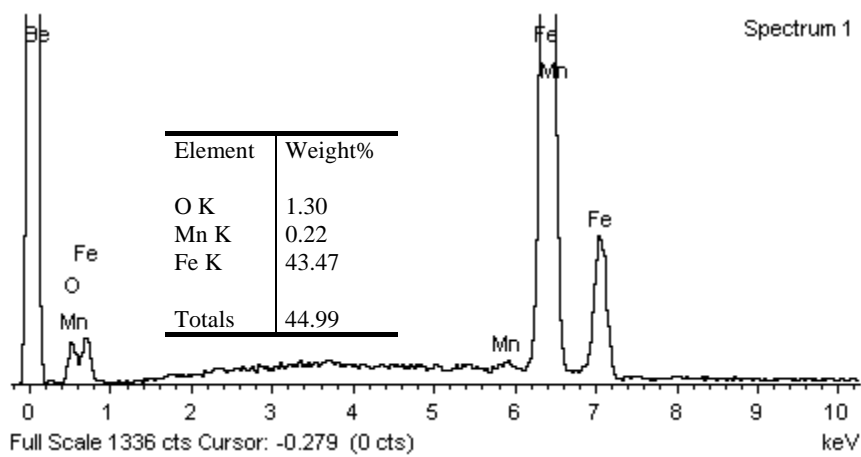
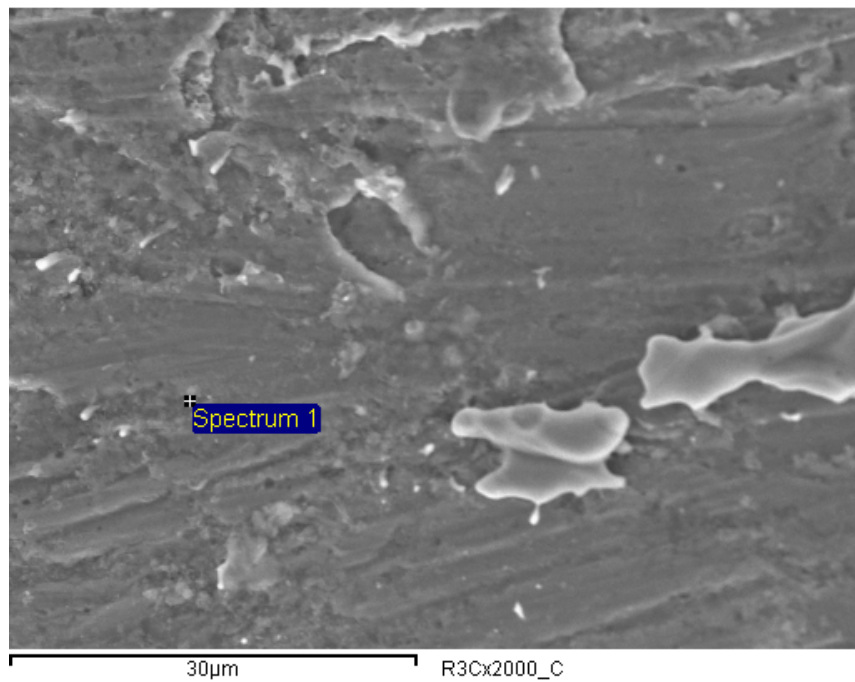


Figura A.88. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 1.

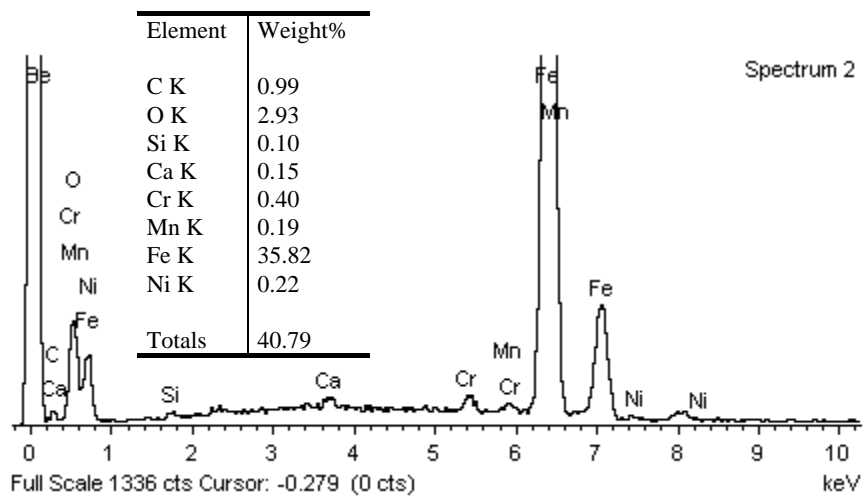
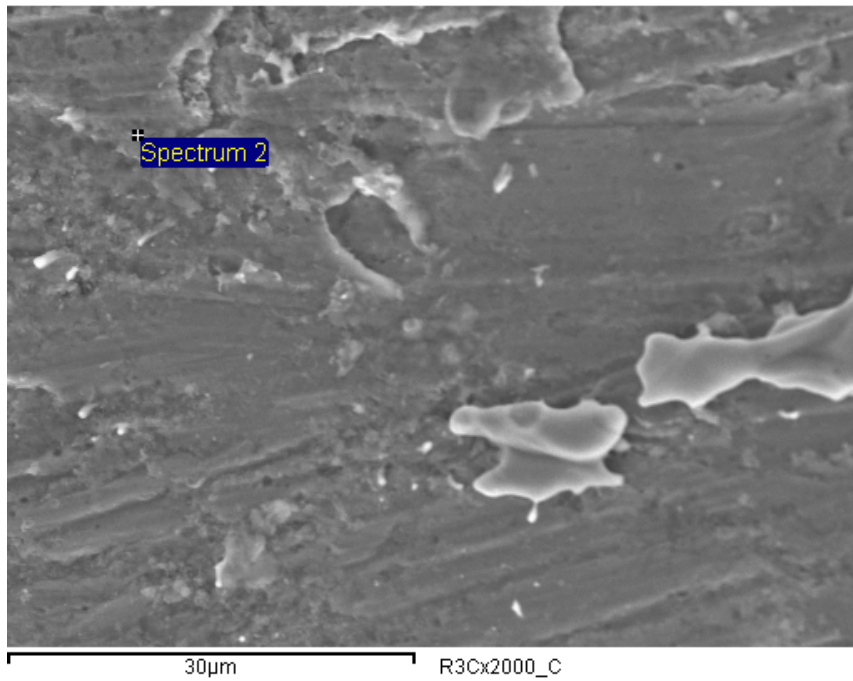


Figura A.89. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 2.

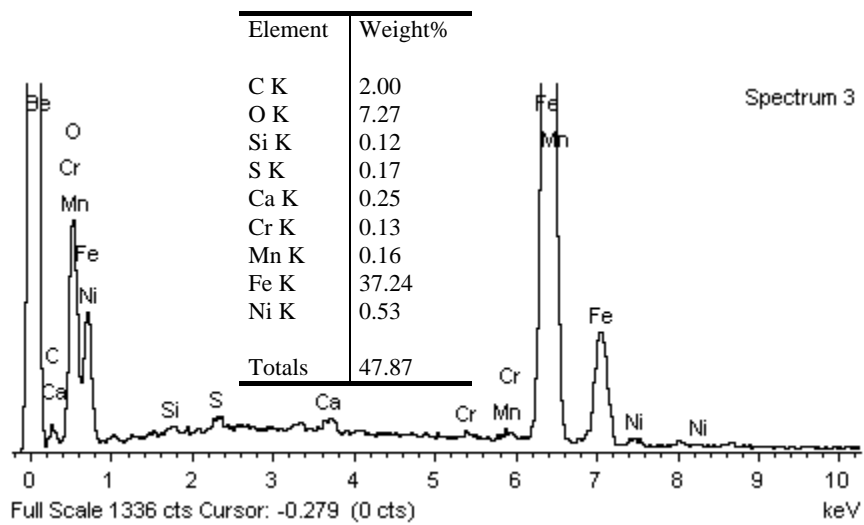
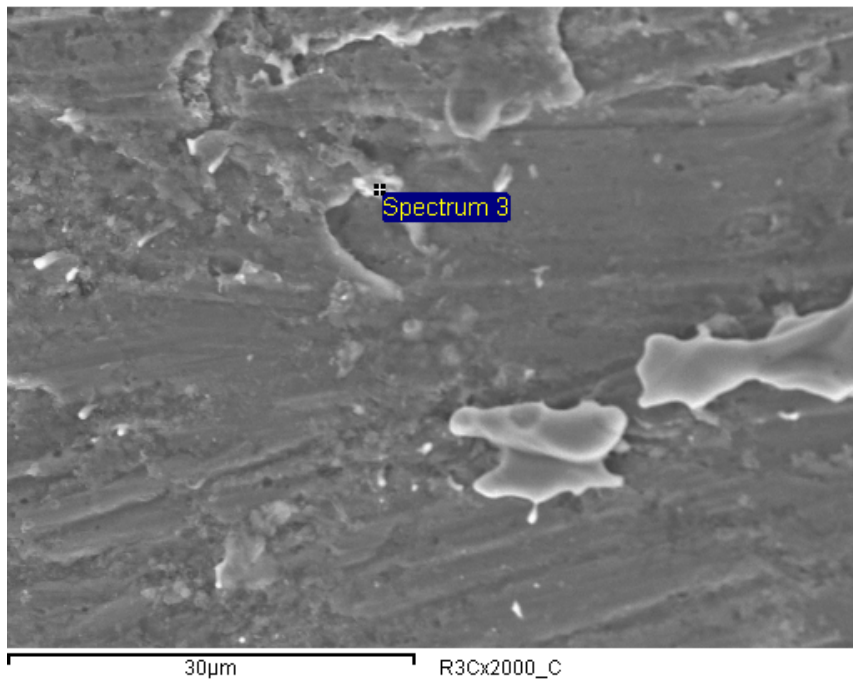


Figura A.90. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 3.

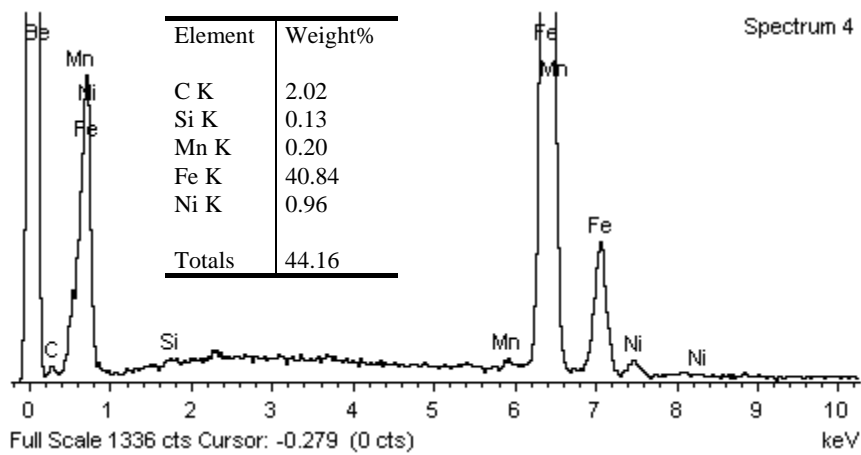
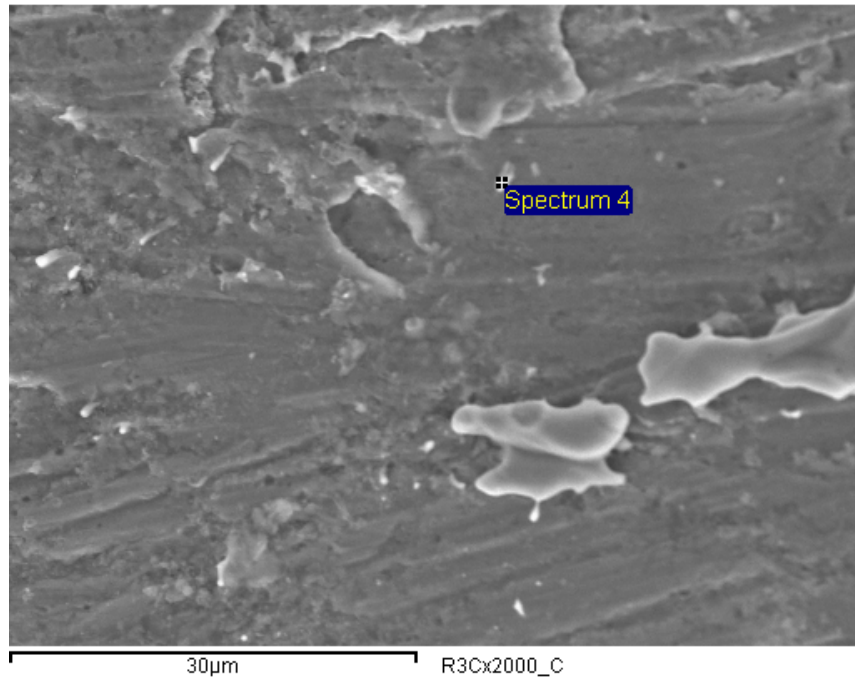


Figura A.91. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 4.

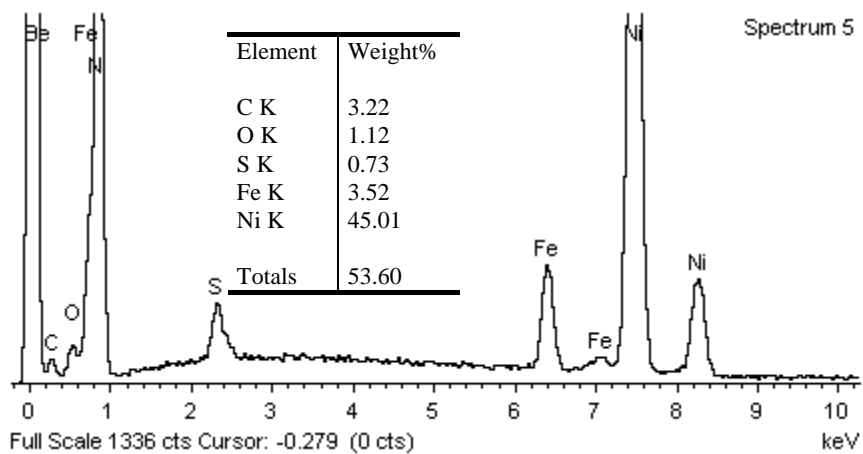
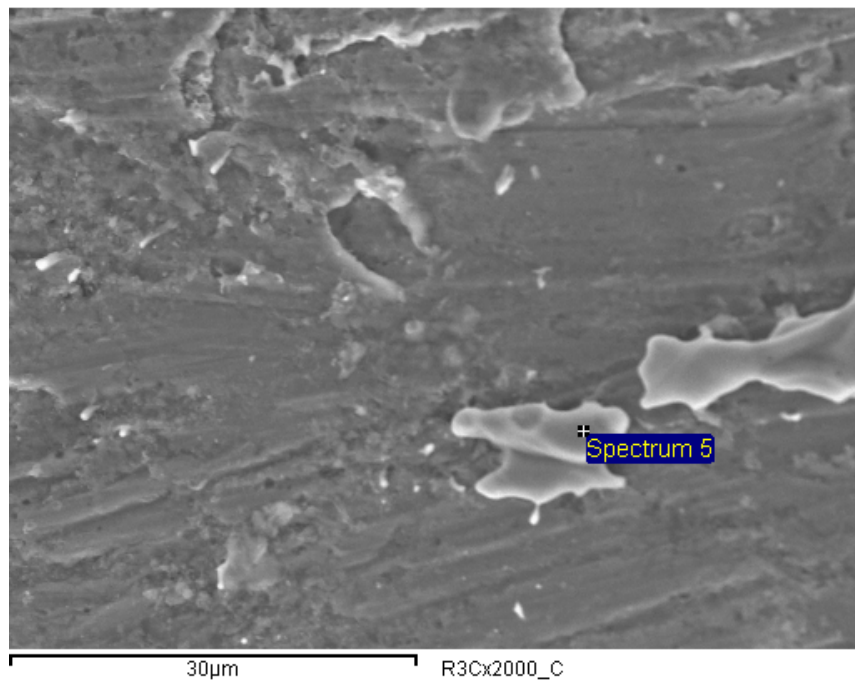


Figura A.92. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 5.

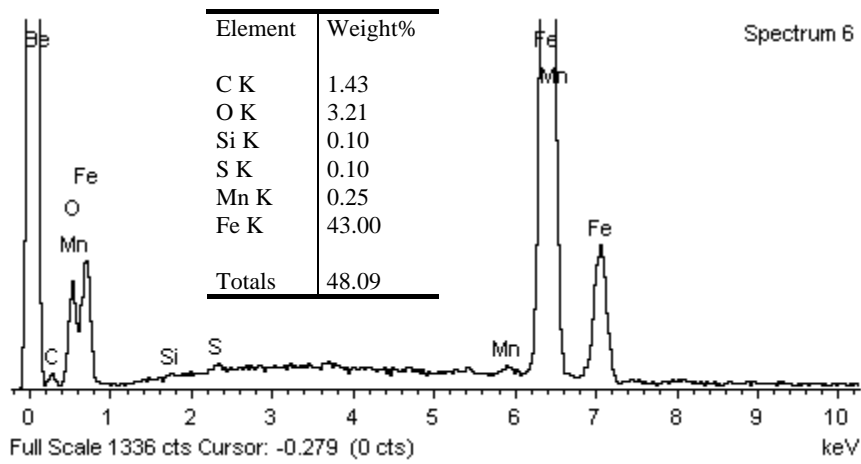
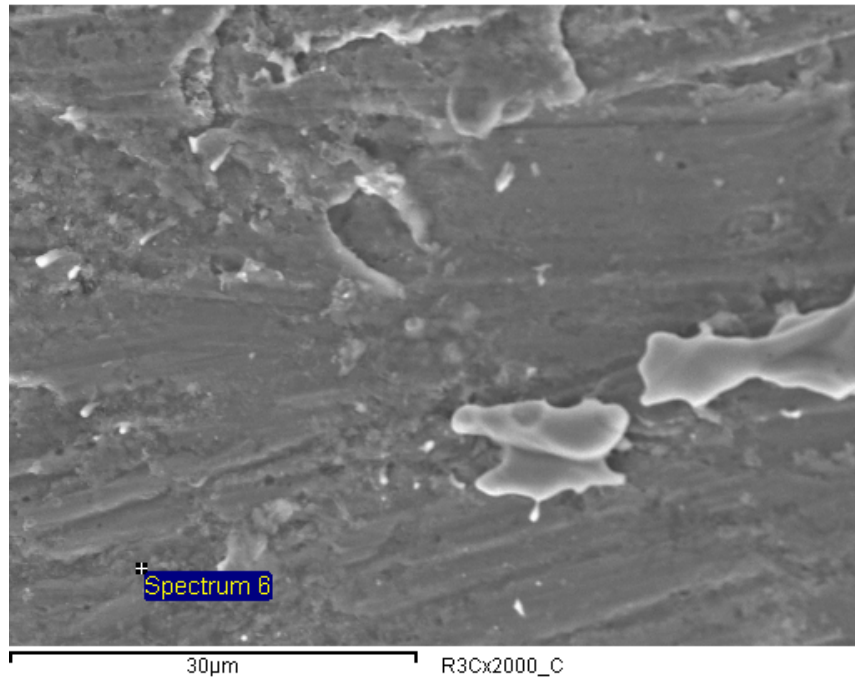


Figura A.93. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 6.

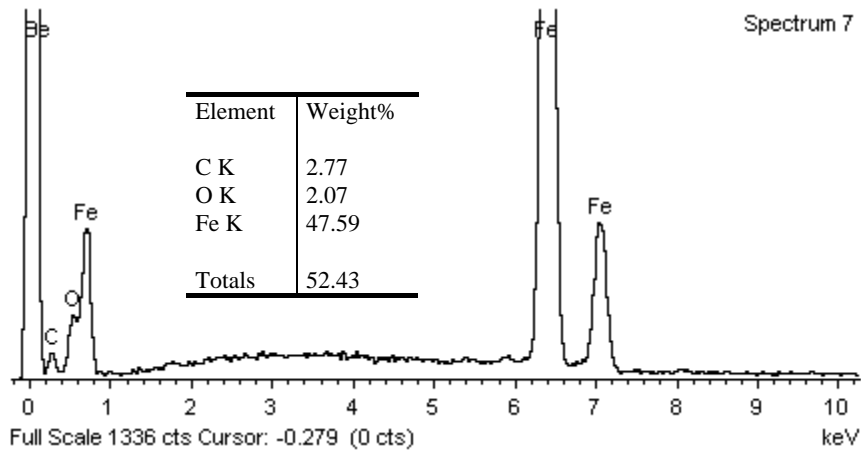
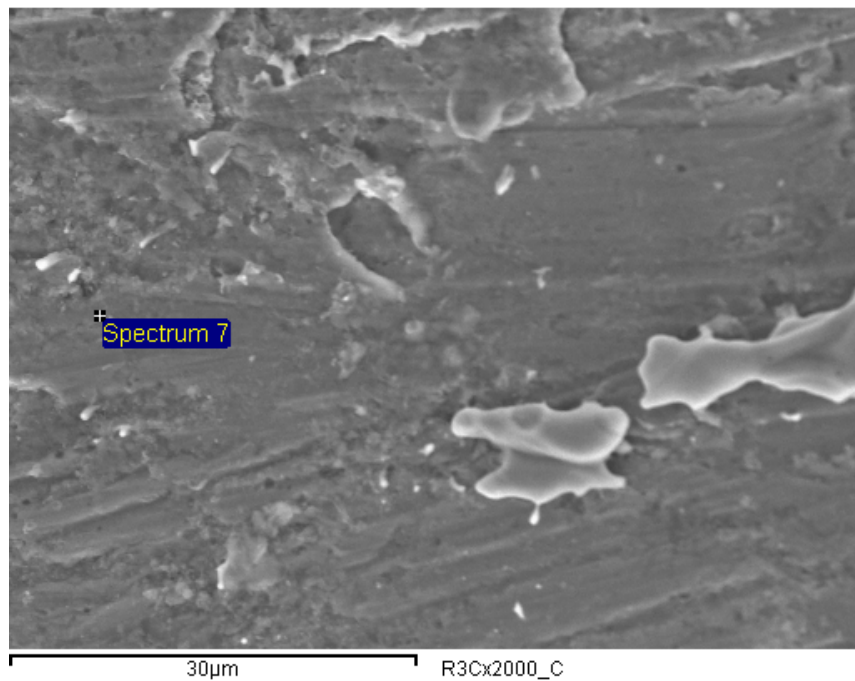


Figura A.94. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 7.

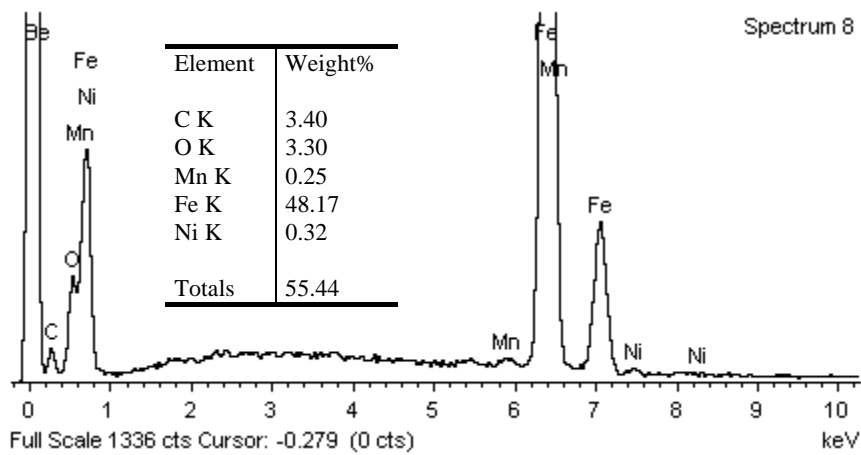
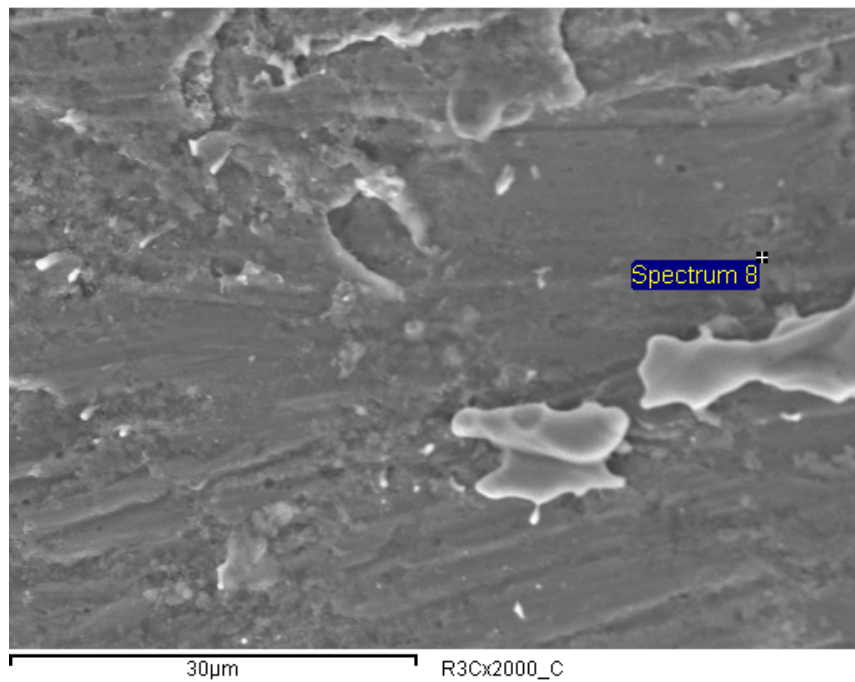


Figura A.95. Probeta R3C, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 8.

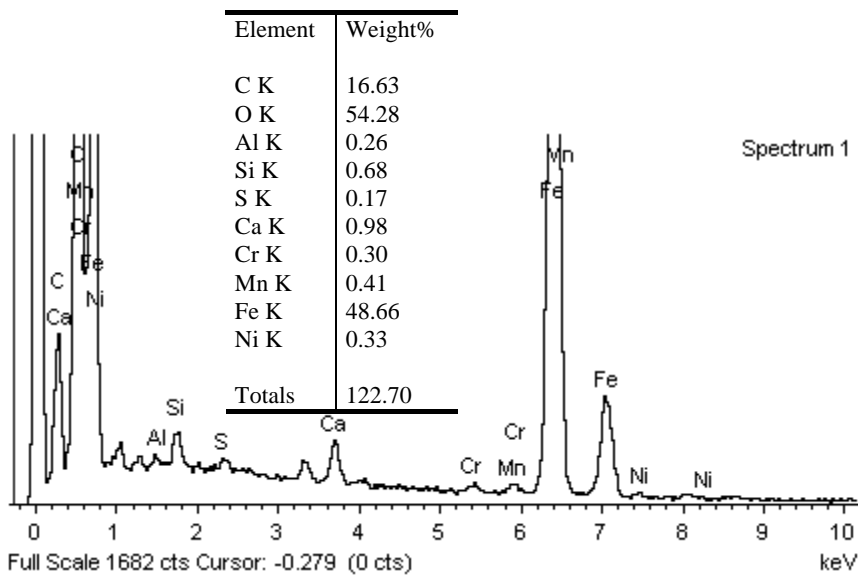
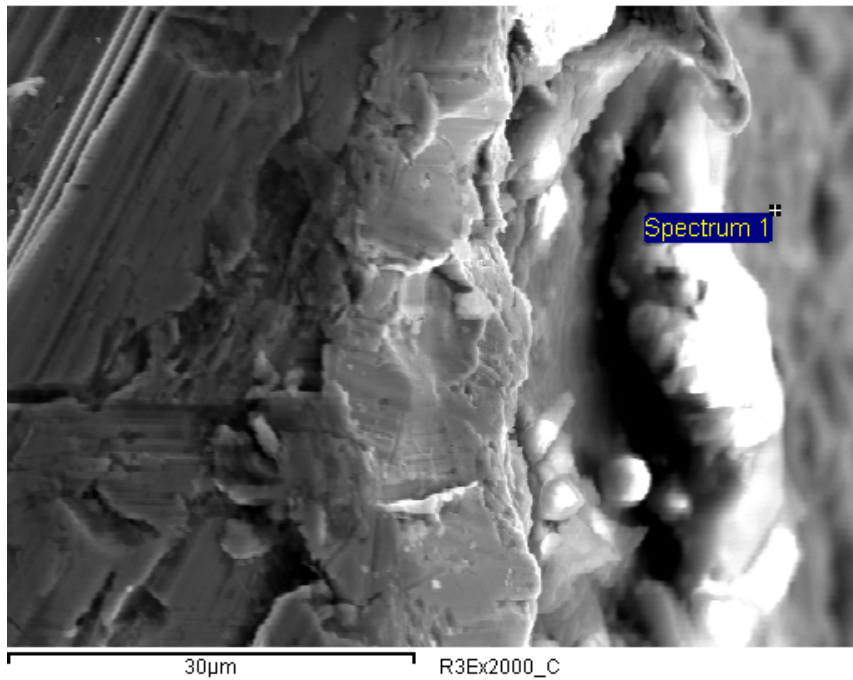


Figura A.96. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 1.

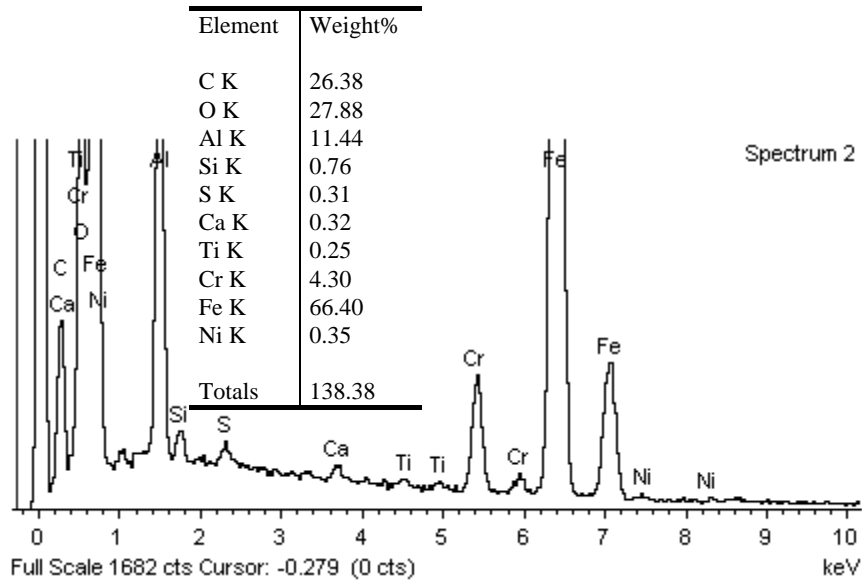
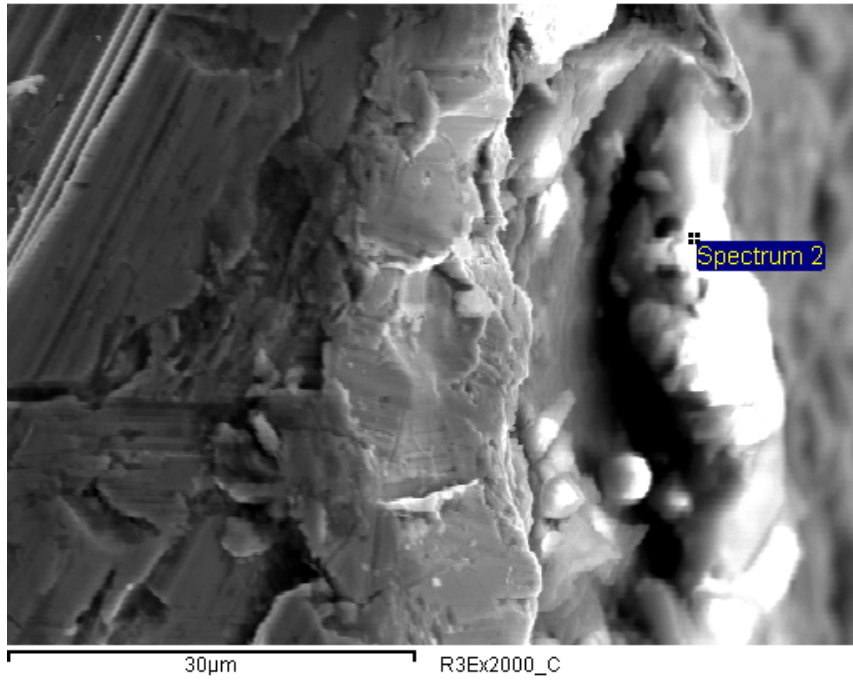


Figura A.97. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 2.

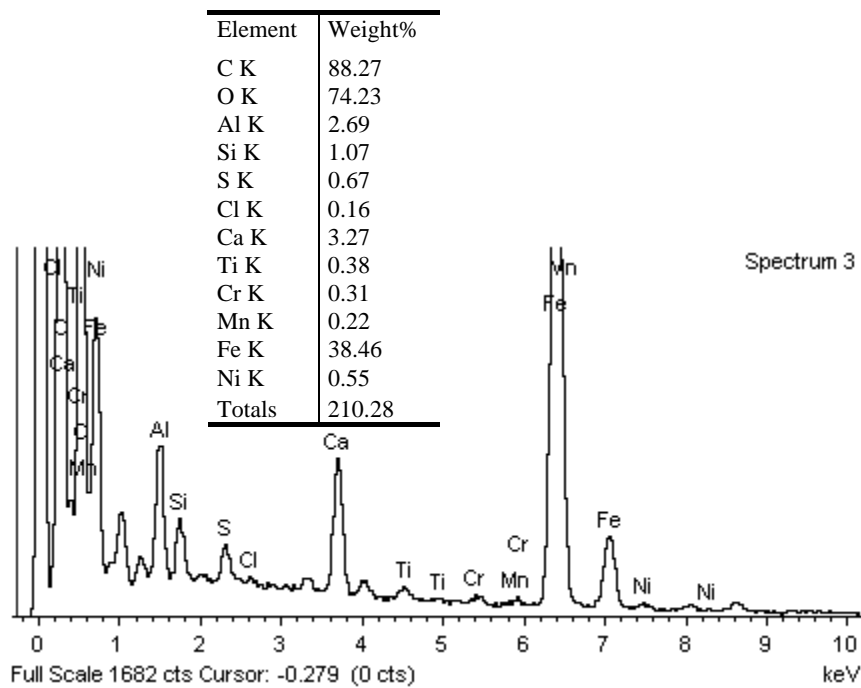
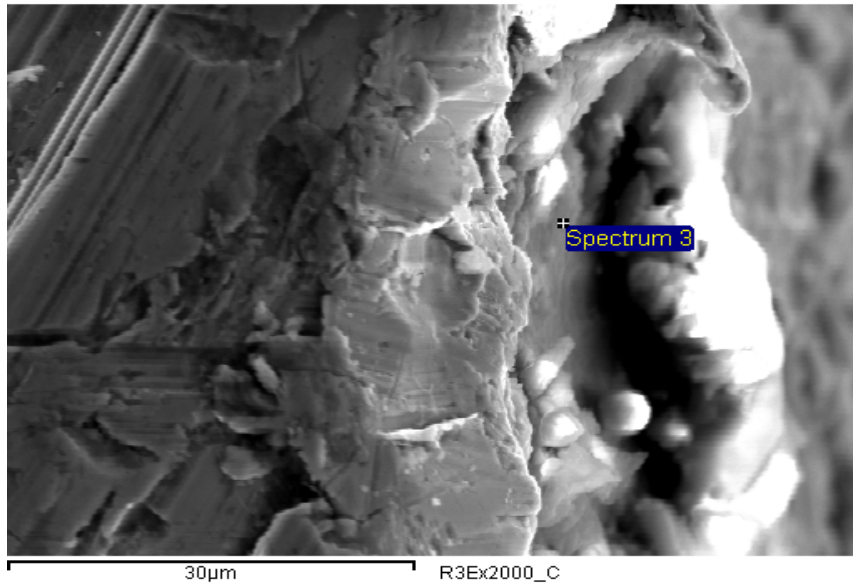


Figura A.98. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 3.

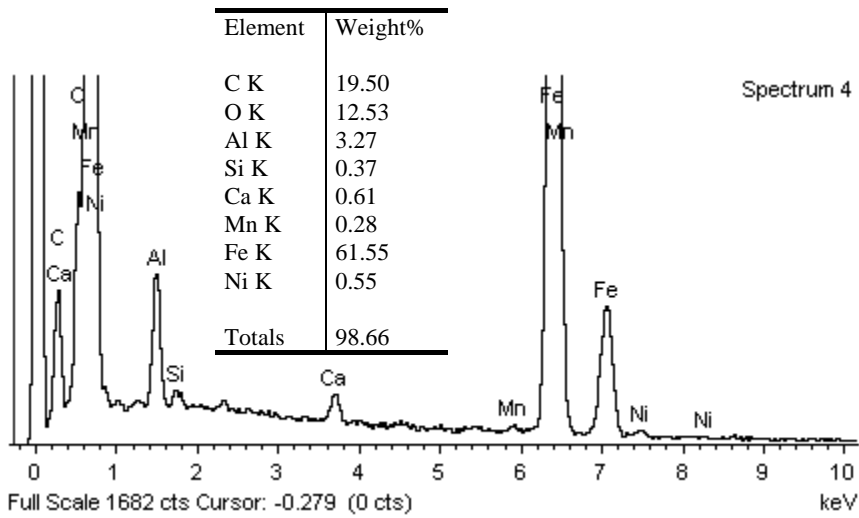
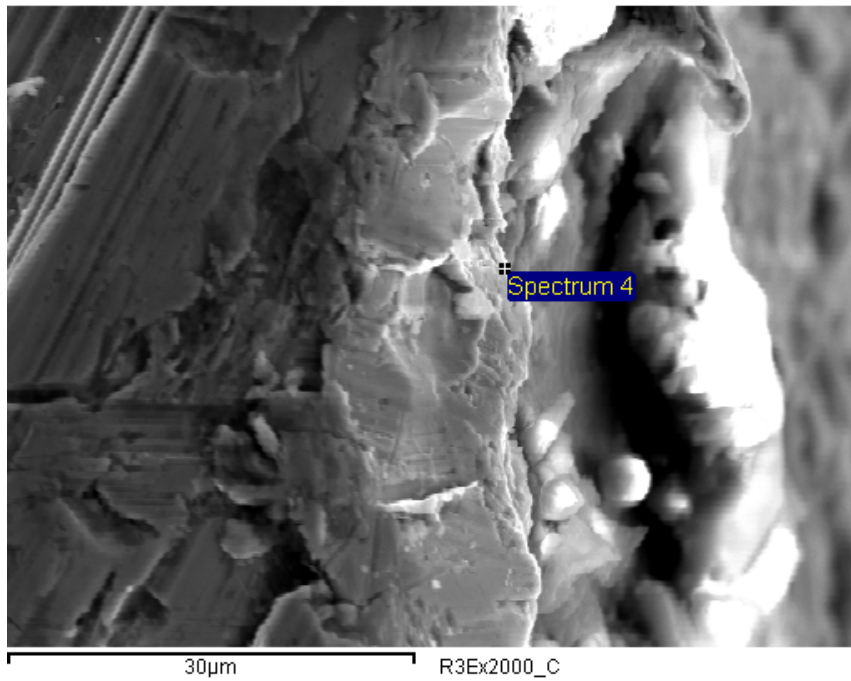


Figura A.99. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 4.

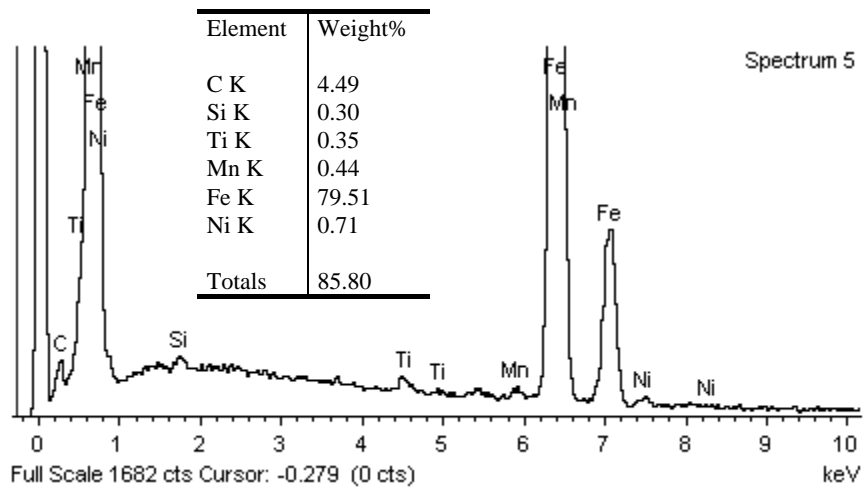
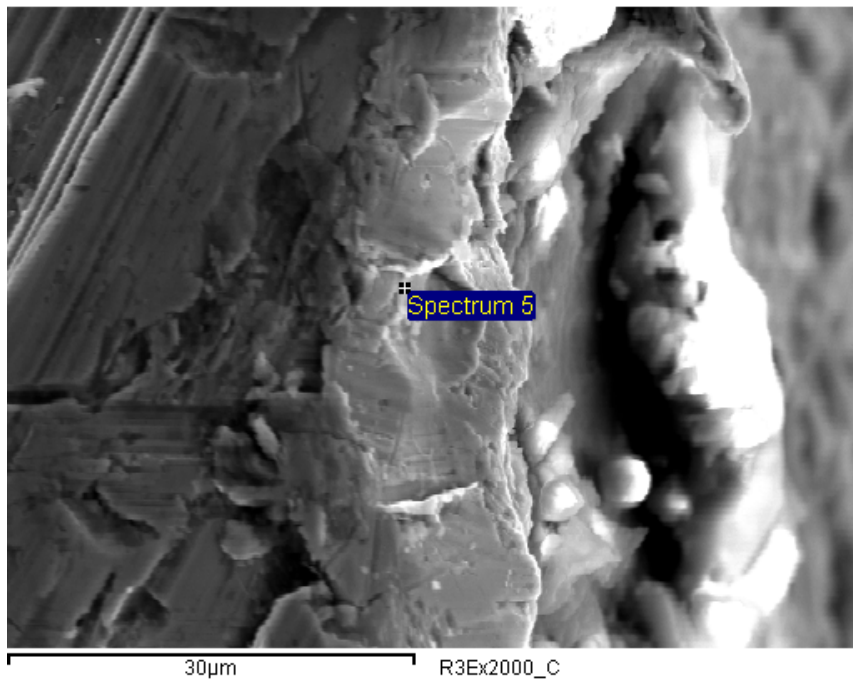


Figura A.100. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 5.

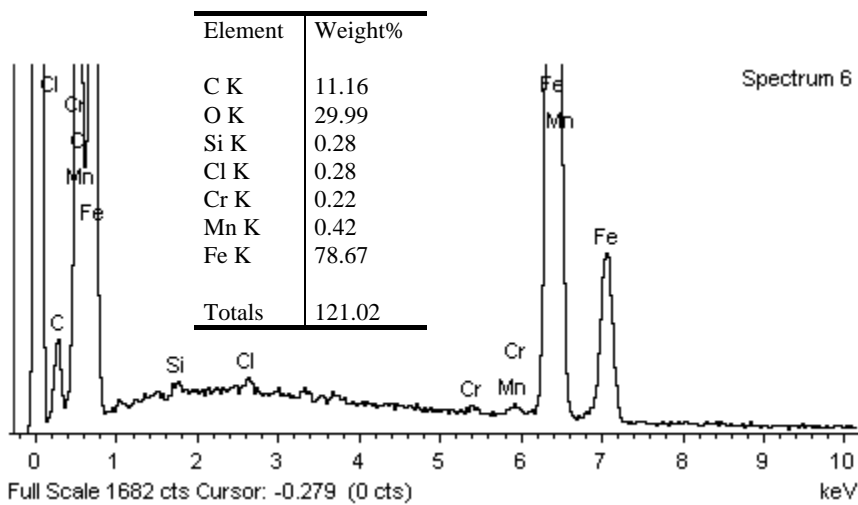
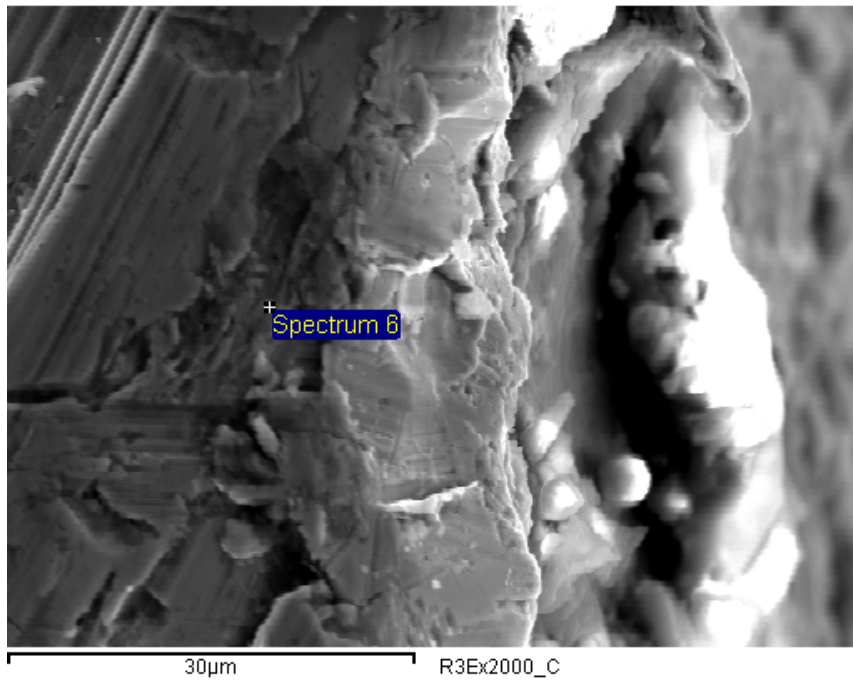


Figura A.101. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 6.

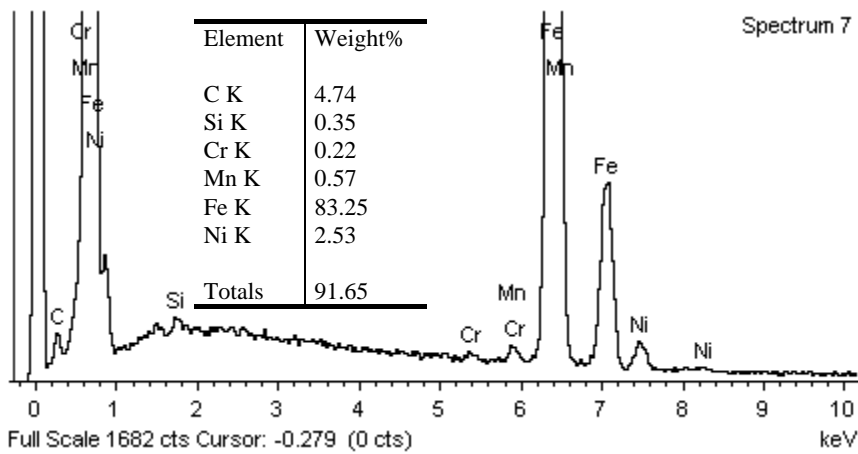
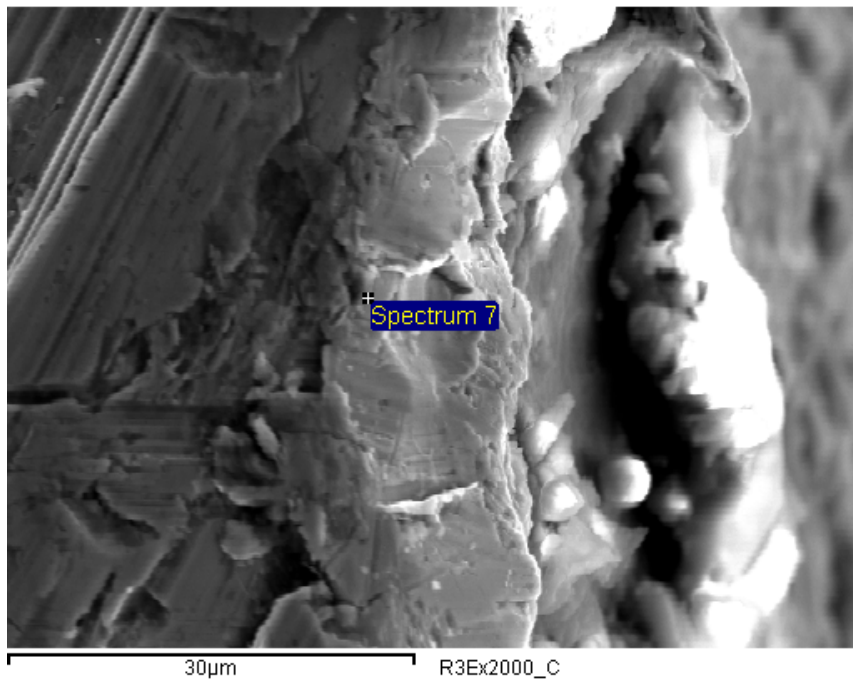


Figura A.102. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 7.

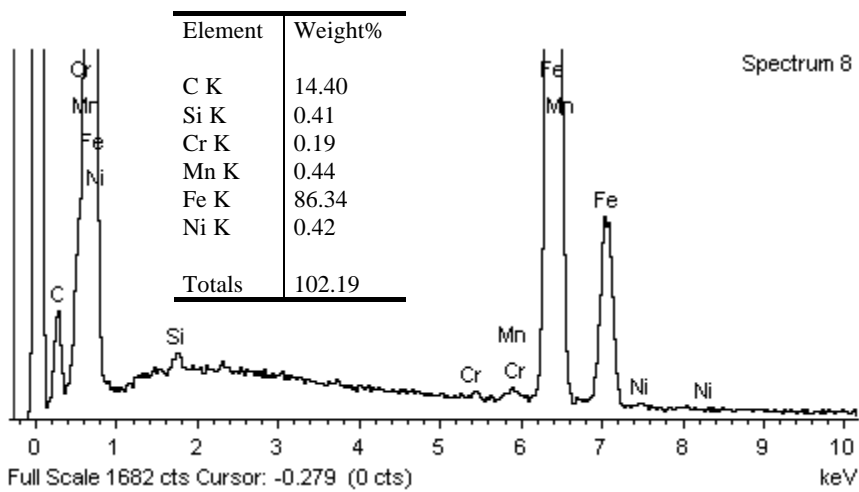
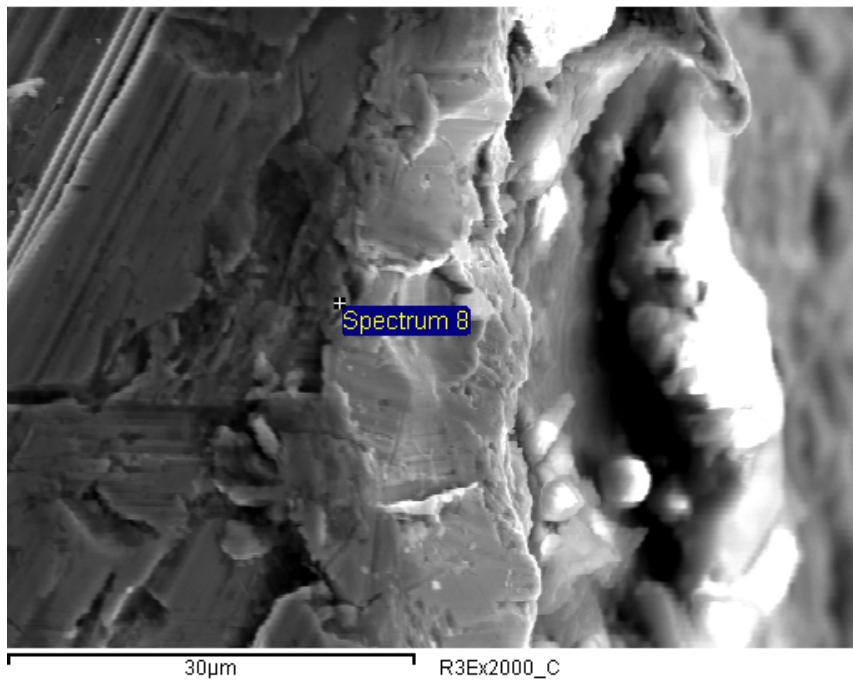


Figura A.103. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 8.

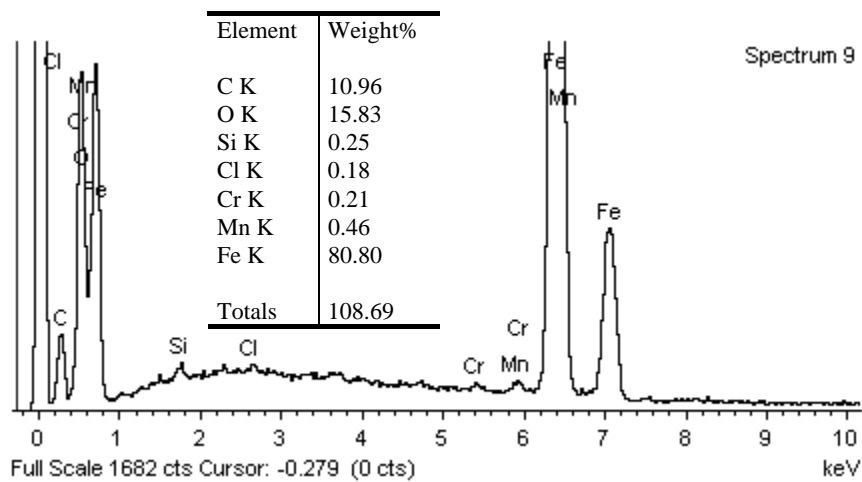
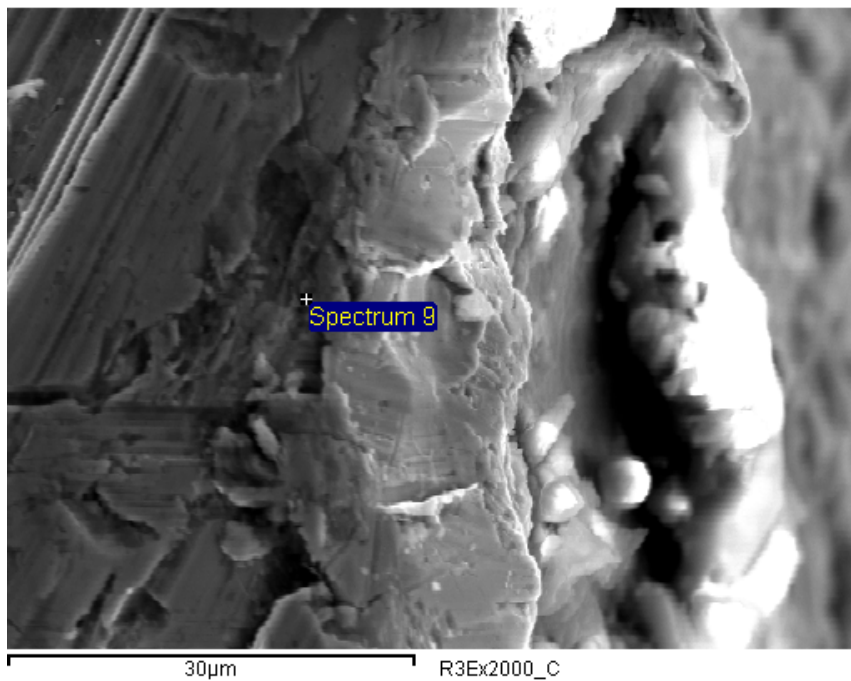


Figura A.104. Probeta R3E, Aleación 87%Al₂O₃/13%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Cresta de un Filete, x2000, SEM y EDS, Espectro 9.

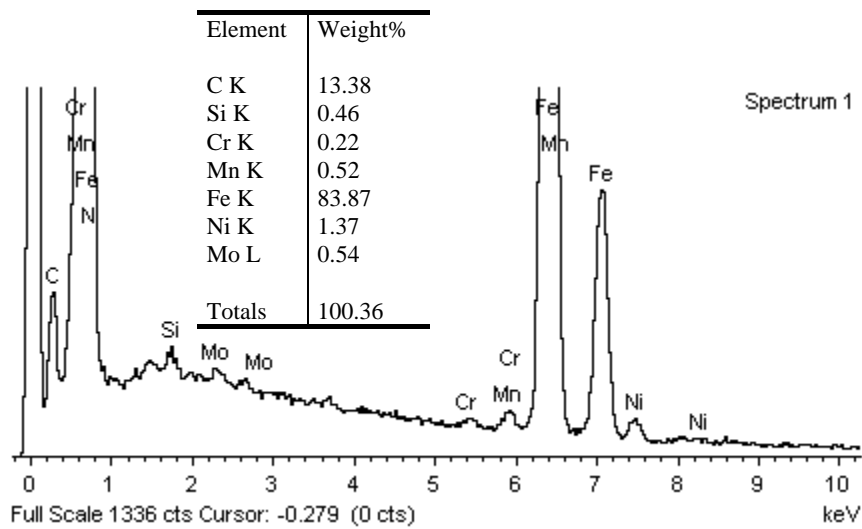
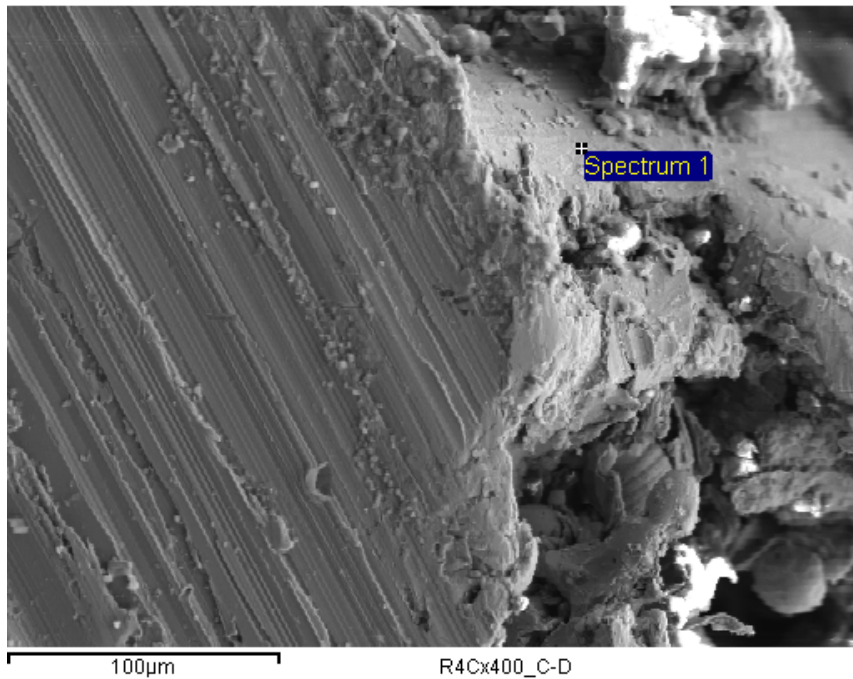


Figura A.105. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 1.

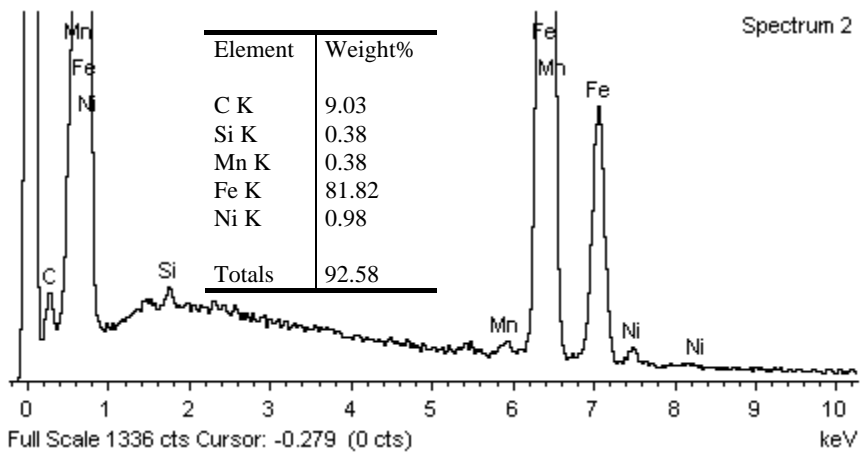
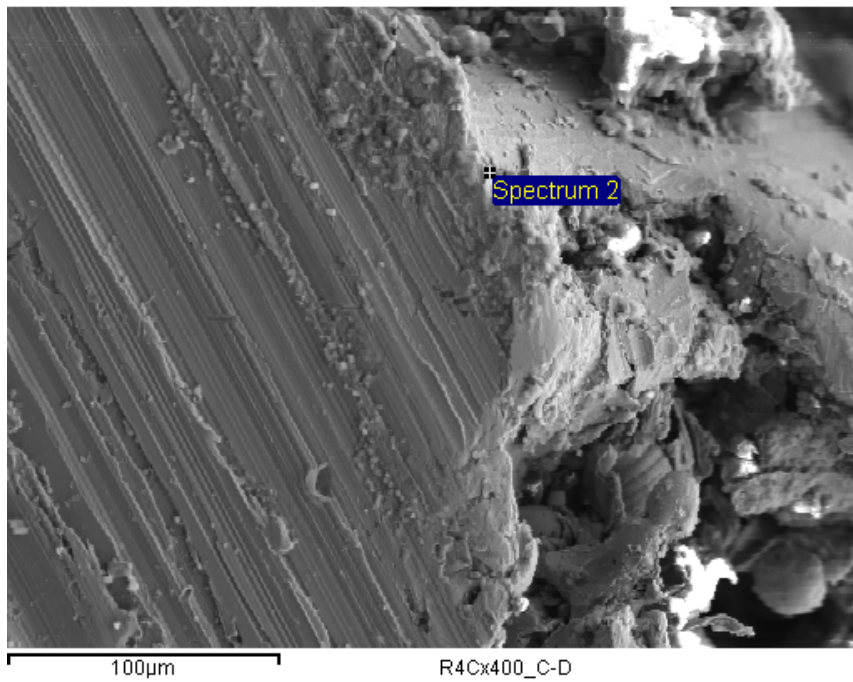


Figura A.106. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 2.

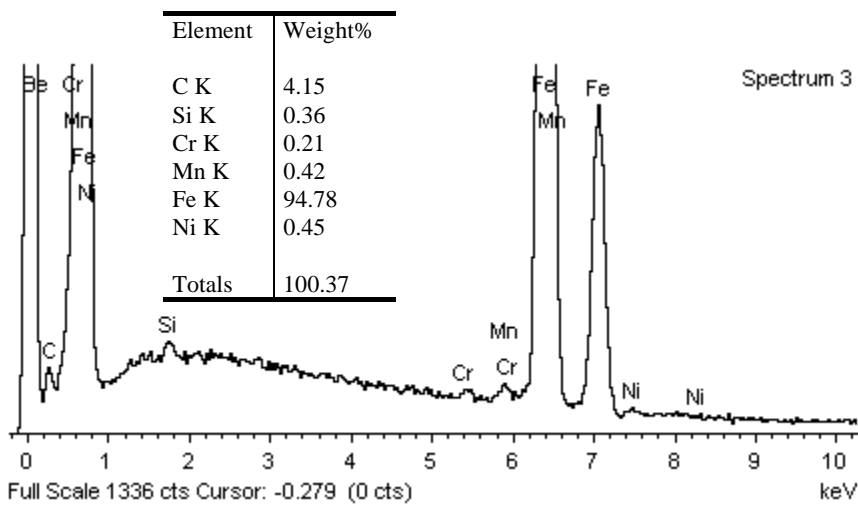
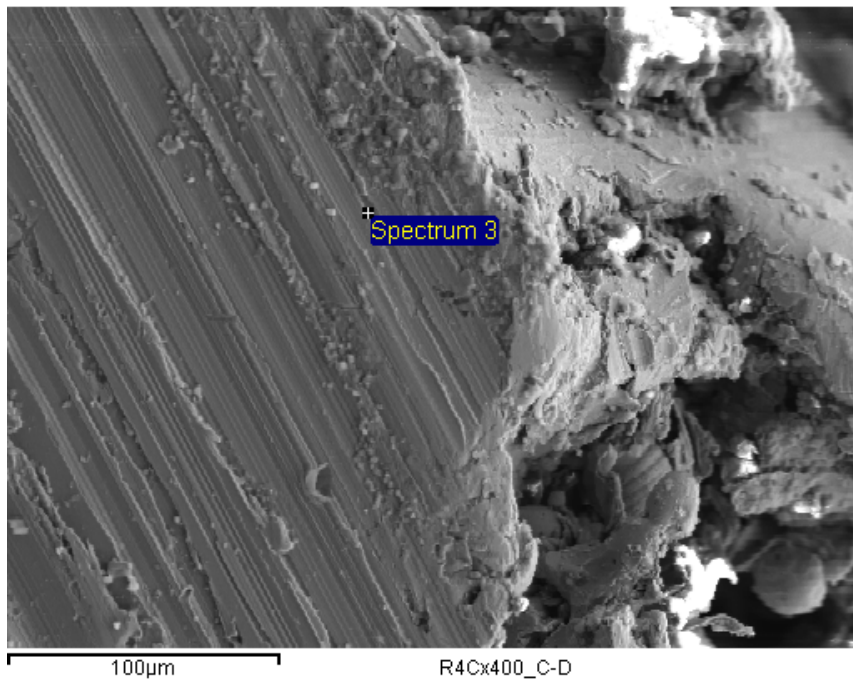


Figura A.107. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 3.

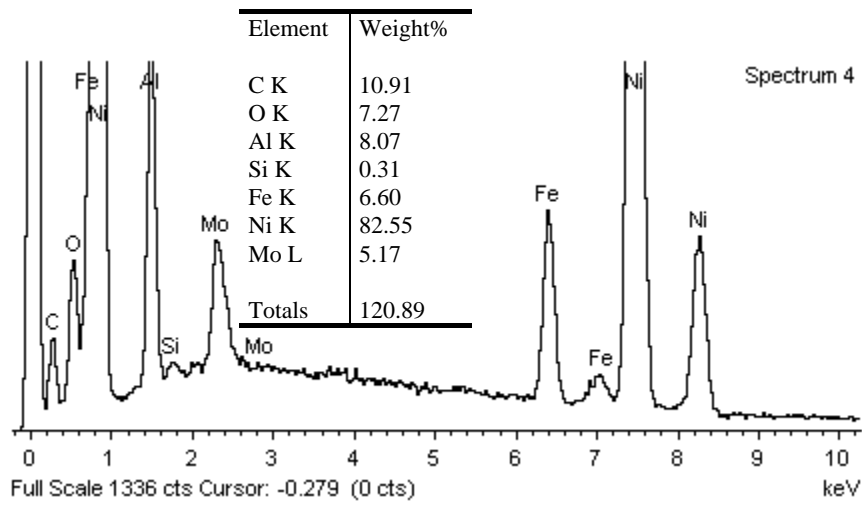
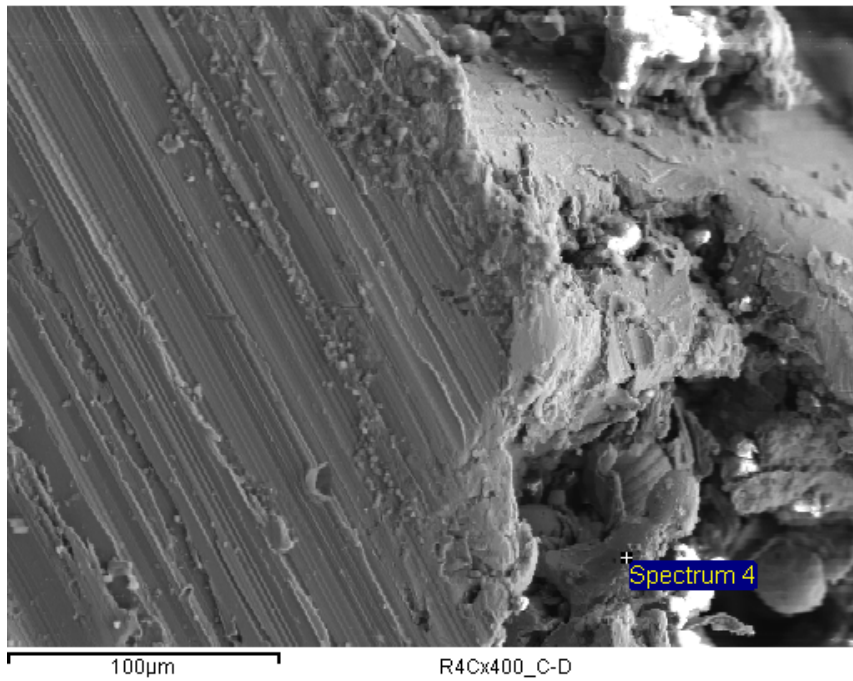


Figura A.108. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 4.

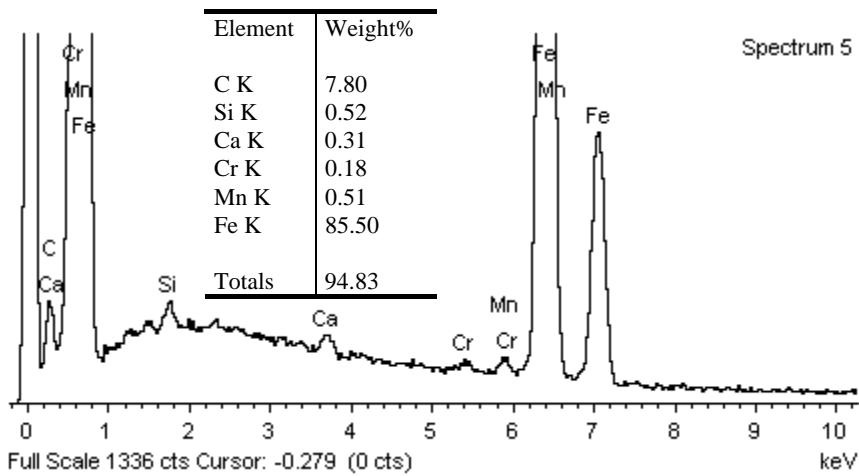
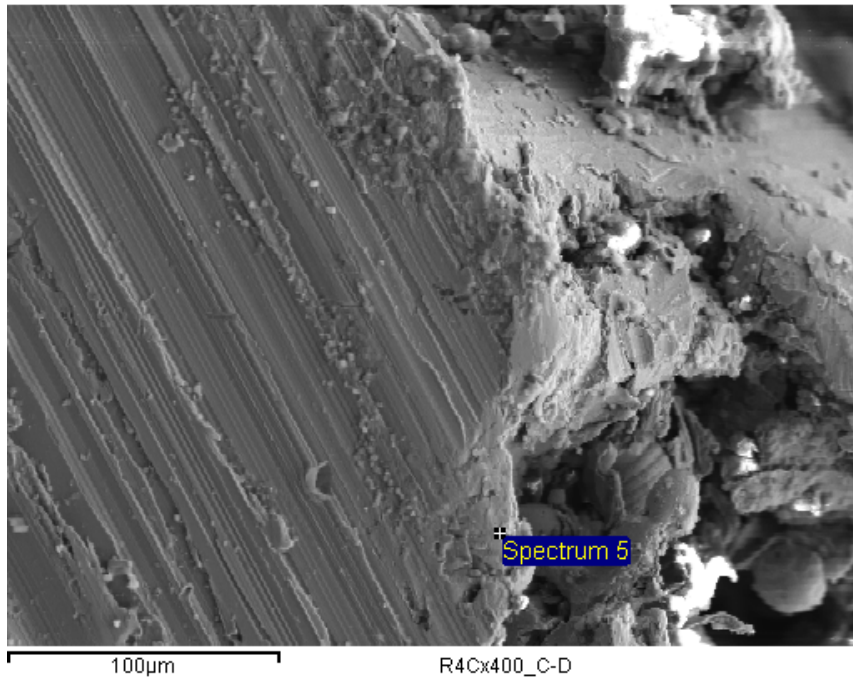


Figura A.109. Probeta R4C, Aleación 97% Al₂O₃/3% TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 5.

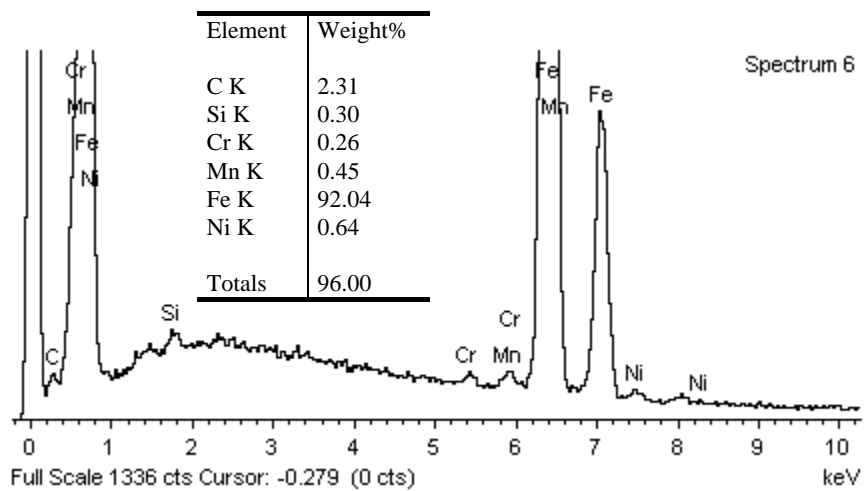
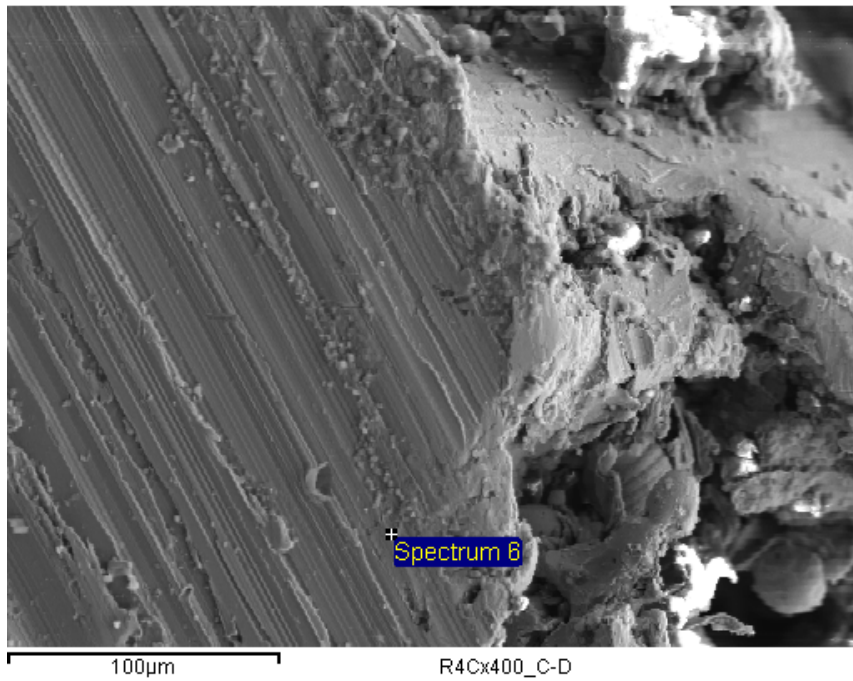


Figura A.110. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 6.

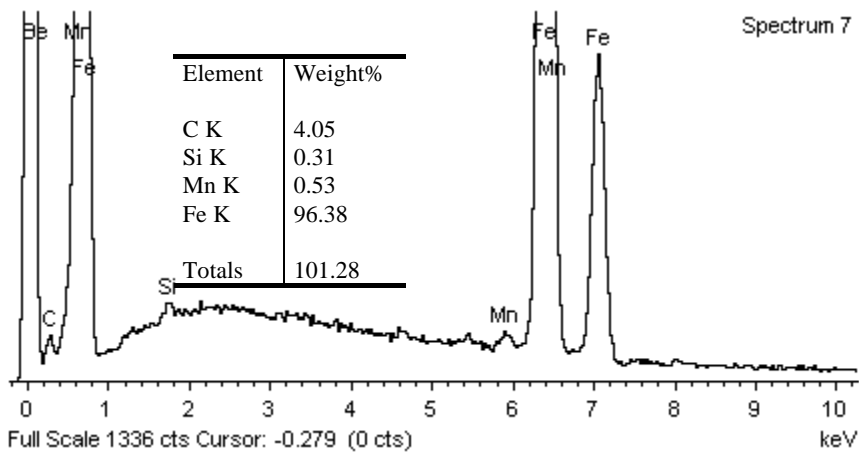
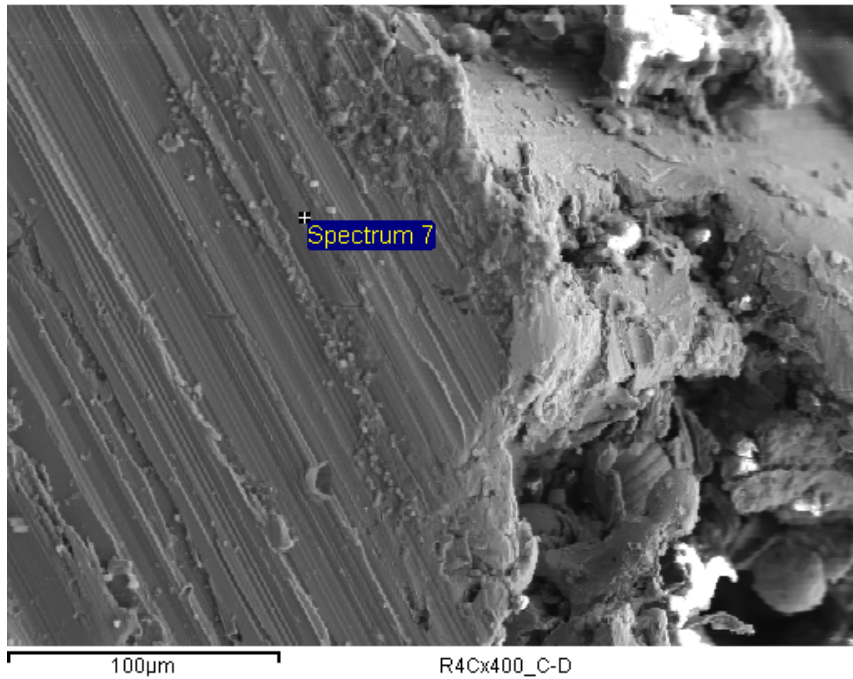


Figura A.111. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 7.

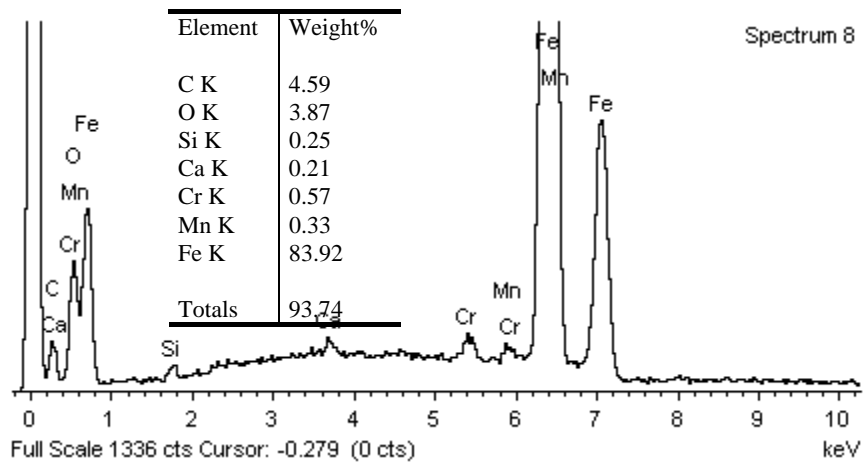
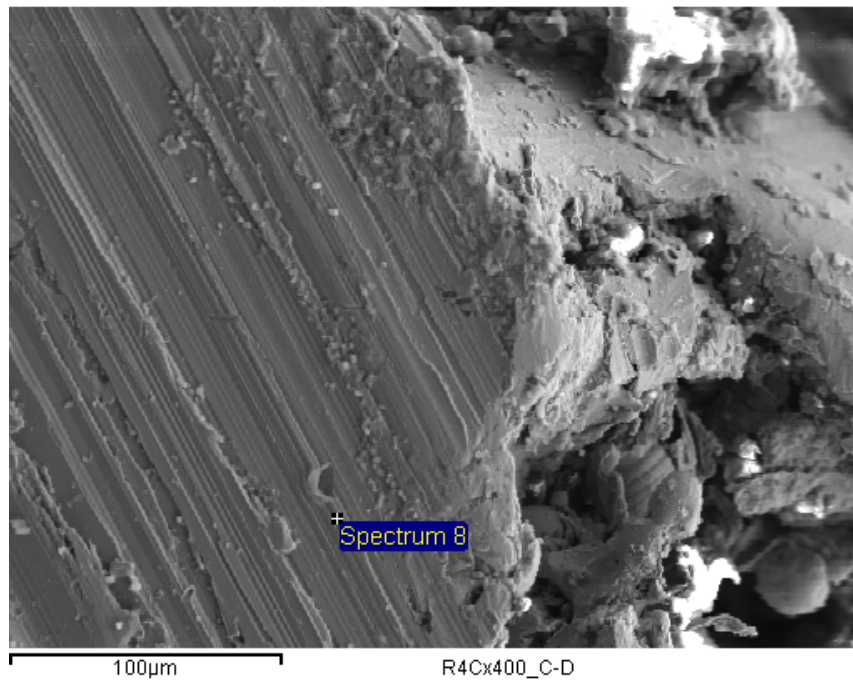


Figura A.112. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 8.

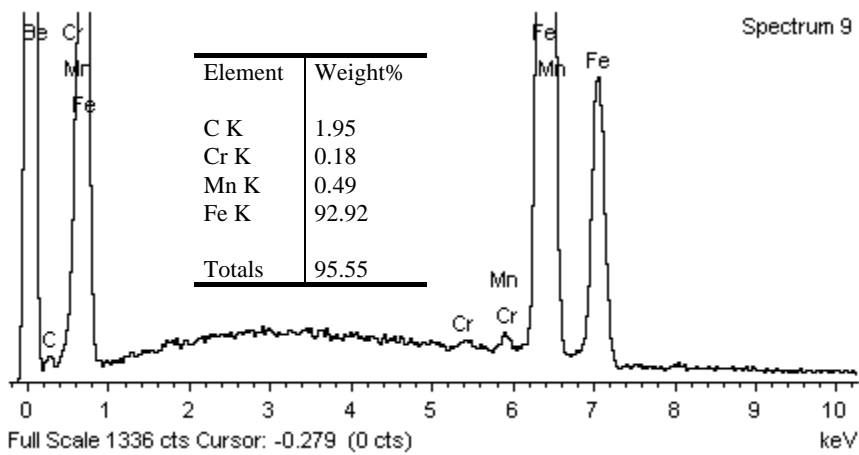
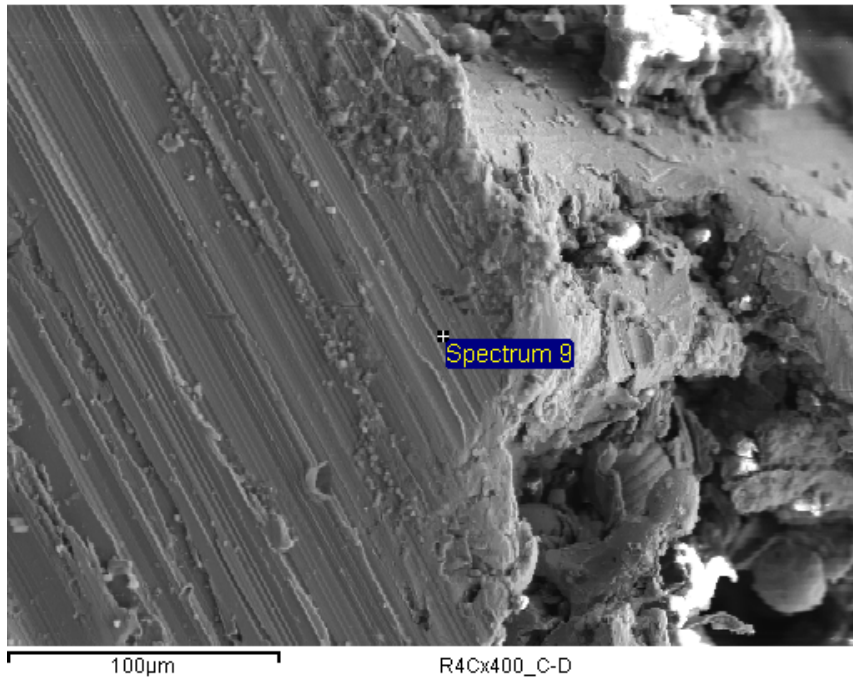


Figura A.113. Probeta R4C, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rosca con Ángulo de Filete 60 °, Entre la Cresta y la Diagonal de un Filete, x400, SEM y EDS, Espectro 9.

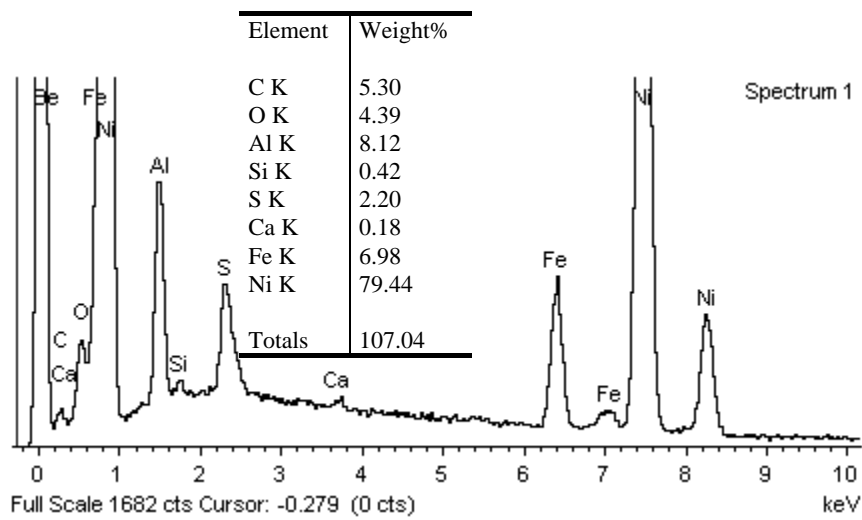
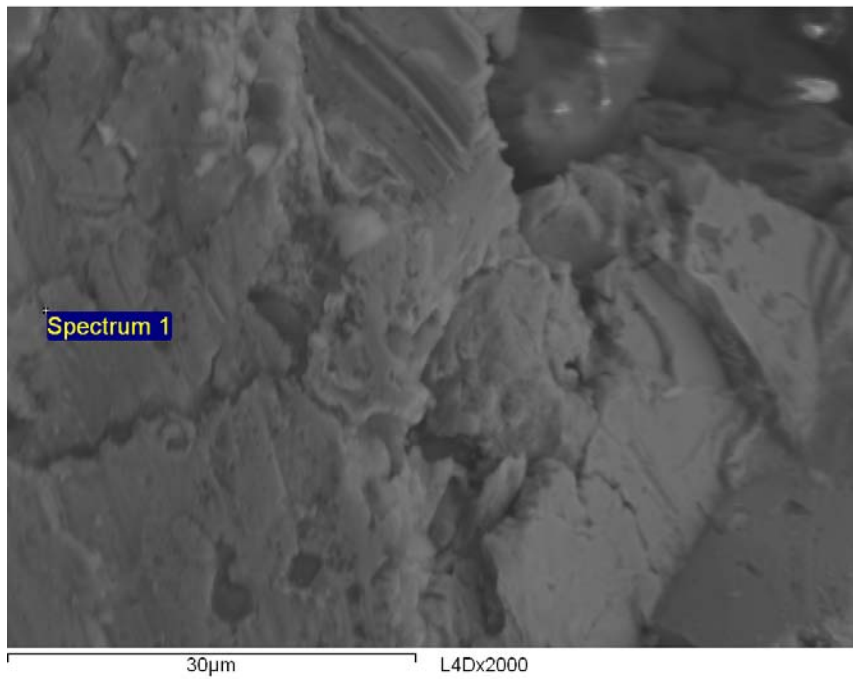


Figura A.114. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 1.

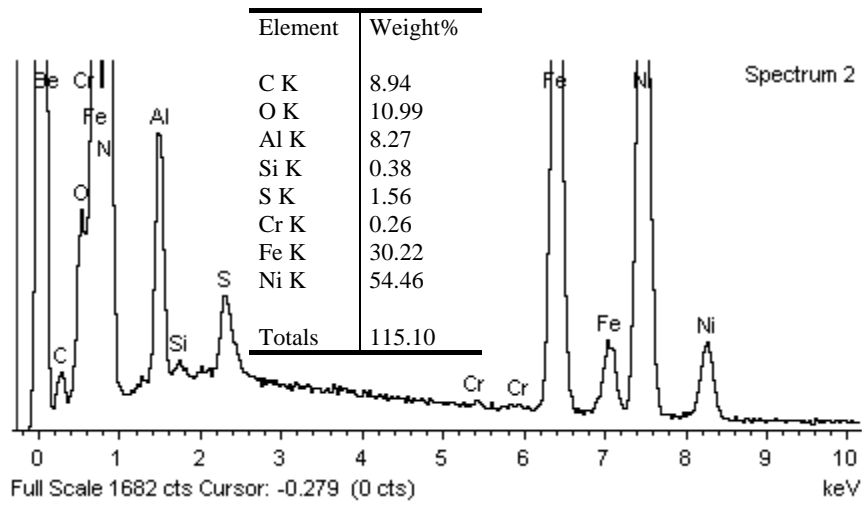
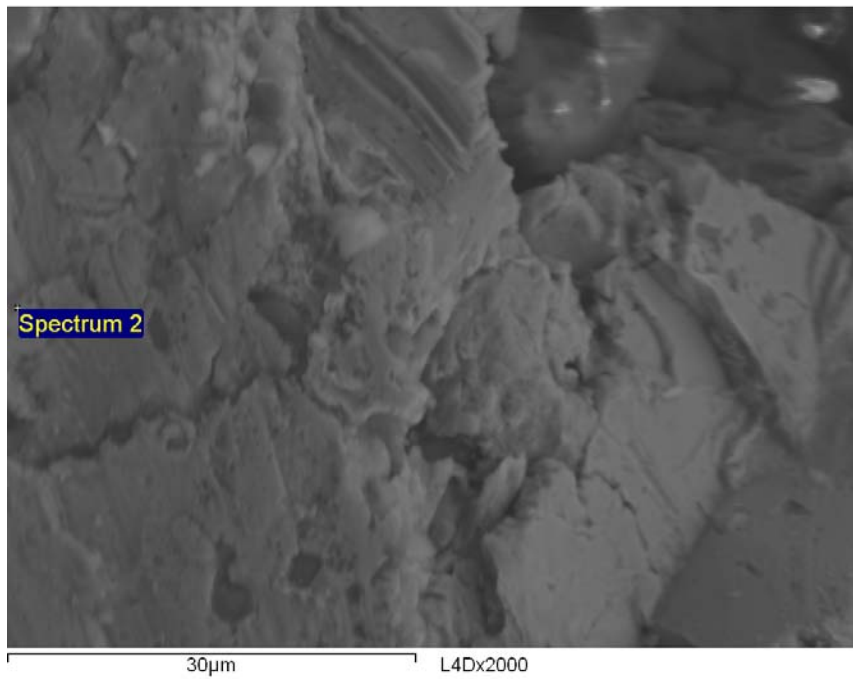


Figura A.115. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 2.

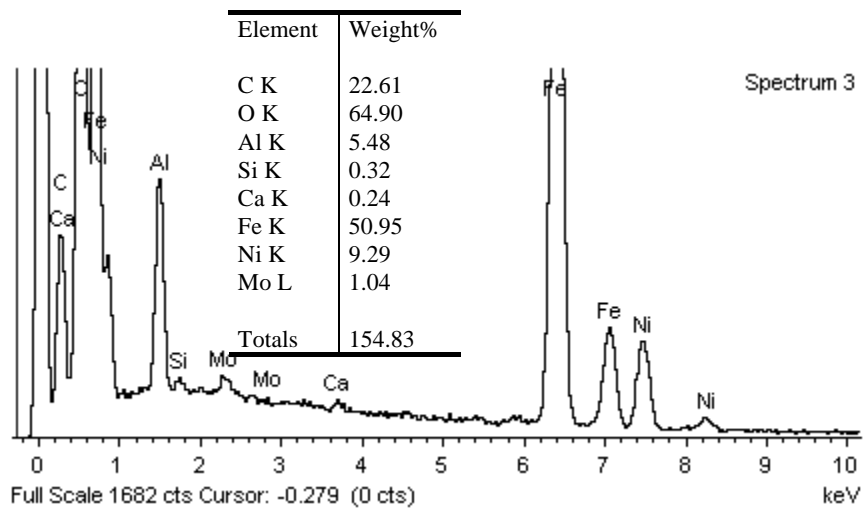
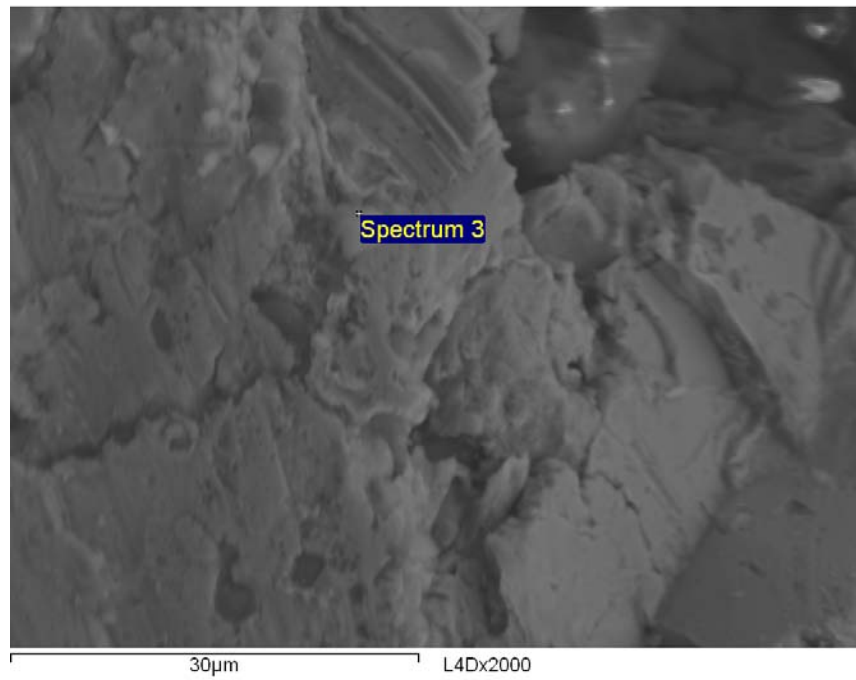


Figura A.116. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 3.

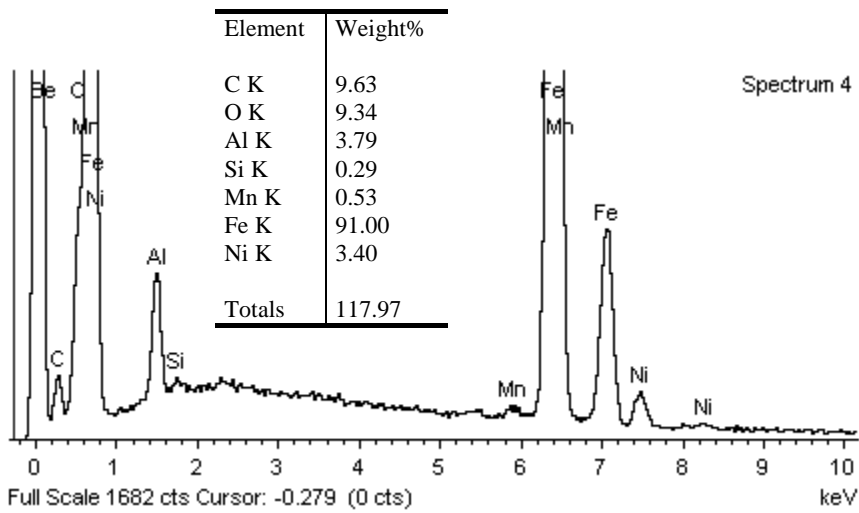
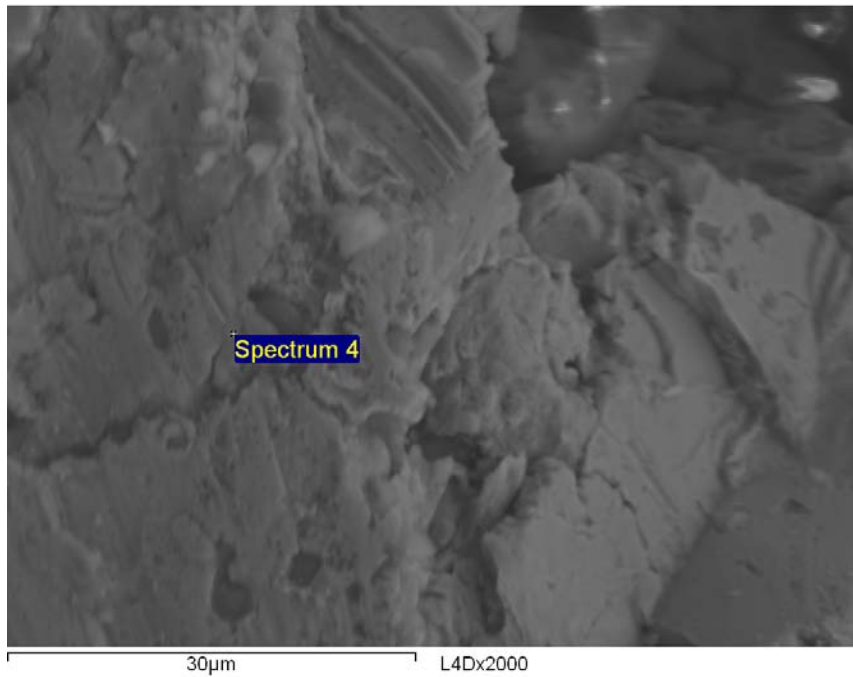


Figura A.117. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 4.

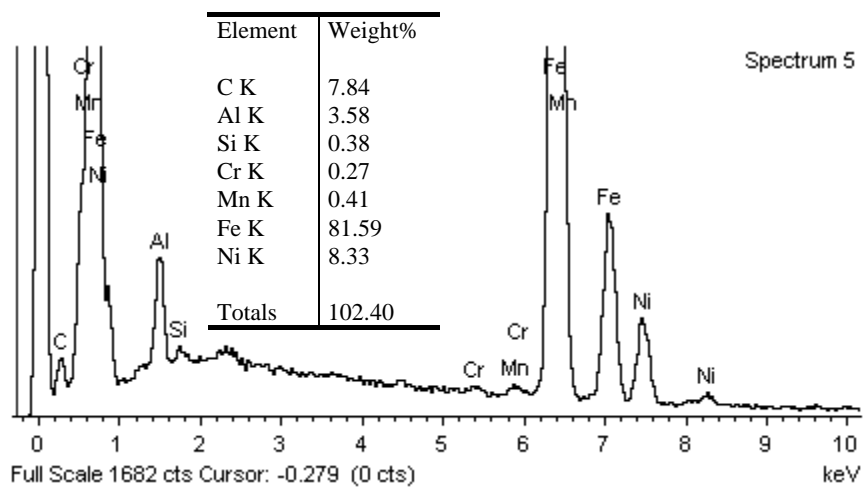
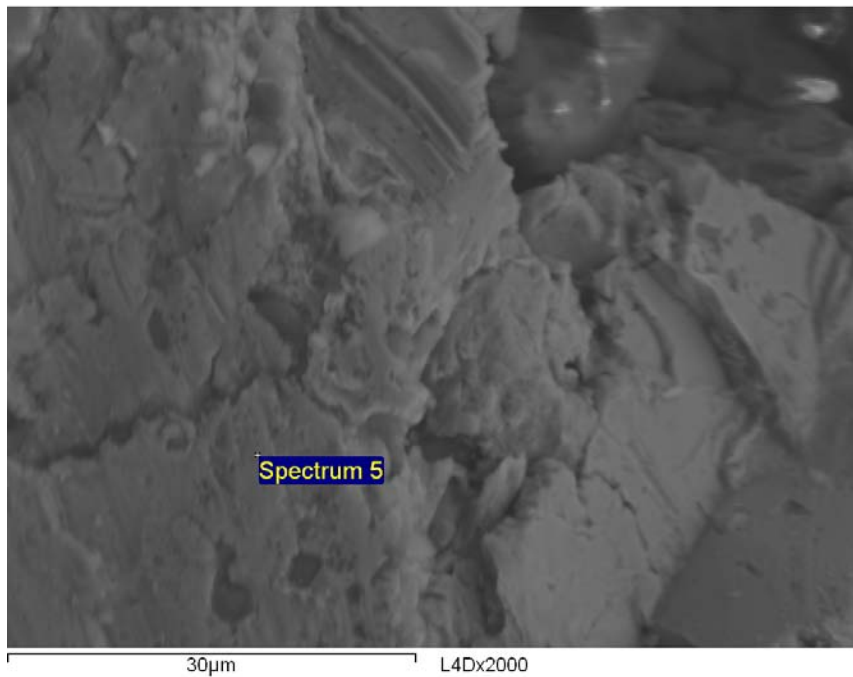


Figura A.118. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 5.

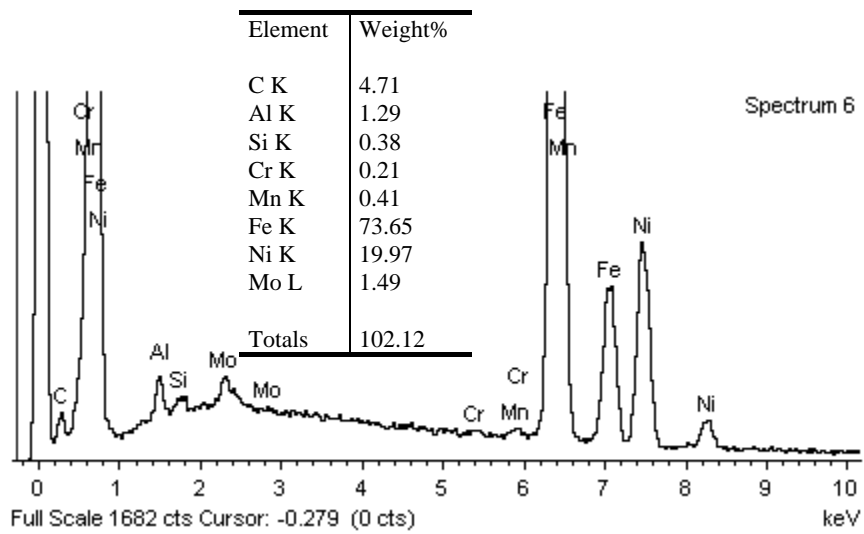
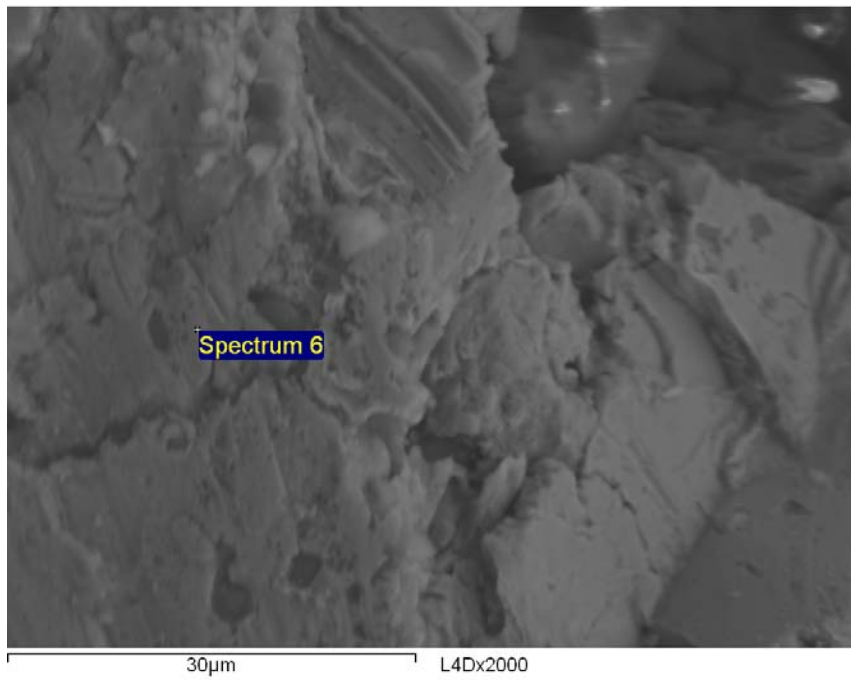


Figura A.119. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 6.

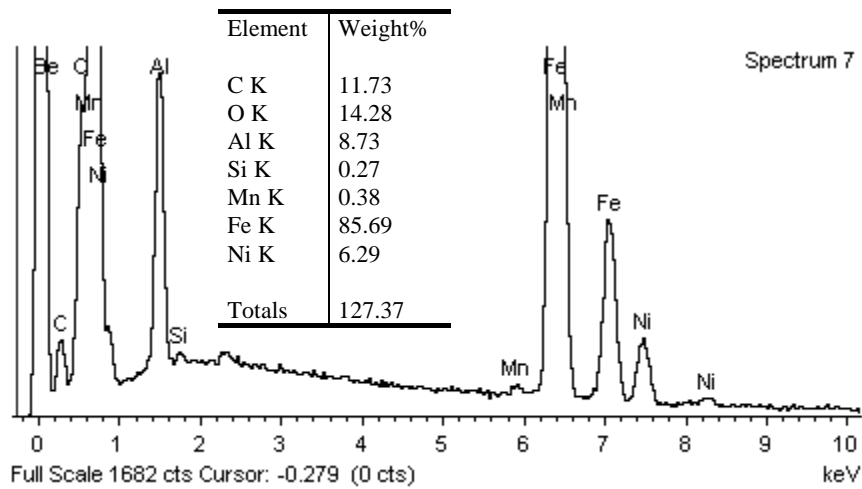
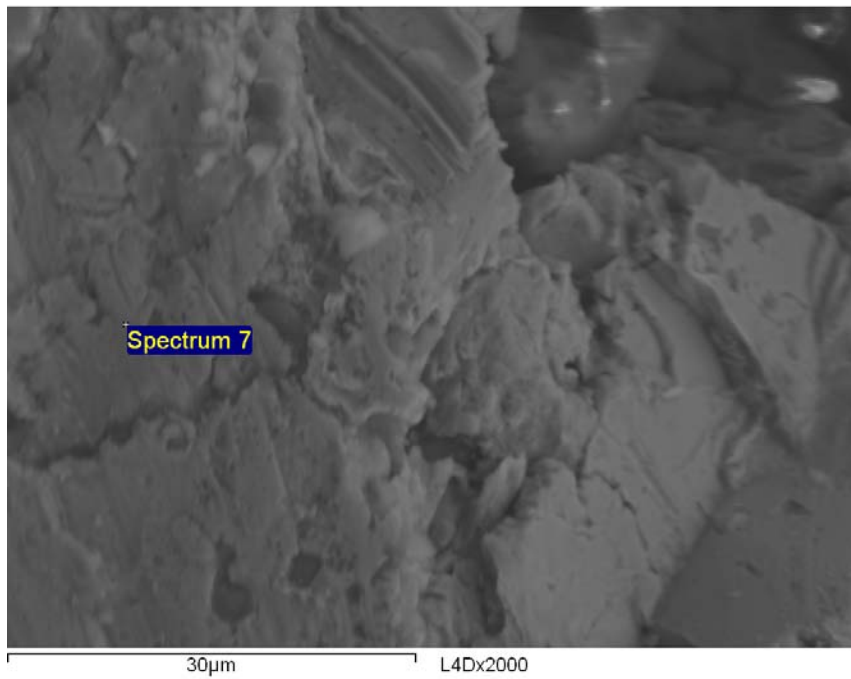


Figura A.120. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 7.

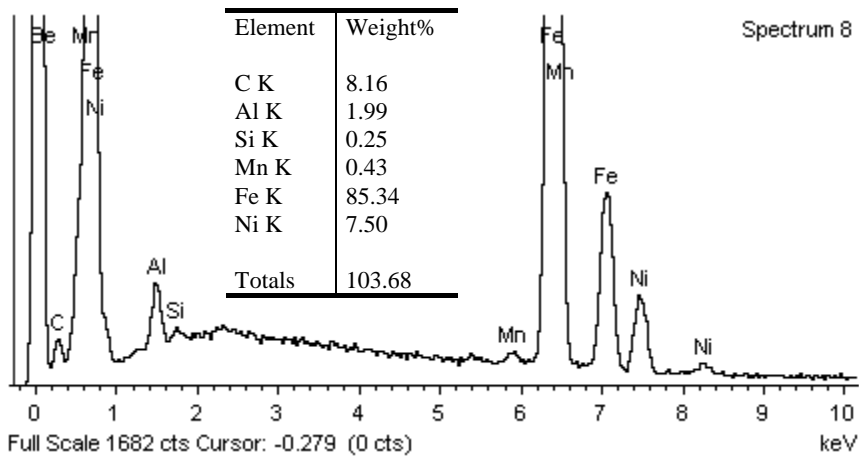
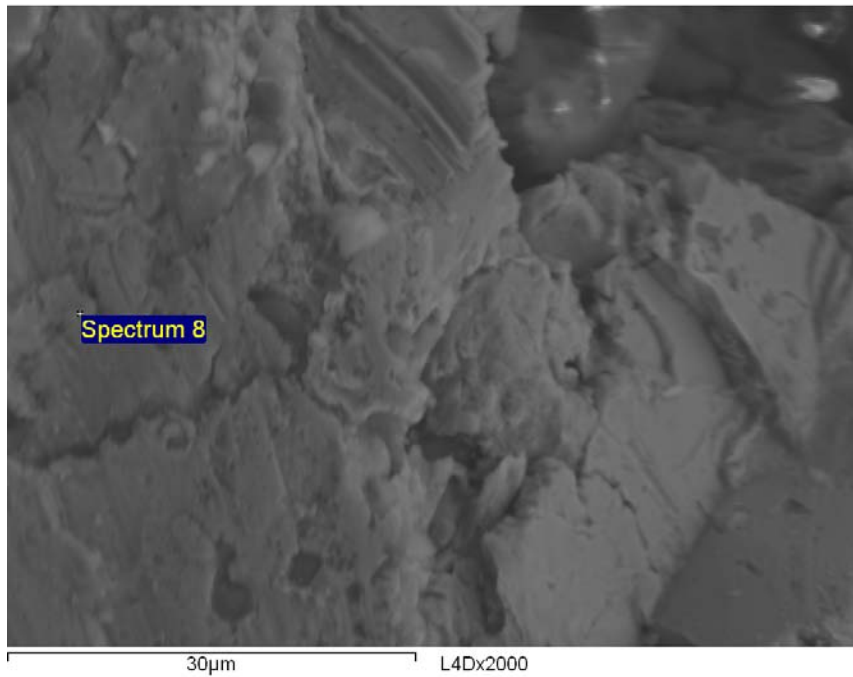


Figura A.121. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 8.

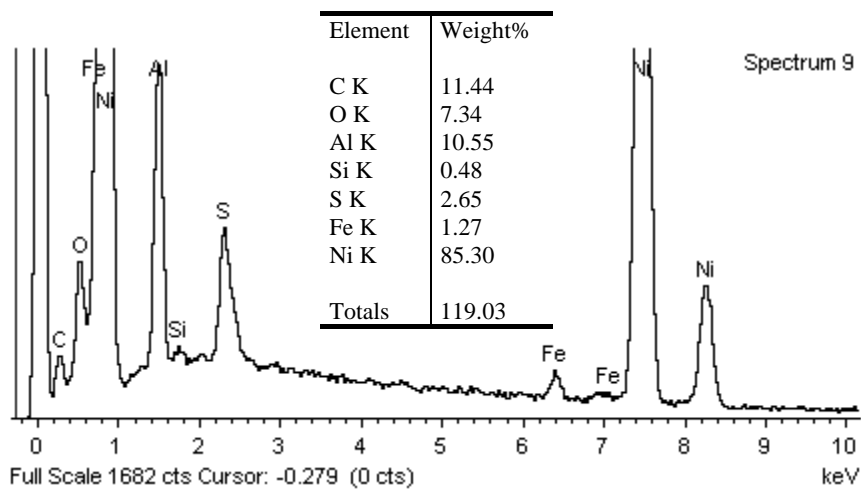
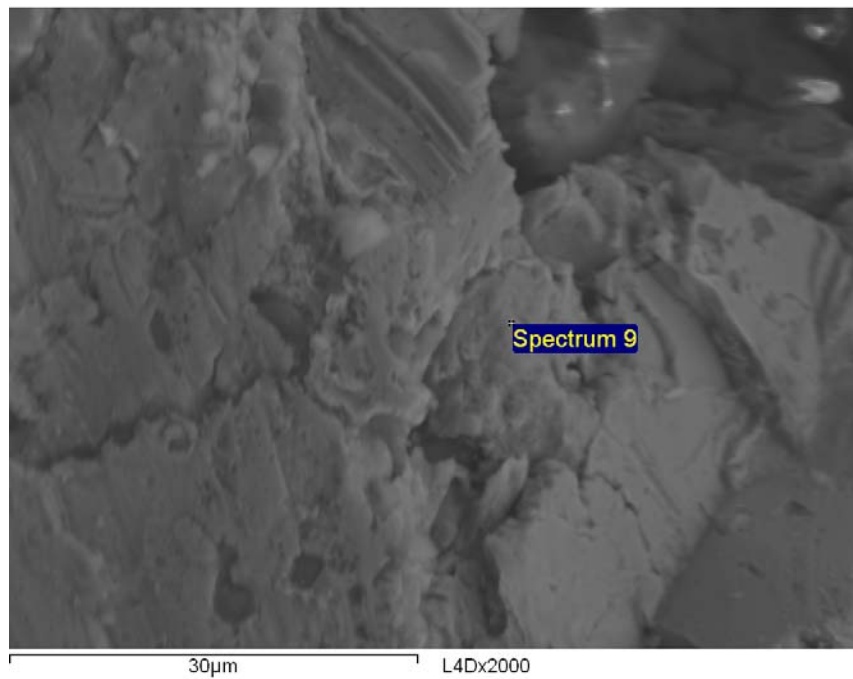


Figura A.122. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 9.

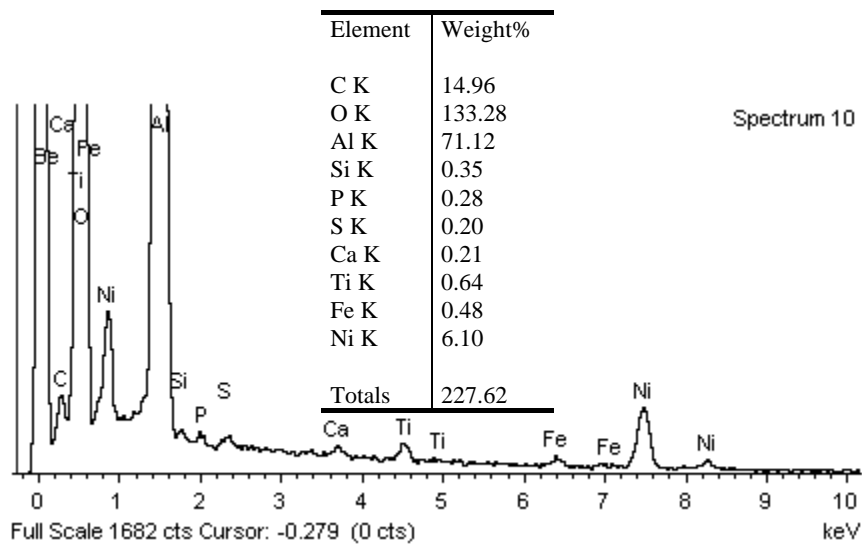
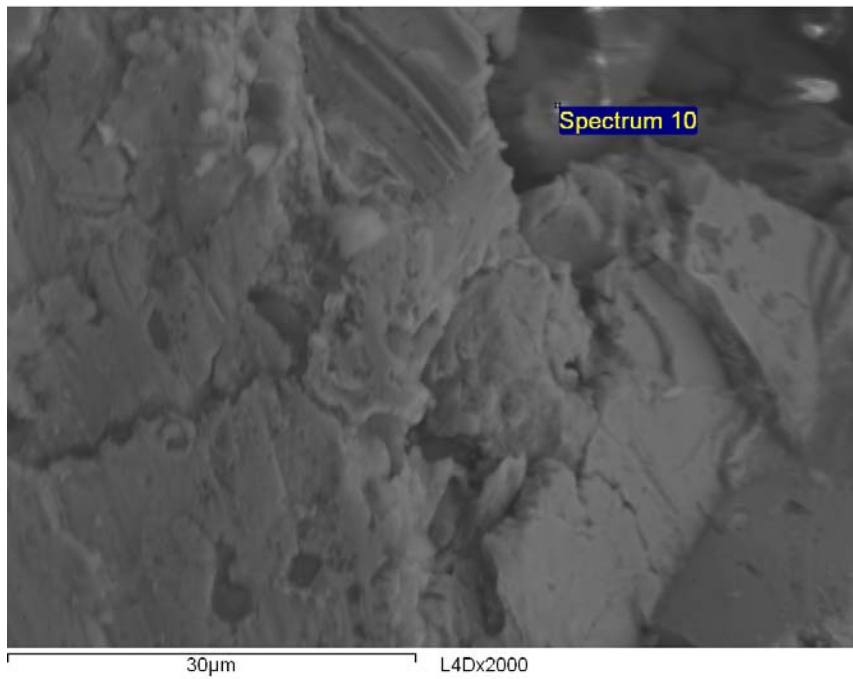


Figura A.123. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 10.

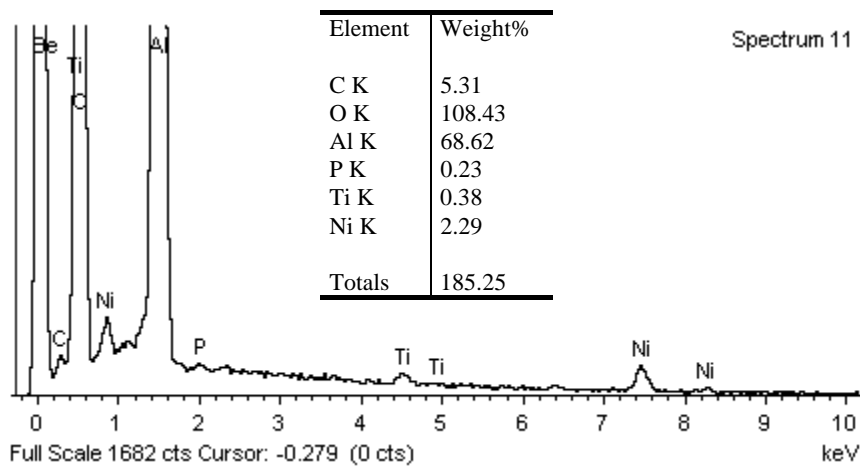
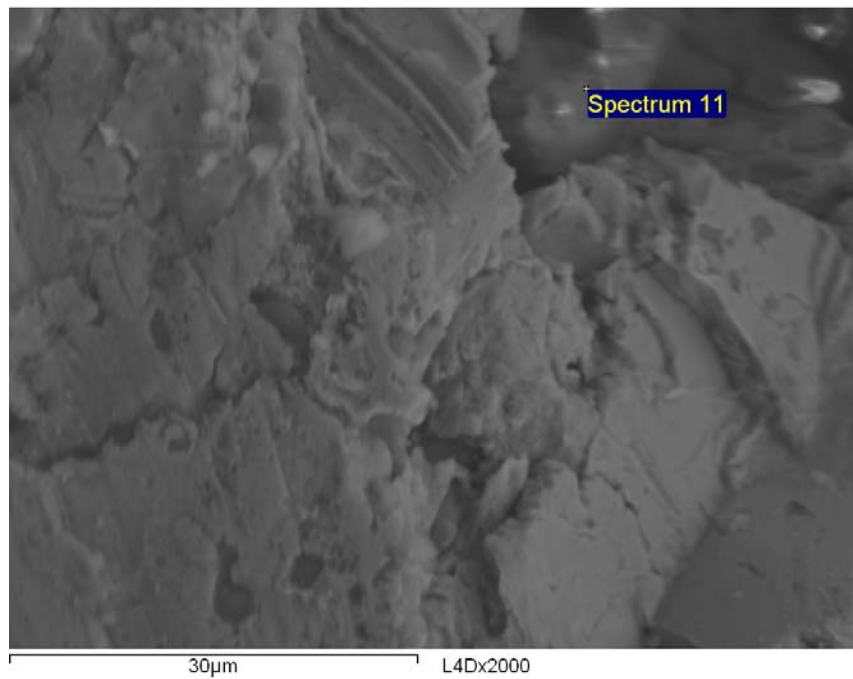


Figura A.124. Probeta L4D, Aleación 97%Al₂O₃/3%TiO₂, Temperatura 100 °C, Rugosidad Rayado Limado, x2000, SEM y EDS, Espectro 11.