

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



TESIS DOCTORAL

**INVESTIGACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE
CHAPAS RECUBIERTAS CON ZN-NI EN
EL PROCESO DE EMBUTICIÓN DE
PIEZAS DE AUTOMÓVILES.**

Presentada por: D. Miguel Angel Perez Puig
Dirigida por: Dr. D. Alfonso Cárcel González
Dr. D. Carlos Ferrer Gimenez

Valencia, Octubre de 2013

TESIS DOCTORAL

**INVESTIGACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE
CHAPAS RECUBIERTAS CON ZN-NI EN
EL PROCESO DE EMBUTICIÓN DE
PIEZAS DE AUTOMÓVILES.**

Que para la obtención
del grado de
Doctor Ingeniero Industrial

presenta

D. Miguel Angel Perez Puig

en el
Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales
de la Universitat Politècnica de València

Dirigida por
Dr. D. Alfonso Cárcel González
Dr. D. Carlos Ferrer Gimenez

Valencia, Octubre de 2013

A mi padre, por proyectar en mí su devoción a la
Ingeniería.

AGRADECIMIENTOS.

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a los catedráticos D. Alfonso Cárcel Gonzalez y D. Carlos Ferrer Gimenez, directores de esta Tesis Doctoral, que sin ellos no hubiera sido posible su realización.

Quisiera agradecerles a los dos, las innumerables sesiones de trabajo juntos, en las que hemos planificado los ensayos, analizado los resultados, y sobre todo, gracias a sus conocimientos, obtenido conclusiones. Tiempo que me han dedicado, y seguramente merecían más que yo sus familias.

Quiero destacar también la ayuda prestada por los técnicos de laboratorio y los compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, en especial, el de aquellos que amablemente han atendido diversas consultas realizadas. Gracias.

Así mismo, quiero expresar mi gratitud a la empresa Arcelor Mittal que facilitaron abundante material tanto de chapas como lubricantes, para la realización de la presente Tesis Doctoral, y al Servicio de Microscopia de esta misma Universidad por su gran amabilidad y eficacia.

También quiero poner de manifiesto el gran apoyo que me ha prestado mi familia, que además, ha sabido comprender en todo momento el tiempo que no les he dedicado, demasiado tiempo, fundamental para su desarrollo.

De nuevo gracias.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

RESUMEN

Las chapas de acero recubiertas con cinc o aleaciones Zn-Fe y Zn-Ni se emplean en la construcción de carrocerías de automóvil para mejorar la resistencia a la corrosión. Entre los diferentes recubrimientos, las aleaciones Zn-Ni en el rango 11-14%Ni, aplicadas por vía electrolítica, ofrecen una superior resistencia frente a la corrosión y excelente soldabilidad, pero han visto limitado un uso extensivo debido a factores de coste y, desde el punto de vista tecnológico, a que presentan habitualmente problemas durante la embutición .debido al desprendimiento de polvos que contaminan o ensucian las matrices y a fenómenos de roturas o gripado con las matrices. En comparación con las propiedades mecánicas del material de las chapas, cuyos efectos sobre el proceso de embutición son bien conocidos, los fenómenos derivados del comportamiento tribológico de este tipo de recubrimientos no han recibido prácticamente atención en la bibliografía: compatibilidad lubricantes-materiales-matrices, efectos de los acabados superficiales, efectos de la presión local y la velocidad, etc.

El objetivo de esta tesis es el análisis del comportamiento tribológico de las chapas recubiertas con Zn-Ni en las condiciones operacionales características del proceso de embutición actualmente empleado en la fabricación de componentes de carrocerías de automóviles. Se analizan los efectos de las variables que controlan los valores de fricción, incluyendo los efectos de las variables externas: presiones, velocidades, viscosidad y aditivos de lubricantes, y las variables intrínsecas del material, con especial atención a la evolución de las superficies reales de contacto y a los fenómenos de aplastamiento de asperezas de la topografía superficial. Adicionalmente, se analiza el efecto de tratamientos superficiales de nitruración aplicados sobre las matrices, con el fin de determinar posibles mejoras en relación con la fricción y con el desgaste.

La evaluación experimental del comportamiento tribológico se ha llevado a cabo en un equipo de ensayos de contacto plano-plano, especialmente diseñado para este fin. Mediante pasadas múltiples se reproducen las condiciones de deterioro o daño superficial acumulativo características de los procesos reales. Debido a las altas presiones de contacto y a la baja viscosidad de los lubricantes de embutición, las condiciones de contacto reales y las empleadas en estos ensayos se producen en un régimen de lubricación límite. Los resultados de estos ensayos de contacto plano-plano se han complementado con ensayos en equipos pin-on-disk, en los que es posible extender las condiciones operaciones a contactos en seco y a contactos con lubricación superabundante o de capa gruesa.

Los resultados de los ensayos indican que, en las condiciones de lubricación límite, los valores del coeficiente de fricción presentan una elevada dispersión, desde valores del orden de 0.10 hasta valores del orden de 0.40, próximos a los valores obtenidos en condiciones de lubricación seca en ensayos pin on disc. El mantenimiento de valores estables de los coeficientes de fricción en el rango 0.10-0.15 depende fundamentalmente de la disponibilidad de lubricante en la zona de contacto y de las condiciones que favorecen la formación de capas límite. Los mecanismos de deformación plástica superficial de estos recubrimientos son claramente diferentes de los observados en chapas recubiertas con cinc puro. El aplastamiento y el crecimiento de las superficies de contacto se produce por aplastamiento de las asperezas sub-superficiales del propio acero de las chapas, cuya dureza es sensiblemente inferior a la dureza del propio recubrimiento Zn-Ni (HV=315 HV).

ABSTRACT

Steel sheets coated with zinc or zinc base alloys, such as Zn-Fe or Zn-Ni, are employed in the construction of automobile bodies with improved corrosion resistance. Among these coatings, the Zn-Ni alloys in the range 11-14% Ni provide superior corrosion resistance and excellent weldability, but are less used than other coatings due to cost factors and, from the technological viewpoint, because of some problems that commonly occur during drawing, such as detachment of hard powders that contaminate the tools and or dirty because of breakage or seizure phenomena arrays. Compared to the mechanical properties of the base steel material of the sheets, whose effects on the forming process are well known, the phenomena related to the tribological behaviour of these Zn-Ni coated have not received attention in the literature : lubricant-materials compatibility, effects of surface finishes, effects of local pressure and speed , etc.

The aim of this thesis is the analysis of the tribological behavior of Zn-Ni coated sheets under the operational conditions of the real drawing processes currently employed in the manufacture of automotive body components. The investigation analyzes the effects of variables that control the values of friction, including the effects of external variables : pressure , speed , viscosity and lubricant additives , and the intrinsic variables of the material, with special attention to the evolution of real surfaces under contact and the flattening process of the surface topography. The influence of nitriding surface treatments applied to the tools on the friction and wear has been also analysed.

Experimental work was carried out in a plane contact test bench, specially designed for this research work. Multiple passes between tools reproduce the conditions of deterioration or cumulative surface damage characteristics of real processes. Due to the high contact pressure and the low viscosity of drawing lubricants, contact conditions occur in a boundary lubrication regime. The results of the plane contact multi-pass tests have been supplemented with additional microtribometer tests, in order to extend the test conditions to dry contacts and to full lubricated contacts.

Test results indicate that under these boundary lubrication condition, the friction coefficient values have a high dispersion from 0.10 to 0.40, close to the values obtained in dry lubrication conditions tests. The stability of the friction coefficients values in the range 0.10-0.15 depends primarily on the availability of lubricant in the contact zone and on the high speed conditions which favor the formation of boundary layers. The surface plastic deformation mechanisms surface of these coatings are different from those observed in pure zinc coated plates. Asperity flattening and growth of the real contact surface is produced by flattening the sub- surface steel asperities, whose hardness is considerably lower than the hardness of the Zn -Ni coating itself (HV = 315 HV).

RESUM

Les xapes d'acer recobertes amb zinc o aliatges Zn-Fe i Zn-Ni s'empren en la construcció de carrosseries d'automòbil para millorar la resistència a la corrosió. Entre els diferents recobriments, els aliatges Zn-Ni en el rang 11-14%Ni, aplicats per via electrolítica, ofereixen una resistència superior enfront de la corrosió i una excel·lent soldabilitat, però han vist limitat un ús extensiu a causa de factors de cost i, des del punt de vista tecnològic, al fet que presenten habitualment problemes durant l'embotició pel despreniment de pólvores que contaminen o embruten les matrius i per fenòmens de trencaments o gripatge amb les matrius. En comparació de les propietats mecàniques del material de les xapes, els efectes de les quals sobre el procés d'embotició són ben coneguts, els fenòmens derivats del comportament tribològic d'aquest tipus de recobriments no han rebut pràcticament atenció en la bibliografia: compatibilitat lubricants-materials-matrius, efectes dels acabats superficials, efectes de la pressió local i la velocitat, etc.

L'objectiu d'aquesta tesi és l'anàlisi del comportament tribològic de les xapes recobertes amb Zn-Ni en les condicions operacionals característiques del procés d'embotició actualment emprat en la fabricació de components de carrosseries d'automòbils. S'analitzen els efectes de les variables que controlen els valors de fricció, inclosos els efectes de les variables externes: pressions, velocitats, viscositat i additius de lubricants, i les variables intrínseques del material, amb especial atenció a l'evolució de les superfícies reals de contacte i als fenòmens d'aixafament d'asprors de la topografia superficial. Addicionalment, s'analitza l'efecte de tractaments superficials de nitruració aplicats sobre les matrius, amb la finalitat de determinar possibles millores en relació amb la fricció i amb el desgast.

L'avaluació experimental del comportament tribològic s'ha portat a terme en un equip d'assajos de contacte pla-pla, especialment dissenyat per a aquesta fi. Mitjançant passades múltiples es reproduïxen les condicions de deterioració o dany superficial acumulatiu característiques dels processos reals. A causa de les altes pressions de contacte i de la baixa viscositat dels lubricants d'embotició, les condicions de contacte reals i les emprades en aquests assajos es produeixen en un règim de lubricació límit. Els resultats d'aquests assajos de contacte pla-pla s'han complementat amb assajos en equips *pin-on-disk*, en els quals és possible estendre les

condiciones de les operacions a contactes en sec i a contactes amb lubricació superabundant o de capa gruixuda.

Els resultats dels assajos indiquen que, en les condicions de lubricació límit, els valors del coeficient de fricció presenten una elevada dispersió, des de valors d'aproximadament 0,10 fins a valors de prop de 0,40, pròxims als valors obtinguts en condicions de lubricació seca en assajos *pin-on-disk*. El manteniment de valors estables dels coeficients de fricció en el rang 0,10-0,15 depèn fonamentalment de la disponibilitat de lubricant en la zona de contacte i de les condicions que afavoreixen la formació de capes límit. Els mecanismes de deformació plàstica superficial d'aquests recobriments són clarament diferents dels observats en xapes recobertes amb zinc pur. L'aixafament i el creixement de les superfícies de contacte es produeix per aixafament de les asprositats subsuperficials del mateix acer de les xapes, la duresa de les quals és sensiblement inferior a la duresa del mateix recobriment Zn-Ni (HV=315 HV).

INDICE

1. PANORAMA CIENTÍFICO	1
1.1. EMBUTICIÓN DE CHAPAS RECUBIERTAS.	1
1.1.1. Factores del proceso de embutición.	3
1.1.2. Aceros para embutición	5
1.1.3. Recubrimientos de protección anticorrosiva.....	7
1.1.4. Recubrimientos en el acero.....	7
1.1.4.1. Recubrimiento del acero por electrocincado.	7
1.1.4.2. Recubrimiento de cinc por inmersión en caliente. ...	9
1.1.4.3. Recubrimiento Zn-Fe o “Galvannealed”	10
1.1.4.4. Recubrimiento Zn-Ni.....	11
1.1.5. Tratamientos superficiales en las matrices de embutición.....	14
1.1.6. Deformaciones y roturas en la embutición. Curvas FLD.....	16
1.1.7. Diseño de matrices para embutición de componentes de carrocerías.	18
1.1.8. Embutición de piezas complejas. Efectos de las pasadas múltiples.....	21
1.2. TRIBOLOGÍA DE LA EMBUTICIÓN.....	24
1.2.1. Condiciones de lubricación y parámetros operacionales	27
1.2.2. Efectos microhidrodinámicos con contactos plano-plano.....	30
1.2.3. Embutición en condiciones de lubricación límite	35
1.2.4. Textura superficial en chapas para embutición.....	37
1.2.5. Lubricantes para embutición.....	39
1.3. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA EMBUTICIÓN.....	42
1.4. ENSAYOS DE FRICCIÓN EN ESTAMPACIÓN.....	44
1.4.1. Finalidad de los ensayos de fricción	44
1.4.2. Ensayos de contacto plano	45
1.4.3. Tribómetros de simulación de rozamiento en zonas curvas.....	46
1.4.4. Ensayo DBS de simulación Draw-Beads.....	46

1.4.5. Ensayos de simulación de embutición.....	47
1.4.6. Ensayos con deformación plástica equipos RON.....	47
1.4.7. Limitaciones de los ensayos de fricción.....	47
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	51
2.1. Objetivos de la investigación.....	51
2.2. Materiales empleados.....	53
2.3. Lubricantes.....	57
2.4. Diseño del equipo para ensayos multifriccion en contactos plano-plano.....	58
2.4.1. Condiciones de contacto en el ensayo.....	58
2.4.2. Componentes y funcionamiento del equipo.....	62
2.4.3. Cálculo del coeficiente de rozamiento en el ensayo.....	66
2.4.5. Variables del ensayo de fricción plana y codificación de muestras.....	71
2.5. Ensayos de fricción en microtribómetro <i>pin on disc</i>	74
2.5.1 Ensayos pin-on-disk en contactos bola-plano.....	75
2.5.2 Ensayos pin-on-disk en contactos plano-plano.....	76
2.6. Resumen de las condiciones de ensayos.....	77
2.7. Caracterización superficial de las chapas.....	78
2.7.1. Medidas de las áreas de contacto real.....	78
2.7.1. Determinación de texturas y topografía superficial.....	81
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS MULTIFRICCION. .	83
3.1. – Resultados Multifriccion contactos plano-plano.....	83
3.1.1. Efectos de la presión.....	87
3.1.2. Influencia de la Velocidad.....	92
3.1.3. Efectos de las pasadas sucesivas.....	98
3.1.4. Efectos del lubricante.....	102
3.2. Determinación de valores de la sección real de contacto.....	103

3.3. Modificaciones de la topografía superficial	111
3.4. Mecanismos de deformación del recubrimiento. Difracción de Rayos X.....	114
3.5. Análisis de los lubricantes.....	119
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS PIN ON DISC.	123
4.1. Ensayos con contacto esfera-plano en seco.....	125
4.2. Contactos esfera-plano con lubricación.	129
4.3 Contactos plano-plano con lubricación.....	131
5. RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS PIN ON DISC CON TRATAMIENTOS.....	134
5.1. Contactos esfera-plano en seco.	134
5.2. Efectos sobre el desgaste.....	137
5.3. Imágenes y análisis SEM de los materiales.....	140
5.4. Ensayos pin on disc con tratamientos y contactos esfera-plano con lubricación.....	146
5.5. Contactos plano-plano con lubricación.....	147
6.-MODELIZACION DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.	153
6.1. Valores del coeficiente de fricción y regímenes de lubricación.....	153
6.2. Condiciones óptimas de procesado de chapas Zn-Ni.....	156
6.3. Modelos paramétricos	158
6.4. Fricción en Condiciones BL. Efectos de la fracción de superficie de contacto Sc.	161
6.5. Efectos de la Presión y la Velocidad.....	164
6.6. Efectos de los aditivos BL y la Temperatura	167
7. CONCLUSIONES.....	170
7.1. Sobre el régimen de lubricación existente en las operaciones reales de embutición.....	170
7.2. Sobre los valores del COF en régimen de lubricación límite.....	170
7.3. Sobre los efectos de las variables del proceso.....	171

7.4. Sobre los efectos de la superficie real de contacto y los mecanismos de lubricación.	172
7.5. Condiciones críticas de procesado.....	173
7.6. Modelización de los valores de COF.....	174
7.7. Sobre el comportamiento en ensayos pin-on-disc con herramientas de acero templado.	175
7.8. Sobre los efectos de los tratamientos superficiales de nitruración. .	176
8. TAREAS ADICIONALES.....	178
9. BIBLIOGRAFIA	180

1. PANORAMA CIENTÍFICO

1.1. EMBUTICIÓN DE CHAPAS RECUBIERTAS.

La necesidad de reducir el peso de los automóviles y de aumentar la resistencia a la corrosión de las carrocerías ha dado lugar, desde finales de 1990, a la incorporación sistemática de nuevos tipos de chapas de aceros de alta resistencia, y al uso creciente de chapas pre-recubiertas con zinc y aleaciones de zinc: Zn-Fe, Zn-Ni, etc. con una superior resistencia frente a la corrosión que las clásicas chapas de aceros al carbono desnudo. Como promedio, las carrocerías de automóviles actualmente fabricadas en Europa incorporan porcentajes variables entre un 80 y un 100% de este tipo de chapas. El uso de estas chapas recubiertas se ha extendido también al campo de la fabricación de electrodomésticos de línea blanca y también al campo de la construcción de mobiliario metálico (armarios eléctricos, muebles de oficina, puertas cortafuegos, etc...). Como ejemplo cercano a nuestro entorno industrial cabe citar la presencia en Sagunto de las empresas Arcelor-Mittal Sagunto y Thyssen Krupp Galmed, que producen chapa recubierta con Zn y Zn-Ni por procesos electrolíticos, y chapa recubierta con Zn y Zn-Fe mediante procesos continuos de inmersión en caliente, con destino a los mercados del automóvil nacional y europeo, con una capacidad de producción superior a las 500.000 Tm/año.

El uso de estos nuevos tipos de chapas para la fabricación de carrocerías ha hecho necesaria una adaptación y/o modificación de los procesos de transformación: fosfatación, soldadura, pintura, etc. Originalmente diseñados para la chapa de acero desnuda laminada en frío. Un problema que todavía persiste aparece asociado a las operaciones de conformado de las piezas por embutición, donde la utilización de chapas pre recubiertas sigue dando lugar a una serie de problemas específicos a los fabricantes de automóviles que no aparecen con acero desnudo¹.

Básicamente, los fenómenos observados se traducen en:

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

- aparición ocasional de roturas en las chapas cuando se procesan bobinas que provocan cambios en el comportamiento tribológico, incrementando los valores de fricción. Ocasionalmente se dan fenómenos de gripado o “galling” con la matriz, con aparición de daños superficiales y roturas en las piezas embutidas.
- desprendimiento de polvo del recubrimiento, que provoca rayados y dañado en las piezas, desgaste prematuro de las matrices y mayores costes de limpieza y mantenimiento.
- eventualmente, y en matrices corregidas para evitar los problemas anteriores, aparición de fenómenos de " buckling" o arrugamiento de la chapa, asociados a una fricción insuficiente.

El problema más grave, sin duda, en los procesos de embutición es la aparición de roturas, lo que determina la imposibilidad de llevar a cabo físicamente la operación ya que deben desecharse las piezas fracturadas. En la práctica resulta inadmisibile incluso la aparición de zonas con estricción localizada que provoque un adelgazamiento o reducción local de espesor, un estado previo a la rotura de la chapa.

El estudio de la influencia de las superficies (naturaleza superficial), condiciona la tendencia a la adhesión entre el recubrimiento y la matriz. Es un fenómeno bien conocido por la experiencia en otros campos de la industria mecánica: cojinetes, guías, etc. De hecho, es el responsable del fenómeno que se aborda en la presente tesis, ya que resulta bien conocido que los recubrimientos modifican notablemente el comportamiento en prensas debido a sus efectos sobre el comportamiento tribológico².

Se acepta que las propiedades mecánicas del material base, tales como los índices de anisotropía³ r o el índice de endurecimiento n no se modifican de forma significativa como consecuencia de la aplicación de recubrimientos de cinc. Los recubrimientos duros de aleación Zn-Fe o Zn-Ni reducen ligeramente los valores del coeficiente de anisotropía r , aunque este efecto es despreciable en la práctica si se

verifican sobre las chapas recubiertas las características mínimas exigidas al material.

Las razones primarias de un diferente comportamiento en la estampación con respecto al acero desnudo se atribuyen a las diferencias en el comportamiento en fricción. Los recubrimientos de cinc puro son más blandos (45-60 HVN) que el acero desnudo de embutición (90-120 HVN) y presentan una gran tendencia a la adhesión con los aceros y otras aleaciones férreas. Por el contrario, los recubrimientos de aleaciones Zn-Fe y Zn-Ni son más duros, lo que incrementa la resistencia al corte de las capas superficiales, pero por otra parte dificulta el aplastamiento de las asperezas, asegurando la retención de aceite lubricante.

En estudios previos realizados en colaboración con Ford España se ha trabajado analizando el comportamiento de recubrimientos de cinc, bien aplicado electrolíticamente o por inmersión. Por ello se considera de interés extender el estudio a otros tipos de materiales actualmente utilizados: zinc-níquel, zinc-hierro –galvannealed- o a las aleaciones de aluminio. También se ha trabajado exclusivamente con un tipo de material para las matrices: materiales férreos (aceros de herramientas en los equipos de laboratorio o fundición dúctil templada en el caso de las piezas reales). Otros tratamientos alternativos, como los recubrimientos por nitruración o los recubrimientos de cromo podrían contribuir a la mejora de resultados en la embutición de chapas recubiertas.

1.1.1. Factores del proceso de embutición.

Una operación de embutición de una pieza de carrocería se considera exitosa cuando se consigue conformar la pieza con la forma prevista (precisión dimensional) sin que aparezcan los problemas citados: ausencia de roturas o adelgazamiento local de la chapa y ausencia de marcas o daños superficiales.

El éxito de la operación de embutición depende de un elevado número de factores, que podemos agrupar en tres categorías: Factores propios

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

del proceso, factores del material que se embute y condiciones tribológicas⁴.

La Figura 1, representa esquemáticamente los elementos involucrados:

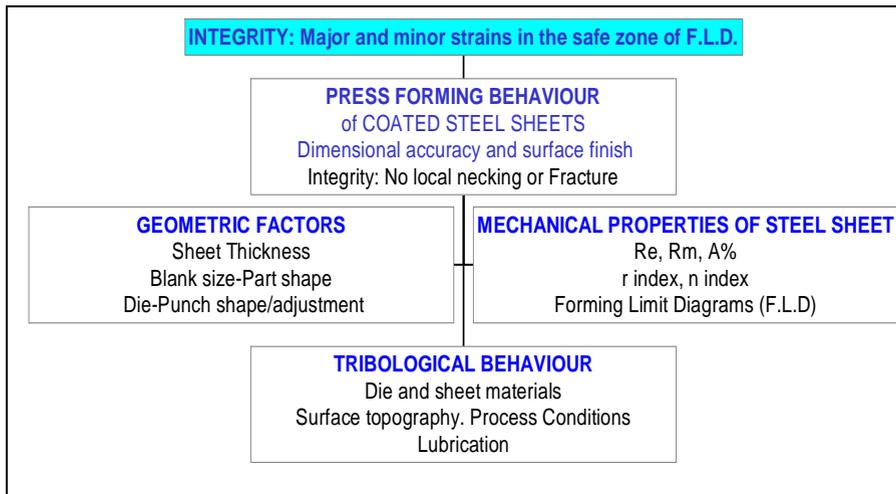


Figura 1. Elementos clave en un proceso de embutición

Factores del proceso: incluyen variables como diseño de la matriz, presiones en los prensachapas, radios de entrada, existencia y dimensiones de frenos (draw-beads) etc. Una presión excesiva en los prensachapas dificulta el flujo de material hacia la matriz, dando lugar a roturas. Una presión insuficiente determina la aparición de arrugas y pliegues.

Factores del material: La capacidad del material para soportar las deformaciones a que se ve sometido durante un proceso de embutición depende en primera instancia de su ductilidad, que debe ser suficientemente elevada. Otros factores mecánicos son igualmente importantes. Un índice de endurecimiento por deformación n elevado en la ecuación de Hollomon $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ ayuda a distribuir las deformaciones uniformemente. Otra propiedad importante es el índice de anisotropía plástica o índice de Lankford $r = \epsilon_{yy}/\epsilon_{zz}$. Un valor elevado de este parámetro asegura que la deformación se lleva a cabo a costa de cambios en el ancho de la chapa (plano x-y) y no a costa de

deformaciones en el espesor (eje z). Finalmente, interesa una alta isotropía en la superficie Δr , lo que asegura que las deformaciones en el plano xy de la chapa no dependen de la dirección considerada (dirección de laminación o dirección transversal).

Factores tribológicos: dado que todo el proceso se realiza por arrastre de material bajo contacto con las herramientas (matriz y punzones), las condiciones tribológicas resultan determinantes en el proceso. De manera general, una fricción demasiado elevada dificultará el flujo de material hacia la matriz, siendo causa de roturas. Una fricción demasiado baja, por el contrario, hace que el material fluya con facilidad hacia la matriz, lo que en determinados diseños puede impedir un correcto conformado. Así, en muchas matrices de embutición es necesario el empleo de frenos (pliegues forzados en U), de modo que se restrinja el flujo. Estos factores se analizan con mayor profundidad en el próximo apartado.

1.1.2. Aceros para embutición

Los aceros para embutición profunda se caracterizan por poseer una elevada capacidad de deformación plástica. Para lograr altos valores de ductilidad, los contenidos en aleantes, especialmente carbono, silicio y manganeso, están limitados a valores muy bajos, y también se limitan los valores máximos de límite elástico y resistencia a la tracción. Entre las diferentes familias de aceros, los aceros para embutición son, como familia, los de menor contenido en carbono. Las propiedades de interés en las chapas de acero para embutición profunda se determinan a partir de ensayos de tracción convencionales. En Europa, los ensayos se llevan a cabo de acuerdo con la norma EN 10027-1. La tabla siguiente presenta las características de los diferentes tipos de aceros de embutición, según la versión más reciente de norma europea “Steels for cold forming and deep drawing applications” EN10346.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Tabla 1: Propiedades de los aceros de embutición.

	Dirección	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A ₈₀ (%)	r 90	n 90
DX51D	T	-	270 - 500	≥ 20	-	-
				≥ 22		
DX52D	T	140 - 300	270 - 420	≥ 24	-	-
				≥ 26		
DX53D	T	140 - 260	270 - 380	≥ 28	-	-
				≥ 30		
DX54D	T	120 - 220	260 - 350	32 - 50	≥ 1.4	≥ 0.180
				34 - 50		
DX55D	T	140 - 240	270 - 370	≥ 30	-	-
				≥ 32		
DX56D	T	120 - 180	260 - 350	≥ 37	≥ 1.7	≥ 0.200

Además de los aceros dulces de alta embutibilidad, se emplean también en la actualidad otros tipos de acero de mayor resistencia mecánica para la obtención de algunas piezas con responsabilidad estructural en el automóvil: ruedas, parachoques, columnas de refuerzo, etc., aunque los mismos presentan en general menor aptitud para la embutición.

Entre estos tipos de aceros especiales, es habitual el uso de aceros endurecibles por precipitación o con efecto “bake hardening”, con valores de límite elástico Re entre 180-300 MPa, aceros microaleados HSLA, con valores de Re entre 260 y 420 MPa y aceros refosforados o microaleados libres de elementos intersticiales o “interstitial free”(IF), con valores de Re entre 220-300 MPa (EN 10268). También se emplean los aceros de muy alta resistencia de los tipos aceros de fase dual martensita-ferrita, con valores de Re entre 300-900 MPa y aceros TRIP, con valores de Re entre 380-550 MPa (EN10338)⁵.

1.1.3. Recubrimientos de protección anticorrosiva

Con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión de las carrocerías, en la actualidad prácticamente todos los fabricantes emplean chapas de acero pre-recubiertas con cinc o aleaciones de cinc, en sustitución de las chapas de acero desnudo. Estos recubrimientos protectores se aplican en las plantas siderúrgicas sobre todo tipo de aceros. A continuación se describen las características generales de los recubrimientos más empleados: electrocincado, galvanizado, galvannealed (Zn-Fe) y recubrimientos Zn-Ni⁶.

1.1.4. Recubrimientos en el acero.

1.1.4.1. Recubrimiento del acero por electrocincado.

El revestimiento de chapas de acero por electrocincado, denominado habitualmente en normas con la abreviación EZ o ZE, se obtiene mediante electrodeposición en continuo de una capa de cinc puro, en baños ácidos de tipo sulfatos o cloruros. Es un tipo de revestimiento muy utilizado en piezas vistas de carrocerías y en piezas de alta dificultad. En aplicaciones para automóvil se emplean habitualmente espesores de 5 y 7,5 μm por cara. Según la designación normalizada EN10152, se emplean los recubrimientos entre ZE25 y ZE100.

La ausencia de tratamiento térmico durante el proceso electrolítico hace que no se modifiquen las características del material base, por lo que este tipo de revestimiento es especialmente adecuado en aceros de muy alta embutibilidad (Calidades DC06). Otra ventaja del proceso es que, en los espesores habitualmente empleados, la capa es capaz de reproducir con bastante precisión la topografía superficial del sustrato, con lo que no se requieren tratamientos posteriores de skin-pass para el control de la topografía superficial.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

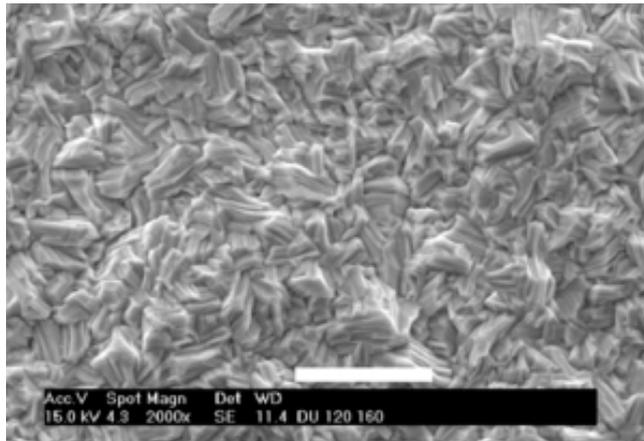


Figura 2. Imagen de acero electrocincado a 2000 aumentos (EZN 2000X)

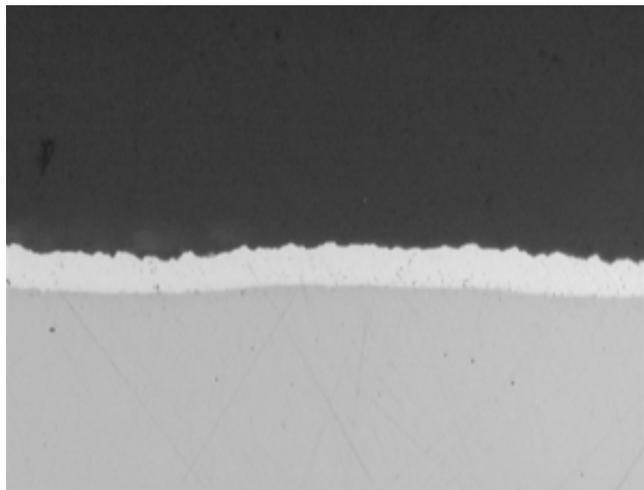


Figura 3. Imagen de la sección del acero electrocincado a 1000 aumentos (EZN 7.7/7.5 1000X) Arcelor Mittal.

El carácter dúctil del revestimiento de cinc puro proporciona una elevada capacidad de deformación intrínseca, haciendo que sean posibles grandes deformaciones en las chapas sin que el revestimiento se agriete, garantizando una buena protección anticorrosiva. Desde el punto de vista tribológico, sin embargo, presenta una mayor tendencia a la adhesión con las matrices que los recubrimientos de cinc obtenidos por inmersión en caliente. En piezas complejas, con baja lubricación y altas presiones de contacto, se producen ensuciamientos

de la matriz por transferencia de metal, que requieren de paradas frecuentes para su eliminación.

1.1.4.2. Recubrimiento de cinc por inmersión en caliente.

El revestimiento galvanizado o “Hot Dip” se obtiene mediante inmersión en caliente (paso de la banda de acero por un baño de cinc fundido) de las chapas de acero laminado en frío, sin recocido previo en campana. En aplicaciones para piezas vistas de carrocerías se emplean capas de estrella mínima, en las que no se observan cristales de cinc a simple vista. Para conseguir un control preciso de la topografía superficial es necesario aplicar un tratamiento final de skin-pass, tras la aplicación del recubrimiento, para que se puedan obtener aspectos pintados de muy alta calidad en las carrocerías de los automóviles.

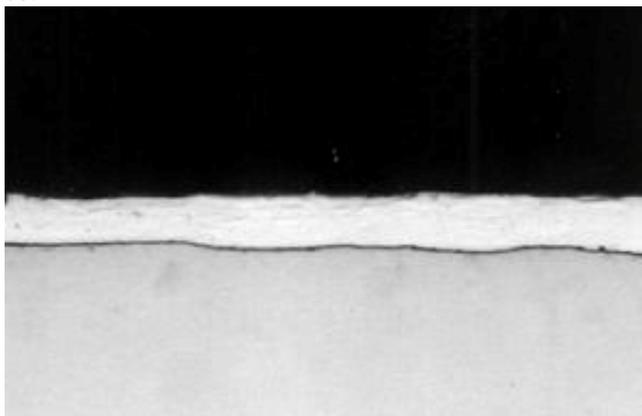


Figura 4. Imagen Recubrimiento Hot-dip (Ultragal) de Arcelor Mittal

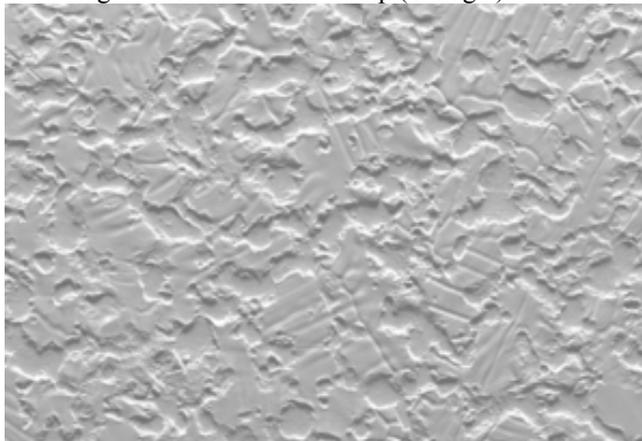


Figura 5. Imagen Recubrimiento Hot-dip (Ultragal) de Arcelor Mittal.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Su comportamiento tribológico en la embutición se considera ligeramente mejor que el cinc puro electrolítico, debido a la existencia de una capa superficial de óxidos que minimiza los riesgos de adhesión con las herramientas. Si se asegura una buena lubricación, se obtienen valores de coeficiente de fricción del orden de 0,10 a 0,14, que le confiere una excelente aptitud para la estampación. Su elevada ductilidad evita también los problemas de desprendimiento de polvos, característicos de los recubrimientos de alta dureza Zn-Fe y Zn-Ni. En la actualidad es, con diferencia, el tipo de revestimiento más empleado, debido a sus buenas prestaciones globales y especialmente, debido a su menor coste en comparación con otros tratamientos.

1.1.4.3. Recubrimiento Zn-Fe o “Galvannealed”

Los recubrimientos Zn-Fe, denominados comúnmente “galvannealed” se obtienen mediante recocido en continuo de chapas de acero previamente galvanizadas en caliente con cinc puro. Su obtención se lleva cabo a cabo en las líneas de procesado continuo que se emplean para aplicar recubrimientos “hot dip”. En la bibliografía se designan habitualmente como recubrimientos GA (Galvannealed), y también ZF, según la designación de las normas EN.

Para conseguir la aleación, la chapa recubierta con cinc puro se hace pasar a través de un horno de tratamiento térmico, a temperaturas de unos 450-500°C, que facilita la interdifusión de Zn y Fe, hasta conseguir una capa externa formada principalmente por la fase δ Fe-Zn (8-12% de Fe), que presenta una dureza elevada, entre 200-250 HV. Debe evitarse un tratamiento prolongado a alta temperatura, ya que existe el riesgo de formación de estructuras b.c.c. frágiles de fases ricas en hierro Γ (16-20%Fe) y Γ_1 (20-30%Fe) en la capa intermedia entre el recubrimiento y el sustrato de acero.

En el campo de la fabricación de carrocerías, las principales ventajas sobre los recubrimientos de cinc puro se relacionan con una ligera mayor resistencia a la corrosión en ambientes salinos, la mayor

adherencia en húmedo de las pinturas y su excelente soldabilidad, que se atribuye a su elevada dureza y a su elevado punto de fusión. Según la norma ISO 18278-2, las chapas galvannealed de espesor 0,7 mm y recubrimientos de 5 micras presentan un rango de soldabilidad por puntos entre de 8,6 a 9,6 kA y una vida útil de los electrodos de 1200 puntos sin cepillado, que es tres veces superior a la que se consigue con chapas recubiertas de cinc puro.

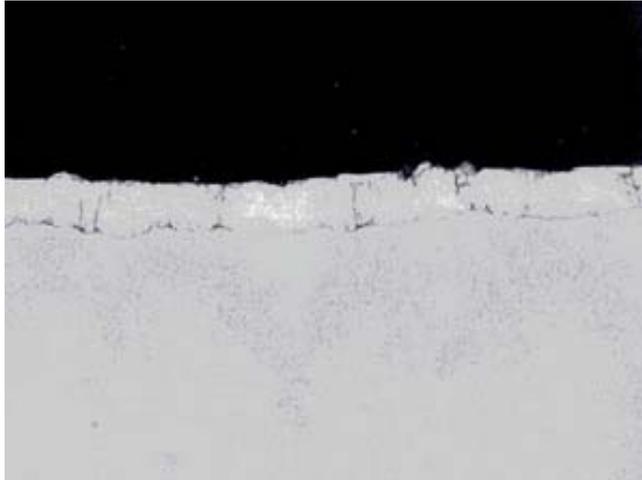


Figura 6. Imagen microscópica 400X de un recubrimiento “Galvannealed”

A pesar de estas ventajas, el uso de chapas galvannealed se asocia con frecuencia a problemas de desprendimiento de polvos de la capa de recubrimiento durante el conformado, asociados a la presencia de la capa interfacial gamma frágil. Por ello, su utilización es desaconsejable en piezas de alta dificultad. También por ello es recomendable el uso de menores espesores de recubrimiento que los habituales en chapas recubiertas con Zn puro. Los valores habituales son entre 4 y 9 micras de espesor. Asimismo, la dureza del revestimiento modifica ligeramente los valores del coeficiente de Lankford r , lo que reduce ligeramente la aptitud de las chapas para la estampación profunda de alta dificultad.

1.1.4.4. Recubrimiento Zn-Ni.

Los recubrimientos de aleaciones Zn-Ni se obtienen mediante electrodeposición en baños electrolíticos que contienen sales de cinc y

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

de níquel en proporciones adecuadas. Las instalaciones son las mismas o similares a las que se emplean para la obtención de recubrimientos de electrocincado. Las capas empleadas como recubrimientos en aceros para embutición presentan una composición entre 10.5 y 13% Ni y los espesores habituales van desde 2 a 6 micras. Las condiciones de suministro habituales se encuentran recogidas en la norma europea EN 10271. Designación DC06+ZN50/50: Chapa de acero de calidad DC06 (Según EN10130), con recubrimiento Zn-Ni de espesor nominal 5 micras por cara. Espesores desde ZN20 a ZN60.

Las aleaciones Zn-Ni se emplean habitualmente como recubrimientos de alta resistencia a la corrosión, como alternativa a los convencionales de cinc puro, debido a su superior resistencia frente a la corrosión. En medios ricos en NaCl o CaCl₂, como los resultantes de las proyecciones y salpicaduras que se encuentran en carreteras de zonas frías donde se aplican este tipo de sales para favorecer el deshielo, su resistencia a la corrosión es unas tres veces superior a los recubrimientos de cinc puro, lo que permite reducir los espesores de capa aplicados o mejorar la resistencia a la corrosión por perforación de la carrocería. El proceso electrolítico de aplicación permite su uso tanto en chapas de aceros de alta embutición como en aceros de alto límite elástico. Este tipo de capas presenta también ventajas en cuanto a su mejor aptitud frente a la soldadura por resistencia, requiriendo menores intensidades de soldeo que los recubrimientos de cinc puro. Debido a estas ventajas, muchos fabricantes japoneses y también algunos europeos emplean este tipo de chapas en determinados paneles de la carrocería, en particular en paneles interiores de puertas y bajos del vehículo o en piezas bajo capó.

Sin embargo, el recubrimiento Zn-Ni plantea algunos problemas durante el procesado de las chapas, lo que constituye una importante limitación para un uso más extendido. En particular, se ha observado que este tipo de chapas presenta un comportamiento tribológico durante la embutición muy diferente del característico de las chapas de acero desnudo o de los recubrimientos de cinc puro, siendo frecuente la aparición de fenómenos de gripado, roturas y problemas de desprendimiento de polvos que contaminan o ensucian las matrices.

Las aleaciones obtenidas por electrodeposición Zn-Ni en el rango 10-15%Ni presentan generalmente una estructura monofásica γ ⁷. Dicha fase aparece como fase única en el diagrama de equilibrio para contenidos en níquel desde 13,7 a 19.8% Ni, con una estructura cúbica de 52 átomos por celda correspondiente al intermetálico Ni₅Zn₂₁ (17.61%Ni)⁸, si bien otros autores indican que la fase electrodepositada γ corresponde a una mezcla de intermetálicos: Ni₅Zn₂₁, Ni₃Zn₂₂ y NiZn₃⁹.

El diagrama de fases presenta las fases características del Zn-Ni.

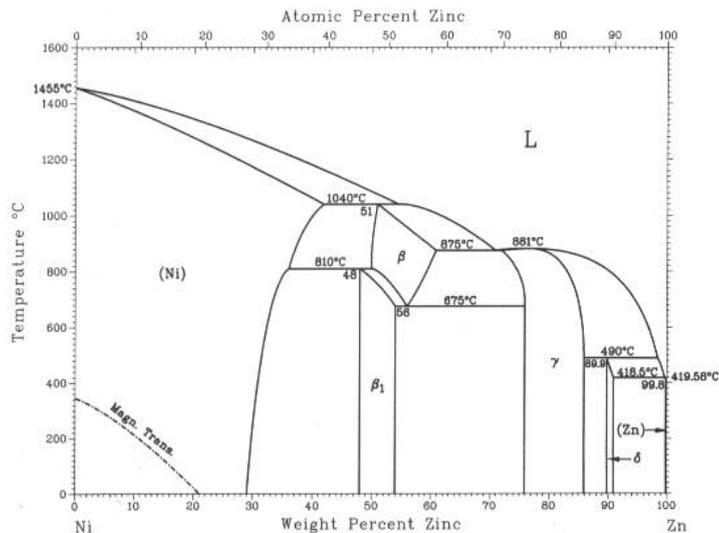


Figura 7. Diagrama de fases Ni-Zn (Ref. P. Nash, Y.Y. Pan (1991). ASM Handbook

En la actualidad, el principal productor europeo de chapas para automóvil con recubrimiento Zn-Ni es la compañía alemana Thyssen Krupp Stahl¹⁰, que comercializa las chapas de embutición profunda recubiertas con Zn-Ni bajo el nombre comercial Neuralyt, con espesores estándar de 5 micras (37 g/m²)¹¹. Para usos generales sobre aceros de embutición profunda, el recubrimiento Zn-Ni se comercializa según EN10271, con espesores desde 2 a 7 micras y con la designación ZN. En la información comercial señala que el comportamiento tribológico está fuertemente afectado por la topografía superficial, y aporta valores típicos del coeficiente de fricción del orden de 0.12 a 0.15 en ensayos de fricción plana, aunque no indica detalles de las condiciones del ensayo.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

La empresa Thyssen también ha incorporado recientemente recubrimientos de este tipo como los más apropiados para componentes de carrocería de aceros de alta resistencia de fase dual que se procesan por estampación en caliente, a temperaturas del orden de 900°C, y para los cuales otros recubrimientos de cinc puro no presentan una temperatura de fusión suficientemente elevada. La estampación en caliente - o conformación en caliente – de aceros de alta resistencia está en auge en la industria automotriz ya que permite reducir el peso del vehículo. El enfriamiento rápido produce componentes con una resistencia a la rotura por encima de 1000 MPa, lo que permite la producción de piezas con paredes más delgadas y un menor peso¹².

1.1.5. Tratamientos superficiales en las matrices de embutición

Los materiales empleados en las matrices de embutición real de piezas de carrocerías suelen ser, en la actualidad, aceros fundidos o preferiblemente, para grandes partes de las prensas, fundiciones de grafito esferoidal de matriz perlítica con tratamiento térmico (temple local o austempering), de tipo EN-GJS-800 o EN-GJS-900 según EN 1583, con valores de dureza superficial en estado bruto del orden de 300-300 HB. Si se aplican tratamientos térmicos de temple superficial, pueden alcanzarse valores de dureza muy elevados, del orden de 50-60 HRC.

Con el fin de mejorar la duración de algunas zonas críticas, estas matrices suelen adicionalmente endurecerse localmente mediante tratamientos adicionales. Entre los tratamientos superficiales aplicados, los que más amplia aceptación han alcanzado son los tratamientos de nitruración, con los que se consiguen durezas entre 700-1000 HV y los recubrimientos de cromo duro, con durezas superficiales del orden de 700-750 HV. En todos los casos es importante conseguir un buen acabado superficial, mediante operaciones de pulido, que permiten lograr valores de rugosidad bajos, Ra por debajo de 0.15 micras^{13 14}.

Las ventajas de estos recubrimientos son evidentes en términos del incremento en resistencia frente al desgaste de las matrices, pero no siempre tienen efectos favorables en la reducción de los valores del coeficiente de fricción, en especial cuando se embuten chapas recubiertas con cinc o aleaciones de cinc. De hecho, se ha encontrado en varios estudios que los efectos de un recubrimiento pueden ser favorables o desfavorables, en comparación con los resultados obtenidos con estructuras férreas templadas o revenidas, dependiendo del acabado superficial, de la naturaleza del recubrimiento (electrocincado, galvanizado en caliente, galvanelado) y del tipo de lubricantes empleado¹⁵. En la actualidad, plantas de embutición como Ford Almussafes emplean de modo regular tratamientos locales de cromado duro, cuyo fin primordial es el incremento de vida útil de las herramientas. No se han encontrado en la bibliografía estudios específicos sobre los efectos de los tratamientos en chapas recubiertas con cinc-níquel. Este tipo de chapas puede provocar, aparte de cambios en el comportamiento tribológico, modificaciones importantes en las tasas de desgaste, ya que presentan valores de dureza superficial superiores a los de las chapas desnudas o a las chapas recubiertas con cinc puro.

En el trabajo experimental de esta tesis se pretende explorar el efecto de estos tratamientos de las matrices en el comportamiento tribológico de las chapas recubiertas con cinc-níquel. En particular, se analizarán dos tipos de recubrimientos de nitruración o nitrocarburation: la nitruración en baño de sales por el proceso Tenifer[®] y la nitruración gaseosa en vacío, con nombre comercial Nitrovac[®]. Ambos procesos se aplican a temperaturas máximas de 575-580°C y permiten obtener capas de elevada dureza, entre 700-1100 HV.

Los procesos de nitruración incorporan nitrógeno en la superficie exterior de las piezas, dando lugar a la formación de una capa externa en la que existe una solución sólida de nitrógeno en la superficie y se desarrolla una capa de compuestos, con un espesor total entre 5 y 30 micras, que contiene las estructuras gamma prima (Fe_4N) y nitruros epsilon (Fe_3N). La zona interna denominada capa de difusión, se caracteriza por la formación de agujas de nitruros en bordes de grano. El grosor normal de la capa endurecida total oscila entre 0,2 y 1,5 mm.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

La presencia del carbono en el proceso de nitruración no contribuye decisivamente a la composición de la capa, salvo por la posible formación de compuestos de tipo carbonitruros ($\text{Fe}_x\text{C}_y\text{N}_z$) en la capa externa, pero tiene efectos catalizadores, permitiendo conseguir profundidades de penetración superiores que cuando se emplean procesos de nitruración pura.

La nitruración en vacío o a baja presión es un procedimiento que se lleva a cabo en hornos especiales en los que puede hacerse vacío. Tiene un coste de aplicación muy superior al de los tratamientos en sales y limitaciones en el tamaño de las piezas a tratar, pero tiene la ventaja de que permite conseguir un estrecho control del tipo de nitruros formados mediante el control de la atmósfera en el horno y excelentes acabados superficiales. Se obtienen normalmente espesores de capa de 0,20 a 0,60 mm.

1.1.6. Deformaciones y roturas en la embutición. Curvas FLD

La herramienta fundamental para el análisis de las deformaciones que sufre la chapa y para evaluar riesgos de fractura en los procesos de embutición de componentes de carrocerías es el empleo de mapas de deformaciones¹⁶, en conjunto con la curva FLD (Forming Limit Diagram) o FLC (Forming Limit Curve) característica del material a embutir. A partir de las deformaciones observadas en círculos o tramas de tamaño conocido, marcados sobre la chapa original, es posible determinar el estado de deformaciones en cualquier punto o zona de la chapa¹⁷.

El fundamento de las mediciones es simple. En el caso de emplear círculos como referencia, un círculo marcado en la superficie original de la chapa sufrirá un proceso de deformación como consecuencia del proceso de conformado, dando como resultado final una elipse. Midiendo los dos semiejes mayor y menor de la elipse d_1 y d_2 y comparándolos con el diámetro original de los círculos d_0 , pueden calcularse con facilidad las deformaciones en cualquier punto.

Se definen en el plano de la chapa las deformaciones reales mayor ε_1 y menor ε_2 como:

$$\varepsilon_1 = \ln d_1 / d_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \ln d_2 / d_0 \quad (2)$$

Dichas deformaciones se representan en un diagrama ε_1 - ε_2 en el que se comparan con las deformaciones máximas que puede sufrir el material de la chapa sin rotura o sin la aparición de estricción local. La curva característica del material se conoce como curva FLD (Forming Limit Diagram) o también FLC (Forming Limit Curve), y es una propiedad intrínseca del material de las chapas y de su espesor.

Los diagramas FLD para el análisis de deformaciones durante la embutición fueron inicialmente desarrollados por Keeler¹⁸ en 1965, para la parte derecha del diagrama, con deformaciones positivas, y fueron completados por Goodwin¹⁹ en relación con la parte izquierda del mismo. Desde entonces se han convertido en una herramienta básica para el análisis de los procesos de deformación plástica de chapas, y en particular en los procesos de embutición.

La obtención de la curva límite FLD o FLC puede realizarse a partir de ensayos experimentales, como por ejemplo el método Nakazima²⁰ o el de Marciniack²¹. No obstante, y para el caso de embutición de chapas de acero, se han obtenido diferentes modelos que permiten obtener y dibujar la curva límite con precisión suficiente a partir simplemente de los datos de ensayos de tracción y del espesor de las chapas. La fórmula habitualmente empleada para determinar la posición mínima en el eje horizontal, conocida como valor FLDo, es la siguiente:

$$FLDo = [23.3 + 14,13 t] x [n/0,21] \quad (3)$$

Donde t es el espesor de la chapa (mm) y n es el coeficiente de endurecimiento por deformación.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

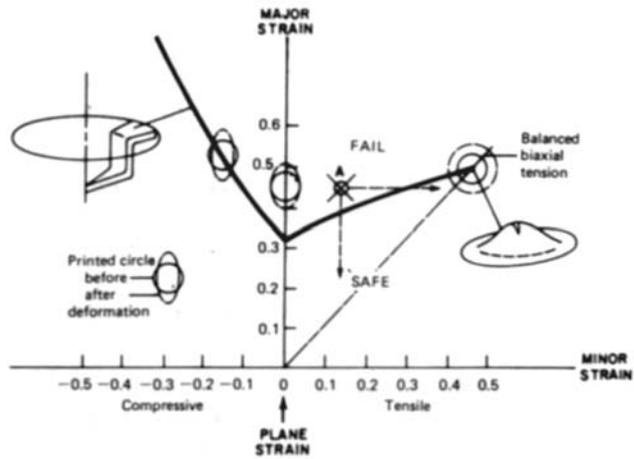


Figura 8. Diagrama FLD mostrando diferentes estados de deformaciones

La Figura 8 presenta esquemáticamente un diagrama FLD y posibles estados de deformación. En la actualidad existen incluso métodos automatizados que, mediante técnicas de análisis de imagen, permiten llevar a cabo el análisis de mapas de deformaciones sobre piezas reales en cuestión de minutos, como los sistemas de adquisición de imágenes CAMSYS²² y los sistemas de determinación automática de deformaciones a partir de imágenes digitales (ASAME²³), de amplia utilización por los fabricantes de automóviles^{24 25 26}. Un reciente estudio de Col²⁷ presenta una interesante y completa revisión del método FLD y de su desarrollo histórico hasta hoy.

1.1.7. Diseño de matrices para embutición de componentes de carrocerías.

El uso de los diagramas FLD y de los mapas de deformación es hoy una herramienta insustituible en el proceso de diseño y puesta a punto de nuevas matrices, una tarea que tradicionalmente se ha llevado a cabo sobre la base de la experiencia personal de matriceros experimentados. Las herramientas de simulación mediante métodos de elementos finitos permiten detectar con rapidez, y sin necesidad de

llevar a cabo la construcción física de las herramientas, potenciales problemas o zonas críticas.

El objetivo de la fase de diseño y puesta a punto de la matriz es conseguir que todos los puntos de la superficie se encuentren en la zona segura del diagrama FLD, esto es, por debajo de la curva. Normalmente, y dado que pequeñas variaciones en las condiciones tribológicas, del proceso o del material, pueden hacer cambiar la situación del FLD o la distribución de deformaciones, se emplea una zona de seguridad, también llamada zona marginal, que se dibuja en el diagrama desplazando un 10% hacia abajo la curva FLD.

El diseño de una nueva carrocería lleva asociado el diseño y puesta a punto previos de todas las herramientas (matrices) necesarias para su conformado. En el sector de las carrocerías de automóviles, esta fase de diseño y puesta a punto se lleva habitualmente a cabo en tres etapas:

La fase de diseño. Se emplean exclusivamente sistemas virtuales de simulación MEF. Con esta finalidad existen algunos programas de elementos finitos especialmente dedicados, de los cuales el más potente y más ampliamente utilizado en el sector es PAMSTAMP 2G²⁸. Para cada pieza es posible estimar, a priori, los mapas de deformación y comparar los resultados con las curvas límite del material, de modo que todas las deformaciones²⁹ sean aceptables. Como resultado final pueden definirse las geometrías iniciales de las piezas y la geometría de las herramientas. Los efectos tribológicos sobre las zonas de contacto se simulan con valores constantes del coeficiente de fricción, usualmente entre 0.15-0.20.

La fase inicial de pruebas reales, que se lleva a cabo con matrices reales, pero fabricadas en materiales fácilmente conformables por colada y mecanizables, como aleaciones Al-Zn (Zamak). En esta fase se verifica la capacidad para obtener piezas sin roturas y con la precisión dimensional apropiada. Respecto a los potenciales efectos tribológicos, esta fase tiene la limitación de que la naturaleza del material de las matrices es diferente de la que se empleará finalmente en producción.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

La fase de puesta a punto en las plantas de proceso. Esta fase, conocida como “die-tryout” se lleva a cabo empleando ya matrices reales de acero colado o fundición de grafito esferoidal, que son finalmente tratados térmicamente para conseguir las propiedades finales. Esta fase, previa a la producción en serie, debería ser exclusivamente una fase de pequeños ajustes: retoques en los radios de entrada, corrección de frenos, etc.

Desde un punto de vista ideal, tras la fase de diseño y con las correcciones finales llevadas a cabo en la fase de puesta a punto de las matrices (die try-out), todos los puntos de la pieza deben estar situados por debajo de la zona marginal. Existen dos alternativas para modificar la posición de los puntos en un determinado proceso:

Las deformaciones reales pueden reducirse en el diseño cambiando la geometría o las condiciones del proceso (mayores radios de entrada a la matriz, por ejemplo, o empleo de condiciones especiales de lubricación).

Puede subirse hacia arriba la curva límite del material FLD mejorando la calidad del material de embutición (aceros de mayor grado de embutición), o bien aumentando el espesor de las chapas. Ambos factores incrementan los costes de las piezas obtenidas y van en contra de la reducción de peso.

Un ejemplo de la dificultad para predecir el resultado final del proceso de diseño se encuentra en el diferente comportamiento que muestran algunas chapas recubiertas con las matrices de zamak, en las que el comportamiento varía dependiendo del modo de deformación en las chapas. Los materiales recubiertos con aleaciones Zn-Fe, por ejemplo, muestran sistemáticamente una baja conformabilidad en comparación con las prensas reales, independientemente del modo de deformación. Las chapas recubiertas con Zn puro, en cambio, muestran problemas con las matrices de zamak solamente cuando se produce deslizamiento en condiciones de deformación plana, como ocurre en el paso por los draw-beads o frenos³⁰.

1.1.8. Embutición de piezas complejas. Efectos de las pasadas múltiples.

En la embutición de piezas de carrocería de formas complejas, la operación de embutición o conformado de la pieza suele llevarse a cabo en varias etapas sucesivas. Es decir, no basta con una única fase de empuje del punzón, sino que es necesario, tras una primera fase, llevar a cabo, al menos, una segunda etapa de embutición, en sentido contrario, al objeto de conformar la forma definitiva. Normalmente, es también necesario incluir finalmente una etapa de troquelado o eliminación de bordes externos. Así, para el conformado de cada pieza se requiere montar en la línea de prensas una serie de herramientas, que incluyen matrices y sus correspondientes prensachapas y punzones. En las líneas de fabricación modernas, la chapa entra inicialmente en la línea tras el corte del “blank” o desarrollo de la pieza plana, y sale finalmente conformada, pero no se maneja o se aplican tratamientos adicionales intermedios durante el proceso.

El hecho de llevar a cabo varios pasos por las sucesivas herramientas puede provocar modificaciones superficiales en el material que se procesa, incluyendo cambios de la topografía y posibles pérdidas de lubricante, y en consecuencia lleva a modificaciones del comportamiento tribológico idealmente esperado en la primera pasada. En la práctica, estas modificaciones que se dan en piezas con embutición múltiple o “re-embutición”, suelen llevar asociados problemas de conformado, y en comparación con otras piezas más simples, suelen ser piezas consideradas de alta dificultad para la embutición.

La Figura 9 muestra un panel lateral de un vehículo, en el que se muestran diferentes zonas de la pieza. Las zonas denominadas 1 y 2 son zonas que solamente han sufrido una fase de embutición. Las zonas 3 a 7, en cambio, solo pueden obtenerse tras una nueva embutición en sentido inverso. Los laterales de la carrocería, junto con el piso de los vehículos y el salpicadero frontal, son piezas típicas de carrocerías consideradas de alta dificultad, que requieren de embutición múltiple.

Las Figura 10 y Figura 11 muestran los mapas de deformaciones FLD de dos de las zonas indicadas en la figura anterior, obtenidos con un

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

sistema de análisis de deformaciones automatizado para una pieza compleja de carrocería, como el lateral. La denominada zona 2 presenta un mapa de deformaciones claramente en la zona segura de la curva FLD. Por el contrario, el mapa de deformaciones mostrado en la Figura 11 y Figura 12, que corresponde a una zona de la misma pieza, muestra valores no aceptables de deformaciones. La situación es similar para las otras zonas 3 a 7 indicadas en la figura.

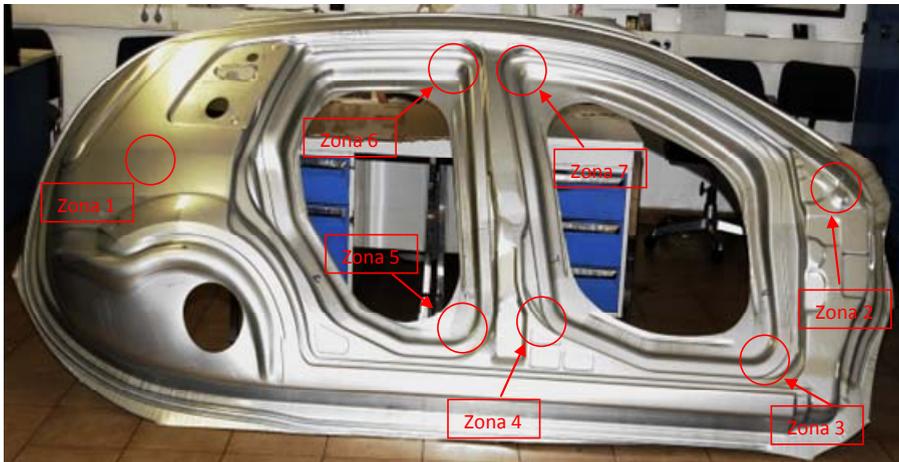


Figura 9. Imagen de un panel lateral de carrocería de un automóvil tras la embutición. En los círculos se indican zonas específicas sometidas a estudio de deformaciones FLD. Chapa de calidad EDDQ: DX56D de 0.80mm de espesor. Coeficiente $n= 0.21$.

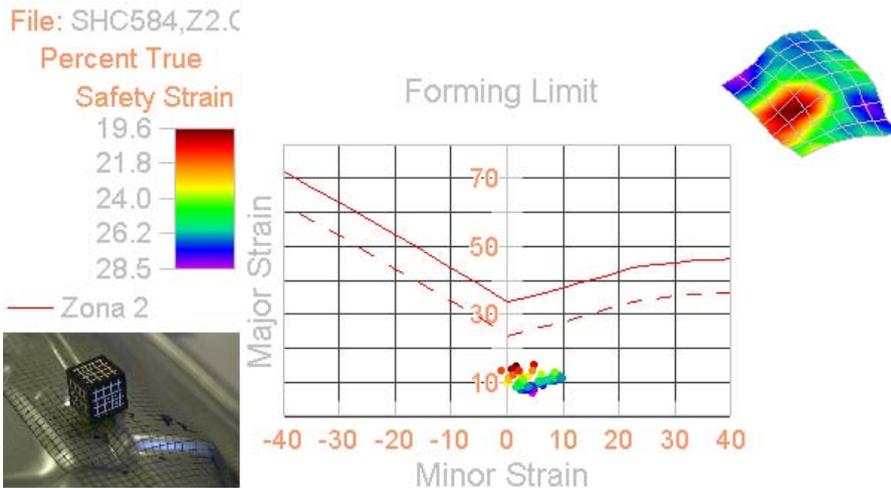


Figura 10. Mapa FLD de deformaciones en la zona 2: deformaciones aceptables por debajo del límite de la curva FLD. $FLDo = [23.3 + 14,13 t] \times [n/0,21] = 34,6\%$

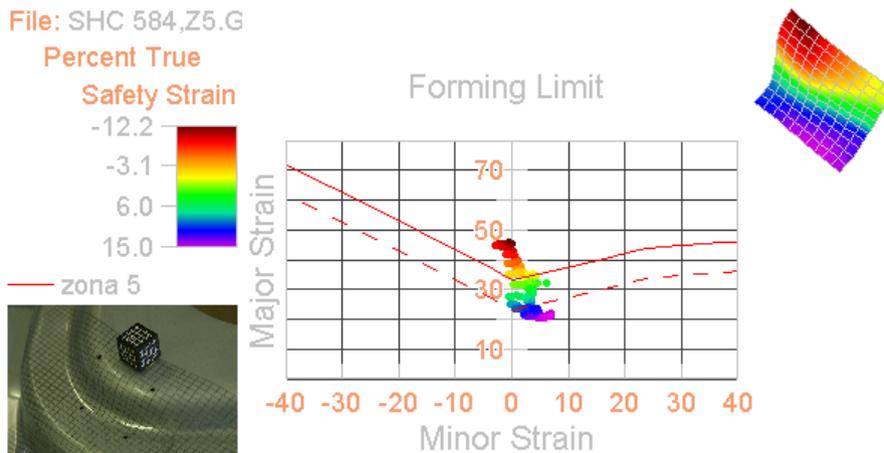


Figura 11. Mapa FLD de deformaciones en una zona de alta dificultad (zona 4), con re-embutición: deformaciones superiores al límite, que provocan estricción local o fractura de la chapa

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

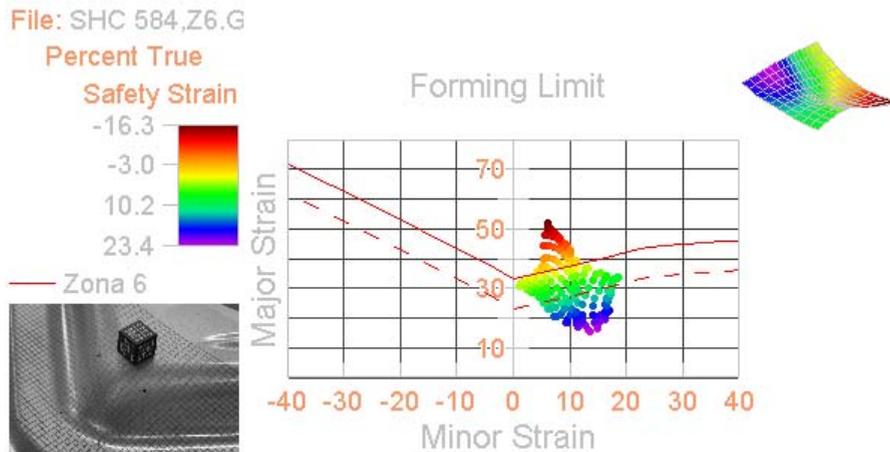


Figura 12. Mapa FLD de deformaciones en una zona de alta dificultad (zona 6), con re-embutición: deformaciones superiores al límite, que provocan estricción local o fractura de la chapa.

El efecto de las embuticiones secuenciales es muy difícil de modelizar, dado que las condiciones superficiales en el contacto, como la cantidad de aceite disponible o la topografía superficial, cambian como consecuencia de los pasos previos. El efecto de las pasadas sucesivas se puede evaluar experimentalmente mediante la realización de algunos tipos de ensayos tribológicos, como el ensayo de pasadas múltiples de Renault³¹.

1.2. TRIBOLOGÍA DE LA EMBUTICIÓN

Como se ha indicado en los apartados previos, la embutición de chapas de carrocería es un proceso de fabricación en el que la tribología juega un papel fundamental. Sin embargo, los problemas tribológicos durante la embutición difieren de otros problemas clásicos, como la fricción en cojinetes o rodamientos o la fricción durante las operaciones de mecanizado. Las diferencias más importantes son:

En el proceso de embutición, la fricción es necesaria para controlar el proceso. La fricción bajo el prensachapas es necesaria para controlar el flujo de material hacia la matriz. En los casos donde la fricción no es suficiente, se añaden intencionadamente elementos de retención (frenos o “draw beads”). El control del comportamiento tribológico no es por tanto reducir la fricción sino controlar los valores de manera adecuada y mantenerlos estables y reproducibles cuando se producen grandes series.

Las dos superficies están en contacto en condiciones “estacionarias” solamente durante un instante. Conforme avanza el proceso, la chapa se mueve a otras zonas donde las condiciones de contacto son diferentes. Esto dificulta el estudio experimental en ensayos, ya que no existen unas condiciones únicas.

El material de las superficies de contacto no puede ser elegido libremente. Es cierto que puede controlarse de manera permanente la naturaleza y acabado del material de las herramientas, aunque las opciones prácticas son limitadas. El material actualmente empleado en prensas del sector del automóvil es acero de herramientas o, en componentes de gran tamaño, fundición dúctil tratada térmicamente, a la que eventualmente pueden aplicarse recubrimientos duros, de tipo nitruración, nitro-carburación o cromo duro. El material de las chapas, en cambio, viene en primer lugar determinado por la aplicación y sus características cambian conforme avanza el proceso de embutición. Un aspecto importante de la chapa, como la topografía superficial, se determina más en función de las necesidades de aspecto final tras el pintado que por cuestiones tribológicas. Otra opción es la aplicación de segundas capas sólidas sobre las chapas, que modifican la naturaleza superficial. Esta posibilidad está también limitada ya que el recubrimiento debe ser posteriormente eliminado o ser compatible con los procesos posteriores aplicados a las piezas de carrocería tras la embutición.

En conjunto, los fenómenos tribológicos durante el conformado de chapas en prensas son bien conocidos en el caso de chapas desnudas. Destaca en este campo el ampliamente difundido trabajo de Schey³², donde se analizan con profusión el efecto de diversas variables del sistema tribológico: topografía superficial, naturaleza del lubricante o materiales en la matriz.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Los fenómenos de gripado o la aparición de microsoldaduras y dañado local son el resultado de una adhesión local entre chapa y matriz, siendo afectado por numerosas variables entre las que cabe destacar las siguientes: topografía superficial, composición superficial, la existencia de películas lubricantes y las condiciones del proceso de embutición. Todos estos aspectos suelen abordarse de forma independiente en la literatura.

La Figura 13 presenta los componentes básicos del sistema “comportamiento tribológico” y define algunos de los parámetros involucrados y sus interacciones. En general, puede afirmarse que la tribología de la embutición es un campo en el que intervienen un elevado número de factores, que interactúan mutuamente y que condicionan el comportamiento observado.

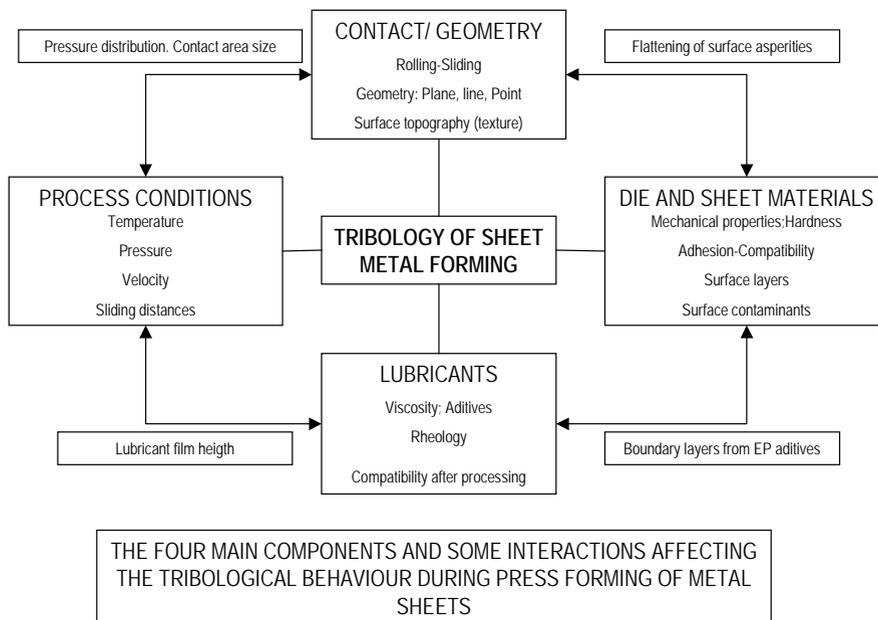


Figura 13. Los elementos del sistema tribológico en la embutición

1.2.1. Condiciones de lubricación y parámetros operacionales

El proceso de embutición, al igual que otros sistemas tribológicos, implica la existencia de dos o más cuerpos en contacto, con movimiento relativo e incluye la existencia de lubricante. Ya en los albores del siglo anterior se analizó por varios autores, como Stribeck y Hersey, la dependencia de la fricción en sistemas lubricados como una función de las variables del proceso: presiones, velocidades y características de los lubricantes.

A partir de estos trabajos comenzó a ser usual describir el funcionamiento de un sistema tribológico lubricado en función de parámetros operaciones, tales como el parámetro adimensional de Hersey, aplicable a cojinetes de fricción, en el que se relacionan la viscosidad dinámica η , la velocidad relativa entre las superficies v y la carga por unidad de anchura del cojinete P_l .

$$H = \frac{v \cdot \eta}{P_l} \quad (4)$$

Otros autores han aplicado recientemente una metodología similar al caso de chapas lubricadas durante la embutición, como Schipper³³ y Emmens³⁴ que introducen el uso de parámetros de lubricación aplicables al caso de la embutición. En todos estos casos se lleva a cabo un análisis sobre la curva de Stribeck, y se definen diferentes regímenes de lubricación: lubricación de capa gruesa, lubricación mixta y lubricación límite.

La lubricación de capa gruesa se da cuando el espesor de aceite es suficiente para mantener completamente separadas las superficies. Puede conseguirse con efectos de tipo hidrodinámico o elastohidrodinámico. Los coeficientes de fricción son muy bajos, ya que sólo debe cortarse el aceite de la interfase. Los valores típicos del coeficiente de fricción observado μ son del orden de 10^{-3} .

Bajo condiciones de lubricación en régimen hidrodinámico de película gruesa el espesor de lubricante es al menos unas 10 veces superior al valor de la rugosidad media R_a de las superficies en contacto. Bajo estas circunstancias ideales, la naturaleza superficial de las chapas a

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

embutir no tiene ninguna influencia, y el proceso de lubricación puede modelizarse con relativa facilidad apoyándose en los trabajos de Reynolds³⁵, o en soluciones optimizadas más recientes³⁶ en las que se tienen en cuenta las variaciones de viscosidad por variaciones en la presión o temperatura del lubricante. En estas condiciones, los espesores de lubricante pueden determinarse con suficiente aproximación con independencia de la naturaleza superficial del material a embutir.

No obstante, la lubricación de piezas complejas de carrocería es un fenómeno de difícil modelización, ya que los regímenes de lubricación cambian de una zona a otra de las piezas. Se ha demostrado que incluso en sistemas diseñados para trabajar en régimen de lubricación hidrodinámica o de película gruesa, aparecen habitualmente zonas o etapas con lubricación de tipo límite o mixta³⁷, responsables de la aparición de contacto metal-metal y, en determinadas condiciones, de fenómenos de gripado y aparición de roturas.

Las condiciones del proceso de embutición determinan los valores de la velocidad relativa y de las presiones y geometría de contacto, y en consecuencia, la posible aparición de condiciones de lubricación límite. Aún cuando en el proceso se emplean lubricantes a base de aceites, las condiciones específicas de la embutición profunda determinan la existencia de regímenes de lubricación mixta o límite, en los cuales una fracción importante de la carga entre superficies es soportada por el contacto entre las rugosidades de la chapa y la matriz. Estas condiciones son características durante el comienzo de la embutición, y en determinadas zonas: borde de entrada a la matriz, bordes de contacto con el punzón y en el paso por los “draw beads” del prensachapas, empleados en las prensas de doble acción para controlar el flujo de material hacia la matriz.

Los valores de las presiones de contacto varían de unas zonas a otras, y también varían a lo largo del proceso de embutición de una pieza. Los valores de presión inicial bajo el prensachapas deben presentar unos valores mínimos para evitar el arrugamiento. Para ello se recomiendan valores del orden del 1-2% de la tensión de fluencia del

material que se embute³⁸, lo que supone valores mínimos del orden de 2-5 MPa para los aceros de embutición convencionales.

Los valores típicos de la presión de contacto varían dependiendo de la geometría de la pieza, de la zona en contacto con la matriz, y de la evolución del proceso. En ensayos de embutición de chapas de acero para formar una pieza de tipo bandeja rectangular³⁹. Se encuentra que bajo el prensachapas, las presiones de contacto alcanzan valores de 30-40 MPa, con velocidades de deslizamiento de 0.2 a 0.4 m/s, para una longitud total recorrida varía desde 50 a unos 150 mm. En los bordes del punzón los valores son más bajos. La presión se mantiene inferior a 10 MPa, la longitud de deslizamiento es despreciable y también es despreciable la velocidad relativa, del orden de 1 mm/s.

Ghosh⁴⁰ también realizó estudios de embutición en ensayos de expansión pura bajo la acción de un punzón semiesférico, con diferentes materiales. Una importante conclusión de su trabajo es la verificación del efecto favorable que un bajo coeficiente de fricción aporta a la capacidad de deformación bajo condiciones de expansión. Para un material dado, la altura máxima de embutición se reduce linealmente con el incremento en los valores del coeficiente de fricción, que en sus ensayos varió desde valores de 0.20-0.24 para aceros de embutición hasta valores de 0.52 para chapas de latón 70-30. Respecto de las condiciones de contacto, con una velocidad de avance del punzón de 0.4mm/s, se encuentran valores de presión entre 8-10 MPa para chapas de acero y de tan solo 3 MPa para chapas de aluminio 3003.

La evolución de las condiciones locales de contacto ha sido analizada con precisión para el caso de embutición axisimétrica. Al inicio del proceso de embutición profunda, el prensachapas se cierra y la fuerza normal aplicada se distribuye uniformemente sobre el área de la chapa. Conforme el material entra en la matriz la superficie del material bajo el prensachapas disminuye, por lo que la presión media en la superficie bajo el prensachapas se incrementa si, como es habitual, se mantienen la fuerza de apriete en el prensachapas. Sin embargo, debido a la deformación plástica del material, que reduce sus dimensiones en el plano, se produce un engrosamiento del espesor de la chapa en la zona exterior, mientras que la tensión en la proximidad del borde entrada a la matriz produce un adelgazamiento.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Esto tiene como efecto que las presiones normales varíen de unas zonas a otras, siendo máximas en la zona externa de la pieza que se embute. En la práctica resulta imposible medir con precisión las presiones locales bajo el prensachapas. No obstante, mediante simulación MEF se han llevado a cabo análisis que muestran la evolución de la presión normal en componentes axisimétricos⁴¹. Con presiones iniciales de 20 MPa, se alcanzan finalmente valores de presión local del orden de 80-100 MPa, con condiciones de contacto que pueden considerarse de tipo plano-plano.

1.2.2. Efectos microhidrodinámicos con contactos plano-plano.

Este mecanismo ha sido descrito por Emmens⁴², que propone un modelo y prueba experimental muy convincente para contactos plano-plano, que es la geometría típica del contacto entre la chapa y el prensachapas durante la operación de embutición. La idea básica de Emmens es que debido a la rugosidad de la chapa, la interfase chapamatrix es capaz de mantener lubricante en contacto con la herramienta. La Figura 14 presenta la curva de Stribeck característica, aplicada al caso particular de la fricción entre una herramienta plana y la superficie de chapas de aceros de embutición desnudos. En ordenadas se representa el coeficiente de fricción observado y en abcisas se representa un parámetro H definido por la expresión:

$$H = \frac{v \cdot v}{P} \quad (5)$$

Donde:

v es la viscosidad dinámica del lubricante (Pa.s)

v es la velocidad relativa de deslizamiento entre superficies (m/s)

P es la presión local aparente aplicada (Pa).

Tal como está definido, el parámetro tiene unidades dimensionales de longitud [L] en metros.

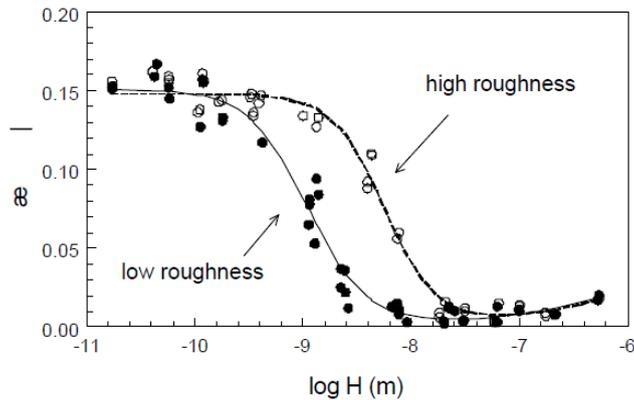


Figura 14. Curva de Stribeck obtenida en ensayos de contacto plano entre chapas de acero desnudo y la matriz, con diferentes valores de rugosidad en las chapas. [Emmens, Tesis] Low roughness: Ra =0.84 micras; High roughness: Ra=2.9 micras

La Figura 14 muestra que también en el caso del contacto plano-plano, que son la configuración propia de la fricción durante la embutición entre la chapa y la matriz, es factible obtener un barrido completo de condiciones de lubricación. Para valores del parámetro H menores que 10^{-9} se entra en la zona de lubricación límite, y para valores superiores a aproximadamente 10^{-7} se consigue un régimen de lubricación de capa gruesa. Los valores del coeficiente de fricción observados en la zona de lubricación límite son, para contactos con chapa desnuda de acero, del orden de 0.15.

Para lograr un amplio campo de condiciones operatorias que permiten lograr condiciones de lubricación mixta o claramente de capa gruesa, en el trabajo experimental se emplearon once diferentes tipos de lubricantes, incluyendo lubricantes no aditivados de viscosidad muy superior a los valores característicos de los aceites realmente empleados por los fabricantes de automóviles. Los valores de la viscosidad variaron desde 4.5 mPa.s a 2880 mPa.s. Solamente se empleó un aceite comercial de embutición, el Quaker Ferrocote 6130, con valores de viscosidad de 55 mPa.s a 20°C. Adicionalmente, la técnica de aplicación del aceite sobre las chapas se hizo con una sobredosis de lubricante con un cepillo o paño y el exceso de lubricante se eliminó raspando con una espátula de plástico sobre las asperezas de la rugosidad inmediatamente antes del ensayo. Este

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

método de aplicación asegura unos contenidos en aceite sobre la chapa muy superiores a los valores normales en el sector, que son del orden de 2 g/m^2 .

Emmens comprobó experimentalmente que la posición relativa de las curvas depende de la rugosidad superficial de las chapas. Es evidente que un aumento de rugosidad hace que la curva Stribeck se desplace a la derecha sin cambiar la forma o la altura de la curva. En definitiva, a mayor rugosidad, más difícil es lograr condiciones de lubricación mixta o de capa gruesa.

A partir de ensayos sobre un amplio número de chapas, se encontró que la posición de las curvas se desplaza a lo largo del eje de abcisas en proporción directa al parámetro de rugosidad R_{pm} (Altura media de picos del perfil), elevado a la potencia 1.96. A partir de estas observaciones experimentales, Emmens propuso el uso de un parámetro alternativo en el eje x de la curva de Stribeck, denominado H^* y definido como:

$$H^* = H/R_{pm}^2 \quad (6)$$

Si se representa la posición de las curvas frente al parámetro de rugosidad H^* , se observó experimentalmente que todas las curvas se solapan significativamente, tal como muestra la Figura 15, independientemente del método empleado para controlar la rugosidad superficial. Utilizando este nuevo parámetro H^* los datos forman una sola curva y no hay diferencias entre los 3 tipos de rugosidad, como se muestra en la figura.

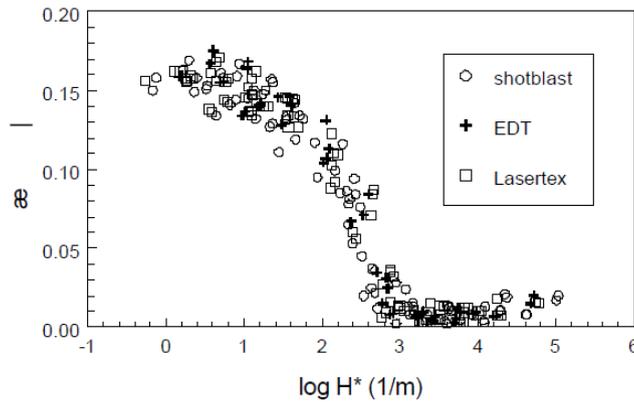


Figura 15. Curvas de Stribeck modificadas en las que se presentan valores del coeficiente de fricción frente al parámetro H^* , obtenidas en ensayos de contacto plano entre chapas de acero desnudo y la matriz, con diferentes valores de rugosidad en las chapas. [Emmens]

A partir de estas observaciones experimentales, Emmens ha llevado también a cabo una modelización del comportamiento en la zona de lubricación mixta, tomando en consideración la contribución de la rugosidad a la generación local de micro-cojinetes, capaces de generar presión en el aceite por mecanismos microhidrodinámicos o hidrostáticos.

La idea básica de Emmens es que debido a la rugosidad de la chapa, la interface contiene lubricante en contacto con la herramienta, de modo que el movimiento relativo permite la generación de presión en el aceite, provocando una separación h entre ambas piezas. Durante el proceso, existe un gradiente de presión en la dirección x de desplazamiento del metal dado por la ecuación de Rayleigh:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \cdot \eta_o \cdot v \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (7)$$

Esta ecuación se puede integrar para dar:

$$h^3 \frac{\partial p}{\partial x} = 6 \cdot \eta_o \cdot v \cdot h + C \quad (8)$$

Que puede expresarse por su equivalente:

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6 \cdot \eta_o \cdot v \frac{(h - h_o)}{h^3} \quad (9)$$

La constante no tiene un significado físico, ya que cuando $h=h_o$, la presión alcanza un máximo o un mínimo. La ecuación puede resolverse para calcular la presión promedio soportada por el lubricante P_l , aplicando la condición de contorno $p=0$ a la entrada y a la salida. Si la geometría en la interface permanece constante, se obtiene una solución general del tipo:

$$P_l = 6\eta_o \cdot v \frac{L}{h^2} Q \quad (10)$$

En la que el factor Q es una constante adimensional que depende de la geometría local del contacto. La aplicación de la anterior expresión a diferentes geometrías, considerando una altura de rugosidad $h=Ra$ del orden de 1 micra, da como resultado que la presión local soportada por el lubricante para contactos de tipo micro-patín hidrodinámico (con $Q = 0.0267$) dados por la expresión:

$$P_l = 9.6MPa/mm * L \quad (11)$$

Mientras que para contactos de tipo micro patín sin salida del aceite (pozos cerrados), en los que el factor adimensional Q alcanza valores del orden $Q=0.5$, se tiene la relación:

$$P_l = 180MPa/mm * L \quad (12)$$

Los valores reales de presión soportada por el lubricante pueden estimarse a partir de la longitud característica L , que en el caso estudiado correspondería a la distancia media entre las asperezas que soportan la carga (picos más altos). Estas distancia, para las topografías normales de las chapas, se encuentran en el rango de 0.1 a 0.2 mm, con lo que los valores de presión promedio soportados por el lubricante alcanzan valores desde aproximadamente $P_l = 1$ a 20 MPa, suficientes para soportar las presiones nominales P aplicadas. La expresión anterior también justifica de modo analítico el efecto cuadrático que ejerce la rugosidad, observado experimentalmente.

De acuerdo con el trabajo experimental de Emmens, los valores del coeficiente de fricción varían en primera aproximación dependiendo de la relación entre la presión aplicada P y la presión soportada por el lubricante P_l . Si la relación P_l/P es suficientemente elevada, la mayor parte de la carga será soportada por el lubricante, de modo que la chapa y el útil contactarán únicamente en una fracción insignificante del área aparente de contacto.

1.2.3. Embutición en condiciones de lubricación límite

Los modelos habitualmente contemplados en el análisis del comportamiento tribológico durante la embutición se basan en una adaptación de la curva de Stribeck y de los parámetros operacionales de tipo Hersey, y se deben a contribuciones de varios autores como Emmens, Schipper o Ter Haar²⁴. Esta aproximación al problema proporciona información útil sobre la influencia de varios parámetros: viscosidad, presiones, velocidad, o rugosidad superficial. Si bien es cierto que la mayoría de los sistemas lubricados muestran un comportamiento similar al mostrado en las curvas de tipo Stribeck, las operaciones de embutición son muy complejas e incluyen siempre zonas o etapas en las que el proceso de lubricación funciona en condiciones de lubricación límite. Así ocurre, por ejemplo, en zonas como los frenos, el contacto con la entrada a la matriz o el contacto con los bordes de los punzones. También se dan condiciones de lubricación límite en muchas otras zonas bajo el prensachapas al comienzo del proceso, cuando la velocidad es baja.

El comportamiento tribológico en condiciones de lubricación límite durante la embutición ha recibido mucha menos atención que otros aspectos, y los mecanismos críticos que controlan la fricción no están todavía suficientemente aclarados. De hecho, en los trabajos recientes debidos a Emmens y a otros investigadores que trabajan con aproximaciones de tipo Stribeck, el valor del coeficiente de fricción en la zona de lubricación límite se considera como una constante que debe determinarse por vía experimental⁴³. Entre los trabajos publicados en relación con el problema existe abundante información experimental, pero con resultados en muchos casos contradictorios.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Se ha publicado, por ejemplo, que en condiciones de lubricación límite la rugosidad superficial de las chapas tiene un efecto despreciable en los valores de la fricción, existiendo en cambio una gran influencia del material del recubrimiento y del material de la matriz, de la rugosidad de la matriz y del tipo de aditivos en el lubricante⁴⁴.

Bajo condiciones de lubricación límite (BL) existe contacto físico entre las herramientas y las asperezas más sobresalientes de la chapa. Si bien es cierto que los valores de fricción dependen en estas condiciones de la naturaleza de los materiales en contacto y de la posible existencia de capas absorbidas, la textura original parece tener una importancia relevante. Los estudios previos a esta tesis, llevados a cabo sobre chapas recubiertas con cinc electrolítico o galvanizado confirman, sin embargo, que existen importantes diferencias en el comportamiento durante la estampación asociados a ligeras variaciones en la topografía superficial⁴⁵. Es cierto que estos cambios no se detectan por los valores convencionales que definen la topografía idónea: rugosidad media Ra o densidad de picos Pc, pero pueden predecirse a partir de medidas de algunos parámetros de topografía o textura alternativos a los convencionales, como Rpk o Mr₁, obtenidos de la curva de material portante.

Un aspecto que consideramos de interés y que también ha sido citado en algunos estudios es que existen importantes cambios en la fricción (o en el comportamiento tribológico) como consecuencia del tiempo y de la distancia de deslizamiento^{46 47} y que estos cambios, bajo condiciones de lubricación límite son incluso más relevantes que los simples valores del coeficiente de fricción⁴⁸.

Estas observaciones son muy acertadas. La chapa que llega al borde de entrada a la matriz cuando el proceso de embutición ya está iniciado no tiene la topografía original. El paso bajo el prensachapas puede haberla modificado de forma significativa y por lo tanto, su comportamiento tribológico puede ser muy diferente al original. Algo similar ocurre en otras zonas, por ejemplo, en el paso por la etapa final de un freno o en los casos habituales en la industria del automóvil en los que la chapa empujada por el punzón sufre finalmente otro proceso

de re-embutición contra el fondo de la matriz o sufre posteriores embuticiones (matrices progresivas).

Se ha publicado también diversos trabajos en relación con la fricción en condiciones de BL la contribución de mecanismos de tipo hidrostático o microhidrodinámico, originados por la existencia de pozos cerrados en la topografía que son capaces de transportar aceite y de soportar gran parte de la presión^{49 50}. La existencia de valles cerrados es una característica que puede existir en algunas topografías determinísticas originales (LaserTex, EBT) o que puede aparecer como consecuencia del proceso de deformación plástica de la superficie. Dado que la existencia de huecos o valles cerrados lateralmente sólo es detectable por técnicas de medida de textura tridimensionales 3D⁵¹, son abundantes los trabajos recientes desde un análisis puramente mecánico, orientados a justificar el uso de tecnología 3D apoyándose en la importante contribución de los pozos cerrados al control de la fricción⁵².

Dada su potencial influencia sobre el proceso, en la presente tesis se pretende abordar también el estudio del proceso de modificación de la topografía⁵³ y textura superficial de las chapas recubiertas con Zn-Ni, valorando sus efectos sobre el comportamiento tribológico y sobre los mecanismos de control de la fricción.

1.2.4. Textura superficial en chapas para embutición

La rugosidad superficial (topografía superficial, también llamada textura en el sector) condiciona, entre otros, el valor del área real de contacto y la capacidad de la superficie para retener lubricantes o para generar efectos de lubricación favorables. Su influencia sobre la fricción y en particular sobre el riesgo de aparición de fenómenos de adherencia local o “galling” ha recibido amplia atención desde los años sesenta del pasado siglo XX. Hacia finales de los años setenta llegó a establecerse una definición de topografía superficial, conocida en el sector como “textura superficial” con propiedades “antigalling”, sobre la base de establecer límites a un conjunto de parámetros de rugosidad: rugosidad media Ra, densidad de picos Pc, etc^{54 55}, pero cuya validez se limitaba a las chapas de acero de embutición sin recubrimientos.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

El control de dicha rugosidad o topografía superficial se lleva a cabo con relativa facilidad en la operación de skin-pass durante la fabricación de las chapas: la topografía del cilindro queda grabada en la chapa. La obtención de estas texturas superficiales propició incluso la aplicación de nuevas tecnologías como el láser, haz de electrones o la electroerosión, para el texturado de la superficie de los cilindros, de modo que pueden obtenerse texturas o topografías superficiales “predeterminadas”, en contraposición a la textura aleatoria o estocástica que se obtienen con los procedimientos tradicionales de texturado de cilindros por electroerosión (EDT). Todavía hoy reciben atención la caracterización de perfiles “antigalling” en aceros de embutición desnudos^{56 57 58 59 60}.

En el caso de las chapas recubiertas, tanto por electrodeposición como por galvanización en caliente, la obtención de topografías “antigalling” se encuentra sin definir. Existen varias razones para ello. En algunas líneas de producción, la laminación final de tipo “skin-pass” no suele emplearse sobre el recubrimiento, lo que hace difícil conseguir una topografía bien definida. En su caso, esta podría obtenerse incluyendo una etapa de skin-pass y/o controlando los parámetros del proceso de recubrimiento. De cualquier modo, existe un segundo problema: no existe una definición válida de perfil “antigalling” válido para las chapas recubiertas, por lo que tanto productores de chapas recubiertas como utilizadores (fabricantes de carrocerías y componentes de automóviles, mobiliario, etc...), carecen de una referencia previa sobre la aptitud de la chapa para una operación de embutición de media o alta dificultad.

Además de sus efectos sobre el comportamiento tribológico, la topografía superficial o textura resulta determinante para el aspecto final tras pintura de las piezas de la carrocería. Por ello, las especificaciones de textura⁶¹, en particular para piezas vistas exteriores, está condicionada por el aspecto final, empleándose valores similares límite en las especificaciones de los materiales, independientemente de que se trate de chapas desnudas o de chapas recubiertas con Zn o aleaciones.

Los requisitos actualmente utilizados por los fabricantes de chapa y por los de automóviles se fundamentan en la definición de dos parámetros: Rugosidad media aritmética Ra y densidad o número de picos Pc. El rango de valores aceptable puede variar de unos fabricantes de coches a otros, pero es habitual que los requisitos o especificaciones sean comunes a todo tipo de chapas, no importa si son desnudas o recubiertas y tampoco son diferentes para diferentes tipos de piezas o tipos de recubrimientos: cinc, cinc-hierro, cinc-níquel, etc. Para la industria del automóvil americana, los valores de textura aceptable pueden definirse aproximadamente como sigue:

Ra desde 20 a 50 micropulgadas (0.5 to 1.30 μm)
Pc mayor que 82 picos por pulgada (35 peaks/cm)

Ambos parámetros medidos con una longitud básica o “cutoff” de 0.8mm y un nivel de conteo de picos de 50 micropulgadas (1,27 μm)⁶².

La exigencia de valores similares para diferentes tipos de recubrimientos puede justificarse por la necesidad de obtener en toda la carrocería un aspecto uniforme y brillante tras el pintado, pero es difícilmente justificable desde el punto de vista del comportamiento tribológico. Efectivamente, son notables las diferencias en cuanto a dureza, plasticidad o reactividad con los aditivos que existen entre el acero, los recubrimientos de cinc o los de aleaciones.

1.2.5. Lubricantes para embutición

Los lubricantes actualmente empleados en las operaciones de embutición de carrocerías suelen ser los mismos aceites que se aplican en las plantas siderúrgicas que producen la chapa con fines de protección anticorrosiva superficial. Su finalidad primaria es aportar una protección temporal contra la corrosión hasta que se utilice el material, aunque normalmente contienen aditivos que son también capaces de proporcionar algún efecto favorable adicional: protección antioxidantes, modificadores del coeficiente de fricción o incluso efectos EP (extrema presión). Los que llevan aditivos intencionadamente aplicados con este fin se denominan “prelubes” y

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

ofrecen también excelentes propiedades lubricantes, ya que permiten estampar piezas complejas sin necesidad de volver a aplicar lubricante a los formatos antes de su entrada en la línea de prensas. Estos aceites protegen frente a la corrosión durante el transporte y el procesado de las piezas. Aportan capacidad lubricante durante el conformado y se eliminan finalmente mediante procesos de desengrase en baños alcalinos a la entrada de la carrocería en la línea de pretratamientos para pintura.

Los lubricantes empleados en la embutición de componentes de carrocerías se basan en aceites de base mineral, normalmente nafténicos o parafínicos, a los que se incorporan aditivos de protección anticorrosiva, modificadores del coeficiente de fricción y agentes de extrema presión. Las recientes regulaciones medioambientales han limitado el tipo de aditivos posibles, ya que no pueden incorporarse aditivos con cloro, aminas, bario o plomo, que formaban parte de las composiciones habituales de muchos aditivos para aceites de estampación.

Se aplican sobre la chapa normalmente por vía electrostática, en cantidades del orden de 2 g/m^2 , y suelen presentar bajos valores de viscosidad, normalmente inferiores a $100 \text{ cm}^2/\text{s}$. La cantidad de aditivos capaces de reaccionar o adsorberse sobre las superficies debe también limitarse, ya que un incremento en la cantidad o reactividad de los aditivos, aun cuando mejora el comportamiento desde el punto de vista de la lubricación, puede dar lugar a problemas de incompatibilidad con los adhesivos de sellado, cada vez más utilizados en el ensamblaje. También dificultan la posterior eliminación del aceite en la etapa de fosfatación cuando se emplean, como es habitual, baños alcalinos de desengrase, por lo que la selección de aditivos debe efectuarse contemplando varios criterios, no solamente el de la lubricación.

Cuando se requieren mejores prestaciones en estampación pueden aplicarse en la misma siderúrgica tratamientos adicionales de superficie sobre los revestimientos. Con una formulación adecuada pueden actuar como lubricantes sólidos o lubricantes de alta viscosidad durante la embutición, evitando la aparición de contactos

metal-metal y dañado superficial⁶³. Suele emplearse la prefosfatación en aceros electrocincados o la aplicación de capas lubricantes sólidas, que se aplican mediante procedimientos de aspersión o de roll-coating, seguidos o no de secado. Estas capas son capaces de proporcionar regímenes de fricción hidrodinámica y evitar contactos chapa-matriz, manteniendo valores del coeficiente de fricción por debajo de 0.10 y evitando fenómenos de gripado o los fenómenos de stick slip, lo que limita los riesgos de agarrotamiento y de rotura. Existen algunos desarrollos de tecnología española^{64 65} que se han probado efectivos en cuanto a la protección anticorrosiva.

Los aceites para embutición de chapas destinadas al sector del automóvil son suministrados por un limitado número de empresas. En Europa, prácticamente todos los fabricantes de automóviles (Mercedes, GM, VW, Ford, Grupo PSA, Renault, etc), utilizan aceites de protección o pre-lubes de dos multinacionales: Quaker y Fuchs. Quaker es el fabricante de un aceite de protección con capacidad lubricante de estampación denominado Ferrocote S-6130, muy ampliamente utilizado, y cuya composición se ha ido adaptando a las nuevas regulaciones sobre limitación de aditivos. Dicho aceite presenta una viscosidad baja, del orden de 36 cm²/s, y en la versión actual indica que incorpora aditivos de tipo sulfonato sódico (1-5%) y también 1-5% de compuestos de tipo sulfonato cálcico sobrebasificados, en una base de mezclas de aceites minerales⁶⁶.

Otros productos ampliamente utilizados son los aceites denominados comercialmente Anticorit RP4107S y Anticorit PL 3802 39S, ambos fabricados por la empresa Fuchs Lubricantes^{67 68}. El primero de ellos presenta una viscosidad de 145 mm²/s a 20°C-36 mm²/s a 40°C y se comercializa con fines fundamentalmente de protección anticorrosiva. Contiene como aditivos sulfonato de sodio en cantidades 2.5-5% y aril-dialkil-fosfito en cantidades de 0.1-1%. El segundo es de tipo prelude, e incorpora también aditivos de tipo sulfonato sódico y sulfonato cálcico, con una viscosidad de 60mm²/s a 40°C.

Los aditivos de tipo sulfonatos básicos son habituales en todo tipo de aceites industriales y de motores. Proporcionan efecto protector contra la corrosión, pero también actúan como antioxidantes, modificadores del coeficiente de fricción y efectos EP. Las composiciones más ampliamente utilizadas son las sales básicas de ácido

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

alkyarylsulfónico. Los fosfitos actúan como antioxidantes, pero también pueden ofrecer efectos antidesgaste⁶⁹.

En general, todos los aditivos que se emplean en aceites lubricantes pueden ejercer más de una función, y seleccionando adecuadamente las mezclas pueden conseguirse efectos sinérgicos favorables⁷⁰. Otro tipo de aditivos habituales en este tipo de aceites para estampación son los ésteres sulfurados de ácidos grasos, con un bajo contenido de azufre activo, lo que les hace ser ampliamente empleados incluso para procesar metales no férreos como aluminio. También se emplean aditivos de la familia ZDDP (Zinc dialquil ditiofosfatos), que actúan como antioxidantes y proporcionan efectos antidesgaste y EP. En combinación con aditivos portadores de azufre, se emplean como sustitutos de aminas cloradas, ampliamente utilizadas en el pasado⁷¹. Un análisis de la bibliografía disponible al respecto sobre los mecanismos de adsorción y la reactividad y características de algunos aditivos de lubricación límite puede encontrarse en un reciente trabajo de Westeneng⁷².

1.3. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA EMBUTICIÓN

En los últimos años se está dedicando una gran atención al propio proceso de deformación plástica del material base durante la embutición y a su modelización, como herramienta básica para el diseño de nuevas carrocerías y de las herramientas necesarias para su conformado. No obstante, no se abordan los fundamentos, sino la aplicación y la aplicabilidad de técnicas de modelización del proceso de embutición mediante elementos finitos. También se ha trabajado sobre la predicción mediante modelos del comportamiento del material base en la embutición, esto es, la predicción de curvas FLD (forming limit diagram) y de las condiciones que producen la rotura en la chapa (necking)^{73 74 75 76}. Desde nuestro punto de vista, sin embargo, la validez de estos trabajos se encuentra parcialmente limitada ya que en los modelos se requiere, como dato fundamental, los valores del coeficiente de fricción entre chapa y matriz, y estos valores se vienen estimando de manera poco precisa.

Se han realizado algunos trabajos intentando obtener modelos parciales del comportamiento tribológico, a partir de datos fundamentales del proceso: rugosidad, comportamiento mecánico de materiales, etc. La precisión de los resultados obtenidos hasta la fecha es muy baja, lo que no resulta extraño teniendo en cuenta la elevada complejidad del problema. La incorporación de estos modelos a los programas de simulación de la embutición resultan por otra parte inviables para la capacidad actual de los sistemas de cálculo.

Habitualmente, en los sistemas de simulación disponibles se emplean modelos de fricción de tipo Coulomb, con valores constantes del coeficiente de fricción para todo el proceso. Suele citarse como apropiados valores del orden de 0,10 a 0,15, típicos del procesado de chapas desnudas. La embutición de chapas recubiertas, en cambio, puede dar lugar a valores bastante más elevados (hasta 0,25-0,30 en algunos casos) y variables de una zonas a otras de la pieza en función de las presiones y velocidades de deformación locales.

Por otra parte, el uso de características de embutibilidad⁷⁷ “estandar” obtenidas con ensayos sobre material desnudo no son extrapolables al caso de materiales recubiertos. Así, por ejemplo, no resulta aceptable la puesta a punto de matrices de embutición (die try-out) mediante técnicas de análisis de deformaciones (circle analysis) empleando como referencia valores obtenidos con chapas desnudas, ya sea mediante modelización MEF y/o ensayos de embutibilidad (Erichsen, Fukui, etc...) si luego dichas matrices van a ser empleadas para embutir piezas recubiertas con otro tipo de material en el recubrimiento.

Consideramos, en resumen, que el problema de la embutición de chapas recubiertas se encuentra insuficientemente analizado, especialmente en el caso de los recubrimientos Zn-Ni. La mayor parte del trabajo publicado sobre el tema hace referencia exclusivamente a la embutición de chapas de acero desnudo o a chapas recubiertas con cinc (electrocincado, galvanizado) o incluso Zn-Fe, pero sin incluir en los estudios chapas recubiertas con Zn-Ni. En el ámbito industrial, el problema de la embutición recibe atención casi exclusivamente desde el campo de la aplicación de técnicas de modelización MEF, pero sigue sin abordarse con suficiente rigor la consideración de los efectos

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

tribológicos sobre el proceso. Así, y a la vista del estado del arte, se considera de interés profundizar sobre los fenómenos que condicionan la aptitud para la embutición profunda de las chapas recubiertas con aleaciones Zn-Ni y, en particular, sobre los parámetros característicos del material, entendido como conjunto material base+recubrimiento, que condicionan la aparición de fenómenos de gripado con la matriz y roturas durante las operaciones de conformado de este tipo de chapas y que dificulta su más amplia utilización por el sector del automóvil.

1.4. ENSAYOS DE FRICCIÓN EN ESTAMPACIÓN

1.4.1. Finalidad de los ensayos de fricción

Los ensayos de fricción se emplean en el campo de la embutición para obtener información de dos tipos:

1.- Medir la aptitud de las chapas y/o lubricantes para sufrir una operación de conformado dada, o las mejoras que supone un cambio de tratamiento superficial en las matrices, etc. El tipo de ensayo y su puesta a punto se eligen, por tanto, en función de su carácter selectivo. El ensayo Inland es un buen ejemplo de este tipo de ensayos, ya que permite evaluar la aptitud de las chapas a partir de indicadores obtenidos del ensayo. Otro ensayo similar es el DBS (Draw Bead Simulator) de uso ampliamente extendido en USA⁷⁸ y Canada. Con similar finalidad se ha incorporado recientemente en Ford un ensayo de fricción de contacto plano, que permite valorar el comportamiento de chapas recubiertas con zinc puro (EZ o HDG). Dicho ensayo ha sido desarrollado por parte de nuestro grupo de investigación.

2.- Obtención de datos de coeficiente de fricción para ser utilizados en simulación numérica de los procesos de embutición. El tipo de ensayo debe elegirse en este caso en función de la similitud de las condiciones del ensayo con las existentes en la zona del sistema de embutición que pretende reproducirse. Los ensayos entre útiles planos o los ensayos DBS son buenos ejemplos. Existen otros ensayos de simulación de embutición: Swift, Erichsen, etc. que ofrecen información más completa sobre el proceso de embutición. Sin embargo, la influencia

de la fricción en los resultados es más difícil de evaluar, requiere disponer de un modelo mecánico de la operación y de datos complementarios relativos al comportamiento mecánico del material.

1.4.2. Ensayos de contacto plano

El tipo de ensayos más clásico es de fundamento similar a los empleados en cursos básicos de física. Una chapa de metal se estira entre dos placas o matrices planas cuya superficie es mayor que la de la chapa. El ensayo es simple y versátil. Pueden ensayarse materiales de diferentes espesores, recubrimientos, etc. Con mordazas planas se tiene un mejor control sobre las presiones aplicadas. Los valores del coeficiente de fricción así obtenidos son útiles para fines de simulación. Las presiones normales pueden controlarse entre valores de 1 a unos 100 MPa y las velocidades pueden variarse a voluntad para reproducir las condiciones reales. Existen numerosas variantes, en las que se cambian las mordazas planas por otras configuraciones de contacto: cilindro-cilindro⁷⁹, cilindro-plano, etc...⁸⁰. Sobre esta configuración se han desarrollado algunos tipos de ensayos específicos, de amplia utilización:

Ensayo Inland⁸¹. Consiste en hacer pasar una chapa plana entre dos mordazas, una semicilíndrica y otra plana, midiendo las fuerzas de tracción necesarias para hacer deslizar la chapa a una velocidad de 50-150 mm/s. La fuerza normal, que se controla con un sistema hidráulico, se selecciona para conseguir en la chapa una ligera deformación plástica de aproximadamente un 3%. Se obtiene información a partir del parámetro

$$FR = \mu_{\text{estático}} / \mu_{\text{dinámico}}. \quad (13)$$

Ensayo Multifricción Renault RNUR D-31 1738 emplea un sistema de mordazas y carga normal similar al sistema Inland. La velocidad del ensayo es inferior, del orden de 40 mm/min, lo que da condiciones de lubricación más severas. La interpretación de resultados suele hacerse a partir de los valores del coeficiente de fricción dinámico y de la aparición o no de fenómenos de gripado como consecuencia de

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

la aplicación de sucesivas pasadas, hasta 10, sin reaceitar entre las mordazas.

Ensayo Sollac: Es un ensayo con fuerza normal variable. El procedimiento empleado por Sollac consiste en aplicar mediante un sistema hidráulico una fuerza de apriete creciente por etapas, midiendo en paralelo la evolución de la distancia normal entre los útiles planos o el coeficiente de fricción. Las presiones aparentes van desde 1 a unos 80 MPa. Se emplea con fines comparativos. Un ensayo similar ha sido empleado por Emmens (Hoogovens Strip Tester).

Ensayo CEMEF: En un ensayo de contacto plano-plano, en el que la fuerza normal se aplica mediante un sistema mecánico (tornillo), de modo que se consigue un posicionamiento fijo inicial. El equipo registra la variación de la fuerza normal y la fuerza de tracción necesaria para hacer deslizar la chapa⁸².

1.4.3. Tribómetros de simulación de rozamiento en zonas curvas.

Se han empleado para reproducir las condiciones de contacto a la entrada a la matriz o el rozamiento con el fondo de los punzones. Este ensayo mide la fricción contra un cilindro de radio conocido, mediante la medida de las fuerzas que existen sobre la chapa a uno y otro lado de la zona de contacto^{83 84 85}.

1.4.4. Ensayo DBS de simulación Draw-Beads.

Este ensayo fue originalmente desarrollado por Nine^{86 87}. Su empleo está ampliamente extendido en USA y existen abundantes trabajos de investigación empleando dicho método de ensayo. En la actualidad, es el método recomendado por el consorcio norteamericano A-SP (Automobile- Steel suppliers) para la evaluación de lubricantes de embutición.

1.4.5. Ensayos de simulación de embutición.

Se incluyen en esta categoría diferentes ensayos de simulación: LDH, Erichsen, Swift, etc. La medida del coeficiente de fricción se extrae a partir de un conocimiento previo de la función matemática que relaciona la fuerza en el punzón con las condiciones geométricas, las propiedades del material y el rozamiento. Han sido también ampliamente utilizados^{88 89 90}.

1.4.6. Ensayos con deformación plástica equipos RON.

Un desarrollo reciente de ensayo de fricción se debe a R. Ter Haar. El equipo permite medir la fricción en un contacto semicilindro-semicilindro, pero sobre chapa sometida a deformación plástica bajo un ensayo de tracción. El equipo ha sido desarrollado en la Universidad de Twente (Holanda), y ha sido empleado en diversos trabajos de investigación, realizados en colaboración con empresas del sector, como Hoogovens y Quaker.

1.4.7. Limitaciones de los ensayos de fricción

De cualquiera de los ensayos puede obtenerse valores numéricos del coeficiente de fricción. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que cada test reproduce sólo unas ciertas condiciones de contacto y de deformación en las chapas. Cuando se evalúan lubricantes de un modo comparativo, suele ocurrir que cada condición de deformación, tipo de recubrimiento y lubricante dan resultados específicos, que cambian de un ensayo a otro.

Por ejemplo Keeler⁹¹ ha encontrado que determinadas combinaciones metal-lubricante son sensibles a cambios en la velocidad, mientras que otras no lo son. Otros muchos trabajos muestran que los valores del coeficiente de fricción medidos en un ensayo no muestran correlación con los obtenidos en otros o con los resultados o ensayos de embutición. El problema aumenta cuando se tienen en cuenta, además, los diferentes tipos de materiales, como las chapas recubiertas con zinc, ya que algunos modos de deformación son muy sensibles a la combinación específica lubricante-recubrimiento^{92 93 94 95}.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

La correlación entre los ensayos y el comportamiento real es en general pobre en los ensayos de simulación si se comparan exclusivamente valores del coeficiente de fricción. Schey aporta algunas recomendaciones útiles para la interpretación de resultados de ensayos de fricción.

Si se evalúan las tendencias en las fuerzas de fricción, la correlación mejora notablemente. Las variaciones en la fuerza de fricción son muy sensibles, y por lo tanto buenos indicadores, a los cambios en los mecanismos de lubricación.

Se recomienda que los ensayos se prolonguen lo suficiente para establecer condiciones más estacionarias. Se indica que el agotamiento del lubricante tiene una influencia mucho más decisiva que la magnitud inicial del coeficiente de fricción. Algunos detalles de la topografía, como la curva de material portante, que controla la cantidad de aceite atrapado, interactúa con la presión superficial para modificar la fricción. Es importante por tanto evaluar las modificaciones de la topografía.

En un sentido similar se orientan las recomendaciones de algunos investigadores pioneros, como Gibson, Hobbs y Stewart⁹⁶ que indican “mucho más importante que los valores de fricción es el hecho de que el lubricante sea capaz de resistir sin agotarse o sin dar gripados”. Reproducir las condiciones de temperatura o de deformación plástica que se dan en la realidad es también fundamental para la reproducibilidad y transferibilidad de los resultados en los ensayos.

A pesar de las incertidumbres que los ensayos de fricción presentan en comparación con el comportamiento real, existen ciertas relaciones que pueden considerarse de validez. Trabajos realizados por el ADDRG señalan que las observaciones de la evolución del coeficiente de fricción ofrecen, independientemente del ensayo empleado y de los valores absolutos, información relevante sobre el sistema⁹⁷:

Una fuerza de fricción estable es característica de un buen lubricante.

Una fricción creciente señala una pérdida gradual o agotamiento del lubricante.

Una reducción en la fuerza de fricción sugiere que se han activado los aditivos, o bien que se ha producido un cambio en el mecanismo de fricción o en la superficie.

El comité ASTM D-2 sobre productos petrolíferos y lubricantes ha tenido en cuenta la complejidad del problema de la evaluación de lubricantes para estampación⁹⁸. En lugar de uno, se recomienda el uso de cuatro ensayos, cada uno de los cuales permite evaluar un modo de deformación diferente:

- 1) ensayos de fricción con matrices plano-plano
- 2) ensayos de fricción con matrices tipo draw-bead
- 3) ensayo en copa con deformación biaxial de estirado (stretch)
- 4) ensayos en copa de embutición profunda

En relación con el diagrama FLD, los dos primeros son de tipo deformación plana. El tercero está en la zona de deformaciones positivas y el cuarto en la zona de deformaciones mínimas negativas.

Nuestro laboratorio dispone de un sistema de ensayos del tipo 1). Dicho sistema permite la realización de diferentes tipos de ensayos: RNUR, Inland, Sollac. La experiencia previa en la realización de ensayos para SIDMED, Aceralia, HQ, Fuchs y diferentes empresas del sector de automoción: Renault, VW, SEAT, Citroën, etc permite asegurar que el sistema proporciona ensayos altamente reproducibles. La variabilidad de resultados en similares condiciones es inferior a 0,015 en los valores del coeficiente de fricción. La reproducibilidad inter-laboratorios es también excelente. De hecho, el sistema ha sido empleado como prueba para el desarrollo de nuevas formulaciones de aceites lubricantes, dada la excelente correlación de resultados con los obtenidos en los laboratorios de RNUR.

Con una configuración similar al ensayo RNUR, pero con modificaciones en el diseño de las matrices al objeto de conseguir idénticas condiciones de contacto en ambas caras de la chapa, se ha diseñado un ensayo de caracterización tribológica para Ford España.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

El ensayo incluye la realización de hasta cuatro pasadas sucesivas sin reaceitar, con el fin de valorar efectos de pasadas múltiples.

Debe destacarse que los criterios de diseño del ensayo se optimizaron de modo que fuese posible correlacionar los resultados del ensayo con comportamientos reales observados en la planta de prensas de Ford Almussafes, para lo cual se dispuso de un elevado número de muestras que habían dado problemas de estampación (roturas) aún cuando cumplieran los requisitos de propiedades mecánicas y rugosidad superficial establecidos. Los resultados indicaron que el mejor criterio para evaluar un comportamiento correcto era la evolución de los coeficientes de fricción conforme se incrementa el número de pasadas. En las muestras sin problemas, el coeficiente de fricción máximo observado en el ensayo se mantiene o se reduce conforme se incrementa el número de pasadas. En las muestras que fallaron, sin embargo, se encontró que el coeficiente de fricción inicial presenta valores ligeramente superiores y, adicionalmente, el valor máximo observado crece conforme se pasa de una a tres pasadas.

Dada la fiabilidad de este tipo de ensayo, se empleará una configuración similar en el desarrollo de la investigación de esta tesis. No obstante, este tipo de ensayo emplea un contacto de tipo hertziano, que no reproduce con fiabilidad las condiciones de contacto bajo el prensachapas. En estudios sobre la influencia de determinadas variables, como la velocidad o la presión bajo el prensachapas, el sistema debe adaptarse empleando matrices de contacto plano-plano, que permiten un control preciso de la presión aplicada.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1. Objetivos de la investigación

El principal objetivo de investigación realizada en esta tesis es alcanzar un conocimiento profundo del comportamiento tribológico durante las operaciones de conformado por embutición de las chapas de acero recubiertas con Zn-Ni, destinadas a la obtención de piezas de carrocerías de automóvil.

Se pretende analizar el comportamiento tribológico bajo las condiciones operacionales y regímenes de lubricación que se dan en los procesos reales de embutición, así como la selección de los posibles tratamientos a las matrices y lubricantes empleados en la embutición para minimizar el desgaste y conseguir reducciones en el coeficiente de fricción, evitando la aparición de fenómenos de gripado o altos valores del coeficiente de fricción, que son los responsables de las roturas y de la contaminación por polvos del recubrimiento observadas durante la embutición real de chapas recubiertas con Zn-Ni. En la caracterización se intenta también evaluar los efectos de re-embutición múltiple que se dan en la fabricación real de piezas complejas de carrocería.

Para la consecución de este objetivo general se ha aplicado una metodología que integra diferentes tipos de ensayos y técnicas de caracterización, planteándose los siguientes objetivos parciales y etapas:

- Diseño de un equipo de ensayos y de un procedimiento de ensayo para la realización de ensayos en condiciones de contacto plano-plano, con capacidad para controlar y registrar los valores de presión aparentes en cada momento del ensayo y los valores de las fuerzas de fricción. Mediante secuencias de pasadas múltiples se reproducirá el efecto de las operaciones de re-embutición o el paso previo por otras zonas de la matriz.
- Modelización de los valores del coeficiente de fricción en contacto plano de una chapa estándar con recubrimientos de

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Zn-Ni, en las condiciones de procesado características del contacto plano-plano que tiene lugar bajo el prensachapas del proceso de embutición.

- Determinación las condiciones críticas de operación que dan lugar a incrementos de los valores del coeficiente de fricción por gripado y determinar el rango o ventana de condiciones de proceso que permiten una embutición en condiciones estables de la chapa con capas Zn-Ni.
- Análisis de los fenómenos locales y de los mecanismos que controlan el proceso y que permiten justificar los comportamientos observados, en particular, se debe analizar y determinar los regímenes de lubricación característicos del proceso, la evolución de la topografía superficial, la evolución de las áreas reales de contacto y de los modos de deformación del recubrimiento, así como la eficacia de los lubricantes/aditivos para mantener valores estables del coeficiente de fricción.
- Se pretende adicionalmente comparar cualitativa y cuantitativamente el efecto tribológico de diversos tratamientos superficiales antidesgaste alternativos (nitruración en baños de sales o nitruración gaseosa en vacío) que podrían aplicarse a las matrices de embutición, así como realizar comparaciones de los lubricantes utilizados en la industria en condiciones de lubricación con exceso de lubricante. Este estudio de carácter complementario se llevará a cabo mediante ensayos en microtribómetro, con configuración de contactos pin on disc.
- Análisis global de resultados. Conclusiones y recomendaciones sobre estudios de interés adicional.

Considerando los objetivos de la tesis y los antecedentes científicos sobre el tema, se han planificado los ensayos tribológicos a realizar en la investigación llevando a cabo un barrido amplio de la variables operacionales: velocidad y presión, para diferentes lubricantes de uso habitual en el sector, con el fin de poder evaluar la influencia de cada

Objetivos y Metodología

una de las variables que intervienen en el proceso de conformado independientemente e investigar la correlación entre ellas.

2.2. Materiales empleados

Las chapas con recubrimiento Zn-Ni empleadas en la presente investigación fueron suministradas por Arcelor-Mittal Sagunto, en forma de planos de tamaño aproximado DIN A2, obtenidos de una misma bobina de material con designación comercial “Chapa UNE-EN 10271 DC05+ZN 50/50 B-O”. Las chapas presentan un espesor de 0.80mm y llevan un recubrimiento Zn-Ni de espesor mínimo 5 micras por cara. Se aportó por parte del fabricante datos de análisis de colada y características mecánicas:

Tabla 2: Datos y composición de las chapas utilizadas.

Muestra	Zn-Ni
Cod Bobina	909015
Re (Mpa)	171
Rm (Mpa)	306
A (%)	40
r	1,874
n	0,208
Ra	1,10 micras
Pc	>50

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)
0,0264	0,0034	0,1471	0,0047	0,0025	0,0205	0,0012	0,0225
Al (%)	Cu (%)	Nb (%)	Ti (%)	V (%)	B (%)	N (%)	Fe (%)
0,0805	0,0547	0,0008	0,0011	0,0006	0,0001	0,0102	99,62

Sobre las muestras se han llevado a cabo ensayos adicionales de caracterización:

- Medidas de rugosidad y textura superficial
- Medida de espesores, caracterización microestructural mediante microscopía óptica y mediante microscopía electrónica de barrido con un equipo SEM Jeol 6300.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

- Caracterización estructural mediante ensayos de difracción de rayos X (DRX). El difractómetro utilizado es un Bruker AXS D4 Endeavour del tipo Bragg-Brentano $\theta:2\theta$. La radiación utilizada es $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5405\text{\AA}$), con un sistema de rendijas de 1, 1, 0.1 y 0.6mm. El rango de ángulos registrado es de $2^\circ 2\theta$ a $70^\circ 2\theta$, con una amplitud de paso de $0.02^\circ 2\theta$ y un tiempo por paso de 8s. Las condiciones de operación del tubo de rayos X fueron un voltaje de 40kV y una corriente del filamento de 40 mA.



Figura 16. Equipo de difracción de R-X.



Figura 17. Preparación de las probetas para la obtención y medidas del espesor de recubrimiento.

Objetivos y Metodología

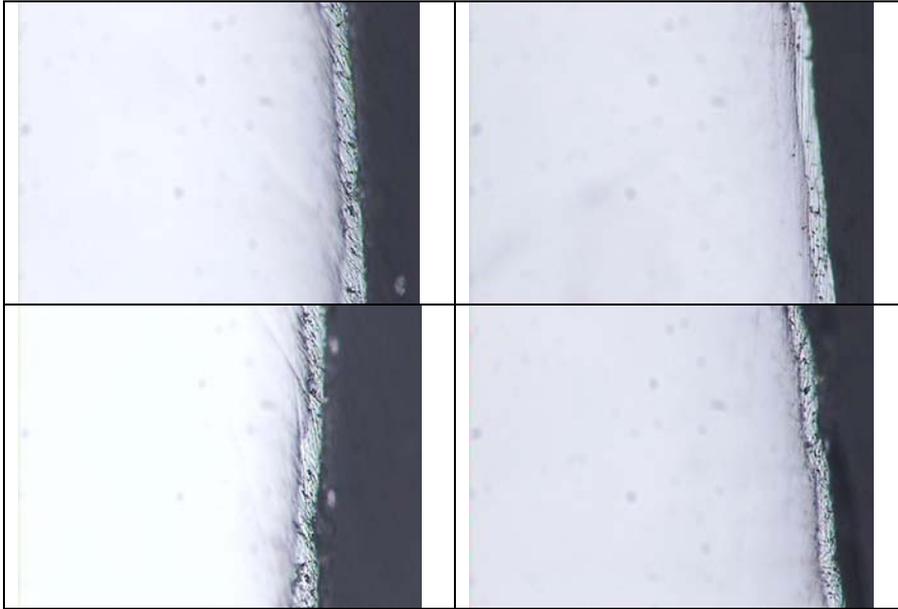


Figura 18. Imágenes obtenidas a 400x para la medición de espesores del recubrimiento.

Las medidas de espesores realizadas van desde las 6,22 μm hasta las 9,84 μm . En todos los casos se presentan espesores por encima del valor nominal garantizado mínimo de 5 μm . La dureza de la capa de Zn-Ni se midió mediante ensayos de microdureza (Matsuzawa MHT2), obteniéndose valores de 315 HV, característicos de la fase gamma Zn-Ni.

En las figuras siguientes se muestra el aspecto superficial y la microestructura del material de las chapas empleadas en esta tesis.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

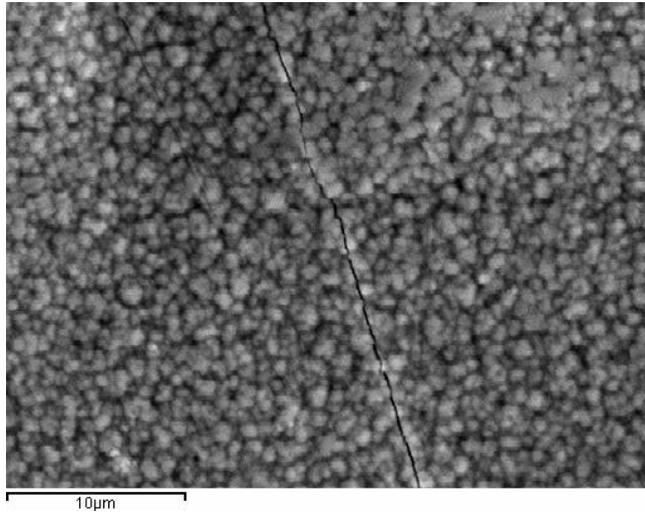


Figura 19. Vista general del recubrimiento por MEB a 3000x donde se observa la fragilidad del recubrimiento y la morfología globular externa de la capa Zn-Ni.

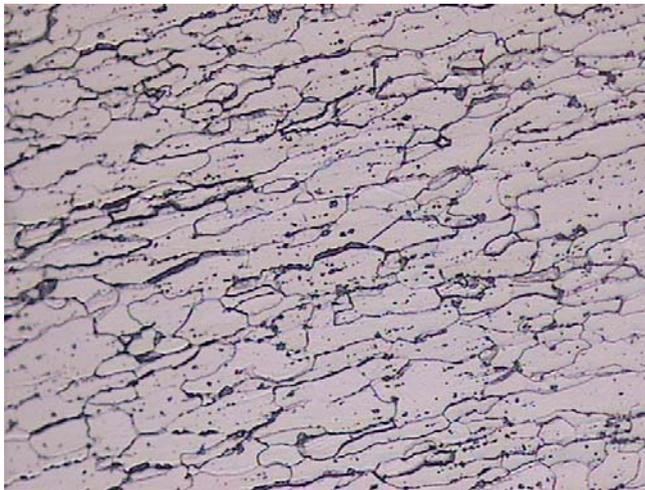


Figura 20. Corte transversal de la chapa de acero dulce recubierto con Zn-Ni a 200 aumentos. Ataque con Nital 3. Se observa la estructura ferrítica con granos de morfología "pancake" característicos de los aceros de embutición.

2.3. Lubricantes

El estudio se ha llevado a cabo empleando dos lubricantes de uso habitual en el sector siderúrgico. En los ensayos de fricción plana se ha evaluado el comportamiento tribológico en tres diferentes condiciones:

- Lubricación tipo (L1: SL): Los ensayos de este tipo se han realizado sobre el material tal como se ha recibido de la planta siderúrgica, en estado de suministro aceitado (O), sin desengrase y sin aplicación de otros lubricantes posteriores. El lubricante original aplicado por Arcelor Mittal a esta chapa es un aceite de protección anticorrosiva denominado Anticorit PL 3802 39S, con una viscosidad de $60 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 40°C , y densidad 0.915 g/ml .
- Lubricación tipo L2: Ensayos realizados tras desengrase y aplicación controlada del mismo lubricante Anticorit PL 3802 39S. Se aplica a la chapa original tras su desengrase con MEEK, mediante inmersión total y escurrido durante 24h en posición vertical. El procedimiento está recomendado en el Ensayo RNUR y garantiza la obtención de capas de espesor aproximado $2\text{-}3 \text{ g/m}^2$, similares a los que se aplican en las líneas de embutición.
- Lubricación tipo L3: Ensayos realizados tras desengrase con MEEK de la chapa original y aplicación controlada del lubricante Ferrocote S6130 de Quaker Chemical. Es también un lubricante de tipo pre-lube, ampliamente utilizado, con capacidad de protección anticorrosión y de lubricación durante la embutición, La viscosidad es de 63 cSt at 20°C y la densidad 900 kg/m^3 .

Los ensayos tribológicos en microtribómetro se han realizado también con los mismos lubricantes, en condiciones de lubricación superabundante, mediante inmersión del contacto en aceite a lo largo de todo el ensayo.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Sobre los lubricantes empleados se han llevado a cabo ensayos de caracterización adicional que incluyen la medida de viscosidad y la caracterización de composición y niveles de aditivos mediante espectroscopia de infrarrojos FTIR y voltamperometría lineal de barrido mediante un equipo comercial Ruler de Fluitec International.

2.4. Diseño del equipo para ensayos multifricción en contactos plano-plano.

Para la realización de los ensayos de fricción en condiciones plano-plano que reproducen las condiciones de contacto en el prensachapas se ha diseñado y fabricado un nuevo sistema de ensayos. Desde el punto de vista de los efectos sobre el comportamiento tribológico en operaciones de conformado, los ensayos de tipo contacto plano, al contrario que otros ensayos de simulación, tienen la ventaja de que los resultados son prácticamente independientes de las propiedades mecánicas del material base.

2.4.1. Condiciones de contacto en el ensayo

El sistema de mordazas empleado emplea una configuración de contacto plano-plano similar a la del ensayo Inland clásico desarrollado por Hilsen⁹⁹ y Bernick en sus estudios pioneros sobre los problemas de “galling” o gripado local con chapas desnudas de acero, si bien la aptitud para llevar a cabo ensayos múltiples se ha adaptado del ensayo normalizado RNUR D31/1738, originalmente desarrollado por el CRM de Bélgica que es ampliamente utilizado en el sector siderúrgico y de fabricantes de automóviles para evaluar la capacidad lubricante de aceites de embutición.

En el ensayo RNUR D31/1738 clásico se emplean unas condiciones fijas de presión y velocidad de deslizamiento. La fuerza normal aplicada en las mordazas es $N = 500$ dN y las mordazas presentan una geometría cilindro-plano, con radio en la parte cilíndrica $r = 10$ mm, la velocidad de deslizamiento es de 50 mm/min, con una longitud total de deslizamiento entre mordazas de 55-60mm. Las chapas presentan una anchura de 50mm. Empleando dicho ensayo, el ancho de la zona de contacto medido experimentalmente es del orden de 0,69mm y la

Objetivos y Metodología

presión media aparente en la zona de contacto alcanza valores de $P_a = 140$ MPa. El tamaño de la zona de contacto es claramente superior al predicho por la teoría de Hertz debido a la aparición de fenómenos de plastificación local.

Para evaluar la influencia de la distancia recorrida bajo presión y las etapas múltiples de embutición, el ensayo RNUR emplea varias pasadas, hasta 10. Esta es una característica similar a la del ensayo Sollac. Al acabar el primer paso entre mordazas, estas se abren, la probeta se retorna a su posición inicial, las mordazas se cierran de nuevo y se realiza una segunda pasada. El proceso puede repetirse hasta que se alcanza un número de pasadas pre-establecido. Las chapas no se re-aceitan entre pasada y pasada.

El equipo de ensayos diseñado presenta frente al ensayo Inland o al ensayo RNUR las siguientes modificaciones y ventajas:

La geometría de contacto se ha modificado respecto al ensayo RNUR, que presenta una configuración de contacto lineal semicilindro-plano. En el ensayo adoptado en esta tesis se emplean matrices de contacto plano-plano. Esto tiene como ventaja el preciso control de las presiones aparentes de contacto y la similitud del contacto entre ambos lados de la chapa. Adicionalmente, el sistema de ensayo se ha adaptado para controlar de modo preciso la fuerza normal aplicada, mediante su medición con una célula de carga durante el ensayo. Las muestras, que presentan una anchura de 20mm, se hacen pasar entre dos herramientas planas de dimensiones 50mm*5mm, de modo que la superficie de contacto aparente es, en todos los casos $S_a = 100 \text{ mm}^2$.

El sistema de montaje de las mordazas se ha modificado respecto al ensayo RNUR, de modo que se generen fenómenos de auto-alineamiento entre las mordazas.

La fuerza necesaria para hacer deslizar la chapa T a una velocidad pre-establecida se registra de forma continua mediante una máquina de ensayos de tracción, que también permite controlar la velocidad de deslizamiento. En nuestras experiencias se empleó una máquina universal Instron 4204 con control automático mediante software. Las matrices están fabricadas en un acero de herramientas de 2%C y 12%Cr, con designación UNE F-5214 (200CrMoV₁₂) templado y

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

revenido a 60 HRC, y con un acabado superficial obtenido mediante lija metalográfica de grano 600 en sentido transversal. Las medidas de rugosidad superficial así obtenida se encuentran en el rango $Ra= 0,1-0,2$ micras.

La experiencia previa de ensayos con el sistema RNUR demostró que, si se trabaja con altas presiones, se produce una deformación de las matrices que provoca una leve curvatura, haciendo que las presiones de contactos sean más elevadas en las zonas laterales de las muestras, como se ilustra en la Figura 21. Para evitar este problema, se modifica el ancho de las muestras, adoptándose un tamaño menor de muestra, con anchura 20mm en lugar de 50mm utilizados en el ensayo RNUR.

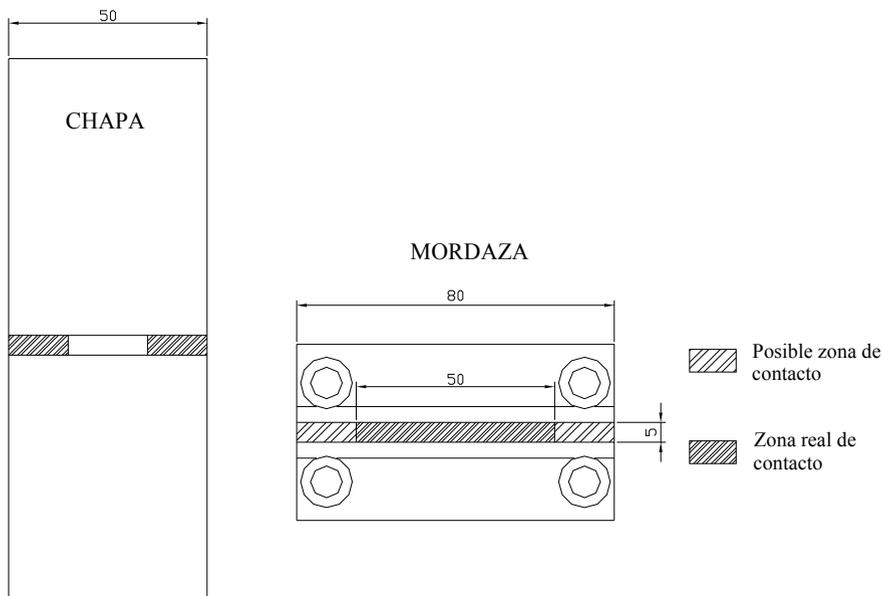


Figura 21. Muestra las zonas de contacto entre la chapa y la mordaza para muestras de anchura 50mm.

Objetivos y Metodología

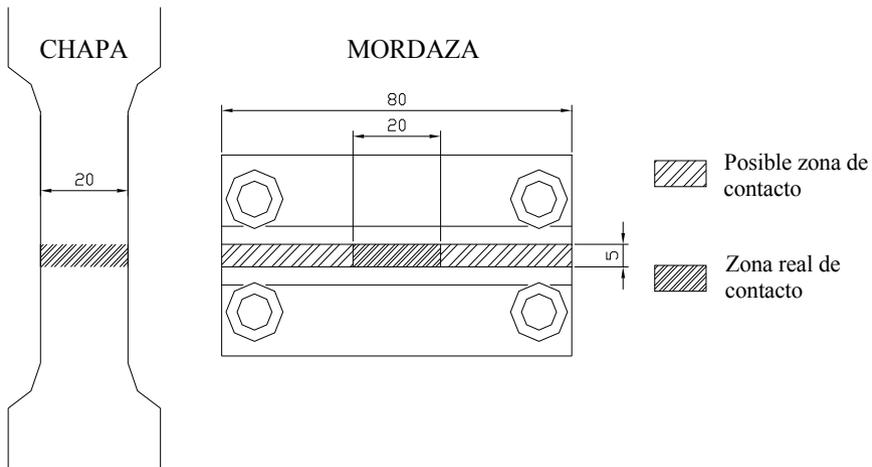


Figura 22. Muestra las zonas de contacto con las nuevas dimensiones de probeta

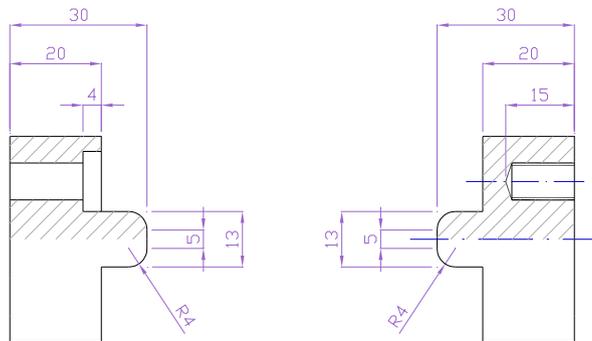


Figura 23. Dimensiones de las mordazas utilizadas en contactos plano-plano

Tras la realización de cada ensayo se procede al lijado de las mordazas en sentido transversal, con lija de grano 600, para evitar que el desprendimiento de polvos o partículas del ensayo anterior pueda interferir en el resultado del ensayo siguiente.

Las muestras empleadas tienen unas dimensiones de 250x20 mm, con la mayor dimensión en sentido transversal a la laminación. El ensayo de fricción se realizó, por tanto, en sentido transversal a la laminación. Las muestras se obtuvieron por corte mediante cizalla a partir de las chapas originalmente suministradas por la planta siderúrgica, de tamaño aproximado A2. Para aplicar un determinado lubricante, una

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

vez eliminadas cuidadosamente todas las rebabas laterales, las muestras se desengrasan mediante disolventes (hexano+ MEEK) y se aceitan por ambas caras para conseguir un espesor uniforme de unos 2 g/m^2 .

2.4.2. Componentes y funcionamiento del equipo.

El equipo de ensayo diseñado consta del utillaje para sujetar la chapa, un grupo hidráulico que suministra el empuje necesario para aplicar la fuerza normal, y la máquina de tracción que permite controlar la velocidad de desplazamiento y registrar las fuerzas de fricción. En la Figura 24 se observa un esquema de conjunto del equipo diseñado, y los componentes del mismo para tener un ensayo preciso, fiable, y con alta reproductividad.

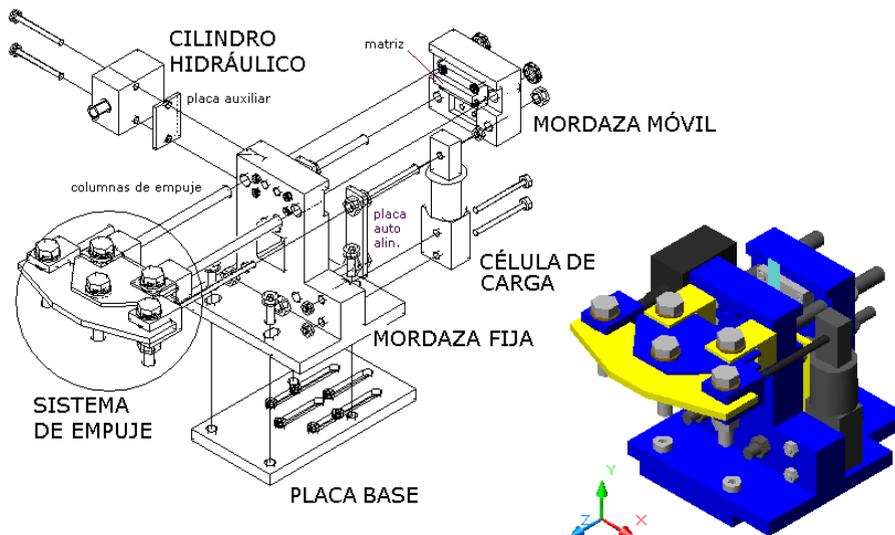


Figura 24. Utillaje y equipo diseñado para la sujeción de la probeta, en el ensayo de multifricción.

A continuación, se listan y describen los componentes utilizados:

1. **SUBSISTEMA HIDRÁULICO:** Es el encargado de suministrar y controlar la presión necesaria para generar la fuerza normal entre mordazas y la chapa.

Objetivos y Metodología



Figura 25. Equipo hidráulico de presión utilizado

2. ESTRUCTURA DE MONTAJE: Está compuesta por un subsistema mecánico que se encarga de recibir un caudal de aceite suministrado por el subsistema hidráulico y transformarlo en una presión sobre las muestras a ensayar, a través de las mordazas. Permite también el montaje del sistema de medida de carga normal aplicada (célula de carga) y las placas de montaje de mordazas o matrices.



Figura 26. Maquina multifriccion diseñada

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

3. CÉLULA DE CARGA: La célula de carga está conectada a la matriz y permite medir la fuerza transmitida entre matriz y muestra a ensayar cuando el subsistema hidráulico está en funcionamiento.

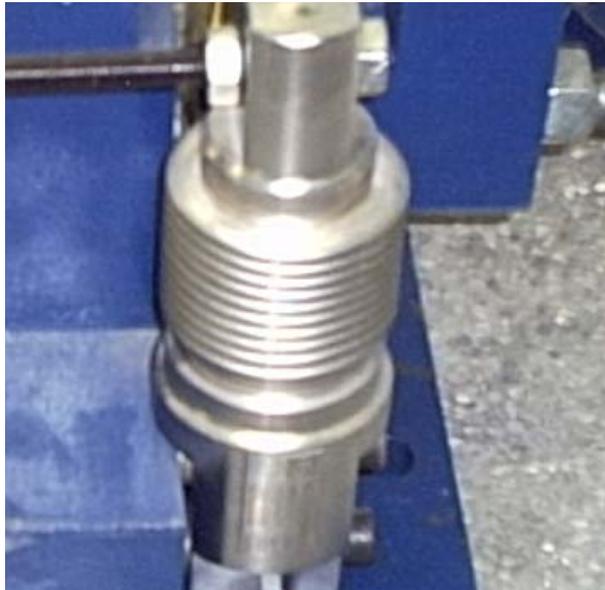


Figura 27. Célula de carga instalada en el equipo multifricción

4. REGISTRADOR DE SEÑAL: Es el encargado de registrar la señal eléctrica que emite la célula de carga. Mediante esta señal eléctrica se calculará la fuerza normal entre matriz y muestra ensayada.



Figura 28. Multímetro utilizado para registrar la señal eléctrica de la célula de carga

Objetivos y Metodología

5. MORDAZAS: Es el elemento que contacta con la chapa por ambos lados.



Figura 29. Mordazas plano-plano incorporadas en el equipo multifricción

6. MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS: Se ha empleado una máquina universal de ensayos Instron 4204. En este ensayo, se fija la velocidad de desplazamiento del cabezal y la máquina universal de ensayos se encarga de realizar la fuerza necesaria para vencer la fricción entre las mordazas y la muestra.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.



Figura 30. Máquina universal de ensayos utilizada

7. UNIDAD DE CONTROL: Es el dispositivo necesario para control de la máquina de ensayos y registro de resultados.



Figura 31. Sistema de control

2.4.3. Cálculo del coeficiente de rozamiento en el ensayo.

Una vez cerradas las mordazas, la muestra se desplaza verticalmente hacia arriba solidaria a la cabeza tractora de la máquina de tracción, a la cual va enganchada, a la vez que es presionada por ambas caras. Si

Objetivos y Metodología

se desean hacer pasadas múltiples, una vez ha recorrido la longitud impuesta se abren las mordazas y sin reaceitar la chapa retorna a su posición original para ser ensayada de nuevo. El balance de fuerzas aplicadas sobre la chapa es el siguiente.

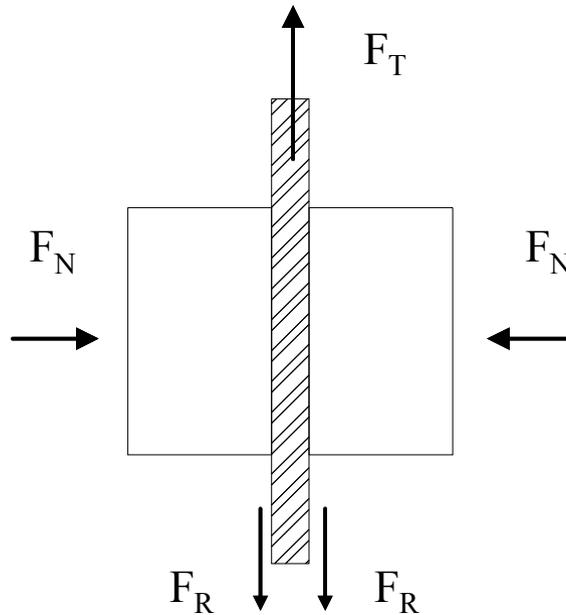


Figura 32. Esquema de fuerzas sobre una probeta en el ensayo de fricción

La fuerza F_T es la de estiramiento de la máquina de tracción. F_N es la fuerza con que las mordazas presionan la chapa. Por cada cara aparece una fuerza de rozamiento F_R que se opone al avance. En el equilibrio dinámico F_T es de sentido contrario a F_R y equivale a dos veces su valor, por estar las dos caras sometidas a presión.

$$F_T = 2F_R \quad (14)$$

y teniendo en cuenta la ecuación del coeficiente de rozamiento dinámico

$$F_R = \mu F_N \quad (15)$$

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

El valor de μ se puede deducir de la ecuación (5), según F_N y F_T , de modo similar a la fórmula empleada en el ensayo RNUR.

$$\mu = F_T/2F_N \quad (16)$$

El valor de F_T es un parámetro de salida del proceso que proporciona la máquina de ensayos y queda registrado en la curva Carga-Desplazamiento. Para medir F_N se cuenta con la célula de carga. La distribución de fuerzas en el sistema de empuje es la siguiente.

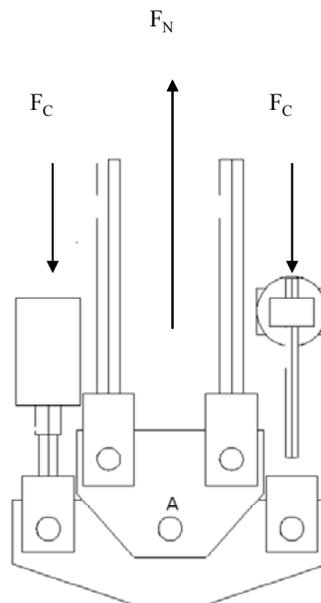


Figura 33. Esquema de fuerzas sobre el sistema de empuje en el equipo de ensayo

El cilindro empuja con una fuerza F_C , que inicialmente puede calcularse mediante la presión P aplicada por el grupo hidráulico y el área efectiva del émbolo $A_e = 12.6 \text{ cm}^2$

$$F_C = P * A_e \quad (17)$$

Como el sistema de empuje es simétrico la célula de carga experimenta una fuerza de igual sentido y valor a F_C . El valor que recoge la célula es el valor real empuje del cilindro, pero dado que

Objetivos y Metodología

puede haber pérdidas en la transmisión de la carga, el valor F_c registrado por la célula de carga será ligeramente menor que el teórico. El punto A actúa como una articulación que permite el giro libre sin crear momento. Por tanto el balance de fuerzas en el equilibrio estático obliga a una fuerza F_N de reacción de sentido contrario y de valor el doble que F_c , que es la responsable de la presión aplicada uniformemente sobre la superficie de la chapa que está en contacto con las matrices.

Con esta configuración, el cálculo de los valores del coeficiente de fricción en el ensayo se determina a partir de la expresión:

$$\mu = \frac{F_T}{2F_n} = \frac{F_T}{4F_c} \quad (18)$$

La fuerza F_N es un parámetro de entrada y su valor depende de la presión ejercida por el sistema hidráulico, siendo este uno de los parámetros de entrada de rango variable. Hay que recalcular los diferentes valores de F_N para cada ensayo.

Por otro lado, el valor de la fuerza F_T va variando durante el proceso según la longitud que ya lleva la chapa recorrida o según la pasada, variaciones que ponen de manifiesto un cambio de comportamiento tribológico a lo largo de un proceso. F_T también depende de la velocidad de subida de la cruceta (variable de entrada del proceso). Si se dispone de un registro continuo de valores F_d , tal como se obtiene de los registros de fuerza de la máquina de tracción, puede obtenerse una representación gráfica de la evolución del coeficiente de fricción a lo largo del ensayo.

En resumen, los parámetros de entrada que van a variar en cada ensayo:

La *presión* de apriete de las mordazas

La *velocidad* de subida de la cruceta

Mientras que permanecerán constantes:

Área de contacto: 1 cm^2

El lubricante aplicado:

Longitud total recorrida: 55 mm

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Número de pasos sucesivos entre mordazas: cuatro

Para poder evaluar modificaciones superficiales correspondientes a cada pasada, se reduce en cada pasada adicional la distancia total recorrida, de modo que queda sobre la muestra una zona representativa de unos 14 mm de longitud, sin dañado adicional. El número de pasadas total se ha establecido en cuatro pasadas. En otros trabajos previos se observó que los efectos más representativos del comportamiento de chapas recubiertas con cinc se observa en las tres primeras pasadas^{100 101}. La longitud total recorrida adoptada para esta tesis ha sido:

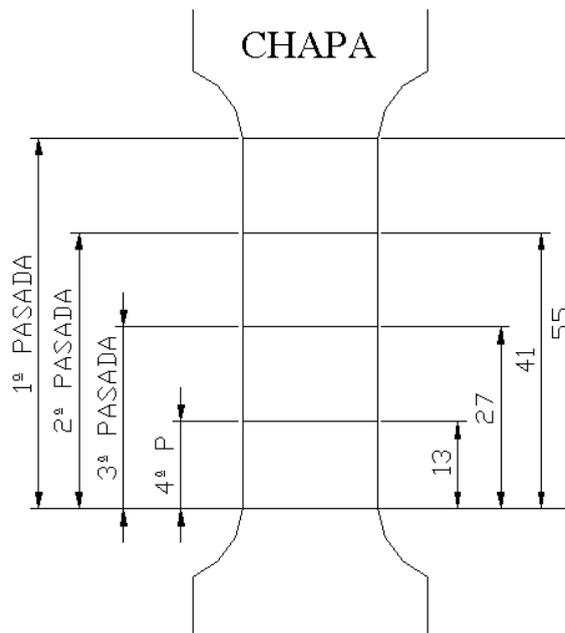
1ª pasada: 55 mm (similar al ensayo RNUR)

2ª pasada: 41 mm

3ª pasada: 27 mm

4ª pasada: 13 mm

La Figura 34 muestra las dimensiones y una imagen de una muestra tras el ensayo.



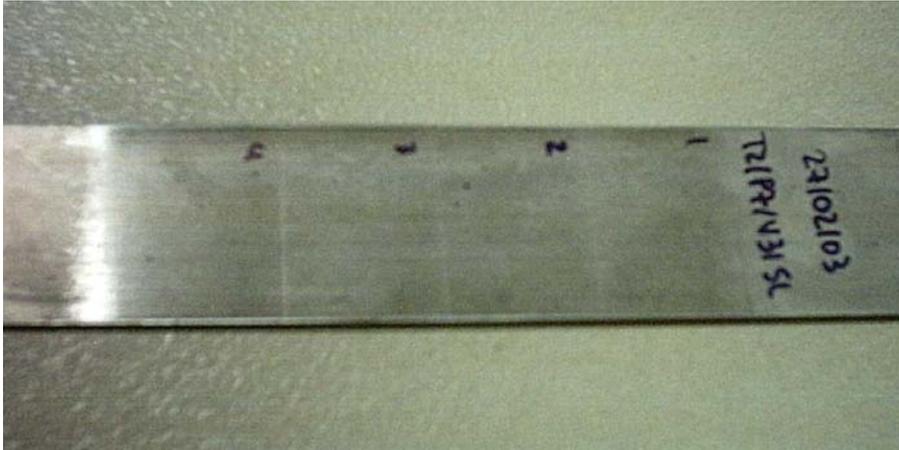


Figura 34. Modo de realizar las pasadas sobre una misma muestra.

2.4.5. Variables del ensayo de fricción plana y codificación de muestras

En el ensayo desarrollado para los estudios de esta tesis se han empleado condiciones propias del proceso de embutición en la zona de contacto bajo el prensachapas. Las presiones en el ensayo se hacen variar en 8 niveles, desde valores del orden de 5 MPa a 60 MPa. Los valores de velocidad de desplazamiento se varían en tres niveles: 40 mm/min, 120 mm/min y 240 mm/min. La longitud total bajo contacto se estableció en 55 mm. Se han realizado hasta 4 pasadas sucesivas, con el fin de evaluar el daño acumulado y los efectos de la re-embutición. Las pasadas adicionales se han llevado a cabo sin la aplicación adicional de aceite sobre las chapas.

Para el correcto registro de las probetas ensayadas, así como el almacenamiento de los datos de los ensayos, se ha procedido a codificar las probetas con un código de tipo M-Pi-Vj-Lk-np que pasamos a comentar a continuación:

Utilizamos inicialmente la letra M para designar el tipo de ensayo realizado, pasadas múltiples o Multifricción.

La segunda letra es una P y después un número i del 1 al 8. La letra P indica presión, y el número i indica la presión hidráulica en kg/cm^2 a la que se ha realizado el ensayo, según la tabla adjunta, en la que se

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

indica también el valor calculado de la presión aparente sobre la chapa en los ensayos:

Tabla 3: Codificación de las probetas en función de la presión aplicada

Número codificación i	1	2	3	4	5	6	7	8
Presión hidráulica (kg/cm ²)	1	3	6	8	12	16	20	24
Presión aparente (MPa)	2.5	7.5	15	20	30	40	50	60

La tercera letra es una V y después un número j del 1 al 3. La letra V indica velocidad de pasada, y el número indica el valor de la velocidad de pasada en milímetros por minuto a la que se ha realizado el ensayo, según la tabla adjunta:

Tabla 4: Codificación de las probetas en función de la velocidad

Número codificación j	1	2	3
Velocidad (mm/min)	40	120	240
Velocidad (m/s)	0,00066	0,002	0,004

La cuarta letra es una codificación k en cuanto a la lubricación empleada según la tabla adjunta:

Tabla 5: Codificación de las probetas en función del lubricante

Núm. Codificación k	SL	L2	L3
Tipo de lubricante	Suministro	Fuchs PL 3802 39S	Ferrocote S-6130

Objetivos y Metodología

Finalmente, se indica el número de pasada nP, desde n=1 a 4. En total, se han realizado los siguientes ensayos o combinaciones de muestras M/Pi/Vj/Lk/nP:

- 96 ensayos para el estado de suministro SL.
- 96 muestras para las lubricadas tipo L1 con Fuchs PL3802 39S
- 96 muestras para las lubricadas tipo L2 con Ferrocote S-6130.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

2.5. Ensayos de fricción en microtribómetro *pin on disc*.

Los ensayos para evaluar efectos de los tratamientos de superficie en las matrices se han llevado a cabo empleando un microtribómetro Microtest, con configuración de contacto pin-on-disk.

El tribómetro utilizado es el modelo MT2/60/SCM, que es un equipo con dos ejes servocontrolados. Uno de ellos para controlar la rotación (a una velocidad definida) y el otro para controlar el radio friccional, y por tanto variar el momento total sobre el pin.

El sistema es controlado por ordenador (velocidad regulable) y se pueden obtener y registrar diferentes parámetros: fuerza de rozamiento, coeficiente de rozamiento u otros, desgaste y temperatura. El conjunto permite además modificar el radio de fricción, de manera que se podrán efectuar ensayos con contacto en zona nueva.

El equipo consiste en un posicionador de un pin esférico sobre un disco, el cual gira por la acción de un motor a unas determinadas revoluciones por minuto rpm. El pin se encuentra localizado a un radio R del centro del disco. El disco puede estar dotado con celdas de carga, las cuales pueden servir para determinar el coeficiente de rozamiento.

Un motor con velocidad variable, montado de tal manera que las vibraciones no afecten las pruebas permite controlar la velocidad del ensayo. Las velocidades de rotación más usadas se encuentran en el rango de 0.3 a 3 rad/seg (60 a 600 rpm).



Figura 35. Vista general del Equipo Pin-on-disk utilizado

2.5.1 Ensayos pin-on-disk en contactos bola-plano

Se han llevado a cabo varias fases de ensayos en tribómetro. En una etapa inicial, destinada a la evaluación de contactos en seco de las chapas contra diferentes tipos de tratamientos de la matriz, se han empleado como “pin” bolas de acero de diámetro 4mm de acero AISI 52100 (UNE F5230-100Cr₆), con 1%C y 1,5%Cr, con una dureza mínima de HRC60. Sobre las mismas se han aplicado dos diferentes tratamientos comerciales: nitruración en baño de sales (Tenifer) y nitruración gaseosa en vacío, designada comercialmente Nitrovac. Como “disk” se emplean directamente las chapas recubiertas con Zn-Ni, previamente cortadas a tamaños de 40mm x 40mm.

Se emplearon diferentes cargas desde 1 a 10 N, aunque los resultados de larga duración que se presentan en este trabajo corresponden a cargas de 10 N. Bajo las condiciones de contacto hertziano de esta geometría esfera-plano, y asumiendo módulos de elasticidad similares en pin y disco de valor $E=210$ GPa, se tiene un área de contacto inicial de radio $a = 0.05$ mm, y una presión normal media de valor $\sigma_c = 1,25$ GPa, un valor muy similar al valor de dureza de la aleación gamma Zn-Ni.

Los ensayos se realizaron inicialmente en seco, tras desengrase de la muestra de chapa con hexano+meeek, con el fin de valorar la tendencia a la adhesión entre tratamientos de la matriz y recubrimiento. También se han llevado a cabo ensayos con lubricación. El recorrido total en

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

los ensayos en seco se prolongó hasta los 1000m. A lo largo del ensayo se registraron valores de desgaste en las chapas por penetración del pin y por el ancho de la pista de fricción o desgaste, según criterios de la norma ASTM G99. También se registraron los desgastes en la matriz a partir del tamaño de la zona plana generada por el ensayo.

2.5.2 Ensayos pin-on-disk en contactos plano-plano

En una segunda fase se han llevado a cabo ensayos en micro tribómetro con pines cilíndricos de diámetro 8mm, de modo que se consigue un contacto plano-plano entre el extremo del pin y la superficie de las chapas. Para evitar los efectos de borde, estos se mecanizan con un pequeño radio de acuerdo, de modo que el diámetro efectivo de la parte plana es $\varnothing = 6.75$ mm y una superficie de contacto aparente de 35.78 mm². Se emplearon materiales y tratamientos de superficie similares al caso de las bolas. Estos ensayos se llevaron a cabo en condiciones de lubricación abundante, con el contacto permanentemente sumergido en aceite.

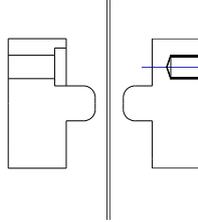
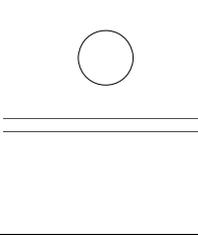
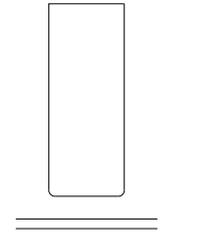
El objetivo fundamental de esta parte del trabajo ha sido el análisis del comportamiento tribológico, en condiciones de deformación plana, pero con un rango de parámetros más favorable para la obtención de regímenes de capa gruesa.

En este apartado de ensayos se explora el comportamiento con mayores valores de velocidad de desplazamiento que en los ensayos de fricción entre mordazas planas, junto con menores valores de presión aparente, y en condiciones de lubricación superabundante. El empleo de bajas presiones aparentes (cargas desde 5 a 30N, que dan como resultado presiones desde 0.14 a 0.84 MPa), junto con el uso de mayores velocidades de desplazamiento (10 a 188 mm/s), permite explorar el comportamiento tribológico en un rango de valores del parámetro de Hersey más elevados que los correspondientes a los ensayos de fricción plana multipasadas.

2.6. Resumen de las condiciones de ensayos

La Tabla siguiente muestra un resumen del rango de variables explorado en las diferentes tipos de ensayos llevados a cabo en investigación. Se indican también en la última columna los rangos de valores del parámetro Hs.

Tabla 6: Condiciones de ensayos

Ensayo/ Contacto	Matrices	Presión Carga	Velocida d	Lubricante s	Hs (m ⁻¹)
	F-5214 Q+T 60 HRc	2.5 a 60 MPa	40 a 240 mm/min	Suministro Fuchs PL 3802 39S Ferrocote S-6130	3.6 10 ⁻¹³ hasta 1.2 10 ⁻¹¹
	AISI521 00 Q+T 60HRc Nitrovac Tenifer	De 1 a 10 N De 0.58 a 1.25 GPa (1, 3, 5 y 10 N)	De 1 a 300 rpm. De 0,00105 a 0.314 m/s (1,3,10,30 0 rpm)	Seco Fuchs PL 3802 39S Ferrocote S-6130	2.4 10 ⁻¹⁴ hasta 1.7 10 ⁻¹³
	AISI521 00 Q+T 60HRc Nitrovac Tenifer	De 5 a 30 N (5, 10 y 30 N) De 0.14 a 0.84 Mpa	De 0,01 a 0,188 m/s. De 20 a 180 rpm Radios de 10 y 20 mm.	Seco Fuchs PL 3802 39S Ferrocote S-6130	8 10 ⁻⁹ hasta 5 10 ⁻⁷

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

2.7. Caracterización superficial de las chapas

2.7.1. Medidas de las áreas de contacto real

En los métodos de fabricación donde se presentan procesos de fricción entre dos superficies (como es el caso de la embutición de chapas), las secuencias de picos y valles de cada una de las superficies deben adaptarse entre sí y formar un área de contacto real que siempre será menor que el área teórica o aparente de contacto.

El objetivo de las medidas de la superficie real S_c es, por tanto, analizar la evolución de la superficie real de contacto entre las dos superficies en contacto a medida que varían las condiciones en el proceso de fricción (presión de contacto, velocidad de deslizamiento, lubricación, etc.). Además también se analizará la evolución del área real de contacto a medida que aumenta el número de pasadas sobre la misma zona de la probeta.

El valor de la fracción de superficie en contacto S_c se determinó a partir de imágenes obtenidas por microscopía óptica, con un microscopio Nikon Microphot a 100 aumentos, directamente de la superficie de las chapas tras cada ensayo, y también se llevaron a cabo observaciones y análisis MEB, en un microscopio Jeol 6300 con software de análisis EDX.

La baja resolución vertical de los microscopios ópticos no estereoscópicos proporciona un elevado contraste cuando se realiza el enfoque sobre la zona plana superior de la topografía de la chapa que ya ha pasado un ensayo de fricción. Las zonas que han estado en contacto con las herramientas se han aplastado, dando por tanto una superficie casi perfectamente plana que refleja la luz y que aparece como una zona clara en las microfotografías. Por el contrario, las zonas de valles que no han estado en contacto con la matriz aparecen de color negro u oscuro. Este elevado contraste permite una fácil cuantificación de la fracción de superficie en contacto mediante técnicas de análisis de imagen.

Objetivos y Metodología

El método utilizado para la estimación de los valores de Sc ha sido el siguiente:

- Tomar las micrografías en microscopio óptico Nikon Microphot, tras la realización de los ensayos.
- Mediante software de tratamiento de imágenes pasar las zonas de tonalidad oscura de la micrografía (zonas que no han sufrido fricción durante el ensayo) a color negro, y las zonas de tonalidad clara a color blanco (zonas reales de contacto durante el ensayo).
- Mediante software de tratamiento de imágenes, realizar histogramas a las micrografías en blanco y negro.

Un histograma es una representación gráfica del número de píxeles que contiene cada nivel de brillo de una imagen. Como la imagen analizada es en blanco y negro, el histograma nos dará la proporción de píxeles de tonalidad blanca y de tonalidad negra, con lo que podremos estimar el porcentaje de la superficie real de contacto frente a la superficie teórica o aparente de contacto.

Las figuras siguientes muestran un ejemplo de la secuencia del proceso de tratamiento de la imagen, que puede llevarse a cabo mediante rutinas disponibles en paquetes de software comerciales como PhotoShop® o Matlab. El ejemplo de análisis se ha realizado sobre la muestra de código P3-V3-L2-4p (Presión aparente 15 MPa, Velocidad de deslizamiento 240 mm/min, con lubricante Fuchs PL 3802 39S y cuatro pasadas.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

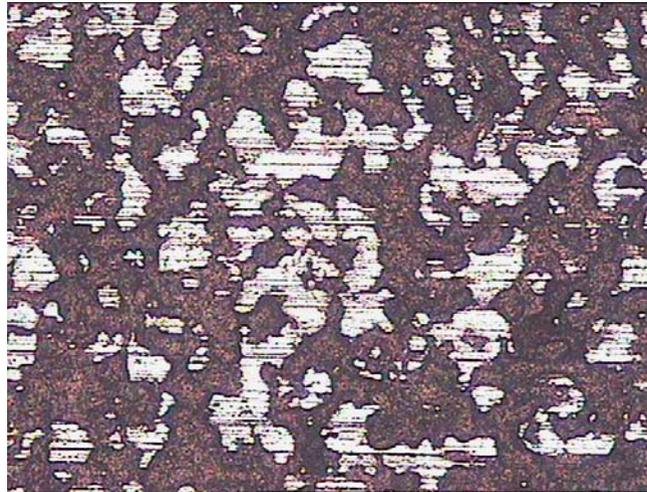


Figura 36. Micrografía óptica de la superficie de la muestra en color a 100X.

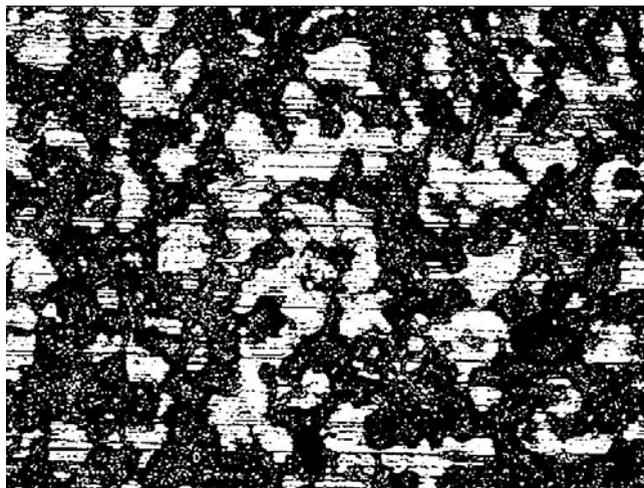


Figura 37. Micrografía de la probeta en blanco y negro

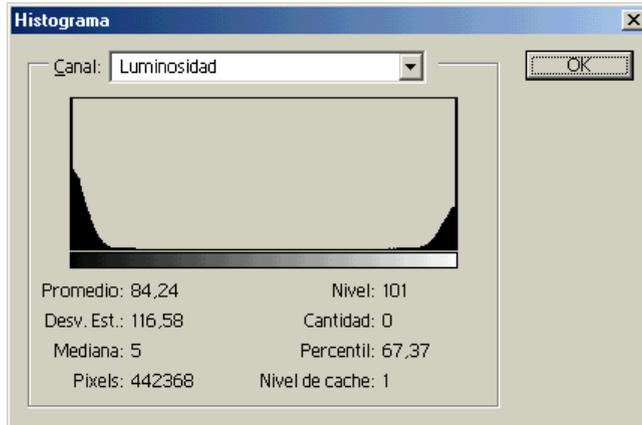


Figura 38. Histograma de la imagen en blanco y negro

El histograma tiene alguna información importante que pasamos ahora a explicar. El número de píxeles total de la imagen es de 442368, de los cuáles, el 67.37% son de tonalidad negra (zonas que no han entrado en contacto durante el ensayo) y el 32.63% son de tonalidad blanca (zonas de contacto real entre ambas superficies). Por tanto, la superficie real de contacto en estas condiciones de ensayo es el 32.63% de la superficie teórica de contacto entre matriz y probeta.

2.7.1. Determinación de texturas y topografía superficial

Los valores originales y la evolución de la textura (topografía) superficial de las chapas se determinaron mediante técnicas de medida 2D, con un rugosímetro de palpador autoguiado Mhar Perthometer M2, que cumple ASME B 45.1-1995 e ISO 3274. La punta de palpación es de tipo cónico, con ángulo de 90° y punta esférica de radio 2 μm . La fuerza estática máxima de medición es inferior a 0,7 mN y la resolución vertical superior a 12 nm.

La medida de la textura superficial de chapas de acero para embutición suele llevarse a cabo en Europa siguiendo las instrucciones del Instituto Alemán del Acero, SEP 1940. Esta norma define la textura superficial de las chapas mediante el uso de dos parámetros: la rugosidad media aritmética R_a , tal como se define en DIN-EN-ISO 4768, y la densidad de picos por centímetro P_c , medida con un nivel de conteo de 1 μm , es decir, con líneas de referencia a

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

distancias $0,5 \mu\text{m}$ por encima y por debajo de la línea media, tal como se define en ANSI/ASME B46.1 1985. Los procedimientos tradicionalmente en Europa para la caracterización de la textura de chapas se llevaban habitualmente a cabo sobre perfiles filtrados de $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ cut-off (Euronorma 49-72) y no tenían en cuenta el número de picos. Las exigencias habituales para chapas de embutición se encuentran en el rango de valores Ra entre 1-2 micras y $P_c > 50$ picos/cm.



Figura 39. Imagen del Rugosímetro Mahr Perthometer M2 utilizado para la determinación de texturas superficiales.

Los parámetros 2D se han medido de acuerdo con diversas normas internacionales:

EN ISO 4287-1998: definición de parámetros 2D

SEP 1940:1992 : Definición de la textura en chapas

ANSI/ASME B46.1: 1995 Definición de la densidad de picos

DIN EN ISO 11562: Obtención de perfiles corregidos

ISO 13562-2: Obtención de parámetros relativos a la curva de material portante linealizada.

3. RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS MULTIFRICCION.

3.1. – Resultados Multifriccion contactos plano-plano.

La Figura 40 siguiente muestra un gráfico típico de resultados obtenidos en los ensayos de contacto plano-plano con pasadas múltiples, en el que se representan las fuerzas de fricción observadas frente al recorrido entre mordazas.

La fuerza de fricción crece rápidamente hasta un valor que se mantiene sensiblemente constante, con ligeras variaciones, a lo largo del recorrido entre mordazas. Esta evolución de las fuerzas de fricción es típica de los ensayos en contacto plano-plano efectuados bajo condiciones estables de carga y velocidad. Únicamente en el caso de que se produzcan fenómenos locales de adherencia o microgripado por ausencia de lubricante se observan oscilaciones bruscas o fenómenos de stick-slip.

En la Figura 41, se incluyen los resultados obtenidos tras sucesivas pasadas, mostrando el efecto normalmente desfavorable provocado por las pasadas múltiples. Conforme se incrementa el número de pasos, los valores del coeficiente de fricción crecen gradualmente.

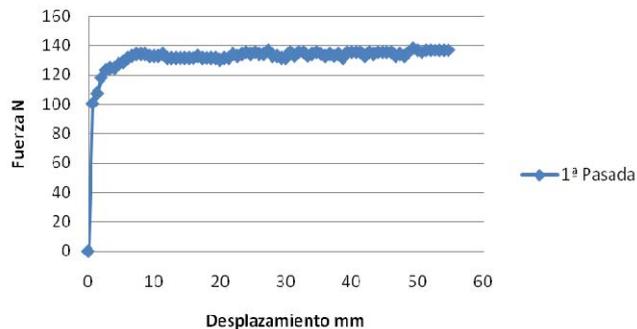


Figura 40. Evolución típica de las fuerzas de fricción con el recorrido entre mordazas. Ensayos en condiciones de suministro con $P=4$ MPa y velocidad de 40mm/min en la primera pasada.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

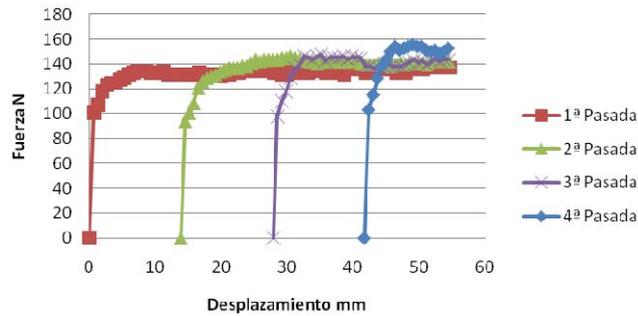


Figura 41. Evolución típica de las fuerzas de fricción con el recorrido entre mordazas, conforme se incrementa el número de pasadas. Ensayos en condiciones de suministro con $P=4$ MPa y velocidad de 40mm/min.

Tal como se ha descrito en el apartado anterior, a partir de los gráficos anteriores se obtienen los valores del coeficiente de fricción. Todas las tablas de resultados obtenidos, se adjuntan en Anexos, presentándose en la siguiente tabla, un resumen de los resultados obtenidos. En las Tablas se han determinado los valores del coeficiente de fricción a los 50mm de recorrido total, tal como se registran en los ensayos multifricción RNUR, y los valores del coeficiente de fricción máximo observados en el ensayo. La carga normal aplicada se controla a partir de la presión en el sistema hidráulico del equipo, pero los valores reales de carga aplicada se miden con precisión mediante la célula de carga. En las tablas de resultados se incluyen las lecturas de las cédulas de carga, las fuerzas normales aplicadas y las presiones aparentes. La Tabla siguiente muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos en unas condiciones dadas.

Resultados y Análisis

Tabla 7: Ejemplo de resultados obtenidos de ensayos multifricción (Tablas completas disponibles en Anexos). Los datos presentados corresponden a ensayos en condiciones de suministro, a velocidad 40 mm/min.

MUESTRA	PASADA	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	μ máx (N)	μ 50 (N)	Pchapa (MPa)
M/P1/V1/SL	1P	0,240	132,3	126,5	0,138	0,132	4,802
	2P	0,235	146,3	142,3	0,156	0,151	4,704
	3P	0,235	147,6	143,6	0,160	0,156	4,606
	4P	0,230	157,0	153,0	0,170	0,166	4,606
M/P7/V1/SL	1P	2,560	2001,0	1799,0	0,201	0,181	49,686
	2P	2,550	2601,0	2378,0	0,262	0,239	49,686
	3P	2,545	3380,0	3075,0	0,340	0,309	49,686
	4P	2,545	3898,0	3378,0	0,392	0,340	49,686

Los valores del coeficiente de fricción observado en los ensayos se encuentran en el rango de 0.13 a 0.45. Estos valores son típicos de condiciones de lubricación límite, y en ningún caso se han observado valores entre 0.01 y 0.10, tal como los observados por otros autores en el régimen de lubricación mixta.

Con el fin de valorar las condiciones de lubricación existentes en los experimentos realizados, se han determinado los valores del parámetro H, y se han representado los valores del coeficiente de fricción máximo observado en un gráfico típico de Stribeck, tal como se muestra en la Figura 42.

El gráfico pone de manifiesto dos hechos relevantes, el primero es que en las condiciones utilizadas en estos ensayos, los valores del parámetro H se mueven en el rango de entre $3.63 \cdot 10^{-13}$ y los $1.28 \cdot 10^{-11}$, valores inferiores a los valores de transición entre regímenes de lubricación mixta y límite, del orden de $H = 10^{-9} - 10^{-10}$ m, observados por otros autores.

Los rangos de presiones aparentes empleados en los ensayos y los valores de viscosidad característicos de los lubricantes empleados son estrictamente similares a los empleados en los procesos de embutición real. Respecto del comportamiento real, únicamente se da la limitación en los ensayos empleados de que los valores de velocidad de desplazamiento no alcanzan los valores reales de desplazamiento que pueden observarse bajo el prensachapas, que pueden alcanzar

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

valores del orden de 100 mm/s, mientras que en los ensayos los valores máximos se encuentran en el orden de 4 mm/s. Esta diferencia de dos órdenes de magnitud indica que, en la embutición real, pueden alcanzarse valores del orden $H = 10^{-9}$, pero no inferiores, por lo que, en la práctica debe considerarse que los procesos de embutición real se desarrollan en condiciones de lubricación límite.

En el trabajo experimental de Emmens fue posible conseguir condiciones experimentales propias del régimen de lubricación límite gracias al uso de lubricantes mucho más viscosos que los realmente empleados en el sector, con valores de viscosidad tal altos como 2880 mPa.s. Solamente se empleó un aceite comercial de embutición, el Quaker Ferrocote 6130, con valores de viscosidad de 55 mPa.s a 20°C. Adicionalmente, la técnica de aplicación del aceite sobre las chapas se hizo con una sobredosis de lubricante, asegurando unos contenidos en aceite sobre la chapa muy superiores a los valores normales en el sector, que son del orden de 2 g/m².

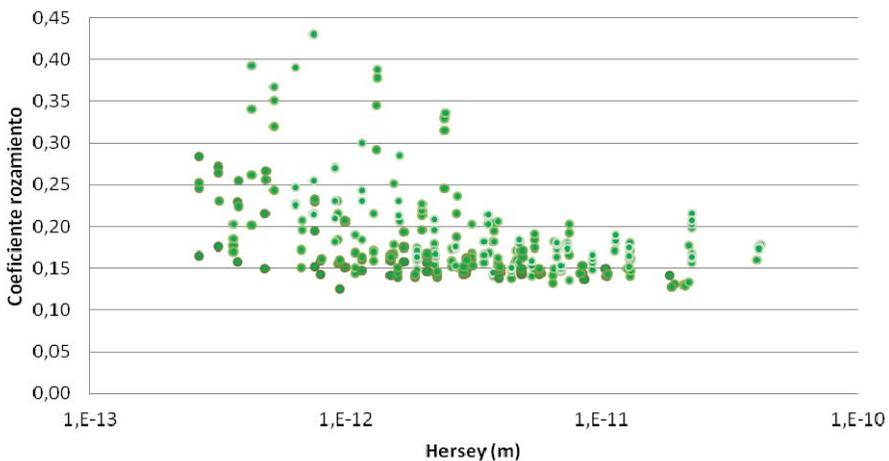


Figura 42. Curva de Stribeck con los resultados de ensayos multifricción..

El segundo hecho destacable, que se aprecia en la Figura 42, es la gran variación en los valores del coeficiente de fricción que se observan en el régimen de lubricación límite característico de las operaciones reales de embutición. Los valores mínimos observados se mantienen en 0.13, pero los valores máximos y la dispersión crecen conforme se

Resultados y Análisis

reduce el valor del parámetro H. Las diferencias en los valores del COF son muy relevantes, confirmando que, en contra de las propuestas de otros autores, en ningún caso resulta aconsejable, de modo general, considerar que los valores del COF en la zona de lubricación límite son constantes o invariables. De facto, los resultados globales confirman la conveniencia de este estudio. La influencia de los diferentes parámetros operacionales se aborda en los apartados siguientes.

3.1.1. Efectos de la presión

En la Figura 43 a Figura 45, se presentan gráficamente los valores máximos del coeficiente de fricción observados frente a la presión aparente aplicada.

En condiciones de lubricación de suministro, es decir, realizando los ensayos con la chapa tal como se recibe, se observa una gran dispersión en los valores del COF con la variación de la presión, especialmente si los ensayos se llevan a cabo con velocidades bajas, tal como se muestra en la Figura 43. Si se incrementa la velocidad, la dispersión de resultados desaparece, observándose que los valores del COF permanecen sensiblemente constantes.

En condiciones de lubricación más uniformes, como las conseguidas al aplicar el mismo lubricante L2, Figura 44, se observa que los incrementos de presión dan lugar a un incremento de los valores de fricción en combinación con bajos valores de velocidad, siendo especialmente relevante el incremento observado en la segunda pasada. Las diferencias entre las condiciones de suministro y las condiciones obtenidas en el laboratorio se atribuyen a la falta de uniformidad en el espesor de la capa de lubricante disponible en las chapas en condiciones de suministro. De hecho, en tales chapas se observaban zonas con diferente tono, indicativas de diferencias en la cantidad de lubricante disponible.

La Figura 45, muestra los efectos de la presión cuando se emplea el lubricante L3, De nuevo se observa que los valores del COF crecen con la presión aparente aplicada, y que el efecto es apreciable en las pasadas sucesivas con bajas velocidades de deslizamiento. Con

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

velocidades altas, el COF se hace prácticamente insensible a las variaciones de la presión.

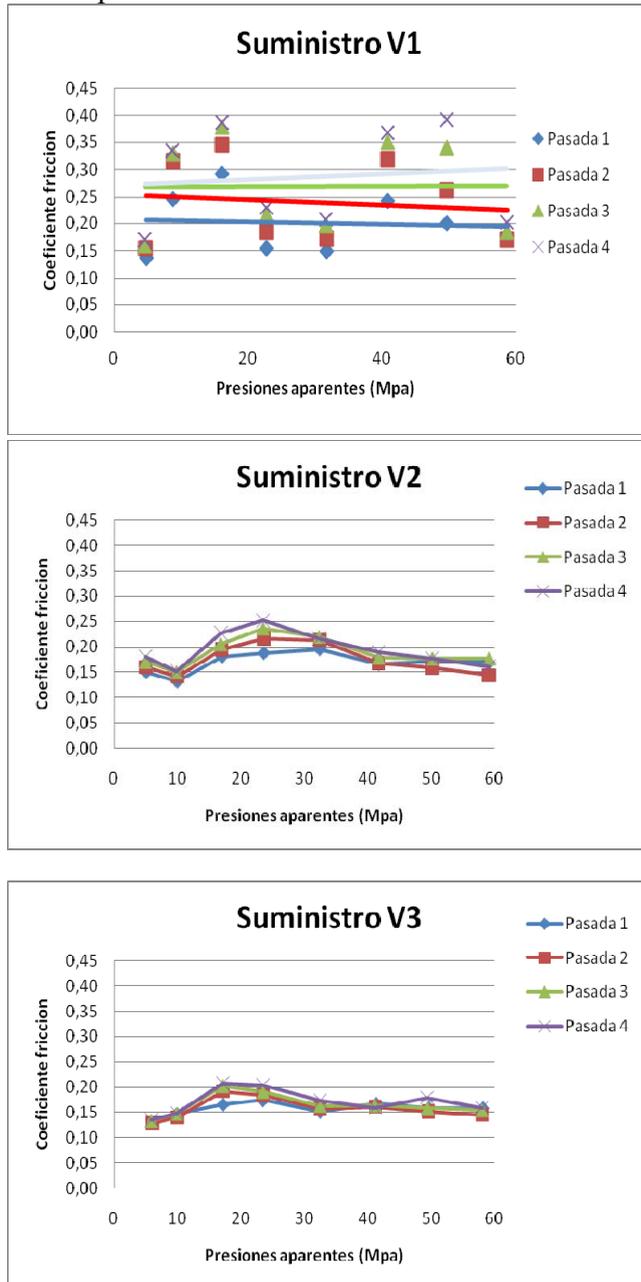


Figura 43. Efectos de la presión aparente Pa. Ensayos en condiciones de suministro SL.

Resultados y Análisis

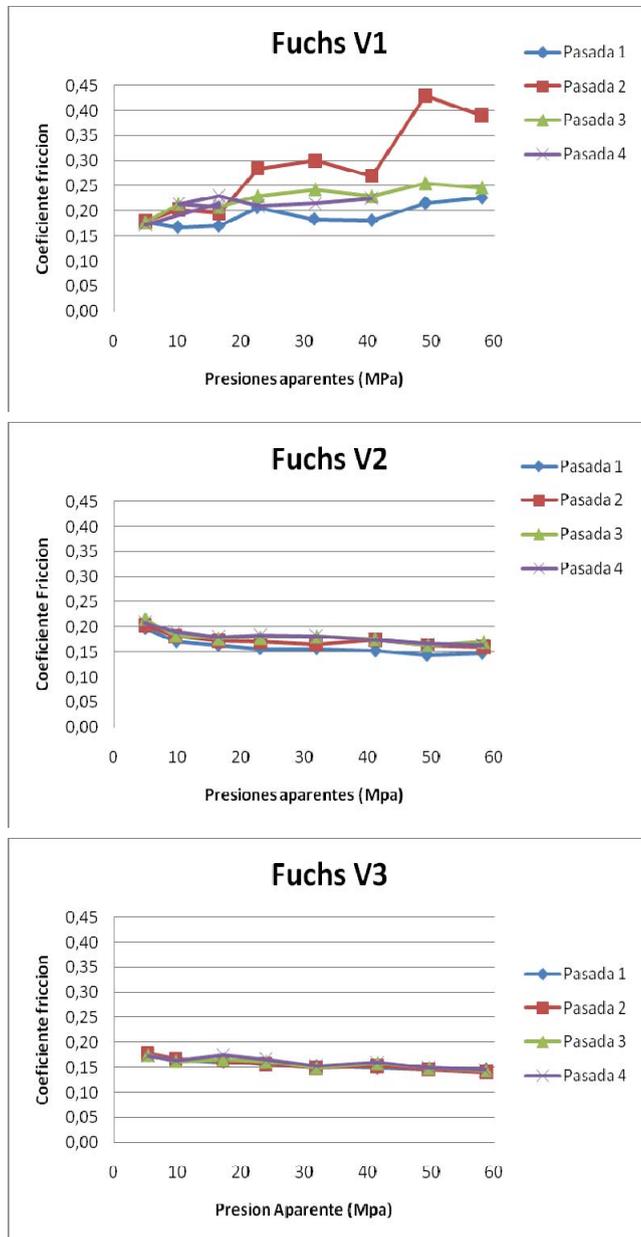


Figura 44. Influencia de la presión utilizando lubricante L2

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

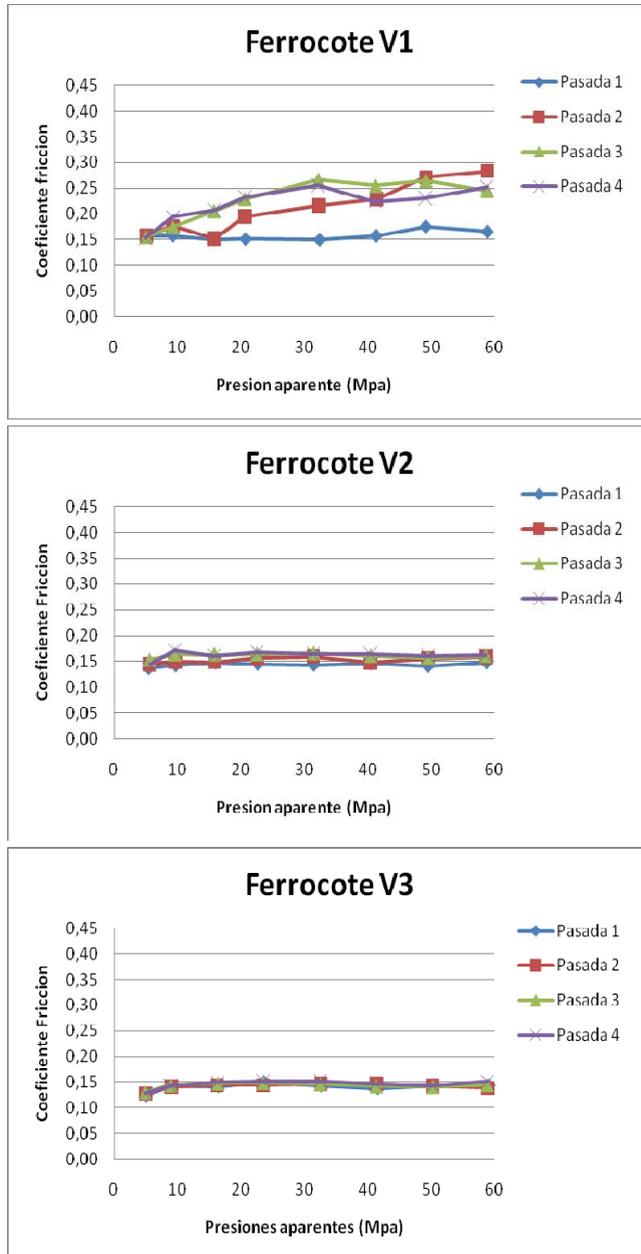


Figura 45. Efectos de la presión aparente Pa con lubricante L3

Valorados globalmente, para todos los ensayos realizados, resulta evidente que los resultados son prácticamente independientes de los

Resultados y Análisis

valores de presión normal aplicada, excepto en condiciones de baja velocidad. La figura siguiente presenta todos los datos. Los ajustes lineales dan ecuaciones del tipo $COF = A+B*P$

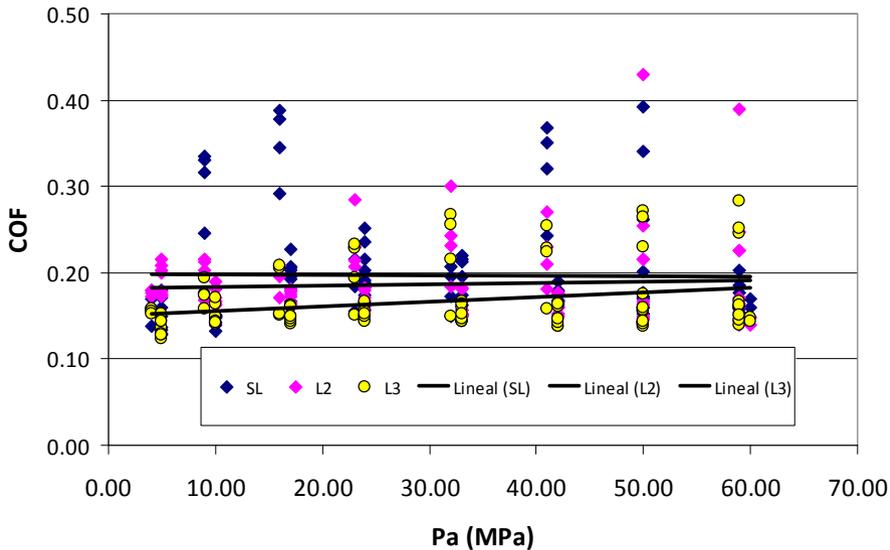


Figura 46.Efectos de la presión en estado suministro SL y con lubricantes L2 y L3.

Los coeficientes A observados son 0.20 para el lubricante SL, 0.182 para el lubricante L2 y 0.13 para el lubricante L3. Los valores de B son despreciables en comparación con los valores anteriores. Se obtienen valores de $B = 5 * 10^{-5}$, $2 * 10^{-4}$ y $5 * 10^{-4}$, respectivamente, confirmando los efectos despreciables de la presión en el comportamiento global observado.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

3.1.2. Influencia de la Velocidad

En las Figura 47 a Figura 50, se presentan gráficamente los valores del COF máximo observado frente a la velocidad relativa, para todas las presiones. Se agrupan los resultados obtenidos con las tres condiciones de lubricación, para diferentes números de pasadas. Los gráficos presentan, en todos los casos, un claro efecto favorable de la velocidad, reduciendo los valores de COF conforme se incrementa la velocidad empleada, con un efecto asintótico.

Los efectos favorables de la velocidad son especialmente sensibles a la cantidad de aceite disponible. En la primera pasada, las condiciones de suministro SL no garantizan una cantidad suficiente de lubricante, mostrando un efecto notable de reducción del COF conforme se incrementa la velocidad. Los resultados observados en estas condiciones son muy similares a los observados con el mismo lubricante L2 cuando se ensaya tras pasadas sucesivas, en las cuales el escurrido previo ha provocado una notable disminución de la cantidad de aceite disponible.

Un efecto similar resulta apreciable en los ensayos realizados con el lubricante L3.

Resultados y Análisis

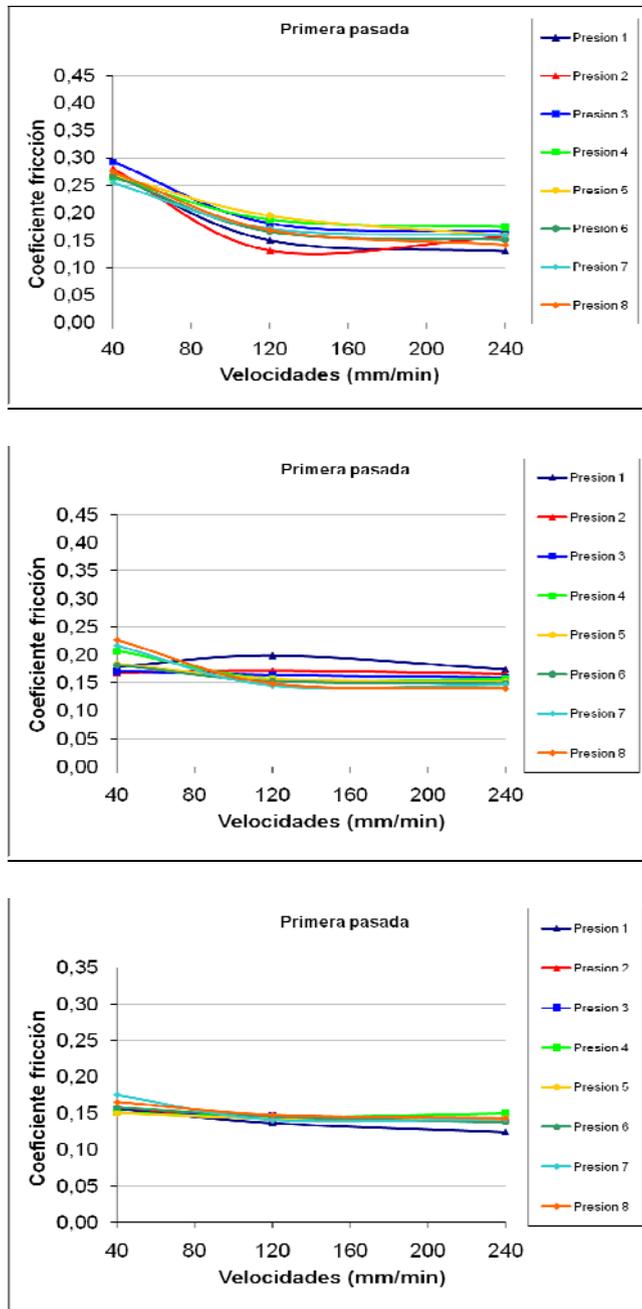


Figura 47. Relación entre coeficiente de fricción y la velocidad en la primera pasada sin lubricante SL, y con L2 y L3.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

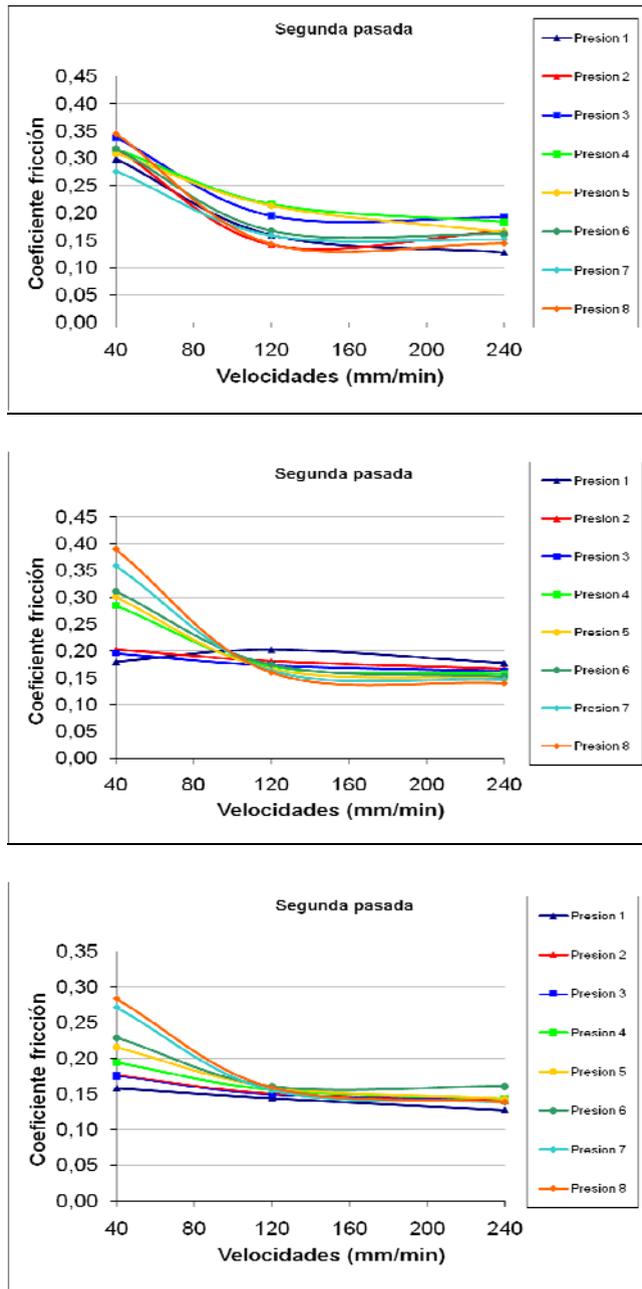


Figura 48. Relación entre coeficiente de fricción y la velocidad en la segunda pasada sin lubricante y con L2 y L3.

Resultados y Análisis

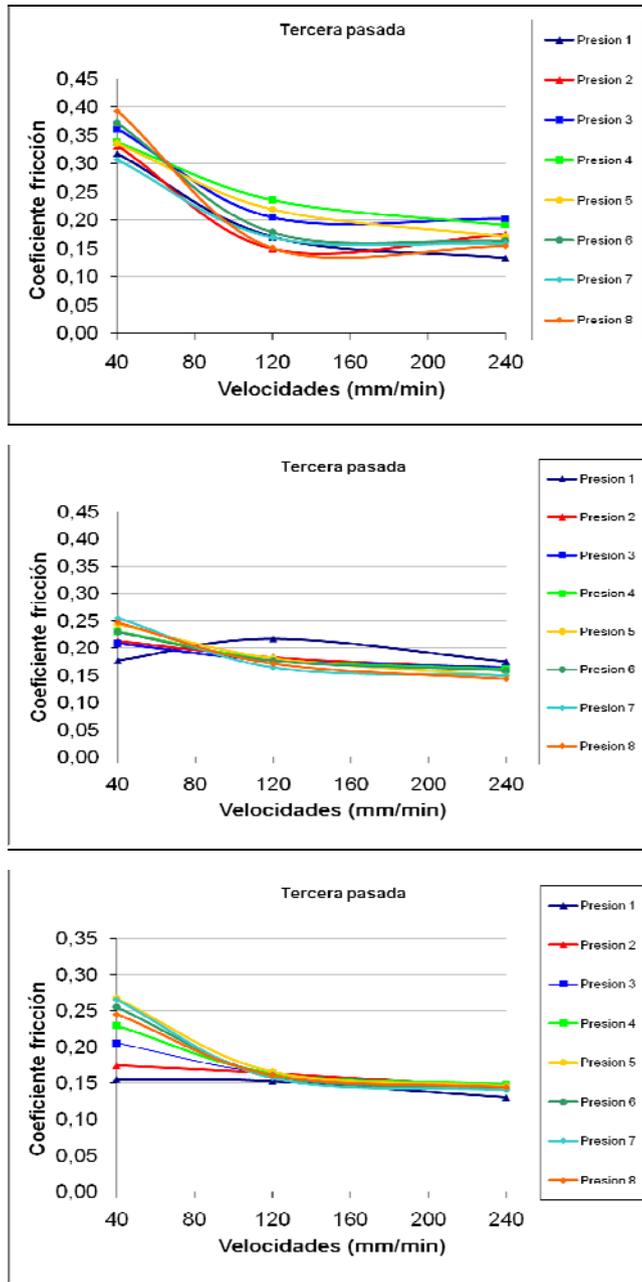


Figura 49. Relacion entre coeficiente de fricción y la velocidad en la tercera pasada, sin lubricante SL y con L2 y L3.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

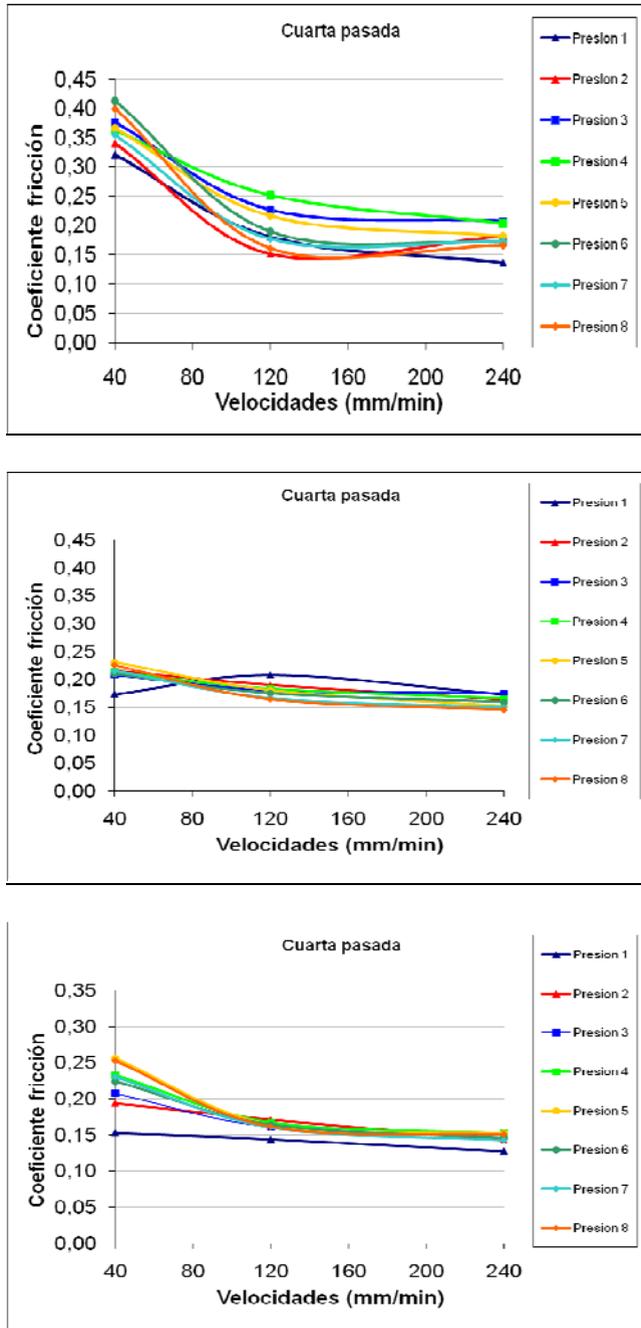


Figura 50. Relación entre coeficiente de fricción y la velocidad en la cuarta pasada sin lubricante y con L2 y L3.

Resultados y Análisis

La gráfica presentada en la Figura 51 refleja cómo se reduce el COF conforme se incrementa la velocidad en el ensayo, para los diferentes lubricantes empleados. Los valores indicados son valores medios para todas las presiones y pasadas. También se representan los valores máximos observados para cada lubricante y velocidad de ensayo, mostrando la mayor dispersión asociada a los resultados obtenidos con velocidades bajas. Las curvas ajustadas a los valores medios son de tipo potencial: $COF = C \cdot V^m$; Para el lubricante L2 se obtiene un valor de $C = 0.207$ y un exponente $m = -0.2$; Para el lubricante L3 se obtiene $C = 0.184$ y un valor similar de $m = 0.2$. Los resultados muestran que los valores de COF para L3 son en promedio inferiores a los obtenidos con L2 (y también en condiciones SL), pero con efectos similares asociados a los incrementos de velocidad.

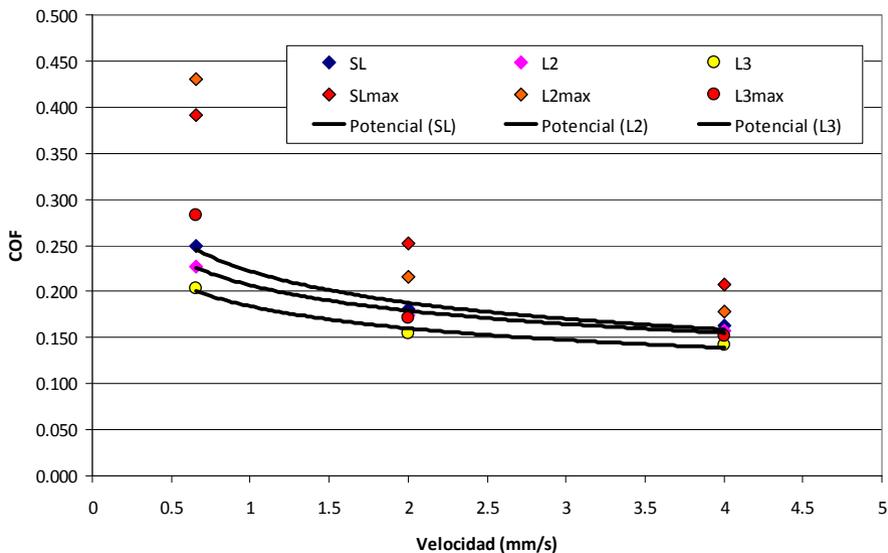


Figura 51. Relación entre coeficiente de fricción y la velocidad.

La dispersión de resultados observada cuando se representan los valores de COF frente a la velocidad sigue una pauta similar a los valores observados frente al parámetro H. Los efectos beneficiosos de los incrementos de velocidad parecen sugerir efectivamente que puedan existir contribuciones favorables al comportamiento de tipo micro-hidrodinámico. Sin embargo, los efectos de las otras variables contradicen esta hipótesis. Los efectos micro-hidrodinámicos deberían

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

verse favorecidos también por una reducción de la carga o presión aparente aplicada P , y por un incremento en los valores de viscosidad. En estas experiencias se observa, sin embargo, que no existe un efecto favorable claro asociado a bajos valores de la presión aplicada, excepto en experiencias con baja velocidad. Los efectos de la viscosidad, por otra parte, no parecen tener ninguna relevancia, dado que se obtienen sistemáticamente menores valores de COF, y con menor dispersión, en los ensayos realizados con el lubricante L3, que presenta una viscosidad aproximadamente un 50% menor que el lubricante L2 o SL.

3.1.3. Efectos de las pasadas sucesivas

En las Figura 52 a Figura 54 se presentan gráficamente los valores del COF observado en los ensayos, para los diferentes lubricantes.

Resultados y Análisis

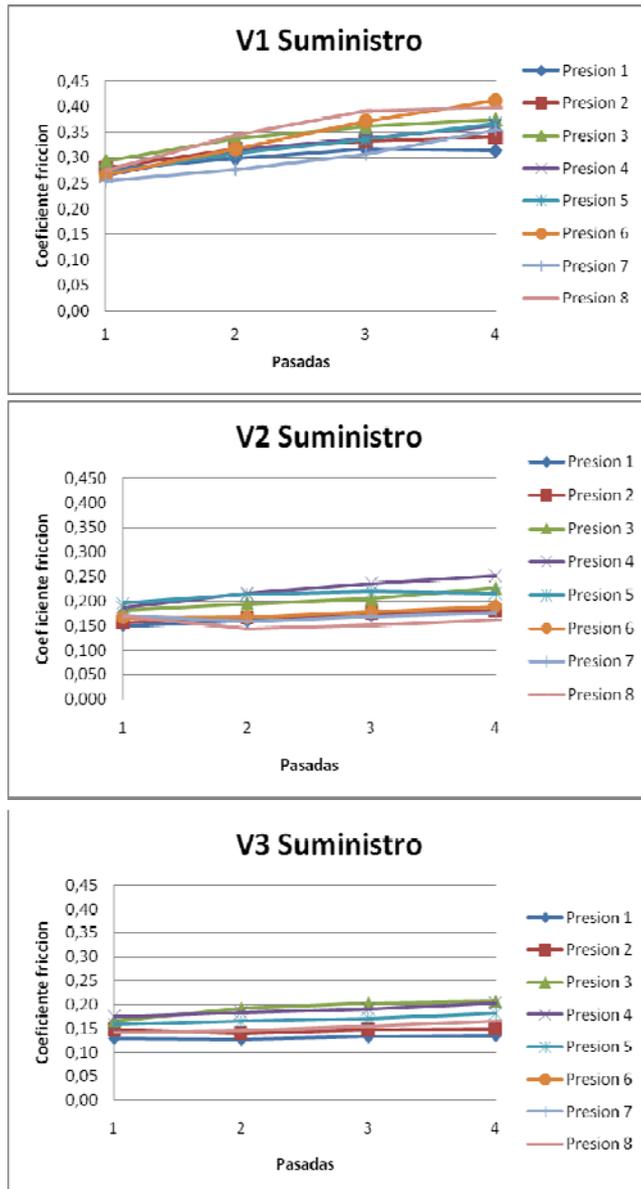


Figura 52. Efectos del número de pasadas sobre el coeficiente de fricción, para el lubricante SL.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

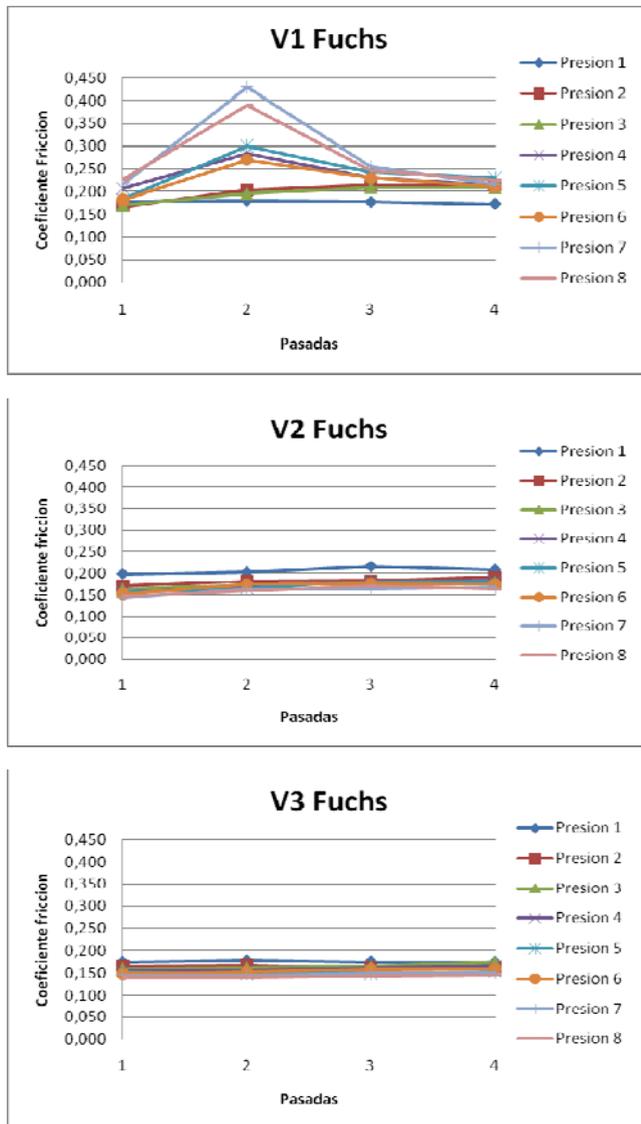


Figura 53. Efectos del número de pasadas sobre el coeficiente de fricción, para el lubricante L2.

Resultados y Análisis

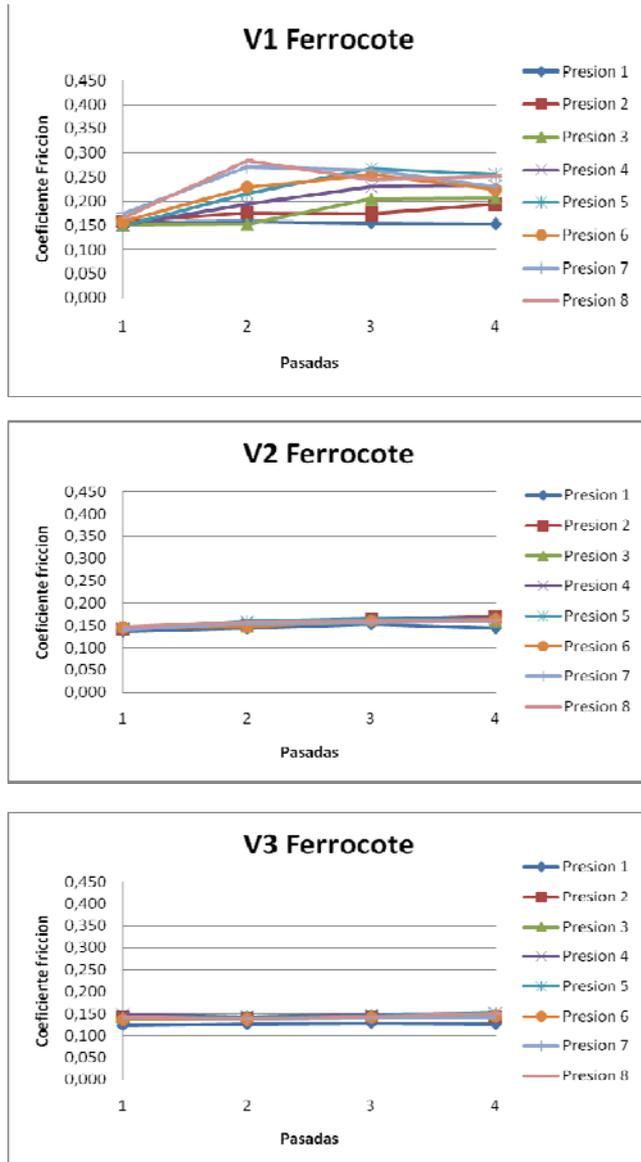


Figura 54. Efectos del número de pasadas sobre el coeficiente de fricción, para el lubricante L3.

Como cabía esperar, se observa de modo general un incremento en los valores del COF cuando se incrementa el número de pasadas. No obstante, el efecto es también dependiente de otras variables, especialmente la velocidad y el tipo de lubricante empleado.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Los efectos negativos de las pasadas sucesivas se aprecian especialmente cuando se llevan a cabo ensayos con baja velocidad. Para velocidades de desplazamiento elevadas, los resultados son prácticamente independientes del número de pasadas tanto para el lubricante L2 como para el lubricante L3. Los ensayos en condiciones de suministro tampoco presentan un claro crecimiento de los valores de COF si la velocidad es elevada, aunque, como ocurre en todas las experiencias, la dispersión observada en los valores del COF para diferentes presiones es mayor con el lubricante SL que con los lubricantes L2 aplicados en laboratorio.

No existe una razón clara por la cual se justifique el efecto observado en el lubricante L2 en la segunda pasada, que en algunas condiciones proporciona valores del COF superiores a los observados en pasadas sucesivas. Teóricamente, este lubricante debería comportarse cuando se aplican pasadas sucesivas tal como se comporta el material en condiciones de suministro. El efecto es también observable en ensayos con el lubricante L3, aunque en este caso el incremento de los valores de COF es menos significativo. Obviando este resultado, se confirma que los resultados con L2 a medias y altas velocidades presentan valores de COF comparables a los obtenidos con el material en condiciones de suministro, pero con menor dispersión. Los resultados más estables se obtienen con el lubricante L3, especialmente a altas velocidades. Con este lubricante, los valores de COF permanecen en valores bajos y estables, en torno a valores de $\text{COF} = 0.13$, independientemente del número de pasadas aplicado. Con velocidades bajas, en cambio, también con este lubricante L3 se observa un incremento ligero de los valores de COF conforme se incrementa el número de pasadas.

3.1.4. Efectos del lubricante

Los efectos de los diferentes lubricantes empleados se han comentado brevemente en los análisis anteriores y en particular, pueden apreciarse sus efectos en la Figura 50 en la que se analizan los efectos de la velocidad. Globalmente, las diferencias observadas entre la condición de suministro y el lubricante L2 radican exclusivamente en la uniformidad y disponibilidad de lubricante sobre la superficie.

Resultados y Análisis

Parece claro que los resultados globales resultan peores para la condición de suministro SL, ya que los valores promedio del COF son más elevados y también es mayor la dispersión observada. Esta observación confirma que el comportamiento tribológico en la embutición, y también en ensayos realizados en condiciones BL, depende notablemente de la cantidad de lubricante disponible.

La tabla siguiente presenta un resumen de los valores de COF observados y de su dispersión, para los diferentes lubricantes ensayados. Resulta evidente que, en las condiciones empleadas, los valores de COF se mantienen más bajos y con menor dispersión para el lubricante L3 que para el lubricante L2. Este efecto, como ya se ha comentado, no puede atribuirse a sus valores de viscosidad o a efectos de lubricación micro-hidrodinámica, ya que la viscosidad de L2 es superior a la viscosidad de L3, por lo que podría ser atribuible a las propiedades tixotrópicas, una mayor adherencia vertical del lubricante L3 tras largos periodos de almacenaje.

Tabla 8: Resumen de los valores del COF y su dispersión para los diferentes lubricantes ensayados.

LUBRICANTE	SL		L2		L3	
	COF max		COFmax		COF max	
Velocidad (mm/s)	media	desv std	media	desv std	media	desv std
0.66	0.25	0.08	0.23	0.06	0.20	0.04
2	0.18	0.03	0.17	0.02	0.15	0.01
4	0.16	0.02	0.16	0.01	0.14	0.01

3.2. Determinación de valores de la sección real de contacto.

En los métodos de fabricación donde se presentan procesos de fricción entre dos superficies (como es el caso de la embutición de chapas), las secuencias de picos y valles de cada una de las superficies deben adaptarse entre sí y formar un área de contacto real que siempre será menor que el área aparente de contacto. El método utilizado para analizar las micrografías de las probetas ensayadas se ha descrito en el capítulo anterior. En anexos se recogen todas las micrografías obtenidas y los valores estimados del área de contacto real.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

El objetivo de este apartado es analizar la evolución de la superficie real de contacto entre las dos superficies en contacto a medida que varían las condiciones en el ensayo de multifricción (presión de contacto, velocidad de deslizamiento, lubricación, etc.). La figura siguiente muestra algunos resultados significativos, que ilustran los efectos de las variables.

			
Presión = 5 MPa Pasada 1 – 11.40%	Pasada 2 – 18.44%	Pasada 3 – 21.04%	Pasada 4 – 26.87%
			
Presión = 32 MPa Pasada 1 – 25.46%	Pasada 2 – 38.43%	Pasada 3 – 39.56%	Pasada 4 – 42.06%
			
Presión = 50 MPa Pasada 1 – 35.09%	Pasada 2 – 41.11%	Pasada 3 – 49.51%	Pasada 4 – 60.83%

Figura 55. Micrografías obtenidas a velocidades de 120mm/min con lubricante L3, y valores estimados de la fracción de área en contacto.

Resultados y Análisis

De la Figura 56 a Figura 61 muestran la evolución de valores de S_c . Por simplicidad, se muestran exclusivamente para cada lubricante o condición de lubricación (SL, L2 y L3) los resultados obtenidos a bajas y altas velocidades. Los resultados con velocidades intermedias son similares.

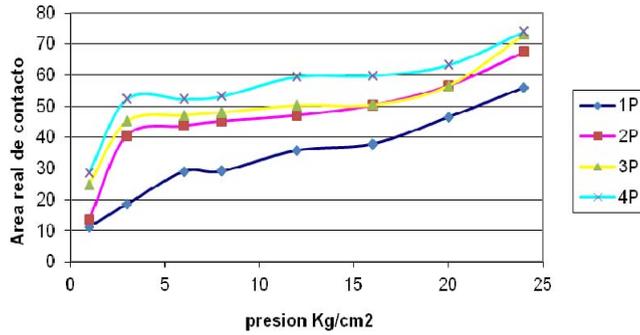


Figura 56. Evolución del área real de contacto en condiciones de lubricación SL en función de las pasadas y a velocidad de 40mm/min.

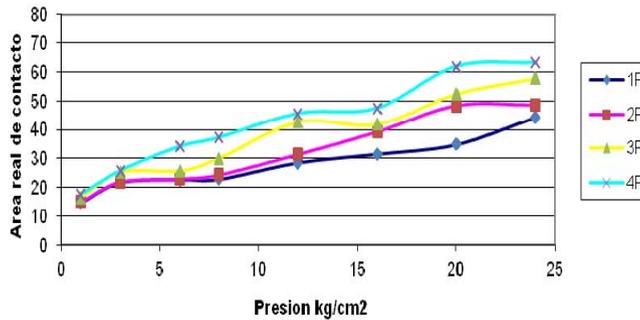


Figura 57. Evolución del área real de contacto en condiciones de lubricación SL en función de las pasadas y $v=240$ mm/min.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

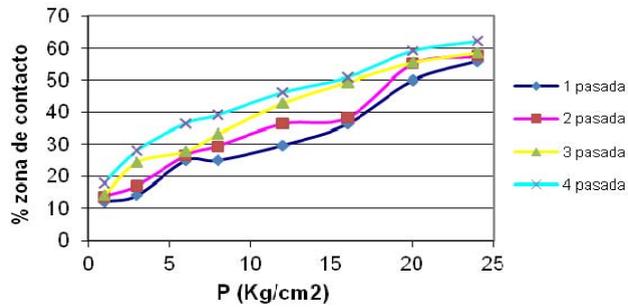


Figura 58. Evolución del área real de contacto con lubricante L2 para velocidades de 40mm/min.

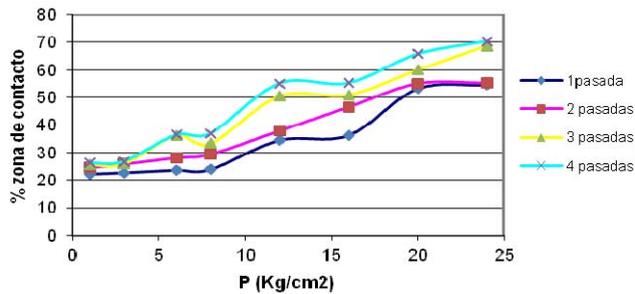


Figura 59. Evolución del área real de contacto con lubricante L2 para velocidades de 240mm/min.

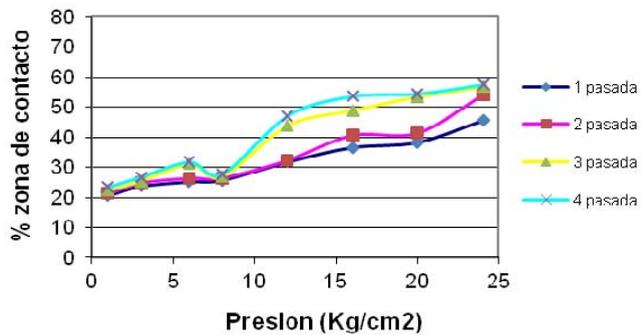


Figura 60. Evolucion del area real de contacto con lubricante L3 a velocidad de 40mm/min.

Resultados y Análisis

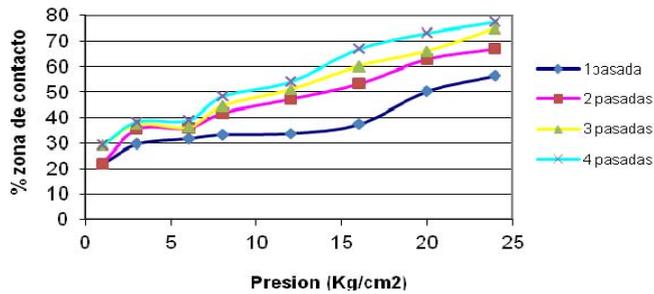


Figura 61. Evolución del área real de contacto con lubricante Ferrocote a V3 (240mm/min).

Para cualquiera de las condiciones de lubricación empleadas en los ensayos de pasadas múltiples (SL, L2 o L3), se observa un crecimiento cuasi-lineal de la superficie real de contacto conforme se incrementa la presión aparente aplicada, aunque en algunos casos es apreciable un efecto de amortiguamiento en el crecimiento de los valores de la superficie real conforme se incrementa la presión. El valor de la fracción de área en contacto observada es del orden de 10-30% para presiones bajas $P_a = 5$ MPa, y crece hasta valores del orden de 60-75% con presiones de valor aparente $P_a = 60$ MPa. También se observa un efecto de aplastamiento acumulativo asociado a las pasadas sucesivas, especialmente en los ensayos realizados con baja velocidad (40 mm/min). No obstante, el crecimiento del área de contacto se observa para cualquiera de las velocidades ensayadas.

En las Figura 62 a Figura 64, se muestra gráficamente la correlación experimental observada entre los valores del coeficiente de fricción y los valores de la superficie real de contacto.

Los resultados demuestran que, para una presión dada, el valor del COF crece con el valor del área real de contacto, pero la influencia relativa de este crecimiento se hace menor conforme se incrementa la velocidad relativa, de modo que para velocidades altas de 240mm/min, se observa que el valor del COF resulta prácticamente independiente de la fracción de área en contacto y por lo tanto, también resulta independiente de la presión P_a aplicada y del número de pasadas.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

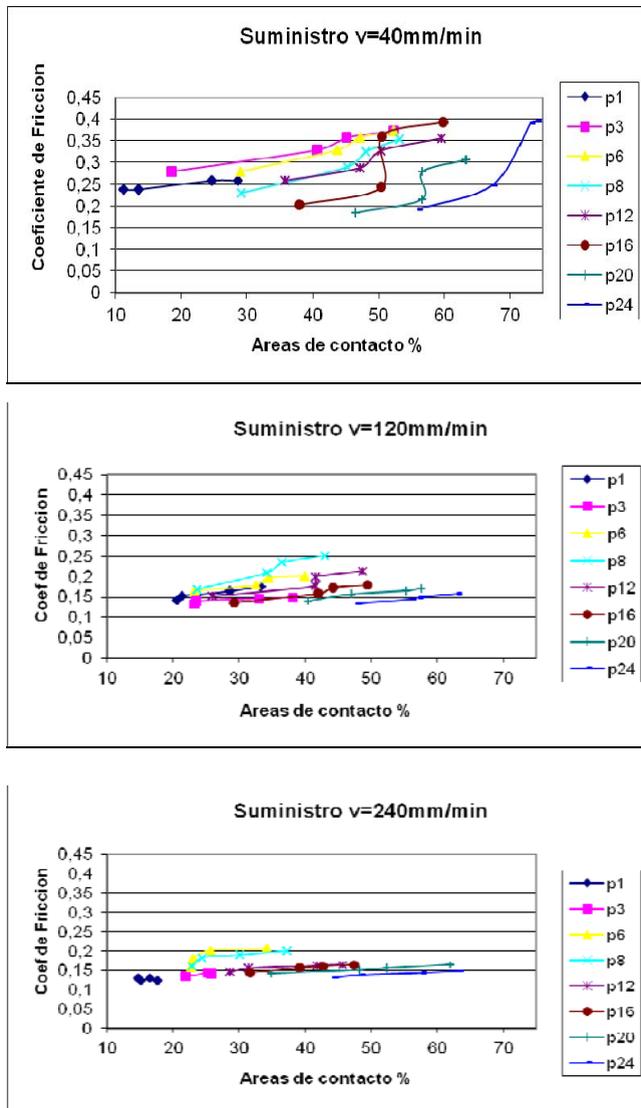


Figura 62. Valores observados de COF máximo frente a los valores de la sección real de contacto, para ensayos con lubricante SL.

Resultados y Análisis

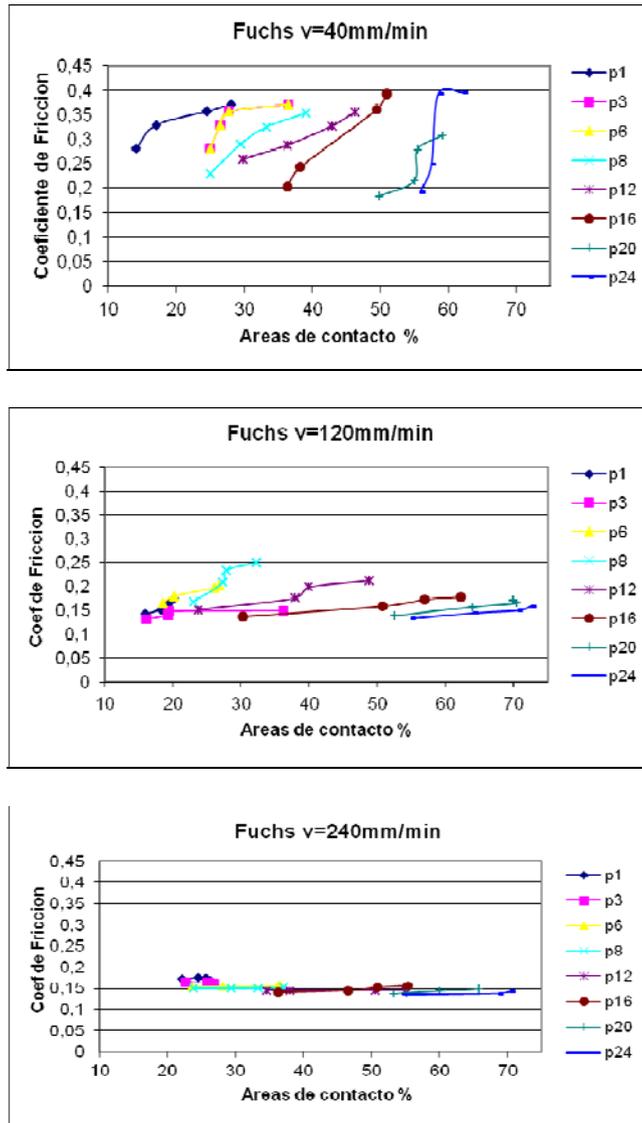


Figura 63. Valores observados de COF máximo frente a los valores de la sección real de contacto, para ensayos con lubricante L2.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

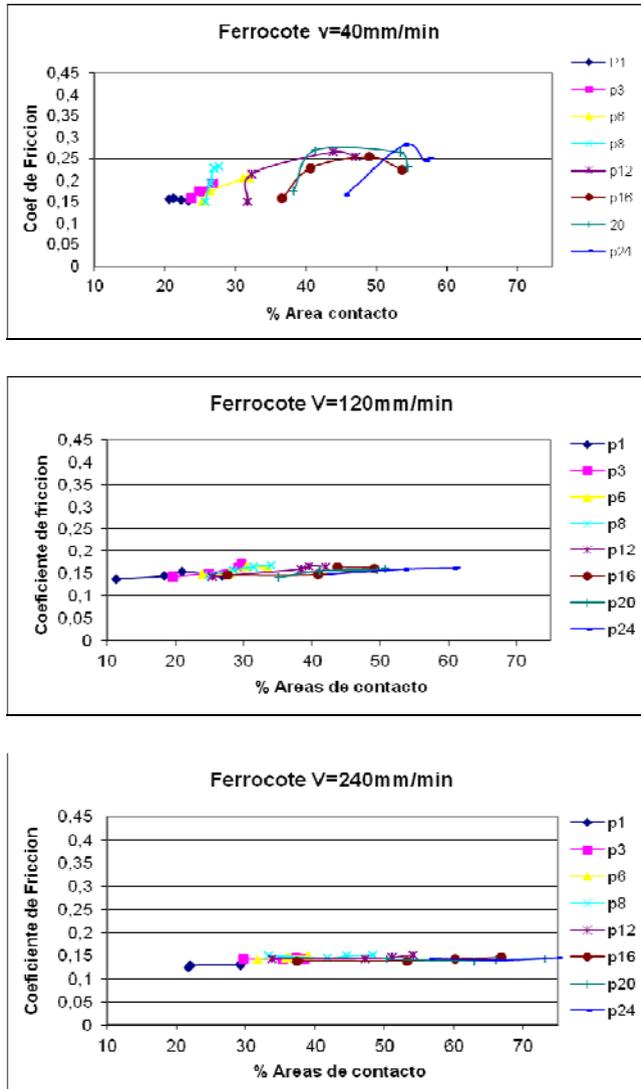


Figura 64. Valores observados de COF máximo frente a los valores de la sección real de contacto, para ensayos con lubricante L3.

3.3. Modificaciones de la topografía superficial

En el Anexo 3 se muestran con detalle los resultados de las medidas de parámetros de topografía superficial o textura, y su evolución conforme se incrementa la presión aplicada o el número de pasadas. En las mediciones se han determinado valores de diferentes parámetros de interés¹⁰²: Ra (μm), Rq (μm), Rz (μm), Rmax (μm), Rp (μm), Rpk (μm), Rk (μm), Rvk (μm), Mr1 %, Mr2%, Pc(2,5,-2,5), Sm (mm), S (mm).

Los valores iniciales de varios de estos parámetros en las chapas empleadas, medidos en la cara garantizada, son los siguientes:

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1%	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1.107	1,429	5,17	6,63	2,73	0,77	4,53	2,2	91	7,5	171	77

El parámetro más representativo es sin duda la rugosidad media *Ra* que se define como la media aritmética de las alturas de las crestas que conforman la topografía superficial¹⁰³. Emmens sugiere que el parámetro más adecuado para evaluar los efectos de la topografía es el parámetro Rpm o Rp (altura media de picos).

Las figuras siguientes ilustran la evolución de estos parámetros en función de las presiones aplicadas y el número de pasadas efectuadas.

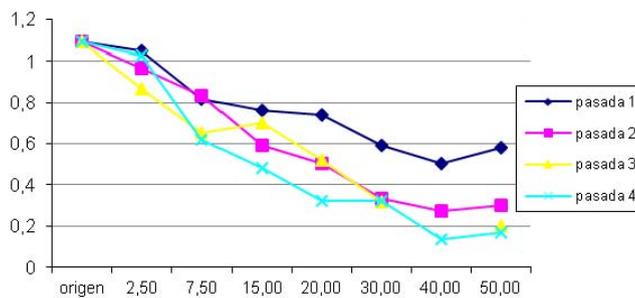


Figura 65. Evolución de la rugosidad media R_a con la presión.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

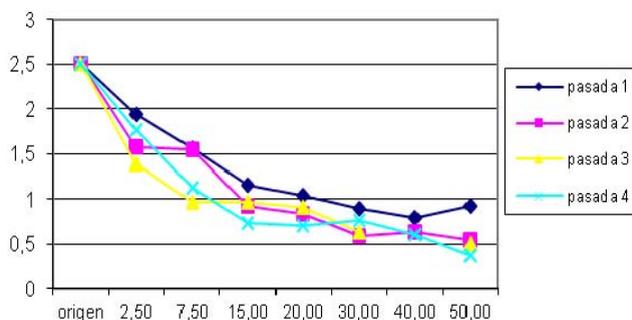


Figura 66. Evolución de la altura de picos Rp con la presión.

Los recubrimientos sufren una fuerte modificación de la topografía durante los ensayos. El deslizamiento bajo altas presiones normales aplasta los picos originales. Todos los parámetros relacionados con la altura del perfil: Ra, Rp, Rq, Rt o Rmax se reducen conforme aumenta el número de pasadas en el ensayo de fricción o se incrementa la presión. La Figura 65 muestra la evolución típica de Ra. Los picos originales se aplastan, incrementando su anchura a costa de una desaparición gradual de los valles próximos, lo que da como resultado la aparición de nuevos y más anchos “elementos del perfil”.

Como ocurre cuando se valora la topografía o textura original, la curva de material portante o curva de Abbot de la topografía superficial contiene información claramente de interés. La evolución de las curvas revela los cambios observados en el área real de contacto Sc. Como se muestra en las Figura 67 y Figura 68, las curvas de material portante se mueven hacia la izquierda conforme se incrementa el número de pasadas en el ensayo de fricción, es decir, conforme aumenta la distancia recorrida bajo presión o conforme se incrementa la presión aplicada. La forma de “S” inicial típica de la curva se ve distorsionada, lo que refleja la aparición de grandes superficies planas en la parte superior del perfil dando lugar a superficies no simétricas respecto a la línea media (negative skewness $R_{sk} < 0$) debido al aplastamiento de los picos.

El material portante es el material existente por encima de una línea definida, así Mr(0) es el material portante existente en la línea sobre el pico más alto, por lo que el material portante por encima de ella es 0, Mr(-1) es el material portante existente por encima de una micra

Resultados y Análisis

por debajo de la anterior, M_r (-2) es el material por encima de dos micras por debajo de la línea superior, etc... Cuanto mayor es la pendiente de la curva de material portante hasta llegar al 100% de material sólido, menor es el volumen de valles o huecos disponibles para retener y suministrar lubricante a las zonas de contacto durante el proceso de deformación superficial que sufre la chapa durante la embutición. En los gráficos se observa claramente que tanto los incrementos de presión como las pasadas sucesivas provocan una reducción de los valores de material portante, y por lo tanto, una reducción progresiva de la capacidad de la superficie para retener o almacenar aceite en los valles.

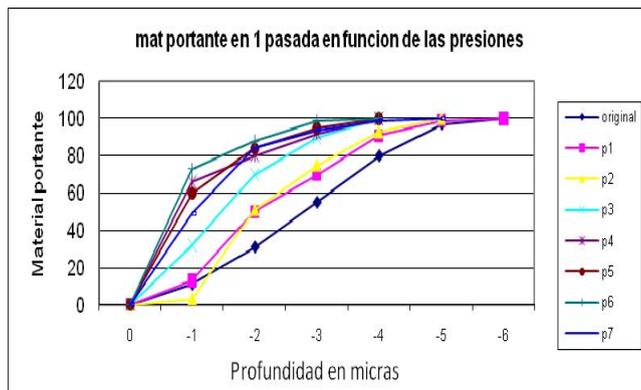


Figura 67. Evolución del material portante en la primera pasada en función de las presiones aplicadas en ensayos multifricción (lubricante L2).

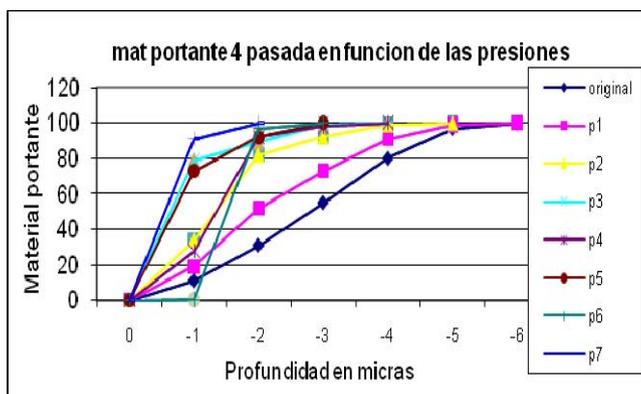


Figura 68. Evolución del material portante en la cuarta pasada.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

3.4. Mecanismos de deformación del recubrimiento. Difracción de Rayos X.

Mediante el análisis de la estructura cristalográfica del recubrimiento se pretende estimar o determinar los posibles mecanismos de deformación plástica observados en la topografía superficial, que provocan cambios en los parámetros de rugosidad y en los valores de la superficie real de contacto S_c . Este estudio se considera de interés ya que existen estudios previos sobre el comportamiento tribológico de chapas recubiertas con cinc puro en los que se determinó que la estructura o textura inicial afecta tanto a la facilidad de deformación como a la evolución de la topografía durante la embutición.

Las chapas recubiertas con cinc puro que presentan una clara textura basal presentan una mayor tendencia al aplastamiento o reducción de los valores de material portante bajo esfuerzos de cizalladura paralelos a la superficie que tienen lugar durante la embutición. El principal sistema de deslizamiento para las estructuras hexagonales hcp es el deslizamiento en direcciones compactas $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ sobre planos basales (0001) o sus equivalentes (0002) detectados por difracción de rayos X. La Figura 69 muestra los diferentes planos característicos de la estructura hcp del cinc.

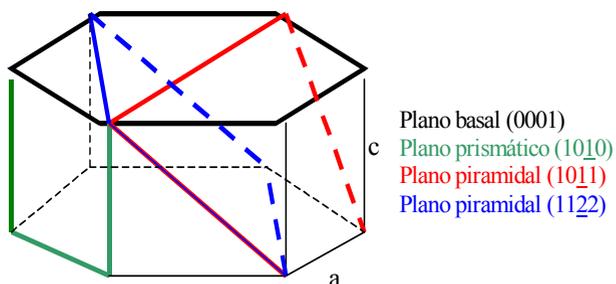


Figura 69. Planos característicos del sistema hexagonal cristalino del Zn puro

En chapas recubiertas con cinc puro se observó en todos los casos que el paso por el ensayo de fricción provoca un notable incremento en la textura basal, confirmando que el mecanismo de deformación

Resultados y Análisis

predominante es el deslizamiento en planos (0002) bajo la acción de los esfuerzos de cizalladura asociados al rozamiento con las herramientas. También se comprobó que la presencia preferente de los sistemas activos de deslizamiento $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ (0002) parece contribuir a facilitar el proceso de deslizamiento paralelo a la superficie bajo la acción de las tensiones de cizalladura que aparecen como consecuencia de fenómenos de adhesión entre cinc y herramienta (mecanismo de adhesión o “junction growth” de Bowden y Tabor, en combinación con los bajos esfuerzos cortantes asociados al deslizamiento en planos basales (deformación “easy glide”).

Simultáneamente con los resultados relativos a las orientaciones cristalinas en el recubrimiento, los espectros proporcionan información respecto a las orientaciones de planos cristalinos en el sustrato de acero. En muestras orientadas al azar, la distribución de intensidades sigue una ley de proporciones característica de las redes b.c. tal como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 9: Intensidades relativas y planos que producen difracción en la red bc del Fea

distancia (hkl) A	I/ I ₁	hkl
2,026	100	110
1,433	20	200
1,170	30	211
1,013	10	220
0,906	12	310
0,627	6	222

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

APLICACIÓN A LAS CHAPAS Zn-Ni:

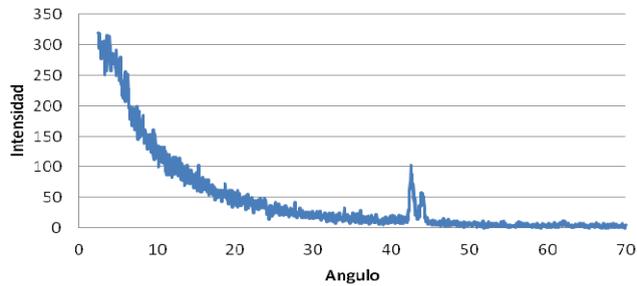


Figura 70. Espectro de difracción RX de la chapa en estado de suministro.

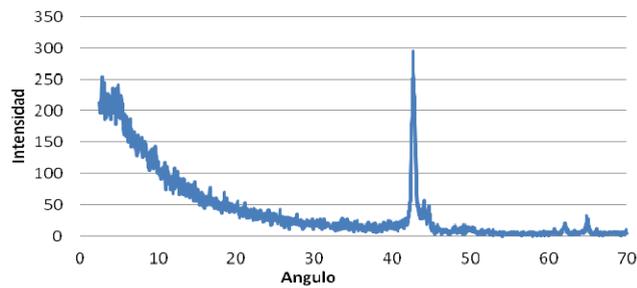


Figura 71. Espectro de difracción RX de la chapa tras la primera pasada en ensayo multifricción.

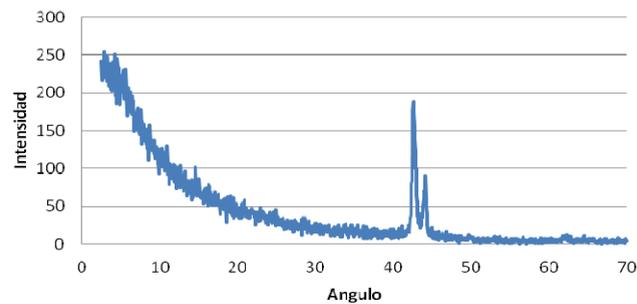


Figura 72. Espectro de difracción RX de la chapa tras la segunda pasada en ensayo multifricción.

Resultados y Análisis

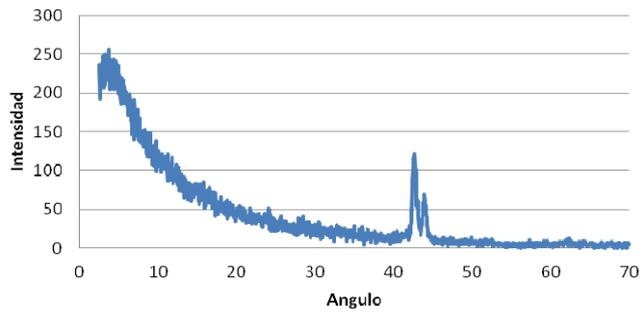


Figura 73. Espectro de difracción RX de la chapa tras la tercera pasada en ensayo multifriccion.

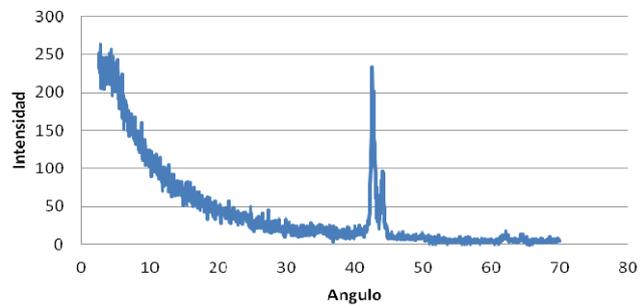


Figura 74. Espectro de difracción RX de la chapa tras la cuarta pasada en ensayo multifriccion.

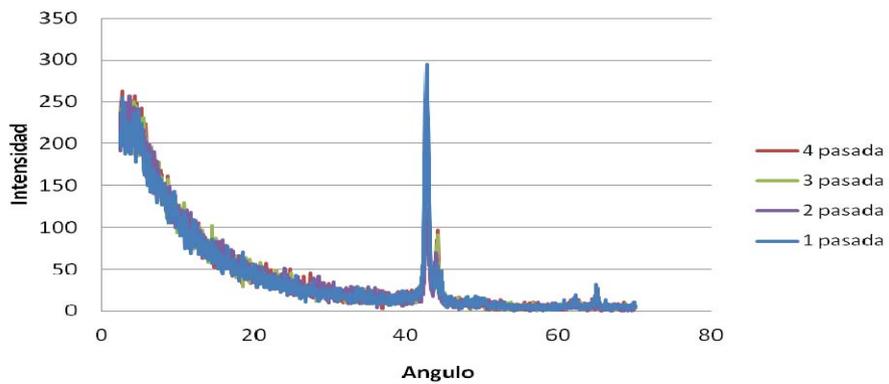


Figura 75. Conjunto de espectros de difracción de RX.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Las figuras anteriores muestran picos de difracción característicos de los recubrimientos Zn-Ni con contenidos de 19.5-15% de Níquel y estructura monofásica γ ¹⁰⁴ que presenta un máximo acentuado en la resistencia a la corrosión.

La chapa empleada en la presente tesis doctoral presenta un contenido del 11% de Ni¹⁰⁵, y la fase γ aparece claramente identificada como fase única del sistema Zn-Ni, obteniéndose picos de difracción para ángulos de difracción 2θ de 42,67°, correspondiente a la fase γ con textura debida a la presencia mayoritaria de planos con índices (411) o (330), con distancias $d_{hkl}=2.11 \text{ \AA}$, paralelos a la superficie del sustrato. Aparecen también en los espectros DRX otros picos en ángulos 44,1° y 62,2°, que corresponden a la difracción de planos (110) y (200) de la fase α del hierro, con distancias interplanares de 2,03 Å, y 1,43 Å respectivamente.

En relación con las modificaciones de la textura cristalina, se observa, a diferencia de lo que ocurre con los recubrimientos de cinc puro durante la embutición, que la textura original de la fase γ (411) o (330) de la fase intermetálica γ Zn-Ni se mantiene durante el proceso de estampación, incluso cuando se incrementa el número de pasadas en ensayos a la máxima presión. No aparecen nuevos picos ni se producen cambios significativos en las alturas relativas, lo que indica la ausencia de cambios en la orientación relativa de los cristales del recubrimiento respecto a la superficie de la chapa. Estos resultados sugieren, en coherencia con el comportamiento típicamente frágil y el agrietamiento observado en las capas Zn-Ni, que la deformación superficial plástica se produce fundamentalmente por aplastamiento del sustrato de acero y no por la deformación plástica del propio recubrimiento.

3.5. Análisis de los lubricantes

La naturaleza y concentración en aditivos de los lubricantes se analizó mediante espectroscopia infrarroja FTIR y voltamperometría lineal de barrido mediante un equipo comercial Ruler de Fluitec International.

La espectroscopia infrarroja se basa en el hecho de que las moléculas tienen frecuencias a las cuales rotan y vibran, es decir, los movimientos de rotación y vibración moleculares tienen niveles de energía discretos (modos normales vibracionales). Las frecuencias resonantes están relacionadas con la fuerza del enlace, y la masa de los átomos a cada lado del mismo. Así, la frecuencia de las vibraciones pueden ser asociadas con un tipo particular de enlace. Las moléculas diatómicas simples tienen solamente un enlace, el cual se puede estirar. Las moléculas más complejas pueden tener muchos enlaces, y las vibraciones pueden ser conjugadas, llevando a absorciones en el infrarrojo a frecuencias características que pueden relacionarse a grupos químicos determinados. Los átomos en un grupo CH_2 , por ejemplo, que forma parte comúnmente en compuestos orgánicos, pueden vibrar de seis formas distintas, estiramientos simétricos y asimétricos, flexiones simétricas y asimétricas en el plano (scissoring y rocking, respectivamente), y flexiones simétricas y asimétricas fuera del plano.

Algunos compuestos o aditivos típicos de las formulaciones de aceites presentan enlaces típicos propios que provocan absorción IR en un rango estrecho de frecuencias o longitudes de onda. Analizando el espectro en dichos rangos puede determinarse la mayor o menor presencia de dichos aditivos en un lubricante determinado. Puede incluso determinarse la concentración existente, si se lleva a cabo una calibración adecuada. A una longitud de onda dada, la Ley de Beer describe la variación de la absorbancia con la concentración de la sustancia que absorbe, ya que la absorptividad molar (a) y el ancho de la celda (b) permanecen constante. Por consiguiente, para poder medir la concentración de una especie química en una solución, primero se debe establecer la longitud de onda en la cual la solución tiene absorbancia máxima, λ_{max} , y después se debe preparar una curva de calibración. La curva de calibración se puede obtener midiendo la

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

absorbancia, a λ_{max} , de varias soluciones de concentración conocidas para determinar la función matemática que describe la variación de la absorbancia con la concentración. Las medidas de absorbancia se obtienen en el laboratorio o en el campo utilizando un espectrofotómetro.

En nuestro caso, el objetivo del análisis no es la determinación precisa de las concentraciones de aditivos, sino la detección de su posible existencia y la comparación entre ambos aceites.

A continuación se presentan espectros los espectros de absorción FTIR obtenidos con los aceites empleados L2 y L3, junto con espectros de un aceite de base mineral sin aditivos. Se incluyen figuras detalladas correspondientes a los rangos de frecuencias característicos de enlaces que permiten detectar la presencia de dos tipos de aditivos de interés por su capacidad para formar capas límite: Sulfonatos, en el rango 1134-1186 cm^{-1} y aditivos antidesgaste del tipo ZDDP en el rango 941-1026 cm^{-1} .

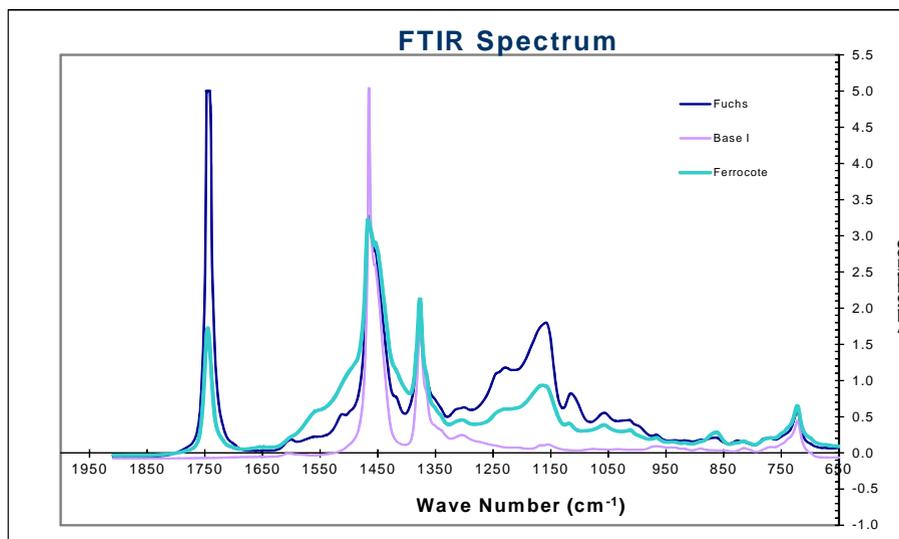


Figura 76. Espectro FTIR de los lubricantes analizados.

Resultados y Análisis

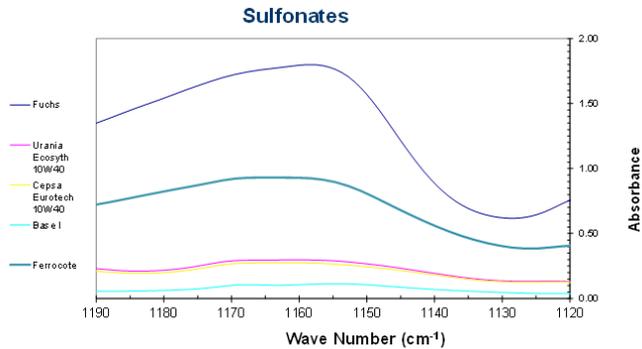


Figura 77. Espectro de absorción FTIR en el rango 1134-1186 cm⁻¹. Comparación entre los lubricantes Fuchs y Ferrocote en contenido en sulfonatos.

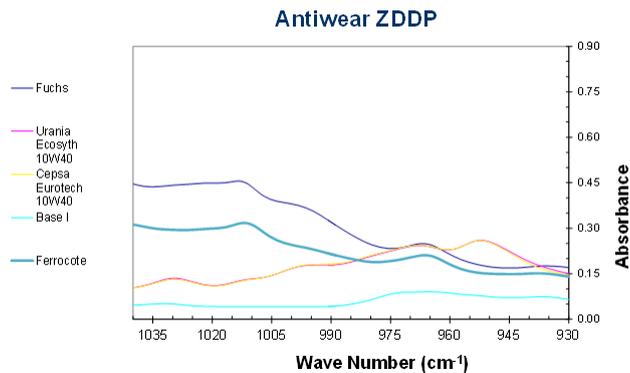


Figura 78. Espectro de absorción FTIR en el rango 941-1026 cm⁻¹. Comparación entre los lubricantes Fuchs y Ferrocote en el contenido de aditivos antidesgaste.

Los resultados FTIR indican que el aceite L2 (Fuchs) presenta un contenido en aditivos ligeramente superior al del aceite L3 (Ferrocote), tanto en aditivos de tipo sulfonato como en aditivos antidesgaste.

Para confirmar la presencia de los aditivos de tipo ZDDP se ha empleado también en la caracterización de los aceites el ensayo de voltamperometría lineal de barrido, con el que se detecta la mayor o menor presencia de aditivos antioxidantes polares de tipo ZDDP o aminas.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

La Figura 79 presenta finalmente la curva resultante del ensayo de voltamperometría de barrido lineal, tras la extracción de aditivos mediante solventes polares, tal como se obtiene con el equipo comercial para análisis de aditivos en aceites RULER de Fluitec International. El barrido se efectúa con un incremento de 0.1V/s. Se representa la corriente frente al potencial o tiempo de barrido, obteniéndose como resultado una intensidad a un potencial o tiempo dado. A ese valor de intensidad se le da el nombre de Rul Number (RN) adimensional y arbitrario. EL tiempo de barrido del voltaje se da en segundos. La intensidad de corriente es directamente proporcional a la concentración de los antioxidantes presentes en el medio.

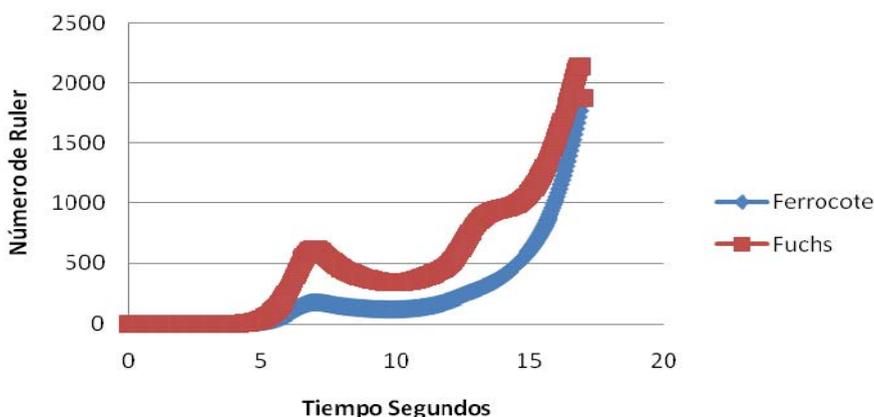


Figura 79. Espectro del ensayo de voltamperometría de barrido lineal. La escala vertical es proporcional al valor de la intensidad.

En la figura podemos comprobar que el aceite L2 Fuchs presenta un contenido en aditivos significativamente mayor que el aceite L3 Ferrocote. Los picos aparecen para valores de voltaje (o tiempo) característicos de los aditivos ZDDP (pico en 7-8 s) y aminas aromáticas (11-12 segundos). Como conclusión parcial de estos ensayos, se constata que el aceite L2 (Fuchs) presenta no solo una mayor viscosidad, sino también un mayor contenido en aditivos de tipo sulfonatos o ZDDP que el aceite L3 (Ferrocote).

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS PIN ON DISC.

Esta fase experimental de la tesis se ha destinado al estudio del comportamiento tribológico en las condiciones de ensayos estándar pin-on-disc, de amplia utilización. El objetivo de esta fase es la evaluación de los coeficientes de fricción tanto en ausencia de lubricantes como bajo los efectos de la lubricación en condiciones controladas, entre la superficie de las muestras de chapa Zn-Ni y la superficie de acero templado, bien mediante bolas de 4mm de acero AISI52100 en estado de temple y revenido o mediante pines cilíndricos con extremo plano del mismo material. También se ha empleado una metodología similar para evaluar el comportamiento con diferentes tratamientos de superficie en las matrices, cuyos resultados se presentan en un apartado independiente de esta tesis. Los ensayos denominados “en seco” se realizan sobre las chapas Zn-Ni en estado de suministro, tras la eliminación de restos de exceso aceite mediante frotado con acetona. Los ensayos en condiciones de lubricación abundante se han llevado a cabo con la zona de contacto completamente sumergida en un baño de aceite.

Mediante los ensayos pin-on-disc se han evaluado las siguientes condiciones de contacto:

Pin esférico (acero AISI52100)-Chapa Zn-Ni Plano, en seco

Pin esférico (acero AISI52100)-Chapa Zn-Ni Plano, con lubricación superabundante (Lubricantes L2 y L3)

Pin plano (acero AISI52100)-Chapa Zn-Ni Plano, con lubricación superabundante (Lubricantes L2 y L3)

Las condiciones de contacto esfera-plano no permiten obtener un gradiente de presiones en el aceite adecuado para lograr condiciones hidrodinámicas de lubricación. Para valorar estas condiciones, se han llevado a cabo también ensayos con lubricación superabundante, pero con pin plano.

Se han llevado a cabo ensayos en diferentes bloques o series, prolongando en algunos casos la duración total del ensayo desde

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

recorridos totales de 10 m hasta 1000m, con el fin de evaluar efectos o fenómenos de desgaste. Los rangos de las variables empleadas se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 10: condiciones de los ensayos realizados

Materiales PIN	Cargas	Velocidades	Recorrido total (m)
Acero al Cr (AISI52100) AISI52100+Nitruración en baño de sales (Tenifer) AISI52100+Nitruración gaseosa en vacío (Nitrovac)	1,3,5, 10 y 30 N	1, 3, 10 y 300 RPM	10,50,150,250,1000 m

Teniendo en cuenta la configuración del contacto bola sobre disco, la presión media de contacto se puede calcular aplicando las ecuaciones de Hertz para el caso de una esfera sobre una superficie plana. Los resultados para distintas fuerzas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11: Presiones medias de contacto real con la utilización de pines esféricos

Carga Normal (N)	Presión de contacto (GPa)
1N	0.58
3N	0.83
5N	0.99

Los valores de presión media obtenidos son claramente superiores a los que se obtienen en las condiciones reales de embutición (inferiores a 0.1 GPa). Resulta obvio, por tanto, que estas condiciones de ensayo no reproducen exactamente las condiciones reales. No obstante, se consideran estos experimentos de interés por la información que puede extraerse respecto a la contribución relativa al comportamiento tribológico de diferentes efectos o variables del sistema.

4.1. Ensayos con contacto esfera-plano en seco.

Las Figura 80 a Figura 82 ilustran la evolución de los valores del coeficiente de fricción observado en condiciones de contacto seco. Corresponden a ensayos de diferentes muestras, en similares condiciones de carga y velocidad, durante los primeros 10 m de recorrido. Es importante señalar que se tienen resultados similares en los demás ensayos realizados (cinco) en condiciones similares de carga y velocidad en contacto seco.

El coeficiente de fricción presenta valores iniciales entre 0.15 y 0.30 y tiende a crecer en todos los casos conforme se incrementa en recorrido total. Se observan grandes oscilaciones en las fuerzas de fricción y la aparición sistemática de algunos picos o valores elevados, que se atribuyen a la aparición de microgripados o microsoldaduras entre el recubrimiento y las bolas de acero por fenómenos de adhesión o rozamiento cohesivo. Normalmente, estos picos se observan únicamente con grandes cargas, y tienden a aparecer con menor recorrido total cuanto mayor es la carga aplicada.

La evolución del coeficiente de fricción con el recorrido es, en todos los casos, creciente conforme se incrementa la distancia recorrida, alcanzándose valores del coeficiente de fricción del orden de 0.40-0.60 o incluso superiores. Estos valores confirman que, en ausencia de lubricantes o capas límite adsorbidas, los valores de fricción entre las estructuras de acero tratado y los recubrimientos de Zn-Ni presentan valores muy elevados.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

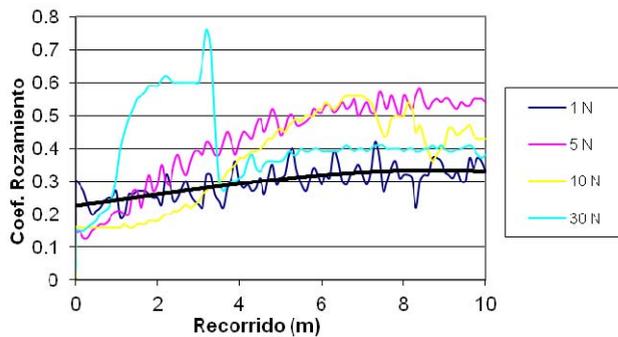


Figura 80. Evolución del coeficiente de fricción en seco. Ensayos a 300 rpm bajo diferentes cargas. Pin: Bola de acero AISI52100 4mm. (Datos originales de ensayos hasta un recorrido total de 250m).

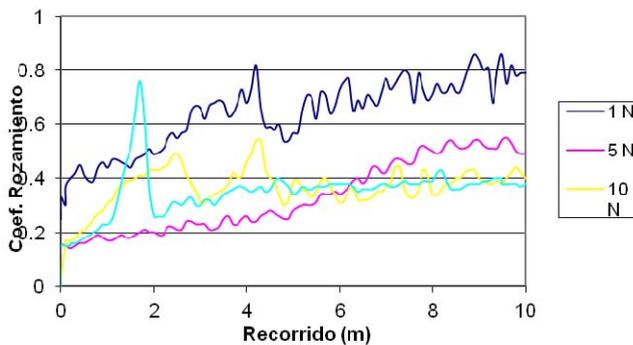


Figura 81. Evolución del coeficiente de fricción en seco. Ensayos a 300 rpm bajo diferentes cargas. Pin: Bola de acero AISI52100 4mm. (Datos originales de ensayos hasta un recorrido total de 500m).

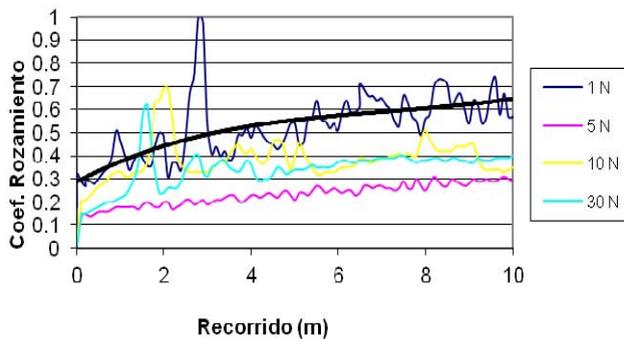


Figura 82. Evolución del coeficiente de fricción en seco. Ensayos a 300 rpm bajo diferentes cargas. Pin: Bola de acero AISI52100 4mm. (Datos originales de ensayos hasta un recorrido total de 1000m).

Resultados y Análisis

La tendencia a la adhesión se ha visto confirmada en estudios mediante microscopía SEM y microanálisis de la superficie de las muestras y las bolas tras los ensayos. Las Figura 83 y Figura 84 muestran imágenes de la pista o zona de contacto tras ensayos en seco. Se aprecia el gran deterioro o modificación de la topografía superficial y la presencia de material con restos de “debris” o material triturado del recubrimiento Zn-Ni, que una vez producido actúa como tercer cuerpo contribuyendo al desgaste y al daño abrasivo observado (arañazos sobre el recubrimiento).

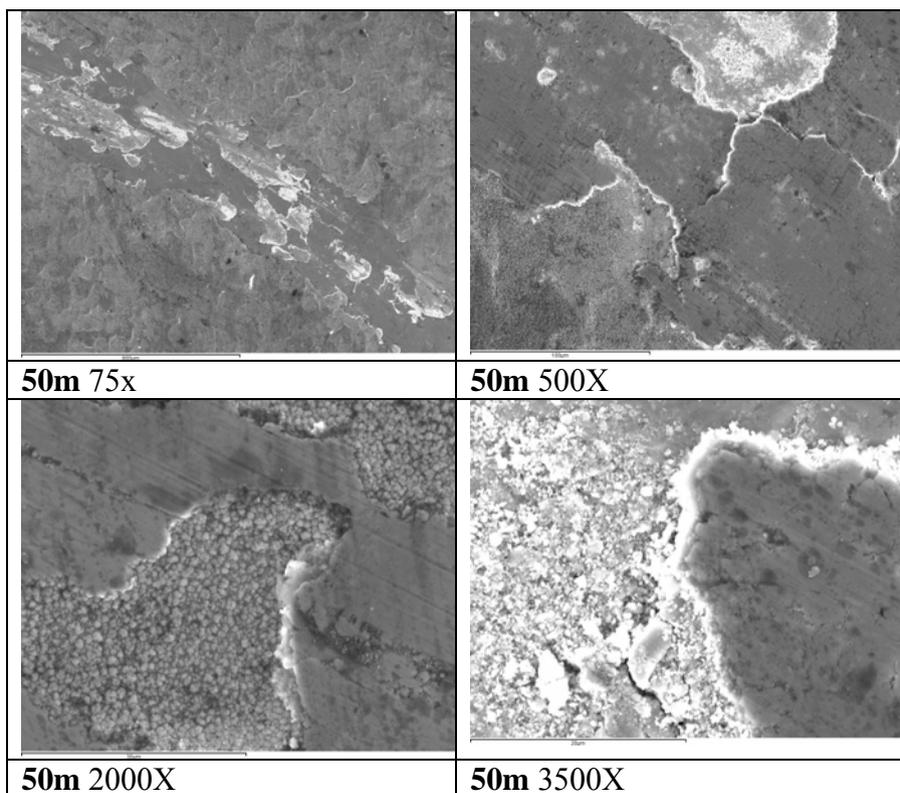


Figura 83. Aspecto SEM de la superficie de las chapas tras ensayos pin-on-disc.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

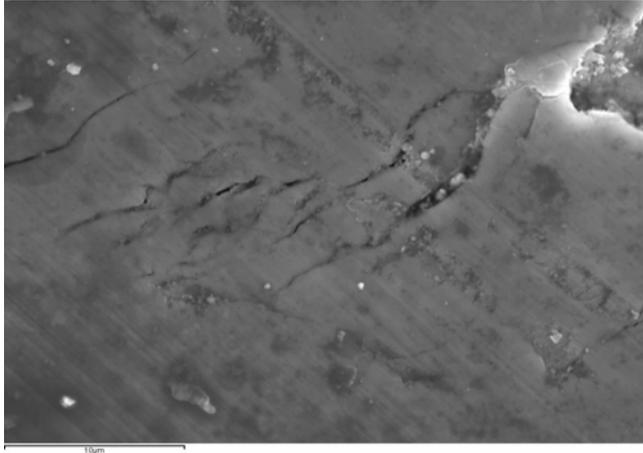


Figura 84. Muestra la chapa de Zn-Ni ensayada con bola de acero al cromo tras 50m de recorrido a 300rpm a 3500 aumentos (regleta de 10um) El recubrimiento aplastado presenta grietas transversales al sentido de avance, lo que se interpreta como síntomas de la existencia de fenómenos de adhesión que provocan tensiones de cizalladura en el sentido de avance.

También se han observado efectos de agrietamiento en la pista, en sentido transversal al avance, que suelen asociarse a efectos de las tensiones de cizalladura por adhesión entre el pin y el sustrato. La evidencia de la existencia de estos efectos de adhesión o cohesión se ha constatado tras la observación de las bolas. Como se muestra en la Figura 85, la superficie presenta restos adheridos de material de las chapas, que mediante análisis EDX se identificó como restos del recubrimiento Zn-Ni.



Figura 85. Imagen SEM de la superficie de una bola de acero al cromo AISI 52100, a 300x donde se observa material transferido del recubrimiento.

4.2. Contactos esfera-plano con lubricación.

Se han realizado ensayos similares a los realizados en seco, pero con las muestras sumergidas en un baño de lubricante. En estos ensayos, las velocidades de rotación se han limitado a 10 RPM, ya que con valores más elevados se producía un derrame del lubricante debido a la fuerza centrífuga. La Tabla siguiente presenta las condiciones empleadas:

Tabla 12: condiciones y variables del contacto esfera-plano.

Zn-Ni & Acero al cromo	
Velocidades	0,00105-0.00314-0.01047-0.314 (m/s)
Presiones medias de contacto Bolas 4mm sobre plano (Hertz)	0.58-0.83-0.99-1.21 GPa
Lubricantes	L2: Fuchs PL 3802 39S, L3: Ferrocote S-6130
Recorridos	10 metros

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Los resultados obtenidos en ensayos bajo condiciones similares, pero en condiciones de lubricación superabundante (Figura 87 y Figura 88), muestran un comportamiento claramente diferente al observado anteriormente en seco (Figura 86 con inversa tendencia a la utilización de lubricantes). Los valores del coeficiente de fricción, en presencia superabundante de aceite, se mantienen sensiblemente constantes, o incluso decrecen con la distancia recorrida, con valores en el rango 0.10-0.20.

Los valores observados en estas condiciones son claramente inferiores a los observados en ensayos en seco, si bien no alcanzan de modo sistemático los valores típicos de las condiciones de lubricación de capa gruesa, del orden de 10^{-3} .

La reducción gradual de los valores del coeficiente de fricción se atribuye a la formación de capas límite entre los aditivos del aceite y las superficies en contacto y al aplastamiento progresivo de las asperezas en la chapa. No se considera que se hayan producido efectos lubricantes de tipo microhidrodinámico o de capa gruesa, dada la configuración esfera-plano empleada en el contacto.

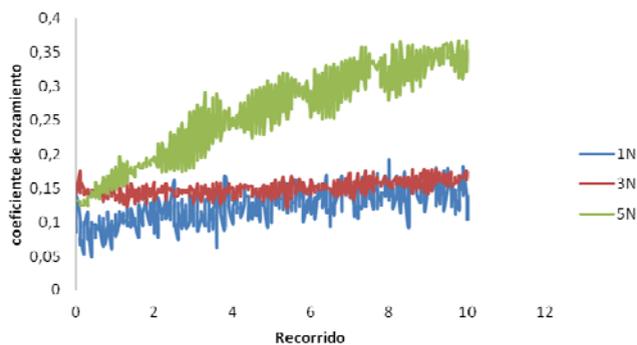


Figura 86. Evolución del COF en ensayos pin-on-disc. Bolas de acero AISI52100 sobre chapa Zn-Ni en estado de suministro (SL).

Resultados y Análisis

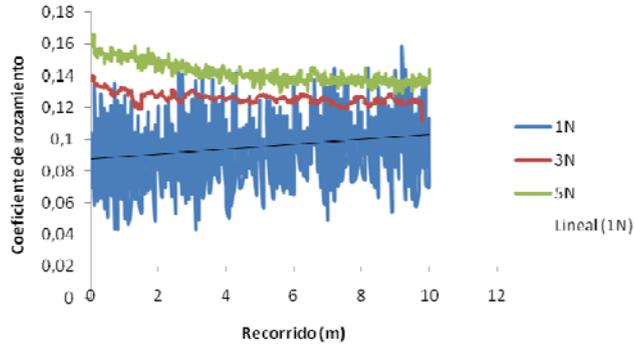


Figura 87. Evolución del COF en ensayos pin-on-disc. Bolas de acero AISI52100 sobre chapa Zn-Ni . Contacto sumergido en aceite L2: Fuchs PL 3802 39S

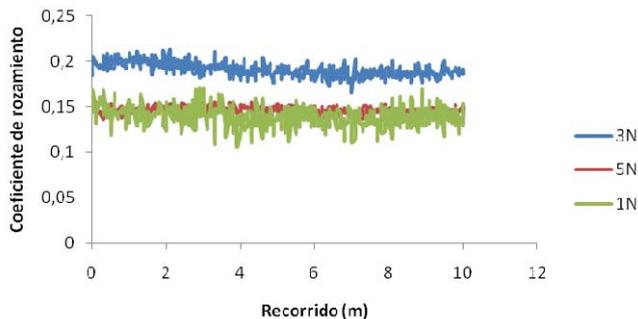


Figura 88. Evolución del COF en ensayos pin-on-disc. Bolas de acero AISI52100 sobre chapa Zn-Ni. Contacto sumergido en aceite L3: Ferrocoate S-6130

4.3 Contactos plano-plano con lubricación.

Se ha utilizado el equipo pin-on-disc sobre las mismas probetas empleando pines cilíndricos de cabeza plana, para conseguir contactos plano-plano. Esta configuración permite obtener presiones constantes en toda la zona de contacto y con una geometría más favorable para la generación de efectos microhidrodinámicos. El área aparente de contacto es además constante en todo el ensayo, no como en el contacto esfera-plano, donde el área crece con el recorrido conforme se incrementa el desgaste. Los ensayos se han llevado a cabo en inmersión total, con el fin de asegurar una disponibilidad continua de aceite en la zona de contacto, pero con una limitada cantidad de aceite para evitar el derrame durante el ensayo.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Los pines utilizados son barras de acero AISI 52100 tratado, de 8mm de diámetro, a los cuales se les ha realizado en torno un rebaje en las aristas para tener cantos romos en todo el proceso. Con el rebaje se tiene una superficie plana de 6,75mm de diámetro. La rugosidad del extremo se ha reducido mediante rectificado con abrasivos hasta tamaño ASTM 600, con lo que se consigue una rugosidad superficial máxima del orden de 0.1micra.

Se han realizado ensayos a 3 presiones distintas (5,10 y 30N) y 4 velocidades distintas, manteniendo constante el tipo de lubricante empleado. El radio utilizado ha sido de 10mm de radio. La Tabla siguiente presenta un resumen de las condiciones de ensayo empleadas.

Tabla 13: condiciones y variables del contacto plano-plano.

Zn-Ni & Acero al cromo	
Velocidades	20,60,120 y 180 RPM (0.021 m/s a 0.188 m/s)
Cargas y Presiones de contacto	5,10 y 30N (0.14-0.28-0.84 MPa)
Lubricantes	L2: Fuchs PL 3802 39S, L3: Ferrocote S-6130
Recorridos	10 metros

Los valores del coeficiente de fricción medio observado en cada ensayo se muestran en la Figura 89.

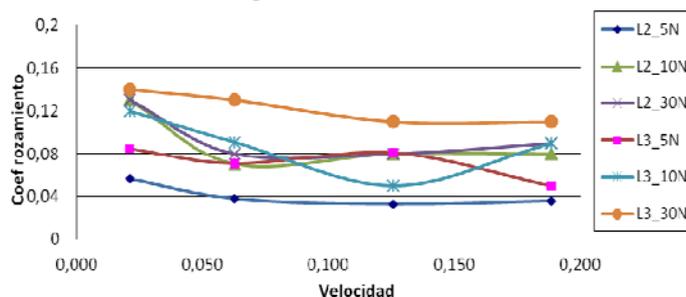


Figura 89. Valores del coeficiente de fricción frente a la velocidad en ensayos pin plano con presencia en exceso de aceite.

Se encuentran en estos resultados evidencias de la transición hacia un régimen de lubricación mixta conforme se incrementa el valor de la velocidad relativa o conforme se reducen las cargas o presiones

Resultados y Análisis

aplicadas, lo que sugiere la posible existencia de contribuciones de tipo hidrodinámico.

Si se representan los valores de fricción frente al parámetro adimensional de Hersey H , como se muestra en la Figura 90, se observa que para valores por encima de $H = 10^{-9}$, se tienen valores del coeficiente de fricción claramente por debajo de 10^{-2} , en un rango de valores característico del régimen mixto.

Este comportamiento se observa con ambos lubricantes para las muestras con superficie de acero, si bien, a igualdad de condiciones de velocidad y carga, los valores del coeficiente de fricción observados son ligeramente inferiores para el aceite L2 (Fuchs PL 3802 39S) que para el lubricante L3 (Ferrocote S6130). Es importante destacar que la transición al régimen mixto se observa para valores de H similares a los observados por Emmens. Si se asume la existencia de contribuciones de tipo hidrodinámico, el mejor comportamiento del aceite L2 se vería favorecido por la mayor viscosidad de este aceite ($60 \text{ mm}^2/\text{s}$ para Fuchs frente a $26 \text{ mm}^2/\text{s}$ para Ferrocote). No obstante, también este aceite presenta un mayor contenido en aditivos, por lo que las mejoras observadas también pueden deberse al mejor comportamiento en condiciones de lubricación límite. Los resultados de los análisis efectuados en los aceites confirman efectivamente que este aceite presenta un mayor contenido en aditivos antidesgaste y/o antioxidantes, del grupo aminas y/o ZDDP (Zinc dialquil ditiofosfatos), que actúan como aditivos EP o modificadores del coeficiente de fricción.

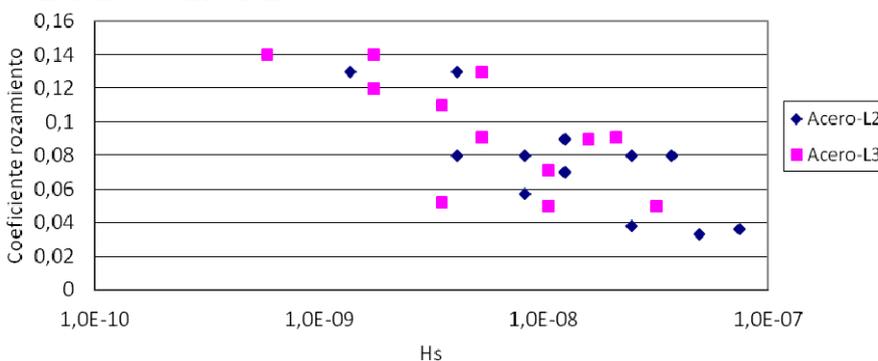


Figura 90. Valores del coeficiente de fricción frente al parámetro H en ensayos pin-on-disc con contacto plano-plano y lubricación superabundante.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

5. RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS PIN ON DISC CON TRATAMIENTOS.

Esta fase se ha destinado al estudio de los efectos de tratamientos termoquímicos de nitruración que eventualmente podrían aplicarse sobre las matrices de estampación, como alternativa al uso del material simplemente tratado mediante técnicas de temple superficial. Como se describe en el capítulo anterior, se ha estudiado el efecto de tratamientos de nitruración en baño de sales, con nombre comercial Tenifer, y el tratamiento de nitruración en atmósfera de gases denominado comercialmente Nitrovac. Los tratamientos fueron realizados por la empresa Metalográfica de Levante SA, en las condiciones estándar típicas del tratamiento de aceros de herramientas mediante dichos procesos. Las muestras de pines tratados se han utilizado para los ensayos en las condiciones de suministro.

La evaluación se ha llevado a cabo exactamente en las mismas condiciones de ensayo en las que se realizan los ensayos pin-on-disc empleando como material el acero tratado AISI 52100. Los tratamientos, de hecho, se han aplicado sobre el mismo tipo de bolas y pines cilíndricos ya descritos. Mediante los ensayos pin-on-disc se han evaluado las siguientes condiciones de contacto:

Pin esférico (acero AISI52100+tratamiento Tenifer o Nitrovac)-Chapa Zn-Ni Plano, en seco

Pin esférico (acero AISI52100+tratamiento Tenifer o Nitrovac)-Chapa Zn-Ni Plano, con lubricación superabundante (Lubricantes L2 y L3)

Pin plano (acero AISI52100+ tratamiento Tenifer o Nitrovac)-Chapa Zn-Ni Plano, con lubricación superabundante (Lubricantes L2 y L3)

5.1. Contactos esfera-plano en seco.

Se han llevado a cabo ensayos en diferentes bloques o series, similares a las empleadas en los ensayos con bolas de acero, en contacto con chapa recubierta Zn-Ni previamente desengrasada. También en este caso se han realizado ensayos de largo recorrido, con el fin de evaluar

Resultados y Análisis

efectos o fenómenos de desgaste. Los rangos de las variables empleadas se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 14: condiciones y variables del contacto esfera-plano.

Materiales PIN	Cargas	Velocidades	Recorrido total (m)
AISI52100+Nitruración en baño de sales (Tenifer)	1,3,5, 10 y 30 N	1, 3, 10 y 300 RPM	10,50,150,250,1000 m
AISI52100+Nitruración gaseosa en vacío (Nitrovac)			

Las Figura 91 y Figura 92 ilustran la evolución de los valores del coeficiente de fricción observado en condiciones de contacto seco. El comportamiento es similar al observado en los ensayos con acero. Se observan grandes oscilaciones en las fuerzas de fricción, especialmente en ensayos con baja carga (1N) y la aparición de algunos picos o valores elevados.

La evolución del coeficiente de fricción con el recorrido es, en todos los casos, creciente conforme se incrementa la distancia recorrida, alcanzándose valores del coeficiente de fricción incluso superior a los observados en ensayos sobre las bolas de acero.

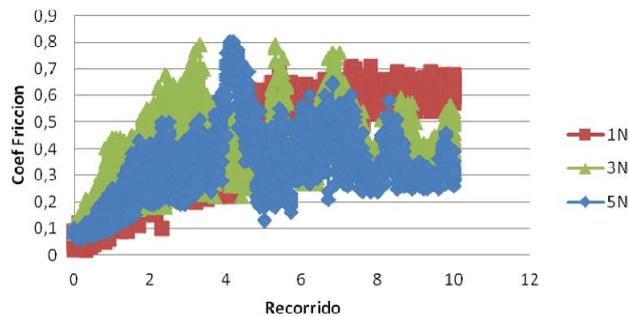


Figura 91. Evolución del coeficiente de fricción en seco. Ensayos a 10 rpm hasta distancias de 10m, con diferentes cargas. Pin: Bola de acero AISI52100 4mm con tratamiento Tenifer.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

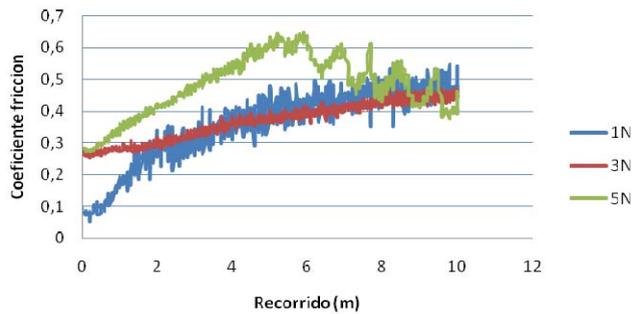


Figura 92. Evolución del coeficiente de fricción en seco. Ensayos a 10 rpm hasta distancias de 10m, con diferentes cargas. Pin: Bola de acero AISI52100 4mm con tratamiento Nitrovac.

En ensayos de larga duración, y en comparación con las superficies de acero, los resultados obtenidos con los tratamientos adicionales de nitruración no ofrecen ninguna mejora significativa. Los valores iniciales del coeficiente de fricción en seco son del mismo orden que con acero, pero se alcanzan valores incluso superiores en los ensayos con tratamientos de nitruración. Las Figura 93 y Figura 94, muestran resultados comparativos, obtenidos de dos ensayos diferentes con similar carga aplicada.

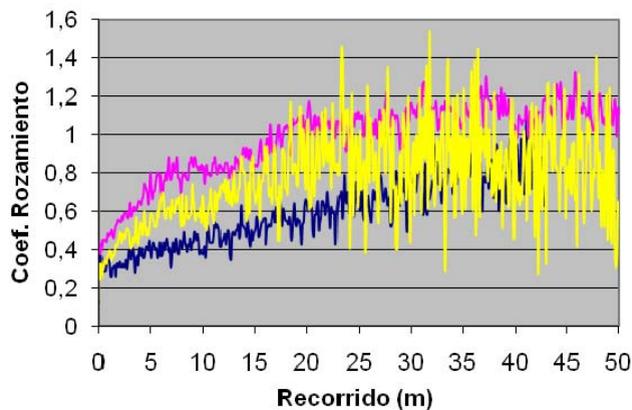


Figura 93. Evolución del coeficiente de fricción en seco. Ensayos a 300 rpm, cargas de 1N y distancias de 50m. Pin: Bola de acero AISI52100 4mm con diferentes tratamientos, Azul sin tratamiento, MAGENTA Tenifer y AMARILLO Nitrovac.

Resultados y Análisis

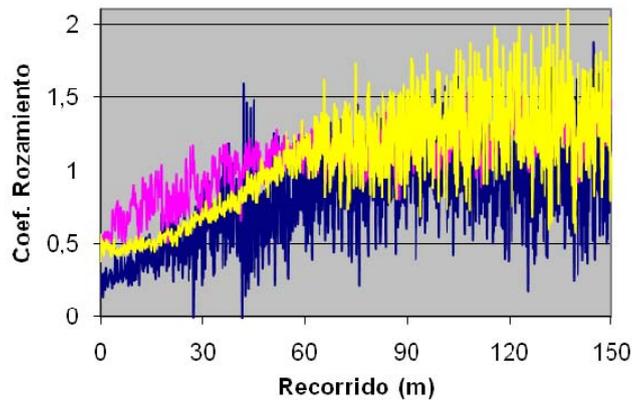


Figura 94. Evolución del coeficiente de fricción en seco. Ensayos a 300 rpm, distancia 150m y cargas de 1N. Pin: Bola de acero AISI52100 4mm con diferentes tratamientos, AZUL sin tratamiento, MAGENTA Tenifer, AMARILLO Nitrovac.

5.2. Efectos sobre el desgaste

Las diferencias en los valores de los coeficientes de fricción entre muestras de acero y muestras con tratamientos Tenifer o Nitrovac se manifiestan también en cuanto al desgaste observado sobre las muestras.

La medición del desgaste se ha llevado a cabo según la norma ASTM G99106.

Cada uno de los valores de desgaste obtenidos en este apartado se ha calculado a partir de la fórmula:

$$W = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \left[r^2 \cdot \arcsen\left(\frac{d}{2r}\right) - \frac{d}{4} \cdot (4r^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (19)$$

Siendo W = volumen de desgaste¹⁰⁷ en mm³

R = radio de giro del punzón sobre el disco, mm.

d = anchura media en la huella de desgaste, mm

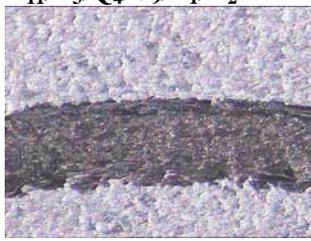
r = radio del pin, mm

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

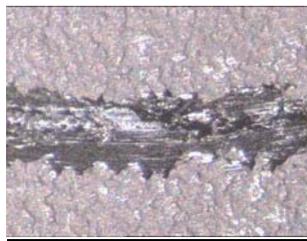
El método empleado para la determinación del ancho de huellas es el siguiente. Una vez acabada la prueba con la máquina pin-on disk, se limpia la probeta, haciendo especial hincapié en la circunferencia que forma la zona de contacto con el pin. Una vez limpia la probeta se utiliza una lupa conectada a un ordenador para sacar fotos de la zona de contacto. Dado el tamaño de la zona de contacto, se consideró más adecuado obtener imágenes parciales de partes de la misma pista, en vez de intentar sacar una foto de su totalidad (en nuestro caso particular se tomaron cuatro fotografías por pista a 90°). Mediante software de análisis de imágenes se determinaron los espesores o anchos de las zonas de contacto.

En la Figura 95, se muestran imágenes obtenidas de las probetas de ensayos con pin de acero al cromo y 10N de carga, obteniéndose el espesor encontrado en cada prueba y el promedio de todas las obtenidas en micras (μm).

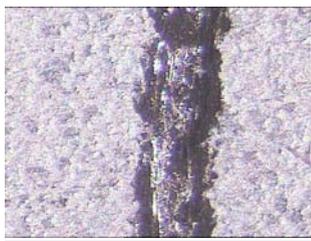
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₂



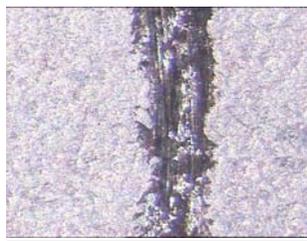
1: 466,97



2: 437,121



3: 445,955



4: 420,048

Promedio: 442,5235 μm Profundidad=6,11 μm

Figura 95. Imágenes obtenidas mediante microscopía óptica (estereoscopia) de las pistas o zonas de contacto de la chapa tras ensayos pin-on-disk, empleadas para determinar el ancho de huella y el desgaste.

Resultados y Análisis

Las figuras siguientes, ilustran la evolución del ancho de las huellas conforme se incrementa el recorrido durante el ensayo pin-on-disc en ausencia de lubricantes. Con bajas cargas aplicadas (1,5 o 10 N), el comportamiento es muy similar para los diferentes tipos de tratamientos aplicados a las bolas. Con altas cargas, en cambio, el desgaste es muy superior con los tratamientos Tenifer o Nitrovac. La Figura 98, presenta los resultados de tasa de desgaste normalizado, por unidad de distancia, frente a la carga aplicada, ilustra también de manera gráfica las mayores tasas de desgaste observadas con las bolas tratadas.

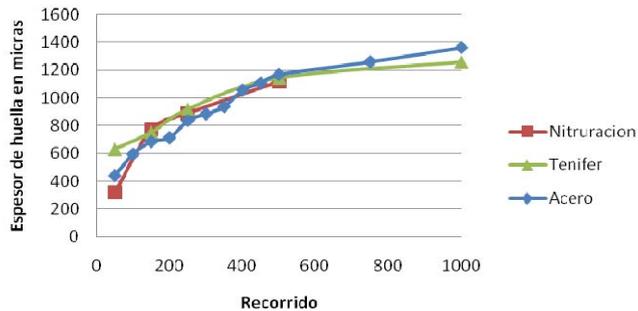


Figura 96. Evolución del ancho de huella con el recorrido para ensayos pin-on-disc en seco con cargas de 10 N.

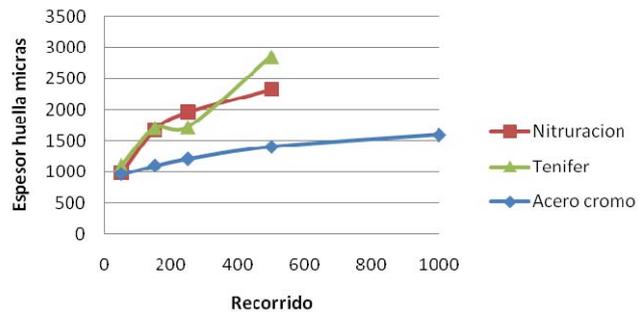


Figura 97. Evolución del ancho de huella con el recorrido para ensayos pin-on-disc en seco con cargas de 30 N.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

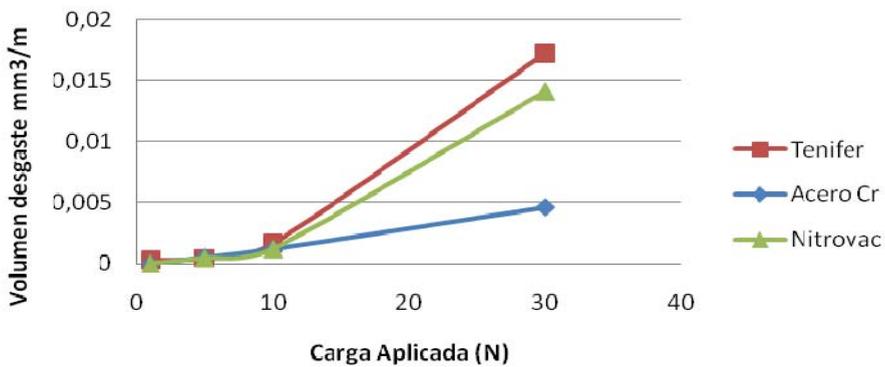


Figura 98. Tasas de desgaste normalizado por unidad de distancia recorrida observadas en los ensayos pin-on-disc en seco, en función de la carga aplicada. Bolas de diámetro 4mm.

En relación con las tasas de desgaste y con las mediciones en ensayos de larga duración, debe hacerse la observación que, si se incrementa la duración o recorrido durante los ensayos, las huellas provocadas por las bolas pueden afectar no solo al recubrimiento de Zn-Ni, sino también al sustrato de acero.

5.3. Imágenes y análisis SEM de los materiales

La tendencia a la adhesión se ha visto confirmada también en este caso tras la observación en microscopía SEM y microanálisis de la superficie de las muestras y las bolas tras los ensayos. La Figura 99 muestra una imagen de una bola Tenifer con restos adheridos del recubrimiento, que se identifica como Zn-Ni a partir de los análisis EDX.

Resultados y Análisis

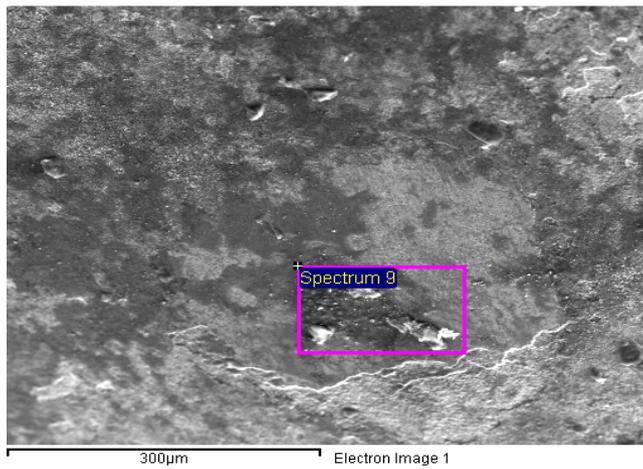


Figura 99. Imagen SEM de la superficie de una bola AISI52100+Tenifer, con restos adheridos de material del recubrimiento.

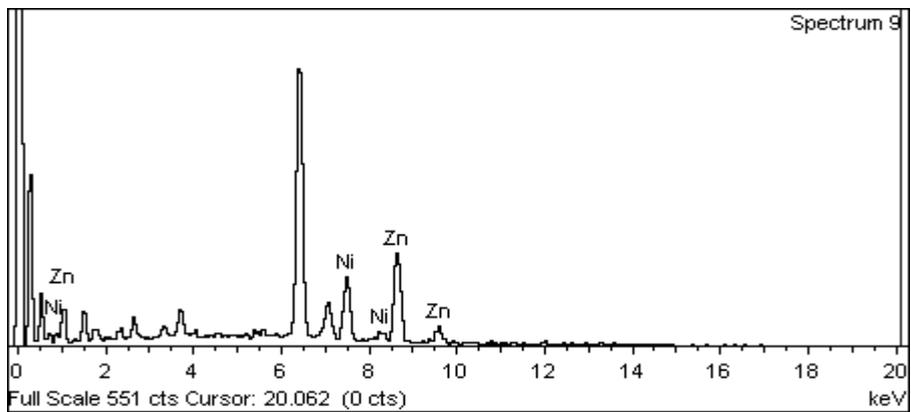


Figura 100. Espectro EDX de la zona indicada en la figura anterior. Se detecta la presencia de restos de la capa Zn-Ni.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

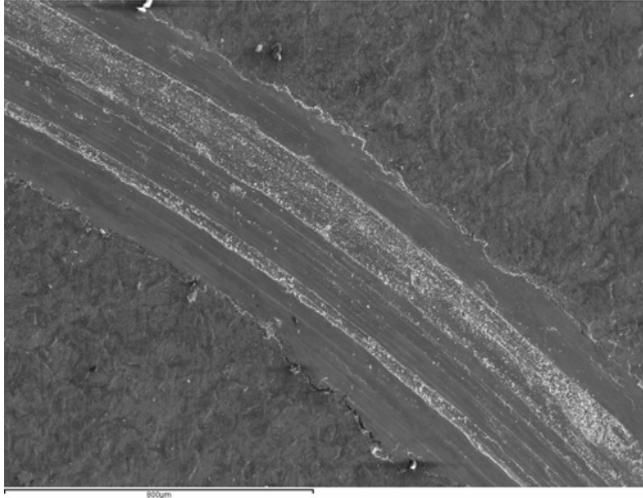


Figura 101. Chapa de Zn-Ni ensayada con bola de acero con tratamiento tenifer tras 50m de recorrido a 300rpm a 75 aumentos (regleta de 800um).

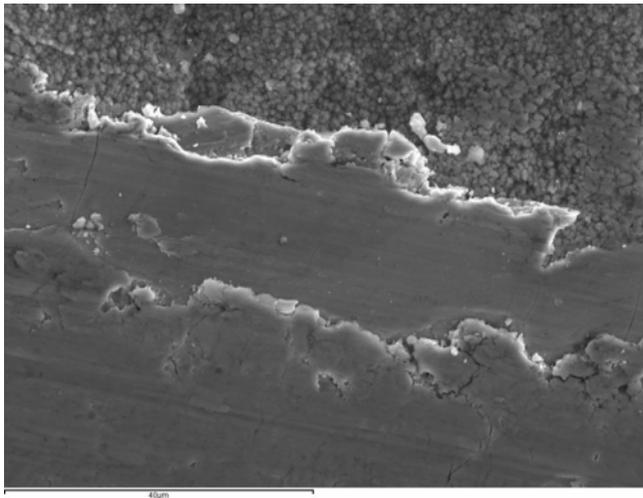


Figura 102. Chapa de Zn-Ni ensayada con bola de acero con tratamiento Tenifer tras 50m de recorrido a 300rpm a 1500 aumentos (regleta de 40um). Aplastamiento y agrietamiento del recubrimiento. Evidencias de ploughing o daños por abrasión.

Resultados y Análisis

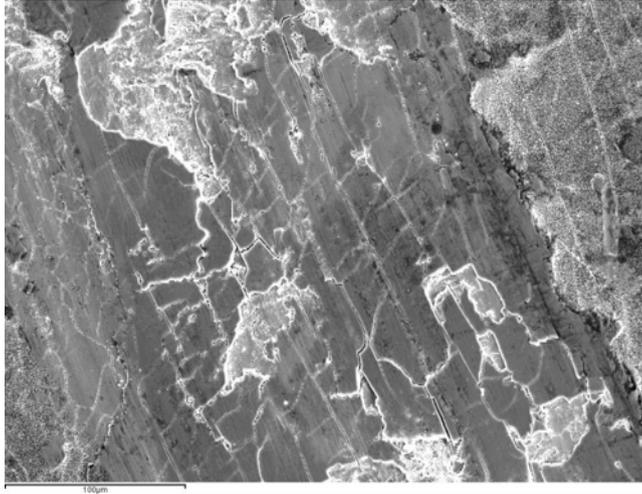


Figura 103. Chapa de Zn-Ni ensayada con bola de acero con tratamiento Nitrovac tras 50m de recorrido a 300rpm a 350 aumentos (regleta de 100µm). Se observa el recubrimiento aplastado y evidencias de múltiples fracturas o midrogrietas.

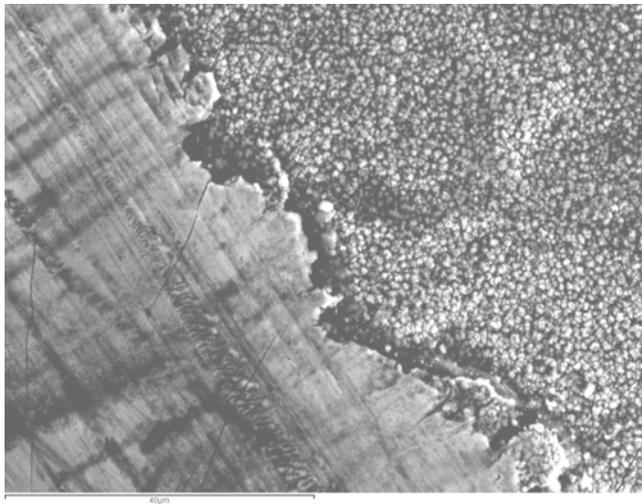


Figura 104. Chapa de Zn-Ni ensayada con tratamiento Nitrovac tras 50m de recorrido a 300rpm a 1500 aumentos (regleta de 40µm) Imagen del borde irregular, observación de rayas por abrasión a lo largo de la pista de contacto. Se observan también grietas transversales por fragilidad del recubrimiento en combinación con fenómenos de adhesión.

Además de los fenómenos de adhesión, sobre las pistas de rodadura se observaron claras señales de daño o desgaste abrasivo, bien provocado por el propio recubrimiento de las capas Tenifer o

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Nitrovac, cuya dureza estimada es del orden de 700-1000 HV, o incluso por restos de material de desgaste del propio recubrimiento Zn-Ni.

Una observación importante en este aspecto es la diferente topografía superficial que presentan las bolas según el tratamiento aplicado. Dadas sus bajas dimensiones y configuración, no ha sido posible medir directamente los valores de rugosidad sobre las bolas o los extremos de los pines empleados, pero las imágenes SEM que se muestran en la Figura 105 a Figura 107 ilustran la existencia de importantes diferencias topográficas. La rugosidad es claramente superior tras la aplicación de los recubrimientos, especialmente en el caso de la muestra con tratamiento Nitrovac.

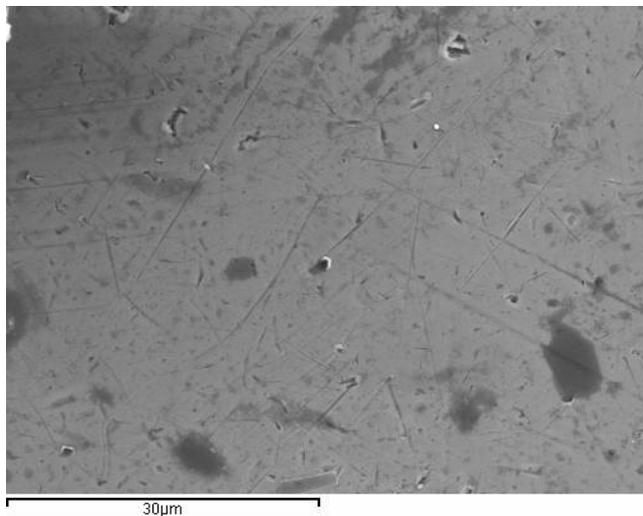


Figura 105. Imagen SEM de la superficie de las bolas de acero al cromo AISI 52100 a 2000x.

Resultados y Análisis

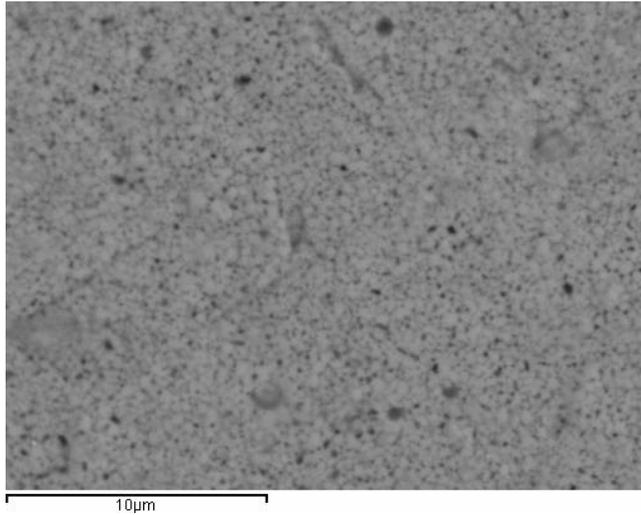


Figura 106. Imagen SEM de la superficie de una bola de acero AISI 52100 con tratamiento Tenifer (5000 X)

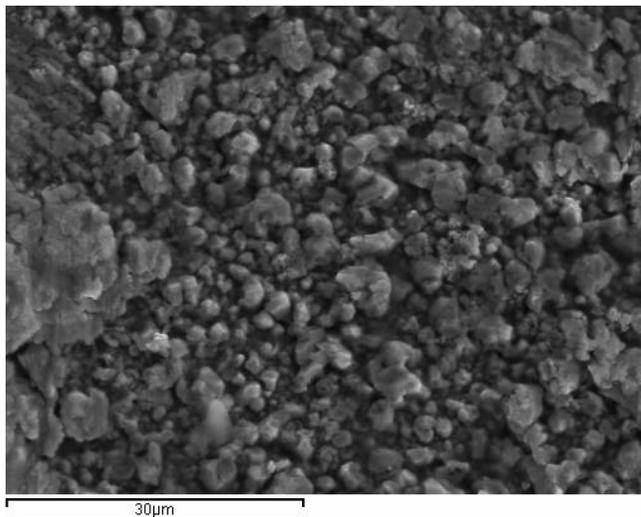


Figura 107. Imagen SEM de la superficie de las bolas de acero al cromo AISI 52100 con tratamiento Nitrovac, mostrando la elevada rugosidad superficial del recubrimiento. (2000x)

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

5.4. Ensayos pin on disc con tratamientos y contactos esfera-plano con lubricación.

Se han realizado ensayos similares a los realizados en el caso de pines de acero (esferas), pero en presencia de lubricantes. La Tabla siguiente presenta las condiciones empleadas:

Tabla 15: Condiciones y variables del contacto esfera-plano con lubricación.

Zn-Ni & AISI 52100+Tenifer Nitrovac	
Velocidades	0,00105-0.00314-0.01047-0.314 (m/s)
Presiones medias de contacto Bolas 4mm sobre plano (Hertz)	0.58-0.83-0.99-1.21 GPa
Lubricantes	L2: Fuchs PL 3802 39S, L3: Ferrocote S-6130
Recorridos	10 metros

Los resultados obtenidos en condiciones de lubricación superabundante muestran, como en el caso del acero, un comportamiento claramente diferente al observado anteriormente en seco, como se aprecia en las Figura 108 y Figura 109, los valores del coeficiente de fricción en presencia superabundante de aceite se mantienen sensiblemente constantes, o incluso decrecen con la distancia recorrida, con valores en el rango 0.10-0.20. Las consideraciones efectuadas en el caso de los ensayos con bolas sin tratamiento son también aplicables en este caso. La reducción gradual de los valores del coeficiente de fricción se atribuye a la formación de capas límite entre los aditivos de los aceites y las superficies en contacto. Se considera la contribución relevante de efectos de tipo microhidrodinámico o de capa gruesa dada la configuración esfera-plano empleada en el contacto.

Resultados y Análisis

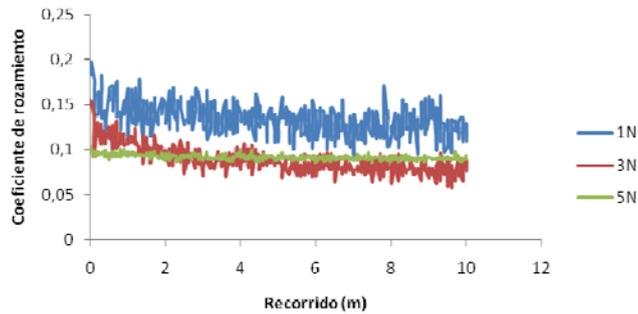


Figura 108. Evolución del COF en ensayos pin-on-disc. Bolas de acero AISI52100 con tratamiento Nitrovac sobre chapa Zn-Ni. Contacto sumergido en aceite L2: Fuchs PL 3802 39S

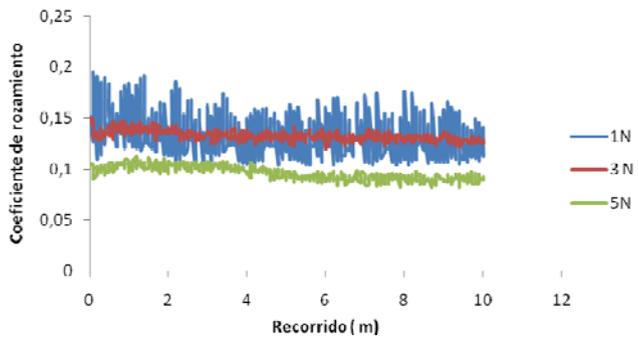


Figura 109. Evolución del COF en ensayos pin-on-disc. Bolas de acero AISI52100 con tratamiento Nitrovac sobre chapa Zn-Ni. Contacto sumergido en aceite L3: Ferrocote S-6130

5.5. Contactos plano-plano con lubricación.

También en este caso se ha utilizado el mismo equipo y condiciones de ensayo que en los ensayos con pines planos sin tratamientos superficiales. Los ensayos se han llevado a cabo en inmersión total, con el fin de asegurar una disponibilidad continua de aceite en la zona de contacto. Como en el caso de las bolas, los pines de acero S52100 fueron recubiertos o tratados mediante los procesos estándar tenifer y Nitrovac por la empresa Metalográfica de Levante S.A. y se

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

emplearon en las condiciones de suministro, sin procesos adicionales de pulido o rectificado de las superficies.

La configuración de contacto plano-plano con bordes convergentes permite obtener presiones constantes en toda la zona de contacto y es una geometría favorable para la generación de efectos microhidrodinámicos, cuya presencia si parece manifestarse en el caso de ensayos con pines sin tratamiento.

Como en el caso de los pines de acero, se han realizado ensayos a 3 presiones distintas (5, 10 y 30N) y 4 velocidades distintas, manteniendo constante el tipo de lubricante empleado (L2 o L3) y el tipo de tratamiento superficial (Tenifer o Nitrovac). El radio utilizado inicialmente ha sido de 10mm de radio. Los resultados obtenidos con ambos lubricantes y tipos de tratamiento, sin embargo, no mostraron en ningún caso valores del coeficiente de fricción del orden de 0.05 o inferiores, como los observados en el caso de las muestras con pin plano de acero. Con el fin de favorecer aún más los posibles efectos hidrodinámicos, se realizó una nueva serie completa de ensayos, en condiciones similares pero con radio de giro de 20mm, lo que proporciona un bloque adicional de resultados con valores dobles de velocidad. Las combinaciones de variables empleadas se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 16: Condiciones y variables del contacto plano-plano.

Zn-Ni & Acero+Tenifer/Nitrovac	
Velocidades	20,60,120 y 180 RPM Radio 10mm: 0.021 m/s a 0.188 m/s Radio 20mm: 0.042 m/s a 0.376 m/s
Cargas y Presiones de contacto	5,10 y 30N (0.14-0.28-0.84 MPa)
Lubricantes	L2: Fuchs PL 3802 39S, L3: Ferrocote S-6130
Recorridos totales	10 metros

La Figura 110 y Figura 111, muestran gráficamente un extracto de los resultados obtenidos, que se reproducen de manera similar para las otras combinaciones de tratamiento y lubricante.

Resultados y Análisis

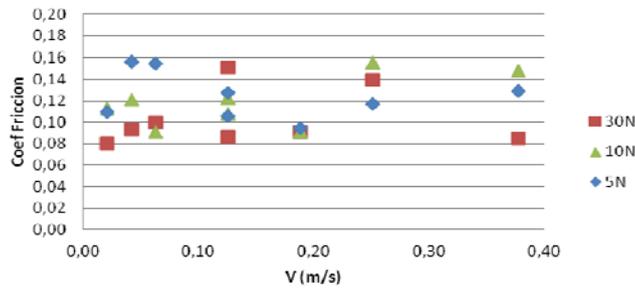


Figura 110. Valores del coeficiente de fricción observados en ensayos pin on disc con contactos plano-plano. Pin con tratamiento Tenifer, en presencia superabundante de lubricante L2.

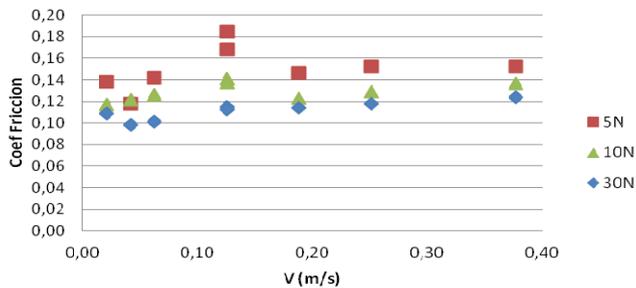


Figura 111. Valores del coeficiente de fricción observados en ensayos pin on disc con contactos plano-plano. Pin con tratamiento Nitrovac, en presencia superabundante de lubricante L3.

Los valores del coeficiente de fricción, aún en el caso de empleo de altas velocidades, siguen mostrando valores en el rango de 0.10-0.15, inferiores claramente a los obtenidos en seco, pero del mismo orden que los obtenidos en ensayos con contacto esfera-plano en presencia de lubricantes. No se alcanzan o se logran reducir los valores del coeficiente de fricción a valores inferiores a 0.08 y además, no se observan efectos claramente favorables asociados a un incremento de velocidad o a una reducción de las cargas o presiones aplicadas. Estos datos sugieren que, al contrario de lo observado con pines planos de acero, no se logra generar capas gruesas por efectos de tipo hidrodinámico con los pines tratados. La Figura 112, ilustra las diferencias si se presentan resultados frente al parámetro H, para ensayos con el lubricante L3.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

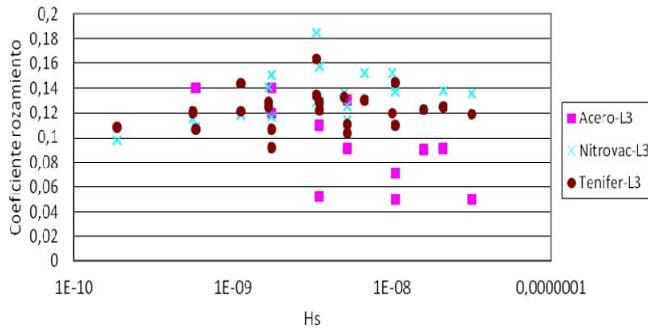


Figura 112. Valores del COF frente al parámetro de Hersey H en ensayos pin on disc con contacto plano-plano y lubricación superabundante.

Entendemos que, dadas las similares condiciones experimentales empleadas, la razón más plausible de estas observaciones se deba a la mayor rugosidad superficial que presentan los pines tratados en comparación con la superficie original de acero. Esta mayor rugosidad de las capas Tenifer o Nitrovac exige, para poder lograr una efectiva separación de las superficies, generar capas de lubricante presurizado por efectos hidrodinámicos de mayor espesor que el necesario en el caso se superficies bien pulidas de baja rugosidad.

Globalmente considerado, el comportamiento tribológico observado con los tratamientos Tenifer o Nitrovac, tal como se suministran por la empresa que efectúa el tratamiento, no parece ofrecer ninguna ventaja desde el punto de vista tribológico respecto al comportamiento observado con el acero simplemente templado y revenido.

Los coeficientes de fricción en seco son superiores y no se ha demostrado factible lograr capas o regímenes de capa gruesa que si han sido observables con acero. En condiciones de lubricación límite, en cambio, se obtienen valores bastante similares a los observados con las muestras de acero.

La opción de aplicar tratamientos de este tipo a las matrices presentaría, en su caso, ventajas respecto al acero desnudo en cuanto a la mayor resistencia al desgaste de la propia matriz, dada la superior dureza de los recubrimientos, pero no en cuanto a un mejor comportamiento tribológico o a la reducción de la fricción en el propio proceso de embutición de las chapas recubiertas con Zn-Ni. En

Resultados y Análisis

todo caso, parece también evidente, tras las observaciones realizadas a las bolas y pines tras los ensayos, que los tratamientos Nitrovac o Tenifer tal como se obtienen a la salida de los hornos de proceso presentan capas externas de alta rugosidad (posiblemente del orden de hasta 3-5 micras, a la vista de las imágenes SEM), que debería en la práctica reducirse mediante pulido u operaciones de acabado hasta lograr valores similares a los recomendados para el acabado de matrices de embutición (inferiores a 0.2 micras).

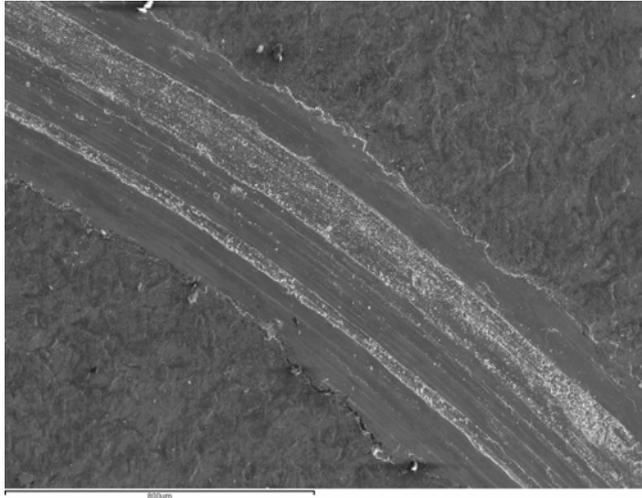


Figura 113. Chapa de Zn-Ni ensayada con bola de acero con tratamiento tenifer tras 50m de recorrido a 300rpm a 75 aumentos (regleta de 800um).

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

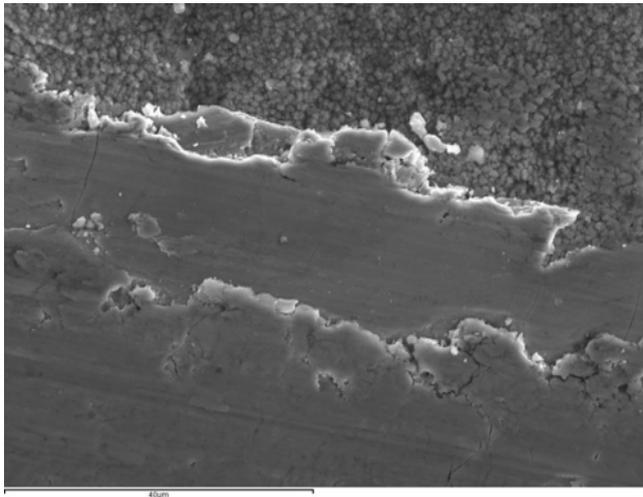


Figura 114. Chapa de Zn-Ni ensayada con bola de acero con tratamiento tenifer tras 50m de recorrido a 300rpm a 1500 aumentos (regleta de 40um).

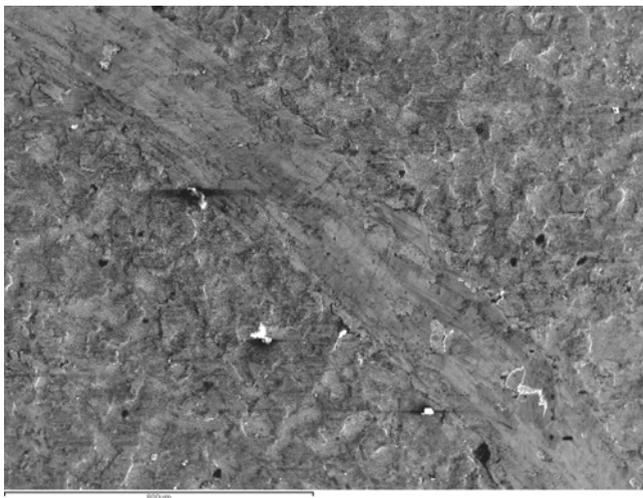


Figura 115. Chapa de Zn-Ni ensayada con bola de acero con tratamiento Nitrovac tras 50m de recorrido a 300rpm a 75 aumentos (regleta de 800um).

6.-MODELIZACION DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.

En este apartado se pretende llevar a cabo un análisis global de los resultados obtenidos en los ensayos de fricción plana (multifricción), que permitirían estimar el comportamiento real esperado en la embutición, integrando en el análisis las observaciones y medidas realizadas de los coeficiente de fricción y su evolución junto con el resto de resultados de los otros ensayos complementarios ya presentados y analizados en una primera aproximación a lo largo de los capítulos anteriores. Se pretende también justificar los posibles mecanismos que controlan el proceso y el comportamiento tribológico del contacto chapas Zn-Ni con las matrices en el proceso de embutición. En este análisis se ha excluido toda referencia a los efectos de los tratamientos térmicos o superficiales de las matrices (Nitrovac/Tenifer), limitándose a interpretar el comportamiento tal como se ha observado de las experiencias realizadas con matrices o pines de acero AISI 52100 templado.

6.1. Valores del coeficiente de fricción y regímenes de lubricación

La mayor parte de modelos propuestos para el análisis del comportamiento tribológico durante la embutición se basan en la curva de Stribeck y en los parámetros operacionales de tipo Hersey, y se deben a contribuciones de varios autores como Emmens, Schipper o Ter Haar. Como ya se indicó en la introducción, esta aproximación al problema proporciona información útil sobre la influencia de varios parámetros: viscosidad, presiones, velocidad, o rugosidad superficial.

Con el fin de ilustrar el conjunto de resultados obtenido globalmente en esta Tesis, se presenta en la Figura 116 el conjunto total de resultados frente al parámetro H, con la exclusión de los resultados en seco. La representación frente al parámetro H tiene sentido en el caso de contactos lubricados, pero no en ausencia de lubricantes.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

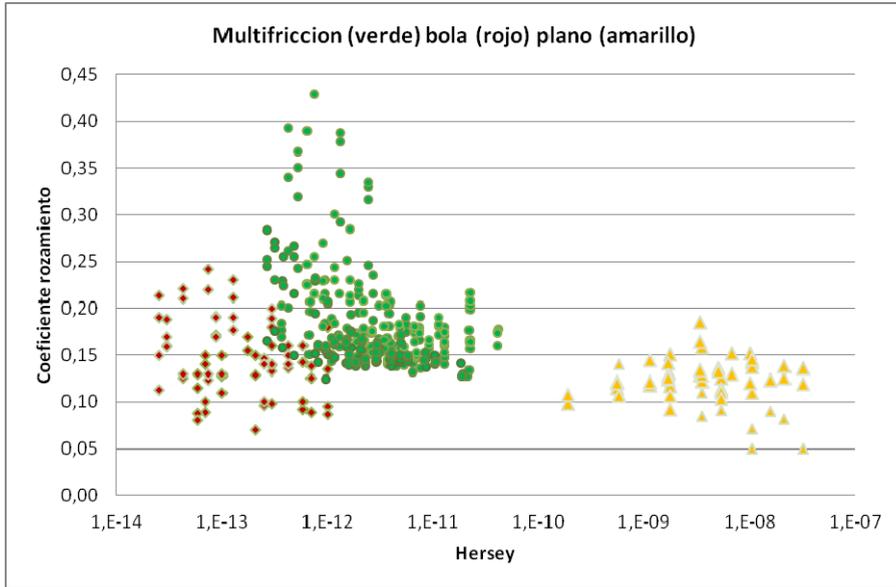


Figura 116. Curva de Stribeck del conjunto de datos obtenidos en ensayos multifricción y pin-on-disc, con matrices de acero y ambos tipos de lubricantes.

El gráfico muestra dos zonas de comportamiento bien diferenciado. Por un lado, el conjunto de resultados de ensayos de multifricción (representados con esferas verdes) y los ensayos con pin esférico (representados con rombos rojos), en los cuales el parámetro H presenta valores bajos y los coeficientes de fricción presentan valores característicos del régimen de lubricación límite o BL, normalmente por encima de 0.10. Por otro lado, el conjunto de datos obtenidos en ensayos de contacto plano-plano con lubricación abundante (triángulos amarillos), en los cuales el empleo de bajas presiones de contacto (menor que 1 MPa) y altas velocidades (63 a 188 mm/s), permite conseguir valores de H por encima de 10^{-9} y hace posible la obtención de condiciones de proceso o ensayo características del régimen mixto, con valores del coeficiente de fricción claramente inferiores a 0.08. Es importante destacar que la transición al régimen mixto se observa exactamente en los mismos valores de $H=10^{-9}$ que en otros trabajos previamente publicados por otros autores Emmens o Ter Haar.

Desde el punto de vista práctico de la embutición de piezas de carrocerías de automóvil, sin embargo, la existencia de condiciones

Resultados y Análisis

que proporcionen valores $H > 10^{-9}$ en un proceso real resulta poco probable. Si bien es cierto que en los procesos reales los valores de velocidad de desplazamiento alcanzan valores elevados, del orden de 50 mm/s o superiores, las presiones de contacto suelen sistemáticamente ser superiores a las aplicadas en estos ensayos, como se analizó en el panorama científico. Por otro lado, en la práctica real de embutición de piezas de carrocería no se emplean condiciones de lubricación superabundante, imprescindibles para lograr una cantidad suficiente de aceite en la interfase chapa-matriz capaz de proporcionar capas de separación con suficiente espesor.

De hecho, en los trabajos citados de Emmens, y con el fin de lograr un amplio campo de condiciones operatorias que permiten lograr condiciones de lubricación mixta o claramente de capa gruesa, se emplearon once diferentes tipos de lubricantes, incluyendo lubricantes no aditivados de viscosidad muy superior a los valores característicos de los aceites realmente empleados por los fabricantes de automóviles. Los valores de la viscosidad variaron desde 4.5 mPa.s a 2880 mPa.s, y solamente se empleó un aceite comercial de embutición, el Quaker Ferrocote 6130, con valores de viscosidad de 55 mPa.s a 20°C. Adicionalmente, la técnica de aplicación del aceite sobre las chapas se hizo con una sobredosis de lubricante con un cepillo o paño y el exceso de lubricante se eliminó raspando con una espátula de plástico sobre las asperezas de la rugosidad inmediatamente antes del ensayo. Este método de aplicación asegura unos contenidos en aceite sobre la chapa muy superiores a los valores normales en el sector, que son del orden de 2 g/m² y que son los que se han utilizado en los ensayos de multifricción realizados en esta tesis.

Tampoco la formación de bolsas o valles cerrados llenos de aceite como consecuencia del proceso de deformación plástica se considera que pueda contribuir a generar efectos de lubricación de tipo hidrostático HPL. Esta formación de bolsas cerradas, de las que el aceite no puede escapar bajo una presión normal a la superficie, es una consecuencia de la deformación de la superficie y acompaña al crecimiento de la fracción de área en contacto S_c , pero no se ha observado en esta investigación que vaya acompañada de un efecto beneficioso (en términos de reducción de los coeficientes de fricción). Esta observación indica que la contribución de una presurización de tipo hidrostático HPL, que ha sido sugerida en algunos trabajos como

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

potencial mecanismo capaz de soportar parte de la presión normal, resulta despreciable en términos cuantitativos para el control de la fricción bajo condiciones de lubricación límite BL pura.

Los resultados obtenidos en esta tesis de los ensayos multifricción deben considerarse, por tanto, como propios del régimen de lubricación límite BL, que es el régimen de lubricación realmente existente en prácticamente todas las operaciones de embutición de chapas de carrocerías en la actualidad.

Es también importante destacar que el conjunto de datos obtenido en los ensayos multifricción proporciona valores del coeficiente de fricción con una elevada dispersión, desde valores del orden de 0.10 hasta valores del orden de 0.35-0.40, próximos a los valores obtenidos en condiciones de lubricación seca en los ensayos pin on disc. En este aspecto, entendemos que los resultados obtenidos en esta tesis reproducen de manera más precisa las variaciones encontradas realmente en la embutición de este tipo de chapas recubiertas que otros trabajos previamente publicados, en los que se asumen valores constantes del coeficiente de fricción para todo el régimen de lubricación límite. Suele citarse como apropiados valores del orden de 0,10 a 0,15, típicos del procesado de chapas desnudas.

Como se esperaba en la programación de ensayos, en cambio, los resultados demuestran que el comportamiento en el régimen BL de las chapas recubiertas con Zn-Ni, puede dar lugar a valores bastante más elevados (hasta 0,25-0,35 en algunos casos) y variables de una zonas a otras de la pieza en función de las presiones y velocidades de deformación locales.

6.2. Condiciones óptimas de procesado de chapas Zn-Ni.

Como se indicó en la introducción, las condiciones o variables operacionales durante la embutición de las piezas reales cambian de unas zonas a otras o incluso durante el propio proceso. En ese sentido, no resulta fácil extrapolar los resultados de los ensayos realizados en condiciones controladas a todas las situaciones reales. No obstante, un

Resultados y Análisis

factor relevante en la práctica, para garantizar un comportamiento reproducible y adecuado durante la embutición, en el mantenimiento de los valores del COF en un rango estrecho de valores, independientemente de las condiciones o zonas de la pieza que se embute. Los valores del COF, obviamente, deben ser bajos, e idealmente similares a los que se emplearon durante diseño de las herramientas y del proceso de embutición.

Tomando como referencia el valor $\text{COF} = 0.15$, obtenido en condiciones de alta velocidad relativa con ambos tipos de aceite L2 y L3, que se muestra además prácticamente independiente de la presión o del número de pasadas, podemos definir como inadecuadas, o de riesgo, aquellas condiciones que proporcionan valores del COF por encima de un valor dado. Eligiendo el criterio de desviaciones menores que un 50% respecto al valor de referencia, se considerarían de riesgo condiciones de proceso que den valores máximos de COF por encima de 0.225-0.23.

Si analizamos sobre los datos disponibles las condiciones que proporcionan valores inaceptables, se encuentra de manera significativa que son determinantes dos variables: las condiciones de lubricación y la velocidad a la que se realizan los ensayos. Adicionalmente, como ya se ha comentado, se tiene el efecto negativo de las pasadas múltiples.

- En el caso SL se observan 16 casos de $\text{COF} > 0.225$ a baja velocidad, de los cuales 11 superan el valor de $\text{COF} = 0.30$. Hay además 3 casos a media velocidad y ninguno a alta velocidad.
- En condiciones L2 se observan 13 casos a baja velocidad, de los que solamente 2 superan el valor $\text{COF} = 0.30$ y ninguno en medias o altas velocidades de ensayo.
- En condiciones L3 se observan 11 casos, exclusivamente a baja velocidad. Ningún ensayo presenta valores por encima de 0.30.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Los resultados sugieren, por tanto, que la disponibilidad de lubricante resulta un factor determinante del comportamiento. Recordemos que SL y L2 son ensayos con el mismo tipo de lubricante Fuchs PL 3802 39S y las diferencias entre las condiciones SL y L2 radican exclusivamente en que, en el caso SL, los ensayos se llevan a cabo tal como es habitual en la práctica real, embutiendo el material en estado de suministro, mientras que en el caso L2 los ensayos se hacen sobre muestras aceitadas en condiciones controladas antes del comienzo de los ensayos.

Las diferencias entre las condiciones L2 y L3, o tipo de aceites empleados, son mucho menos relevantes. Es cierto que se observa un mejor comportamiento en los ensayos multifricción con el aceite L3, que de acuerdo con los datos disponibles y con los análisis efectuados presenta menor viscosidad y menor contenido en aditivos de tipo sulfonatos o ZDDP que el aceite L2, pero las diferencias en comportamiento real son poco relevantes. Los tipos de aditivos, aún siendo de la misma familia, pueden ser más efectivos en el caso del lubricante L3 que el L2. Otro posible factor de influencia, que no se ha analizado con precisión, es el hecho de que su comportamiento tixotrópico sea diferente. Esto podría dar lugar a que, en las condiciones de preparación (escurrido durante 24 horas en posición vertical), la cantidad de aceite remanente sea superior en caso que en otro.

6.3. Modelos paramétricos

Si se evitan las condiciones críticas asociados con una baja cantidad de lubricante (SL), los gráficos de tipo Stribeck pueden proporcionar una estimación adecuada de los coeficientes de fricción, especialmente si se limitan los valores a los resultados obtenidos en las dos primeras pasadas, lo que excluye gran parte de los valores “altos o elevados que solamente se darían en casos excepcionales. Las figuras siguientes presentan modelos matemáticos ajustados a los resultados experimentales.

Resultados y Análisis

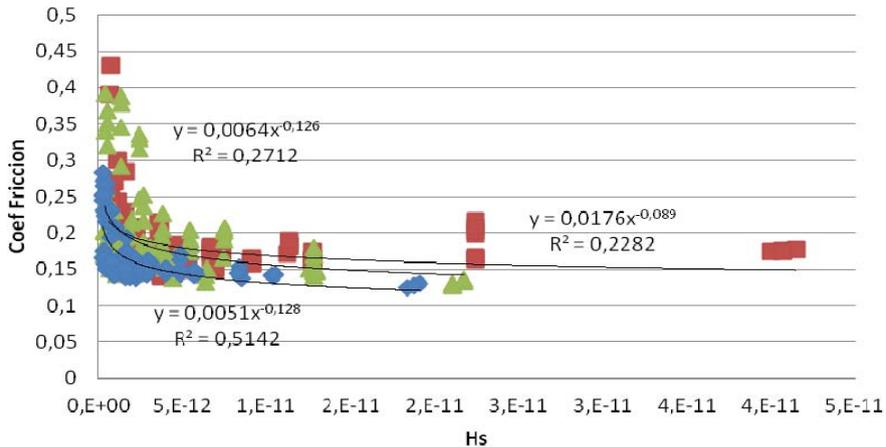


Figura 117. Valores del COF en ensayos multifricción frente al parámetro de Hersey H, y modelos ajustados a los valores experimentales. Siendo el verde estado se suministro, el rojo el lubricante L2 y el azul el lubricante L3.

Figura 118.

Puede observarse que, si bien los datos experimentales pueden representarse de manera apropiada en un gráfico de tipo Stribeck, frente al parámetro H, los ajustes a modelos matemáticos simples proporcionan muy baja fiabilidad. En el análisis de los datos y resultados obtenidos se ha trabajado extensamente para la obtención de ajustes a modelos más precisos, que, en su caso, podrían incorporarse o implementarse en los programas de simulación MEF de los procesos de embutición de este tipo de chapas. La metodología es similar a la obtención de la curva de Stribeck, pero empleando como parámetro operacional un valor alternativo al parámetro de Hersey convencional.

El parámetro seleccionado, que sería adecuado en el caso de comportamientos en lubricación límite, combina simultáneamente los efectos de las variables presión de contacto P, la velocidad V y número de pasadas o distancia recorrida en el ensayo L en la forma:

$$\text{COF} = f(P^m * V^n * L^r) \quad (20)$$

Los valores de los coeficientes m, n y r se obtuvieron por optimización del ajuste de la curva a los datos experimentales. Mediante un proceso de aproximaciones sucesivas, se obtuvieron los

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

coeficientes que proporcionan ajustes con coeficientes de regresión más elevados. El valor óptimo del exponente m de la presión fue $m = -0.1$, mientras que el valor óptimo del exponente n de la velocidad fue $n = 0.6$.

La Figura 119 a Figura 121 presentan gráficamente los resultados frente al parámetro propuesto, y los modelos ajustados, para los diferentes tipos de lubricantes empleados. En todos los casos se obtiene, como en las representaciones convencionales frente al parámetro H, una reducción gradual de los valores de fricción conforme se incrementa el valor del parámetro alternativo propuesto.

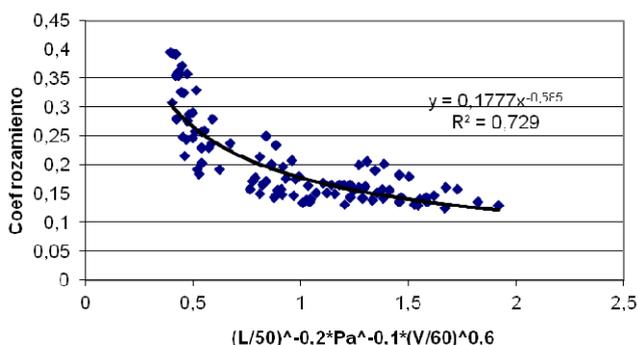


Figura 119. Valores del coeficiente de fricción frente al parámetro operacional $V^{0.6}/(L^{0.2}P^{0.1})$ en estado suministro.

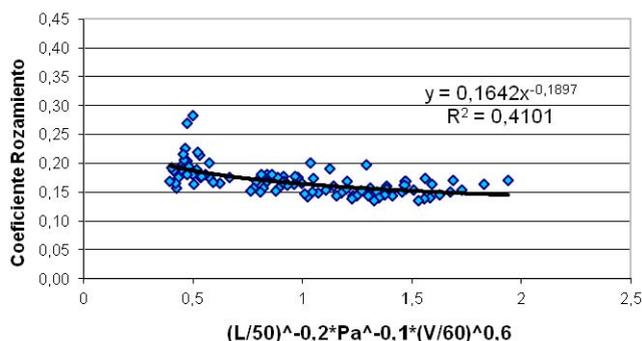


Figura 120. Valores del coeficiente de fricción frente al parámetro operacional con lubricante L2

Resultados y Análisis

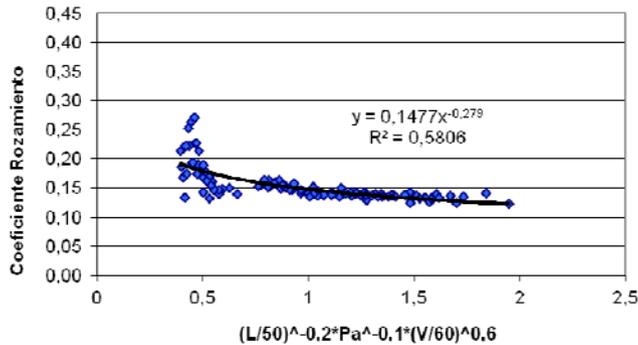


Figura 121. Valores del coeficiente de fricción frente al parametro operacional con lubricante L3

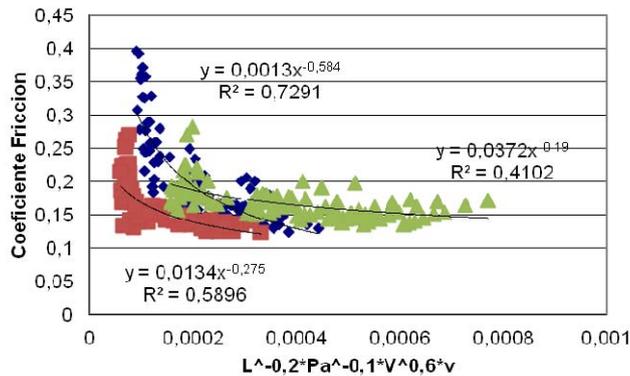


Figura 122. Comparacion entre suministro (azul) lubricante L2 (verde) y lubricante L3(rojo).

6.4. Fricción en Condiciones BL. Efectos de la fracción de superficie de contacto S_c .

Bajo condiciones de lubricación límite, existe contacto físico entre las herramientas y los picos más altos de la topografía superficial de las chapas, de modo que parte de la superficie aparente está en contacto y parte permanece sin contactar. Si se asume que en el contacto se producen fenómenos de fricción por adherencia o interferencia, los valores del coeficiente de fricción suelen aumentar con la fracción de área en contacto S_c y con la resistencia a la deformación por cizalladura del recubrimiento o de las capas en contacto¹⁰⁸. Un modelo

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

simple, empleado para modelar el comportamiento en condiciones de lubricación mixta, es también aplicable al caso.

$$\mu = \frac{\tau_c A_c + \tau_l A_l}{N_c + N_l} = \frac{(\tau_c S_c + \tau_l S_l) \cdot A}{N} = \frac{(\tau_c S_c + \tau_l S_l)}{P} \quad (21)$$

Donde

μ es el coeficiente de fricción observado

τ_c es la resistencia al corte media de la zona en contacto

τ_l es la resistencia al corte del lubricante en los valles

A es el área total aparente de contacto

N es la carga normal aplicada

$P = N/A$ es la presión aparente de contacto

A_c es el área real en contacto y A_l el área ocupada por los valles con aceite;

$A_c + A_l = A$

S_c es la fracción del área total en contacto; $S_c = A_c/A$

S_l es la fracción del área total ocupada por bolsas de lubricante (valles)

Obviamente, debe cumplirse siempre que $S_c + S_l = 1$

La expresión anterior permite justificar la contribución de S_c al incremento de los valores el coeficiente de fricción. Dado que τ_c es siempre claramente superior a τ_l , los incrementos en S_c deberían ir acompañados de un incremento paralelo en los valores de μ . Las observaciones realizadas en esta tesis, sin embargo, muestran que los efectos de crecimiento de S_c no presentan una correlación simple o directa con los valores del coeficiente de fricción. De hecho, para ensayos a medias o altas velocidades se observa que los valores del COF son prácticamente independientes del valor de S_c .

La resistencia al cortante de las zonas en contacto τ_c es a su vez fruto de varios efectos

- Una parte de la superficie en contacto puede estar efectivamente cubierta por capas límite BL, y el esfuerzo

necesario para cortarlas será τ_{bl} . La magnitud S_{bl} representa la fracción del área en contacto cubierta efectivamente por capas límite.

- En el resto de la superficie no protegida por las capas límite S_k ocurrirán fenómenos de adhesión por contacto seco metal-metal, cuya resistencia al corte tiene un valor característico k dependiente de los materiales en contacto.
- En toda la superficie en contacto, tanto bajo las capas de tipo límite como en zonas secas, pueden darse además fenómenos de rozamiento por interferencias mecánicas o arañado de la superficie (ploughing), contribuyendo a un incremento en la resistencia al corte cuya evaluación también resulta difícil, ya que depende de la magnitud y forma de las asperezas abrasivas. Su contribución es aditiva a la resistencia debida a los otros efectos, y su magnitud puede definirse por τ_p . Globalmente, la resistencia al corte observada en la zona de contacto obedece, por tanto, a una expresión

$$\tau_c = \frac{kS_k + \tau_{bl}S_{bl}}{S_c} + \tau_p \quad (22)$$

Si se desprecia el efecto de tipo interferencial τ_p , lo que en el caso de trabajar con bajas rugosidades en la matriz y en ausencia de restos del recubrimiento desprendidos en la zona de contacto se puede considerar aceptable, entonces los valores de fricción son función de la relación entre la fracción de área protegida por capas BL y la fracción de área en seco y de las resistencias respectivas a la cizalladura del material y de las capas límite.

El rozamiento en películas delgadas (monocapas) de lubricante, bajo las condiciones de lubricación límite, fue ya analizado en 1922 por Hardy¹⁰⁹ y Doubleday Langmuir¹¹⁰ o Bowden^{111 112}. Más recientemente, Godfrey¹¹³ analizó los diferentes mecanismos de formación de capas límite. Se han llevado a cabo diferentes trabajos sobre los mecanismos de formación de capas monomoleculares, haciendo uso de las modernas técnicas de análisis superficial. Las capas monomoleculares son extremadamente delgadas, y son capaces de soportar presiones muy altas. Briscoe y Tabor midieron el espesor

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

de capas de estearato cálcico y de ácido esteárico, con valores típicos de unos 2,5 nm. Los efectos de las condiciones de trabajo en la resistencia al corte de las capas siguen leyes bien conocidas:

Para los efectos de la presión se cumple la expresión:

$$\tau = C \cdot p^n \quad (23)$$

Para los efectos de la temperatura se cumple la expresión

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{q/RT} \quad (24)$$

Para presiones del orden de 100 MPa, la resistencia al corte de las capas τ_{bl} varía entre unos 4 y 10 MPa^{114 115 116}.

6.5. Efectos de la Presión y la Velocidad

Como ya se ha indicado, los ensayos multifricción realizados con mordazas plano-plano indican que las contribuciones de tipo hidrodinámico son cuantitativamente poco importantes. Una contribución de este tipo debería ponerse de manifiesto, de acuerdo con la teoría hidrodinámica, por una reducción en los valores de fricción cuando la velocidad aumenta y cuando la presión se reduce, como si se observa en los ensayos pin on disc con lubricación superabundante. Sin embargo, el comportamiento en ensayos multifricción es diferente. Si es cierto que se observan efectos de reducción de los valores del coeficiente de fricción cuando la velocidad se incrementa. Sin embargo, los aumentos de presión, en vez de hacer aumentar el valor del coeficiente de fricción, o bien no provocan efectos relevantes, como ocurre con el lubricante L3, o bien lo reducen ligeramente, como ocurre con el lubricante L2.

La reducción en los valores de μ para altos valores de la presión es un fenómeno bien conocido en aquellos casos donde la fracción de área en contacto S_c no crece linealmente con la presión aparente P , especialmente para altas cargas aplicadas. Este comportamiento se define como “asperity persistence”, y fue observado inicialmente por Moore¹¹⁷ en 1948 y posteriormente por otros autores^{118 119 120}. Se ha sugerido por Childs¹²¹ que gran parte de la desviación de la linealidad

Resultados y Análisis

debe ser atribuida a la recuperación elástica, que hace que la superficie real medida sea inferior a la superficie real en contacto. Sin embargo, el fenómeno ha sido también observado con mediciones in situ. Moore atribuyó el fenómeno al endurecimiento por deformación del material. Sin embargo, el fenómeno se ha observado también con materiales que no endurecen por deformación por Uppal¹²² y Williamson¹²³.

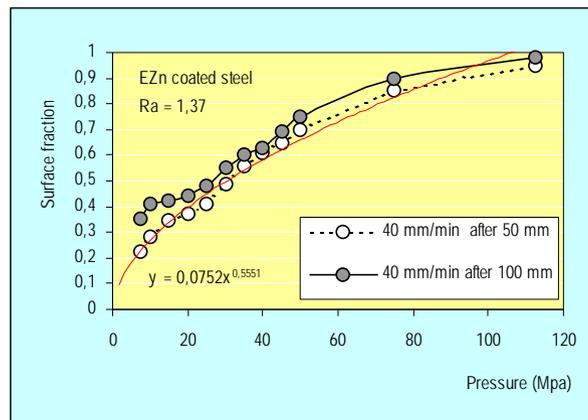


Figura 123. Evolución de los valores del área real de contacto S_c en ensayos de contacto plano-plano con muestras recubiertas de cinc puro electrolítico.

También se ha observado en ensayos realizados por nuestro grupo de investigación en chapas recubiertas con cinc electrolítico, como se muestra en la Figura 123. Se ha propuesto como posible explicación la interacción subsuperficial de la deformación provocada en las asperezas vecinas con comprobaciones numéricas recientes¹²⁴. Aunque los resultados parecen justificar el fenómeno, se señala en la literatura que los mecanismos físicos involucrados y sus efectos en el desarrollo del área real de contacto son todavía desconocidos.

En nuestras experiencias con las chapas recubiertas Zn-Ni no se ha observado, sin embargo, un efecto claro de “asperity persistence” o de resistencia creciente de las asperezas a la deformación, ya que los crecimientos de S_c en los ensayos multifricción son en general, lineales con los valores de la presión aparente aplicada, y no se observa claramente el efecto de amortiguación bajo altas cargas.

En nuestro caso, el incremento de S_c va paralelamente acompañado de una reducción en la rugosidad: se reducen R_a , la altura de picos R_p , y

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

en general todos los parámetros asociados a la altura del perfil. Esta reducción es también significativamente lineal con la presión aplicada, como ocurre con los crecimientos de la fracción de área en contacto Sc. De hecho, ambos fenómenos están estrictamente relacionados con el aplastamiento progresivo de las asperezas superficiales.

Respecto al mecanismo actuante, y a diferencia de lo que ocurre con las chapas recubiertas de cinc puro, parece desprenderse de la ausencia de cambios en la estructura de los recubrimientos (difracción XRD), que los fenómenos de aplastamiento observados no se deben exclusivamente a la deformación plástica del propio recubrimiento, sino al aplastamiento de las asperezas sub-superficiales del propio acero de las chapas, cuya dureza (HB 80) es sensiblemente inferior a la dureza del propio recubrimiento Zn-Ni (HV=315 HV).

Los valores del coeficiente de fricción encontrados son, para el caso de las primeras pasadas, sólo ligeramente superiores a los característicos de la fricción en capas límite. El mantenimiento de valores estables de dicho valor, aún cuando cambian de manera significativa las condiciones de contacto (área real en contacto), demuestra que el efecto más determinante del comportamiento observado se debe a la contribución de las capas límite.

En ausencia de estas capas, lo que resulta más probable conforme se incrementa el número de pasadas, se observa sistemáticamente un incremento de los valores del coeficiente de fricción, especialmente en el caso de los ensayos a baja velocidad y/o en condiciones de lubricación SL o de suministro. Los valores más elevados del coeficiente de fricción, en tales casos, deben atribuirse a fenómenos de fricción asociados con la deformación y/o cizalladura del sustrato de acero. Es poco probable que el comportamiento observado se deba a la deformación del propio recubrimiento, cuya elevada dureza daría lugar, bajo presiones poco elevadas, y en ausencia de capas límite, a valores del coeficiente de fricción muy superiores a 1.

La necesaria contribución de las capas límite formadas a partir del aceite residual sobre las superficies se pone especialmente de manifiesto al comparar los resultados, en idénticas condiciones, de muestras ensayadas en estado SL, y empleando el mismo tipo de

aceite, de las muestras en condición de lubricación L2. En el caso de no disponer de una adecuada cantidad de lubricante (Caso SL), el rápido crecimiento de S_c elimina los valles y deja la superficie rápidamente sin capacidad para seguir aportando aditivos a la zona de contacto, observándose un rápido incremento en los valores del coeficiente de fricción, que alcanza valores superiores a 0,30 en la tercera pasada.

6.6. Efectos de los aditivos BL y la Temperatura

En los ensayos multifricción se ha observado, en todas las condiciones de lubricación, un efecto favorable del uso de altas velocidades, que parece ser ajeno a la generación de efectos micro-hidrodinámicos convencionales. Una posible explicación de estos efectos favorables se atribuye a la creación de condiciones favorables para la formación de capas límite debidas a incrementos locales de temperatura en las asperezas. Cuando dos sólidos deslizan, la mayor parte del trabajo o energía involucrada en la deformación elástica y plástica se disipa en forma de calor, provocando un notable incremento local de las temperaturas. Este incremento de temperatura provoca cambios instantáneos en la zona inmediata de contacto, denominada temperatura instantánea o flash. Las temperaturas instantáneas o “flash” dependen de la velocidad relativa y de los valores del coeficiente de fricción en la interfase, y en la zona de contacto crecen cuanto mayor es la presión en una zona deformada, de acuerdo con el modelo de Archard¹²⁵. Posteriormente se han generado nuevos modelos¹²⁶ (Ashby 1991) que han encontrado amplia aplicación y que en años recientes se han empleado extensivamente para justificar el comportamiento tribológico de diferentes sistemas¹²⁷. La aplicación de dichos modelos al aplastamiento de asperezas de rugosidad similares a las encontradas sobre las chapas, asumiendo que la presión sobre una aspereza o pico permanece sensiblemente constante independientemente de la presión aplicada, proporciona valores de incremento de T_{flash} del orden de hasta 80°C por encima de la temperatura general en el contacto¹²⁸, que se consideran, en el caso de ensayos en frío o de corta duración, suficientes para activar la

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

formación de capas adsorbidas por reacción química a partir de los esteres de ácidos grasos o películas por reacción de aditivos de EP.

Dado que tanto la reactividad de los aditivos que forman capas límite como la estabilidad de las capas formadas dependen fundamentalmente de la temperatura local, un incremento de temperatura excesivo podría provocar también la destrucción o alteración de las capas límite adsorbidas. Este fenómeno es menos probable en la embutición real o en los experimentos multifricción que en los ensayos realizados con el sistema pin-on-disc, en el que el material va calentándose gradualmente conforme se incrementa la distancia recorrida.

De los resultados se puede concluir que en las condiciones BL, resulta fundamental disponer de aceites correctamente aditivados y en cantidad suficiente como para evitar su ausencia a nivel local (lubricant beakdown). Los dos tipos de lubricantes empleados en la embutición real (L2 y L3) parecen ser capaces de proporcionar capas límite capaces de mantener valores bajos y constantes de los coeficientes de fricción, en valores próximos a 0.15 si se emplean velocidades de procesado de 240 mm/min o superiores.

En relación con la disponibilidad de aceite, resulta también determinante aplicar una cantidad suficiente del mismo sobre la chapa, y garantizar que la topografía superficial de la misma y su evolución durante el proceso (aplastamiento por efecto de altas presiones y/o pasadas múltiples), garantice al mismo tiempo una cierta cantidad de valles (no importa si son abiertos o cerrados) capaces de retener lubricante. En ausencia de estas condiciones, sólo los mecanismos de tipo HD o EHD podrían aportar o reducir los valores del coeficiente de fricción, pero como hemos comprobado, su eficacia cuantitativa, frente a los efectos de las capas BL es despreciable en las condiciones habituales de procesado de chapas recubiertas.

En comparación con resultados obtenidos con otros tipos de chapas desnudas o recubiertas con Zn (electrolítico o aplicado por inmersión), el comportamiento de las chapas Zn-Ni presenta algunas similitudes y diferencias. El hecho de trabajar en condiciones BL es similar, y también la necesidad de disponer de cantidades adecuadas de aceite

Resultados y Análisis

con aditivos capaces de formar capas límite, que son las responsables del comportamiento general considerado “adecuado” durante la embutición.

Entre las diferencias, la principal está asociada a la elevada dureza del recubrimiento Zn-Ni que, al contrario de los otros tipos de recubrimientos, es mucho más dura que el propio acero de las chapas. También la naturaleza intermetálica del propio recubrimiento, que aparentemente no sufre cambios o deformación plástica durante el paso entre las matrices en los ensayos multifricción. Se observa aplastamiento, que se produce fundamentalmente en el sustrato. Se observa también finalmente y bajo altas cargas algunos efectos de abrasión, que se consideran producidos por restos del propio recubrimiento desprendidos del mismo en forma de partículas de pequeño tamaño. Otra diferencia relevante es la menor sensibilidad de los valores del COF frente al crecimiento de la fracción de superficie en contacto Sc. En un amplio estudio de chapas recubiertas con cinc puro, realizado por nuestro grupo de investigación sobre bobinas reales, se demostró que las chapas que daban problemas en la embutición real presentaban mayores valores de la fracción de área en contacto Sc y simultáneamente mayores valores del coeficiente de fricción máximo. El efecto negativo de altos valores de Sc parece estar asociado, en dicho caso, al efecto de agotamiento de reservas de lubricante aditivado y a la incapacidad en el caso del cinc puro para seguir formando constantemente capas límite sobre material recién expuesto a la atmósfera por cizalladura del propio recubrimiento, algo que aparentemente no ocurre en el caso de los recubrimientos cinc-níquel. Estos en cambio, presentan el inconveniente frente al cinc puro de los mayores valores de COF en condiciones de lubricación seca o en ausencia de capas límite.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

7. CONCLUSIONES

7.1. Sobre el régimen de lubricación existente en las operaciones reales de embutición.

Considerando los objetivos de la tesis y los antecedentes científicos sobre el tema, se han planificado los ensayos tribológicos a realizar en la investigación llevando a cabo un barrido amplio de las variables operacionales: velocidad y presión, para diferentes lubricantes de uso habitual en el sector, y con posibilidad de efectuar pasos múltiples sobre la misma zona, con el fin de reproducir las condiciones operacionales que se dan en los procesos reales de embutición de piezas de carrocerías de automóviles con chapas recubiertas de aleaciones Zn-Ni en zonas de contacto plano-plano.

El análisis de las condiciones operacionales del proceso de embutición indica que los procesos reales se llevan a cabo en un régimen de lubricación límite, con valores del parámetro H por debajo de 10^{-10} m, debido fundamentalmente a los elevados valores de presión y a la baja viscosidad de los lubricantes habitualmente utilizados. Los ensayos realizados en la presente tesis se han llevado a cabo en un equipo de ensayos especialmente diseñado para este fin, con el cual se han cubierto un amplio rango de valores del parámetro H entre 10^{-10} a 10^{-13} m. Los resultados de estos ensayos de contacto plano-plano se han complementado en esta tesis con ensayos en equipos pin-on-disk, en los que es posible extender las condiciones operacionales a contactos en seco y a contactos con lubricación superabundante o de capa gruesa, con valores del parámetro H entre 10^{-9} y 10^{-7} m.

7.2. Sobre los valores del COF en régimen de lubricación límite.

En trabajos anteriores de otros investigadores que han explorado el comportamiento global de sistemas lubricados en contactos plano-plano, el valor del coeficiente de fricción en la zona de lubricación límite se considera constante. Los valores publicados para los contactos con chapas recubiertas de Zn-Ni son del orden de 0.15. Los estudios realizados en esta tesis confirman, sin embargo, que existen

Conclusiones

importantes diferencias de comportamiento en lubricación límite. Los valores del coeficiente de fricción observados en el régimen de lubricación límite no se mantienen constantes y oscilan significativamente entre 0,13 y 0,45. Estos resultados son coherentes con las observaciones o problemas encontrados en los procesos reales cuando se procesan este tipo de chapas.

7.3. Sobre los efectos de las variables del proceso.

Los valores observados del coeficiente de fricción en contactos plano-plano en condiciones de lubricación límite o BL muestran una escasa dependencia de la presión, tanto en experiencias con chapas en estado de suministro (SL) como cuando se aplican lubricantes en cantidades controladas. Únicamente en condiciones de suministro (SL), con una cantidad de lubricante escasa, se observa una gran dispersión en los valores del coeficiente de fricción (COF) con la variación de la presión, especialmente si los ensayos se llevan a cabo con velocidades bajas. Si se incrementa la velocidad, la dispersión de resultados desaparece, observándose que los valores del COF permanecen sensiblemente constantes.

En condiciones de lubricación más uniformes, como las conseguidas al aplicar lubricantes L2 o L3 en cantidades controladas, el COF se hace prácticamente insensible a las variaciones de la presión. Se observa, sin embargo, una notable reducción y una elevada uniformidad de los valores del COF si se incrementa la velocidad.

Mediante secuencias de pasadas múltiples se reproducen los efectos de las operaciones de re-embutición o el paso previo por otras zonas de la matriz, observándose en general un deterioro de la topografía superficial del material y aumentos en el coeficiente de fricción con el número de pasadas. Los efectos negativos de las pasadas sucesivas se aprecian especialmente cuando se llevan a cabo ensayos con baja velocidad. Para velocidades de desplazamiento elevadas, los resultados son prácticamente independientes del número de pasadas tanto para el lubricante L2 como para el lubricante L3.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

Con la utilización de los lubricantes, el efecto de dañado del material con los pasadas se minimiza, sobre todo a velocidades elevadas, donde prácticamente el coeficiente de fricción es similar en todas las pasadas.

No se ha observado un efecto relevante derivado del tipo de lubricante empleado, a pesar de que presentan diferente viscosidad y contenido en aditivos. Los resultados FTIR indican que el aceite L2 (Fuchs) presenta un contenido en aditivos ligeramente superior al del aceite L3 (Ferrocote), tanto en aditivos de tipo sulfonato como en aditivos antidesgaste. En los ensayos de pasadas múltiples en condiciones BL, el comportamiento del lubricante L3 de menor viscosidad y menor cantidad de aditivos destaca sobre el L2, con menores valores de COF y menor dispersión. Las diferencias, aún no siendo significativas, podrían atribuirse a un diferente comportamiento tixotrópico o al tipo de aditivos que incorpora el lubricante L3.

7.4. Sobre los efectos de la superficie real de contacto y los mecanismos de lubricación.

Para cualquiera de las condiciones de lubricación empleadas en los ensayos de pasadas múltiples (SL, L2 o L3), se observa un crecimiento cuasi-lineal de la superficie real de contacto conforme se incrementa la presión aparente aplicada. Se observa claramente también que tanto los incrementos de presión como las pasadas sucesivas provocan una reducción de los valores de material portante, una reducción de la rugosidad, en paralelo con el incremento de los valores de la superficie real en contacto S_c . Esta modificación superficial provoca una reducción progresiva de la capacidad de la superficie para retener o almacenar aceite en los valles junto con una mayor fracción de área en contacto real. Esta evolución de la topografía superficial, en un régimen de lubricación mixto, debería llevar asociado un incremento gradual en los valores de fricción.

A diferencia de lo que ocurre con las chapas recubiertas de cinc puro, los fenómenos de aplastamiento observados no se deben exclusivamente a la deformación plástica del propio recubrimiento,

Conclusiones

sino al aplastamiento de las asperezas sub-superficiales del propio acero de las chapas, cuya dureza (HB 80) es sensiblemente inferior a la dureza del propio recubrimiento Zn-Ni (HV=315 HV).

Los resultados demuestran que, para una presión dada, el valor del COF crece con el valor del área real de contacto, pero la influencia relativa de este crecimiento se hace menor conforme se incrementa la velocidad relativa, de modo que para velocidades altas de 240mm/min, se observa que el valor del COF resulta prácticamente independiente de la fracción de área en contacto y por lo tanto, también resulta independiente de la presión Pa aplicada y del número de pasadas.

En las condiciones óptimas de alta velocidad relativa, los valores del COF se mantienen constantes y son del orden de 0.10-0.15. No muestran dependencia de la presión o de los valores del área real en contacto, por lo que se atribuyen al corte de las capas límite generadas por los aditivos de los lubricantes. Los efectos favorables de las elevadas velocidades se atribuyen a la generación de incrementos locales de temperatura Tflash sobre las asperezas en contacto, facilitando la formación de capas límite.

7.5. Condiciones críticas de procesado.

Se han determinado las condiciones críticas de operación que dan lugar a incrementos de los valores del coeficiente de fricción por gripado, asegurando el rango de condiciones de proceso que permiten una embutición en condiciones estables de la chapa con capas Zn-Ni. Para evitar condiciones críticas son determinantes dos variables: las condiciones de lubricación, que deben asegurar una cantidad inicial suficiente de aceite, y la velocidad, que debe ser suficientemente elevada. Adicionalmente se tiene el efecto negativo de las pasadas múltiples, que es solamente relevante en condiciones de baja disponibilidad de aceite o baja velocidad.

De los resultados globales se puede concluir que en las condiciones BL que se dan en los procesos reales, resulta fundamental disponer de aceites correctamente aditivados y en cantidad suficiente como para

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

evitar su ausencia a nivel local (lubricant beakdown). Los dos tipos de lubricantes empleados en la embutición real (L2 y L3) parecen ser capaces de proporcionar capas límite para mantener valores bajos y constantes de los coeficientes de fricción, en valores próximos a 0.15 siempre que se emplean velocidades de procesamiento de 240 mm/min o superiores.

En relación con la disponibilidad de aceite, resulta también determinante aplicar una cantidad suficiente del mismo sobre la chapa, y garantizar que la topografía superficial de la misma y su evolución durante el proceso (aplastamiento por efecto de altas presiones y/o pasadas múltiples), garantice al mismo tiempo una cierta cantidad de valles (no importa si son abiertos o cerrados) capaces de retener lubricante. En ausencia de estas condiciones, sólo los mecanismos de tipo HD o EHD podrían aportar o reducir los valores del coeficiente de fricción, pero como hemos comprobado, su eficacia cuantitativa, frente a los efectos de las capas BL es despreciable en las condiciones habituales de procesamiento de chapas recubiertas

7.6. Modelización de los valores de COF.

Se ha modelizado los valores del coeficiente de fricción en contacto plano-plano, empleando modelos paramétricos del tipo

$$\text{COF} = f(P^m * V^n * L^r),$$

que permiten estimar los valores de COF en contactos plano-plano, como ocurre en los procesos reales bajo el prensachapas. Las modelizaciones paramétricas realizadas con el modelo en el que intervienen la longitud de contacto o número de pasadas, la presión y la velocidad se ajustan mucho más a los datos experimentales que los modelos ajustados empleando como referencia el convencional parámetro de Hersey H comúnmente utilizado.

7.7. Sobre el comportamiento en ensayos pin-on-disc con herramientas de acero templado.

Las condiciones de contacto esfera-plano no permiten obtener un gradiente de presiones en el aceite adecuado para lograr condiciones hidrodinámicas de lubricación. Esta configuración bola sobre disco ofrece valores de presión media claramente superiores a los que se obtienen en las condiciones reales de embutición (inferiores a 0.1 GPa). Resulta obvio, por tanto, que estas condiciones de ensayo no reproducen exactamente las condiciones reales. No obstante, se consideran de interés por la información que puede extraerse respecto a la contribución relativa al comportamiento tribológico de diferentes efectos o variables del sistema.

En los ensayos con contacto esfera-plano en seco, el COF (del orden de 0,4 a 0,6) tiende a crecer conforme se incrementa en recorrido total. Se observan grandes oscilaciones en las fuerzas de fricción y la aparición sistemática de algunos picos o valores elevados, que se atribuyen a la aparición de microgripados o microsoldaduras entre el recubrimiento y las bolas de acero por fenómenos de adhesión o rozamiento cohesivo. Normalmente, estos picos se observan únicamente con grandes cargas, y tienden a aparecer con menor recorrido total cuanto mayor es la carga aplicada.

La tendencia a la adhesión del recubrimiento con las bolas de acero se ha visto confirmada en estudios mediante microscopía SEM y microanálisis de la superficie de las muestras y las bolas tras los ensayos. Apreciándose el gran deterioro o modificación de la topografía superficial y la presencia de material con restos de “debris” o material triturado del recubrimiento Zn-Ni, que una vez producido actúa como tercer cuerpo contribuyendo al desgaste y al daño abrasivo.

Los resultados obtenidos en ensayos en condiciones de lubricación superabundante, los valores del COF, se mantienen sensiblemente constantes, o incluso decrecen con la distancia recorrida, con valores en el rango 0.10-0.20, valores claramente inferiores a los observados en ensayos en seco, si bien no alcanzan valores típicos de las

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

condiciones de lubricación de capa gruesa, del orden de 10^{-3} . La reducción gradual de los valores del COF se atribuye a la formación de capas límite entre los aditivos del aceite y las superficies en contacto y al aplastamiento progresivo de las asperezas en la chapa.

Los ensayos con contactos bola-plano con lubricación superabundante cubren un rango de valores del parámetro H entre 10^{-13} y 10^{-14} m, propio del régimen de lubricación límite o BL, con valores incluso inferiores a los del ensayo multifricción, dado que en los contactos bola-plano se obtienen muy altos valores de presión local.

Mediante los ensayos pin-on-disk de contactos plano-plano, en presencia de lubricación superabundante, ha sido factible el análisis del comportamiento tribológico en un rango del parámetro H superior a 10^{-9} , observándose efectivamente una transición hacia valores del COF más bajos, inferiores a 0.05 y propios de un régimen de lubricación mixta. La transición al régimen mixto se observa para valores de H similares a los observados por Emmens.

En este régimen, y a igualdad de condiciones de velocidad y carga, los valores del coeficiente de fricción observados son ligeramente inferiores para el aceite L2 de mayor viscosidad (Fuchs PL 3802 39S) que para el lubricante L3 (Ferrocote S6130). Asumiendo la existencia de contribuciones de tipo hidrodinámico, el mejor comportamiento del aceite L2 se vería favorecido por la mayor viscosidad del mismo.

7.8. Sobre los efectos de los tratamientos superficiales de nitruración.

Se han comparado cualitativa y cuantitativamente, mediante ensayos en microtribómetro, el efecto de dos tratamientos superficiales antidesgaste (nitruración en baños de sales o nitruración gaseosa en vacío) que podrían aplicarse a las matrices de embutición. Globalmente, los resultados de los ensayos indican que los tratamientos aplicados no ofrecen ventajas en comparación con el uso de las matrices de acero tratado.

Los valores iniciales observados del COF en seco son del mismo orden que con acero AISI52100, pero se alcanzan valores incluso

Conclusiones

superiores en los ensayos con tratamientos de nitruración, claramente por encima de 0.5. El tratamiento Tenifer de nitruración en baño de sales presenta un comportamiento más cohesivo, mostrando mayores desgastes y mayores coeficientes de fricción prácticamente para cualquier condición de servicio.

En presencia de lubricantes, la disminución del COF es notable, hasta valores propios de un régimen BL, tanto en contactos bola-plano como en contactos plano-plano, pero sin que se obtengan valores de COF inferiores a los previamente observados con bolas o pines planos de acero. Incluso con valores del parámetro H elevados, no ha sido posible obtener con los pines tratados unas condiciones de lubricación en régimen mixto, que si han sido observadas en acero. Este diferente comportamiento se atribuye a la elevada rugosidad de las superficies tratadas, que se ensayaron sin tratamientos adicionales de pulido.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

8. TAREAS ADICIONALES

Los resultados obtenidos en la tesis permiten interpretar el comportamiento de las chapas recubiertas con Zn-Ni durante los procesos de embutición, cuando estos se llevan a cabo en las condiciones de lubricación habituales.

En esta tesis no se ha abordado el estudio de la influencia de la topografía superficial de las chapas. En todos los casos se ha trabajado con muestras de la misma bobina original. Dados los importantes efectos de la topografía en la capacidad de transporte y almacenamiento de lubricante en condiciones BL, se considera interesante llevar a cabo ensayo similares a los realizados, pero con chapas de diferentes topografías, especialmente en el rango de bajas velocidades que es donde se observan mayores riesgos.

Los efectos de los aditivos deberían confirmarse mediante estudios específicos para confirmar su existencia y naturaleza sobre el recubrimiento.

Sería interesante el análisis de superficie por espectroscopia fotoelectronica de rayos X, XPS, obteniendo las energías de los elementos presentes en el interior de la huella de desgaste.

Las condiciones de electrodeposición pueden condicionar de forma significativa el grado en que el recubrimiento “reproduce” la topografía original del acero obtenida en la etapa de skin-pass. En el estudio de los efectos de la topografía, y en cooperación con la industria suministradora (Arcelor), sería aconsejable un análisis específico de los efectos que las condiciones de electrodeposición (densidades de corriente- agitación, etc...) y las estructuras y topografía del material base, ejercen sobre la estructura y la topografía final tras la aplicación de los recubrimientos.

El uso de tratamientos externos sobre las matrices es habitual, con el fin de incrementar su vida útil. Se considera conveniente repetir de nuevo los ensayos con los tratamientos Tenifer o Nitrovac ya ensayados, pero tras un cuidadoso acabado superficial previo de las

Tareas Adicionales

herramientas, de modo que se reduzcan los valores de rugosidad. El estudio podría también aplicarse a los efectos de tratamientos de cromado duro, ampliamente utilizados en la actualidad.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

9. BIBLIOGRAFIA

¹ Wilson, W. R. D. 1978. "Friction and lubrication in sheet metal forming in Symposium on Mechanics of sheet metal forming". General Motors Research Lab. Plenum Press. Nueva York: 166-173.

² Hersey M.D. (1915) "On the laws of lubrication of journal bearings" *ASME trans.* 37, 167-202

³ Miguel V. (2005) "Investigación de la metodología para la determinación de los indicadores de deformación y de cohesión en tensiones multiaxiales de embutición en deformación plana. Aplicación a la del acero electrocincado DC-05. Tesis doctoral.

⁴ Watson, S.A. (1988) Nickel Dev.Inst.Rev.Series 13001. March,

⁵http://www.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/catalogue.p?id_sheet=I7&header=&language=ES

⁶ Carcel A.C. y Ferrer C. (1993) "Estructuras y textura de las aleaciones Zn-Ni electrodepositadas con baños todo cloruros". Rev: Metal.Madrid 29(2) 83-91.

⁷ Lambert, M.R. et al. (1983) SAE Tech. Paper Series 83187 81-87

⁸ Chang, Y.A. (1973) ASM Metals handbook, Vol 8.8th Ed.1973: 223

⁹ Yamato R.et al(1985) Kawasaki Steel Tech. Report 12, June 75-84.

¹⁰http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/upload/binarydata_tksteel05d4cms/05/91/78/02/00/00/2789105/Zinc_nickel_coated_sheet_Neuralyt_ZN.pdf (2009)

¹¹ Stribeck, R. (1902) "Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager" VDI-Zeitschrift 46, 1341-1348, 1432-1438 and 1463-1470.

- ¹² <http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com> “GammaProtect®: Cathodic corrosion protection for hot stamping” Nov. 2011
- ¹³ Schey J.A.”Friction and Lubrication in Drawing Coated Steel Sheets oc Chromium coated beads”. Lubr. Eng, 52, 9 677-681
- ¹⁴ Schey J.A. ”Lubricant effects in drawing coated steel sheets over nitrided die surfaces”. Lubr. Eng, 52, 9 630-636
- ¹⁵ Meuleman D.J. and Dwyer T.E.(1988) “Die materials and treatments with electrogalvanized steels” SAE Paper n° 880369 SAE Warrendale, PA
- ¹⁶ Raghavan K.S. “Forming Limits of instertitial free steels”. Int. Symp. On IF steel sheets. Ottawa. August 1991
- ¹⁷ Lewison D. J. and D. Lee, "Determination of Forming Limits by Digital Image Processing Methods", Proceedings of International Body Engineering Conference and Exposition (IBEC), Paper 01-3168, September 28-30, 1999, Detroit, Michigan.
- ¹⁸ Keeler S.P. (1965) “Determination of Forming Limits in automotive stampings” SAE Paper n° 650535.
- ¹⁹ Goodwin G. (1968) “ Application of sttrain analysis to sheet metal forming problems in the press shop” SAE paper n° 680093
- ²⁰ Nakazima K, Kikuma T Asuna K. (1968) “Study on the formability of steel sheet”. Yawata technical Report n° 264 Sept.
- ²¹ Marciniack Z, Kuczinski K. (1967) “Limit strains in the process of strecht forming sheet metal”. Int. Journal Mech. Sci. Vol.9,.
- ²² CAMSYS : www.camsysinc.com USA
- ²³ ASAME Technology (2009): www.asametech.com USA

²⁴ Ter Haar, R. (1996) "Friction in sheet metal forming. The influence of local contact conditions and deformation". Ph.D. Thesis, University of Twente. Netherlands.

²⁵ Bernick L.M., Hilsen R.R. and Wandrei C.L. (1978) "Development of a quantitative sheet galling test" *Wear* (48)323,346.

²⁶ Dalton G. (2001) "New friction model for sheet metalforming". SAE paper 010081.

²⁷ Col A. (2002) "FLC: Past, present and future". Proc. 22th Bienn. Cong. IDDRG. Nagoya.

²⁸ Pamstamp 2G programa informatico

²⁹ Vogel J. H. and D. Lee, "The Automated Measurement of Strains from Three-Dimensional Deformed Surfaces," *Journal of Metals (JOM)*, Vol. 42, 1990, pp. 8-13.

³⁰ Meuleman, D.J Zoldak, J.J. (1986) "The interactions of coated steels, die materials and forming lubricants" SAE Paper No. 860432

³¹ D31/1738 Renault, Toles aptitude au glissement RNUR D31/1738 (1994), Section norms et cahiers des charges.

³² Schey J. (1983) *Tribology in Metalworking. Friction, lubrication and wear.* ASM p.79, metals park Ohio, USA.

³³ Schipper, D.J. (1988) "Transitions in the lubrication of concentrated contacts" Ph .D. Thesis, University of Twente, Netherland.

³⁴ Emmens, W.C. (1988) "The influence of surface roughness on friction" Proc. 15th IDDRG Biennial Conference. Dearborn, p.63-70, (1988)

³⁵ Reynolds, O. (1886). *Trans. Roy. Soc.*, 177 Pt 1: 157

14. Wilson, W. R. D Y Mahdavian, S. M. (1974) *Journal of Lubric. Technol.* (Trans. ASME, F), 96: 572.

³⁶ Azushima A, Tsubouchi M. and Kudo H. (1990) "Direct observation of lubricant behaviour under the micro PH-L at the interface between workpiece and die". *Adv. Tech. of Plasticity Vol 1*

³⁷ Cheng H.S. (1992) *Lubrication Regimes*, in *ASM Handbook*. Vol 18. "Lubrication and wear Technology". Ed. ASM. Ohio. 89.

³⁸ Schey J.A. (1987) "Introduction to manufacturing processes 2nd ed". Mc Graw Hill NY. Chapter 5.

³⁹ Rault D. Etringer M. (1976) "Antigalling roughness profile permitting reduction of the blankholder pressure and the required amount of lubrication during the forming of sheet metals". *Proc. Of the 9th IDDRG Biennial Congress Ann Arbor*.

⁴⁰ Ghosh A.K. (1977) "A method for determining the coefficient of friction in punch stretching of sheet metals". *Int J. Mech. Sci*, 19 457-470.

⁴¹ Atzema E. H. (1994), "Formability of sheet metal and sandwich laminates" Ph. D. thesis University of Twente Enschede Netherlands.

⁴² Emmens W.C. "Tribology of flat contacts and its applications in deep drawing", University of Twente 1997.

⁴³ Ozturk F. and D. Lee, "Experimental and Numerical Analysis of Out-of-Plane Formability Test", *Journal of Materials Processing Technology*, July 2005.

⁴⁴ Scheers J. and De Mare C. (1998) "Study of the frictional behaviour of steel sheet surfaces during deep drawing by use of design of experiments". 20th Bienn. Cong. IDDRG Brussels, Belgium.

- ⁴⁵ Carcel A.C. Ferrer C. and Perez Puig M.A. (2002) Alternative 2D surface topography parameters for optimising friction behaviour of zinc coated sheets. 22th Int. Cong. IDDRG Nagoya (Japan) May.
- ⁴⁶ Ludema K.C. (1996) *Friction, Wear, Lubrication*. CRC Press 10
- ⁴⁷ Schey J. and Watts S.W. (1992) "Transient tribological phenomena in the drawbead simulation" SAE paper 9200634
- ⁴⁸ Dalton G. (2001) "New friction model for sheet metalforming". SAE paper 2001010081,
- ⁴⁹ Wihlborg A. & Gunnarson, L (2000) "A frictional study of uncoated EBT steel sheets in a bending under tension friction test" *Wear* 237 (1) 129:136.
- ⁵⁰ Nellesmann T , Bay N and Wanheim T. (1977) "Real area of contact and friction stress- The role of trapped lubricant" *Wear*, 43, 45-53.
- ⁵¹ Vogel J. H. and D. Lee, "An Automated Two-View Method For Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces," *Journal of Material Shaping Technology*, Vol. 6, 1989.
- ⁵² Garcia J.C. y Peñalba F. "Evaluación del espesor de capas delgadas mediante análisis EDS y simulación de Monte Carlo" *Revista de Metalurgia*, vol. 46 Numero, 95-100, 2010 ISSN: 0034-8570
- ⁵³ Sanes J. Jiménez M. Saura B. y Bermúdez M.D. "Formación de capas limite en la interfase zafiro-acero inoxidable a partir de disoluciones de líquidos iónicos en agua" VI congreso ibérico de tribología 2011.
- ⁵⁴ Rabinowicz, E. (1965) *Friction and wear*. Butterwoths. Londres
- ⁵⁵ Rault,D. Etringer,M. (1976) "Sheet metal forming and energy conservation". ASM 97-114.

- ⁵⁶ Sarkar, A.D. (1976) *Wear of materials*. Pergamon Press. Oxford 1976.p.40
- ⁵⁷ Hilsen R.R. Bernick L.M. (1978) “ Relationship between surface characteristics and galling index of steel sheet”. ASTM Special Tech.Publ.nº 647 ASTM.
- ⁵⁸ Jonasson M. Et al. (1997) « Comparative study of shot-blasted and electrical-discharge textured rolls with regard to frictional behaviour of steel sheet surfaces”. *Wear*, 207 (1,2) 34-40.
- ⁵⁹ Hopkins D.N. et al. (1999) “Reduced maintenance costs by using engineered surfaces to control friction and galling”. *Wear*, 229 Apr. 27-37.
- ⁶⁰ Muster A y Presz W.(1999) “Influence of initial surface roughness on galling behaviour of steel-stell couples”. *Scandinavian Journal of Metallurgy* ,28 (1) 5-8.
- ⁶¹ Xie HC et al. (1999) “Analysis of the 3-D surface topography of textured cold rolled steel sheets”. *Tribology International*. Vol 32 (2) 83-87.
- ⁶² Keeler S.P, Brazier W.G. (1975) “Relationship between Laboratory Material characterization and Press Shop formability”. *Proc. Microalloying*, 75. Washington Oct.
- ⁶³ Mitterer et al. (1997) “A comparative study on the evaluation of the tribological behaviour of polymer/zinc coated steel sheets”. *Wear*, 210 (1-2)88-95
- ⁶⁴ Fraile, J. et al. (1991). "The use of inorganic coatings to improve drawability and painting of electrogalvanized cold rolled steel". in *Proc.of 15 Surcar'91*. Cannes, 13,14 Junio.
- ⁶⁵ Carcel A. et al.(1997) “Evaluación del comportamiento tribológico en la embutición de chapas recubiertas para carrocerías de

automóviles. Estrategias de lubricación”. Rev Iberam. De Ingeniería Mecánica. Vol 1 (1) 69-80.

⁶⁶ Quaker Ferrocote S-6130 Safety Data Sheet, (2011)

⁶⁷ FUCHS Anticorit RP4107S Safety data Sheet (2011)

⁶⁸ FUCHS Anticorit PL 3802 39S Safety Data Sheet (2007)

⁶⁹ Rudnick L.R. (2009) Lubricant Additives: Chemistry and Applications 2Ed. CRC Press

⁷⁰ Otto Beeck, J. W. Givens and; E. C. Williams. (1940) “On the mechanism of boundary lubrication”. Wear Prevention by Addition Agents. Proc. Roy. Soc. A:177, pp. 103-118.

⁷¹ Lubricant oil additives www.rheinchemie.com (2010).

⁷² Westeneng J.D. (2001) “Modelling of contact and friction in Deep Drawing proceses”. Ph.D. Thesis. University of Twente , Enschede

⁷³ Lee, SY. et al. (1997) “3-D Finite element method simulations of stamping processes for planar anisotropic sheet materials”. Int.Journal of Mech. Sci., 39 (10)1181-1198

⁷⁴ Drossel WG. et al. (1998). "FEM analysis of the friction process in section drawing". Steel Res. 69(8)330-333.

⁷⁵ Meinders T. et al. (1998) “The implementation of an equivalent draw-bead model in a finite element code for sheet metal forming". J. Mater. Process. Technol. 83(1-3):234-244.

⁷⁶ Bleck W. et al.(1998) “A comparative study of the forming-limit diagram models for sheet metal forming". J. Mater. Process. Techol. 83(1-3):223-230

- ⁷⁷ Hisashi Hayashi and Takeo Nakagawa “Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels” Original Research Article Journal of Materials Processing Technology, Volume 46, Issues 3–4, November 1994, Pages 455-487
- ⁷⁸ American Iron and Steel Institute- Auto Steel Partnership “Automotive steel design manual” August 2002 and “Managing the stamping process” Stamping Task Force Committee (1991).
- ⁷⁹ Ike, H., Yoshida K. (1981) *Wear*, 72, pp. 143-155.
- ⁸⁰ Miyauchi, K. 1986) “Torsional Behavior of Sheet Metals,” Proceedings of the 14th Biennial Congress of the IDDRG, Koln, Germany, April 21-23, pp. 400-401.
- ⁸¹ Bernick L.M. Hilsen R.R. Wandrei C.L. (1978) “Development of a quantitative sheet galling test” *Wear*, 48 323,346,
- ⁸² Samper V. (1993) “Etude theorique experimentale du frottement et des forces de retenue en emboutissage de toles d’acier doux nues et revetues”. These de Doctorat. École des Mines de Paris.
- ⁸³ Shedín E. Frederikson K. (1988) “Characterisation of friction properties during sheet forming” Proc. 15th Bienn. Congr.IDDRG Dearnborn p.55-61
- ⁸⁴ Fox R.T. Maniatty A.M. Lee D. (1989) “Determination of friction coefficient under stretch forming conditions”. *Metall. Trans.* 20^a 2179-2181
- ⁸⁵ Duncan, J. L., Shabel, B. S., and Filho, J. G. (1978) SAE Paper No. 780391.
- ⁸⁶ Nine H.D. (1978) “ Draw bead forces in sheet metal forming, in *Mechanics of sheet metal-forming*” Ed. Plenum Press p.179-211

⁸⁷ Nine H.D. (1982) “The applicaility of Coulomb’s friction law to drawbeads in sheet metalforming J. Appl. Metal working, 2 (3) 200-210

⁸⁸ Ghosh A.K. (1977) “A method for determining the coefficient of friction in punch stretching of sheet metals” Int. J. Mech. Sci. 19 457,470,

⁸⁹ Schey J.A. (1988) “Surface properties for the LDH test. J. Materials Shaping Technology”, 6 (2) 103-111

⁹⁰ Ferron M. (1976) “La lubrification dans le formage des materiaux en feuille. Cas des toles d’acier extradoux“ CETIM Inf. N° 46 71,81

⁹¹ Keeler, S. P. (1986), “Evaluating the Lubricity of Press Shop Lubricants on Various Types of Galvanized steels,” AIME Mechanical Working Conference, Greentree, Pittsburgh, PA, (October 17).

⁹² Keeler, S. P. and Dwyer, T. E. (1986), “Frictional Characteristics of Galvanized Sheets Evaluated with a Draw Bead Simulator,” SAE Paper No. 860433.

⁹³ Brazier, W. G. Thompson, R. W. (1985) “The Effect of Die Materials and Lubrication on punch stretching and Drawing Forces of Cold-Rolled and Zinc-Coated Steels,” SAE Paper 850274.

⁹⁴ Brazier, W. G. Thompson, R. W. (1986). “The Effect of Zinc Coatings, Die Materials, and Lubricants on Sheet Metal Formability,” SAE Paper 860434.

⁹⁵ Meuleman, D. J., Denner S. G., and Cheng, F. L. (1984), “The Effect of Zinc Coatings on the Formability of Automotive Sheet Steels,” SAE Paper 840370.

- ⁹⁶ Gibson, T. J., Hobbs, R. M., and Stewart, P. D. (1974) in International Conference on Product Technology, Institution of Engineers, Melbourne, Australia, pp. 328-332.
- ⁹⁷ American Deep Drawing Research Group, Sheet Metal Industries, 54, (1977), pp. 147-153.
- ⁹⁸ American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, PA.
- ⁹⁹ Hilsen R.R., Hughes I.F. and Quinto D.T. (1978) "Surface galling characteristics of a series of high strength cold rolled steels. Proc. 10th Bienn. Cong. Of the IDDRG, Warwick.
- ¹⁰⁰ Cárcel A. C. and Pérez Puig M. A. (2005) "The influence of friction stability on the success of lubricated stamping operations: predictive tools from plane friction test". Spain, Paper WTC2005-64278, pp. 847-848; 2 Sep 12-16 Washington, D.C., USA.
- ¹⁰¹ Cárcel A. C. and Rodilla E. (2005) "Effects of asperity shape on the tribological behavior during stamping of zinc coated steel sheets for car bodies". Paper WTC2005-64129, pp. 835-836; 2 Sep 12-16 Washington, D.C., USA. World Tribology Congress III
- ¹⁰² Monfort G. (1991) J. Defourny. "Surface Roughness and friction in press forming. Final Report ISBN 92-826-2453-6.
- ¹⁰³ Saha P.K. (1996), W.R.D. Wilson, R.S. Timsit. "Influence of surface topography on the frictional characteristics of 3104 aluminium alloy sheet, Wear.vol197,1996,pp123-129.
- ¹⁰⁴ Carcel A.C. y Ferrer C. "Estructuras y textura de las aleaciones Zn-Ni electrodepositadas con baños de cloruros" Revista de metalurgia vol 29, 1993.
- ¹⁰⁵ Carcel A.C., Ferrer C. y Gonzalo G. "Determinacion experimental de los factores que controlan el desprendimiento de polvos en el

conformado de chapas de acero recubiertas con Zn-Ni” Revista de metalurgia 1995.

¹⁰⁶ M. Suárez, M. Staia, E. Carrasquero, W. González, “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.

¹⁰⁷ A. Nilsson, L. Kirkhorn, M. Andersson, J.-E. Ståhl “Improved tool wear properties in sheet metal forming using Carbide Steel, a novel abrasion resistant cast material” *Wear* 271 (2011) 1280–1287

¹⁰⁸ Samper V. and Felder E. Frictional mechanism in uncoated and zinc coated steel sheet forming. Proc. 16th. Leeds-Lyon Symposium on Tribology. (1989).

¹⁰⁹ Hardy W and Doubleday I. Boundary Lubrication- The paraffin series. *Proc. R. Soc. London, Series A* 102: 550-574. (1922).

¹¹⁰ Langmuir I The mechanism of the surface phenomena of flotation, *Trans. Faraday Soc.* 15: 62-74 (1920).

¹¹¹ Bowden F.P and Leben L. The friction of lubricated metals, *Phil.Trans. R. Soc. London* 239: 1-27. (1940).

¹¹² Bowden F.P. y Tabor D. The friction and Lubrication of solids. Oxford Press. (1954).

¹¹³ Godfrey D. Boundary Lubrication, P.M. Ku, pp 335-384 (1968).

¹¹⁴ Briscoe B. J. and Evans D.C.B. The shear properties of Langmuir-Blodgett layers, *Proc. R. Soc. London, Series A* 380: 389-407 (1982).

- ¹¹⁵ Timsit R.S. and Pelow C.V. Shear strength and tribological properties of stearic acid films on Glass and aluminium-coated glass. *Journal of Tribology* 114: 150-158 (1992).
- ¹¹⁶ Georges J.M. and Mazuyer D. Pressure effects on the shearing of a colloidal thin film. *Journal Physical Codensed matter* 2: 9545-9550. (1991).
- ¹¹⁷ Moore A.J.W. (1948) Deformation of metals in static and in sliding contacts *Proc. R. Soc. London, Series A* 195: 231-249.
- ¹¹⁸ Chivers T.C., Mitchell L.A y Rowe M.D. The variation of real contact area between surfaces with contact presure and material hardness, *Wear* 28: 171-185 (1974).
- ¹¹⁹ Williamson J.B.P. and Hunt R.T. Asperity persistence and the real area of contact between rough surfaces, *Proc. R. Soc. London, Series A* 327: 147-157 (1972).
- ¹²⁰ Uppal A.H , Probert S.D. The plastic contact between a rough and a flat surface, *Wear* 21: 173:184 (1973).
- ¹²¹ Childs T.H.C. "The persistence of roughness between surfaces in static contact", *Proc. R. Soc. London Series A* 353: 35-53 (1977).
- ¹²² Uppal A..H , Probert S.D. The real area of contact between a rough and a flat surface, *Wear* 20: 381-400 (1972).
- ¹²³ Briscoe B. J. y Tabor D. Rheology of thin organic films, *ASLE Translactions* 17(3): 158-165. (1973).
- ¹²⁴ Lee-Prudhoe I, Sayler R.S. and Kaderic A. Investigations into asperity persistence in heavily loaded contacts, *Journal of Tribology* 121: 441-448 (1999).
- ¹²⁵ Archard, J. F "The Temperature of Rubbing Surfaces," *Wear*,2, 438-455, (1958-1959).

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles.

¹²⁶ Ashby, M.F., Abulawi, J., Kong, H.S., 1991, "Temperature maps for Frictional Heating in Dry sliding", Tribology Transactions, Vol.34, Number 4, October 1991, pp 577-587.

¹²⁷ Stachowiak G. W., Batchelor A. W.; Engineering Tribology ; Ed. Elsevier Butterworth Heinemann (2005).

¹²⁸ www.tribology-abc.com; Applets for calculatin Tflash in point contacts

**ANEXO I: EQUIPO DISEÑADO PARA EL ENSAYO
MULTIFRICCION.**

ANEXO I: Equipo diseñado para la presente Tesis.

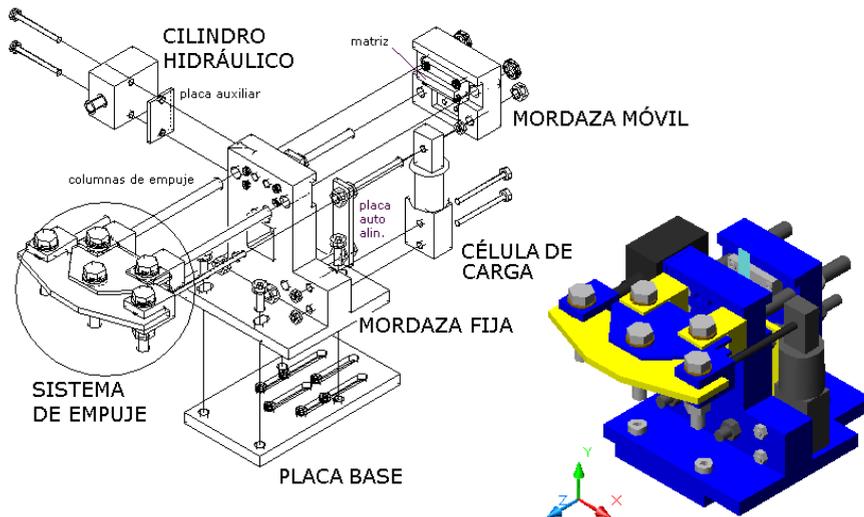


Figura 1. Utillaje diseñado para la sujeción de la probeta en el ensayo de multifricción.

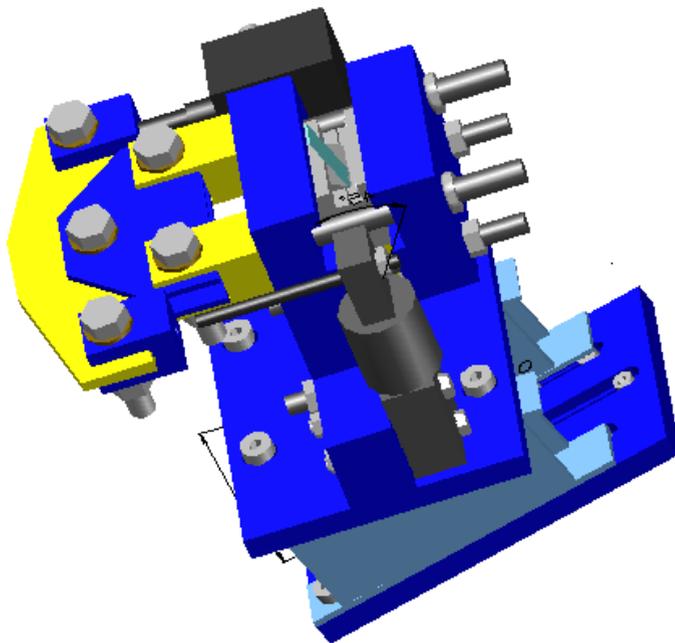


Figura 2. Utillaje diseñado para la sujeción de la probeta en el ensayo.

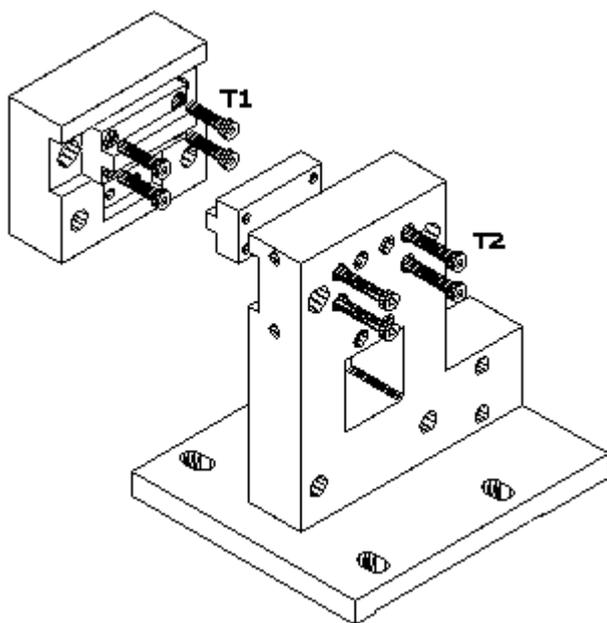


Figura 3. Montaje de las matrices en las mordazas

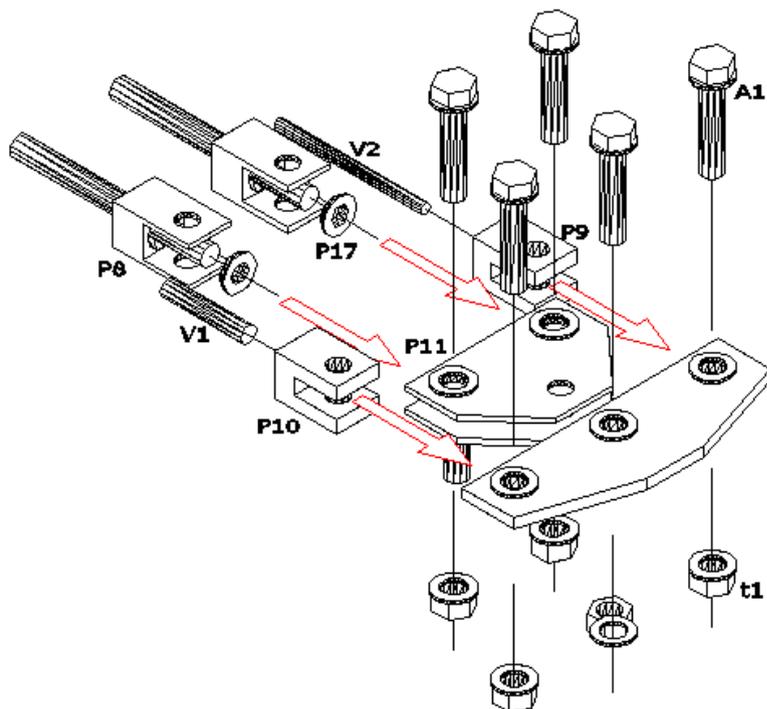


Figura 4. Montaje del sistema de empuje.

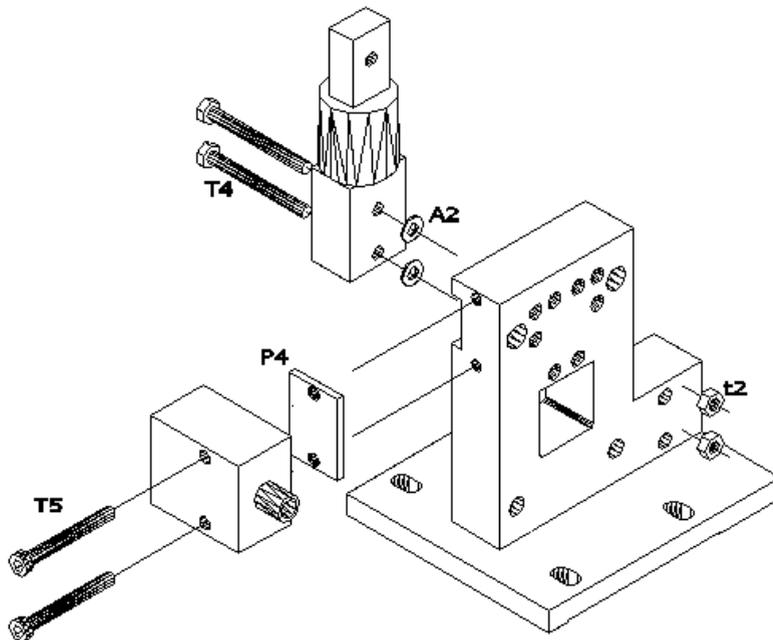


Figura 5. Montaje del cilindro y la célula de carga.

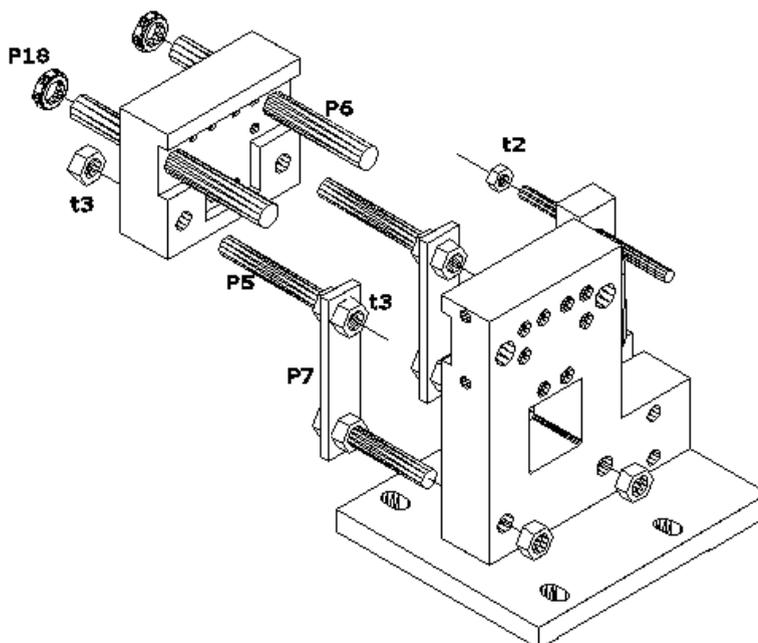


Figura 6. Montaje de los ejes de autoalineación.

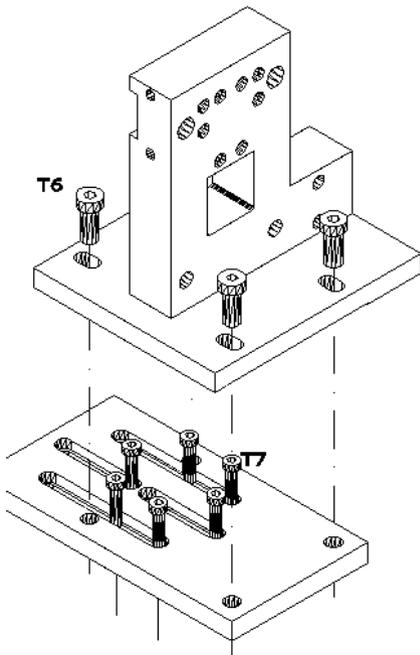


Figura 7. Montaje en la máquina de tracción universal.

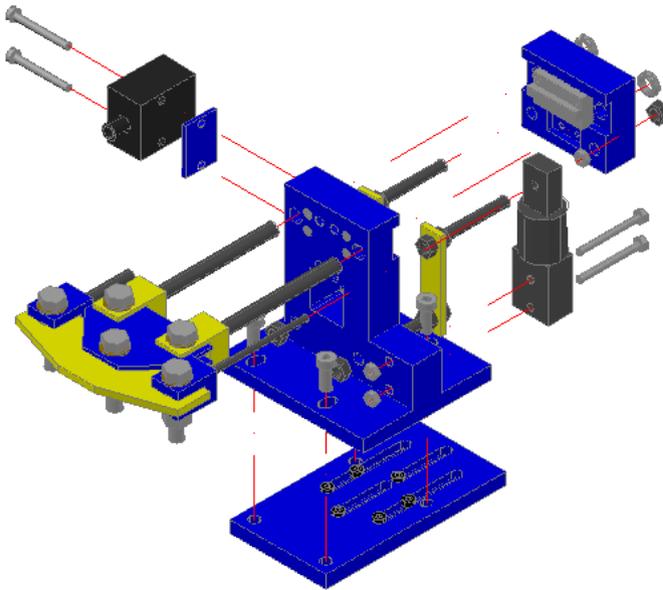


Figura 8. Despiece del equipo de multifriccion diseñado.

**ANEXO II: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS Y
ANÁLISIS DE IMÁGENES PARA EL CÁLCULO DE
PRESIONES REALES.**

Anexo II. – RESULTADOS Y ANALISIS DE IMAGENES

MUESTRA	PASADA	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	μ máx (N)	μ 50 (N)	Pchapa (MPa)
M/P1/V1/L1	1P	0,240	132,3	126,5	0,138	0,132	4,802
	2P	0,235	146,3	142,3	0,156	0,151	4,704
	3P	0,235	147,6	143,6	0,160	0,156	4,606
	4P	0,230	157,0	153,0	0,170	0,166	4,606
M/P2/V1/L1	1P	0,520	433,6	425,9	0,246	0,241	8,82
	2P	0,515	557,0	512,7	0,316	0,291	8,82
	3P	0,505	582,5	559,7	0,330	0,317	8,82
	4P	0,505	585,2	578,5	0,335	0,332	8,722
M/P3/V1/L1	1P	0,880	945,0	884,7	0,292	0,274	16,17
	2P	0,875	1115,0	1056,0	0,345	0,327	16,17
	3P	0,875	1216,0	1180,0	0,378	0,367	16,072
	4P	0,875	1246,0	1221,0	0,388	0,380	16,072
M/P4/V1/L1	1P	1,200	710,1	695,5	0,155	0,152	22,834
	2P	1,195	841,6	797,3	0,184	0,175	22,834
	3P	1,195	985,2	825,5	0,216	0,181	22,834
	4P	1,200	1052,0	808,0	0,230	0,177	22,834
M/P5/V1/L1	1P	1,655	954,4	886,8	0,150	0,140	31,752
	2P	1,650	1091,0	1023,0	0,172	0,161	31,752
	3P	1,650	1243,0	1145,0	0,196	0,181	31,654
	4P	1,650	1311,0	1302,0	0,207	0,206	31,654
M/P6/V1/L1	1P	2,115	1985,0	1681,0	0,243	0,206	40,866
	2P	2,105	2613,0	2283,0	0,320	0,279	40,866
	3P	2,105	2864,0	2744,0	0,350	0,336	40,866
	4P	2,105	3008,0	2936,0	0,368	0,359	40,866
M/P7/V1/L1	1P	2,560	2001,0	1799,0	0,201	0,181	49,686
	2P	2,550	2601,0	2378,0	0,262	0,239	49,686
	3P	2,545	3380,0	3075,0	0,340	0,309	49,686
	4P	2,545	3898,0	3378,0	0,392	0,340	49,686
M/P8/V1/L1	1P	3,015	2081,0	1678,0	0,177	0,143	58,702
	2P	3,020	1993,0	1854,0	0,170	0,158	58,702
	3P	3,015	2164,0	2148,0	0,185	0,183	58,604
	4P	3,010	2381,0	2368,0	0,203	0,202	58,604

Tabla 1 : Muestra los valores obtenidos en estado se suministro para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 40mm/min.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles

MUESTRA	PASADA	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	μ máx (N)	μ 50 (N)	Pchapa(MPa)
M/P1/V2/L1	1P	0,260	153,0	144,8	0,150	0,142	5,096
	2P	0,255	159,7	151,7	0,160	0,152	4,998
	3P	0,255	170,5	163,5	0,171	0,164	4,998
	4P	0,255	179,9	174,8	0,180	0,175	4,998
M/P2/V2/L1	1P	0,510	264,4	262,6	0,132	0,131	9,996
	2P	0,510	283,2	280,5	0,142	0,140	9,996
	3P	0,505	296,6	291,3	0,150	0,147	9,898
	4P	0,505	299,3	294,0	0,151	0,149	9,898
M/P3/V2/L1	1P	0,870	617,4	562,3	0,181	0,165	17,052
	2P	0,865	660,4	606,7	0,195	0,179	16,954
	3P	0,860	689,9	663,1	0,205	0,197	16,856
	4P	0,860	763,7	676,1	0,227	0,201	16,856
M/P4/V2/L1	1P	1,205	887,2	792,3	0,188	0,168	23,618
	2P	1,205	1020,0	983,9	0,216	0,208	23,618
	3P	1,200	1110,0	1102,0	0,236	0,234	23,52
	4P	1,200	1184,0	1174,0	0,252	0,250	23,52
M/P5/V2/L1	1P	1,655	1267,0	983,9	0,195	0,152	32,438
	2P	1,655	1384,0	1144,0	0,213	0,176	32,438
	3P	1,650	1420,0	1286,0	0,220	0,199	32,34
	4P	1,650	1397,0	1380,0	0,216	0,213	32,34
M/P6/V2/L1	1P	2,130	1387,0	1134,0	0,166	0,136	41,748
	2P	2,130	1397,0	1319,0	0,167	0,158	41,748
	3P	2,130	1490,0	1438,0	0,178	0,172	41,748
	4P	2,130	1584,0	1489,0	0,190	0,178	41,748
M/P7/V2/L1	1P	2,565	1723,0	1401,0	0,171	0,139	50,274
	2P	2,560	1597,0	1572,0	0,159	0,157	50,176
	3P	2,560	1698,0	1659,0	0,169	0,165	50,176
	4P	2,560	1772,0	1718,0	0,177	0,171	50,176
M/P8/V2/L1	1P	3,015	1996,0	1577,0	0,169	0,133	59,094
	2P	3,015	1699,0	1698,0	0,144	0,144	59,094
	3P	3,015	1785,0	1762,0	0,151	0,149	59,094
	4P	3,015	1906,0	1866,0	0,161	0,158	59,094

Tabla 2 : Muestra los valores obtenidos en estado se suministro para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 120mm/min.

MUESTRA	PASADAS	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	μ máx (N)	μ 50 (N)	Pchapa (MPa)
M/P1/V3/L1	1P	0,310	158,4	156,8	0,130	0,129	6,076
	2P	0,310	155,7	150,1	0,128	0,124	6,076
	3P	0,300	157,0	153,0	0,134	0,130	5,88
	4P	0,300	159,7	1464,0	0,136	0,245	5,88
M/P2/V3/L1	1P	0,510	295,3	269,8	0,148	0,135	9,996
	2P	0,510	280,5	270,7	0,140	0,135	9,996
	3P	0,505	292,6	285,4	0,148	0,144	9,898
	4P	0,505	294,0	281,2	0,149	0,142	9,898
M/P3/V3/L1	1P	0,880	573,1	546,6	0,166	0,158	17,248
	2P	0,875	657,7	618,8	0,192	0,180	17,15
	3P	0,875	695,3	688,2	0,203	0,201	17,15
	4P	0,875	710,1	705,3	0,207	0,206	17,15
M/P4/V3/L1	1P	1,200	820,1	753,7	0,174	0,160	23,52
	2P	1,200	863,1	860,4	0,183	0,183	23,52
	3P	1,200	898,0	893,9	0,191	0,190	23,52
	4P	1,200	957,0	942,5	0,203	0,200	23,52
M/P5/V3/L1	1P	1,660	985,2	955,6	0,151	0,147	32,536
	2P	1,660	1023,0	1015,0	0,157	0,156	32,536
	3P	1,660	1062,0	1059,0	0,163	0,163	32,536
	4P	1,660	1130,0	1075,0	0,174	0,165	32,536
M/P6/V3/L1	1P	2,110	1389,0	1193,0	0,168	0,144	41,356
	2P	2,100	1329,0	1292,0	0,161	0,157	41,16
	3P	2,100	1349,0	1326,0	0,164	0,161	41,16
	4P	2,100	1475,0	1360,0	0,179	0,165	41,16
M/P7/V3/L1	1P	2,535	1584,0	1402,0	0,159	0,141	49,686
	2P	2,530	1505,0	1499,0	0,152	0,151	49,588
	3P	2,525	1570,0	1545,0	0,159	0,156	49,49
	4P	2,520	1702,0	1627,0	0,172	0,165	49,392
M/P8/V3/L1	1P	2,970	1850,0	1527,0	0,159	0,131	58,212
	2P	2,965	1686,0	1609,0	0,145	0,138	58,114
	3P	2,965	1795,0	1668,0	0,154	0,144	58,114
	4P	2,960	1830,0	1724,0	0,158	0,149	58,016

Tabla 3: Muestra los valores obtenidos en estado se suministro para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 240mm/min.

6.1.2. - Ensayos con muestras lubricadas con Fuchs RP4107S

MUESTRA	PASADAS	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	μ máx (N)	μ 50 (N)	Pchapa(MPa)
M/P1/V1/L2	1P	0,255	178,5	175,4	0,179	0,175	4,998
	2P	0,255	179,9	174,3	0,180	0,174	4,998
	3P	0,255	177,2	175,0	0,177	0,175	4,998
	4P	0,255	173,2	163,8	0,173	0,164	4,998
M/P2/V1/L2	1P	0,515	339,6	333,8	0,168	0,165	10,094
	2P	0,520	413,4	364,6	0,203	0,179	10,192
	3P	0,520	434,9	367,8	0,213	0,180	10,192
	4P	0,520	438,9	369,1	0,215	0,181	10,192
M/P3/V1/L2	1P	0,845	565,1	552,8	0,171	0,167	16,562
	2P	0,845	648,3	625,2	0,196	0,189	16,562
	3P	0,845	691,3	673,7	0,209	0,203	16,562
	4P	0,845	689,9	648,1	0,208	0,196	16,562
M/P4/V1/L2	1P	1,155	936,9	907,6	0,207	0,200	22,638
	2P	1,155	1290,0	1281,0	0,285	0,283	22,638
	3P	1,160	1046,0	932,4	0,230	0,205	22,736
	4P	1,160	971,8	856,9	0,214	0,188	22,736
M/P5/V1/L2	1P	1,610	1160,0	1142,0	0,184	0,181	31,556
	2P	1,620	1909,0	1829,0	0,301	0,288	31,752
	3P	1,620	1546,0	1202,0	0,243	0,189	31,752
	4P	1,620	1464,0	1201,0	0,231	0,189	31,752
M/P6/V1/L2	1P	2,075	1475,0	1445,0	0,181	0,178	40,67
	2P	2,075	2200,0	2193,0	0,270	0,270	40,67
	3P	2,075	1868,0	1423,0	0,230	0,175	40,67
	4P	2,070	1706,0	1521,0	0,210	0,187	40,572
M/P7/V1/L2	1P	2,505	2122,0	2094,0	0,216	0,213	49,098
	2P	2,505	4220,0	4211,0	0,430	0,429	49,098
	3P	2,505	2507,0	1540,0	0,255	0,157	49,098
	4P	2,505	2113,0	1886,0	0,215	0,192	49,098
M/P8/V1/L2	1P	2,960	2625,0	2548,0	0,226	0,220	58,016
	2P	2,960	4525,0	4511,0	0,390	0,389	58,016
	3P	2,960	2867,0	1917,0	0,247	0,165	58,016
	4P	2,960	2615,0	1953,0	0,225	0,168	58,016

Tabla 4: Muestra los valores obtenidos utilizando lubricante Fuchs para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 40mm/min.

MUESTRA	PASADAS	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	μ máx (N)	μ 50 (N)	P chapa(MPa)
M/P1/V2/L2	1P	0,250	194,6	193,7	0,199	0,198	4,9
	2P	0,250	198,7	186,6	0,203	0,190	4,9
	3P	0,250	212,1	195,9	0,216	0,200	4,9
	4P	0,250	204,0	171,8	0,208	0,175	4,9
M/P2/V2/L2	1P	0,500	335,6	332,4	0,171	0,170	9,8
	2P	0,495	351,7	336,9	0,181	0,174	9,702
	3P	0,495	355,7	343,5	0,183	0,177	9,702
	4P	0,495	369,1	345,0	0,190	0,178	9,702
M/P3/V2/L2	1P	0,840	540,9	530,2	0,164	0,161	16,464
	2P	0,840	570,5	546,3	0,173	0,166	16,464
	3P	0,840	585,2	558,4	0,178	0,170	16,464
	4P	0,840	594,6	577,2	0,181	0,175	16,464
M/P4/V2/L2	1P	1,175	724,8	706,0	0,157	0,153	23,03
	2P	1,180	791,9	755,7	0,171	0,163	23,128
	3P	1,175	825,5	806,7	0,179	0,175	23,03
	4P	1,180	848,3	837,6	0,183	0,181	23,128
M/P5/V2/L2	1P	1,630	1003,0	954,4	0,157	0,149	31,948
	2P	1,630	1062,0	1032,0	0,166	0,162	31,948
	3P	1,630	1160,0	1149,0	0,182	0,180	31,948
	4P	1,630	1158,0	1150,0	0,181	0,180	31,948
M/P6/V2/L2	1P	2,105	1263,0	1246,0	0,153	0,151	41,258
	2P	2,105	1442,0	1383,0	0,175	0,168	41,258
	3P	2,100	1455,0	1389,0	0,177	0,169	41,16
	4P	2,095	1440,0	1389,0	0,175	0,169	41,062
M/P7/V2/L2	1P	2,520	1431,0	1409,0	0,145	0,143	49,392
	2P	2,525	1615,0	1552,0	0,163	0,157	49,49
	3P	2,525	1624,0	1552,0	0,164	0,157	49,49
	4P	2,525	1651,0	1557,0	0,167	0,157	49,49
M/P8/V2/L2	1P	2,965	1723,0	1712,0	0,148	0,147	58,114
	2P	2,975	1863,0	1776,0	0,160	0,152	58,31
	3P	2,975	1997,0	1752,0	0,171	0,150	58,31
	4P	2,970	1913,0	1768,0	0,164	0,152	58,212

Tabla 5: Muestra los valores obtenidos utilizando lubricante Fuchs para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 120mm/min.

Investigación del comportamiento tribológico de chapas recubiertas con Zn-Ni en el proceso de embutición de piezas de automóviles

MUESTRA	PASADAS	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	μ máx (N)	μ 50 (N)	Pchapa(MPa)
M/P1/V3/L2	1P	0,280	191,0	187,9	0,174	0,171	5,488
	2P	0,270	188,0	185,2	0,178	0,175	5,292
	3P	0,275	189,0	186,6	0,175	0,173	5,39
	4P	0,275	187,0	181,2	0,173	0,168	5,39
M/P2/V3/L2	1P	0,500	326,0	322,5	0,166	0,165	9,8
	2P	0,500	327,0	319,5	0,167	0,163	9,8
	3P	0,500	319,0	318,1	0,163	0,162	9,8
	4P	0,500	322,0	315,4	0,164	0,161	9,8
M/P3/V3/L2	1P	0,880	552,0	530,2	0,160	0,154	17,248
	2P	0,880	561,0	530,2	0,163	0,154	17,248
	3P	0,880	568,0	535,6	0,165	0,155	17,248
	4P	0,880	603,0	544,5	0,175	0,158	17,248
M/P4/V3/L2	1P	1,225	754,0	720,9	0,157	0,150	24,01
	2P	1,225	753,0	718,2	0,157	0,150	24,01
	3P	1,225	774,0	722,1	0,161	0,150	24,01
	4P	1,225	797,0	728,7	0,166	0,152	24,01
M/P5/V3/L2	1P	1,630	973,0	924,1	0,152	0,145	31,948
	2P	1,630	952,0	919,3	0,149	0,144	31,948
	3P	1,630	956,0	922,0	0,150	0,144	31,948
	4P	1,630	976,0	922,0	0,153	0,144	31,948
M/P6/V3/L2	1P	2,120	1235,0	1172,0	0,149	0,141	41,552
	2P	2,120	1268,0	1204,0	0,153	0,145	41,552
	3P	2,120	1318,0	1262,0	0,159	0,152	41,552
	4P	2,120	1326,0	1288,0	0,160	0,155	41,552
M/P7/V3/L2	1P	2,535	1454,0	1376,0	0,146	0,138	49,686
	2P	2,535	1455,0	1387,0	0,146	0,140	49,686
	3P	2,535	1486,0	1426,0	0,150	0,144	49,686
	4P	2,535	1493,0	1471,0	0,150	0,148	49,686
M/P8/V3/L2	1P	3,000	1642,0	1588,0	0,140	0,135	58,8
	2P	2,995	1644,0	1588,0	0,140	0,135	58,702
	3P	2,995	1681,0	1623,0	0,143	0,138	58,702
	4P	2,990	1702,0	1675,0	0,145	0,143	58,604

Tabla 6: Muestra los valores obtenidos utilizando lubricante Fuchs para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 240mm/min.

6.1.3. - Ensayos con muestras lubricadas con Ferrocote S-6130.

MUESTRA	PASADAS	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	m máx (N)	m 50 (N)	P chapa (MPa)
M/P1/V1/L3	1P	0,260	159,7	141,9	0,157	0,139	5,096
	2P	0,260	161,1	142,3	0,158	0,140	5,096
	3P	0,260	158,4	133,9	0,155	0,131	5,096
	4P	0,255	153,0	142,3	0,153	0,142	4,998
M/P2/V1/L3	1P	0,475	294,0	279,8	0,158	0,150	9,31
	2P	0,475	327,5	298,0	0,176	0,160	9,31
	3P	0,475	324,8	314,1	0,174	0,169	9,31
	4P	0,475	361,1	324,8	0,194	0,174	9,31
M/P3/V1/L3	1P	0,805	475,2	469,8	0,151	0,149	15,778
	2P	0,805	479,9	560,9	0,152	0,178	15,778
	3P	0,805	648,3	601,3	0,205	0,191	15,778
	4P	0,805	655,0	606,7	0,208	0,192	15,778
M/P4/V1/L3	1P	1,060	629,5	609,3	0,151	0,147	20,776
	2P	1,055	804,0	781,7	0,194	0,189	20,678
	3P	1,055	949,0	937,9	0,229	0,227	20,678
	4P	1,055	962,4	922,1	0,233	0,223	20,678
M/P5/V1/L3	1P	1,655	973,1	950,1	0,150	0,146	32,438
	2P	1,650	1395,0	1381,0	0,216	0,214	32,34
	3P	1,645	1723,0	1695,0	0,267	0,263	32,242
	4P	1,640	1644,0	1432,0	0,256	0,223	32,144
M/P6/V1/L3	1P	2,110	1305,0	1285,0	0,158	0,155	41,356
	2P	2,110	1894,0	1872,0	0,229	0,226	41,356
	3P	2,105	2106,0	2081,0	0,255	0,252	41,258
	4P	2,100	1844,0	1388,0	0,224	0,169	41,16
M/P7/V1/L3	1P	2,510	1726,0	1670,0	0,175	0,170	49,196
	2P	2,510	2668,0	2659,0	0,271	0,270	49,196
	3P	2,510	2608,0	1714,0	0,265	0,174	49,196
	4P	2,505	2263,0	1836,0	0,230	0,187	49,098
M/P8/V1/L3	1P	3,005	1950,0	1912,0	0,166	0,162	58,898
	2P	3,005	3338,0	2282,0	0,283	0,194	58,898
	3P	3,005	2890,0	1268,0	0,245	0,108	58,898
	4P	3,000	2968,0	2518,0	0,252	0,214	58,8

Tabla 7: Muestra los valores obtenidos utilizando lubricante Ferrocote para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 40mm/min.

MUESTRA	PASADAS	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	m máx (N)	m 50 (N)	P chapa (MPa)
M/P1/V2/L3	1P	0,280	150,3	142,3	0,137	0,130	5,488
	2P	0,285	161,1	159,7	0,144	0,143	5,586
	3P	0,285	170,5	169,1	0,153	0,151	5,586
	4P	0,290	163,8	161,1	0,144	0,142	5,684
M/P2/V2/L3	1P	0,495	276,5	265,8	0,142	0,137	9,702
	2P	0,495	291,3	280,5	0,150	0,145	9,702
	3P	0,490	314,1	280,5	0,164	0,146	9,604
	4P	0,490	328,9	288,6	0,171	0,150	9,604
M/P3/V2/L3	1P	0,815	471,1	431,1	0,147	0,135	15,974
	2P	0,810	472,5	447,0	0,149	0,141	15,876
	3P	0,805	514,1	464,4	0,163	0,147	15,778
	4P	0,805	507,4	468,5	0,161	0,148	15,778
M/P4/V2/L3	1P	1,155	656,4	628,2	0,145	0,139	22,638
	2P	1,155	707,4	664,4	0,156	0,147	22,638
	3P	1,150	739,6	688,6	0,164	0,153	22,54
	4P	1,150	754,4	719,5	0,167	0,160	22,54
M/P5/V2/L3	1P	1,605	902,0	867,8	0,143	0,138	31,458
	2P	1,605	1003,0	996,0	0,159	0,158	31,458
	3P	1,605	1042,0	1028,0	0,166	0,163	31,458
	4P	1,605	1032,0	1025,0	0,164	0,163	31,458
M/P6/V2/L3	1P	2,065	1179,0	1106,0	0,146	0,137	40,474
	2P	2,065	1193,0	1185,0	0,147	0,146	40,474
	3P	2,065	1301,0	1279,0	0,161	0,158	40,474
	4P	2,065	1329,0	1329,0	0,164	0,164	40,474
M/P7/V2/L3	1P	2,525	1395,0	1385,0	0,141	0,140	49,49
	2P	2,525	1538,0	1499,0	0,155	0,151	49,49
	3P	2,525	1557,0	1519,0	0,157	0,153	49,49
	4P	2,525	1588,0	1531,0	0,160	0,155	49,49
M/P8/V2/L3	1P	2,995	1733,0	1590,0	0,148	0,135	58,702
	2P	2,995	1867,0	1808,0	0,159	0,154	58,702
	3P	2,990	1887,0	1783,0	0,161	0,152	58,604
	4P	2,990	1893,0	1800,0	0,162	0,154	58,604

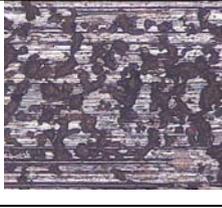
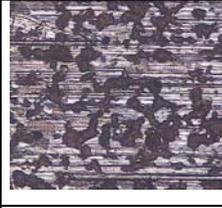
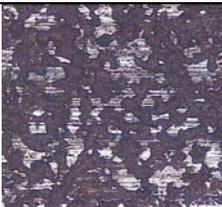
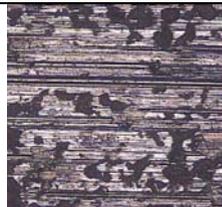
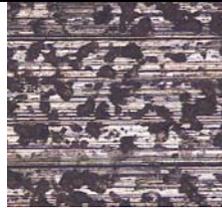
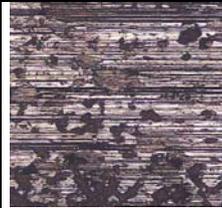
Tabla 8: Muestra los valores obtenidos utilizando lubricante Ferrocote para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 120mm/min.

MUESTRA	PASADAS	V (mV)	Fmáx (N)	F 50 (N)	m máx (N)	m 50 (N)	P chapa (MPa)
M/P1/V3/L3	1P	0,260	126,6	124,8	0,124	0,122	5,096
	2P	0,255	127,5	124,8	0,128	0,125	4,998
	3P	0,250	127,5	123,5	0,130	0,126	4,9
	4P	0,255	127,5	124,8	0,128	0,125	4,998
M/P2/V3/L3	1P	0,465	259,1	257,2	0,142	0,141	9,114
	2P	0,460	253,7	251,0	0,141	0,139	9,016
	3P	0,455	256,4	253,7	0,144	0,142	8,918
	4P	0,455	253,7	246,8	0,142	0,138	8,918
M/P3/V3/L3	1P	0,840	465,8	447,0	0,141	0,136	16,464
	2P	0,830	467,1	445,0	0,144	0,137	16,268
	3P	0,835	481,9	453,9	0,147	0,139	16,366
	4P	0,835	488,6	456,6	0,149	0,139	16,366
M/P4/V3/L3	1P	1,205	708,7	646,4	0,150	0,137	23,618
	2P	1,200	676,5	652,0	0,144	0,139	23,52
	3P	1,200	699,3	656,4	0,149	0,140	23,52
	4P	1,200	714,1	673,8	0,152	0,143	23,52
M/P5/V3/L3	1P	1,665	932,9	874,5	0,143	0,134	32,634
	2P	1,665	934,2	877,3	0,143	0,134	32,634
	3P	1,660	949,0	888,7	0,146	0,137	32,536
	4P	1,660	991,9	924,7	0,152	0,142	32,536
M/P6/V3/L3	1P	2,120	1145,0	1100,0	0,138	0,132	41,552
	2P	2,110	1145,0	1115,0	0,138	0,135	41,356
	3P	2,110	1174,0	1142,0	0,142	0,138	41,356
	4P	2,105	1204,0	1175,0	0,146	0,142	41,258
M/P7/V3/L3	1P	2,565	1431,0	1335,0	0,142	0,133	50,274
	2P	2,565	1392,0	1352,0	0,138	0,134	50,274
	3P	2,565	1416,0	1384,0	0,141	0,138	50,274
	4P	2,565	1435,0	1425,0	0,143	0,142	50,274
M/P8/V3/L3	1P	3,015	1693,0	1559,0	0,143	0,132	59,094
	2P	3,010	1638,0	1601,0	0,139	0,136	58,996
	3P	3,005	1705,0	1657,0	0,145	0,141	58,898
	4P	3,005	1777,0	1762,0	0,151	0,150	58,898

Tabla 9: Muestra los valores obtenidos utilizando lubricante Ferrocote para cada una de las presiones analizadas a la velocidad de 240mm/min.

Microestructura de las muestras Ensayadas.

MICROGRAFÍAS A 40 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 11.26%	Pasada 2 – 13.44%	Pasada 3 – 24.66%	Pasada 4 – 28.58%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 18.48%	Pasada 2 – 40.61 %	Pasada 3 – 45,16 %	Pasada 4 – 52.27%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 28.97%	Pasada 2 – 43.71%	Pasada 3 – 47.17%	Pasada 4 – 52.32%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 29.11%	Pasada 1 – 45.23%	Pasada 3 – 48.09%	Pasada 4 – 53.22%

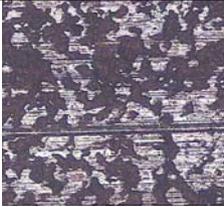
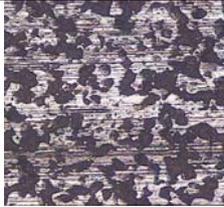
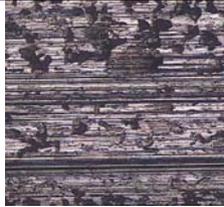
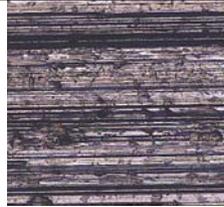
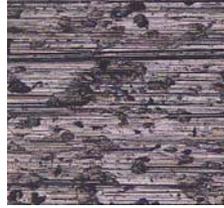
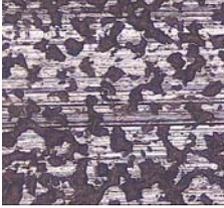
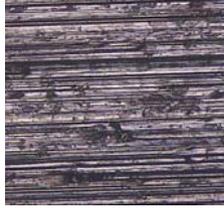
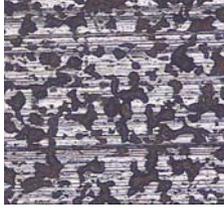
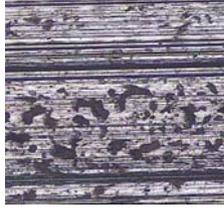
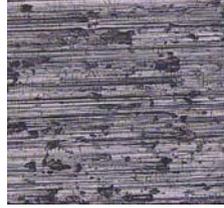
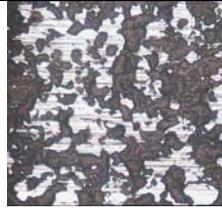
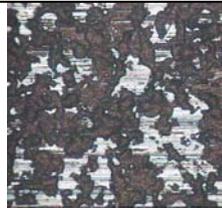
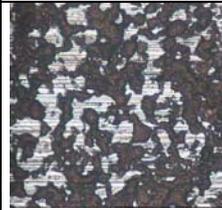
			
Presión= 12 kg/cm ² Pasada 1 – 35.82%	Pasada 2 – 47.17%	Pasada 3 – 50.33%	Pasada 4 – 59.52%
			
Presión= 16 kg/cm ² Pasada 1 – 37.91%	Pasada 2 – 50.41%	Pasada 3 – 50.51%	Pasada 4 – 59.88%
			
Presión= 20 kg/cm ² Pasada 1 – 46.48%	Pasada 2 – 56.62%	Pasada 3 – 56.62%	Pasada 4 – 63.31%
			
Presión= 24 kg/cm ² Pasada 1 – 56.06%	Pasada 2 – 67.41%	Pasada 3 – 73.15%	Pasada 4 – 74.03%

Tabla 10: Muestra las micrografías obtenidas a velocidades de 40 mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

MICROGRAFÍAS A 120 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 20.53%	Pasada 2 – 21.34%	Pasada 3 – 28.6%	Pasada 4 – 33.26%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 23.20%	Pasada 2 – 23.51%	Pasada 3 – 33.10%	Pasada 4 – 38.19%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 23.29%	Pasada 2 – 32.51%	Pasada 3 – 34.46%	Pasada 4 – 39.91%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 23.64%	Pasada 2 – 34.20%	Pasada 3 – 36.50%	Pasada 4 – 42.93%

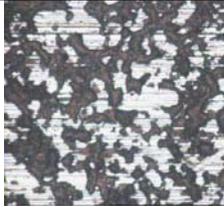
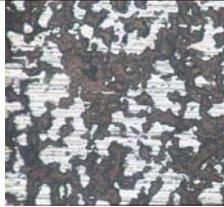
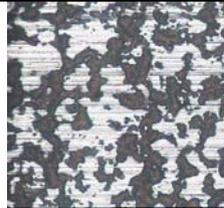
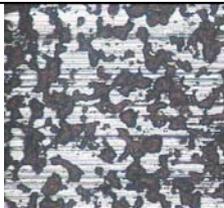
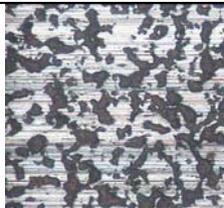
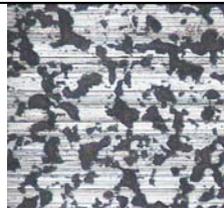
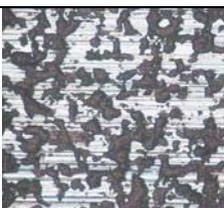
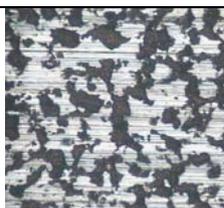
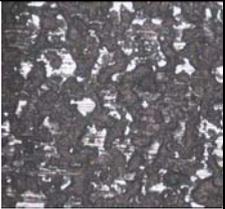
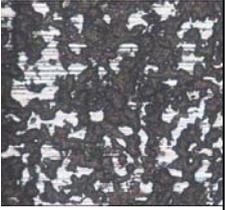
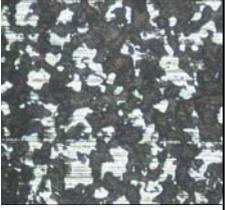
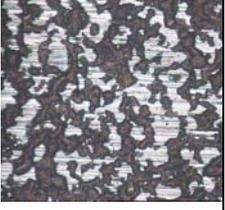
			
Presión= 12 kg/cm ² Pasada 1 – 25.96%	Pasada 2 – 41.52%	Pasada 3 – 41.62%	Pasada 4 – 48.65%
			
Presión= 16 kg/cm ² Pasada 1 – 29.23%	Pasada 2 – 42.01%	Pasada 3 – 44.29%	Pasada 4 – 49.46%
			
Presión= 20 kg/cm ² Pasada 1 – 40.49%	Pasada 2 – 47.07%	Pasada 3 – 55.36%	Pasada 4 – 57.56%
			
Presión= 24 kg/cm ² Pasada 1 – 47.79%	Pasada 2 – 56.13%	Pasada 3 – 57.26%	Pasada 4 – 63.02%

Tabla 11: Muestra las micrografías obtenidas a velocidades de 120mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

MICROGRAFÍAS A 240 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 14.77%	Pasada 2 – 15.18%	Pasada 3 – 16.53%	Pasada 4 – 17.62%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 21.80%	Pasada 2 – 21.95%	Pasada 3 – 25.32%	Pasada 4 – 25.83%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 22.80%	Pasada 2 – 22.97%	Pasada 3 – 25.67%	Pasada 4 – 34.14%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 22.93%	Pasada 2 – 24.40%	Pasada 3 – 30.12%	Pasada 4 – 37.29%

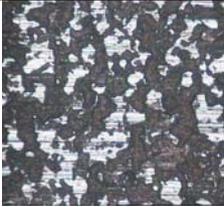
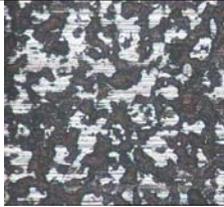
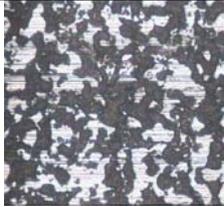
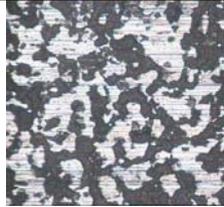
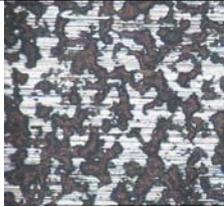
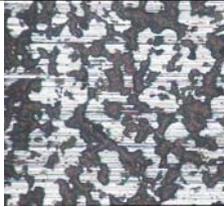
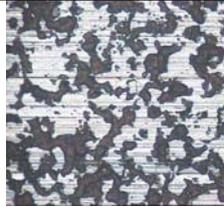
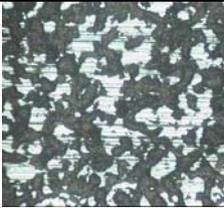
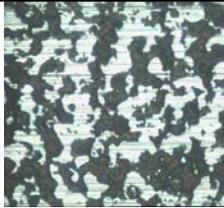
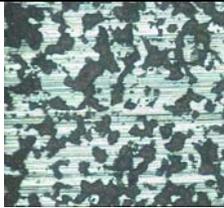
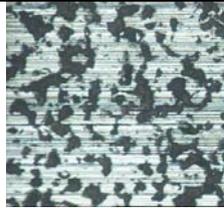
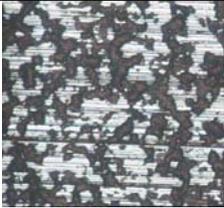
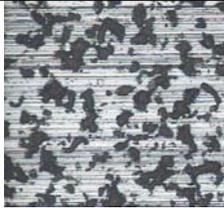
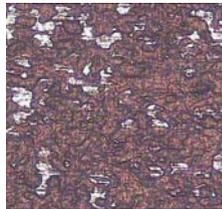
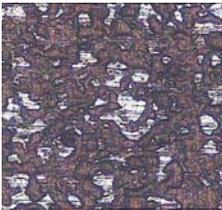
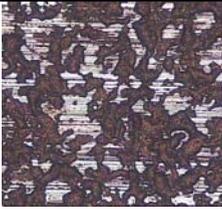
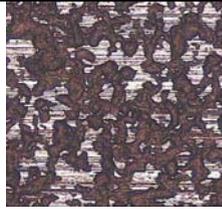
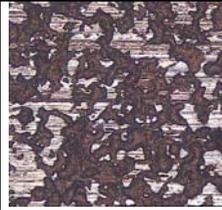
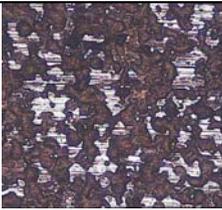
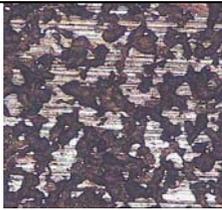
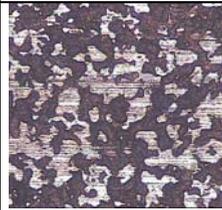
			
Presión= 12 kg/cm ² Pasada 1 – 28.63%	Pasada 2 – 31.44%	Pasada 3 – 43.88%	Pasada 4 – 45.65%
			
Presión= 16 kg/cm ² Pasada 1 – 31.60%	Pasada 2 – 39.16%	Pasada 3 – 42.67%	Pasada 4 – 47.47%
			
Presión= 20 kg/cm ² Pasada 1 – 34.86%	Pasada 2 – 48.24%	Pasada 3 – 52.36%	Pasada 4 – 61.96%
			
Presión= 24 kg/cm ² Pasada 1 – 44.22%	Pasada 2 – 48.48%	Pasada 3 – 57.75%	Pasada 4 – 63.30%

Tabla 12: Muestra las micrografías obtenidas a velocidades de 240mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

6.3.3.2. – Micrografías de probetas con lubricante Fuchs RP4107S.

MICROGRAFÍAS A 40 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 12.19%	Pasada 2 – 13.63%	Pasada 3 – 14.09%	Pasada 4 – 18.01%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 14.14%	Pasada 2 – 17.06%	Pasada 3 – 24.46%	Pasada 4 – 28.09%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 24.98%	Pasada 2 – 26.47%	Pasada 3 – 27.76%	Pasada 4 – 36.49%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 25.03%	Pasada 2 – 29.48%	Pasada 3 – 33.22%	Pasada 4 – 39.14%

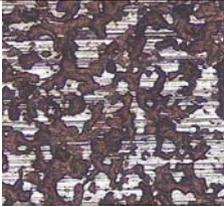
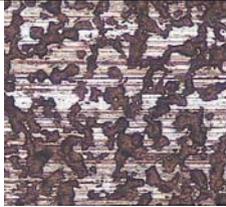
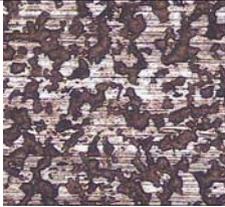
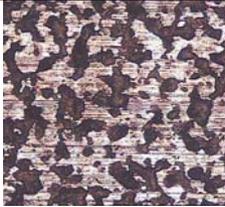
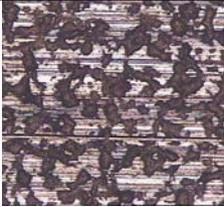
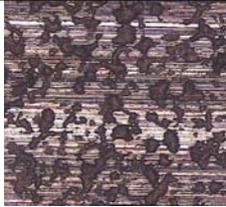
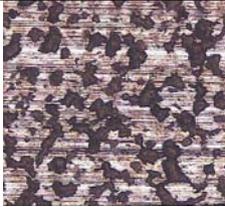
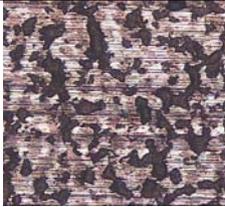
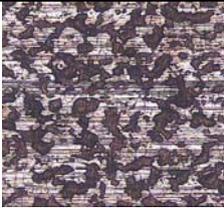
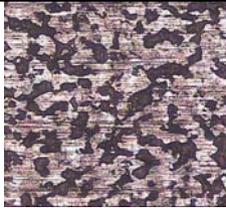
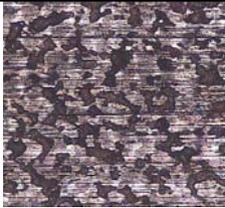
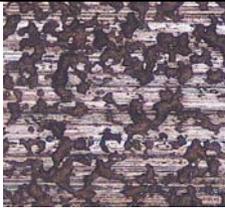
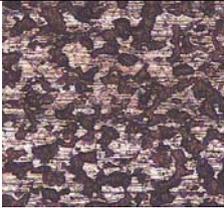
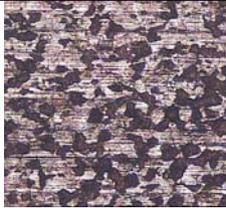
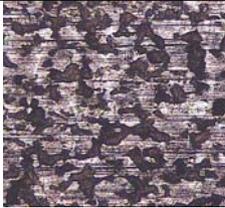
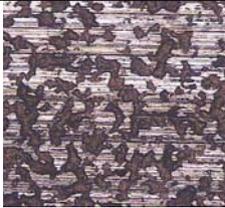
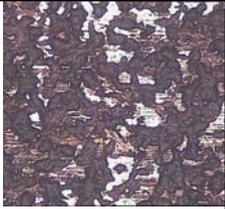
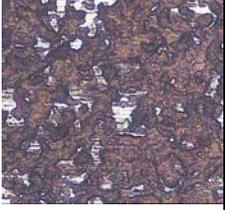
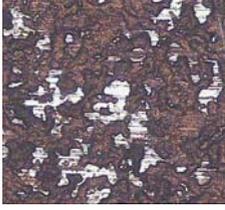
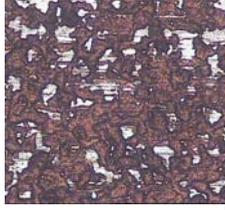
			
Presión= 12 kg/cm ² Pasada 1 – 29.76%	Pasada 2 – 36.38%	Pasada 3 – 42.88%	Pasada 4 – 46.27%
			
Presión= 16 kg/cm ² Pasada 1 – 36.34%	Pasada 2 – 38.25%	Pasada 3 – 49.18%	Pasada 4 – 50.97%
			
Presión= 20 kg/cm ² Pasada 1 – 49.88%	Pasada 2 – 55.08%	Pasada 3 – 55.51%	Pasada 4 – 59.18%
			
Presión= 24 kg/cm ² Pasada 1 – 55.96%	Pasada 2 – 57.57%	Pasada 3 – 58.58%	Pasada 4 – 62.22%

Tabla 13: Muestra las micrográficas con lubricante fuchs obtenidas a velocidades de 40mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

MICROGRAFÍAS A 120 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 15.91%	Pasada 2 – 18.32%	Pasada 3 – 19.30%	Pasada 4 – 19.44%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 16.11%	Pasada 2 – 19.28%	Pasada 3 – 19.46%	Pasada 4 – 20.21%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 18.56%	Pasada 2 – 20.15%	Pasada 3 – 26.07%	Pasada 4 – 26.82%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 23.01%	Pasada 2 – 27.27%	Pasada 3 – 27.76%	Pasada 4 – 32.20%

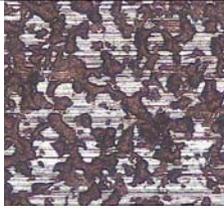
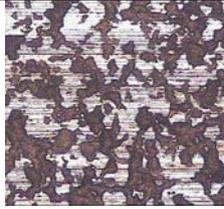
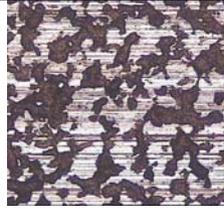
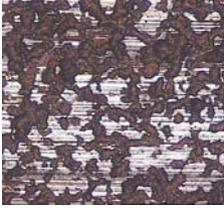
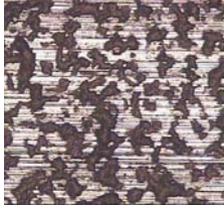
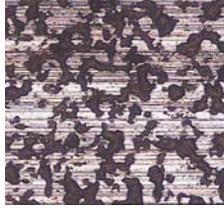
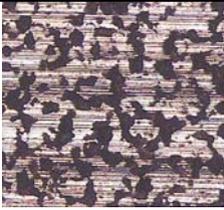
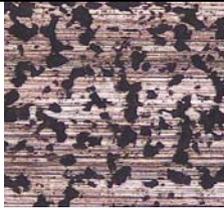
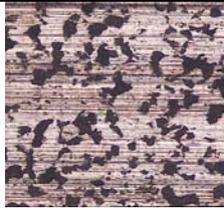
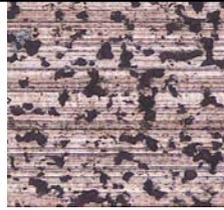
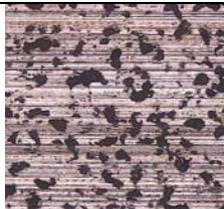
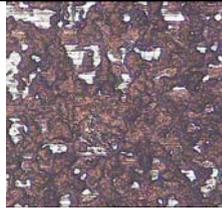
			
Presión= 12 kg/cm ² Pasada 1 – 23.77%	Pasada 2 – 37.90%	Pasada 3 – 39.80%	Pasada 4 – 48.83%
			
Presión= 16 kg/cm ² Pasada 1 – 30.29%	Pasada 2 – 50.81%	Pasada 3 – 56.92%	Pasada 4 – 62.17%
			
Presión= 20 kg/cm ² Pasada 1 – 52.42%	Pasada 2 – 63.90%	Pasada 3 – 70.42%	Pasada 4 – 69.92%
			
Presión= 24 kg/cm ² Pasada 1 – 54.97%	Pasada 2 – 64.14%	Pasada 3 – 70.56%	Pasada 4 – 72.59%

Tabla 14: Muestra las micrografías con lubricante fuchs obtenidas a velocidades de 120mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

MICROGRAFÍAS A 240 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 22.19%	Pasada 2 – 24.54%	Pasada 3 – 25.69%	Pasada 4 – 26.23%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 22.70%	Pasada 2 – 25.90%	Pasada 3 – 26.03%	Pasada 4 – 26.88%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 23.60%	Pasada 2 – 28.13%	Pasada 3 – 36.27%	Pasada 4 – 36.50%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 23.85%	Pasada 2 – 29.43%	Pasada 3 – 33.38%	Pasada 4 – 36.99%

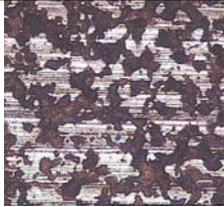
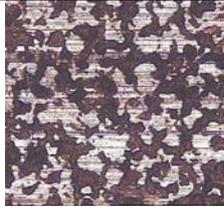
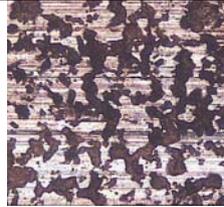
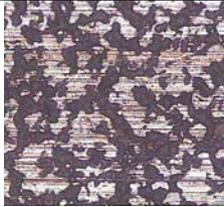
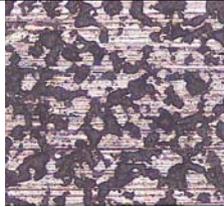
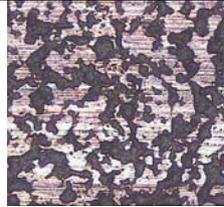
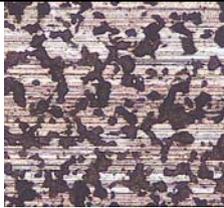
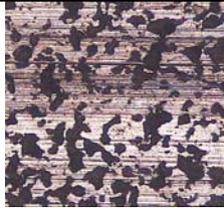
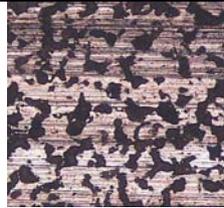
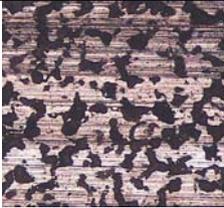
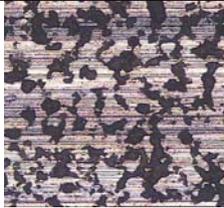
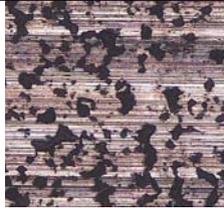
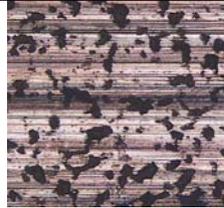
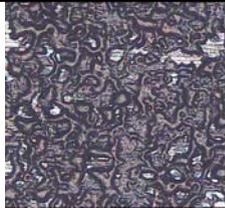
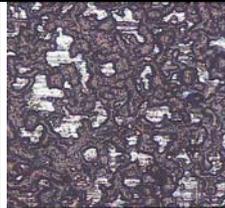
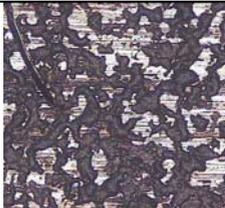
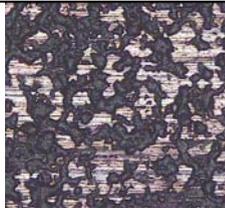
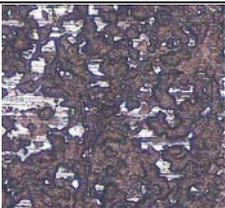
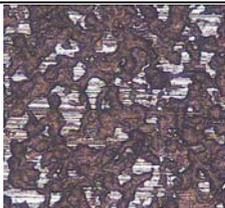
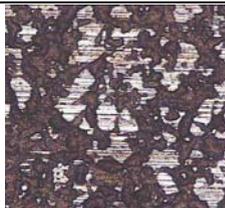
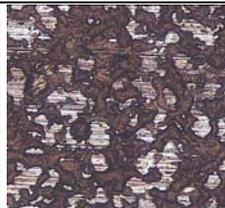
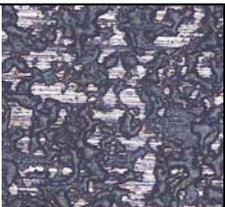
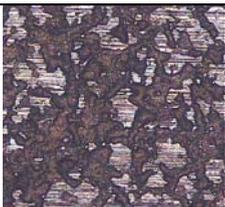
			
Presión= 12 kg/cm ² Pasada 1 – 34.52%	Pasada 2 – 37.98%	Pasada 3 – 50.55%	Pasada 4 – 55.14%
			
Presión= 16 kg/cm ² Pasada 1 – 36.33%	Pasada 2 – 46.60%	Pasada 3 – 50.96%	Pasada 4 – 55.30%
			
Presión= 20 kg/cm ² Pasada 1 – 53.28%	Pasada 2 – 55.12%	Pasada 3 – 60.02%	Pasada 4 – 65.77%
			
Presión= 24 kg/cm ² Pasada 1 – 54.73%	Pasada 2 – 55.35%	Pasada 3 – 68.77%	Pasada 4 – 70.42%

Tabla 15: Muestra las micrografías con lubricante fuchs obtenidas a velocidades de 240mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

6.3.3.3. – Micrografías de probetas con lubricante Ferrocote S-6130.

MICROGRAFÍAS A 40 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 20.63%	Pasada 2 – 21.28%	Pasada 3 – 22.31%	Pasada 4 – 23.99%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 23.75%	Pasada 2 – 24.84%	Pasada 3 – 25.44%	Pasada 4 – 26.81%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 25.25%	Pasada 2 – 26.40%	Pasada 3 – 31.11%	Pasada 4 – 31.83%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 25.81%	Pasada 2 – 26.50%	Pasada 3 – 26.93%	Pasada 4 – 27.74%

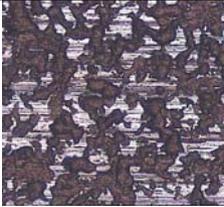
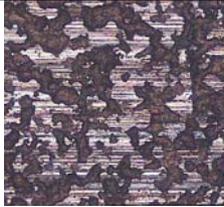
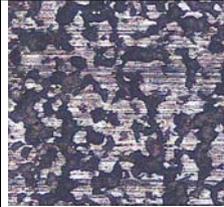
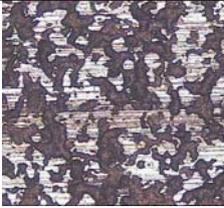
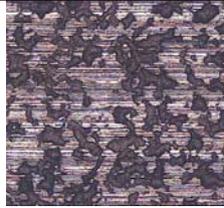
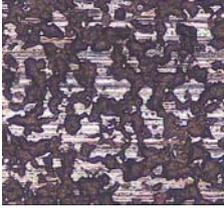
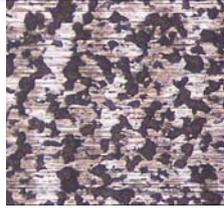
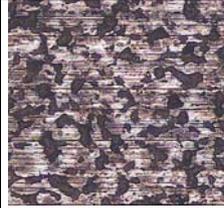
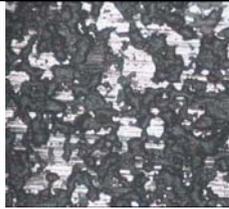
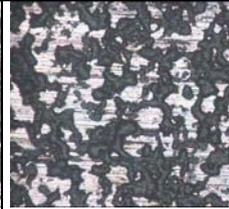
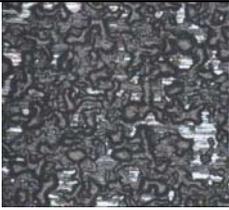
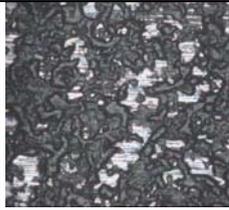
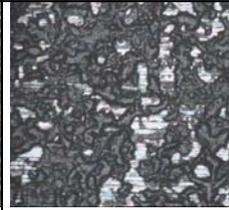
			
Presión= 12 kg/cm ² Pasada 1 – 31.79%	Pasada 2 – 32.35%	Pasada 3 – 43.84%	Pasada 4 – 47.07%
			
Presión= 16 kg/cm ² Pasada 1 – 36.68%	Pasada 2 – 40.66%	Pasada 3 – 49.00%	Pasada 4 – 53.61%
			
Presión= 20 kg/cm ² Pasada 1 – 38.33%	Pasada 2 – 41.41%	Pasada 3 – 53.45%	Pasada 4 – 54.45%
			
Presión= 24 kg/cm ² Pasada 1 – 45.58%	Pasada 2 – 54.03%	Pasada 3 – 56.85%	Pasada 4 – 57.51%

Tabla 16: Muestra las micrografías con lubricante ferrocote obtenidas a velocidades de 40mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

MICROGRAFÍAS A 120 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 11.40%	Pasada 2 – 18.44%	Pasada 3 – 21.04%	Pasada 4 – 26.87%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 19.68%	Pasada 2 – 24.87%	Pasada 3 – 29.22%	Pasada 4 – 29.71%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 23.95%	Pasada 2 – 27.95%	Pasada 3 – 30.50%	Pasada 4 – 33.53%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 24.99%	Pasada 2 – 28.15%	Pasada 3 – 31.45%	Pasada 4 – 34.07%

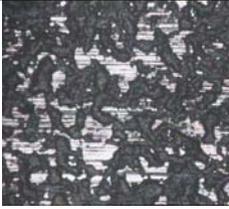
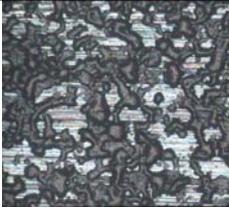
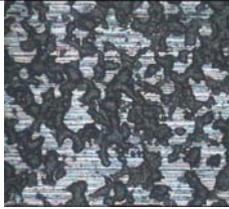
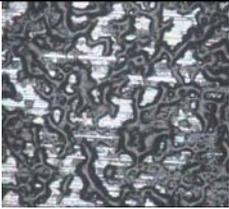
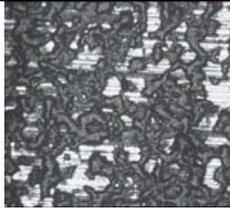
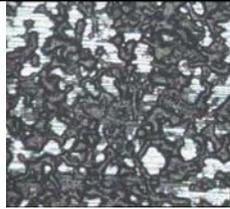
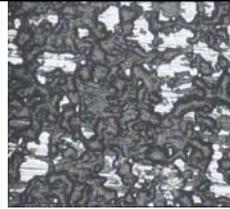
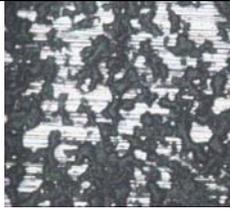
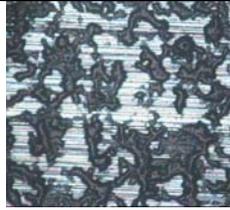
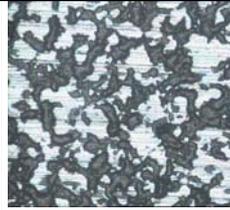
			
Presión = 12 kg/cm ² Pasada 1 – 25.46%	Pasada 2 – 38.43%	Pasada 3 – 39.56%	Pasada 4 – 42.06%
			
Presión = 16 kg/cm ² Pasada 1 – 27.62%	Pasada 2 – 40.91%	Pasada 3 – 49.20%	Pasada 4 – 43.80%
			
Presión = 20 kg/cm ² Pasada 1 – 35.09%	Pasada 2 – 41.11%	Pasada 3 – 49.51%	Pasada 4 – 50.83%
			
Presión = 24 kg/cm ² Pasada 1 – 42.41%	Pasada 2 – 53.54%	Pasada 3 – 60.68%	Pasada 4 – 61.08%

Tabla 17: Muestra las micrografías con lubricante ferrocote obtenidas a velocidades de 120mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

MICROGRAFÍAS A 240 mm/min:

			
Presión = 1 kg/cm ² Pasada 1 – 21.77%	Pasada 2 – 22.07%	Pasada 3 – 29.21%	Pasada 4 – 29.32%
			
Presión = 3 kg/cm ² Pasada 1 – 29.60%	Pasada 2 – 35.40%	Pasada 3 – 37.33%	Pasada 4 – 38.47%
			
Presión = 6 kg/cm ² Pasada 1 – 31.75%	Pasada 2 – 35.82%	Pasada 3 – 36.19%	Pasada 4 – 39.03%
			
Presión = 8 kg/cm ² Pasada 1 – 33.26%	Pasada 2 – 41.81%	Pasada 3 – 44.60%	Pasada 4 – 48.33%

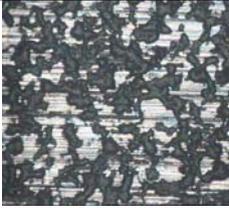
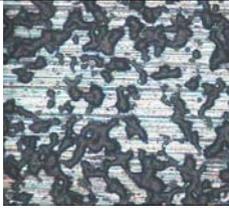
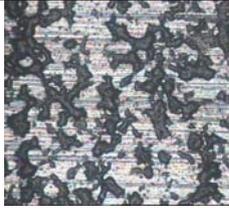
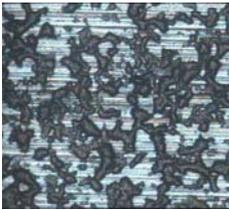
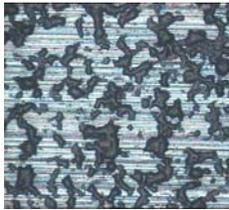
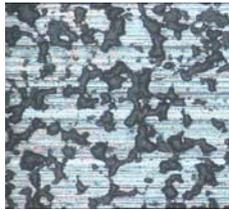
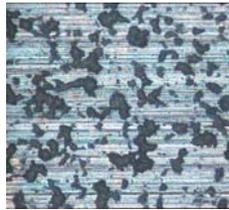
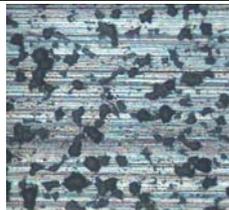
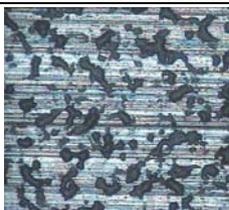
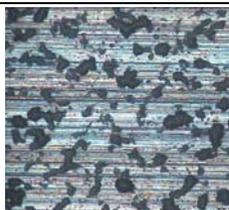
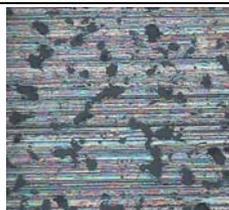
			
Presión = 12 kg/cm ² Pasada 1 – 33.75%	Pasada 2 – 47.25%	Pasada 3 – 51.09%	Pasada 4 – 54.19%
			
Presión = 16 kg/cm ² Pasada 1 – 37.36%	Pasada 2 – 53.29%	Pasada 3 – 60.18%	Pasada 4 – 66.89%
			
Presión = 20 kg/cm ² Pasada 1 – 50.33%	Pasada 2 – 62.96%	Pasada 3 – 66.08%	Pasada 4 – 73.16%
			
Presión = 24 kg/cm ² Pasada 1 – 56.53%	Pasada 2 – 67.05%	Pasada 3 – 74.96%	Pasada 4 – 77.45%

Tabla 18: Muestra las micrografías con lubricante ferrocote obtenidas a velocidades de 240mm/min, desplazamientos hacia la derecha muestra como aumentan las pasadas, en vertical cada una de las presiones aplicadas, pudiéndose observar la evolución del área real de contacto.

RESULTADOS PIN ON DISC

Código	umax	Código	umax
$D_{11}/T_3 /Q_1/V_1/L_1/R_1$	0.314	$D_{11}/T_3 /Q_2/V_3/L_2/R_1$	0.123
$D_{11}/T_3 /Q_1/V_2/L_1/R_1$	0.155	$D_{11}/T_3 /Q_3/V_1/L_2/R_1$	0.090
$D_{11}/T_3 /Q_1/V_3/L_1/R_1$	0.172	$D_{11}/T_3 /Q_3/V_2/L_2/R_1$	0.028
$D_{11}/T_3 /Q_2/V_1/L_1/R_1$	0.233	$D_{11}/T_3 /Q_3/V_3/L_2/R_1$	0.143
$D_{11}/T_3 /Q_2/V_2/L_1/R_1$	0.152	$D_{11}/T_3 /Q_1/V_1/L_3/R_1$	0.214
$D_{11}/T_3 /Q_2/V_3/L_1/R_1$	0.175	$D_{11}/T_3 /Q_1/V_2/L_3/R_1$	0.189
$D_{11}/T_3 /Q_3/V_1/L_1/R_1$	0.213	$D_{11}/T_3 /Q_1/V_3/L_3/R_1$	0.157
$D_{11}/T_3 /Q_3/V_2/L_1/R_1$	0.331	$D_{11}/T_3 /Q_2/V_1/L_3/R_1$	0.183
$D_{11}/T_3 /Q_3/V_3/L_1/R_1$	0.354	$D_{11}/T_3 /Q_2/V_2/L_3/R_1$	0.192
$D_{11}/T_3 /Q_1/V_1/L_2/R_1$	0.106	$D_{11}/T_3 /Q_2/V_3/L_3/R_1$	0.191
$D_{11}/T_3 /Q_1/V_2/L_2/R_1$	0.095	$D_{11}/T_3 /Q_3/V_1/L_3/R_1$	0.131
$D_{11}/T_3 /Q_1/V_3/L_2/R_1$	0.154	$D_{11}/T_3 /Q_3/V_2/L_3/R_1$	0.122
$D_{11}/T_3 /Q_2/V_1/L_2/R_1$	0.070	$D_{11}/T_3 /Q_3/V_3/L_3/R_1$	0.151
$D_{11}/T_3 /Q_2/V_2/L_2/R_1$	0.059		

Tabla 19: resultados con tratamiento acero al cromo

Código	umax	Código	umax
$D_{11}/T_2 /Q_1/V_1/L_1/R_1$	0.579	$D_{11}/T_2 /Q_2/V_3/L_2/R_1$	0.128
$D_{11}/T_2 /Q_1/V_2/L_1/R_1$	0.586	$D_{11}/T_2 /Q_3/V_1/L_2/R_1$	0.116
$D_{11}/T_2 /Q_1/V_3/L_1/R_1$	0.505	$D_{11}/T_2 /Q_3/V_2/L_2/R_1$	0.154
$D_{11}/T_2 /Q_2/V_1/L_1/R_1$	0.547	$D_{11}/T_2 /Q_3/V_3/L_2/R_1$	0.096
$D_{11}/T_2 /Q_2/V_2/L_1/R_1$	0.449	$D_{11}/T_2 /Q_1/V_1/L_3/R_1$	0.152
$D_{11}/T_2 /Q_2/V_3/L_1/R_1$	0.467	$D_{11}/T_2 /Q_1/V_2/L_3/R_1$	0.230
$D_{11}/T_2 /Q_3/V_1/L_1/R_1$	0.513	$D_{11}/T_2 /Q_1/V_3/L_3/R_1$	0.189
$D_{11}/T_2 /Q_3/V_2/L_1/R_1$	0.495	$D_{11}/T_2 /Q_2/V_1/L_3/R_1$	0.189
$D_{11}/T_2 /Q_3/V_3/L_1/R_1$	0.526	$D_{11}/T_2 /Q_2/V_2/L_3/R_1$	0.185
$D_{11}/T_2 /Q_1/V_1/L_2/R_1$	0.129	$D_{11}/T_2 /Q_2/V_3/L_3/R_1$	0.136
$D_{11}/T_2 /Q_1/V_2/L_2/R_1$	0.155	$D_{11}/T_2 /Q_3/V_1/L_3/R_1$	0.222
$D_{11}/T_2 /Q_1/V_3/L_2/R_1$	0.178	$D_{11}/T_2 /Q_3/V_2/L_3/R_1$	0.258
$D_{11}/T_2 /Q_2/V_1/L_2/R_1$	0.136	$D_{11}/T_2 /Q_3/V_3/L_3/R_1$	0.106
$D_{11}/T_2 /Q_2/V_2/L_2/R_1$	0.122		

Tabla 20: resultados con tratamiento Nitrovac

Manteniendo la velocidad constante a 300rpm tenemos:

Código	μ_{inic}	μ_{max}	Código	μ_{inic}	μ_{max}
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.03	0.509	D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.20	0.719
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₃	0.13	0.87	D ₁₁ /T ₃ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.28	2.27
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.16	0.86	D ₁₁ /T ₃ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.28	1.1
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₅	0.17	0.87	D ₁₁ /T ₃ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.16	1.86
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.16	0.72	D ₁₁ /T ₃ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.28	1.61
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₇	0.165	0.73	D ₁₁ /T ₃ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.33	2.579
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₈	0.17	0.779	D ₁₁ /T ₃ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.29	1.809
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₉	0.17	0.67	D ₁₁ /T ₃ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.20	0.72
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₀	0.172	0.839	D ₁₁ /T ₃ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.20	0.659
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.17	0.63	D ₁₁ /T ₃ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.175	1.049
D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₂	0.20	0.579	D ₁₁ /T ₃ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.15	1.01
D ₁₁ /T ₃ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.15	0.91	D ₁₁ /T ₃ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₁₀	0.15	0.829
D ₁₁ /T ₃ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.15	0.98	D ₁₁ /T ₃ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.15	0.829
D ₁₁ /T ₃ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.165	0.73	D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₁₀ /L ₁ /R ₁₃	0.52	0.86
D ₁₁ /T ₃ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.16	0.769	D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₅ /L ₁ /R ₁₃	0.54	0.849
D ₁₁ /T ₃ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.15	0.779	D ₁₁ /T ₃ /Q ₄ /V ₈ /L ₁ /R ₁₃	0.53	0.86

Tabla 21: resultados con tratamiento acero al cromo

Pruebas con pin de aleación Tenifer					
Código	μ_{inic}	μ_{max}	Código	μ_{inic}	μ_{max}
D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.26	0.569	D ₁₁ /T ₁ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.20	0.5
D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₃	0.24	0.74	D ₁₁ /T ₁ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.185	1.13
D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.24	0.759	D ₁₁ /T ₁ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.205	0.96
D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.22	0.79	D ₁₁ /T ₁ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.195	0.959
D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.20	0.79	D ₁₁ /T ₁ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.20	1.11
D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.20	0.79	D ₁₁ /T ₁ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.19	0.81
D ₁₁ /T ₁ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.40	1.32	D ₁₁ /T ₁ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.17	0.84
D ₁₁ /T ₁ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.50	1.59	D ₁₁ /T ₁ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.175	0.899
D ₁₁ /T ₁ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.50	1.33	D ₁₁ /T ₁ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.165	0.93
D ₁₁ /T ₁ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.48	2.15	D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₅ /L ₁ /R ₁₃	0.545	0.84
D ₁₁ /T ₁ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.55	2.539	D ₁₁ /T ₁ /Q ₄ /V ₁₀ /L ₁ /R ₁₃	0.58	0.78
D ₁₁ /T ₁ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.50	1.8			

Tabla 22: resultados con tratamiento Tenifer

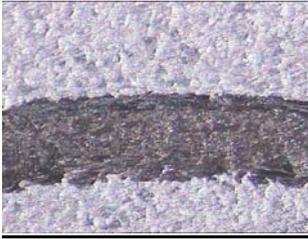
Pruebas con pin de nitruración iónica					
Código	μ_{inic}	μ_{max}	Código	μ_{inic}	μ_{max}
D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.19	0.66	D ₁₁ /T ₂ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.38	0.91
D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.19	0.72	D ₁₁ /T ₂ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.18	0.86
D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.175	0.779	D ₁₁ /T ₂ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.21	0.87
D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.17	0.68	D ₁₁ /T ₂ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.185	0.75
D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.198	0.79	D ₁₁ /T ₂ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.18	0.84
D ₁₁ /T ₂ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.30	1.539	D ₁₁ /T ₂ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.18	0.96
D ₁₁ /T ₂ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.50	2.1	D ₁₁ /T ₂ /Q ₅ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.165	0.91
D ₁₁ /T ₂ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₆	0.46	4.23			
D ₁₁ /T ₂ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₁₁	0.36	1.13	D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₅ /L ₁ /R ₁₃	0.57	0.87
D ₁₁ /T ₂ /Q ₁ /V ₉ /L ₁ /R ₁₃	0.34	3.279	D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₁₀ /L ₁ /R ₁₃	0.65	0.99
D ₁₁ /T ₂ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₂	0.47	0.86	D ₁₁ /T ₂ /Q ₄ /V ₈ /L ₁ /R ₁₃	0.66	0.81
D ₁₁ /T ₂ /Q ₃ /V ₉ /L ₁ /R ₄	0.21	0.86			

Tabla 23: resultados con tratamiento Nitrovac

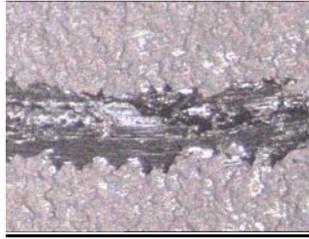
Calculo del área aparente de contacto PIN DE ACERO AL CROMO

Se muestran los resultados obtenidos bajo cargas de 10N, en todos los tratamientos, habiéndose realizado las de 1N, 5N, 10N y 30N.

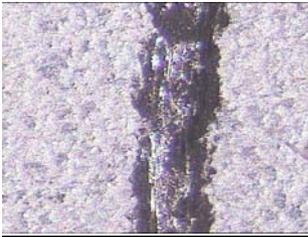
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₂



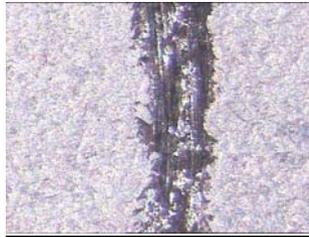
1: 466,97



2: 437,121



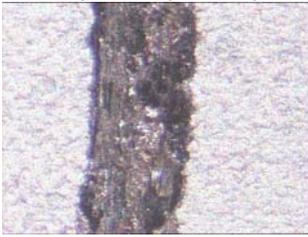
3: 445,955



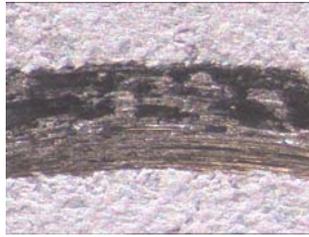
4: 420,048

Promedio: 442,5235 μm Profundidad=6,11 μm

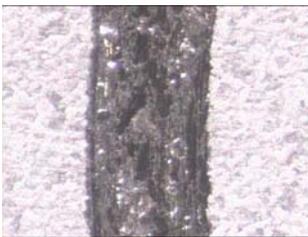
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₃



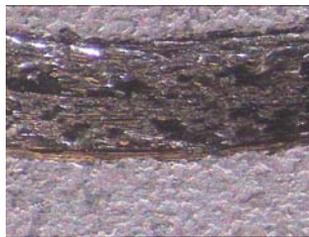
1: 533,401



2: 567,468



3: 644,54



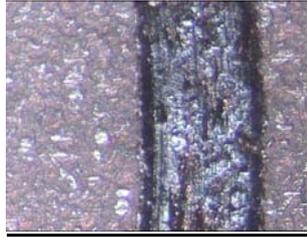
4: 644,573

Promedio: 597,4955 μm Profundidad=11,26 μm

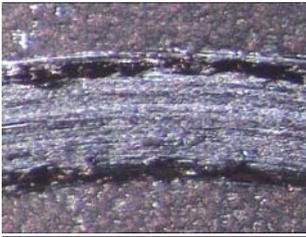
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₄



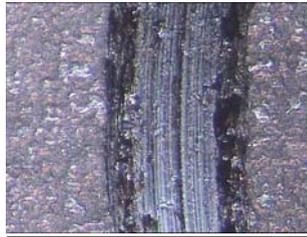
1: 650,446



2: 650,336



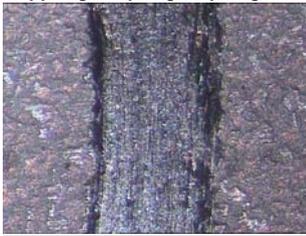
3: 701,651



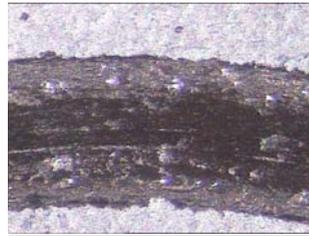
4: 746,272

Promedio: 687,1763 μm Profundidad=14,77 μm

D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₅



1: 692,967



2: 827,303



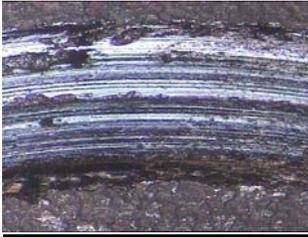
3: 658,849



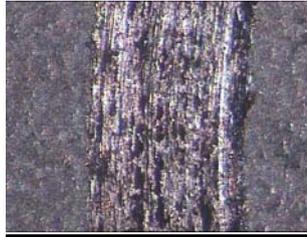
4: 678,052

Promedio: 714,2928 μm Profundidad=15,94 μm

D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₆



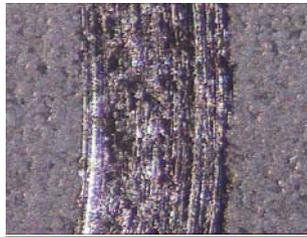
1: 859,444



2: 859,286



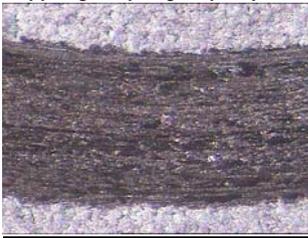
3: 827,303



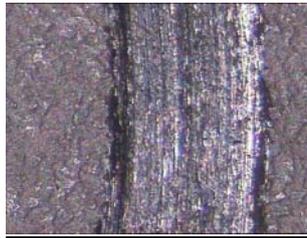
4: 801,709

Promedio: 836,9355 μ m Profundidad=20,01 μ m

D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₇



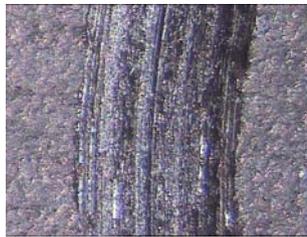
1: 846,654



2: 878,475



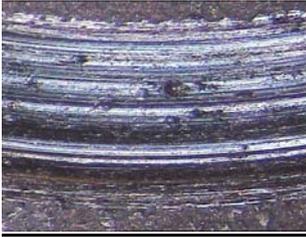
3: 946,697



4: 871,779

Promedio: 885,9013 μ m Profundidad=24,57 μ m

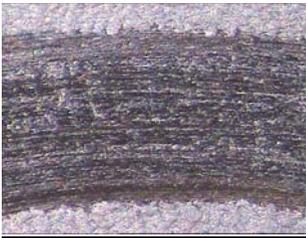
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₈



1: 825,204



2: 944,65



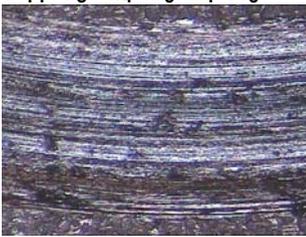
3: 953,495



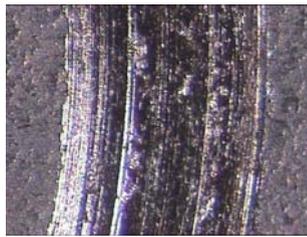
4: 1032,3

Promedio: 938,9123 μ m Profundidad=27,55 μ m

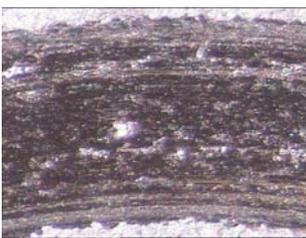
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₉



1: 1046,91



2: 1076,93



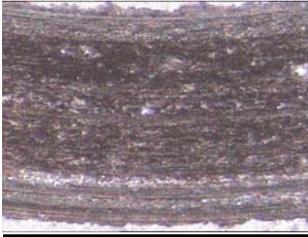
3: 1095,11



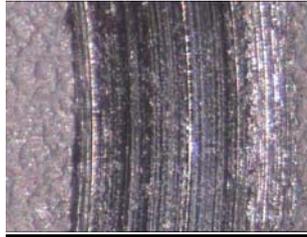
4: 1010,19

Promedio: 1057,285 μ m Profundidad=34,95 μ m

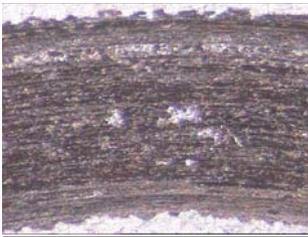
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₁₀



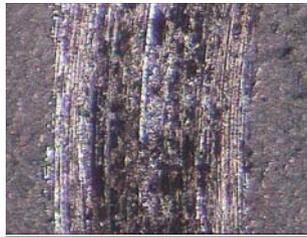
1: 1101,23



2: 1176,98



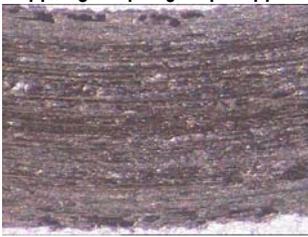
3: 1096



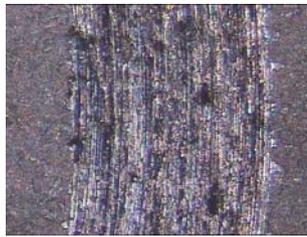
4: 1057,74

Promedio: 1107,988 μm Profundidad=38,42 μm

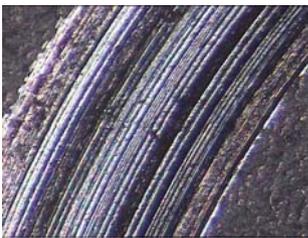
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₁₁



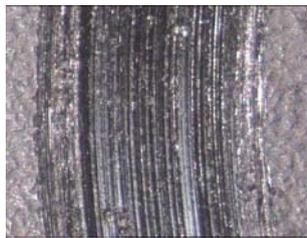
1: 1145,89



2: 1061,87



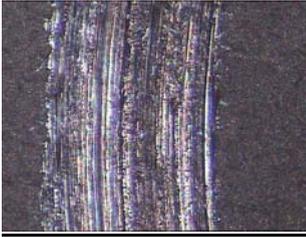
3: 1242,46



4: 1226,35

Promedio: 1169,143 μm Profundidad=40,12 μm

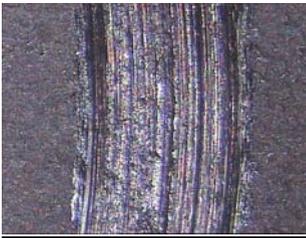
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₁₂



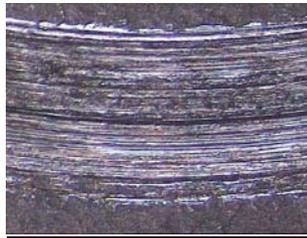
1: 899,878



2: 895,502



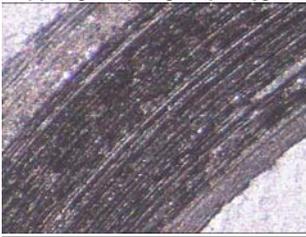
3: 882,34



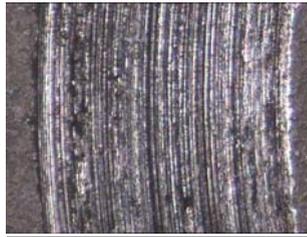
4: 938,169

Promedio: 903,9723 μm Profundidad=25,3 μm

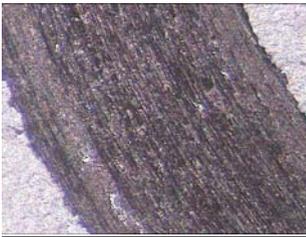
D₁₁/T₃/Q₄/V₉/L₁/R₁₃



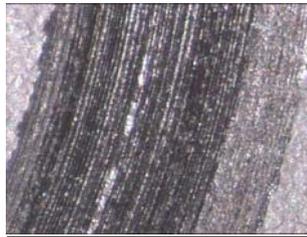
1: 1376,59



2: 1365,53



3: 1326,56

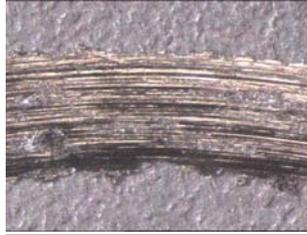


4: 1381,83

Promedio: 1362,628 μm Profundidad=58,29 μm

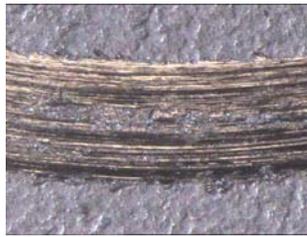
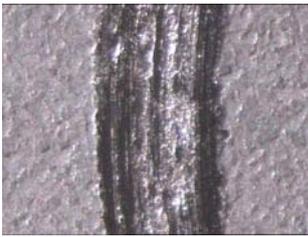
Cálculo del área aparente de contacto: pin de aleación Tenifer

$D_{11}/T_1/Q_4/V_9/L_1/R_2$



1: 638,119

2: 591,068

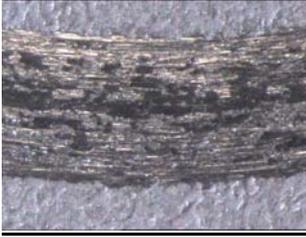


3: 648,826

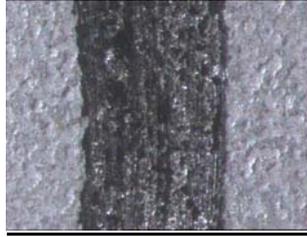
4: 648,82

Promedio: 631,7083 μm

D₁₁/T₁/Q₄/V₉/L₁/R₃



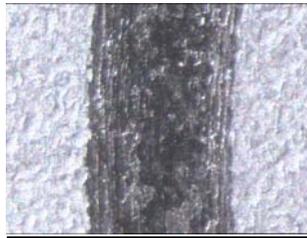
1: 775,187



2: 755,901



3: 706,641



4: 770,881

Promedio: 752,1525 µm

D₁₁/T₁/Q₄/V₉/L₁/R₄



1: 916,791



2: 920,773



3: 918,63



4: 918,653

Promedio: 918,7118 µm

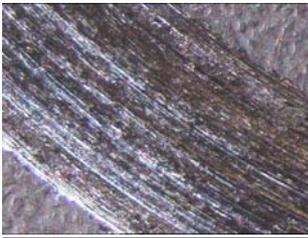
D₁₁/T₁/Q₄/V₉/L₁/R₅



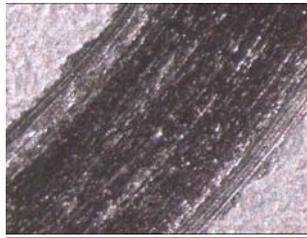
1: 1147,77



2: 1157,29



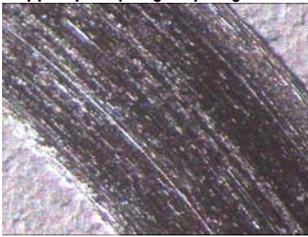
3: 1119,03



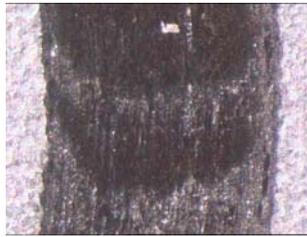
4: 1147,76

Promedio: 1142,963 μm

D₁₁/T₁/Q₄/V₉/L₁/R₆



1: 1264,25



2: 1244,13



3: 1320,34



4: 1205,6

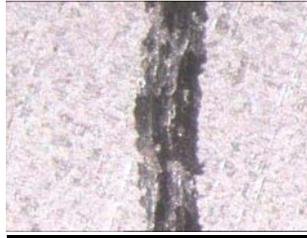
Promedio: 1258,58 μm

7.3.2. – Cálculo del área aparente de contacto: pin nitruración iónica.

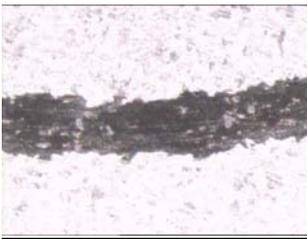
D₁₁/T₂/Q₄/V₉/L₁/R₂



1: 310,493



2: 344,814



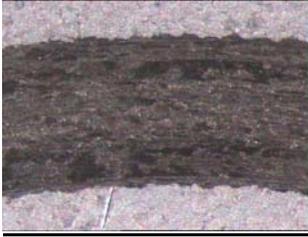
3: 319,065



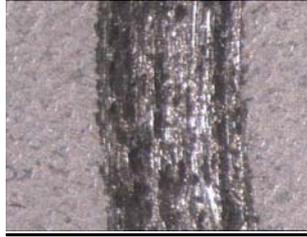
4: 308,782

Promedio: 320,7885 μm

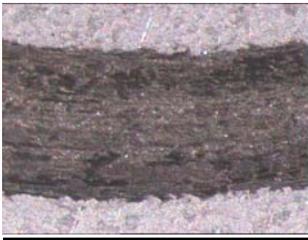
D₁₁/T₂/Q₄/V₉/L₁/R₄



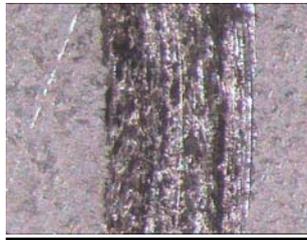
1: 800,868



2: 779,867



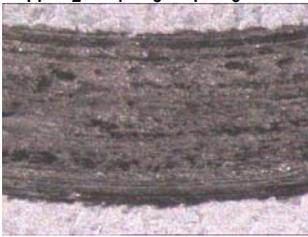
3: 732,334



4: 779,446

Promedio: 773,1289 μm

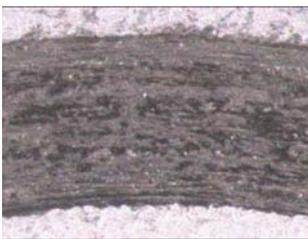
D₁₁/T₂/Q₄/V₉/L₁/R₆



1: 867,304



2: 918,719



3: 897,28



4: 878,205

Promedio: 890,377 μm

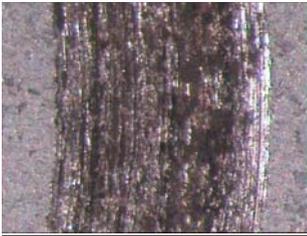
D₁₁/T₂/Q₄/V₉/L₁/R₁₁



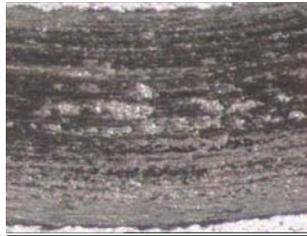
1: 1113,54



2: 1094,52



3: 1132,84



4: 1133,86

Promedio: 1118,69 μm

ANEXO III: MEDIDAS DE RUGOSIDAD.

ANEXO III: Medidas de Rugosidad.

Las tablas de datos siguientes, muestran la evolución de estos parámetros en función de las presiones aplicadas y el número de pasadas efectuadas.

Para P1 (Pa = 2.5 MPa):

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	1,037	1,22	4,78	5,78	2,37	0,81	3,76	2,4	91	2,5	139	65
2p	1,044	1,245	4,99	5,31	2,1	0,29	3,18	3,4	83	0	138	68
3p	1,013	1,173	4,56	4,88	2,14	0,35	3,38	2,8	87	0	145	71
4p	1,072	1,262	4,88	5,38	2,18	0,43	3,31	3,3	83	2,5	100	65

P2 ; Pa = 7.5 MPa:

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	1,05	1,25	5,02	5,79	2,27	0,4	2,89	4,2	77	5	143	61
2p	0,912	1,103	4,46	5,14	1,92	0,35	2,58	4	79	0	131	66
3p	1,012	1,209	4,96	6,04	2,15	0,47	3,21	2,5	85	0	136	70
4p	0,976	1,141	4,48	5,05	1,76	0,19	1,97	4	68	0	144	74

P3 ; Pa = 15 MPa

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	0,985	1,195	5,22	6,38	2,04	0,5	2,73	3,4	80	0	139	66
2p	1,1	1,304	5,18	6,2	2,3	0,3	3,67	2,6	88	0	138	67
3p	1,014	1,221	4,67	5,66	2,01	0,56	3,33	2,2	84	2,5	140	67
4p	0,955	1,141	4,34	5,13	1,74	0,37	1,88	19	69	0	145	58

P4; Pa = 20 MPa

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	1,093	1,35	5,66	6,72	3,01	1,25	3,74	9,3	93	2,5	137	73
2p	1,121	1,311	5,11	6,07	2,31	0,67	3,42	3	81	2,5	158	69
3p	0,975	1,153	4,55	5,81	1,91	0,35	2,77	3,3	80	0	114	70
4p	0,973	1,145	4,42	4,77	1,95	0,25	2,86	2,4	79	0	131	63

P5; Pa = 30 MPa

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	0,943	1,165	5	5,61	2,29	0,8	2,78	6,2	82	2,5	147	83
2p	0,988	1,165	4,79	5,34	1,96	0,42	2,08	4	71	2,5	152	69
3p	0,92	1,096	4,29	5,11	1,61	0,23	2,03	2,8	72	0	155	67
4p	0,832	1,019	4,02	5,02	1,46	0,29	1,39	4,8	68	0	115	69

P6; Pa = 40 MPa

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	0,994	1,176	5,15	6	2,33	0,54	2,86	5	80	2,5	123	60
2p	0,909	1,087	4,48	5,26	1,93	0,42	2,29	4,4	75	0	135	60
3p	0,924	1,106	4,24	4,93	1,62	0,42	1,5	5,7	65	0	136	72
4p	0,651	0,825	3,95	5,04	1,33	0,34	1,07	8,9	70	0	135	59

P7; Pa = 50 MPa

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	1,075	1,244	4,55	5,52	1,97	0,28	2,45	3,5	70	0	157	69
2p	0,713	0,885	3,87	4,78	1,57	0,31	1,54	5,9	73	0	134	51
3p	0,647	0,798	3,41	3,88	1,23	0,29	1,09	6,9	70	0	130	54
4p	0,54	0,7	3,1	3,62	0,95	0,19	0,86	6,2	72	0	110	59

P8; Pa = 60 MPa

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc(2,5,- 2,5)	Sm (μm)	S (μm)
1p	0,689	0,873	3,92	4,54	1,56	0,39	1,38	5,8	76	0	178	53
2p	0,629	0,807	3,77	4,65	1,37	0,31	1,11	6,5	72	0	153	66
3p	0,707	1,086	4,15	7,11	1,72	1,58	1,51	14	80	2,5	218	75
4p	0,344	0,481	2,33	2,97	0,8	0,2	0,72	8,3	81	0	162	43

Aplicando un lubricante concretamente el L2, mientras se realiza el ensayo de las pasadas, obtendremos valores de:

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc	Sm (μm)	S (μm)
2,5 MPa													
1p	1,045	1,199	4,4	5,09	1,94	0,51	2,13	1,82	4	65	0	113	60
2p	0,967	1,118	3,79	4,39	1,57	0,16	2,41	1,42	1,4	73	0	96	49
3p	0,868	1,016	3,65	4,03	1,39	0,21	1,67	1,85	4,4	68	0	94	50
4p	1,025	1,198	4,31	5,01	1,77	0,31	2,54	1,66	3	73	0	102	53
Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc	Sm (μm)	S (μm)
7,5 MPa													
1p	0,818	0,972	3,84	4,84	1,56	0,59	1,36	1,86	5,3	66	0	99	60
2p	0,832	1,023	4,12	5,44	1,54	0,87	1,84	1,76	4,8	74	2,5	101	62
3p	0,651	0,855	3,4	3,95	0,96	0,12	0,84	2,43	4	71	0	144	80
4p	0,62	0,839	3,57	4,3	1,13	0,25	0,78	2,16	7,7	71	0	157	81
Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc	Sm (μm)	S (μm)
15 MPa													
1p	0,764	0,895	3,35	4,28	1,16	0,17	0,99	2,1	5,7	64	0	104	64
2p	0,593	0,77	3,11	4,01	0,92	0,1	0,74	2,2	3,3	73	0	163	77
3p	0,704	0,89	3,35	4,65	0,97	0,15	0,83	2,5	4,9	70	0	163	89
4p	0,48	0,661	2,78	3,04	0,73	0,18	0,52	2,19	8,9	77	0	175	85
Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc	Sm (μm)	S (μm)
20 MPa													
1p	0,739	0,916	3,42	3,89	1,04	0,22	0,59	2,73	8,5	67	0	119	72
2p	0,505	0,735	3,31	3,73	0,83	0,13	0,62	2,35	5,8	78	0	178	99
3p	0,522	0,719	3	3,81	0,91	0,2	0,49	2,33	11	75	0	239	94
4p	0,32	0,525	2,61	3,51	0,7	0,2	0,41	1,61	4,9	80	0	256	95
Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc	Sm (μm)	S (μm)
30MPa													
1p	0,589	0,792	3,25	4,14	0,89	0,15	0,68	2,37	4,6	75	0	132	79
2p	0,336	0,522	2,56	3,27	0,59	0,14	0,46	1,68	8	81	0	194	88
3p	0,318	0,527	2,46	3,47	0,64	0,21	0,41	1,67	9,1	81	0	233	78
4p	0,325	0,488	2,63	2,89	0,77	0,17	0,42	1,31	7,2	76	0	202	92
Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc	Sm (μm)	S (μm)
40MPa													
1p	0,504	0,655	2,89	3,2	0,8	0,17	0,57	1,92	5,2	72	0	119	69

2p	0,272	0,435	2,51	2,68	0,63	0,15	0,42	1,31	7,5	82	0	191	87
3p													
4p	0,134	0,225	1,66	2,59	0,61	0,22	0,31	0,59	6,9	86	0	218	54

Muestra	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rp (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 %	Mr2 %	Pc	Sm (μm)	S (μm)
---------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	---------------------------	-------------------------	--------------------------	-------------------------	--------------------------	----------	----------	----	-------------------------	------------------------

50MPa

1p	0,581	0,791	3,33	4,05	0,92	0,14	0,62	2,38	4,9	74	0	142	79
2p	0,303	0,465	2,34	2,73	0,55	0,15	0,38	1,43	8,8	79	0	194	79
3p	0,203	0,362	2,23	3,01	0,51	0,14	0,26	1,04	9,5	82	0	333	77
4p	0,167	0,253	1,44	1,66	0,37	0,24	0,32	0,75	9,4	82	0	244	60