



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departament d'Enginyeria Mecànica i de Materials

TESIS DOCTORAL

Investigación de las condiciones tribológicas en el conformado de elementos estructurales de Aceros Avanzados de Alta Resistencia en vehículos.

Presentada por:

Rafael Pla Ferrando

Dirigida por:

Dr. D. Vicente Jesús Seguí Llinares

Dr. D. Samuel Sánchez Caballero

Dr. D. Miguel Ángel Sellés Cantó

Diciembre 2015



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departament d'Enginyeria Mecànica i de Materials

TESIS DOCTORAL

Investigación de las condiciones tribológicas en el conformado de elementos estructurales de Aceros Avanzados de Alta Resistencia en vehículos.

Presentada por:

Rafael Pla Ferrando

Dirigida por:

Dr. D. Vicente Jesús Seguí Llinares

Dr. D. Samuel Sánchez Caballero

Dr. D. Miguel Ángel Sellés Cantó

Octubre 2015

Agradecimientos.

Gracias por haberme dado tanto. Lili, Iris, Rafa, Leonor, Jesus, Sam, Miki, Bea, Tomas V. Lourdes, Tayo, Viçent, Rafa, Rafa, Javi.

Gracias amigos de Flinsa, Miguel y Jesús

Resumen.

La rápida evolución de los materiales y procedimientos de fabricación, impulsada por una competencia globalizada y nuevas regulaciones de seguridad y medio ambiente ha tenido un fuerte impacto en la fabricación de estructuras de automóviles (BIW).

La necesidad de vehículos con menos peso, con más equipamiento, más seguros y al mismo tiempo, respetuosos con el medio ambiente, abarca todo el ciclo de vida del vehículo.

Constructores y fabricantes de acero están de acuerdo en que todavía hay margen para para la reducción, y la solución pasa por los nuevos Aceros Avanzados de Alta Resistencia.

Materiales más delgados y más resistentes llevan a mayores exigencias en el conformado por estampación, que es el sistema de fabricación que abarca una mayor proporción de piezas y peso del chasis de vehículos ligeros. En este contexto de innovación persistente la lubricación de las superficies rozantes es un problema asociado al cambio.

Tras formular la cuestión sobre el lubricante más adecuado para conformar estos nuevos materiales, se ha realizado una investigación sobre los equipos de simulación conocidos, sus características y prestaciones. Se ha utilizado un simulador del proceso de estampación referido a los bordes de punzón y matriz. Se han seleccionado dos materiales dentro de la propuesta de AISI. El DP600 por ser uno de los más utilizados en la construcción de la estructura, y el TWIP que es una novedad a evaluar, y con un extraordinario comportamiento en su deformación. Se han diseñado y construido útiles para la fabricación de las probetas.

Se ha definido un modelo de deformación simplificado para la evaluación del comportamiento. Se ha desarrollado un protocolo de medición con doce parámetros que permiten comparar el comportamiento de los lubricantes en el simulador. Se han seleccionado los mejores para cada tipo de material mediante un Diseño de Experimentos Factorial y se han definido parámetros de eficiencia para tomar los mejores candidatos.

Se ha aplicado el modelo a los materiales conformados y se ha podido responder a la cuestión inicial. Al mismo tiempo se ha podido realizar la evolución tecnológica del sistema de simulación y el protocolo de medida.

Palabras Clave: Estampación, lubricación, rozamiento, DP600, TWIP

Resum.

La ràpida evolució dels materials i procediments de fabricació, impulsada per una competència globalitzada i noves regulacions de seguretat i medi ambient ha tingut un fort impacte en la fabricació d'estructures d'automòbils (BIW)

La necessitat de vehicles amb menys pes, amb més equipament, més segurs i al mateix temps respectuosos amb el medi ambient, comprén el procés integral del vehicle.

Constructors i fabricants d'acer estan d'acord en què encara hi ha marge per a la reducció, i la solució penses pels nous Acers Avançats d'Alta Resistència.

Materials més primers i més resistents porten a majors exigències en el conformat per estampació, que és el sistema de fabricació que comprén una major proporció de peces i pes del xassís de vehicles lleugers. En este context d'innovació persistent la lubricació de les superfícies rozantes és un problema associat al canvi.

Després de formular la qüestió sobre el lubricant més adequat per a conformar estos nous materials, s'ha realitzat una investigació sobre els equips de simulació coneguts, les seues característiques i prestacions. S'ha utilitzat un simulador del procés d'estampació referit als bords de punxó i matriu. S'han seleccionat dos materials dins de la proposta d'AISI. El DP600 per ser un dels més utilitzats en la construcció de l'estructura, i el TWIP que és una novetat a avaluar, i amb un extraordinari comportament en la seua deformació. S'han dissenyat i fabricat útils per a la fabricació de les provetes.

S'ha definit un model de deformació simplificat. S'ha desenrotllat un protocol de mesurament amb dotze paràmetres que permeten comparar el comportament dels lubricants en el simulador. S'han seleccionat els millors per a cada tipus de material per mitjà d'un Disseny d'Experiments Factorial i s'han definit paràmetres d'eficiència per a prendre els millors candidats i el model de simular.

S'ha aplicat el model als materials conformats i s'ha pogut respondre a la qüestió inicial. Al mateix temps s'ha podi realitzar l'evolució tecnològica del sistema de simulació i el protocol de mesura.

Paraules Clau: Estampació, lubricació, fregament, DP600, TWIP

Abstract.

The rapid evolution of materials and manufacturing processes, driven by global competition and new safety and environmental regulations has had an impact on the automotive structures (BIW) manufacturing.

The need for lighter vehicles, with more equipment, safer and at the same time friendly to the environment, covers the entire life cycle of the car.

Carmakers and steelmakers agree that weight reduction is possible, and the solution goes through the new Advanced High-Strength Steels.

Thinner and stronger materials lead to higher demands on stamping, the manufacturing system most used in manufacturing BIW parts. In this context of persistent innovation the lubrication of surfaces is a problem associated with the change.

After the question about the best lubricant to form these new materials, it was researched about characteristics and performance of known simulation equipment. An edge of punch and die drawing simulator was used. Two materials have been selected from the AISI portfolio. DP600 for being one of the most used in BIW frames, and TWIP is a new steel to evaluate, and with an extraordinary strain. They are designed and manufactured tools for the manufacture of the specimens.

It has defined a simplified deformation model. It was developed a measurement protocol with twelve parameters that compare the behaviour of lubricants in the simulator. It was selected the best for each type of material by Factorial Experiments Design and efficiency parameters have been used to select the best one.

The model has been applied to the formed specimens and is able to answer the initial question. Simultaneously it has been able to make the technological evolution of system simulation and measurement protocol.

Keywords: Stamping, lubrication, friction, DP600, TWIP

SUMARIO:

I. INTRODUCCIÓN	1
1 INTRODUCCIÓN.	5
1.1 OBJETIVOS.	5
1.2 PLAN DE INVESTIGACIÓN.....	6
1.3 ESTRUCTURA DE ESTA TESIS:	8
2 ENERGÍA ACERO Y AUTOMÓVIL.	13
2.1 LA NORMATIVA SOBRE EMISIONES DE CO ₂ EN LA CEE.	19
2.2 LAS POLÍTICAS FUTURAS DE LA CEE.	23
2.3 NORMATIVA EN OTROS PAÍSES SOBRE EMISIONES DE CO ₂ Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE.	24
2.4 LA SEGURIDAD DEL VEHÍCULO.	26
2.5 LA RECICLABILIDAD DE LOS VEHÍCULOS.	29
2.6 LOS MATERIALES ESTRUCTURALES DE LOS VEHÍCULOS.....	30
2.7 EVOLUCIÓN RECIENTE EN EL USO DEL ALUMINIO EN LAS ESTRUCTURAS DEL AUTOMÓVIL.	30
2.8 LOS COSTES DE LOS MATERIALES.	34
2.9 LOS ACEROS EN LA ESTRUCTURA DEL AUTOMÓVIL.	37
2.9.1 LA EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS ACEROS UTILIZADOS EN AUTOMÓVILES.	37
2.9.2 LOS ACEROS ACTUALES.	39
2.9.3 LOS ACEROS TWIP/TRIP.	40
2.9.3.1 Twinning-Induced Plasticity -TWIP (aceros de plasticidad inducida por unión)	
Aceros al hierro-manganeso	41
2.9.4 PERSPECTIVAS E IMPORTANCIA CRECIENTE DE LOS ACEROS TWIP.....	42
2.9.5 LOS ACEROS DUAL PHASE (DP).....	43
2.10 LOS PROCEDIMIENTOS DE FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA PORTANTE.....	45
2.11 MATERIAS PRIMAS.	45
2.12 NECESIDAD DEL CONOCIMIENTO DEL ROZAMIENTO DE LOS MATERIALES PARA SU CONFORMADO.	46
3 EL COMPORTAMIENTO DE LAS SUPERFICIES.	49
3.1 ROZAMIENTO Y LUBRICACIÓN EN EL CONFORMADO DE LÁMINAS METÁLICAS.	49
3.2 LUBRICACIÓN DE CAPA LÍMITE Y ROZAMIENTO.	50
3.3 REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.	51
3.4 ANÁLISIS DE LA LUBRICACIÓN Y LA LUBRICACIÓN DE CAPA LÍMITE EN CONFORMADO METÁLICO.	53
3.5 CONCLUSIONES. EL MODELO DE CONTACTO ENTE SUPERFICIES.	64
4 LOS SIMULADORES DE LA ESTAMPACIÓN.	69
4.1 LOS SIMULADORES DEL ROZAMIENTO Y SUS RESULTADOS.....	69
4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE MEDICIÓN DEL ROZAMIENTO EN LÁMINAS METÁLICAS	79
4.3 ECUACIONES UTILIZADAS PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO.	82
4.4 AVANCES EN MEDICIÓN ELECTRÓNICA Y OPTICA:	84

4.5 CONCLUSIONES .LA MEDIDA DEL ROZAMIENTO. 84

II. MATERIALES Y MÉTODOS 87

5 COMPORTAMIENTO DE LA LÁMINA DEFORMADA. 91

5.1 EL ROZAMIENTO EN EL PROCESO..... 91

5.1.1 EL PROCESO DE ESTAMPACIÓN Y EL ROZAMIENTO. 91

5.1.2 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO Y PRESIÓN DE CONTACTO. 97

5.1.2.1 Coeficiente de rozamiento y presión de contacto. 97

5.2 EL RÉGIMEN DE LUBRICACIÓN Y MODELO DE ROZAMIENTO. 101

5.3 RÉGIMEN HIDRODINÁMICO. 102

5.3.1 CONDICIÓN DE RÉGIMEN HIDRODINÁMICO DE PELÍCULA GRUESA $h \geq 10\sigma$ 103

5.3.2 CONDICIÓN DE RÉGIMEN HIDRODINÁMICO DE PELÍCULA FINA $10\sigma \geq h \geq 3\sigma$ 103

5.3.3 RÉGIMEN HIDRODINÁMICO O DE CAPA LÍMITE $h \leq 3\sigma$ 104

5.3.3.1 Si $p_a > 0$, entonces se da lugar a lubricación mixta; 104

5.3.3.2 Si $p_a \leq 0$, entonces se da lugar a lubricación de capa límite..... 104

5.4 VARIABLES DEL SISTEMA DE MEDIDA. VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN RELATIVA Y DEFORMACIÓN RELATIVA EN EL PUNTO DE CONTACTO. 105

5.5 DEFORMACIÓN PLÁSTICA Y ROZAMIENTO. 108

5.6 ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN PERMANENTE. HERRAMIENTA LISA. 110

5.6.1 ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO A VELOCIDAD CONSTANTE. RÉGIMEN PERMANENTE CON ANCHO CONSTANTE. HERRAMIENTA LISA. 110

5.6.2 ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO A VELOCIDAD CONSTANTE. RÉGIMEN PERMANENTE CON ANCHO VARIABLE. HERRAMIENTA LISA. 112

1.1.1 MODELO DE VARIACIÓN DE LA DEFORMACIÓN RELATIVA. 115

5.7 CONCLUSIÓN. 117

6 LOS MATERIALES Y SUS CARACTERÍSTICAS..... 121

6.1 LA OBTENCIÓN DE PROBETAS..... 121

6.2 UTILAJES PARA LA PREPARACIÓN DE PROBETAS. 122

6.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES. CURVA DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN. 124

6.4 CARACTERIZACIÓN DEL ACERO DP600 (GM). 125

6.5 CARACTERIZACIÓN DE ACERO TWIP (POSCO). 127

6.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES. DIMENSIONES..... 129

6.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES. SUPERFICIE. 131

6.7 MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL. RUGOSÍMETRO. 132

6.8 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA SEM. 137

6.9 LOS LUBRICANTES. 138

6.10 CONCLUSIÓN..... 138

7 EL SIMULADOR Y EL SISTEMA DE MEDICIÓN. 143

7.1 ANTECEDENTES 143

7.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR. 143

7.1.1	ELEMENTOS DE MOVIMIENTO Y POSICIÓN.....	144
7.1.2	DESPLAZAMIENTOS.....	147
7.2.1.1	Actuadores lineales. Movimiento del fleje.....	147
7.2.1.2	Actuadores rotativos. Posicionamiento del módulo basculante.....	148
7.2.1.3	Actuadores rotativos. Giro de la herramienta.....	148
7.2.1.4	La herramienta de conformado.....	149
7.2.2	EL SISTEMA DE MEDIDA.....	149
7.2.2.1	Medición de fuerzas.....	150
7.2.2.2	Medición de desplazamientos. Regletas ópticas.....	150
7.2.2.3	Medición de desplazamientos. Encoders incrementales.....	151
7.2.3	EL CONTROL DEL SISTEMA.....	152
7.2.3.1	Acondicionamiento de las señales de salida.....	153
7.2.3.2	La conversión de magnitudes en datos.....	154
7.2.3.3	El conjunto de medida.....	155
7.3	EL PROCESO DE ESTAMPACIÓN SIMPLIFICADO.....	156
7.4	LA SIMULACIÓN DE LA ESTAMPACIÓN.....	160
7.4.1	LA DEFORMACIÓN PERFECTA.....	162
7.4.2	LA DEFORMACIÓN REAL.....	164
7.1.3	GEOMETRÍA DE LA MEDICIÓN.....	167
7.4.3	CINEMÁTICA DE LA PROBETA.....	170
7.5	EL SIMULADOR EN FUNCIONAMIENTO.....	171
7.5.1	EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL. LOS DATOS DE SALIDA.....	171
7.5.2	EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL. PASOS EN LOS ENSAYOS.....	173
7.5.3	EL FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR.....	174
7.6	CONCLUSIÓN.....	175
III.	RESULTADOS.....	177
8	LOS RESULTADOS DEL DP600(FLINSA).....	181
8.1	LA HERRAMIENTA DE CONFORMADO.....	181
8.2	LAS PROBETAS.....	182
8.3	LOS LUBRICANTES.....	183
8.4	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	184
8.4.1	VARIABLES DE ENSAYO.....	184
8.4.1.1	La velocidad de ensayo.....	184
8.4.1.2	El ángulo de ensayo.....	184
8.4.1.3	Los lubricantes.....	185
8.4.2	EL DISEÑO FACTORIAL DEL EXPERIMENTO.....	185
8.4.3	DATOS QUE SUMINISTRA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN.....	185
8.4.4	PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA LOS EXPERIMENTOS FACTORIALES.....	186
8.4.4.1	Grupo de fuerzas y tensiones:.....	186
8.4.4.2	Grupo de velocidades y deformaciones.....	187

8.4.4.3 Grupo de coeficiente de rozamiento.....	189
8.4.4.4 Grupo de parámetros relacionados con la superficie	189
8.4.4.5 Parámetros seleccionados.....	190
8.5 RESULTADOS DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONAL.....	190
8.5.1.1 Influencia de los bloques.....	190
8.5.1.2 Variables Velocidad, Viscosidad, Ángulo y Coeficiente de Rozamiento 1	192
8.5.1.3 Rugosidades transversales.	194
8.6 RESULTADOS SOBRE LA SUPERFICIE. MICROSCOPIA.	195
8.6.1 OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO.....	195
8.6.2 OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO SEM.....	196
8.7 LOS RESULTADOS DEL EQUIPO DE SIMULACIÓN	196
8.8 DISCUSIÓN	197
8.9 CONCLUSIONES PARCIALES.....	199
9 EL DP600(GM).....	203
9.1 LA HERRAMIENTA DE CONFORMADO.....	203
9.2 LAS PROBETAS.....	204
9.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	206
9.3.1 VARIABLES DE ENSAYO.....	206
9.3.1.1 La velocidad de ensayo.....	207
9.3.1.2 El ángulo de ensayo.....	207
9.3.1.3 Los lubricantes.....	208
9.3.2 EL DISEÑO FACTORIAL DEL EXPERIMENTO.	208
9.4 PARÁMETROS DE EFICIENCIA DEL SISTEMA EN PROCESO.	209
9.4.1 DATOS OBTENIDOS DESDE EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN.	209
9.4.2 PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA LOS EXPERIMENTOS FACTORIALES	209
9.4.3 PARÁMETROS SELECCIONADOS	209
9.4.3.1 Realización de los experimentos	210
9.5 RESULTADOS DEL DISEÑO FACTORIAL COMPLETO.....	211
9.5.1 INFLUENCIA DE LOS BLOQUES	211
9.5.2 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO 1.....	212
9.5.3 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO 2.....	215
9.5.4 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO 3.....	215
9.5.5 DIFERENCIA DE TENSIONES.	217
9.5.6 DIFERENCIA DE FUERZAS ESPECÍFICA.	218
9.5.7 VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN RELATIVA ESPECÍFICA.	219
9.5.8 SALTO DE VELOCIDADES RELATIVO	220
9.5.9 VELOCIDAD DE ENTRADA RELATIVA.	221
9.5.10 SALTO DE VELOCIDAD.	221
9.5.11 RAZÓN DE PENDIENTES A LA ENTRADA.....	222
9.5.12 DIFERENCIA DE RUGOSIDADES LONGITUDINALES.....	223
9.5.13 DIFERENCIA DE RUGOSIDADES TRANSVERSALES	224
9.6 RESULTADOS SOBRE LA SUPERFICIE. RUGOSIDADES MEDIDAS.....	225

9.7 RESULTADOS SOBRE LA SUPERFICIE. MICROSCOPÍA.	225
9.7.1 OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO	226
9.7.2 OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO SEM.	226
9.8 LOS RESULTADOS DEL EQUIPO DE SIMULACIÓN	227
9.9 DISCUSIÓN	228
9.9.1 LOS COEFICIENTES DE ROZAMIENTO	229
9.9.2 DIFERENCIA DE FUERZAS ESPECÍFICA	233
9.9.3 DIFERENCIA DE RUGOSIDADES LONGITUDINALES	234
9.9.4 COMPARACIÓN DE LAS ECUACIONES.	235
9.9.5 OTRAS CONSIDERACIONES	238
9.9.5.1 Velocidad sobre la probeta	238
9.10 APLICACIÓN DEL MODELO.	238
9.11 CONCLUSIONES PARCIALES.	240
10 RESULTADOS. ESTUDIO DEL TWIP (POSCO)	245
10.1 LAS PROBETAS	245
10.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	246
10.2.1 VARIABLES DE ENSAYO	246
10.2.1.1 La velocidad de ensayo.	247
10.2.1.2 El ángulo de ensayo.	247
10.2.1.3 Los lubricantes.	247
10.3 EL DISEÑO FACTORIAL DEL EXPERIMENTO.	248
10.4 PARÁMETROS DE EFICIENCIA DEL SISTEMA EN PROCESO.	249
10.4.1 DATOS QUE SUMINISTRA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN.	249
10.4.2 PARÁMETROS DE CACULO PARA LOS EXPERIMENTOS FACTORIALES.	249
10.4.3 PARÁMETROS SELECCIONADOS	249
10.4.3.1 Realización de los experimentos	250
10.5 RESULTADOS DEL DISEÑO FACTORIAL COMPLETO.	251
10.5.1 INFLUENCIA DE LOS BLOQUES	251
10.5.2 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO 1.	252
10.5.3 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO 2.	254
10.5.4 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO 3.	255
10.5.5 DIFERENCIA DE TENSIONES.	256
10.5.6 DIFERENCIA DE FUERZAS ESPECÍFICA.	257
10.5.7 VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN RELATIVA ESPECÍFICA.	258
10.5.8 SALTO DE VELOCIDADES RELATIVO	258
10.5.9 VELOCIDAD DE ENTRADA RELATIVA.	259
10.5.10 SALTO DE VELOCIDAD.	260
10.5.11 RAZÓN DE PENDIENTES A LA ENTRADA	260
10.5.12 DIFERENCIA DE RUGOSIDADES LONGITUDINALES.	261
9.1.1.1 Diferencia de rugosidades transversales.	261
10.6 RUGOSIDADES MEDIDAS.	262
10.7 RESULTADOS SOBRE LA SUPERFICIE. MICROSCOPÍA.	263

10.7.1 OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO.....	263
10.7.2 OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO SEM.....	263
10.8 LOS RESULTADOS DEL EQUIPO DE SIMULACIÓN	264
10.8.1 COMENTARIOS A LA DEFORMACIÓN	266
10.9 DISCUSIÓN	266
10.9.1 LOS COEFICIENTES DE ROZAMIENTO	268
10.9.2 DIFERENCIA DE TENSIONES	269
10.9.3 DIFERENCIA DE FUERZAS ESPECÍFICA.....	270
10.9.4 COMPARACIÓN DE LAS ECUACIONES	271
10.9.5 OTRAS CONSIDERACIONES	274
10.9.5.1 Velocidad sobre la probeta	274
10.10 APLICACIÓN DEL MODELO	274
10.11 CONCLUSIONES PARCIALES.....	276

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES..... 277

11 DISCUSIÓN

11.1 EL DP600(GM).....	284
11.2 EL ACERO TWIP(Posco).....	286
11.3 LOS PARÁMETROS.....	288
11.4 LAS PROBETAS.....	288
11.5 EL EQUIPO DE MEDIDA.....	289
11.5.1 LA MEDICIÓN DE LAS FUERZAS	289
11.5.2 LA MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS.....	290
11.6 EL PROTOCOLO DE MEDICIÓN	292

12 CONCLUSIONES..... 295

12.1 LAS PROBETAS.....	295
12.2 EL EQUIPO DE MEDICIÓN	295
12.3 LA SOLUCIÓN.....	296

13 FUTURAS INVESTIGACIONES..... 299

13.1 AMPLIACIÓN DE LA VALIDEZ DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN A DIFERENTES TIPOS DE ACEROS. OPTIMIZACIÓN DEL PROTOCOLO	299
13.2 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LUBRICANTES SÓLIDOS.....	299
13.3 PARÁMETROS DE MEDICIÓN PARA ALUMINIOS UTILIZADOS EN LA ESTRUCTURAS DE AUTOMÓVIL ..	299
13.4 APLICACIÓN Y DESARROLLO DE UN PROTOCOLO DE MEDICIÓN PARA LA COMPARACIÓN DE LUBRICANTES PARA ESTAMPACIÓN EN CALIENTE (HOT STAMPING).....	299

VI. REFERENCIAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES

V. ANEXOS	313
ANEXO A. TABLAS DE RESULTADOS DP600 (FLINSA). GRÁFICOS COMPLEMENTARIOS..	315
ANEXO B. RESULTADOS DP600 (GM).....	327
ANEXO C. RESULTADOS TWIP (POSCO).....	355

Simbología

Símbolo	Descripción
A	Área aparente de contacto
ε^*	Deformación relativa normalizada de la pieza.
P	p/k, factor de presión de entrecara, adimensional
DRm	Altura promedio de la capa de asperezas
W,w	Ancho de lámina
Θ	Ángulo de abrazamiento/flexión
θ_t	Ángulo medio de rugosidad de la herramienta
A	Área de contacto aparente
τf	Carga de rozamiento unitaria en la entrecara
c	Coefficiente de adherencia
ν	Coefficiente de Poison
μ	Coefficiente de rozamiento
μ_w	Coefficiente de rozamiento con agua
μ_0	Coefficiente de rozamiento de capa límite
μ_b	Coefficiente de rozamiento hidrodinámico (película lubricante)
μ_p	Coefficiente de rozamiento por arado de las superficies.
μ_m	Coefficiente de rozamiento por captura de partículas
α	Coefficiente presión-viscosidad
C ₁ ,C ₂	Constantes semiempíricas
$\Delta\varepsilon$	Deformación relativa integrada a lo largo del contacto
ε_i	Deformación relativa-i
y, t	Espesor de la lámina
h_t	Espesor promedio de lubricante
A ₁	Fracción de área inicial de la sección de la pieza
α	Fracción de superficie en contacto
α	Fracción se superficie cubierta por film lubricante
β	Fracción se superficie no cubierta por film lubricante y con captura de partículas
F _s	Fuerza de cizalladura
P ₁ , F ₁	Fuerza de retención
D _{d+f}	Fuerza de tracción en embutición con los rodillos fijos
D _d	Fuerza de tracción en embutición con los rodillos libres
P _i	Fuerza en la superficie de contacto
F _n	fuerza normal
F _n	Fuerza normal en kN
F _B , F _{BUB}	Fuerza que produce flexión y enderezamiento
P ₂ , F ₂	Fuerza de estiramiento
\bar{h}	Holgura promedio entre las crestas aplanadas y los flancos de las asperezas
θ_w	Inclinación de las asperezas de la herramienta

θ_t .	Inclinación de las asperezas de la pieza de trabajo
x_i	Longitud de la cuerda entre dos puntos de contacto
L_2	Longitud del fleje en el tramo de salida
L_1	Longitud del fleje en el tramo de entrada
L_{10}	Longitud inicial del fleje en el tramo de entrada
L_{20}	Longitud inicial del fleje en el tramo de salida
σ	Media geométrica de rugosidades eficaces
H	<i>módulo de endurecimiento efectivo</i>
E	Módulo elástico del material
P_A	Presión aparente
p	Presión de contacto promedio (MPa)
p_h	presión debida a la acción hidrodinámica
p_h	Presión debida a la acción hidrodinámica
p_a	presión debida al contacto de las asperezas
p_a	Presión debida al contacto de las asperezas
R, r	Radio de contacto
β	Razón ϵ_2/ϵ_1
k	Resistencia a cortadura del material de la pieza (MPa)
R_q	Rugosidad eficaz
λ	Rugosidad superficial
α	Semiángulo de deformación del fleje
Vr	Suma de velocidades de deformación de las asperezas
T	Tensión (Fuerza o Fuerza por unidad de ancho)
τ	tensión de cortadura
σ	Tensión de tracción o compresión
τ_a	Tensión debida a la adherencia
t_s	Tiempo en que se alcanza el régimen estacionario
A_c	Valor crítico de A
VR_m	Variación de DRm pre y post conformado
$\dot{\epsilon}$	Velocidad de deformación relativa
U_1, U_1	Velocidad de la lámina a la entrada
U_2, U_2	Velocidad de la lámina a la salida
V_1, V_1	Velocidad del actuador 1
V_2, V_2	Velocidad del actuador 2
V	Velocidad relativa en mm/s
η	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática cSt

Índice de tablas

Tabla 1. 1 Etapas de la investigación y su duración en horas.....	8
Tabla 2. 1 Normativas para vehículos de gasolina. CEE.....	19
Tabla 2. 2 Calendario de límites de emisión en la CEE	20
Tabla 2. 3 Normativas sobre emisiones en automóviles de diversos países.	24
Tabla 2. 4 Aluminios utilizados en chasis y cerramientos.....	33
Tabla 2. 5 Precios de Acero y Aluminio, para un ACV(LCA) de 14 años.....	35
Tabla 2. 6 Huella de carbono de BIW de Acero y Aluminio, tomados de un ACV(LCA) durante la utilización de 1 año.	35
Tabla 2. 7 Impacto ambiental de la producción primaria de metales “cradle to gate”	36
Tabla 2. 8 Precios del mercado de metales	37
Tabla 4. 1 Diferentes tipos de simuladores descritos.....	80
Tabla 4. 1 (Continuación) Diferentes tipos de simuladores descritos	81
Tabla 4. 1(Continuación) Diferentes tipos de simuladores descritos	82
Tabla 4. 2 Ecuaciones para determinar el coeficiente de rozamiento.....	83
Tabla 6. 1 TABLA. Resultados de los ensayos de tracción DP600(GM)(Val. Nominales)	125
Tabla 6. 2 Resultados de los ensayos de tracción TWIP(POSCO).....	128
Tabla 8. 1 Variables de ensayos de cada bloque	185
Tabla 8. 2 Resultados de ANOVA y LSD sobre los bloques de ensayos.....	191
Tabla 8. 3 Resultados de ANOVA.....	192
Tabla 8. 4 Resultados LSD.....	193
Tabla 8. 5 Resultados de ANOVA.....	194
Tabla 9. 1 Combinación de parámetros	207
Tabla 9. 2 Variables de ensayos de cada bloque	208
Tabla 9. 3 Parámetros de eficiencia	210
Tabla 9. 4 Resultados de ANOVA y LSD sobre los bloques de ensayos.....	211
Tabla 9. 5 Resultados de ANOVA. Rozamiento 1. Ec. 5.6	212
Tabla 9. 6 Resultados LSD . Rozamiento 1. Ec. 5.6	213
Tabla 9. 7 Gráfico Resultado LSD. Rozamiento 1. Ec. 5.6	214
Tabla 9. 8 Análisis de Varianza de la variación de Rugosidad Transversal.....	224
Tabla 9. 9 Resumen de las variables significativa respecto a los parámetros de eficiencia	228
Tabla 9. 10 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento	230
Tabla 9. 11 Diferencias de rozamientos entre dos lubricantes Lub2 – Lub1	231
Tabla 9. 12 Parámetro Diferencia de Fuerzas Específica.	233
Tabla 9. 13 Resultados de las Diferencias Rugosidades Longitudinales	234
Tabla 9. 14 Ecuaciones obtenidas con significación de la viscosidad	235
Tabla 9. 15 Velocidades diferenciales U2-U1 (mm/s)	238
Tabla 9. 16 Factores sobre la velocidad de la herramienta	238
Tabla 10. 1.....	247
Tabla 10. 2 Variables de ensayos de cada bloque	248
Tabla 10. 3 Parámetros de eficiencia	250
Tabla 10. 4 Resultados de ANOVA y LSD sobre los bloques de ensayos.....	251
Tabla 10. 5 Resultados de ANOVA. Rozamiento 1. Ec. 5.6	252
Tabla 10. 6 Resultados LSD . Rozamiento 1. Ec. 5.6	252
Tabla 10. 7 Gráfico Resultado LSD. Rozamiento 1. Ec. 5.6	253
Tabla 9. 8 Gráfico Medias Diferencia Tensiones. Ecuación 8. 4	258

Tabla 10. 9 Gráfico Medias Velocidad de entrada normalizada. Ec 8.14	261
Tabla 10. 10 Gráfico Medias Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2.....	261
Tabla 10. 11 Gráfico Medias Diferencia de rugosidades transversales Ec. 6.2.....	262
Tabla 10. 12 Resumen de las variables significativa respecto a los parámetros de eficiencia	266
Tabla 10. 13 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento	268
Tabla 10. 14 Diferencias de rozamientos entre dos lubricantes Lub2 – Lub1	269
Tabla 10. 15 Parámetro Diferencia de Tensiones.....	270
Tabla 10. 16 Parámetro Diferencia de Fuerzas Especifica	271
Tabla 9. 17 Ecuaciones obtenidas con significación de la viscosidad	271
Tabla 10. 18 Velocidades diferenciales U2-U1 (mm/s)	274
Tabla 10. 19 Factores sobre la velocidad de la herramienta	274
Tabla 11. 1 Factores del ensayo DP600 (GM).....	284
Tabla 11. 2 Factores del ensayo DP600 (GM).....	287
Tabla 11. 3 Parámetros significativos en lubricación	288
Tabla 11. 4 Arcos iniciales en el ensayo	291
Tabla 12. 1 Parámetro generales	296
Tabla 12. 1 Parámetro generales	296
Tabla A. 1 Herramienta de conformado (rodaje). Rugosidad Longitudinal.....	317
Tabla A. 2 Herramienta de rodaje Rugosidad Transversal	317
Tabla A. 3 Perfil longitudinal y transversal de rugosidad de la herramienta de conformado.....	318
Tabla A. 4 DP600 (Flinsa) Resultados Bloque 1	319
Tabla A. 5 DP600 (Flinsa) Resultados Bloque 2	320
Tabla A. 6 Medias e intervalos de los parámetros de Diseño.....	322
Tabla A. 7 Ecuaciones de ajuste resultado de los Experimentos.....	322
Tabla B. 1 Herramienta de conformado. Rugosidad Longitudinal.....	329
Tabla B. 2 Herramienta de rodaje Rugosidad Transversal.....	329
Tabla B. 3 Resultados Bloque 1,2 a)	331
Tabla B. 4 Resultados Bloque 1,2 b)	332
Tabla B. 5 Resultados Bloque 1,2 c)	333
Tabla B. 6 Resultados Bloque 1,2 D).....	334
Tabla B. 7 Resultados Bloque 3 e)	335
Tabla B. 8 Resultados Bloque 3 f).....	336
Tabla B. 9 Resultados Bloque 3 g)	337
Tabla B. 10 Resultados Bloque 3 h)	338
Tabla B. 11 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 1. Ec. 5.6	341
Tabla B. 12 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 2. Ec. 5.9	343
Tabla B. 13 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 3. Ec. 8.15	345
Tabla B. 14 Rugosidad inicial y Final. Longitudinal y Transversal. Probeta D1	351
Tabla B. 15 Rugosidades medidas Ra (μm), Longitudinal y Transversal	352
Tabla B. 16 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento.Lub1	353
Tabla B. 17 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento.Lub2	354
Tabla C. 1 Herramienta de conformado. Rugosidad Longitudinal.....	357
Tabla C. 2 Herramienta de rodaje Rugosidad Transversal.....	357
Tabla C. 3 Resultados Bloque 1,2 a)	359
Tabla C. 4 Resultados Bloque 1,2 b)	360
Tabla C. 5 Resultados Bloque 1,2 c)	361
Tabla C. 6 Resultados Bloque 3 a)	362

Tabla C. 7 Resultados Bloque 3 b)	363
Tabla C. 8 Resultados Bloque 3 c).....	364
Tabla B. 24 Resultados LSD . Pareto y ANOVA experimento. Rozamiento 1. Ec. 5.6.....	367
Tabla C. 10 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 2. Ec. 5.9	368
Tabla C. 11 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 3. Ec. 8.15	370
Tabla C. 12 Rugosidad inicial y Final. Longitudinal y Transversal. Probeta T1	378
Tabla C. 13 Rugosidades medidas Ra (μm), Longitudinal y Transversal.....	379

Índice de Ilustraciones

Figura 2. 1 .Estructura de materiales de un vehículo	13
Figura 2. 2 Evolución de pesos del Golf VW	14
Figura 2. 3 Evolución de peso de vehículo	15
Figura 2. 4 Estrategias de Ahorro	16
Figura 2. 5 Previsión de emisiones de diferentes países en el período 2002-2018.....	17
Figura 2. 6 Previsión de normativas sobre emisiones de diferentes países en el período 2002-2025	18
Figura 2. 7 Evolución de las emisiones de CO ₂ en distintos países europeos hasta 2010.....	22
Figura 2. 8 Emisiones de GEI de la UE: hacia una reducción interna del 80 % (100 % =1990)	24
Figura 2. 9 Correlación entre las emisiones de CO ₂ y la masa rodante de los vehículos nuevos vendidos cada año.....	26
Figura 2. 10 Impacto frontal a 64 km/h contra una barrera deformable.....	27
Figura 2. 11 Ejemplos de ensayos de impacto frontal según diferentes normas.....	28
Figura 2. 12 Elementos del frontal de un vehículo	28
Figura 2. 13 Trayectorias de carga en impacto frontal y lateral en un BMW Serie-3	29
Figura 2. 14 Estructura del vehículo (BIW).....	30
Figura 2. 15 Previsión del uso del aluminios y acero sen BIW+cerramientos	31
Figura 2. 16 Previsión de distribución de uso de materiales en los futuros vehículos	32
Figura 2. 17 Utilización del aluminio en estructuras se vehículos automóviles.....	34
Figura 2. 18 Estructura actual de oferta de aceros para BIW	39
Figura 2. 19 Posibles aceros para BIW.	40
Figura 2. 20 Curvas Tensión-Deformación verdaderas para TRIP,TWIP(X-IP1000), DP680 y DP980 y HSLA320.....	42
Figura 2. 21 Número de artículos relacionados con aceros TWIP	43
Figura 2. 22 Posición relativa de los aceros DP	44
Figura 2. 23 DP Fase matriz ferrítica e islas de martensita.....	44
Figura 3. 1 Regímenes de lubricación.....	52
Figura 3. 2 Modelo de rozamiento de Orowan	54
Figura 3. 3 Modelo de rozamiento de Shaw	55
Figura 3. 4 Conformado de la pieza en ausencia de deslizamiento con la herramienta.....	57
Figura 3. 5 Los casos de la ecuación de Wilson y Sheu	58
Figura 3. 6 Esquema del simulador de W.R.D.Wilson.....	59
Figura 3. 7 Los puntos Ay B en dos instantes del proceso.	63
Figura 4. 1 Sistema de ensayo para flejes. Duncan.....	71
Figura 4. 2 Resultados del sistema de ensayo para flejes. Duncan.	71
Figura 4. 3 Simulador de deslizamiento para fleje plano.	73
Figura 4. 4. Simulador para fleje plano en caliente de Azushima	73
Figura 4. 5	74
Figura 4. 6 Esquema del simulador de draw-bed de Nine	75
Figura 4. 7 Simulador de de Draw-Bed de Samuel.....	75
Figura 4. 8 Simulador de bordes de matriz de Wright	76
Figura 4. 9 Simulador de Azushima	77
Figura 4. 10 Simulador de Tracción Bajo Flexión de Bay	78
Figura 4. 11 Principales simuladores relacionados con la estampación.....	79

Figura 5. 1 Acciones en la estampación	92
Figura 5. 2 Elementos de la estampación	93
Figura 5. 3 Lámina en el proceso de estampación	93
Figura 5. 4 Modelo de fricción de la lámina contra la herramienta	94
Figura 5. 5 Estado de deformación.	96
Figura 5. 6 Parte de la lámina traccionada.....	96
Figura 5. 7 Estados de fuerza, espesor, deformación y presión de la lámina	97
Figura 5. 8 Variables del ensayo.....	98
Figura 5. 9 Modelo de la banda con coeficiente constante.....	99
Figura 5. 10 Modelos de distribución de presión	101
Figura 5. 11 Variables del sistema.....	106
Figura 5. 12 Distribución de deformaciones relativas en el contacto	107
Figura 5. 13 Geomería del simulador de estampación	110
Figura 5. 14 Balance de fuerzas con cambio de ancho	112
Figura 5. 15 Geometría de la lámina deformada	113
Figura 5. 16 Modelo de variación de la deformación relativa.....	115
Figura 6. 1 Matriz de corte (izquierda). Matriz de perforación (derecha).....	122
Figura 6. 2 Pasos en el corte de las probetas.	123
Figura 6. 3 Detalle de las garras de la máquina universal, un momento de la ejecución del ensayo, y el final tras la rotura de la probeta	124
Figura 6. 4 DP600 (GM) Diagrama σ - ϵ (nominales) para velocidades de 10,30,60 , 120 y 240 mm/min.....	125
Figura 6. 5 Probetas de DP600(GM) tras los ensayos.....	126
Figura 6. 6 DP600(GM) Diagrama σ - ϵ (verdad.) para velocidades de 10,30,60 , 120 y240 mm/min	126
Figura 6. 7 Detalle de algunas de las probetas del material DP600 de Flinsa	127
Figura 6. 8 TWIP (POSCO) Diagrama σ - ϵ (nominales) para velocidades de 19,39,60 , 120 y240 mm/min.....	127
Figura 6. 9 Probetas de TWIP (POSCO) tras los ensayos.....	128
Figura 6. 10 TWIP (POSCO) Diagrama σ - ϵ (verdaderos) para velocidades de 19,39,60 , 120 y240 mm/min.....	129
Figura 6. 11 Pie de rey utilizado	130
Figura 6. 12 Micrómetro para espesores de tubo.....	130
Figura 6. 13 Tornillo Micrométrico para chapas.....	130
Figura 6. 14 Tabla y gráfico tipo utilizados para caracterizar el ancho de cada una de las probetas.	131
Figura 6. 15 Esquema geométrico de las probetas.	131
Figura 6. 16 Rugosímetro digital y el palpador sobre el patrón de verificación, en el estado de calibración que se utiliza.....	133
Figura 6. 17 Ensayos de rugosidad longitudinal y transversal realizados en cada una de las probetas	133
Figura 6. 18 Rugosidades en dirección longitudinal antes y después del conformado de la probeta TWIP(53).....	134
Figura 6. 19 Valores de Diferencias de valor de rugosidad Ra entes y después de la deformación, en direcciones longitudinal y transversal. Aceros TWIP	135
Figura 6. 20 Perfiles transversales antes y después de la deformación (Pobreta 53).....	135

Figura 6. 21 DRm representa la distancia entre las líneas promedio a ambos lados de la línea base. Es la altura del rectángulo equivalente	136
Figura 6. 22 VRm representa la diferencia entre capas de rugosidades. El resultado negativo indica la disminución.	137
Figura 6. 23 Microscopio Electrónico de Barrido SEM.....	138
Figura 7. 1 Vista general de Sistema de Flexión bajo Tensión (SFBT	144
Figura 7. 2 Elementos básicos del sistema de flexión bajo tensión.....	145
Figura 7. 3 Detalle del módulo basculante en un posición intermedia.....	146
Figura 7. 4 Detalle, desde la parte posterior, del sistema de movimiento del módulo basculante mediante patines, accionado por el husillo a bolas	147
Figura 7. 5 Detalle de la parte central del SFBT.....	148
Figura 7. 6 Herramienta (cilindro) en contacto con el fleje. Se aprecian las ruedas de fricción y la garra de retención a la izquierda	149
Figura 7. 7 Célula de carga HBM U3/20kN	150
Figura 7. 8 Regleta óptica ELAP PD500.....	150
Figura 7. 9 Vista de la regleta óptica montada sobre el actuador, y conectada al extremo de la célula de carga.....	151
Figura 7. 10 Vista de los encoders montados sobre los balancines de aproximación	152
Figura 7. 11 Detalle de las ruedas de fricción, en contacto con el fleje, y que transmiten el giro a los encoders	152
Figura 7. 12 Detalle del amplificador utilizado para la adquisición de datos	153
Figura 7. 13 Detalle de la ubicación del QuantumX.....	153
Figura 7. 14 Esquema del conjunto de medida: Transductores de ambos lados de la herramienta, Amplificación, Adquisición , tratamiento de señal y Archivo de resultados	155
Figura 7. 15 Elementos básicos del conformado por estampación.....	157
Figura 7. 16 Estepas en el proceso de conformado por estampación	159
Figura 7. 17 Esquema de desplazamientos, la lámina desarrollada, respeto al origen fijo A.....	159
Figura 7. 18 Esquema del sistema SFBT	160
Figura 7. 19 Esquema geométrico del fleje en su proceso de deformación	161
Figura 7. 20 Aceleración del tramo central del fleje (B-E)(L1=30mm, L2=90,e=100mm)	162
Figura 7. 21 Velocidad de deformación y Carga unitaria del fleje sin rozamiento. Caso ideal sin rozamiento y lámina perfectamente flexible.	163
Figura 7. 22 Variación de la velocidad por unidad de longitud para diferentes velocidades del punzón, para L1=30, L2=90 y e=150.	164
Figura 7. 23 Efecto de la zona de contacto sobre el fleje.	165
Figura 7. 24 Modelo de comportamiento idealizado del proceso de flexión bajo tensión	166
Figura 7. 25 Situación de los dos encoders al fleje en los tres ángulos de estudio.....	168
Figura 7. 26 Definición geométrica de la probeta para la determinación de las velocidades.	168
Figura 7. 27 Distribución de velocidades para la probeta con ángulo de 90°	169
Figura 7. 28 Resultados de la medición simultánea de la fuerza de ambos actuadores.....	172
Figura 7. 29 Diferencia de fuerzas entre los actuadores	172
Figura 7. 30 Resultados calculados de las velocidades de los cuatro dispositivos de medida des desplazamiento.....	173
Figura 7. 31 Pantalla del control de la adquisición de Catman AP	174
Figura 7. 32 Cuadro de control del ensayo de simulación SFBT	175
Figura 8. 1 Caracterización de la rugosidad. Herramienta de rodaje	181
Figura 8. 2 Perfiles de rugosidades transversales	182

Figura 8. 3	Perfiles de rugosidades longitudinales	182
Figura 8. 4	Curva Tensión-Deformación Nominal y Verdadera DP600	183
Figura 8. 5	Conjunto de probetas DP600. Pruebas iniciales	183
Figura 8. 6	Perfil de velocidades del fleje	188
Figura 8. 7	Menú Análisis Varianza Statgraphics.	190
Figura 8. 8	Imágenes antes y después de deformar las probetas.	195
Figura 8. 9	Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM.	196
Figura 8. 10	Gráficos de resultados, Fuerzas y velocidades. Probeta FL33	197
Figura 9. 1	Caracterización de la rugosidad. Herramienta de rodaje	203
Figura 9. 2	Perfiles de rugosidades transversales	204
Figura 9. 3	Perfiles de rugosidades longitudinales	204
Figura 9. 4	Curva Tensión-Deformación Nominal DP600	205
Figura 9. 5	Conjunto de probetas DP600 (GM). Antes y después de la preparación. Bloque 2	205
Figura 9. 6	Perfiles Rugosidad. Probeta D1. LL-Pre. y Fl-Post. Conformado	206
Figura 9. 7	Micrografía del DP600	206
Figura 9. 8	Menú Análisis de Experimentos de Statgraphics	211
Figura 9. 9	Medias Coeficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15	215
Figura 9. 10	Medias Coeficiente de Rozamiento 3 . Ec 5.7	216
Figura 9. 11	Medias Diferencia Tensiones. Ec 8.4	217
Figura 9. 12	Medias Diferencia fuerzas-ancho. Ecuación 8. 5	218
Figura 9. 13	Grafico Medias LSD Vel. Def. Relativa. Ecuación 8. 9	219
Figura 9. 14	Valores del Salto de Velocidades Relativo. Ec. 8.11	220
Figura 9. 15	Valores de Velocidad de entrada relativa. Ec. 8.12	221
Figura 9. 16	Grafico Medias LSD. Salto Velocidad U_1/U_e. Ecuación 8. 13	222
Figura 9. 17	Medias LSD. Razón de pendientes de entrada	222
Figura 9. 18	Valores de Diferencia de rugosidades longitudinales. Ec. 6.2	223
Figura 9. 19	Rugosidades obtenidas Ra DP600(GM)	225
Figura 9. 20	Imágenes antes y después de deformar las probetas.	226
Figura 9. 21	Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x150	226
Figura 9. 22	Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x300	226
Figura 9. 23	Gráficos de resultados, Fuerzas y velocidades. Probeta D54	227
Figura 9. 24	Gráficos de resultados, Fuerzas y velocidades. Probeta D54	228
Figura 9. 25	Conjunto de curvas de variabilidad de cada Ecuación .DP600(GM)	236
Figura 9. 26	Conjunto de curvas de baja variabilidad .DP600(GM)	237
Figura 9. 27	Conjunto de curvas de alta variabilidad .DP600(GM)	237
Figura 9. 28	Resultados de la aplicación de Roz1.	239
Figura 9. 29	Resultados de la aplicación de Vel. Entrada Relativa	239
Figura 10. 1	Curva Tensión-Deformación Nominal TWIP	245
Figura 10. 2	Conjunto de probetas TWIP (GM). Antes y después de la preparación	246
Figura 10. 3	Perfiles Rugosidad. Probeta T1. LL-Pre. Fl-Post. Conformado	246
Figura 10. 4	Menú Análisis de Experimentos de Statgraphics.	251
Figura 10. 5	Análisis de Varianza del Experimento .Rozamiento 2	254
Figura 10. 6	Medias Coeficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15	254
Figura 10. 7	Análisis de Varianza del Experimento .Rozamiento 3	255
Figura 10. 8	Medias Coeficiente de Rozamiento 3 . Ec 5.7	255
Figura 10. 9	Análisis de Varianza del Experimento. Diferencia de tensiones.	256
Figura 10. 10	Medias .Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ec 8.4	256

Figura 10. 11	Análisis de Varianza del Experimento. Diferencia de fuerzas por unidad de ancho, ..	257
Figura 10. 12	Medias. Diferencia fuerzas-ancho. Ecuación 8. 5	257
Figura 10. 13	Valores del Salto de Velocidades Relativo. Ec. 8.11.....	259
Figura 10. 14	Valores de Velocidad de entrada relativa. Ec. 8.12.....	259
Figura 10. 15	Medias de Salto de velocidad Ecuación. 8.13	260
Figura 10. 16	Rugosidades antes y tras la deformación. TWIP	262
Figura 10. 17	Imágenes antes y después de deformar las probetas.	263
Figura 10. 18	Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x150.....	263
Figura 10. 19	Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x300.....	264
Figura 10. 20	Gráficos de resultados. Probeta T44.....	265
Figura 10. 21	Gráficos de resultados, velocidades. Probeta T44	265
Figura 10. 22	Efecto deformación sobre flejes conformados	266
Figura 10. 23	Conjunto de curvas de variabilidad de cada Ecuación .TWIP(POSCO).....	272
Figura 10. 24	Conjunto de curvas de baja variabilidad .TWIP (Posco).....	273
Figura 10. 25	Conjunto de curvas de elevada variabilidad .TWIP (Posco)	273
Figura 10. 26	Resultados Coeficiente Roz2.....	275
Figura 10. 27	Resultados del parámetro Diferencia de Fuerzas Específica	275
Figura 11. 28	Resultados LSD. Rangos de Medias	283
Figura A. 1	Curvas Tensión-Deformación. Nominal. DP600 (GM)	321
Figura B. 1	Perfil longitudinal y transversal de rugosidad de la herramienta de conformado	330
Figura B. 2	Curvas Tensión-Deformación. Nominal. DP600 (GM)	339
Figura B. 3	Curvas Tensión-Deformación. Verdadero. DP600 (GM).....	340
Figura B. 4	Resultados de Rozamiento 1. Ec. 5.6.....	342
Figura B. 5	Resultados de Rozamiento 2. Ec. 5.9.....	344
Figura B. 6	Resultados de Rozamiento 3. Ec. 8.15.....	346
Figura B. 7	Resultados de Diferencia de Fuerzas Ec. 8.5.....	347
Figura B. 8	Resultados de Dif. Fuerzas Especifica (Ec 8.5)	348
Figura B. 9	Resultados de Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2.....	349
Figura B. 10	Resultados de Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2.....	350
Figura C. 1	Perfil longitudinal y transversal de rugosidad de la herramienta de conformado.....	358
Figura C. 2	Curvas Tensión-Deformación. Nominal. TWIP (GM)	365
Figura C. 3	Curvas Tensión-Deformación. Verdadero. TWIP (GM)	366
Figura C. 4	Resultados de Rozamiento 1. Ec. 5.6	367
Figura C. 5	Resultados de Rozamiento 2. Ec. 5.9.....	369
Figura C. 6	Resultados de Rozamiento 3. Ec. 8.15.....	371
Figura C. 7	Resultados de Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ec 8.4	372
Figura C. 8	Resultados de Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ec 8.4	373
Figura C. 9	Resultados de Diferencia de Fuerzas Ec. 8.5.....	374
Figura C. 10	Resultados de Dif. Fuerzas Especifica (Ec 8.5)	375
Figura C. 11	Resultados de Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2.....	376
Figura C. 12	Resultados de Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2.....	377

I. Introducción

Capítulo 1

Introducción.

Resumen:

Se declaran los antecedentes y objetivos del trabajo. Se detalla el plan de investigación ejecutado, separándolo en fases secuenciales, que se han valorado en tiempo de trabajo. Finalmente se indica la estructura general del documento, que tiene una distribución clásica AMRYD, pero que en algunas partes ha avanzado la discusión y se han tomado decisiones para seguir a la fase siguiente.

En este capítulo se plantea una cuestión que es el propósito directo de esta investigación.

1 Introducción.

Fruto de la colaboración de Personal de la UPV, La Empresa Flejes Industriales, S.A. (Flinsa) de Ibi (Alicante), el Profesor Steven R. Schmid (Notre Dame University) y Mr Lou del General Motors Technical Center (Michigan), fue comenzar a desarrollar ensayos sobre las características del rozamiento, en el proceso de estampación de los Aceros Avanzados de Alta Resistencia, utilizados en la construcción de Estructuras de Automóvil

El proyecto se inició construyendo en equipo de simulación por parte de la UPV, y la donación de materiales y apoyo por parte de las Empresas.

Desde 2012 se ha construido un sistema de simulación basado en el desarrollado por W-R.D. Wilson, con algunas mejoras, y que fue utilizado en este trabajo.

En este tiempo el equipo experimentó modificaciones, consecuencia de las primeras fases de su utilización.

La realización de los ensayos para esta Tesis fue una prueba de funcionamiento, con cerca de 300 probetas tratadas. Una consecuencia fue la obtención de nuevos criterios para su mejora.

El equipo de simulación fue diseñado y construido por un grupo bajo la dirección del Profesor Dr. D.Samuel Sánchez Caballero, la programación del Sistema de Control fue desarrollada bajo la dirección del Profesor Dr. D. Miguel Ángel Sellés Cantó y el desarrollo de los utillajes para el corte de las probetas fue realizada por el autor de este trabajo.

La empresa Flinsa donó un lote de flejes de 10 tipos de acero y los lubricantes de estampación. General Motors donó 7 tipos de acero, algunos de ellos en fase de prueba.

1.1 Objetivos.

Antes de fijar objetivos quisiera reproducir una conversación.

“Sr Ingeniero, he recibido un pedido para estampar la pieza A, que es de un nuevo acero. He consultado a mis proveedores de lubricantes y dos me han ofrecido su aceite, y además me ofrecen varios posibles aditivos para mejorar el proceso. Dígame cual es el más adecuado.”

El objeto de este trabajo es dar una respuesta cuantificada al procesador. Es el objetivo Central a conseguir.

Los objetivos parciales son los siguientes:

Elaborar un modelo del comportamiento de fricción de la lámina frente a la herramienta en el proceso de estampación.

Construir un modelo simplificado de la evolución de la lámina en el movimiento.

Definir parámetros de eficiencia frente al rozamiento.

Definir un protocolo de ensayo que indique el aceite con mejor comportamiento en rozamiento

Conseguir mejoras en el funcionamiento del equipo de simulación.

1.2 Plan de Investigación

Esta investigación incorporó los parámetros iniciales del equipo de simulación construido, por lo que su resultado es parte de esta investigación.

Dado que a la redacción de este documento la investigación ya está concluida, puede cuantificarse el peso del trabajo en horas.

El trabajo se segmentó en 11 etapas consecutivas, que coincidieron con el orden previsto en el Proyecto de Investigación.

La secuencia que se indica es la real.

- Fase de documentación:

Los equipos de ensayo equivalentes al SFBT (*Sistema de Flexión Bajo Tensión*), los ensayos realizados y sus resultados.

Comportamiento de las láminas en el conformado, comportamiento mecánico y tribológico.

Aceros utilizados en la fabricación de Automóviles.

Proceso de conformado más utilizado.

Evolución de los tipos y grados de materiales utilizados, pasado, presente y previsión tecnológica.

Causas de la evolución acelerada de las últimas décadas.

- Fase de diseño y fabricación del SFBT:

Se realizaron los cálculos, los planos, se fabricaron las máquinas y se confeccionaron las aplicaciones de control.

- Evaluación del SFBT:

Se cortaron probetas de diversos materiales y se iniciaron pruebas de funcionamiento, que llevaron a modificaciones sustanciales del sistema.

Tras estas modificaciones se podían iniciar los ensayos.

- Caracterización de las propiedades mecánicas.

Se disponía de un conjunto de materiales, de los cuales la mayoría eran Aceros Avanzados de Primera y Segunda generación, algunos todavía no se han utilizado e nivel industrial. Se cortaron probetas de 50 mm y se ensayaron a diversas velocidades. Se seleccionaron los aceros ensayar.

- Elaboración de un modelo de comportamiento frente al rozamiento

A partir de la bibliografía se definió el modelo de comportamiento de las superficies en el proceso de conformado.

- Elaboración del modelo de comportamiento de la lámina en el simulador.

A partir de la geometría del sistema y la bibliografía se elaboró un modelo de comportamiento elasto-plástico simplificado de la lámina en el proceso de conformado, que explicase lo que ocurría durante el desplazamiento de la herramienta.

- Ajuste del ensayo

Se cortaron y verificaron la primera serie de probetas.

Se realizó una serie de ensayos con el fin de verificar el funcionamiento del equipo en series de pruebas, determinar las dimensiones de las probetas y los datos que se podían obtener del SFBT.

Se elaboraron 12 parámetros que permitiesen discriminar el comportamiento de la lámina frente a diversos lubricantes.

Se analizaron los resultados y se aplicaron a los parámetros de rozamiento.

- Ensayos DP600(GM)

Se cortaron y verificaron las probetas

SE realizaron los ensayos, se comprobó el funcionamiento del equipo, y se realizaron ajustes para posterior uso.

Se verificaron las probetas

- Ensayos TWIP

Se cortaron y verificaron las probetas

Se ajustó el equipo al material y se realizaron los ensayos.

Se verificaron las probetas

- Cálculos y comprobación del modelo.

Se realizaron los cálculos de todos los parámetros, se generaron parámetros de calidad, y se aplicó el modelo con los datos obtenidos.

- Se redactó el documento de la tesis.

Tabla 1. 1 Etapas de la investigación y su duración en horas

Actividad	Horas
Documentación	1000
Diseño y fabricación del SFBT	350
Evaluación del SFBT	100
Caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales (17 materiales posibles).	120
Elaboración de un modelo de comportamiento frente al rozamiento	40
Elaboración del modelo de comportamiento de la lámina en el simulador.	40
Primeros ensayos. Ajuste del Sistema	90
Ensayos DP600(GM)	200
Ensayos TWIP	200
Cálculos y comprobación del modelo	175
Redacción	350

1.3 Estructura de esta Tesis:

La estructuración general de este documento se ha basado la estructura IMRYD (R.A. Day, 2005) y los criterios de Blaxter (Blaxter, Hughes, & Tight, 2000)

Introducción-Materiales y Métodos-Resultados-Discusión-Conclusiones.

La estructuración por capítulos se enmarca de la siguiente forma:

I. Introducción

1. Introducción
2. Energía Acero y Automóvil.
3. Comportamiento de las superficies
4. Los simuladores de la estampación

II. Materiales y Métodos

5. Comportamiento de la lámina deformada

6. Los materiales y sus características.

7. Simulador y el sistema de medición

III. Resultados

8. Resultados. Estudio del DP600(Flinsa)

9. Resultados. Estudio del DP600(GM)

10. Resultados. Estudio del TWIP (Posco)

IV. Discusión y Conclusiones

11. Discusión.

12. Conclusiones

13. Futuras investigaciones

V. Anexos

Bibliografía.

VI. Referencias

Anexo A. Tablas DP600 (Flisa)

Anexo B. Tablas DP600 (GM)

Anexo C. Tabla TWIP (Posco)

La experiencia de los primeros ensayos permitió crear nuevos criterios, que fueron base del segundo grupo de pruebas, y que a su vez obligo a hacer modificaciones en el tercer material. Este proceso de aprendizaje continuo hizo que en algunos capítulos se plantease la discusión y la generación de conclusiones provisionales, así como la aplicación del modelo para evaluar su mantenimiento o modificación.

Capítulo 2

Energía, Acero y Automóvil

Resumen:

Las legislaciones sobre la seguridad, las emisiones a la atmósfera, los residuos, la reciclabilidad, el respeto con la naturaleza comienzan a ser hoy un paradigma global.

Los intereses económicos de los grandes grupos trasnacionales, las barreras económicas, y los ataques a las actuaciones de los diferentes actores ya lo eran.

Noticias como el trucaje de los programas sobre emisiones denunciados en Septiembre de 2015 contra Volkswagen , son un indicador del retraso de los fabricantes de automóviles con respecto a las legislaciones mundiales.

En las siguientes páginas se presentará de forma resumida el marco regulatorio de vehículos ligeros, su influencia en la estructura portante de los automóviles, y el cambio en materiales que ha propiciado en las últimas décadas, los principales materiales que se utilizan así como la previsión tecnológica para los siguientes.

Finalmente se enfoca la investigación hacia el proceso más frecuente en este tipo de estructura.

2 Energía Acero y Automóvil.

A fecha de hoy, al menos el 56% de la masa de un vehículo automóvil está fabricado con acero, y esto se da en el 99% de los vehículos fabricados en el mundo, Figura 2. 1. Pero dependiendo de su composición, y posteriores tratamientos, podemos encontrar al menos nueve tipos de aceros; aplicados según sus propiedades. Si bien en las últimas décadas se ha dado una disminución de la fracción en peso del acero en el conjunto del vehículo, parece que se ha tocado fondo en cuanto a la rentabilidad de utilizar otros materiales estructurales, tales como el aluminio y el magnesio (AUTOMOTIVE, 2009; B. C. Cooman et al., 2009). Aunque se dio un retroceso en el uso del acero, la rápida evolución actual ha llevado a que vaya recuperando importancia en el cómputo total en peso de un vehículo.

Por otra parte, durante los últimos años se está apostando fuertemente por medidas más respetuosas con el medio ambiente. Las políticas nacionales e internacionales están realizando esfuerzos económicos tanto a nivel de investigación como apoyo a empresas para que se consigan avances tecnológicos más respetuosos con el entorno.

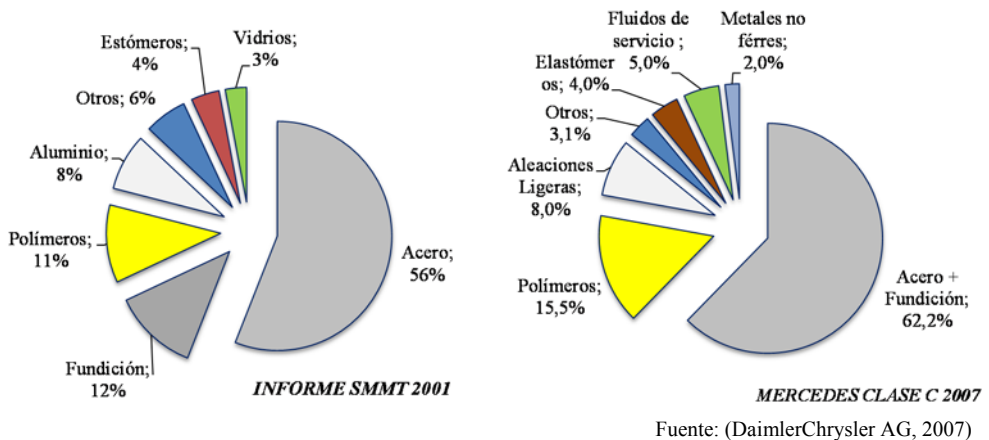
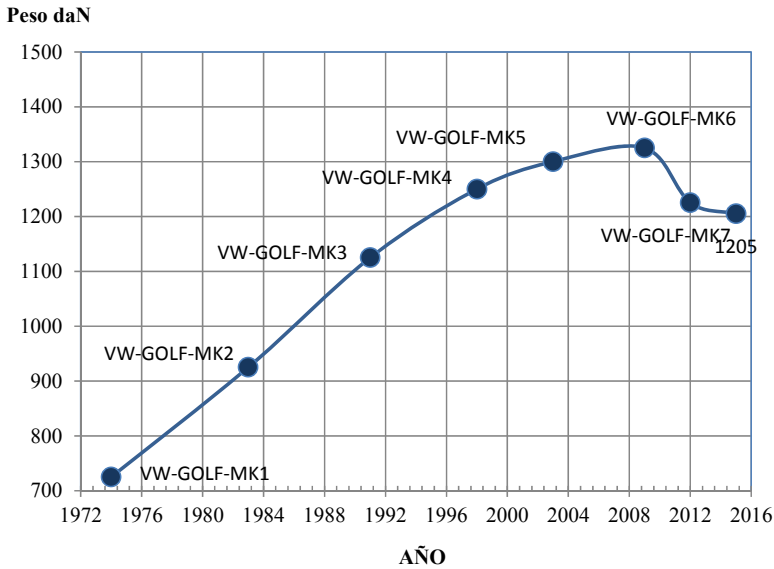


Figura 2. 1 .Estructura de materiales de un vehículo

En los últimos 40 años, vehículos como el Astra, han pasado de pesar alrededor de 8000N en 1970, a 11500 N en 2002, y un Golf de Volkswagen ha pasado de un peso parecido al del Astra, a pesar unos 13500 N en el mismo período, y 15900 N en 2010, con un repunte de al menos 1000 N en el modelo de 2012, y que continua a menor escala, Figura 2. 2.

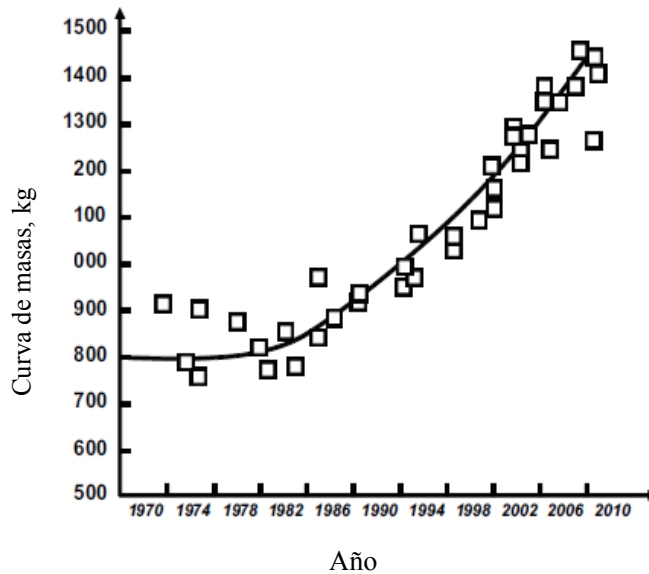


Fuente: Volkswagen

Figura 2. 2 Evolución de pesos del Golf VW




El aumento de peso inicial se justifica con el incremento de la seguridad y el confort: aire acondicionado, sistemas de control de la adherencia del vehículo, airbag, GPS, TV, vehículos híbridos, un promedio de 10 motores, otros sistemas de control, etc, Figura 2. 3. Nos encontramos con dos exigencias antagónicas: por una parte el aumento de confort y seguridad, y por otra la disminución de emisiones y la sostenibilidad. Para poder conjugarlas, se ha de buscar que los elementos constitutivos de los vehículos tengan menor peso y mayores prestaciones y por ende menor consumo. Y esto obligado no solo por la competencia, sino por las legislaciones internacionales tales como la NCAP de seguridad, la Euro5 de emisiones diésel la New Vehicle target 130 gr/km CO₂ para 2012-2015 y para el 2015 ELVD “95% per vehicle mass reused/ recovered, 85% per vehicle mass reused/recy-cled”

A modo de síntesis se van a considerar dos ideas: por una parte la reducción de las emisiones de CO₂ y la reciclabilidad, y por otra las condiciones comerciales y de seguridad.



Fuente: De Cooman (B. C. D. Cooman, Chin, & Kim, 2011)
Figura 2. 3 Evolución de peso de vehículo

De acuerdo con el informe de la ICCT “*El motor normativo: como una política inteligente incentiva la innovación automotriz*”, (Torabinejad, Zarei-Hanzaki, Sabet, & Abedi, 2011), en la Figura 2. 4 se indican políticas de mejora en el siguiente cuadro, y que pueden servir de hoja de ruta de muchas de las estrategias que se están siguiendo por parte de los fabricantes.

MEJORAS EN LA EFICIENCIA Y COSTO			
	Tecnología	Reducción de las emisiones de CO ₂	Aumento del precio por vehículo
 Motor	Lubricantes de baja fricción	0.5%	\$3
	Reducción de la fricción del motor	1–3%	\$50–100
	Distribución o alzada de válvulas variable	3–4%	\$125–259
	Desactivación de cilindros	6%	\$150–169
	Motor de menor tamaño con turbocarga	5–7%	\$149–1.099
	Actuación de válvula sin árbol de levas	5–15%	\$501
	Inyección directa de gasolina (estequiométrica)	1–2%	\$209–346
 Transmisión	Transmisión variable continua	6%	\$192–224
	Automática de seis velocidades	4.5–6.5%	\$99
	Seis velocidades con doble embrague	5.5–13%	\$47–92
 Vehículo	Reducción del arrastre aerodinámico (20% en los automóviles, 10% en los camiones)	2–3%	\$42
	Reducción del 10% de la resistencia al rodamiento de los neumáticos	1–2%	\$6
	Reducción del 10% del peso	6.5%	\$518–666
	Alternador de alta eficiencia y accesorios eléctricos	1–2%	\$76
	Dirección eléctrica	1.5–2%	\$94
	Sistema de encendido-detención integrado	7.5%	\$351–437
	Asistencia al motor híbrido	20–30%	\$2.854–4.431

Fuente: ICCT

Figura 2. 4 Estrategias de Ahorro

La Figura 2. 4 hace una previsión de estrategias que reducen la producción de gases de combustión. Y es evidente que algunas de ellas son aparentemente incompatibles

De los sistemas indicados en la Figura 2. 4, los más eficientes representan una reducción de consumo. Sin embargo, todos aquellos elementos que produzcan un aumento en el peso, representan mayores emisiones en el ciclo de vida del automóvil.

A nivel de evolución de las legislaciones, se presentan los siguientes gráficos:

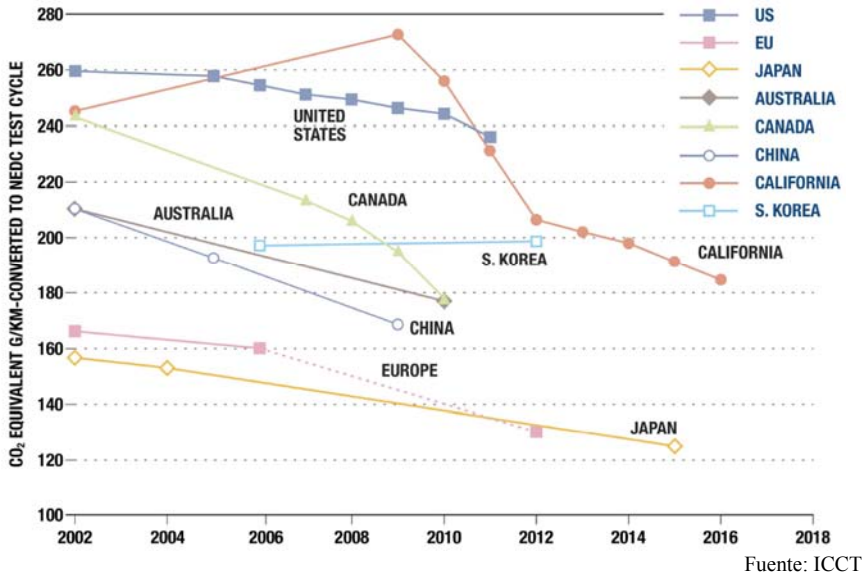
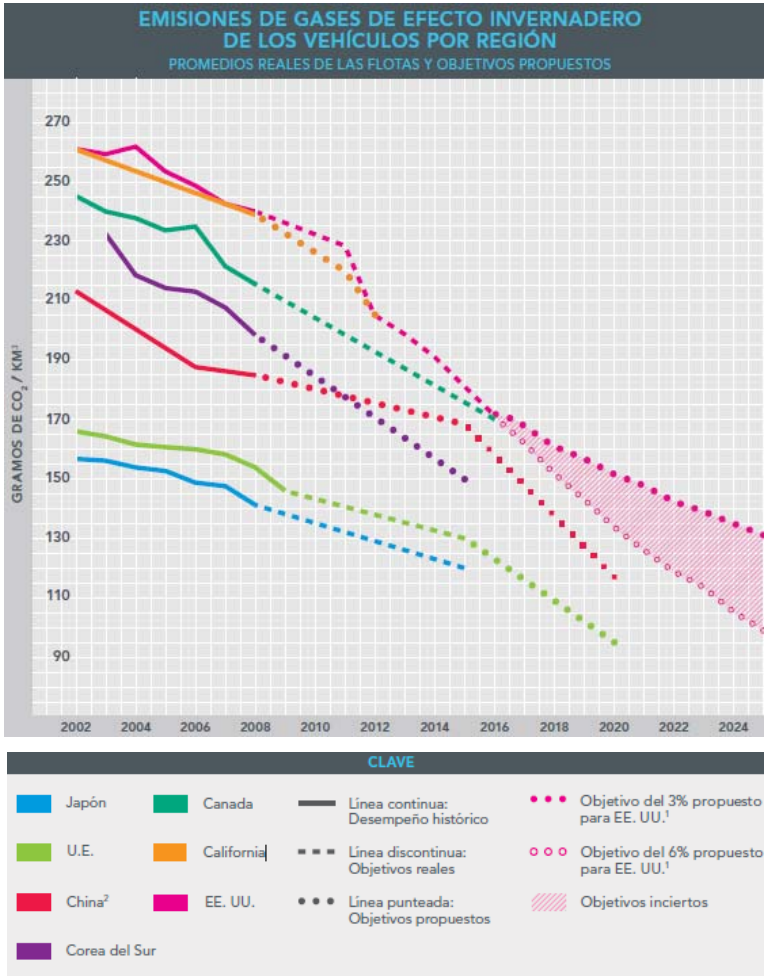


Figura 2. 5 Previsión de emisiones de diferentes países en el período 2002-2018

En la Figura 2. 5 se aprecia la fuerte apuesta de Europa y Japón. Pero esta tendencia parece que va a seguir desarrollándose, convirtiendo la legislación en hoja de ruta para los constructores.

Los fabricantes de automóviles trabajan con objetivos a largo plazo, y utilizan los avances en las normativas como referencias en sus criterios de diseño. La evolución de las normas de ahorro de combustible son predecibles, y sus consecuencias duran más de una década, convirtiéndose en un factor de competitividad. Quienes redactan las políticas, los ejecutivos y los inversionistas, se dan cuenta de la importancia de contar con normas estables, firmes y fuertes en cuanto a la reducción de las emisiones de carbono. La conciencia sobre el cambio climático parece establecida de forma general.

De manera intermitente, en las últimas tres décadas, aproximadamente el 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte mundial ha sido reglamentado por los gobiernos nacionales. Estados Unidos, la Unión Europea, Japón, China, Australia, Canadá y Corea del Sur han adoptado una gran variedad de estándares sobre eficiencia energética. En algunos casos, estos estándares comenzaron como pautas voluntarias; ahora, todas menos las de Australia son obligatorias. México planea anunciar pronto estándares de uso eficiente del combustible, mientras que la India, Indonesia y Tailandia están redactando normas. En la Figura 2. 6 siguiente hacen previsiones de cambios en normativas hasta el año 2024.



Fuente: ClimateWorks Foundation

Figura 2. 6 Previsión de normativas sobre emisiones de diferentes países en el período 2002-2025

Comentarios sobre la figura:

¹ Objetivo incierto para la flota de los EE. UU. de 3% a 6% anual de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero entre 2017 y 2025, como se propuso en la Carta de intención firmada el 30 de septiembre de 2010 por la Agencia de Protección Ambiental y la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras.

² Los objetivos de China reflejan un escenario con una flota de vehículos de gasolina. Si se incluyen otros tipos de combustible, el objetivo será menor.

³ Normalizados según el nuevo ciclo de conducción europeo.

En Figura 2. 5 y Figura 2. 6 se evidencia la apuesta, al menos a nivel normativo, encaminada a la disminución de emisiones de CO₂. Posteriormente se analizará con un poco más de detalle la evolución en la UE, y sirva como avance, que esta modificación es así mismo una fuente de oportunidades para los fabricantes que se han anticipado en el desarrollo de nuevos vehículos.

La reducción de peso es uno de los objetivos más claros, en el cuadro de la Figura 2. 4 se indica que una reducción del 10% significa una reducción del 6,5% en emisiones, y esto es independiente del tipo de conducción. Sin embargo el dimensionado de los diferentes elementos tiene restricciones en cuanto a su resistencia, rigidez y/o absorción de energía. La idea de materiales más resistentes es clave para la obtención de elementos más ligeros; y se acelera si el coste es asumible por los mercados y se tienen en cuenta las regulaciones sobre contaminación.

2.1 La normativa sobre emisiones de CO₂ en la CEE.

El objetivo fijado en el Protocolo de Kyoto fue reducir las emisiones de una serie de gases de efecto invernadero en un 8 % durante el período 2008-2012 en relación con los niveles de 1990. Fue el comienzo de un conjunto de regulaciones que han ido desarrollándose en las diferentes zonas económicas.

Emisiones de CO₂: etapas y marco jurídico en la CEE.

Las etapas son normalmente denominadas Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4 y Euro 5 para vehículos ligeros. Las series correspondientes de las normas para vehículos pesados utilizan números romanos en vez de números arábigos (Euro I, Euro II, etc.)

El marco jurídico consiste en una serie de directivas, cada una es una modificación de la Directiva 70/220/CEE. Se presenta aquí una lista resumida de las normas, Tabla 2. 1 , cuando entran en vigor, qué se aplicará en cada una de ellas, y qué directivas de la UE proporcionan una definición de cada norma.

Tabla 2. 1 Normativas para vehículos de gasolina. CEE

Euro 1 (1993):	Para turismos - 91/441/CEE. También para turismos y para camiones ligeros - 93/59/CEE.
Euro 2 (1996)	Para turismos - 94/12/CE (& 96/69/CE)
Euro 3 (2000)	Para cualquier vehículo - 98/69/CE
Euro 4 (2005)	Para cualquier vehículo - 98/69/CE (& 2002/80/CE)
Euro 5 (2008/9)	para cualquier vehículo - (COM(2005) 683 - propuesto)

Fuente: CEE

Estos límites sustituyen a la directiva original 70/220/CEE sobre límites de emisión.

Las clasificaciones de los tipos de vehículos están definidas por:

Directiva 2001/116/CE de la Comisión, de 20 de diciembre de 2001, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 70/156/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de vehículos de motor y de sus remolques.

Directiva 2002/24/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de marzo de 2002, relativa a la homologación de los vehículos de motor de dos o tres ruedas y por la que se deroga la Directiva 92/61/CEE del Consejo.

En el área de los combustibles, la directiva sobre biocombustibles de 2001 exige que el 5,75% de todos los transportes que usan combustibles fósiles deben sustituir su uso por biocombustibles antes del 31 de diciembre de 2010, con un objetivo intermedio del 2% a finales de 2005.

El transporte por carretera fue el responsable del 28% emisiones de CO₂ en España , y el 25% a nivel de Unión Europea en 2004 , en ese mismo año el 40% de la energía final fue consumida por el sector del transporte, y de este el 80% fue para el transporte por carretera (IDAE, 2012a) siendo:

- Las emisiones para vehículos de gasolina 95/98 fueron de 2,38 kg CO₂/l (promedio 13 km),
- Las emisiones para vehículos diésel fueron de 2,61 kg CO₂/l (promedio 16 km).

La estrategia europea puede resumirse en la Tabla 2. 1

Tabla 2. 2 Calendario de límites de emisión en la CEE

Año	EMISIÓN PROMEDIO gr CO ₂ /km
1996	175
2005	160
2008	149
2012	120 (130)
2020	95

Fuente: CEE

Concretamente, la normativa hace referencia al concepto de emisión promedio, y son interesantes algunos de los pasos programados por el Reglamento (CE) N° 443/2009.(COMISIÓN EUROPEA, 2009)

Para este cálculo se utilizarán los siguientes porcentajes de turismos nuevos matriculados por el fabricante correspondiente: 65 % en 2012, 75 % en 2013, 80 % en 2014, 100 % de 2015 en adelante.

En el cálculo de las emisiones medias específicas de CO₂, cada turismo nuevo con emisiones específicas de CO₂ por debajo de 50 g de CO₂/km equivaldrá a:

3,5	vehículos en 2012,
3,5	vehículos en 2013,
2,5	vehículos en 2014,
1,5	vehículos en 2015,
1	vehículo a partir de 2016.

Sin embargo, las normativas han ido más rápido que la innovación de los fabricantes, se han tomado medidas para el estímulo, tales como en el Reino de España:

Ley 34/2007 de calidad del aire y protección de la atmósfera..... Ley 38/1992 de impuestos especiales.el impuesto de matriculación viene determinado por las emisiones oficiales de CO₂, medidas en g/km. Para los vehículos turismo (clase M1) el tipo impositivo queda como sigue, partir del 1 de enero de 2008:

Para emisiones de CO₂ hasta 120 g/km se aplica un tipo impositivo del 0%

-Entre 121 y 159 g/km se aplica un tipo del 4,75% (3,75% en Canarias)

-Entre 160 y 199 g/km se aplica un tipo del 9,75% (8,75% en Canarias)

-Para emisiones de CO₂ de 200 g/km en adelante el tipo es del 14,75% (13,75% en Canarias).

A nivel de CE, el antes enunciado Reglamento (CE) N° 443/2009 indica:

1. Respecto a cada año natural a partir de 2012 en el que las emisiones medias específicas de CO₂ de un fabricante superen su objetivo de emisiones específicas correspondiente a ese año, la Comisión impondrá al fabricante o, en caso de una agrupación, a su gestor, una prima por exceso de emisiones.

2. La prima por exceso de emisiones prevista en el apartado 1 se calculará mediante la siguiente fórmula:

a) a partir de 2012 hasta 2018:

i) cuando las emisiones medias específicas de CO₂ del fabricante superasen su objetivo de emisiones específicas en más de 3 g CO₂/km:

$$((\text{Exceso de emisiones} - 3 \text{ g CO}_2/\text{km}) \times 95 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} + 1 \text{ g CO}_2/\text{km} \times 25 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} + 1 \text{ g CO}_2/\text{km} \times 15 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} + 1 \text{ g CO}_2/\text{km} \times 5 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km}) \times \text{Número de turismos nuevos},$$

ii) cuando las emisiones medias específicas de CO₂ del fabricante superasen su objetivo de emisiones específicas en más de 2 g CO₂/km pero menos de 3 g CO₂/km:

$$((\text{Exceso de emisiones} - 2 \text{ g CO}_2/\text{km}) \times 25 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} + 1 \text{ g CO}_2/\text{km} \times 15 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} + 1 \text{ g CO}_2/\text{km} \times 5 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km}) \times \text{número de turismos nuevos},$$

iii) cuando las emisiones medias específicas de CO₂ del fabricante sobrepasen su objetivo de emisiones específicas en más de 1 g CO₂/km pero menos de 2 g CO₂/km:

$$((\text{Exceso de emisiones} - 1 \text{ g CO}_2/\text{km}) \times 15 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} + 1 \text{ g CO}_2/\text{km} \times 5 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km}) \times \text{Número de turismos nuevos,}$$

iv) cuando las emisiones medias específicas de CO₂ del fabricante sobrepasen su objetivo de emisiones específicas en 1 g CO₂/km como máximo:

$$(\text{Exceso de emisiones} \times 5 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km}) \times \text{número de turismos nuevos;}$$

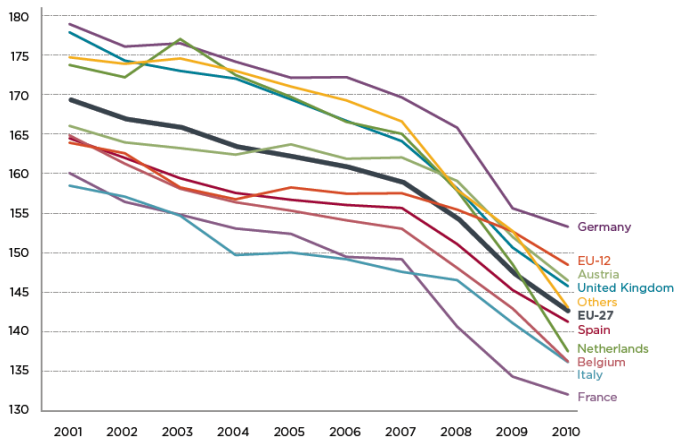
b) a partir de 2019:

$$(\text{Exceso de emisiones} \times 95 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km}) \times \text{Número de turismos nuevos.}$$

Sin embargo, en 2010 se replanteó parcialmente la estrategia, el “Informe de situación sobre la aplicación del enfoque integrado de la Comunidad para reducir las emisiones de CO₂ de los vehículos ligeros”(COMISIÓN EUROPEA, 2010) , modifica el objetivo de 120 g de CO₂/km y lo eleva a 130, introduciendo otras medidas adicionales tales como la mejora de eficiencia en el aire acondicionado, los neumáticos, el indicador de cambio de velocidad, la conducción eficiente, la generalización de los biocombustibles, así como la previsión de un endurecimiento de la política impositiva sobre los productos energéticos. La Figura 2. 7 indica la evolución de emisiones por países CEE

En resumen, se aplicarán fuertes recargos sobre los turismos y los combustibles.

Turismos nuevos: Emisiones de CO₂ por estado miembro



Fuente: (Campestrini & Mock, 2011)

Figura 2. 7 Evolución de las emisiones de CO₂ en distintos países europeos hasta 2010

2.2 Las políticas futuras de la CEE.

Se hace reseña del siguiente documento, fechado en 08/03/2011:

COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES (COMISIÓN EUROPEA, 2011)

Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050

Resulta esclarecedor en siguiente párrafo de objetivos:

La transición hacia una economía hipocarbónica competitiva supone que la UE debe prepararse para reducir sus emisiones internas un 80 % de aquí a 2050 respecto a 1990 (Esto significa reducciones internas reales de las emisiones de la UE y no por compensación mediante el mercado del carbono).

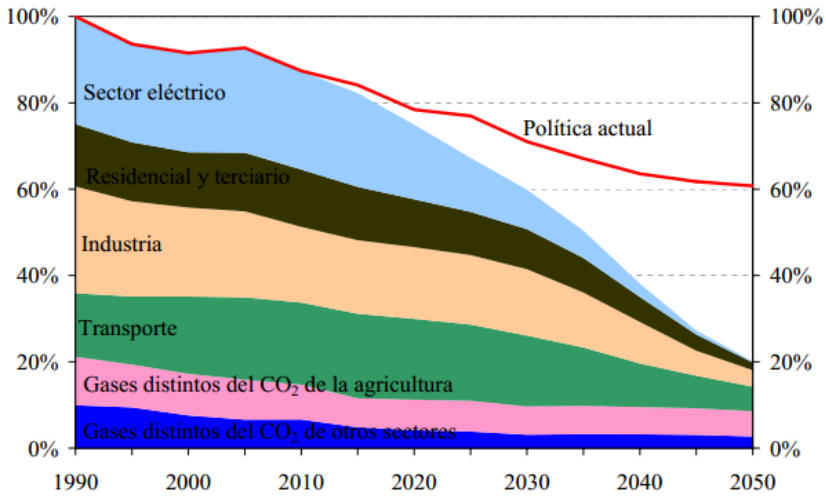
La Comisión ha realizado un análisis exhaustivo mediante el establecimiento de modelos con varias hipótesis posibles en las que se indica el modo de conseguirlo, como se describe en el recuadro que figura a continuación.

El análisis de las distintas hipótesis muestra que la vía económicamente ventajosa sería una reducción de emisiones internas del orden del 40 % y del 60 % respecto a los niveles de 1990 de aquí a 2030 y 2040, respectivamente. En este contexto, indica asimismo reducciones del 25 % en 2020, lo que queda ilustrado en la figura 1 ⁽¹⁾. Esa vía tendría como resultado una reducción anual, respecto a 1990, del orden del 1 % en la primera década hasta 2020, el 1,5 % en la segunda década de 2020 a 2030 y el 2 % en las dos últimas hasta 2050. El esfuerzo aumentará con el tiempo a medida que se disponga de un conjunto más amplio de tecnologías rentables.

(1) Figura 2. 8 en este documento.

El gráfico que se presenta a continuación, Figura 2. 8 compara las políticas actuales (línea superior), y las futuras políticas para la consecución de objetivos.

En esencia, el documento plantea políticas impositivas y de previsión tecnológica como hoja de ruta para la reducción de las emisiones de CO₂ en la CEE.



Fuente: (COMISIÓN EUROPEA, 2011)

Figura 2. 8 Emisiones de GEI de la UE: hacia una reducción interna del 80 % (100 % =1990)

2.3 Normativa en otros países sobre emisiones de CO₂ y consumo de combustible.

En el apartado anterior, al Figura 2. 5 y la Figura 2. 6 indican las normativas en vigor, y las previstas para un futuro a largo plazo. En la Tabla 2. 3 se indican las normativas de otras potencias económicas a nivel mundial.

Tabla 2. 3 Normativas sobre emisiones en automóviles de diversos países.

PAIS/ REGION	Objetivo	Medida	Estructura de la norma	Tipo Vehículo	Ensayo	Aplicación
Japón	Combustible	km/l	Peso del vehículo	Nuevo	JC08	Obligatorio
Unión Eu- ropea	CO ₂	g/km	Normalización	Nuevo	NEDC	Obligatorio
China	Combustible	l/100-km	Peso del vehículo	Nuevo	NEDC	Obligatorio
Canadá	GHG (CO ₂ , CÜ, N ₂ O, HFCs)	5.3 Mt reducción	Clase del Vehículo	En uso y Nuevo	U.S. CAFE	Obligatorio
California	GHG (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs)	g/milla	Clase del Vehículo	Nuevo	U.S. CAFE	Obligatorio

Estados Unidos	Combustible	mpg	Norma para vehículos. Normas por clases para vehículos Indust. ligeros	Nuevo	U.S. CAFE	Obligatorio
Australia	Combustible	l/100-km	Normalización	Nuevo	NEDC	Voluntario
South Korea	Combustible	km/l	Potencia del motor	Nuevo	U.S. EPA City	Obligatorio
Taiwan, China	Combustible	km/l	Potencia del motor	Nuevo	U.S. CAFE	Obligatorio

Fuente: (Feng An, Deborah Gordon, Hui He, Drew Kodjak, & Rutherford, 2007)

Se tomó como referencia el estudio del ICCT (International Council on Clean Transportation), con la particularidad del cambio de unidades: Estado Unidos utiliza como parámetro el consumo por unidad de distancia millas/galón (1 galón = 3,7854118 litros. 1 milla = 1,609344 kilómetros).

Las normativas actuales, y las previsiones de normativas futuras, llevan a una progresiva y mantenida reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Una de las medidas es la reducción del peso, que es independiente de la técnica de conducción, y que significa una reducción de emisiones incluso en el reciclado.

La gráfica de la Figura 2. 9 indica la evolución de emisiones frente a peso en la última década:

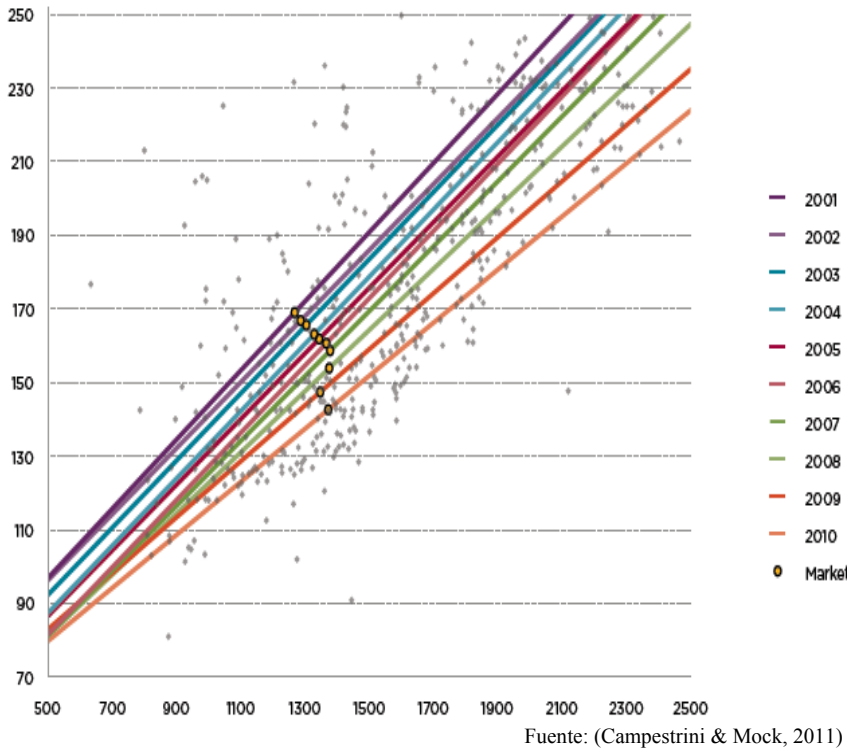


Figura 2. 9 Correlación entre las emisiones de CO₂ y la masa rodante de los vehículos nuevos vendidos cada año

La evolución de la reducción de consumo frente al peso que se presenta en la Figura 2. 9 ha de entenderse como complementario a las estrategias de reducción de consumo recogidas en la Figura 2. 4 . Según datos del IDAE, por cada 100 kg de masa adicional, en consumo se incrementa un 5%. (IDAE, 2012b), y según el estudio de FKA se puede llegar a una reducción de entre el 4,5 y 6% para una reducción del 10% del peso (Wohlester, 2007).

Se asume como estrategia de reducción de emisiones la disminución del peso del vehículo.

2.4 La seguridad del vehículo.

La seguridad en vehículos viene reglamentada por muchos países o regiones, algunos de los más importantes son:

- En Europa : Euro NCAP
- En USA: USNCAP

- En Sudamérica: Latin NCAP
- En Australia: ANCAP
- En Japón: JNCAP
- En China: C-NCAP
-

Uno de los aspectos de seguridad es la capacidad de absorción de energía de impactos, y que da lugar a varios ensayos.



Fuente: EURO NCAP

Figura 2. 10 Impacto frontal a 64 km/h contra una barrera deformable

El conseguir una calificación suficiente para este tipo de ensayos, ha llevado cambios estructurales importantes en el vehículo, Figura 2. 10 .

En los procedimientos habituales de diseño, se simula el comportamiento del vehículo, y se obtiene el grado de cumplimiento de la norma de seguridad contra impacto. En las últimas décadas el número de objetivos de seguridad ha ido aumentando de forma sostenida.

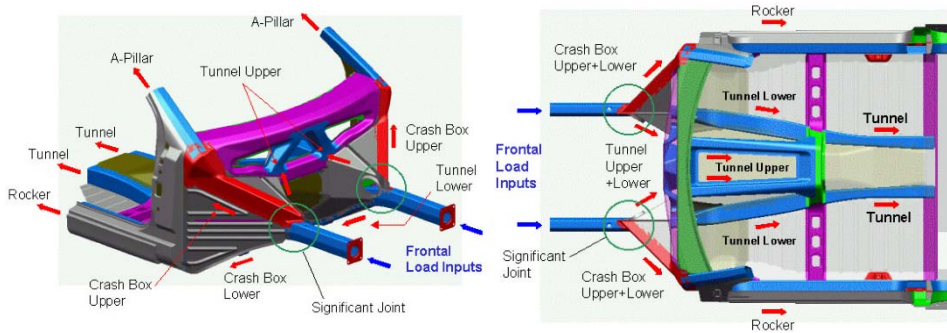
Para el caso de los choques frontales, existen elementos desarrollados para la absorción de la energía:

US-NCAP Front Impact	Euro-NCAP
<p>Overall dynamic deformation > 650 mm Steering Column displacement < 80 mm in X-direction</p>	<p>64 km/h (40 mph), 40% overlap offset deformable barrier, zero degree impact</p> <p>A-pillar displacement < 50 mm Footwell intrusion < 150 mm Steering column displacement < 80 mm in X-direction</p>

(P. E. Inc., 2001)

Figura 2. 11 Ejemplos de ensayos de impacto frontal según diferentes normas.

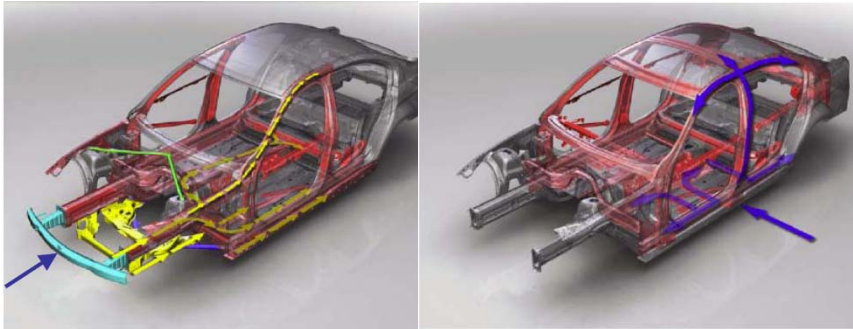
Este desarrollo ha evolucionado tanto en cuanto a la aparición de elementos que tienen como objetivo la seguridad, como el refinamiento de los mismos.



Fuente: (P. E. S. Inc., 2001)

Figura 2. 12 Elementos del frontal de un vehículo

Cada uno de estos elementos ha sido estudiado y evolucionado con los años, y representando una enorme carga de conocimiento, ingeniería y eficiencia, Figura 2. 12.



Fuente: (Wohlester, 2006)

Figura 2. 13 Trayectorias de carga en impacto frontal y lateral en un BMW Serie-3

Finalmente, la seguridad ha de ser demostrada mediante ensayos normalizados, Figura 2. 11, y el estado actual de conocimiento ha llevado a incorporar elementos de absorción (en muchos casos con función exclusiva) Figura 2. 13, y que han de ser lo más ligeros posibles, frente a una eficacia demostrada.

2.5 La reciclabilidad de los vehículos.

La Unión Europea desea limitar la generación de residuos procedentes de vehículos y fomenta la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización de los mismos y de sus componentes al final de su vida útil. Para alcanzar este doble objetivo, establece nuevas exigencias para los constructores europeos, quienes deberán diseñar vehículos fáciles de reciclar.

La Directiva 2000/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de septiembre de 2000 (end-of-life vehicle ELV), relativa a los vehículos al final de su vida útil, determina entre otros la reutilización y valorización de residuos, con el siguiente calendario.

El porcentaje de reutilización y valorización debe alcanzar (expresada como peso medio por vehículo y año):

- el 85 % a más tardar a partir del 1 de enero de 2006;
- el 95 % a más tardar a partir del 1 de enero de 2015.

El porcentaje de reutilización y reciclaje debe alcanzar (peso medio por vehículo y año):

- el 80 % a más tardar a partir del 1 de enero de 2006;
- el 85 % a más tardar a partir del 1 de enero de 2015.

La Directiva incentiva la reutilización de materiales, y por otra parte las normas sobre emisiones empujan hacia el aligeramiento del vehículo (un 10% en peso significa alrededor de un 6% en reducción de emisiones), y las normas sobre seguridad requieren materiales de elevadas prestaciones mecánicas para la absorción de la energía de impacto.

Lo indicado en el anterior párrafo ha llevado a buscar nuevas opciones en materiales. Por una parte el uso de materiales reciclados, en lugar de materiales primarios, significa una gran reducción del uso de energía y costes. Sin embargo, materiales con bajas (o disminuidas) propiedades mecánicas significan un aumento en peso. En este escenario, los materiales compuestos pueden llegar a ser una solución ventajosa con procedimientos de reciclado económicamente viables (Gerrard & Kandlikar, 2007; Witik, Payet, Michaud, Ludwig, & Månson, 2011). Actualmente casos como el Mercedes Clase-C incorpora materiales compuestos de fibras naturales, que significan un avance en la compatibilidad (DaimlerChrysler AG, 2007), sin embargo, al finalizar el ciclo de vida del automóvil, el proceso pasa por un triturado, pasando a ser materias primas para la fabricación de elementos de menor nivel de exigencia.

La Directiva ELV prima el uso de materiales fácilmente reciclables, y que al mismo tiempo, en el caso de la estructura portante, no tengan merma en sus propiedades. Estas condiciones son ideales aluminios, aceros y otros metales; materiales que pueden reciclarse infinidad de veces, sin merma de sus propiedades, que se ajustan en los procesos de fabricación.

2.6 Los materiales estructurales de los vehículos.

En los apartados previos se han indicado algunas de las restricciones con los que los fabricantes de vehículos han de conjugar la rentabilidad de su negocio. En los apartados siguientes se van a detallar los que tienen actualmente mayor impacto en la estructura portante, también conocida como Body in White (BIW). Los principales materiales utilizados en la actualidad son los aceros y los aluminios. Se van a presentar detalles de forma no secuencial para una mejor apreciación de sus diferencias y ventajas.



Fuente: (P. E. S. Inc., 2001)

Figura 2. 14 Estructura del vehículo (BIW)

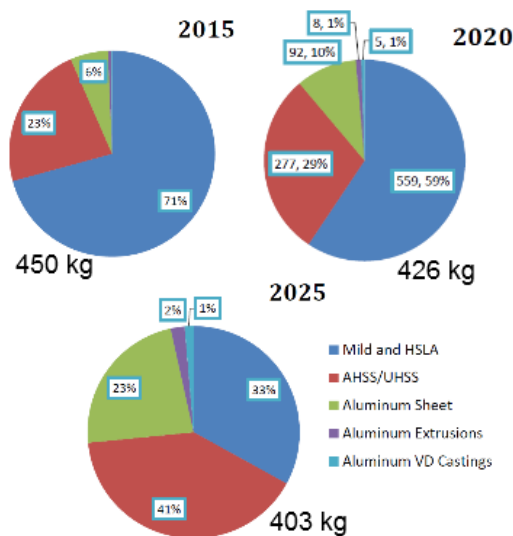
2.7 Evolución reciente en el uso del aluminio en las estructuras del automóvil.

La continua presión por la reducción de peso ha llevado a seleccionar para cada pieza el material que pudiese dar mejor relación de reducción de peso/resistencia/coste.

Existen en el mercado un número considerable de modelos con un BIW completamente de aluminio, sin embargo, representan todavía un pequeño porcentaje de la producción total de automóviles.

Las aleaciones actuales permiten reducciones de peso todavía mayores que los aceros normales, sin embargo requieren de mayor volumen para conseguir la misma rigidez que los aceros de alta resistencia (para una misma rigidez, puede reducirse el peso en un 50%, con un aumento del 40% de volumen del elemento)(Wohlester, 2006).

En el estado actual de la fabricación, el aluminio tiene importancia en capós, puertas y otros elementos de cierre, partes en que ha ido desplazando a los aceros. Los fabricantes de aluminio prevén que el impacto de este material en 2020 pase de un 1% hasta un 4%, en lo que respecta al BIW y cerramientos.

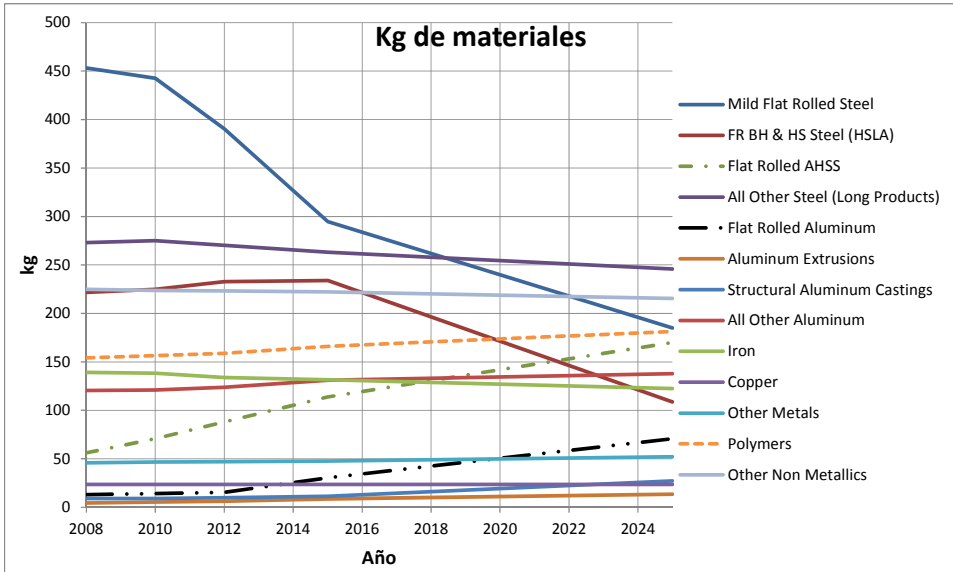


Fuente:(Ducker WorldWide, 2014)

Figura 2. 15 Previsión del uso del aluminios y acero sen BIW+cerramientos

La previsión de los productores de aluminio para los próximos años compatibiliza el crecimiento de los aceros avanzados de alta resistencia, de aluminios y de los polímeros, con el resultado de un vehículo más ligero.

La Figura 2. 16 es más explícita en la previsión de la evolución, incorporando otros materiales



Fuente:(Ducker, 2012)

Figura 2. 16 Previsión de distribución de uso de materiales en los futuros vehículos de USA.

Las aleaciones de aluminio pueden incrementar su importancia en los próximos años en los nuevos vehículos eléctricos, en el estrato de pequeños vehículos, dada la ventaja sobre los aceros en cuanto a peso. Los fabricantes de aluminio esperan pasar de un promedio 8,7% del vehículo en 2009 a un 10,4% en 2020(Ducker, 2008)

Los tipos de aluminios más utilizados tanto en estructura como cerramientos exteriores son:

Tabla 2. 4 Aluminios utilizados en chasis y cerramientos

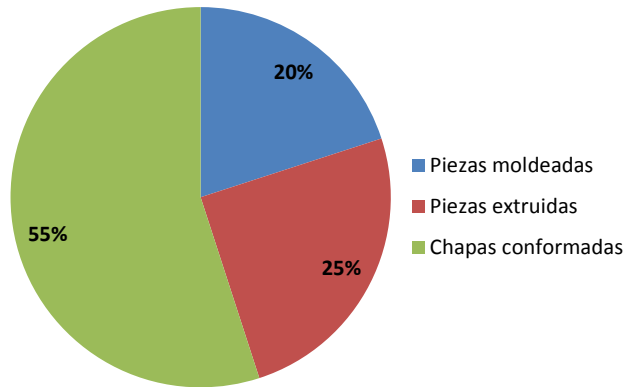
Group	Desig.	Si %	Cu %	Mn %	Mg %	Temper	Rm [MPa]	Rp _{0.2} [MPa]	A _g [%]	n	R	USO
AlMg	AA5022	0,2-0,5	0,2-0,5	0,2	3,5-4,9		275	135	30	0,3	0,6-0,7	E/C
AlMg	AA5023	0,2-0,5	0,2-0,5	0,2	5,0-6,2		285	135	33			C
AlMg	AA5052	0,2-0,5	0,25	0,1	2,2-2,8		190	90	26	0,3-0,3	0,8	C
AlMg	AA5154	0,2-0,5	0,1	0,5	3,1-3,9		230	105	27			E
AlMg	AA5454	0,2-0,5	0,1	0,5-1	2,4-3		240	110	24			E/C
AlMg	AA5754	0,4	0,10	0,50	2,60-3,60	Recocido	210	100	28	0,3-0	0,7-0,5	E
AlMg	AA5182	0,2	0,15	0,20-0,50	4,00-5,00	Recocido	280	140	30	0,3-0,1	0,7-0,5	E/C
AlMgSi	AA6016	1,0-1,5	0,20	0,20	0,25-0,60	T4	240	120	28	0,2-0,7	0,6-0,5	C
AlMgSi	AA6022	0,8-1,5	0,01-0,11	0,02-0,1	0,45-0,7		275	155	31	0,2-0,5	0,6	
AlMgSi	AA6022	0,4-0,8	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2		315	275	12			C
AlMgSi(Cu)	AA6009	0,6-1,0	0,15-0,60	0,20-0,80	0,40-0,80	T4	230	125	27	0,2-0,3	0,7-0	C
AlMgSi(Cu)	AA6111	0,7-1,1	0,50-0,90	0,15-0,45	0,50-1,00	T4	275	160	28	0,2-0,6	0,5-0,6	C
AlMg Si(iSi)	AA2036	0,5	2,20-3,0	0,10-0,40	0,30-0,60	T4	340	195	24	28	0,7	C

Fuente: (Metals, 2012; SAKURAI, 2008)

E: Elementos estructurales (soldables), C: Chapas (alta formabilidad)

T4: tratamiento para elevada formabilidad

La utilización del aluminio en la estructura del automóvil está compuesta por unos valores próximos a los siguientes, Figura 2. 17:



Fuente: (Metals, 2012)

Figura 2. 17 Utilización del aluminio en estructuras se vehículos auto-móviles

A nivel mundial, la utilización del aluminio en BIW+cerramienteos no es homogénea, siendo Europa la que más porcentaje de aluminio, respecto a otros materiales, utiliza en los automóviles.

2.8 Los costes de los materiales.

En este trabajo se contemplan dos materiales de uso masivo en la fabricación de estructuras de automóviles:

Aceros y Aluminios como principales actores en la fabricación del BIW+cerramientos, y sus costes tanto económicos como energéticos no son iguales, tal como se indica en el siguiente grupo de tablas (Tabla 2. 5,Tabla 2. 6, Tabla 2. 7 y Figura 2. 7).

Tabla 2. 5 Precios de Acero y Aluminio, para un ACV(LCA) de 14 años.

PARÁMETRO	Valor	Precio reciclado \$/kg
Coste del acero (\$/kg)	0,9	
Coste del aluminio (\$/kg)	3,3	
Precio de la chatarra de Acero(\$/kg)	0,09	0,12
Precio de la chatarra de Aluminio (\$/kg)	0,93	1,32
Consumo de combustible (mpg) BIW de Acero	22	
Consumo de combustible (mpg) BIW de	20	
Peso del vehículo con BIW de Acero	1 418	
Peso del vehículo con BIW de Aluminio	1155	
Porcentaje del Acero reciclado	90	
Porcentaje del Aluminio reciclado	91	

Fuente:(Ungureanu, Das, & Jawahir, 2007)

Los precios de los mercados internacionales se indican en la divisa que aparece en la información. El consumo mpg significa millas por galón, las masas se indican en kg.

Tabla 2. 6 Huella de carbono de BIW de Acero y Aluminio, tomados de un ACV(LCA) durante la utilización de 1 año.

Etapas	Acero (kg CO ₂ /BIW)	Aluminio (kg CO ₂ /BIW)
Previa a la fabricación	1.913,50	2.689,00
Fabricación	19,50	18,60
Utilización	6.772,50	6.139,50
Después de la utilización	282,50	75,70
TOTAL	8.988,00	8.922,80

Fuente:(Ungureanu et al., 2007)

Los costes energéticos antes indicados colocan a aceros y aluminios en un mismo escenario de utilización en un ciclo de vida. Los datos anteriores son válidos para aceros y aluminios secundarios.

En la Tabla 2. 7 se indican los valores aproximados de energía que se requieren para la fabricación de diversos metales y aleaciones primarios. Los datos correspondientes a aceros y aluminios aparecen resaltados en negra. Los parámetros que se resumen son:

- GER La Energía bruta requerida
- GVP Potencial de calentamiento global
- AP Potencial de acidificación atmosférica
- SWB Carga de residuos sólidos

Tabla 2. 7 Impacto ambiental de la producción primaria de metales “cradle to gate”

Metal	PROCESO	GER	GWP	AP	SWB
		(MJ/kg)	(kg CO ₂ e/kg)	(kg SO ₄ e/kg)	(kg/kg)
Niquel	Horno de fundición flash y Refino Sherrit-Gordon	114	11,4	0,130	65
	Lixiviación ácida a presión y SX/ EW	194	16,1	–	351
Cobre	Fundición / convertidor y electro-refino	33	3,3	0,040	64
	Lixiviación en pilas y SX/ EW	64	6,2	–	125
Plomo	El plomo de alto horno	20	2,1	0,022	14,8
	Proceso de fundición imperial	32	3,2	0,035	15,9
Zinc	Proceso electrolítico	48	4,6	0,055	29,3
	Proceso de fundición imperial	36	3,3	0,036	15,4
Aluminio	Refino Bayer, fundición Hall—Heroult	211	22,4	0,131	4,5
Acero	Proceso integral Horno blaster y de oxígeno (BF and BOF)	23	2,3	0,020	2,4
Titanio	Procesos Becher y Kroll .	361	35,7	0,230	16,9
Acero Inoxid	Horno eléctrico y Argón—Descarburación por oxígeno	75	6,8	0,051	6,4

Fuente: (Norgate, Jahanshahi, & Rankin, 2007)

En la Tabla 2. 7 se puede apreciar el elevado coste energético y de huella de carbono del aluminio primario respecto al acero primario. Otras metodologías, de instituciones próximas a los fabricantes de aluminio, dan resultados menores para el aluminio primario, por ejemplo, los fabricantes de latas de USA estiman el consumo de energía en 155 MJ/kg (Aluminum Association, 2010) y de 104 MJ/kg (Energy, 2007) con potencial de reducción de energía.

A continuación la Figura 2. 7 da una idea aproximada del precio de los metales. Actualmente se está dando una bajada en los mercados de mineral primario por la reducción de la demanda. En cualquier caso, el acero puesto en el mercado, es más económico que el aluminio,

Tabla 2. 8 Precios del mercado de metales

MATERIAL	FECHA	€/tm
Tocchos de acero	31/08/2015	133
Chatarra acero	01/09/2015	460
Bobinas acero laminado en frio	02/09/2015	850
Chatarra aluminio	03/09/2015	1.680
Zinc	04/09/2015	1.611
Aluminio	05/09/2015	1.522
Manganeso (Ferromanganeso MC)	06/09/2015	2.150
Cromo (Ferrocromo)	07/09/2015	2.500
Manganeso electrolítico	08/09/2015	3.000
Magnesio	09/09/2015	3.150
Cobre	10/09/2015	4.764
Niquel (Ferroniquel)	11/09/2015	8.935
Titanio	12/09/2015	26.000
Molibdeno	13/09/2015	11.807

Fuentes: [www. Metalprices.com](http://www.Metalprices.com) y www.lme.com/

Se aprecia el interés de los fabricantes de automóviles por utilizar los materiales más rentables en la dualidad prestaciones/precio. En esta decisión parcial el acero es muy ventajoso (G. Davies, 2012).

2.9 Los aceros en la estructura del automóvil.

La estructura del automóvil es conocida con el acrónimo de BIW (Body in White), que es equivalente al chasis es español. Está fabricado con múltiples piezas, conformadas principalmente por aceros avanzados de alta resistencia.

2.9.1 La evolución reciente de los aceros utilizados en automóviles.

En las últimas décadas, el Análisis del Ciclo de Vida de los automóviles ha sido una herramienta básica en la toma de decisiones. Una iniciativa alrededor de esta idea ha sido desarrollada por “WorldAutoSteel” (agrupación de 20 de los mayores fabricantes), que ha creado institutos sectoriales, y desarrollado programas para la innovación. Uno de estos organismos, concretamente el “Steel Market Development Institute” (SMDI) ha desarrollado el proyecto denominado:

FutureSteelVehicle (FSV)

Este proyecto tiene por objetivo la reducción de la masa de la estructura portante un 35%, sobre un vehículo de referencia. Así como la reducción total de emisiones, durante el total del Ciclo de Vida del vehículo, hasta el 70%. Esto se cumpliría conjuntamente

con una lista de requisitos relacionados con el comportamiento ante el impacto y la durabilidad, permitiendo 5 estrellas en los parámetros (ratios) de seguridad.

El FSV ha desarrollado y optimizado estructuras de chasis fabricadas con aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) para cuatro propuestas de modelos para el período 2015-2020: Vehículo eléctrico a batería (Battery electric vehicle, BEV), Vehículo híbrido conectable (Plug-in hybrid electric ,PHEV-20), para los vehículos de las clases A-/B-; Vehículo híbrido conectable (Plug-in hybrid electric ,PHEV-40) y células de combustible (FCV) para vehículos de las clases C-/D-. La masa actual de referencia es de alrededor de 300 kg para un vehículo de 1500 kg.

Este programa global permiten utilizar las mejores propiedades de los aceros, incluyendo su flexibilidad en el diseño, resistencia y formabilidad, así como sus reducidas emisiones y relativo bajo coste. La reducción del 35% cambia el posicionamiento en cuanto a aligeramiento en peso, y hace la estructura de acero comparable con la de vehículos contruidos con aluminio.

El proyecto FSV ha aportado novedades en cuanto a aceros y sus tecnologías, incluyendo más de 20 nuevos grados de AHSS, que se espera estén disponibles entre 2015 y 2020. Así mismo FSV genera nuevas formas optimizadas y configuraciones de componentes, frecuentemente mimetizadas de eficientes modelos naturales.

Proyectos precedentes fueron: en 1998 UltraLight Steel Auto Body (ULSAB), en 2000 UltraLight Steel Auto Closures (ULSAC) y UltraLight Steel Auto Suspension (ULSAS), y en 2001 Advanced Vehicle Concepts programs (ULSAB-AVC).

El sector automovilístico no se encuentra al margen de las políticas medioambientales. Se acepta que el vehículo a motor utiliza combustibles fósiles, y es altamente contaminante. Por esta razón se está apostando fuertemente en líneas estratégicas, que tienen como última finalidad, la reducción del consumo de los derivados del petróleo.

Para ello el sector se enfrenta con dos opciones, la primera es la apuesta por nuevos métodos de obtención de energía más limpias, y la segunda por la reducción de contaminantes de los actuales combustibles. Una forma de llevar a cabo esta reducción del consumo es la reducción del peso de los componentes de un automóvil. Esto justifica la investigación y aparición de nuevos materiales más ligeros, y que tengan las mismas prestaciones mecánicas o superiores; así como el cumplimiento de las Directivas comunitarias respecto a la reutilización de los materiales constitutivos de los nuevos vehículos.

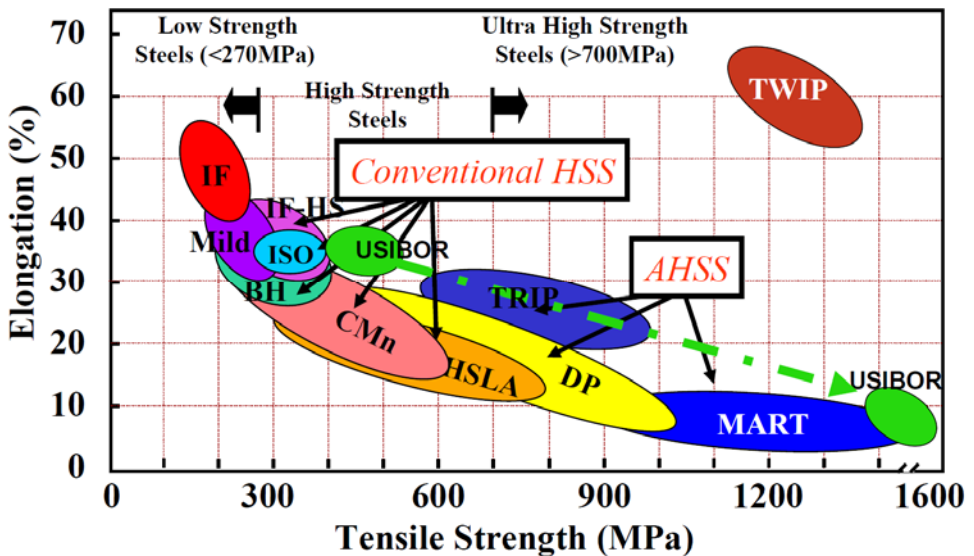
Actualmente, para conseguir la reducción de espesores de los diferentes componentes metálicos encontrados en un automóvil, tales como montantes, taloneras, refuerzos laterales, etc (y con un aumento la resistencia al impacto), se están empezando a utilizar los llamados aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steel AHSS).

Los aceros para partes de chasis con elevada responsabilidad, se definen como de alta resistencia HSS (High-Strength Steels) con límites elásticos comprendidos entre 210 y 550 MPa y con una tensión de rotura de entre 270 y 700 MPa.

Los aceros con límites elásticos mayores de 550 MPa y con tensiones de rotura mayor de 700 MPa son los llamados aceros avanzados de alta resistencia AHSS (Advanced High strength Steels).

2.9.2 Los aceros actuales.

La presión de las normativas medioambientales y de seguridad, junto a la evolución de los mercados puede observarse en muchos de los cambios perceptibles en los vehículos. Sin embargo el objeto de esta investigación es el acero. La Figura 2. 18 sirve de mapa de ruta para la situación actual



Fuente: WorldAutoSteel/Arcelor

Figura 2. 18 Estructura actual de oferta de aceros para BIW

La oferta de familias de aceros que ofrece AISI a fecha de hoy es la siguiente:

- Drawing Quality (DQ)
- Interstitial Free (IF)
- Bake Hardenable (BH)
- High-Strength Steel (HSS)
- High-Strength Low Alloy (HSLA)

Dual Phase (DP)

Transformation Induced Plasticity (TRIP)

Martensitic Steel (MS)

Cada denominación representa una familia de materiales con diversos grados. De acuerdo con el portafolio que AutoSteel propone, la gama pasa a ser de al menos 38 referencias diferentes, Figura 2. 19 .

DP 210/440	HSLA 490/600	DP 700/1000	CP 1050/1470
IF 260/410	DP 500/800	CP 750/900	HF 1050/1500
BH 280/400	CP 500/800	TPN 750/900	DP 1150/1270
IF 300/420	TWIP 500/980	DP 750/980	MS 1150/1400
DP 300/500	HSLA 550/650	TRIP 750/980	HF 1200/1900
FB 330/450	CP 600/900	TWIP 750/1000	MS 1250/1500
DP 350/600	TWIP 600/900	CP 800/1000	
TRIP 350/600	DP 600/980	DP 800/1180	
TRIP 400/700	TRIP 600/980	CP 850/1180	ULSAB AVC Grades (2002)
HSLA 420/500	Q&P 650/980	MS 950/1200	FutureSteelVehicle (2011)
FB 450/600	CP 680/780	TWIP 950/1200	AHSS Guidelines V5.0 (2014)
TRIP 450/800	TPN 680/780	CP 1000/1200	
TWIP 480/900	HSLA 700/780	MS 1050/1470	

Fuente: WorldAutostel

Figura 2. 19 Posibles aceros para BIW.

Para el presente trabajo se seleccionaron dos aceros a investigar. De ambos se obtuvo suficiente cantidad de chapa para realizar un diseño factorial de experimentos.

En primer lugar se seleccionó el DP600 (Dual Phase 600), es un acero de la primera generación de los AHSS, y su utilización se está ampliando más allá del automóvil.

De la información de WorldAutoSteel, para el proyecto de vehículo tipo, un 75% de la masa del chasis es de este material, según el capítulo 9 del USLB-AVC (P. E. S. Inc., 2001)

El Segundo material es el TWIP, que es un acero de segunda generación, con una extraordinaria capacidad de absorber energía de deformación, y que actualmente todavía está en estado de evolución y prueba por los transformadores.

2.9.3 Los aceros TWIP/TRIP.

La principal diferencia entre los aceros convencionales HSS y los avanzados AHSS es su microestructura. Los HSS son monofásicos con una estructura ferrítica, mientras que

los AHSS son de múltiples fases, que pueden contener ferrita, martensita, bainita, y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir distintas propiedades mecánicas.

Algunos tipos de AHSS tienen una mayor capacidad de endurecimiento dando como resultado unas propiedades resistencia-ductilidad mayor a los aceros convencionales. Uno de los aceros que más se están evolucionando en los últimos años son los denominados aceros TWIP. Fueron desarrollados en el Max Planck Institute for Iron Research en Dusseldorf, por el profesor Georg Frommeyer, aunque eran conocidos a finales del siglo XIX por Sir Robert Hadfield. Este nuevo material está siendo desarrollado con diversas composiciones y grados, y se prevé su aplicación a todo tipo de elementos estructurales sometidos a levadas exigencias de resistencia, ductilidad y resiliencia.

Con composiciones casi iguales existen dos tipos de aceros TRIP y TWIP.

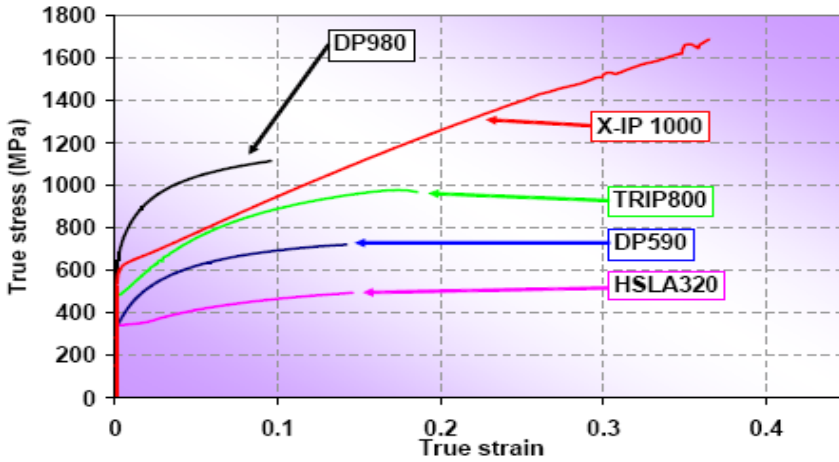
2.9.3.1 *Twinning-Induced Plasticity -TWIP (aceros de plasticidad inducida por unión) Aceros al hierro-manganeso*

Su gran característica es que son aceros con un alto contenido en manganeso, lo que causa que sean completamente austeníticos a temperatura ambiente. La causa de una capacidad de deformación tan elevada es el llamado efecto twinning (maclado). Es el tipo de emparejamiento de los granos que actúan como multitud de bordes de grano, combinando una alta resistencia con una gran formabilidad. Algunos de los aleantes son el Manganeso, Aluminio y el Silicio junto con el carbono y el nitrógeno. Una de las ventajas de estos aceros es la buena capacidad para mantener sus propiedades a temperaturas criogénicas.

Los aceros TWIP tienen un alto contenido de manganeso (17-30%) (B. C. Cooman et al., 2009), lo que determina que el acero sea completamente austenítico a temperatura ambiente. Esto hace que el principal modo de deformación sea el maclado dentro de los granos.

El maclado causa un alto valor de exponente de endurecimiento instantáneo (valor n) con una microestructura muy fina. Los límites de las maclas resultantes actúan como límites de grano y refuerzan el acero (AIMME-OTEA (Valencia)). El valor n aumenta a un valor de **0.4** con una deformación nominal de aprox. 30% y se mantiene constante hasta una elongación total de alrededor del 50%. La resistencia a la tracción es superior a 1100 MPa, y su capacidad de deformación puede llegar al 95% (B. C. Cooman et al., 2009).

De acuerdo con la información suministrada por Arcelor y Auto+Thyssen Krupp, Figura 2. 20, se puede llegar a una deformación del 35% para una resistencia de 1400 MPa, y reducciones en peso del conjunto del vehículo del 15%.



Fuente: WorldAutoSteel

Figura 2. 20 Curvas Tensión-Deformación verdaderas para TRIP, TWIP(X-IP1000), DP680 y DP980 y HSLA320

La utilización inicial de estos aceros está prevista para los elementos de refuerzo y seguridad estructural más importantes, debido por una parte a su elevada resistencia, y por otra a su muy elevada capacidad de deformación plástica, que garantiza una elevada absorción de energía en caso de impacto.

2.9.4 Perspectivas e importancia creciente de los aceros TWIP

De los 168 artículos registrados desde 1978, 68 se han publicado antes de 2006, y 123 desde esta fecha hasta hoy. Durante 2010 se han publicado 48 artículos relacionados con este material, ver Figura 2. 21.

Se han publicado muchos artículos sobre sus propiedades mecánicas, su fabricación y su comportamiento dinámico. Solo se han encontrado dos artículos relacionados con la tribología de los AHSS, y que concluyen con la necesidad de más investigación.

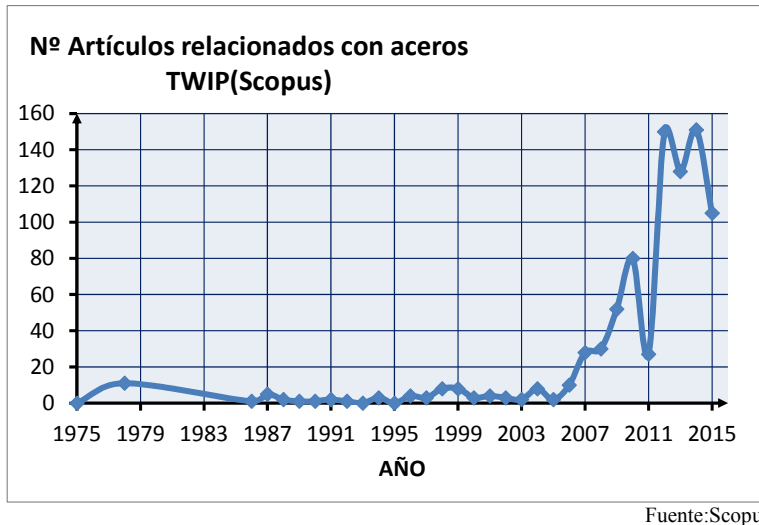


Figura 2. 21 Número de artículos relacionados con aceros TWIP

Algunos de los propietarios de las patentes.

Con objeto de declarar la importancia que le han dado los grandes fabricantes a este material, se indican algunos de los propietarios de las patentes encontradas, y que se relacionan con el TWIP.

Frommeyer, G; DaimlerChrysler AG (Stuttgart, DE); THYSSENKRUPP STAHL AG (DUISBURG, DE); Arcelor France; TRW Automotive GmbH; POSCO (Pohang, KR); Hyundai Motor Company (Seoul, KR); DAYTON PROGRESS CORPORATION (Dayton, OH, US); Salzgitter Flachstahl GmbH (Salzgitter, DE). Centre de Recherches Metallurgiques asbl (Bruxelles, BE). ILJIN LIGHT METAL CO., LTD. (Anyang-city, KR)., KIA MOTORS CORPORATION (Seoul, KR). Corus Staal BV (Ijmuiden, NL).

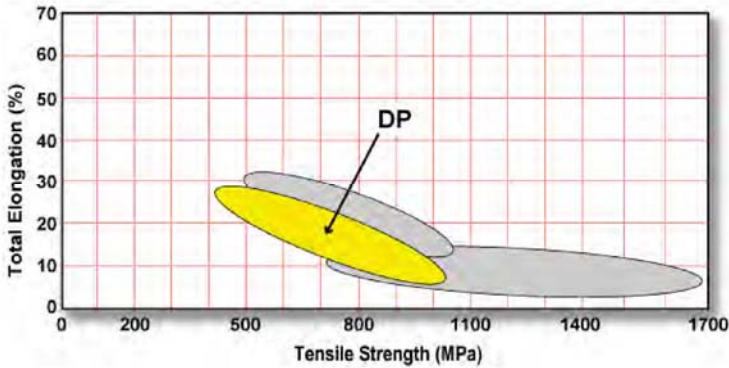
Tras la consulta en freepatent, se ha comprobado que en 2010 había 41 patentes relacionadas con aceros TWIP, en septiembre de 2015 aparecen más de 250.

Existe una amplia bibliografía respecto a los aspectos tribológicos del conformado de los aceros utilizados en los 90, sin embargo se conoce poco del comportamiento en cuanto a rozamiento de los aceros de alta resistencia AHSS (Advanced High strength Steels).

2.9.5 Los aceros Dual Phase (DP)

Los aceros Dual Phase (DP) están constituidos por una fase matriz ferrítica, y una fase dispersa formada por islas duras de martensita. Aumentando la proporción de la fase dura, generalmente se incrementa la resistencia.

Los aceros DP se fabrican mediante el enfriamiento controlado a partir de la fase austenítica en aceros laminados en caliente, o mediante recocido de aceros bi-fase ferrítico-austenítico (producción en continuo de aceros laminados en frío y recubiertos mediante inmersión en caliente). En el segundo caso, se transforma toda la ferrita en austenita antes de realizar un enfriamiento rápido que transforme la austenita en martensita.

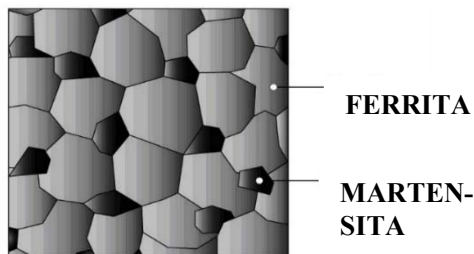


Fuente:(WorldAutoSteel, 2009)

Figura 2. 22 Posición relativa de los aceros DP

Dependiendo de la composición y de la secuencia del proceso, cuando se requiere un aumento de resistencia al estiramiento de los bordes de las piezas en bruto, pueden tener cantidades significativas de bainita.

En la Figura 2. 23 se aprecia la fase ferrítica con islas de martensita. En la deformación, el endurecimiento se centra en la fase matriz, rodeando las islas de martensita, lo que explica su elevada exponente n.



Fuente: DP Fase matriz ferrítica e islas de martensita.

Figura 2. 23 DP Fase matriz ferrítica e islas de martensita.

DP tiene el efecto de endurecimiento por envejecimiento (bake hardening), debido a la elevación de temperatura en la operación de curado de la pintura en horno, como consecuencia de las tensiones residuales de la estampación.

En los aceros DP, el carbono permite la formación de martensita a velocidades de enfriamiento moderadas, aumentando la capacidad de endurecimiento. El manganeso, cromo, vanadio y níquel, añadidos individualmente o en combinación, pueden aumentar también la capacidad de endurecimiento. El carbono, el silicio y el fósforo aumentan la resistencia. Estos elementos, cuidadosamente dosificados, permiten obtener buenas propiedades mecánicas, así como la capacidad de soldadura por puntos. Sin embargo, en el soldeo por puntos del grado DP700/1000 sobre sí mismo, la soldabilidad por puntos requiere una dosificación especial.

2.10 Los procedimientos de fabricación de la estructura portante.

Los procedimientos de fabricación están relacionados tanto con el material y las propiedades que adquiere, como con la forma de la pieza. El catálogo de procesos más importantes es el siguiente:

Estampación

Estampación de piezas compuestas por soldeo.

Hidroformado

Hidroformado de tubos compuestos por soldeo

Tubos modificados

Si se tiene en cuenta que algunos de los procesos de estampación son en caliente, “la estampación” es el proceso para alrededor del 75% de las partes (en peso) de acero del vehículo.(P. E. S. Inc., 2001)

2.11 Materias primas.

El estado inicial de la chapa de acero son bobinas (coils) de pequeño espesor, para luego ser cortadas y conformadas, pero se están dando diversas variantes:

- Lámina de un solo material (un solo espesor y un solo grado) (Single material sheet)
- Bobinas soldadas con laser (Láser welded coils)
- Bobinas de elementos soldados multiespesor (Tailored rolled coils)

Estas bobinas pueden ser procesadas posteriormente como “piezas en bruto” (blanks), y tubos o piezas tubulares:

Las piezas en bruto (blanks):

- Piezas en bruto convencionales (Conventional blanks)

- Piezas en bruto multiespesor

Las bobina pueden estar recubiertas por Zinc (por electrolisis o inmersión) o Aluminio

2.12 Necesidad del conocimiento del rozamiento de los materiales para su conformado.

En la práctica habitual de fabricación está la simulación previa de los procesos, y su ajuste mediante el uso de programas específicos. El uso de estas herramientas resulta imprescindible como factor de competitividad.

Frente a la práctica de los años 70, en que se fabricaban matrices, en base a una experiencia acumulada, y se iban corrigiendo sobre fallos en las piezas prototipo, hasta que se tenía una matriz y unas condiciones de procesado aceptables; actualmente se intenta optimizar todo el proceso en la fase de simulación, con un ajuste final de las holguras de los parámetros controlados.

Los programas de análisis del conformado por deformación plástica son capaces de simular en procesado mediante FEM, para lo cual es necesario conocer además de las propiedades elasto-plásticas del material, los modelos de rozamiento que se dan entre la lámina, la matriz y el lubricante que pueda utilizarse (Yanagida, Kurihara, & Azushima, 2010).

Para las zonas sujetas a deformación elástica, el modelo habitual de Coulomb se considera suficiente, pudiéndose determinar las fuerzas actuantes con suficiente precisión (Hayhurst & Chan, 2005). Sin embargo la elevada energía de rozamiento en los puntos más plastificados, hacer conveniente conocer el modelo de rozamiento en la zona de endurecimiento. Así mismo, se hace necesaria la caracterización respecto a la velocidad de deformación local. No se ha de perder de vista que, en el caso de la estampación, el arrastre de la lámina se realiza mediante el rozamiento. Esta razón exige un control y conocimiento integral del sistema.

Capítulo 3

El Comportamiento de las superficies

Resumen:

Se declaran los principales mecanismos de fricción, los tipos de lubricación y el modelo de rozamiento entre herramienta y lámina que posteriormente se utilizará

3 El Comportamiento de las superficies.

Para conseguir los objetivos indicados en el apartado 1.1, es necesario recoger los conocimientos necesarios para la evaluación de las condiciones de contacto, de la lámina sobre la herramienta.

3.1 Rozamiento y Lubricación en el conformado de láminas metálicas.

Durante el conformado de metales, se generan fuerzas tangenciales (de cortadura) en la entrecara pieza-matriz, que se oponen al movimiento relativo de ambas superficies, y que son debidas al rozamiento.

La calidad del conformado de láminas metálicas viene frecuentemente controlada por el rozamiento en el contacto entre pieza y matriz. Si las fuerzas de rozamiento de las entrecaras son excesivamente grandes, las condiciones de deformación local y la formabilidad de la pieza pueden verse deterioradas. Además, la energía requerida para el proceso llegar a ser injustificadamente alta (M. R. Lovell & Deng, 2002).

La magnitud de la fricción puede evaluarse como un valor de la resistencia a cortadura de la entrecara. El rozamiento, ya sea por su utilidad para controlar el arrastre, deformación y recuperación, o su aspecto adverso de cargas excesivas, tiene un papel central en el conformado de láminas metálicas (Fratini, Lo Casto, & Lo Valvo, 2006). El proceso de deformación, el diseño de herramientas, la calidad de la superficie, la selección de los lubricantes, así como la predicción de fallos mediante simulación dependen en gran medida del conocimiento del mecanismo de rozamiento (Hua-Chu & William, 1999; Daniel Wiklund, Rosén, & Gunnarsson, 2008). La fricción no es un parámetro independiente, sino que depende de diversas variables tales como la rugosidad de las superficies, el lubricante, la química de las superficies, la velocidad relativa de deslizamiento, la temperatura y de la presión de conformado (Joun, Moon, Choi, Lee, & Jun, 2009). La fuerza de rozamiento por cortadura en la superficie de contacto puede modificarse mediante lubricación, así como alterando la rugosidad superficial para pieza y herramienta.

Desde este punto de vista, la rugosidad inicial de la lámina y el rayado previo de la matriz en contacto son, factores importantes para determinar la retención de lubricante. Por otra parte, la deformación sin restricciones del material lleva a que la rugosidad de la pieza aumente durante su conformado (Le & Sutcliffe, 2002).

En muchos de los procesos de conformados de metales, una baja fricción puede ser beneficiosa. Se reducen, la presión en la superficie de contacto, la fuerza resultante de conformado, la energía de proceso requerida y el calor producido. Sin embargo, en el conformado de láminas y el proceso de laminación, el rozamiento puede ser deseable e incluso esencial para asegurar una adecuada fijación, contacto de las superficies y deformación plástica durante el procesado (Lenard, 2002)(página 85-86). Por otra parte, un diseño cuidadoso del sistema de lubricación, que permita alcanzar un nivel de roza-

miento adecuado, es esencial para un conformado de láminas metálicas tal como menciona Wilson (1978) (Wilson & Kokoska, 1975). Esto sin embargo puede ser una dificultad, dado que son posibles, simultáneamente, diferentes regímenes de lubricación en la entrecara lámina-herramienta. (Hua-Chu & William, 1999)

En las operaciones de estirado, la lámina se deforma mediante el adelgazamiento de la hoja mientras se desliza sobre la matriz, las propiedades a tracción de la hoja de material determinan la distribución de deformaciones relativas, la deformación alcanzable y el punto de fallo. Por otra parte estas características pueden ser utilizadas para la selección de los lubricantes.

Debido a la baja presión de contacto en el conformado de láminas metálicas, las propiedades mecánicas y químicas de las asperezas controlan las fuerzas de cortadura en la entrecara. La topografía superficial tanto de lámina de material, como de la herramienta es de gran importancia en el modelo de fricción. En el caso de herramientas lisas Wilson (1988) (Lenard, 2002) indica que las asperezas de la pieza de trabajo son progresivamente aplanadas mientras la tensión de tracción genera el proceso de deformación y el área de contacto real va aumentando. En este caso la tensión por rozamiento es proporcional a la resistencia por adhesión. Por otro lado, las asperezas del procesado se van labrando en la pieza de trabajo, de modo que el rozamiento se compone de adhesión y las irregularidades labradas. Así, la fricción aumenta con la presión, velocidad de deformación relativa y la disminución de la velocidad de deslizamiento.

3.2 Lubricación de capa límite y rozamiento.

La lubricación efectiva es de gran importancia en la práctica de la ingeniería. La lubricación gobierna el comportamiento de muchos mecanismos de deslizamiento, y en el caso de que el fluido lubricante desaparezca, aparecen serios desgastes o incluso el gripado.

En la práctica, sin embargo, en muchos casos es imposible obtener una lubricación fluida, especialmente cuando las velocidades de deslizamiento son pequeñas o las cargas elevadas. En tales casos el espesor de la delgada lámina de lubricante se rompe y las superficies están separadas solamente por films lubricantes de espesor molecular. En estas condiciones, el rozamiento se ve influenciado tanto por la naturaleza de las superficies en contacto como por la composición química del lubricante. La viscosidad del lubricante tiene poca o ninguna influencia sobre el comportamiento del rozamiento. En la lubricación de capa límite solamente queda una fina capa (film) de lubricante entre las dos superficies enfrentadas, pero el espesor del film es insuficiente para evitar el contacto de las asperezas a través del film. Sin embargo, si los lubricantes está formulados adecuadamente, contendrá compuestos que reaccionarán químicamente con las superficies formando delgadas capas (delgados films) orgánicas. Dichos films tienen el espesor suficiente para permitir la suficiente interacción entre las asperezas de las superficies, al mismo tiempo que reducen, dentro de lo posible, el contacto metálico entre las superficies. Si ha de disminuirse la fricción, el film ha de distribuirse y extenderse

con facilidad. Esta es la razón de que las cadenas moleculares largas son especialmente útiles como lubricantes de capa límite.

En general, la mayor protección de las superficies se consigue cuando el lubricante de capa límite es sólido. Así, con parafinas de cadena larga, la lubricación es eficaz hasta el punto de fusión, pero a temperaturas elevadas se da un aumento del rozamiento y crece la interacción metálica. Se han observado resultados similares con alcoholes. Con ácidos grasos, sin embargo, la lubricación suele ser eficaz bastante por encima del punto de fusión. Esto se debe a la reacción química con el metal o el óxido metálico de la superficie que forma un jabón metálico y es esto lo que lubrica por encima del punto de fusión.

En la lubricación de capa límite del proceso de conformado metálico, bajo la condición de grandes superficies relativas de contacto, y un sustrato deformado plásticamente; la aproximación de un único coeficiente de rozamiento constante es cuestionable, como mencionan Wilson y Sheu (Wilson & Sheu, 1988b), y otros autores (Tan, 2002; Daniel Wiklund et al., 2008).

Muchos de los intentos por desarrollar un modelo de rozamiento mejorado se han relacionado con grandes superficies relativas en contacto, asociadas con elevadas presiones en la entrecara. Dado que la superficie real de contacto no puede superar, en la práctica, al área aparente de contacto; el área real de contacto no puede crecer indefinidamente al crecer la carga, sino que deber saturarse para condiciones de presión elevadas. Mientras que la saturación del área real tiene valores elevados en el proceso de conformado metálico (forja, laminación, etc.), las presiones en el conformado de láminas metálicas suele ser bastante menor.

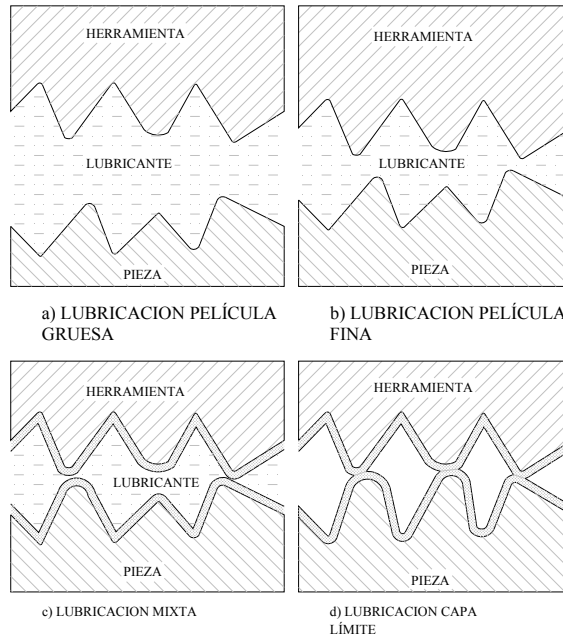
En cuanto al modelo de fricción superficial, se han desarrollado pocas investigaciones sobre la influencia de la deformación plástica del sustrato en fricción.

3.3 Regímenes de lubricación.

El rozamiento entre la lámina y la herramienta juega un papel decisivo en el perfil de las fuerzas y la distribución de deformaciones relativas de los elementos del conformado de láminas metálicas. Las variables de proceso incluyen la velocidad de conformado, la temperatura, la composición del lubricante y el procedimiento de aplicación, la geometría de herramienta y pieza así como la topografía superficial, que pueden influir de forma importante en las condiciones del rozamiento. El lubricante puede tener influencia sobre la topografía resultante de la pieza.

Un modelo de fricción realista ha de tener en cuenta lo fundamental del mecanismo de rozamiento y lubricación de la entrecara herramienta-lámina. La situación puede ser complicada como consecuencia de que pueden darse diversos regímenes de lubricación entre herramienta y pieza. Estos regímenes pueden caracterizarse por el espesor del film de lubricante en relación con la rugosidad de la superficie (y la fracción de la carga de la entrecara soportada por los picos o asperezas en contacto. Wilson ha descrito cuatro regímenes principales tal como se muestra en la Figura 3.

1. Película gruesa ($h/\sigma > 10$), en donde h es el espesor medio de la capa de lubricante y σ la rugosidad cuadrática media compuesta de las superficies.
2. Película delgada ($3 < h/\sigma < 10$)
3. Lubricación mixta ($h/\sigma \leq 3$) (indeterminación)
4. Lubricación de capa límite ($h/\sigma \leq 3$) (indeterminación) (Darendeliler, Akkök, & Yücesoy, 2002)



Fuente: W.R.D. Wilson

Figura 3. 1 Regímenes de lubricación

En el régimen de capa límite mostrado en la Figura 3. (d) la carga entre las superficies se soporta completamente por el contacto entre los picos de las irregularidades. Aunque con una formulación adecuada, los lubricantes reaccionarían químicamente con las superficies formando una delgado film lubricante. Este film tiene la capacidad de reducir la adhesión entre las superficies. Esto no solamente reduce la fricción sino que también reduce las resistencias de cortadura de las uniones, disminuyendo las cargas tangenciales de las caras, lo que reduce el crecimiento del área real de contacto.

El régimen de lubricación mixta mostrado en la Figura 3. (c), se da cuando el espesor del film es tal, que una fracción significativa de la carga entre las superficies es soportada por el contacto entre los picos de la rugosidad. El resto de la carga es soportado por la

presión del lubricante en los valles de la rugosidad. El proceso de lubricación en los valles es como el de régimen de lubricación de capa delgada, mientras que los picos en contacto operan en régimen de lubricación de capa límite. De este modo, un modelo de lubricación realista debe aplicar método de análisis separados para picos y para valles.

Hay dos modos de combinar los procedimientos de lubricación masiva y la lubricación de capa límite:

En primer lugar, la carga total está compartida entre film de los valles (relativamente delgado) y la lubricación de capa límite de los picos en contacto. La carga soportada por el lubricante de los valles reducirá la severidad de los problemas de lubricación en los picos.

En segundo lugar, el lubricante de capa límite en los picos en contacto tiende a ser continuamente desplazado por frotamiento, y regenerado por la acción del flujo del lubricante intacto depositado en los valles. Si el control del flujo de lubricante depositado en los valles no es eficaz para suministrar nuevo lubricante a los puntos de contacto, entonces el mecanismo de lubricación de capa límite perderá efectividad.

Es importante poder predecir qué régimen puede darse bajo diferentes condiciones. Si el factor de decisión es el espesor de la capa de lubricante presente en el contacto, el estudio del mecanismo por el cual el lubricante es retenido o introducido entre la pieza y la herramienta determina la clave para determinar el régimen de lubricación presente en la situación dada.

3.4 Análisis de la Lubricación y la Lubricación de capa límite en conformado metálico.

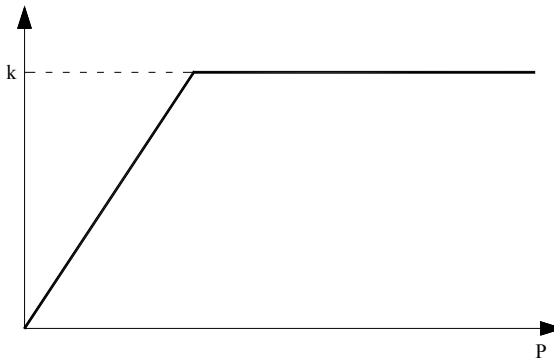
Hay tres leyes clásicas en rozamiento (Amontons-Modelo de Coulomb). Las tres leyes se enuncian a continuación:

1. La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto entre los sólidos.
2. La fuerza de rozamiento es proporcional a la fuerza normal entre los sólidos.
3. El rozamiento cinemático es independiente de la velocidad de deslizamiento.

La segunda ley nos permite utilizar una constante, conocida como coeficiente de rozamiento. Un coeficiente de rozamiento es invariable, resulta muy útil en el comportamiento de muchos sistemas mecánicos, sin embargo su valor es limitado en el modelo de rozamiento de la entrecara pieza-herramienta en las operaciones de conformado metálico (Fratini et al., 2006; Joun et al., 2009). A primera vista, podríamos considerar adecuado el modelo de coeficiente constante para el caso de procesos de conformado metálico operando en régimen de lubricación de capa límite. Sin embargo, la posibilidad

de que una fracción importante de la superficie en contacto esté sometida a una severa deformación plástica, hace que el valor del modelo sea cuestionable.

La teoría clásica de la fricción adhesiva desarrollada por Bowden y Tabor (1953) (Leu, 2009) asume que, cuando ambas superficies están cargadas una contra la otra, se produce el contacto solamente en los picos de las asperezas, y el rozamiento se genera por la adhesión entre las puntas. Esta teoría permite una explicación de dos de las leyes del rozamiento, esto es, que el rozamiento es independiente del área de contacto aparente y que la fuerza de rozamiento es proporcional a la carga, determinando un coeficiente constante.



Fuente:(Hayhurst & Chan, 2005)

Figura 3. 2 Modelo de rozamiento de Orowan

Orowan (1941) estuvo ente los primeros en apuntar la inconsistencia de utilizar un coeficiente de rozamiento constante para una elevada presión normal. Cuando analizaba el proceso de laminado por rodillos, propuso un modelo de fricción en que la tensión crece en proporción a la presión, con un coeficiente de rozamiento constante consecuentemente, hasta que se alcanzaba un valor crítico de presión. Por encima de la presión crítica, el rozamiento se asocia con el área real de contacto, llegando a ser igual al área aparente, y la tensión de rozamiento es constante. En otras palabras, su modelo predice coeficientes de rozamiento constantes para bajas presiones normales y una “tensión” de rozamiento constante para elevadas presiones; se ajusta bien para laminación en frío sin lubricación de materiales blandos, se puede representar tal como se indica en la Figura 3. 2. , donde k es el límite elástico a cortadura.

Shaw et al. (1969) ha dado una explicación más precisa para esto, diciendo que la relación entre el área real de contacto y el área aparente aumenta con el crecimiento de la presión y se aproxima a la unidad de forma asintótica, siendo necesaria una presión muy elevada para llegar a la última fase de allanamiento de la curva. La conexión entre la tensión de fricción y la presión normal aparece reflejada en la Figura 3. 3, de acuerdo con la teoría de la adhesión.

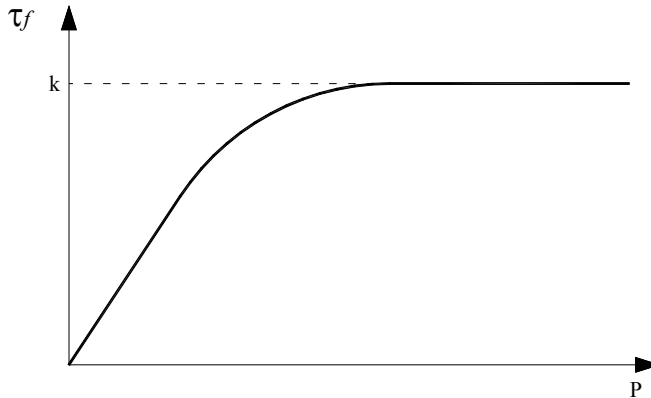


Figura 3. 3 Modelo de rozamiento de Shaw

Wanheim and Bay (Bay & Wanheim, 1976) tiene en cuenta una transición más suave entre el coeficiente de rozamiento constante a baja presión y la tensión de fricción a presión elevada.

En algunas operaciones de conformado metálico, tales como el conformado por estirado o el conformado de láminas, las presiones en la entrecara son relativamente bajas comparadas con las que se dan en un conformado por deformación a corazón (laminación, forja). Así la única característica propia de la entrecara pieza-herramienta en conformado metálico es que la pieza está siendo sometida a una gran deformación plástica, es que las deformaciones locales asociadas con las irregularidades se dan en una zona plastificada próxima a la superficie.

Wilson y Sheu (1983, 1988)(Wilson & Sheu, 1988a, 1988b) utilizaron métodos del teorema del límite superior para estudiar el alisado de las asperezas de la superficie o la indentación superficial en presencia de una deformación plástica plana masiva. Encontraron que el endurecimiento efectivo está relacionada con la razón de deformación masiva en el material próximo a la superficie y la razón de deformación plástica relativa asociado con el alisamiento de las asperezas o superficie de contacto. Cuando esta razón se incrementa, el endurecimiento efectivo se reduce. Una comparación cuantitativa de las predicciones de la teoría con las mediciones experimentales del alisamiento del modelo de las esperezas en laminado mostró una buena aproximación con los resultados

experimentales de laminación. Así mismo utilizaron SEM para para analizar el efecto de la deformación superficial.

Wilson y Sheu (1988)(Wilson & Sheu, 1988a, 1988b) también desarrollaron una expresión semiempírica para el endurecimiento efectivo de una pieza sometida a una deformación plástica en su espesor, y utilizaron este modelo de rozamiento límite en dos casos ideales. Su modelo de endurecimiento efectivo se aplica directamente a ambas piezas, aplanadas sus asperezas mediante una herramienta alisada tal como se muestra en la Figura 3. 3

Es interesante utilizar los resultados del endurecimiento efectivo para generar los modelos de rozamiento, en los procesos de conformado metálico sujetos al régimen de lubricación de capa límite. La cuestión clave es, como contribuyen diferentes tipos de interacciones de las asperezas al nivel de rozamiento global. Las interacciones pueden incorporar las asperezas de la pieza, de la herramienta o ambas.

Para entender el proceso, se considera el caso con una pieza que tiene irregularidades triangulares y una herramienta lisa mostrada en la Figura 3. 4 (a) y el caso de una pieza lisa contra una herramienta con irregularidades de forma triangular como se ve en la Figura 3. 4 (b), son los que se han tenido en cuenta en este modelo. Se encontró una importante relación entre la deformación relativa de la pieza y el la fracción del área en contacto para una presión constante dada por la expresión (Shih & Wilson, 1999), (Saniei & Salimi, 2006),(Yang, 2007):

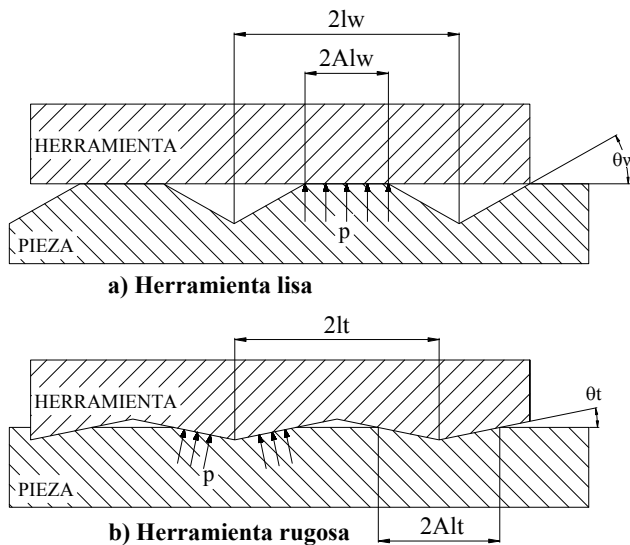
$$\frac{dA}{d\varepsilon} = \frac{P \cdot f_1(A)}{\theta \cdot [2A - P \cdot f_2(A)]} \rightarrow \frac{dA}{d\varepsilon^*} = \frac{P \cdot f_1(A)}{2A - P \cdot f_2(A)} \quad \text{Ecuación 3. 1}$$

$$f_1(A) = 0,515 + 0,345A - 0,860A^2; \quad f_2(A) = \frac{1}{(2,571 - A - A \cdot \ln(1 - A))} \quad \text{Ecuación 3. 2}$$

- k = Resistencia a cortadura del material de la pieza (MPa)
- p = Presión de contacto promedio (MPa)
- P = p/k, factor de presión de entrecara, adimensional
- A = Fracción de área de contacto
- A_c = Valor crítico de A
- A₁ = Fracción de área inicial de la sección de la pieza

Donde $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\theta'}$ es la deformación relativa normalizada de la pieza.

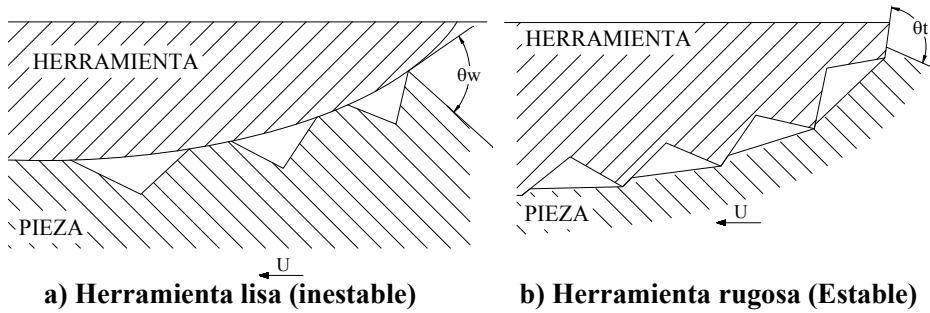
La Figura 3. 4 (a) muestra una pieza alisada donde las asperezas han sido aplanadas por una herramienta lisa, mientras que la Figura 3. 4 (b) muestra una pieza lisa que ha sido labrada para acomodarse a una herramienta rugosa. Sin embargo, debería hacerse notar que el caso de la pieza alisada, el θ de la ecuación (3.1) es la inclinación de las asperezas de la pieza de trabajo θ_w , mientras que en el caso de la pieza, el ángulo de rugosidad es el correspondiente a la rugosidad de la herramienta θ_t .



Fuente:W.R.D. Wilson

Figura 3. 4 Conformado de la pieza en ausencia de deslizamiento con la herramienta

Para el caso genérico de zonas de contacto curvas, la Figura 3. 5 expresa las diferentes variables a tener en cuenta.



Fuente: W.R.D. Wilson

Figura 3. 5 Los casos de la ecuación de Wilson y Sheu

Este trabajo fue extendido por Wilson (1988) (Wilson & Sheu, 1988a, 1988b) para tratar el rozamiento límite tanto en condiciones de estabilidad como inestabilidad. En su análisis, integró la ecuación (1) para obtener la variación en la fracción de área de contacto A_c , el denominador en el segundo miembro con la deformación relativa normalizada ε^* . Se ha mencionado que si A es inferior a cierto valor crítico A_c , el denominador del segundo miembro de la ecuación (3.1) tenderá a ser negativo. De la Ecuación 3. 1 y la Ecuación 3. 2 se deduce que A_c depende de P de acuerdo con la siguiente ecuación, con las siguientes condiciones iniciales: P es constante durante la deformación $\varepsilon^* = 0$ y $A = 1,05 \cdot A_c$

Se llegó a la siguiente ecuación:

$$P = 5,142 A_c + 2 A_c^2 + 2 A_c^2 \ln(1 - A_c) \tag{Ecuación 3. 3}$$

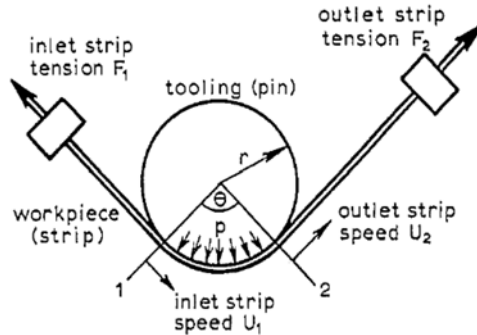
Shih et al. (Shih & Wilson, 1999) sugirió que la influencia de la rugosidad podría incorporar un incremento de la aspereza, que aumentase linealmente con la deformación relativa, añadiendo un término adicional a la ecuación de Wilson y Sheu Ecuación 3. 1, del aplanamiento de las asperezas, del siguiente modo: $\theta = \theta_0(1.C_1.\varepsilon)$, quedando la indicada ecuación como:

$$\frac{dA}{d\varepsilon} = \frac{P.f_1(A)}{\theta.[2A - P.f_2(A)]} - C_2 A = \frac{P.f_1(A)}{\theta_0(1.C_1.\varepsilon).[2A - P.f_2(A)]} - C_2 A \tag{Ecuación 3. 4}$$

En donde C_1 y C_2 son constantes empíricas obtenidas por ensayos. En general tendrán una valor mayor para aquellos materiales que presenten tendencia al aumento de la rugosidad superficial durante la deformación; debiendo tenerse en cuenta que la anterior

ecuación solamente es aplicable durante el contacto superficial. Lo anterior permite predecir un aumento o disminución de la fracción de área en contacto con el aumento de la deformación, dependiendo de los valores iniciales de P y A .

A continuación, la Figura 3. 6 esquematiza el simulador de estampación Flexión Bajo Tensión BUT utilizado por Wilson.



Fuente:(P. K. Saha, Wilson, & Timsit, 1996)

Figura 3. 6 Esquema del simulador de W.R.D.Wilson

Sutcliffe (Sutcliffe, 1988) presentó un análisis de la línea de deslizamiento del alisamiento de las asperezas transversales y extendió la investigación al aplanamiento de las asperezas longitudinales utilizando un aproximación al método energético debido a Wilson y Sheu. Ambas teorías predicen un gran incremento en el área de contacto con elevada deformación relativa y una reducción del área necesaria para la deformación plástica de la masa. En este análisis se utilizó un valor de la máxima tensión de tracción.

Posteriormente Sutcliffe desarrolló experimentos en que llegó a caracterizar el rozamiento respecto al espesor de la capa de lubricante, así como la reducción de espesor de la lámina (a mayor reducción, mayor rozamiento), utilizando el modelo de allanamiento de las asperezas junto con el modelo de lubricación de capa límite, llegando a resultados aceptables(Le & Sutcliffe, 2001). Posteriormente estudió la influencia de los huecos llenos de lubricante en el rozamiento, la velocidad de laminación y los aditivos utilizados en laminación, llegando a resultados equivalentes con las teorías de Wilson et al.(Le & Sutcliffe, 2002; Le, Sutcliffe, Wang, & Burstein, 2005; R. Le & Sutcliffe, 2003; Sutcliffe, Combarieu, & Montmitonnet, 2004; Sutcliffe, Combarieu, Repoux, & Montmitonnet, 2003; Sutcliffe & Georgiades, 2002), Sutcliffe utilizó un procedimiento de estirado a través de una matriz, con una elevada deformación plástica de la pieza.

Korzekwa et al. (Korzekwa, Dawson, & Wilson, 1992) también aplicaron análisis de elementos finitos en ranuras, en dos y tres dimensiones. En su comunicación, se utilizó un modelo de material lineal, y con él se modeló un sistema con deformación relativa en todo el sólido. Se dio énfasis a una relativamente baja presión y a una pequeña fracción de área en contacto, adecuada para el caso del conformado de láminas. En muchos casos de conformado de láminas, las tensiones planas internas son fundamentales en determinar la trayectoria de la deformación mientras que las tracciones normales a la superficie son relativamente insignificantes. Sin embargo, incluso bajas presiones en la superficie pueden producir incrementos significativos en el área de contacto verdadera. De acuerdo con sus cálculos, los perfiles de velocidades generalmente mantienen la simple aceptación de que la pendiente de la superficie libre no varía. Esto puede no ser verdad para pequeñas razones de contacto y bajas presiones. Es interesante hacer notar que las superficies libres parecen moverse hacia arriba casi uniformemente en los espacios entre las asperezas. Las comunicaciones de Sutcliffe (1988) y Korzewa et al. (1991) también apoyan los hallazgos de Wilson y Sheu (1983,1988).

Matuszak (Matuszak, 2000a, 2000b) realizó una serie de investigaciones para comprobar la adecuación del modelo de Amontons-Columb, en donde no tuvo en cuenta las rugosidades de herramienta y pieza, y sí la velocidad de deslizamiento y el recubrimiento, llegando a la conclusión de la no validez de la indicada teoría para caso de deformación plástica. Los factores fundamentales son la velocidad de deslizamiento, las condiciones de lubricación y la presión de contacto y la deformación experimentada por la pieza.

Lovell (M. R. Lovell & Deng, 2002) planteó su trabajo como una caracterización de las condiciones de rozamiento, buscando rellenar un hueco en los modelos reales de comportamiento. Tuvo en cuenta tanto la rugosidad, como las características de los lubricantes, diferenció los tipos de recubrimiento, y utilizando un simulador similar al de Duncan, desarrolló ensayos de deformación plana por flexión en ambos sentidos. En su análisis utilizó un perfilómetro para cuantificar y análisis micrográfico para caracterizar los tipos de desgaste. Sus conclusiones abrieron el camino para posteriores trabajos.

Lee (Lee, Keum, & Wagoner, 2002) ha realizado ensayos, con prensa y matriz de estampación, y traccionando un fleje entre dos superficies, para diferentes láminas galvanizadas, con diversos lubricantes, llegando a unas ecuaciones que determinan el coeficiente de rozamiento en base a la rugosidad y la viscosidad del lubricante, y que son adecuadas para su programación sobre programa FEM, aunque no han tenido en cuenta factores tales como la direccionalidad, la temperatura, la velocidad de deformación o la velocidad de deformación plástica y su influencia en el coeficiente local. Establece conclusiones generales en función de rozamiento viscosidad para diferentes rugosidades, y rozamiento-rugosidad par distintas viscosidades, Ecuación 3. 5.

$$\mu = \frac{23,2}{104,5 + \nu^{0,98}} - 5,3 \cdot 10^{-6} (\nu - 56,2)^2 + 0,24 (\lambda - 0,76)^2 - 0,112 \quad \text{Ecuación 3. 5}$$

μ = coeficiente de rozamiento

λ = rugosidad superficial

ν = viscosidad cinemática cSt

Liu (Yuqi & Junhua, 2006) ha realizado un análisis por FEM una aplicación de las restricciones de lubricación de capa límite, y con coeficientes de rozamiento constantes, en donde se puede comprobar que con una mayor aproximación al rozamiento real, probablemente se llegase a una total correlación entre el modelo y el resultado real.

Wiklund (Daniel Wiklund et al., 2008; D. Wiklund, Rosén, & Wihlborg, 2009) ha realizado investigaciones sobre la lubricación en régimen mixto, dando un índice de huecos llenos de lubricante y aportando conclusiones, entre ellas la necesidad de aumentar la investigación sobre este régimen de lubricación. . Considera que el desplazamiento equivale a una sucesión de cojinetes de deslizamiento plano convergentes-divergentes. Aplica ecuaciones correspondientes a cojinetes tomadas de (Batchelor & Stachowiak, 1995), y utilizando mediciones de perfilometría 3D, llega a la Ecuación 3. 6.

$$\mu = \mu_0 \left[1 - \frac{\eta \nu (1 - \alpha)}{P_A \bar{h}^2} C \right] + \frac{\eta \nu (1 - \alpha)}{P_A \bar{h}} \quad \text{Ecuación 3. 6}$$

μ	Coeficiente de rozamiento
μ_0	Coeficiente de rozamiento de capa límite
η	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática
α	Fracción de superficie en contacto
\bar{h}	Holgura promedio entre las crestas aplanadas y los flancos de las asperezas
P_A	Presión aparente

Kosanov y Lenard (Kosanov, Lenard, Uhrig, & Wallfarth, 2006) llevaron a cabo ensayos para analizar la influencia de diferentes lubricante en el rozamiento mediante una máquina de matriz plana, con cargas y velocidades más próximas a las utilizadas habitualmente en el conformado. Llegaron a una correlación para el coeficiente de rozamiento en que intervenía la viscosidad, la velocidad de desplazamiento y la fuerza normal (que determinaría la presión), llegando como conclusión a una modificación de la curva de Stribeck Ecuación 3. 7 .

$$\mu = 0,0288 \left(\frac{V}{1999} \right)^{-0,1648} - 0,0002\nu + 0,1909 F_n^{-0,5017} \quad \text{Ecuación 3. 7}$$

μ = coeficiente de rozamiento

ν = viscosidad cinemática mm²

V =velocidad relativa en mm/s

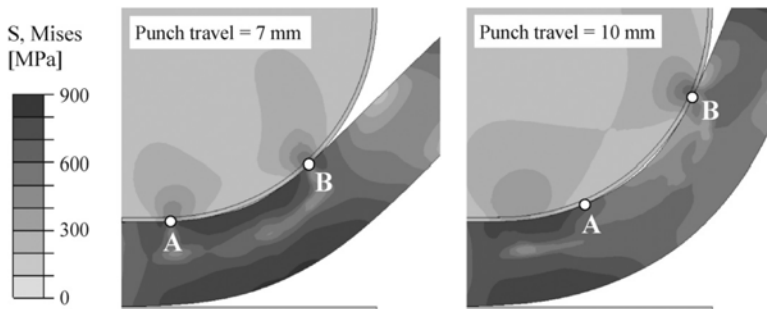
F_n =Fuerza normal en kN

Kim et al. (Hyunok Kim, Altan, & Yan, 2009) han realizado investigaciones sobre el comportamiento de diferentes lubricantes para diferentes casos de embutición profunda en aceros AHSS, midiendo las fuerzas de embutición y analizando mediante FEM, micrografías e inspección visual los resultados de diferentes lubricantes. En esta investigación se buscó mas el resultado global frente a las predicciones de las simulaciones FEM, que el conocimiento del comportamiento del acero de alta resistencia frente a la condiciones de conformado. Ha llegado a distribuciones no uniformes de la presión de contacto. Así mismo, para un ángulo de abrazamiento de 90°, ha demostrado que la zona de contacto verdadera es de unos 75°, con máximos de presión en las zonas de inicio y final. Posteriormente ha realizado investigaciones respecto el régimen de lubricación, utilizando el modelo de rozamiento de Stribeck. Realizó una investigación en que combina ensayos BUT (SFBT), junto a ensayos de la copa y la utilización de modelos FEM de los mapas de presión, llegando a una metodología que utiliza un polinomios segundo orden para definir el coeficiente de rozamiento, tomando como parámetro de cálculo de la presión en el punto analizado.(Y. S. Kim, Jain, & Metzger, 2012)

Pereira et al.(Pereira, Yan, & Rolfe, 2008), han realizado investigaciones en la misma línea que Kim, llegando a resultados equivalentes, y ampliando la investigación al análisis de desgaste en puntos concretos del borde de la matriz, llegando demostrar las simulaciones FEM mediante el desgaste acelerado de los puntos de máxima presión(Pereira, Yan, & Rolfe, 2012).

Duncan ha realizado una interpretación ajustada a las investigaciones anteriores, en que clasifica el proceso de conformado en tramo transitorio, y estable, y analiza la asimetría de todo el proceso (Pereira, Duncan, Yan, & Rolfe, 2009). El trabajo ha sido continuado por Wang et al.(X. Z. Wang & Masood, 2011) Incidiendo en la dimensiones del radio de curvatura y forma de la herramienta, y reproduciéndose la no uniformidad en las distribuciones de presión

La no uniformidad en la distribución de presiones ha sido comprobada por Coubrough mediante un sistema de medición en el pin, llegando a un ángulo real de contacto de unos 70 grados para un ángulo aparente de 90°(Coubrough, Alinger, & Van Tyne, 2002).



Fuente:(Pereira, Yan, & Rolfe, 2010)

Figura 3. 7 Los puntos Ay B en dos instantes del proceso.

En la Figura 3. 7 se aprecia la no uniformidad de distribuciones, la existencia de puntos con una elevada presión, así como de zonas sin contacto.

Kim (Hyunok Kim et al., 2009) ha realizado investigaciones para averiguar el comportamiento de diferentes lubricantes frente a la embutición de AHSS, concretamente un material de fase dual (DP) 590 galvanizado (GA), con una matriz fabricada con acero D2, en sus conclusiones no parecen discriminar los diferentes regímenes de lubricación. Su conclusión principal es la necesidad de acercar las condiciones de un tribolaboratorio a las existentes realmente en el conformado.

Weidel et al. (Weidel & Engel, 2007; Weidel, Engel, Merklein, & Geiger, 2009) han realizado aplicaciones con equipos de análisis de imagen de rugosidad con objeto de determinar la verdadera superficie de contacto, así como el efecto del lubricante y el ángulo del flanco de la rugosidad, abriendo la posibilidad a posteriores investigaciones.

Azushima et al. Ha desarrollado varios procedimientos ópticos para la observación in situ de las condiciones de lubricación relacionadas con la perfilometría de la pieza, llegando a que la fracción de superficie en contacto tiene un límite del 60%. Posteriormente realizaron ensayos de deformación bajo flexión, se utilizaron láminas de aluminio y acero recocido; se encontró que a partir de un valor determinado de presión relativa el rozamiento pasaba de ser de capa límite a régimen mixto, como consecuencia del aplastamiento de las asperezas (Azushima & Sakuramoto, 2006), que coincide cualitativamente con lo indicado por Wilson y sus colaboradores. Recientemente ha desarrollado y utilizado tribosilumadores, del tipo inlet, para el estudio de las condiciones de rozamiento en la laminación en caliente hasta temperaturas de 800°C; a fin de analizar el comportamiento en condiciones de estampación en caliente (Yanagida et al., 2010). Azushima apoya sus conclusiones en la observación del daño longitudinal y la rugosidad obtenida.

Azushima modifica la ecuación de Wilson, desvinculando el arado de la superficie en contacto, Ecuación 3. 8 :

$$\mu = \alpha \cdot \mu_b + (1 - \beta)(1 - \alpha) \mu_w + \beta (1 - \alpha) \mu_m + \mu_p$$

Ecuación 3. 8

- μ_b Coeficiente de rozamiento hidrodinámico (película lubricante)
- μ_w Coeficiente de rozamiento con agua
- α Fracción se superficie cubierta por film lubricante
- μ_p Coeficiente de rozamiento por arado de las superficies.
- μ_m Coeficiente de rozamiento por captura de partículas
- β Fracción se superficie no cubierta por film lubricante y con captura de partículas

Lo (Lo & Tsai, 2002; Lo, Yang, Shih, & Lin, 2009; Lo & Yang, 2003) ha realizado ensayos sobre láminas rugosas de aluminio contra un cristal, realizando análisis de imagen de la deformación de la asperezas (en la cara opuesta a la herramienta), así como otros ensayos respecto a la evolución de la deformación de las asperezas, llegando a conclusiones parecidas a las de Wilson, e incorporando simplificaciones.

Bay et al.(Sørensen et al., 1999), (J. Andreasen, Olsson, Chodnikiewicz, & Bay, 2006) ha utilizado un simulador de estampación equivalente al desarrollado por Wilson. Ha realizado diversas investigaciones relacionando parámetros tales como la fuerza de retención del fleje, velocidad de conformado, radio de la matriz, temperatura de la matriz, rugosidades superficiales y lubricantes utilizados, evaluando al superficie de contacto a partir de la perfilometría de la pieza. Sus resultados van en la dirección de la comparación de diferentes lubricanes y sus efectos en el rozamiento en procesos de estampación y embutición profunda.

Boher et al.(Boher, Attaf, Penazzi, & Levailant, 2005; Le Roux, Boher, Penazzi, Dessain, & Tavernier, 2012) ha realizado investigaciones sobre el coeficiente de rozamiento en flejes, aplicado a la embutición profunda, buscando la reducción del desgaste de las herramientas. Un resultado importante para esta investigación, es la comprobación de la no uniformidad del desgaste en los diferentes puntos de contacto de la herramienta (Boher, Le Roux, Penazzi, & Dessain, 2012).

3.5 Conclusiones. El modelo de contacto ente superficies.

Tras la revisión bibliográfica de los resultados obtenidos durante los últimos 15 años por los autores antes reseñados, que a su vez seguía la estela de trabajos anteriores, se llega a la siguiente conclusión.

El contacto, y su efecto en las superficies en el conformado de láminas metálicas es un fenómeno complejo, en el que intervienen tanto las propiedades del material, matrices, rugosidades de los elementos, lubricantes, temperatura y forma de ejecución.

Así mismo, diferentes zonas de una pieza están sometidas a distintas condiciones de lubricación, temperatura, presión, deformación relativa, velocidad de deformación,

efecto de la asimetría del proceso, y en consecuencia a diferentes condiciones de rozamiento.

Las superficies reales de contacto no son las aparentes. Por un lado las asperezas determinan diferentes aproximaciones dentro de la lámina. Por otro lado, la rigidez del fleje hace que parte del arco de abrazamiento no tenga contacto real con la herramienta.

Diferentes investigadores llegan a la conclusión de que se dan dos regímenes de lubricación, una fracción de la superficie puede estar en régimen de lubricación hidrodinámica. Otra fracción puede estar en régimen de lubricación mixta, con riesgo de rotura de la capa límite, esto puede expresarse en la Ecuación 3. 9.

$$p = A \cdot p_a + (1 - A) p_h \quad \text{Ecuación 3. 9}$$

en donde p es la presión aparente, y que está compuesta por la presión debida al contacto de las asperezas (p_a) y la presión debida a la acción hidrodinámica, que se limita a la zona de los valles llenos de lubricante (p_h), siendo A la fracción de área en contacto real con las asperezas.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un procedimiento, viable económica y tecnológicamente, para la mejora del conformado mediante la selección de variables de proceso y principalmente el lubricante.

Se ha comprobado que la topografía inicial de las superficies es un dato efímero, aunque significativo.

El modelo puede resumirse aceptando que cada efecto aporta su propia tensión de cizalladura entre superficies, que evaluada sobre la superficie total o aparente:

$$\tau = A \cdot \tau_a + A \cdot \tau_p + (1 - A) \tau_h \quad \text{Ecuación 3. 10}$$

Donde τ_p es la tensión correspondiente al labrado (ploughing) de las superficies; tensiones que se rigen por leyes muy diferentes, los otros subíndices se han definido anteriormente.

Finalmente, no es posible establecer un único modelo de comportamiento en todos los casos, al comparar los resultados existen claras divergencias entre los modelos presentados.

Capítulo 4

Los simuladores de la estampación.

Resumen:

La utilización de simuladores de procesos no es un asunto nuevo. Se ha encontrado un conjunto de diferentes tipologías, enfocados a partes específicas del proceso. Se describen los que han tenido más relevancia en las últimas décadas, así como sus autores, y se resume en forma tabular su estructura y ecuaciones de rozamiento.

4 Los simuladores de la estampación.

Se han encontrado dos líneas básicas en la medición de rozamiento en la estampación de chapas metálicas:

- Medición de fuerzas y desplazamientos de una lámina en condiciones de simulación.
- Medición del desgaste sobre una herramienta.

Adicionalmente se han añadido otras observaciones respecto a la rugosidad y efectos superficiales, ensayos de deformación plástica y simulaciones por el método de los elementos finitos del comportamiento de la lámina sobre la herramienta.

4.1 Los simuladores del rozamiento y sus resultados.

El comportamiento de las chapas metálicas en operaciones de conformado queda determinada por dos acciones simultáneas. Por una parte de la deformación del núcleo del material, que es una combinación de tensión y deformación planas (al menos en parte de la deformación), junto con presiones superficiales localizadas. Por otra parte, por las condiciones de rozamiento de la entrecara matriz/pieza.

Para evaluar el efecto combinado de la deformación del núcleo y de la entrecara, se han desarrollado diversos simuladores del proceso. En ellos se emulan los estados tensionales y de deformación complejos, producidos por la interacción herramienta-lámina metálica.

Schey (Schey, 1984) hizo una útil revisión de los diferentes modos de medir o inferir el rozamiento en los procesos de conformado metálico. Otros autores como Hao (Hao, Klamecki, & Ramalingam, 1999), H. Kim (Hyunok Kim et al., 2009; H. Kim, Han, Yan, & Altan, 2008; Hyunok Kim, Sung, Sivakumar, & Altan, 2007) indican las configuraciones básicas de dispositivos para la medición del coeficiente de rozamiento en diferentes partes de una pieza sometida a estampación/embutición. Deng y Lovell (Deng & Lovell, 2000; M. Lovell, Higgs, Deshmukh, & Mobley, 2006; M. R. Lovell & Deng, 1999, 2002) indican una serie de investigaciones con un sistema parecido al de Duncan (Zhang, Hodgson, Duncan, Cardew-Hall, & Kalyanasundaram, 2002), tanto para evaluar el rozamiento como el diferente comportamiento de lubricantes.

De forma resumida, se han desarrollado diversos métodos para medir el rozamiento, asumiéndose en muchos de ellos el coeficiente de rozamiento de Coulomb, que para el caso de que se considere constante puede escribirse como: $\mu = \frac{F_s}{F_n} = \frac{\tau}{p}$, siendo:

F_s la fuerza de cizalladura, F_n la fuerza normal, τ es la tensión de cortadura en la entrecara y p es la presión promedio en la superficie.

Estos ensayos de rozamiento en laboratorio, en algunos casos, difieren en la geometría, forma de aplicación de la carga, grado de deformación relativa (elástica o plástica), velocidad de ensayo y método de lubricación, llegando a resultados discrepantes.

Por otra parte, el rozamiento es un parámetro característico del sistema mecánico, no debiendo ser considerado como una propiedad exclusiva del material. Como consecuencia, no deben compararse los resultados obtenidos por diferentes tipos de ensayos de laboratorio. (Vallance & Matlock, 1992)

Duncan (X. J. Wang, Duncan, & Devenpeck, 1983) desarrolló un ensayo para flejes que se muestra en la Figura 4. 1 , el mismo equipo ha sido utilizado por Lovell (Deng & Lovell, 2000; M. Lovell et al., 2006; M. R. Lovell & Deng, 2002) . Simula el alargamiento de una lámina contra el canto del punzón de una típica matriz de embutición, fue utilizada para comparar el efecto del rozamiento producido por diferentes materiales.

En este ensayo, Figura 4. 1 , el fleje es guiado entre dos rodillos, y está sujeto a la fuerza de tracción P_1 . Los alargamientos relativos en e_1 y e_2 se miden con facilidad. La fuerza P_2 puede estimarse a partir del diagrama fuerza-deformación del material, a partir de la deformación relativa obtenida a partir del extensómetro e_2 . El experimento se realizó en una máquina de ensayos de tracción con la parte superior acoplada a una célula de carga y la parte inferior la bancada. El coeficiente de rozamiento se calcula por los incrementos de e_1 utilizando la siguiente relación:

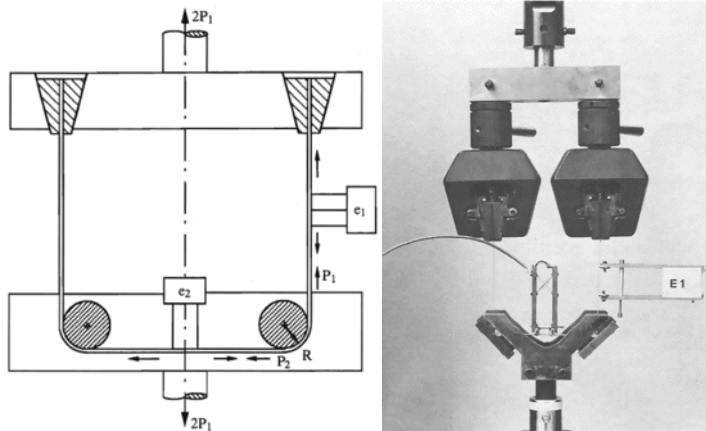
$$\frac{dP}{P} = \mu \cdot d\theta, \text{ integrando entre } P_1 \text{ y } P_2, \text{ para un ángulo de } \beta^\circ \text{ de contacto: } \ln \frac{P_1}{P_2} = \mu \cdot \beta$$

Para el sistema de Duncan el ángulo de abrazamiento es de 90° , por lo que la ecuación toma el valor : $\ln \frac{P_1}{P_2} = \mu \cdot \frac{\pi}{2}$, puesto que la rama más cargada es la correspondiente al lado

vertical,

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Ecuación 4. 1

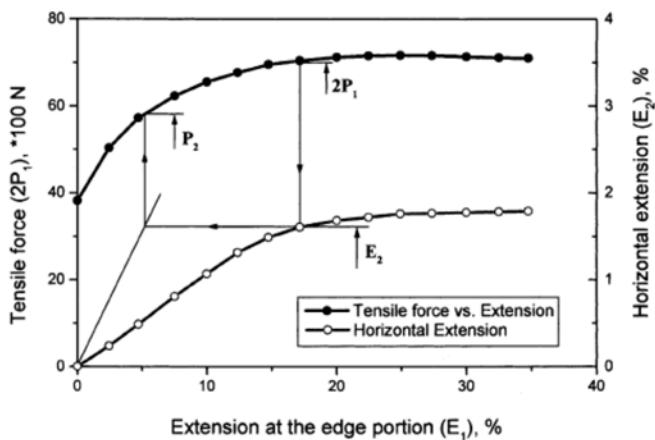


Fuente: (X. J. Wang et al., 1983)

Figura 4. 1 Sistema de ensayo para flejes. Duncan.

El ensayo se realiza hasta el fallo del material. Se registran simultáneamente P_1 y e_1 , que determinan la curva nominal del material, así como e_2 . Dado un punto P_1 - e_1 , se busca e_2 , este valor se coloca en abscisas, y la vertical indica el punto P_2 , que permite determinar el coeficiente de rozamiento.

Este ensayo incorpora con el rozamiento las fuerzas de curvado y enderezamiento, lo que sobredimensiona el valor del rozamiento.



Fuente: (Deng & Lovell, 2000)

Figura 4. 2 Resultados del sistema de ensayo para flejes. Duncan.

La parte de la fuerza correspondiente a la flexión puede evaluarse mediante la ecuación de Swift $\frac{F_B}{y_1 w} = \frac{\sigma_y y_1}{2r} \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right)$ (Y. S. Kim, 2004) , ecuación que posteriormente se explicará.

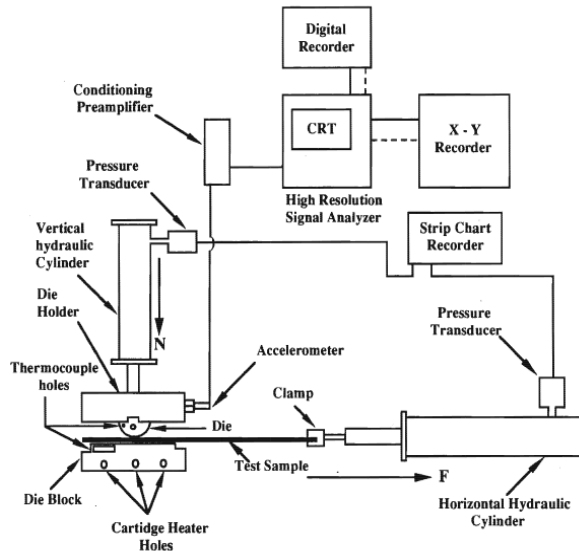
Wang (X. J. Wang et al., 1983) ha utilizado un montaje de ensayo similar y ha medido los cambios del coeficiente de rozamiento con las distancias de deslizamiento para diferentes materiales en seco y lubricados. Comenta que un solo ensayo no es suficiente para determinar todos los aspectos de la fricción y los factores concurrentes, y considera que han de desarrollarse suficientes ensayos.

Un montaje de ensayo equivalente fue utilizado por Zheng y Overby (1988) para simular el alargamiento de una lámina galvanizada sobre el borde de un troquel. Ha permitido encontrar las relaciones entre el coeficiente de rozamiento y otras variables de conformado. Estas variables incluyen la velocidad de troquelado, el radio del troquel, la lubricación, las propiedades del material y la rugosidad superficial. Se han realizado ensayos tanto para flejes galvanizados como desnudos. En ambas condiciones, tanto secas como lubricadas, el coeficiente de rozamiento se incrementa conforme el radio del rodillo disminuye.

El rozamiento y la influencia de la lubricación de productos laminados en frío de acero, tanto recubiertos como no, fueron estudiados por Coduti (Coduti, 1987) en un equipo de ensayos de rozamiento por deslizamiento lineal para fleje plano. El equipo es básicamente consiste en una matriz de posicionamiento, mecanismo vertical de carga y sistema horizontal de tracción como se ilustra en la Figura 4.3. Durante el experimento la parte superior de la matriz baja sobre la muestra ensayada hasta la carga deseada, y se aplica presión en el cilindro hidráulico horizontal. Las muestras de ensayo son arrastradas a través de la matriz de sujeción a una velocidad de 152 mm/s. La señal de voltaje de los transductores de presión conectados a los cilindros vertical y horizontal queda grabada en registrador gráfico continuo. Se utilizan células de carga para calibrar periódicamente la señal de salida de los transductores de presión. La fuerza necesaria para iniciar y mantener el movimiento de deslizamiento es grabado continuamente en función del tiempo (o en un registrador gráfico).

El coeficiente de rozamiento es la razón entre la carga tangencial y la carga normal. Coduti (Coduti, 1987) ha dado un estudio comparativo sobre el comportamiento tribológico de lubricantes líquidos y sólidos sobre láminas de aceros sin recubrir y recubiertos. Las tendencias de rozamiento y desgaste fueron evaluadas cuantitativamente para coeficientes de rozamiento estático y dinámico, deformación relativa y morfología de los cambios superficiales. El efecto de la temperatura y la dureza de lubricantes sólidos sobre la fricción y el desgaste también fueron examinados. El fenómeno del retemblado fue registrado de un acelerómetro acoplado a la matriz de ensayo. Se comprobaron mejoras significativas en reducción de la fricción, desgaste y vibraciones en láminas de acero recubierto con films de lubricantes sólidos. Mayor grado de conformabilidad, anterior al

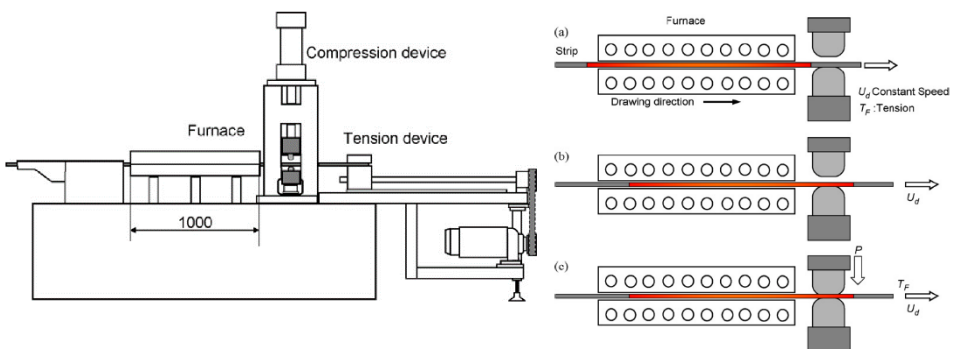
fallo, fue comprobado con el ensayo (LDH) Limiting Dome Height sobre muestras recubiertas con films de lubricantes sólidos.



Fuente:(Coduti, 1987)

Figura 4. 3 Simulador de deslizamiento para fleje plano.

Un equipo similar ha sido utilizado por Lenard et al(Kosanov et al., 2006) y por Bay(J. Andreasen et al.). Para el caso de estampación en caliente Yamagida y Azushima han desarrollado una variante del anterior equipo(Yanagida & Azushima, 2009; Yanagida et al., 2010) Figura 4. 4.

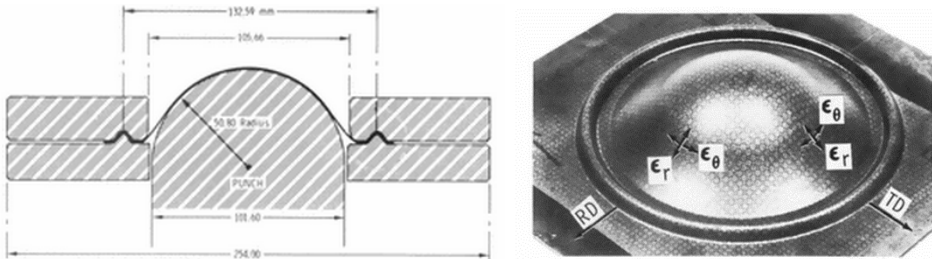


Fuente:(Yanagida et al., 2010)

Figura 4. 4. Simulador para fleje plano en caliente de Azushima

El ensayo LDH es un ensayo de conformado por tracción introducido por Ghosh (Ghosh & Hecker, 1975). Está basado en un ensayo anterior de copa sugerido por Hencker (1974).

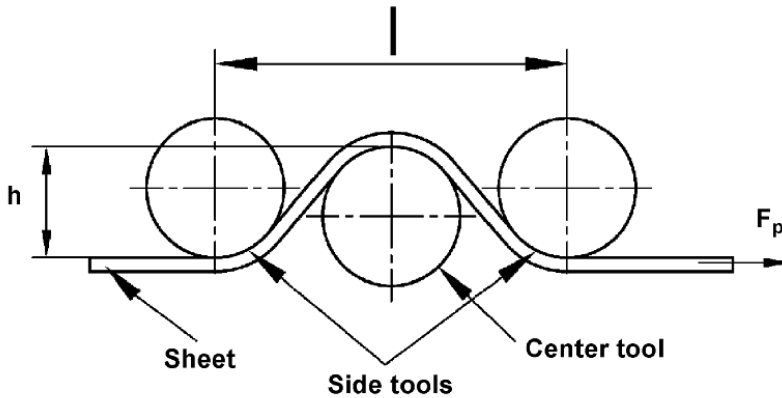
Hechker propuso su nuevo ensayo de copa como consecuencia de la insuficiencia y falta de repetitividad en los dos bien conocidos y equivalentes ensayos denominados como de Ericksen y Olson ensayos de copa. El ensayo LDH, mostrado en la Figura 4.5, es un ensayo importante de conformabilidad y se utiliza habitualmente para cuantificar el comportamiento bajo presión de las láminas metálicas. Las principales variables de proceso que afectan a los resultados del ensayo LDH son el flujo de tensión del sólido y las propiedades superficiales de la probeta, el material de la matriz, la razón de presión y la lubricación. Estos factores afectan indirectamente las mediciones dadas de formabilidad, principalmente por su influencia cooperativa, tanto como la trayectoria de deformación local que experimenta la probeta durante la deformación. Normalmente se utiliza una rejilla circular para determinar la distribución de deformaciones en la pieza.



Fuente:(Ghosh & Hecker, 1975)

Figura 4.5

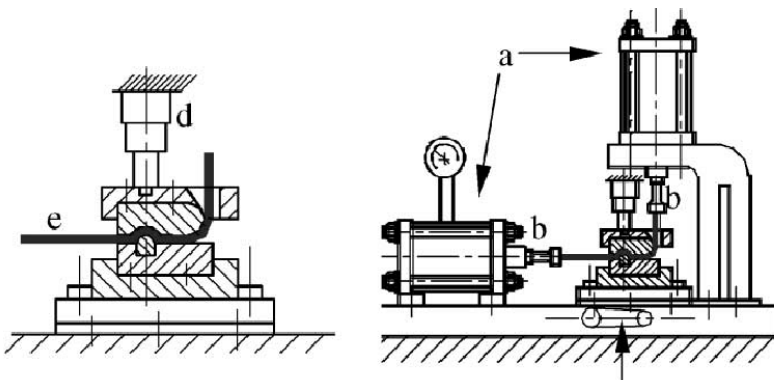
En ensayos de flexión de las camas de las matrices, la lámina es flexionada mientras se desliza sobre las superficies de una herramienta circular. En muchas embuticiones poco profundas de la industria del automóvil, el lecho de embutición se utiliza para volver a estirar el material. La flexión libre sobre el lecho de embutición sometida a lubricación y en condiciones severas puede ensayarse en un dispositivo denominado simulador del lecho de embutición, tal como el mostrado en la Figura 4.6 diseñada por Nine (Nine, 1978), siendo también utilizada por Bay (J. Andreasen et al.)y Azushima (Azushima & Sakuramoto, 2006). En este ensayo el fleje es traccionado a través del lecho de flexión de una matriz de embutición, simulada en una máquina de ensayo de tracción, donde los rodillos tienen varios grados de interpenetración. El componente de flexión de la fuerza de embutición se obtiene cambiando los insertos de los pisadores por rodillos. La fuerza de rozamiento se obtiene entonces directamente, y el desprendimiento de material y el desgaste adhesivo puede observarse fácilmente.



Fuente: (Bay, Olsson, & Andreasen, 2008)

Figura 4. 6 Esquema del simulador de draw-bed de Nine

Una simulador equivalente ha sido utilizado por Samuel, para el estudio de las condiciones de deformación que experimenta la lámina, en el proceso de prensado por el prensachapas (Samuel, 2002), Figura 4. 7.



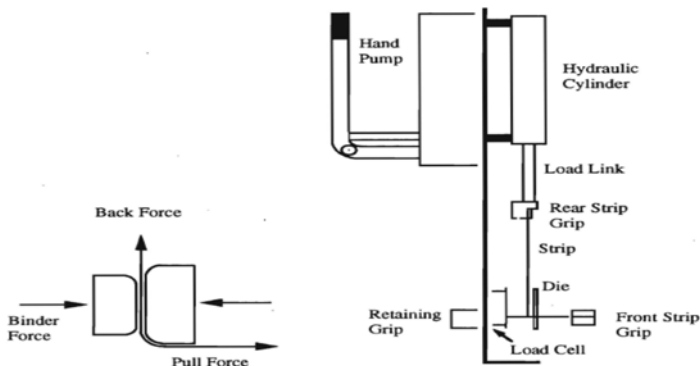
Fuente: (Samuel, 2002)

Figura 4. 7 Simulador de de Draw-Bed de Samuel

Los efectos de las condiciones de conformado (presión normal, velocidad y peso de la lubricación), sobre las características del rozamiento del acero recubierto con zinc, han sido estudiadas por Nakamura et al. (1988). Se utilizó un aparato de ensayo de embutición para determinar el coeficiente de rozamiento. También encontraron la variación del coeficiente de rozamiento como consecuencia de los cambios en las condiciones de conformado.

Rangarajan (Tesis 1990) evaluó la respuesta friccional de láminas de acero recubierta utilizando un ensayo de embutición de una lámina bajo tensión. Midió experimentalmente las áreas de contacto reales de las superficies, como una función de la presión de contacto, siguiendo la tendencia predicha en el modelo de Wanheim y Bay (Bay & Wanheim, 1976) para rozamiento controlado por la deformación de las asperezas.

Wright y Schurman (Wright & Schurman, 1990) han desarrollado un equipo experimental que simula la zona del radio de acuerdo como se muestra en la Figura 4. 8. Esta comunicación presenta las características de rozamiento de varios radios de acuerdo, enfatizando la variabilidad del coeficiente de rozamiento. Se encontraron pequeñas variaciones de localización de las tensiones residuales. La utilización de aceite residual de fresadora, solo, dio un coeficiente de rozamiento de alrededor de 0,03 mayor que con un aceite habitual de conformado. El aumento de la rugosidad de la matriz puede asociarse con un aumento de coeficiente de rozamiento. Láminas de aceros con galvanizado electrolítico (EG) y galvanizado por inmersión en caliente (HDG) manifestaron un coeficiente de rozamiento alrededor de 0,03 por debajo del rango para acero de calidad desoxidado con aluminio (AKDG). Las láminas de acero HDG presenta un comportamiento de rozamiento de deslizamiento intermitente (stick-slip). Acero AKDQ tiene mayor coeficiente de rozamiento superior al acero ADQ.



Fuente:(Wright & Schurman, 1990)

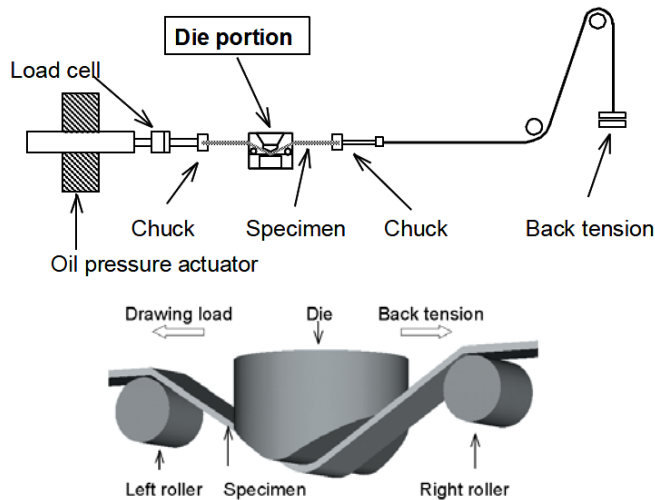
Figura 4. 8 Simulador de bordes de matriz de Wright

En la ponencia principal, Dohda (Dohda) ha mencionado que se dispone de muchos tipos recubrimientos duros y delgados utilizables, pero no son totalmente útiles debido a la falta de conocimiento de su comportamiento en el conformado. Ha clarificado las características tribológicas de estos recubrimientos duros que se utilizan en las herramientas para conformado metálico. Ha llegado a conclusiones de sus resultados experimentales en que los recubrimientos de carburos y nitruros son superiores en propiedades anti-

desgaste y dan bajos rozamientos en todos los ensayos. Los resultados no son siempre claros entre carburos y nitruros debido a las diferentes condiciones de los ensayos tales como la rugosidad y la limitación de las condiciones de ensayo. Así y todo, es deseable examinar y aclarar su comportamiento con una base física y desarrollar un nuevo sistema de ensayo que tenga la capacidad de distinguir pequeñas diferencias entre los coeficientes de rozamiento.

Davies y Stewart (R. G. Davies & Stewart, 1990) han estudiado la influencia del material de la matriz en el coeficiente de rozamiento de acero recubiertos con zinc utilizando la máquina de ensayo del tipo de flexión bajo tensión colocando varias matrices. No encontró ninguna evidencia de que recubrimientos de las matrices del tipo TiC TiN, o que tratamientos superficiales tales como la nitruración reduzcan el coeficiente de rozamiento, pero observó que estos recubrimientos reducen el desgaste y el zinc el pick-up en la matriz.

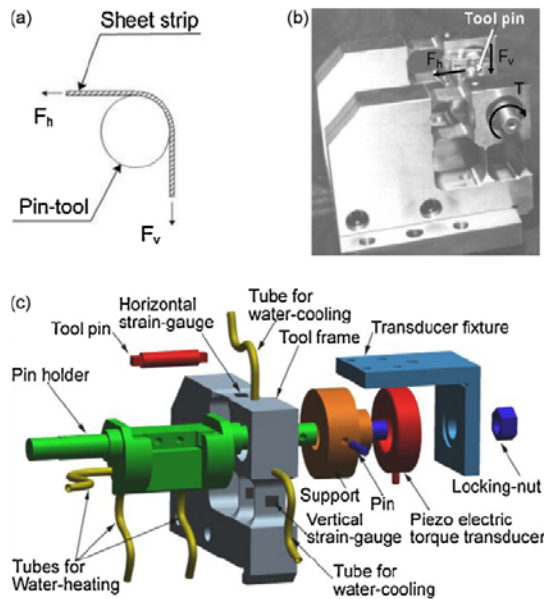
Azushima 2006 (Azushima & Sakuramoto, 2006) ha utilizado un simulador, Figura 4.9, que permite analizar el rozamiento en la zona de los radios de acuerdo de matriz y punzón, para diferentes lubricantes. Según el autor, el efecto de la fuerza de flexión y enderezamiento se calcula con la ecuación de Swift, y que tras un análisis óptico de los efectos de rozamiento da resultados muy interesantes para elaborar modelos de rozamiento bajo diversas condiciones de deformación.



Fuente: (Azushima & Sakuramoto, 2006)

Figura 4.9 Simulador de Azushima

Bay (J. Andreasen et al., 2006) ha desarrollado un tribosimulador para el ensayo de Flexión Bajo Tensión (BUT), que se caracteriza por la capacidad de controlar la temperatura del material a ensayar mediante circuitos de agua. Así mismo dispone de una amplia gama de velocidades (0 a 200 mm/s), Figura 4. 10 .



Fuente:(J. Andreasen et al., 2006)

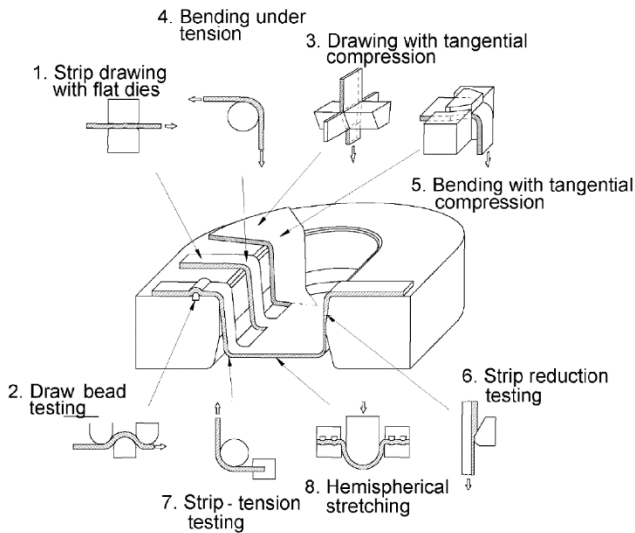
Figura 4. 10 Simulador de Tracción Bajo Flexión de Bay

En este apartado se ha realizado un resumen de algunos de los investigadores que han trabajado con simuladores de estampación.

Tomando como referencia a Bay (J. Andreasen et al.) , y habiendo constatado a otros autores como Kim(Hyunok Kim et al., 2009; H. Kim et al., 2008; Hyunok Kim et al., 2007; H. Y. Kim, Hwang, & Bae, 2002; S.-k. C.-d. Kim, KR), Chin, Kwang-geun (Chunlanam-do, KR), Kim, Seong-ju (Chunlanam-do, KR), 2008) , coinciden en que el proceso consta de diferentes partes o zonas con comportamiento diferenciado, y que todas han de ser estudiadas para su mejora.

4.2 Clasificación de los principales sistemas de medición del rozamiento en láminas metálicas

Se realizó una búsqueda de los simuladores del proceso de estampación, y tomando como referencia a Bay (Bay et al., 2008), se va a recapitular los tipos principales, relacionados con la estampación, encontrados en la bibliografía, siguiendo a esta autor las diferentes zonas de la lámina se resumen en la Figura 4. 11.



Fuente:(Bay et al., 2008)

Figura 4. 11 Principales simuladores relacionados con la estampación

Las zonas 4 y 8 (Figura 4. 11), pueden simularse con un Simulador de Flexión Bajo Tensión (SFBT/BUT).

Se ha realizado un estudio de los principales simuladores reseñados en artículos de investigación en tribología del conformado de láminas metálicas, Hao (Hao et al., 1999) y hace una clasificación de simuladores de rozamiento en conformado de chapa metálica, en primer lugar el simulador de Duncan, el simulador en U, el simulador en L sus elementos básicos se describen la Tabla 4. 1 , y que se amplió para hacer un resumen de las tipologías encontradas .

Tabla 4. 1 Diferentes tipos de simuladores descritos

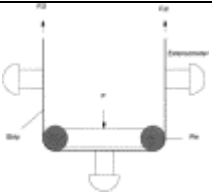
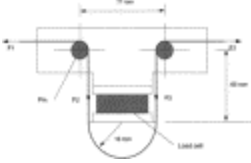
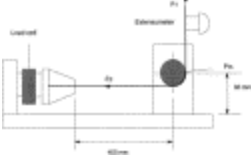
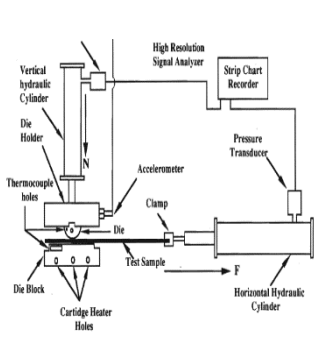
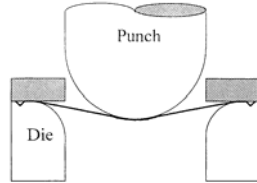
SIMULADORES DE ROZAMIENTO EN CONFORMADO DE LÁMINAS METÁLICAS	
<p>Simulador de Duncan (Hao et al., 1999)</p>	
<p>Simulador en U (Hao et al., 1999)</p>	
<p>Simulador en L (BUT)(Hao et al., 1999)</p>	
<p>Simulator longitudinal INLET Wright & Schurman, 1990)</p>	
<p>Ensayo LDH de embuti- ción profunda. (Yang & Hsu, 2001)</p>	

Tabla 4. 1 (Continuación) Diferentes tipos de simuladores descritos

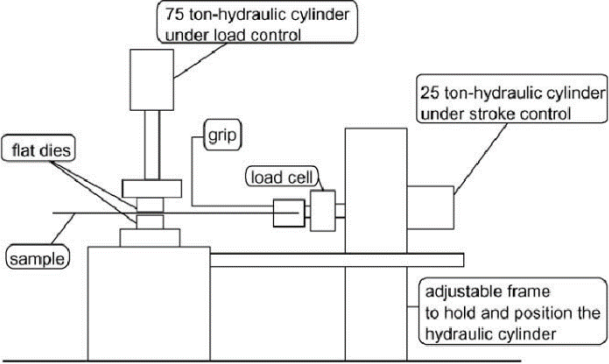
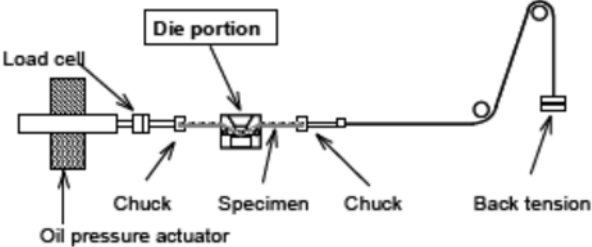
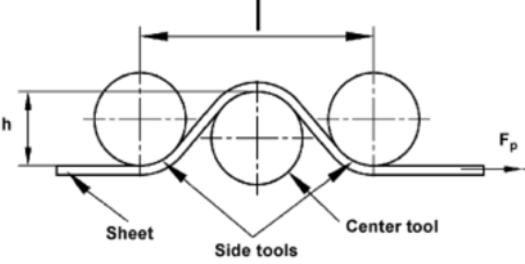
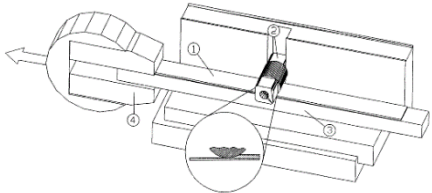
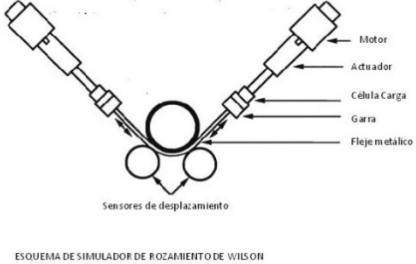
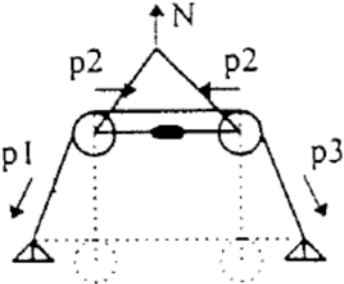
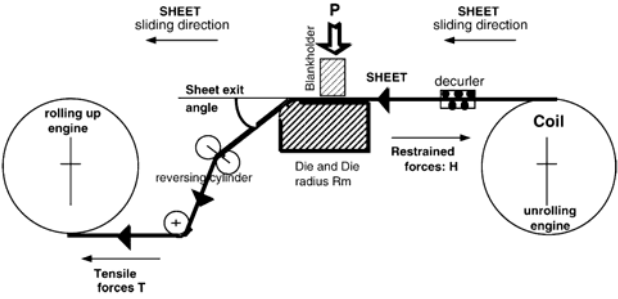
<p>Simulador lineal de Leonard. Fleje plano, tipo In-Let. (Kosanov et al., 2006)</p>	
<p>Simulador de Azushima (BUT) (Azushima & Sakuramoto, 2006)</p>	
<p>Simulador de embutición profunda (Bay et al., 2008)</p>	
<p>Estiramiento con reducción de sección. (J. L. Andreasen, Bay, Andersen, Christensen, & Bjerrum, 1997)</p>	

Tabla 4. 1(Continuación) Diferentes tipos de simuladores descritos

<p>Simulador de Wilson Saha's Thesis</p>	
<p>Simulador de Kong y Wagoner (BUT)(kong, Wang, & WAGONER)</p>	
<p>Simulador de Boher (Boher et al., 2005)</p>	

4.3 Ecuaciones utilizadas para calcular el coeficiente de rozamiento.

De acuerdo con la morfología de los diferentes simuladores (Vallance & Matlock, 1992), algunas se han reescrito utilizando como dato el diámetro y el espesor de la probeta, Tabla 4. 2 :

Tabla 4. 2 Ecuaciones para determinar el coeficiente de rozamiento

Nº	Nombre/Descripción	Ecuación	μ
1	ECUACIÓN DE LA POLEA: Equilibrio incremental de fuerzas en el deslizamiento sobre rodillo fijo.	$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2}{F_1}$	0,210
2	ENSAYO DE TRACCIÓN SOBRE FLEJE(Duncan) Fleje contra dos rodillos fijos para simular el extremo del punzón; sigue el mismo principio de la polea; ángulo de abrazamiento/flexión 90°	$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2}{F_1}$	0,210
3	FLEXIÓN BAJO TRACCIÓN (BUT) Fox Equilibrio incremental de fuerzas en el deslizamiento sobre rodillo fijo. Ignora el espesor de la lámina, ángulo variable Θ.	$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	0,160
4	FLEXIÓN BAJO TRACCIÓN (BUT) Fox Equilibrio incremental de fuerzas en el deslizamiento sobre rodillos fijos o giratorios. Incluye el espesor de la lámina, ángulo variable Θ.	$\mu = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{r + 0,5 \cdot y}{r} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1} = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{D + y}{D} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	0,165
5	FLEXIÓN BAJO TRACCIÓN (BUT) Sulonen Equilibrio incremental de energías en el deslizamiento sobre rodillos fijos o giratorios. Incluye el espesor de la lámina, ángulo π/2	$\mu = \frac{2}{\pi} \left[\frac{r + 0,5 \cdot y}{r} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	0,165
6	FLEXIÓN BAJO TRACCIÓN (BUT) Wilson Capstan. Equilibrio de fuerzas	$\mu = \frac{2}{\Theta} \left[\frac{F_2 - F_1 - F_B}{F_2 + F_1} \right]$	0,152
7	Simulador de embutición (Nine) Equilibrio incremental de fuerzas, cuatro flexiones de 90°	$\mu = \frac{1}{\pi} \left[\frac{D_{d+f} - D_d}{C_{d+f}} \right]$	

F_2 Fuerza de tracción, rodillo fijo(o libre) (11,34kN)

F_1 Fuerza de retención, rodillo fijo(o libre) (8,16kN)

F_B	Fuerza de retención, rodillo libre (0,85kN)
Θ	Ángulo de abrazamiento/flexión (90°)
D_{d+f}	Fuerza de tracción en embutición con los rodillos fijos
D_d	Fuerza de tracción en embutición con los rodillos libres
C_{d+f}	Fuerza de bloqueo de la herramienta.
y	Espesor de la lámina
D	Diámetro de la herramienta. $r=D/2$

4.4 Avances en medición electrónica y óptica:

Los procedimientos habituales de medición son los transductores de fuerzas, los transductores de desplazamiento (absolutos o incrementales) y los transductores de deformación. La adquisición de información se realiza mediante dispositivos tales como tarjetas National Instruments o dispositivos de HBM. A estos se ha de añadir la posibilidad de utilizar cámaras de alta velocidad con programas de gestión adecuados.

Los programas de medición habituales gestionan el conjunto de tarjetas y elementos de medida, que en algunos casos controlan los accionamientos, y suministran ficheros ASCII o Excel de los resultados. En los dispositivos de última generación no es necesario disponer de un ordenador para la medida, sistemas con alto grado de integración incorporan ordenadores en muy poco espacio.

La frecuencia de muestreo dependerá de la velocidad de la deformación y la rapidez con que cambia la, para ensayos rápidos suele ser de 300 Hz, y para ensayos en que la deformación dura varios segundos puede recomendarse bajar a 50Hz si se quiere trabajar con archivos de unos cientos de líneas..

Sefton (Sefton, 2000) ha desarrollado transductores para el rozamiento, basados en galgas extensométricas. Tieu (2004) (Tieu & Liu, 2004) Jeswiet (Jeswiet, 1998) han aplicado un procedimiento parecido a rodillos de laminación de aluminio. Esta línea puede ser útil, no solo para obtener medidas directas, sino para validar los modelos de rozamiento que se desarrollen.

Es posible medir con precisión los pares que realizan los servomotores con el propio software de control. En el caso de Boher (Boher et al., 2005) , la medición se realiza sobre el consumo de los motores.

Así mismo, se ha dado un desarrollo importante en los procedimientos para medir y caracterizar las topografías por procedimientos ópticos. Avances que habrán de ser utilizados, cuando estén disponibles

4.5 Conclusiones .La medida del rozamiento.

Se ha buscado en la bibliografía la reseña de los diferentes simuladores, de artículos de los últimos 15 años.

Algunos de los simuladores son consecuencia de ensayos de formabilidad de los materiales, y que se han utilizado con fines tribológicos (como el LDH), o bien como el Azushima de flexión bajo tracción, que es una evolución del ensayo.

Ninguno de los encontrados simula para todas las partes críticas de una pieza estampada:

Autores como Kim (Hyunok Kim et al., 2009; H. Kim et al., 2008; Hyunok Kim et al., 2007), utiliza varios simuladores en sus estudios, en función de la parte de la pieza a caracterizar.

Las dos zonas más críticas de una pieza son las que soportan los mayores rozamientos, los bordes redondeados de punzón y matriz, por lo que un simulador del tipo Wilson parece una buena solución. Sin embargo la zona de la cama, donde la brida ejerce una gran presión, no puede simularse con este procedimiento.

En el simulador del tipo Wilson los actuadores son capaces de mover en ambos sentidos, controlando el estiramiento del material. La rueda, que simula los acuerdos de punzón y matriz, puede girar en ambos sentidos, o estar bloqueada; permitiendo, al variar la velocidad de rotación y así modificar las condiciones de velocidad relativa.

Ninguno de los simuladores encontrados aporta solución simultánea para todas las partes de la pieza estampada.

Los procedimientos de caracterización y medición topográfica 3D habrán de ser tenidos en cuenta.

Parece necesario incidir en la utilización de sensores capaces de medir el rozamiento en pequeñas superficies (Sefton, 2000).

Algunos autores han utilizados films sensibles a la presión, que permiten establecer unas coordenadas iniciales sobre distribuciones de presión (X. Z. Wang & Masood, 2011).

II. Materiales y Métodos

Capítulo 5

Comportamiento de la lámina deformada

Resumen:

Se desarrollan el conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de la lámina frente al rozamiento, declarando un modelo que posteriormente será la referencia del ensayo de conformado.

5 Comportamiento de la lámina deformada.

Se pretende utilizar un simulador de rozamiento equivalente al diseñado por Wilson (Wilson & Sheu, 1988b), y utilizado posteriormente por Fratini (Fratini et al., 2006), Wihlborg (Wihlborg & Gunnarsson, 2000) y Wiklund (Daniel Wiklund et al., 2008; D. Wiklund et al., 2009); y que permita evaluar el rozamiento de en una zona de tamaño determinada, para diferentes condiciones tales como, presión de contacto, lubricante, materiales (lámina y herramienta) y velocidad de desplazamiento.

Se van a plantear ecuaciones que describan la deformación relacionada con el rozamiento para cada posición, así como el porcentaje de superficie en contacto calculada. En todo este documento se acepta que las condiciones de lubricación son básicamente de capa límite.

5.1.1 El rozamiento en el proceso.

5.1.2 El proceso de estampación y el rozamiento.

El proceso de conformado por estampación se caracteriza por producir la forma deseada, en tres dimensiones, a partir de una lámina delgada.

Elementos de la estampación:

Pieza: lámina delgada con capacidad de deformación plástica suficiente.

Punzón: elemento de dureza y rigidez suficientes que se desplaza contra la pieza, teniendo rugosidad determinada.

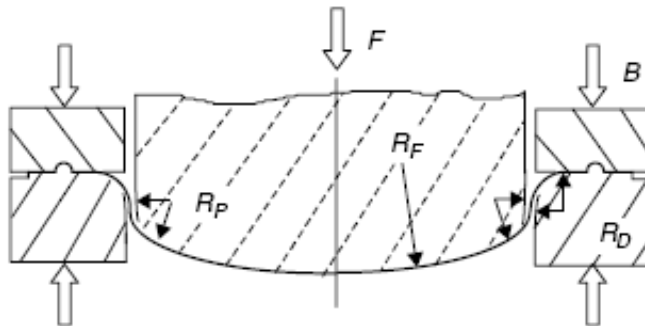
Elemento de sujeción: Elemento que impide el movimiento de los bordes de la pieza, suele denominarse cama (bed). El prensa-chapas genera la presión que crea el rozamiento

Matriz: Elemento de resistencia, dureza y rigidez suficiente que mantiene el borde fijado y direcciona la deformación de la pieza, siendo característica su rugosidad.

Estampación: En el conformado por estampación, el punzón baja contra la lámina sujeta por las mordazas o bridas y la matriz.

Estos elementos se corresponden con el esquema mostrado en la Figura 5.1.

El conjunto de ideas que se exponen a continuación se han tomado de autores tales como (Marciniak, Duncan, & Hu, 2002b), (W. F. HOSFORD, 2011)



Fuente: Marciniak,2002

Figura 5. 1 Acciones en la estampación

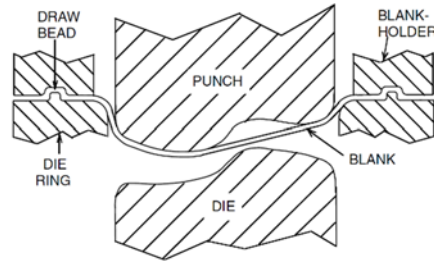
La lámina es presionada por una herramienta convexa, como se esquematiza en Figura 5. 1 . Para la mayor parte del de la lámina, el contacto se hace solamente por una de las caras.

La fuerza exterior F genera el movimiento.

El rozamiento, que produce el arrastre o retención, controla la deformación de las zonas con presión entre hoja y herramienta

Parámetros para controlar el rozamiento:

- Rugosidad de las superficies.
- El lubricante
- La química de las superficies
- La velocidad relativa de deslizamiento
- La temperatura
- La velocidad de conformado

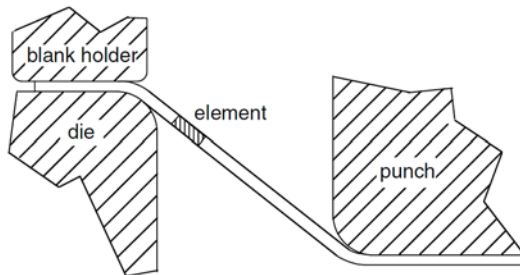


Fuente:(W. F. HOSFORD, 2011)

Figura 5. 2 Elementos de la estampación

En el sistema de estampación, existe un juego entre el anillo de la matriz y el punzón, de modo que el espesor de la lámina es inferior a este, Figura 5. 2 .

De lo anterior deducimos que no existe una compresión bilateral de la lámina más que en la zona de la cama. En el resto de la superficie está en contacto solamente por una de las caras.



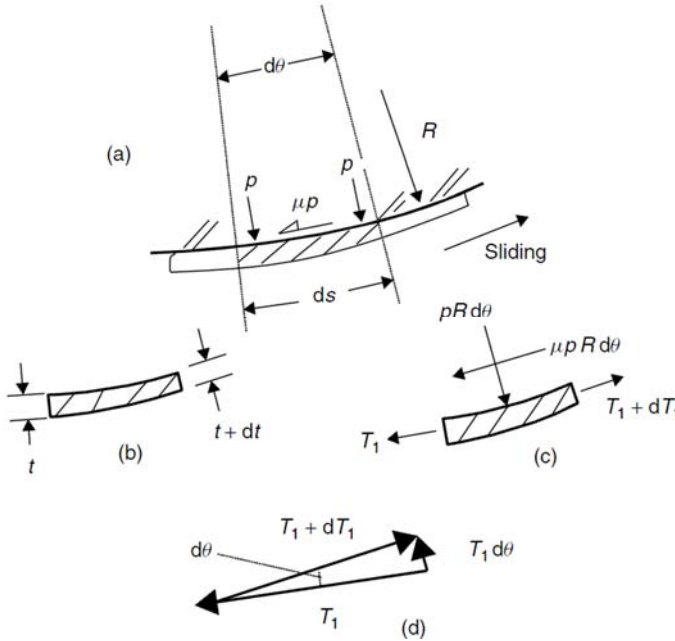
Fuente W. Hosford

Figura 5. 3 Lámina en el proceso de estampación

La lámina se deforma en tres formas diferentes, Figura 5. 3 . La zona en contacto con el sistema de sujeción no se deforma libremente, por estar sometida a un rozamiento importante en ambas caras. Las zonas en contacto con los radios reciben la fuerza de empuje y el rozamiento por una de sus caras. El resto de la lámina se deforma libremente.

En este análisis se consideró que la lámina es delgada respecto al resto de dimensiones, para elementos estructurales de un automóvil 1 a 2 mm, y si son de carrocería exterior, alrededor de 0,7 a 0,55mm. Por lo que en primera instancia vamos a aceptar que el estado tensional puede ser mono o biaxial, y el estado de deformación puede ser el de deformación plana (para las zonas en contacto con los bordes), o deformación biaxial; más adelante se justifica esta decisión.

Inicialmente se ha considerado el análisis del equilibrio de correas, y utilizando la Figura 5. 4 , tomada del libro de Marciniak (Z. Marciniak, 2002):



Fuente:(Z. Marciniak, 2002)

Figura 5. 4 Modelo de fricción de la lámina contra la herramienta

Las ecuaciones resultantes son:

$$p = \frac{T}{R.W} \quad a) \quad \text{y} \quad \mu = \frac{\left(\ln \frac{T_2}{T_1} \right)}{\Theta} \quad b) \quad \text{o} \quad \frac{T_2}{T_1} = e^{\mu\Theta} \quad c) \quad \text{Ecuación 5. 1}$$

La Ecuación 5. 1 a) nos indica que la presión de contacto entre lámina y matriz (indeformable) en un punto, es proporcional la Tensión (T) que soporta dividida por el radio (R) y el ancho de la lámina (W), la Ecuación 5. 1 b) y c), en sus dos formas nos indica el valor de las tensiones entre dos puntos separados por un ángulo de abrazamiento Θ y μ coeficiente de rozamiento promedio (constante).

Por otra parte, la fuerza de arrastre específica que hace que la chapa se estire es el producto de la fuerza unitaria normal por el coeficiente de rozamiento local (que en este modelo es constante), que podemos expresar como: $\tau = p \cdot \mu$.

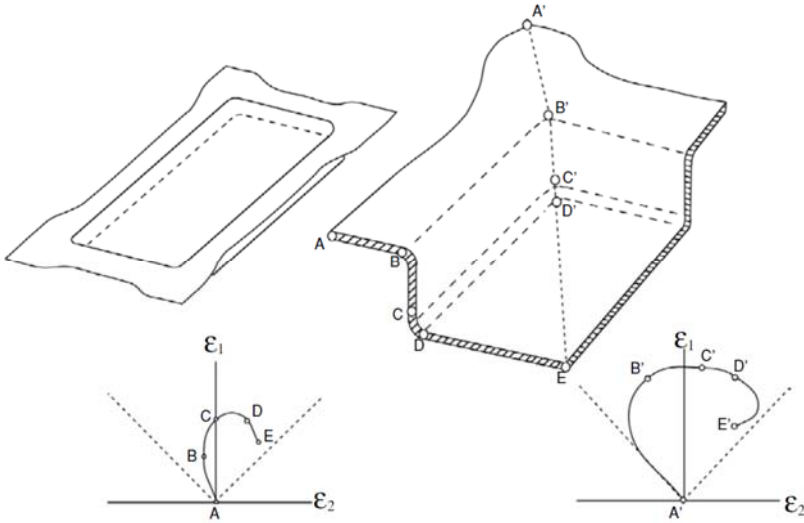
El ejemplo del Libro de Marciniak (Z. Marciniak, 2002), de la página 56, se puede ver que para una tensión de tracción de 338 MPa, se produce una presión de arrastre de 32 MPa. Esta diferencia entre los valores de presión y tensiones de deformación se mantiene en todos los puntos de la pieza. Se acepta que, el valor de la presión contra el radio, no se tiene en cuenta a efecto de producir deformaciones superficiales.

Dado que el coeficiente de rozamiento genera la fuerza de arrastre que determina la deformación, es importante conocer con la mayor exactitud su valor, y así poder controlarla.

En caso de que el valor de μ sea excesivo, puede dar lugar al desgarro de la pieza (tearing), y en caso de que sea insuficiente, puede dar lugar al arrugado de la zona de apriete (wrinkling) (Narayanasamy & Loganathan, 2007).

Algunos autores han dado valores del rozamiento generalizados, basados en la viscosidad (Kosanov et al., 2006), o añadiendo un factor basado un valor promediado de la rugosidad (Lee et al., 2002), pero son muchas las variables en juego, por lo que se deberían caracterizar de forma particular para cada tipo de material. Por otro lado, no cesan de aparecer nuevos materiales y lubricantes. Esperar a disponer de teoría unificada puede no ser la mejor solución en muchos casos.

Tomado de Hosford (W. F. HOSFORD, 2011), en la Figura 5.5 se presentan gráficos para explicar el comportamiento de la lámina en su deformación. El gráfico superior indica los puntos sometidos a deformación durante el conformado. Cada punto queda definido por las coordenadas (ϵ_1, ϵ_2) . Los dos gráficos inferiores son una representación biaxial del estado de deformación de diferentes puntos. Si los puntos se corresponden con un único plano de corte, el lugar geométrico constituye la trayectoria de deformación (strain path), si es de un solo punto se denomina firma de deformación (strain signature).



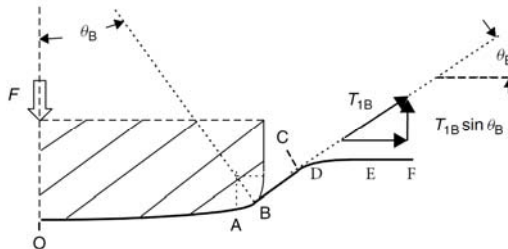
Fuente:(W. F. HOSFORD, 2011)

Figura 5. 5 Estado de deformación.

Para el caso de una placa rectangular estampada, asumiendo que la variación de espesor es muy pequeña comparada con el cambio en las otras dimensiones, la deformación se caracteriza por $\epsilon_3=0$, ϵ_1 y ϵ_2 las deformaciones en las dos direcciones principales para un punto. Denominando a $\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$, el valor β oscila entre :

$\beta=1$ para tracción biaxial y $\beta=-2$ para compresión monoaxial.

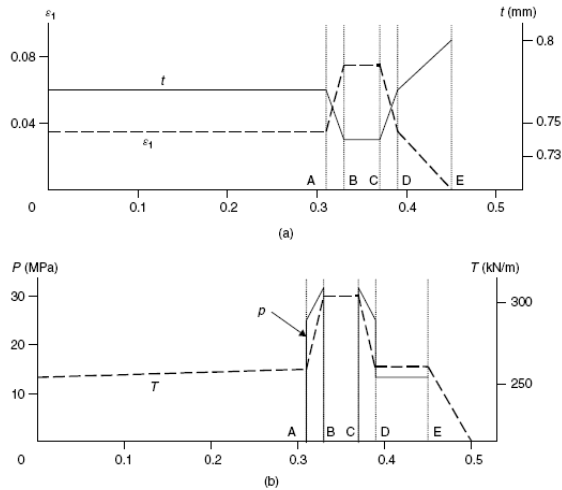
Las zonas en contacto con los bordes de la herramienta se caracterizan por tener deformación plana ($\beta =0$), si se utiliza el modelo desarrollado por Ducan en (Z. Marciniak, 2002): Las Figura 5. 6 y Figura 5. 7 indica los diferentes tramos de una pieza estampada.



Fuente:(Z. Marciniak, 2002)

Figura 5. 6 Parte de la lámina traccionada

A-B, Figura 5. 6 y Figura 5. 7, es la zona del radio de borde del punzón. C-D es la zona del radio de la matriz DE es la zona recta y si presión. E-F zona de presión del prensa-chapas



Fuente: (Z. Marciniak, 2002)

Figura 5. 7 Estados de fuerza, espesor, deformación y presión de la lámina

En la Figura 5. 7 T es la fuerza por unidad de ancho (N/mm), t es el espesor (mm), ϵ_1 es la deformación relativa en la dirección del plano de corte y p es la presión promedio en MPa en las zonas curvas en contacto con la lámina.

Se aprecia que las zonas con radio, el cambio de presión es muy grande, son las zonas con fuerte Rozamiento.

5.1.3 Coeficiente de rozamiento y presión de contacto.

El modelo matemático de simulador de rozamiento de flexión bajo tracción, mostrado en la Figura 5. 8, combina la ecuación de equilibrio con el modelo de rozamiento de Wilson (P. K. Saha et al., 1996). Se busca determinar el rozamiento, velocidad de deformación, y deformación en la entrecara entre el fleje y el cilindro-herramienta. El modelo, teórico, se centra en la condición de “estado estacionario”, donde la rugosidad del fleje y la geometría del micro contacto en una posición particular en la entrecara no cambian a lo largo del tiempo.

5.1.3.1 Coeficiente de rozamiento y presión de contacto.

Los datos de ensayos del equipo de medida pueden ser utilizados para estimar los valores promedios de la presión de la entrecara p , el coeficiente de rozamiento promedio

μ , la velocidad de deformación relativa $\dot{\epsilon}$ y la deformación relativa global en contacto $\Delta\epsilon$.

Estas variables promedio o globales pueden utilizarse para la comparación inicial con el modelo teórico. La Figura 4. 8 muestra diversas variables medias, utilizadas para calcular variables promediadas o globales.

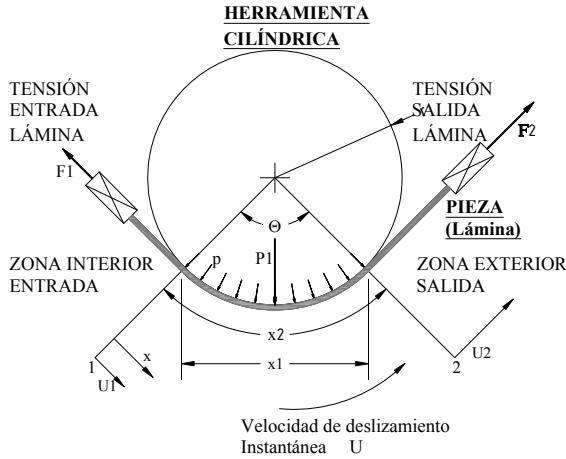


Figura 5. 8 Variables del ensayo

Considerando la condición general de equilibrio, para la pieza en contacto con la herramienta, tenemos para el eje vertical, con $F_2 > F_1$:

$$(F_1 + F_2) \operatorname{sen} \frac{\Theta}{2} = P_1 \tag{Ecuación 5. 2}$$

P_1 es el producto de la presión media por el área proyectada sobre el plano horizontal de la superficie de contacto $P_1 = p \cdot x_1 \cdot W$. (Considerando la presión uniforme)

Se asume que la presión es uniforme en la zona de contacto, y tiene un valor promediado p . La fuerza de rozamiento produce un esfuerzo de cortadura a nivel de la superficie de contacto, que denominaremos τ_f , y que se relaciona con la presión media. Considerando la superficie real de la zona de contacto, la fuerza resultante puede escribirse como el par: $(F_2 - F_1) \cdot r = (\tau_f \cdot x_2 \cdot W) \cdot r$

$$F_2 - F_1 = \tau_f \cdot x_2 \cdot W \tag{Ecuación 5. 3}$$

El cálculo de la superficie horizontal proyectada se hace con el valor x_1 , que por geometría será $x_1 = 2.r.\text{sen}\frac{\Theta}{2}$, quedando:

$$P_1 = p \left(2.r.\text{sen}\frac{\Theta}{2} \right) W \quad \text{Ecuación 5. 4}$$

Combinando ecuaciones se obtiene la presión promedio p , y despejando posteriormente:

$$p = \frac{F_1 + F_2}{2rW} \quad \text{Ecuación 5. 5}$$

$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\Theta(F_1 + F_2)} \quad \text{Ecuación 5. 6}$$

Donde r es el radio del cilindro-herramienta, W es el ancho de la probeta, Θ es el ángulo de contacto, F_1 y F_2 son las fuerzas la tracción en las zonas interior y exterior respectivamente. El coeficiente μ anterior difiere del valor obtenido por teoría de bandas y correas, y que se detalla a continuación Figura 5. 9.

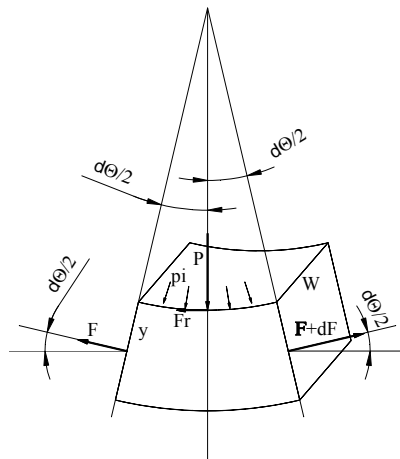


Figura 5. 9 Modelo de la banda con coeficiente constante

Ecuaciones tradicionales de correas:

La presión en un cualquier punto dependerá la fuerza aplicada

$$p_i = \frac{F}{r \cdot W} \quad \text{Ecuación 5. 7}$$

El coeficiente de rozamiento obtenido;

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{F_2}{F_1}\right)}{\Theta} \quad \text{Ecuación 5. 8}$$

Wihlborg (Jonasson, Wihlborg, & Gunnarsson, 1998; Wihlborg & Gunnarsson, 2000) da los siguientes valores:

$$\mu = \frac{r + \frac{y_1}{2} \left(\ln \frac{F_2 - F_{BUB}}{F_1} \right)}{r \Theta} \quad \text{Ecuación 5. 9}$$

De la geometría se deduce:

F_1 = Tensión entrada

F_2 = Tensión salida

F_{BUB} = Fuerza de curvado y enderezado.

p = Presión de contacto promedio con $p = \frac{F_1 + F_2}{2rW}$

p_i = Presión en un punto i

P_1 = Resultante vertical de la presión aplicada

U_1 = Velocidad interior de la pieza sin recubrimiento

U_2 = Velocidad exterior de la pieza sin recubrimiento

W = Ancho de la pieza

x = Longitud de la zona de contacto interior

x_2 = longitud de contacto

r = Radio de la herramienta

Θ = Ángulo de contacto

y_1 = Espesor de la pieza a la entrada

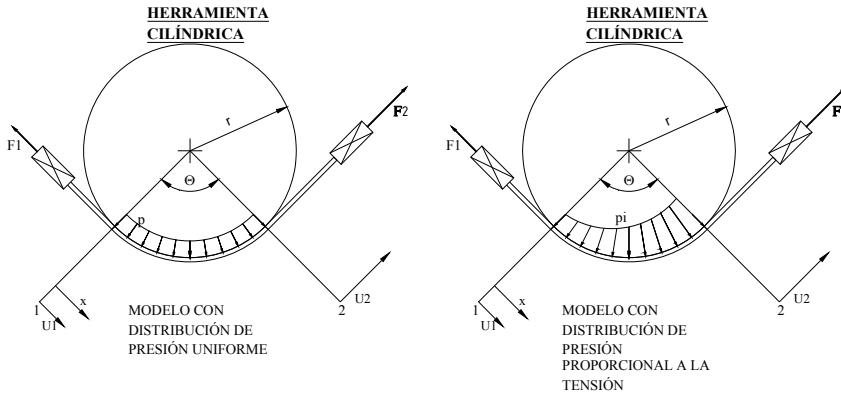


Figura 5. 10 Modelos de distribución de presión

Sin embargo, para este caso las diferencias son despreciables (Shih & Wilson, 1999),(Y. S. Kim et al., 2012) y la Ecuación 5. 6 se acepta por su uniformidad y facilidad de computación, dado que todo este desarrollo presupone que el coeficiente de rozamiento es igual para toda la zona de contacto.

El parámetro μ dependerá del régimen y las condiciones de lubricación, y de la presión media relativa, disminuyendo, como ha demostrado Azushima en algunos casos (Azushima & Sakuramoto, 2006).

Sin embargo estos modelos simplificados no pueden describir con rotundidad el coeficiente de rozamiento, algunos autores han demostrado que para el ángulo de contacto aparente de 90° la zona de contacto real es de alrededor de 70° . (Coubrough et al., 2002), (Y. S. Kim et al., 2012),(Pereira et al., 2008), y especialmente (X. Z. Wang & Masood, 2011) y los trabajos sobre el desgaste medido de (Le Roux et al., 2012).

5.2 El régimen de lubricación y modelo de rozamiento.

Parece aceptado que el modelo de rozamiento en conformado de láminas por estampación, está básicamente entre el régimen mixto y el régimen de capa límite, con un porcentaje de rozamiento en capa límite y otro en condiciones hidrodinámicas, representado por la siguiente ecuación de equilibrio de presiones:

$$p = A p_a + (1 - A) p_h \tag{Ecuación 5. 10}$$

(Carcel, Palomares, Rodilla, & Puig, 2005) en donde p es la presión aparente, y que está compuesta por la presión debida al contacto de las asperezas (p_a) y la presión debida a la acción hidrodinámica, que se limita a la zona de los valles llenos de lubricante (p_h)

(caso de lubricación mixta), siendo A la fracción de área en contacto con real de las asperezas.

Operando: $p = Ap_a + (1-A)p_h = p_h + A(p_a - p_h) = p_h + AHk$, llegando a que el control de la deformación de las asperezas se debe al p_a (determinada por el aplanamiento de las asperezas) y p_h (determinada por el régimen hidrodinámico)

El modelo anterior no puede ser evaluado exactamente midiendo la rugosidad, dado que al entrar en contacto parte de las superficies, las crestas se deforman, cambiando sustancialmente la topografía.

Si se considera que cada efecto aporta su propia tensión de cizalladura, que evaluada sobre la superficie total o aparente:

$$\tau = A\tau_a + A\tau_p + (1 - A)\tau_h \quad \text{Ecuación 5. 11}$$

tensiones que se rigen por leyes muy diferentes, el subíndice p hace referencia al caso de que haya arado de la superficie (Hsu & Yang, 2001).

p es la presión aparente y que está compuesta por la

p_a presión debida al contacto de las asperezas

p_h la presión debida a la acción hidrodinámica, que se limita a la zona de los valles llenos de lubricante

A la fracción de área en contacto con real de las asperezas .donde

$\tau_a = c.k$:es la tensión debida a la adherencia.

c : coeficiente de adherencia;

k : resistencia a cizalladura del material)

$\tau_p = \theta.k.H$:es las tensión correspondiente al labrado (ploughing) de las superficies

θ : ángulo promedio inicial de las asperezas (geometría triangular)

H : módulo de endurecimiento efectivo (adimensional)

$\tau_h = \phi_f \eta \frac{dU}{dh_i}$:es la tensión debida al efecto hidrodinámico

En el modelo de Wilson, para herramientas lisas, inicialmente y como modelo simplificado no se tiene en cuenta más que la adhesión según Bowden, y no incluye el efecto del labrado, quedando la siguiente ecuación:

$$\tau = A\tau_a + (1 - A)\tau_h \quad \text{Ecuación 5. 12}$$

5.3 Régimen hidrodinámico.

El análisis que sigue está basado en varios autores (Hamrock & D.Dowson, 1981) (Darendeliler et al., 2002), :

5.3.1 Condición de régimen hidrodinámico de película gruesa $h \geq 10\sigma$

$$\phi_f = 1 \text{ y } \tau_h = \phi_f \eta \frac{dU}{dh_t} \quad \text{Ecuación 5. 13}$$

5.3.2 Condición de régimen hidrodinámico de película fina $10\sigma \geq h \geq 3\sigma$

El sistema puede estar en régimen de lubricación hidrodinámica, y para tener en cuenta el efecto de las asperezas:

$$\phi_f = \frac{35}{32} z \left[(1-z^2)^3 \ln\left(\frac{z+1}{z-1}\right) + \frac{z}{15} (66 + z^2 (30z^2 - 80)) \right];$$

$$z = \frac{h}{3\sigma}; \sigma = \sqrt{R_{q\text{ tool}}^2 + R_{q\text{ pieza}}^2}; \tau_h = \phi_f \eta \frac{dU}{dh_t} \quad \text{Ecuación 5. 14}$$

Siendo h el espesor nominal, o separación entre los planos medios de dos superficies indeformadas y h_t el espesor promedio de lubricante, definido como el volumen de lubricante dividido por el área aparente.

La distribución de la rugosidad eficaz R_q se obtiene de integrar la función de densidad $f(h)$ para un espesor de capa h determinado sobre el plano medio:

$$f(h) = \frac{35}{96R_q} \left[1 - \frac{1}{9} \left(\frac{h}{R_q} \right)^2 \right]^3 \quad \text{Ecuación 5. 15}$$

La relación entre los dos espesores se encuentra con la siguiente ecuación:

$$\frac{h_t}{R_q} = \frac{3}{256} \left[35 + z \left(128 + z \left(140 + z^2 \left(-70 + z^2 (28 - 5z^2) \right) \right) \right) \right] \quad \text{Ecuación 5. 16}$$

5.3.3 Régimen hidrodinámico o de capa límite $h \leq 3\sigma$

$$H_a = \frac{2}{f_1(A)\bar{E} + f_2(A)}; \bar{E} = \frac{\dot{\epsilon}l}{\theta_i V_r}; A = \frac{(16 - 35z + 35z^3 - 21z^5 + 5z^7)}{32} \quad \text{Ecuación 5. 17}$$

θ_i ángulo medio de rugosidad de la herramienta (5 a 15°).

V_r Suma de velocidades de deformación de las asperezas (o velocidad de deslizamiento.)

5.3.3.1 Si $p_a > 0$, entonces se da lugar a lubricación mixta;

Lubricación hidrodinámica + lubricación de capa límite, dependiendo de la presión promedio p_a de la entrecara lámina-herramienta, que se calcula del siguiente modo:

$$p_a = p - A.H_a.k \quad \text{Ecuación 5. 18}$$

El rozamiento está conformado por la acción de la adhesión y labrado de las asperezas, y el efecto hidrodinámico del lubricante superficial, siendo la ecuación completa:

$$\tau = A.\tau_a + A.\tau_p + (1 - A)\tau_h \quad \text{Ecuación 5. 19}$$

los valores son: $\tau_a = c.k$ y $\tau_p = \theta.k.H_a$

Y para la parte hidrodinámica: $\tau_h = \phi_f \eta \frac{dU}{dh}$, donde se ha de modificar el factor:

$$\phi_f = \frac{35}{32} z \left[\frac{(1 - z^2)^3 \ln(300(z + 1)) + \frac{1}{60} (-55 + z(132 + z(345 + z(-160 + z(-405 + z(60 + 147z))))))}{1} \right]$$

5.3.3.2 Si $p_a \leq 0$, entonces se da lugar a lubricación de capa límite

La presión debida al lubricante se considerará $p_h = 0$, en estas condiciones la fracción de superficie A se calcula con:

$$H = \frac{2}{f_1(A)\bar{E} + f_2(A)} \quad \text{Ecuación 5. 20}$$

y con $\tau = A.\tau_a + A.\tau_p$, los valores son: $\tau_a = c.k$ y $\tau_p = \theta.k.H_a$

Por otra parte, de Hamrock y Dowson (Hamrock & D.Dowson, 1981), podemos estimar el espesor mínimo de la película de lubricante

$$h_t = 3,63.R \left(\frac{U.\eta_0}{E'.R'} \right)^{0,68} (\alpha E')^{0,49} \left(\frac{T}{E'.R'} \right)^{-0,073} (1 - e^{-0,68k}) \quad \text{Ecuación 5. 21}$$

h_t Mínimo espesor del film (m)

$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_T} + \frac{1}{R_W}$ R' es el radio de curvatura reducido a partir de herramienta y pieza

$U = \frac{U_T + U_W}{2}$ Velocidad superficial relativa (m/s)

η_0 Viscosidad dinámica del lubricante (Pa.s) a presión atmosférica

$E' = \frac{2}{\frac{(1-\nu_T^2)}{E_T} + \frac{(1-\nu_W^2)}{E_W}}$ Módulo elástico reducido (Pa), obtenido a partir de los E y ν de los elementos

$\alpha = (0,6 + 0,065 \log_{10} \eta_0) 10^{-8}$ (m²/N) coeficiente presión-viscosidad.

T (N) es la carga total que actúa sobre la zona de contacto

$k = a/b$, es el factor de elipticidad (tomaremos valor 1)

Esta ecuación puede reescribirse del siguiente modo:

$$h_t = \frac{1,6\alpha^{0,6} (U.\eta_0)^{0,7} (E')^{0,03} (R')^{0,43}}{w^{0,13}} \quad \text{Ecuación 5. 22}$$

w es la carga por unidad de longitud = $2.W.p$

5.4 Variables del sistema de medida. Velocidad de deformación relativa y Deformación relativa en el punto de contacto.

Se ha detallado un modelo de comportamiento basado en el equilibrio de fuerzas, sin embargo se trata de deformar una lámina que se está moviendo, por lo cual se han de incorporar al modelo: desplazamiento, velocidad y deformación. Y estas variables se relacionan con el SFBT, Ecuación 5. 11 .

De las salidas de los encoders determinamos las velocidades de entrada y de salida U_1 y U_2 , en un intervalo de tiempo, como razón del cambio de posición respecto del tiempo, Ecuación 5. 23 .

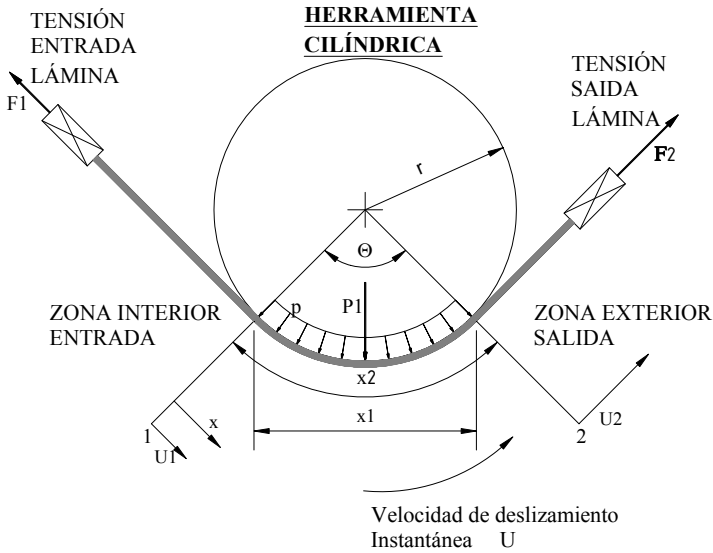


Figura 5. 11 Variables del sistema

$$U_i = \frac{x_i^2 - x_i^1}{\Delta t}$$

Ecuación 5. 23

Donde, x_i^2 es la posición final leída por el sensor i en el instante de contacto j , x_i^1 es la posición inicial leída por el sensor en el instante de contacto $j-1$ y Δt es el incremento de tiempo entre ambas lecturas.

Por cinemática, definimos el promedio de velocidad de deformación relativa local $\dot{\epsilon}$, Ecuación 5. 24.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{dx}{x_2} = \frac{dx}{dt} = \frac{Vel.media}{x_2} = \frac{U_2 - U_1}{x_2} = \frac{U_2 - U_1}{r \cdot \theta}$$

Ecuación 5. 24

La “deformación relativa en el contacto” es la función de distribución de deformación relativa en la región de contacto, y varía durante un ensayo tal como se muestra en la Figura 5. 12 siguiente.

Inicialmente existirá una pequeña deformación relativa inicial $\Delta\epsilon_0$ producida por la precarga antes del deslizamiento, que se ha demostrado necesaria para la estabilidad del ensayo (P. M. SAHA, 1993).

Conforme progresa el deslizamiento (consecuencia del estiramiento hacia el exterior del sistema) nuevo material entrará en contacto (entrando a la matriz), llegando a una distribución de deformaciones relativas tal como la mostrada en la Figura 5. 12 b). Finalmente el nuevo material toma contacto completamente en la zona de contacto, llevando a una distribución como la mostrada en la Figura 5. 12 c).

Para calcular la deformación relativa en contacto, supondremos que la velocidad cambia linealmente en la región de contacto, dada la continuidad del material, de modo que la velocidad local de contacto en el fleje U puede escribirse, Ecuación 5. 26.

$$U(x) = \frac{dx}{dt} = U_1 + \left[\frac{U_2 - U_1}{x_2} \right] x \tag{Ecuación 5. 25}$$

En donde x es el tramo de arco desde el punto de contacto inicial. La posición x_b es límite entre el material antiguo (que ha estado en contacto con la herramienta y ha sido modificado) y el nuevo material (material que entra en contacto con la herramienta durante la deformación plástica), para un instante t , se encuentra utilizando los valores iniciales $t=0, x=0$, dando en función del tiempo, Ecuación 5. 26.

$$x_b = x_2 \left[e^{\frac{t}{x_2}(U_2 - U_1)} - 1 \right] \left(\frac{U_2}{U_1} - 1 \right)^{-1} \tag{Ecuación 5. 26}$$

El tiempo requerido (t_s) para alcanzar el régimen estacionario, es el tiempo que tarda un punto en recorrer el arco a velocidad constante, Ecuación 5. 27.

$$t_s = \frac{x_2}{U_2 - U_1} \ln \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \tag{Ecuación 5. 27}$$

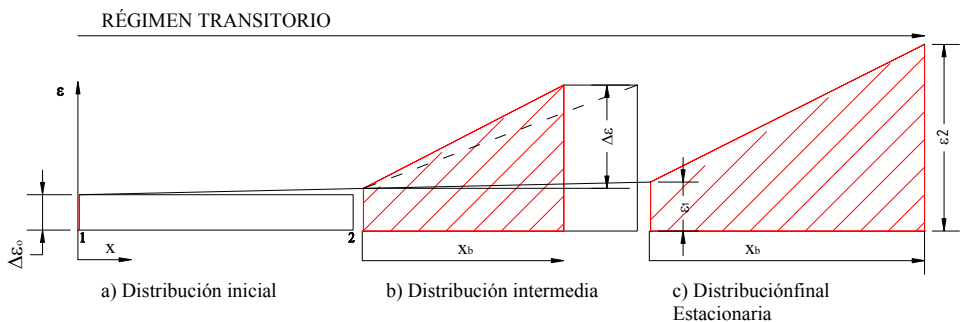


Figura 5. 12 Distribución de deformaciones relativas en el contacto

En nuestro experimento consideramos la velocidad de deformación relativa esencialmente constante (Shih & Wilson, 1999). Así, para el nuevo material entrando en contacto, la deformación relativa se da por la Ecuación 5. 28.

$$\Delta \varepsilon_{nuevo} = \dot{\varepsilon} \Delta t \quad \text{Ecuación 5. 28}$$

Donde Δt es el tiempo en contacto para esa porción de material, y operando las ecuaciones precedentes, Ecuación 5. 29.

$$\Delta t = \frac{x_2}{U_2 - U_1} \ln \left(\frac{U_1 x_2 + (U_2 - U_1) x}{x_2} \right) \quad \text{Ecuación 5. 29}$$

Para el material antiguo, el tiempo de contacto es simplemente $t < t_s$ de modo que la deformación relativa para el material antiguo $\Delta \varepsilon_{antiguo}$ viene dada aproximadamente por la Ecuación 5. 30.

$$\Delta \varepsilon_{antiguo} = \dot{\varepsilon} t + \Delta \varepsilon_0 \quad \text{Ecuación 5. 30}$$

Así, podemos calcular en cualquier posición y tiempo, integrar estas distribuciones y estimar el valor promedio de $\Delta \varepsilon$. En la condición de estado estacionario, la influencia de la deformación relativa inicial desaparece y el valor promedio de $\Delta \varepsilon$ viene dado aproximadamente por combinar las ecuaciones (para $x_2 = r \cdot \Theta$, arco de contacto), que presupone que hay una deformación que se inicia en el punto de entrada de material y finaliza en el de salida: $\dot{\varepsilon} = \frac{U_2 - U_1}{r \cdot \Theta}$ y $t = \frac{r \cdot \Theta}{U_2 - U_1} \ln \left(\frac{U_2}{U_1} \right)$; siendo la variación de deformación relativa media en el transcurso del contacto, el promedio Ecuación 5. 31.

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{2} \ln \frac{U_2}{U_1} \quad \text{Ecuación 5. 31}$$

5.5 Deformación plástica y rozamiento.

La flexión plástica tiende a amentar los coeficientes de rozamiento observados, Swift (1948) y Lovell (M. R. Lovell & Deng, 2002). Sin embargo Wilson et al (Hua-Chu & William, 1999), sugieren que dado que el aplanamiento de las asperezas aumenta (al igual que la superficie real de contacto), también lo hace la rugosidad, y además varían el coeficiente de modo diferente, siendo el coeficiente de rozamiento en condiciones de lubricación de capa límite una característica intrínseca del material. Para poder encontrar un coeficiente de rozamiento real, se considera que la diferencia de fuerzas entre F_2 y F_1 , necesarias para estirar y deslizar el fleje alrededor del cilindro, incorporan la

flexión alrededor de la rueda y el rozamiento por deslizamiento. La diferencia entre F_2 y F_1 viene dada por la Ecuación 5. 32:

$$F_2 - F_1 = F_B + F_F \tag{Ecuación 5. 32}$$

Donde F_B es la fuerza de flexión y enderezamiento y F_F es la fuerza de rozamiento.

De acuerdo con Swift (Hua-Chu & William, 1999) ,(Y. S. Kim, 2004), (Deng & Lovell, 2000), para determinar F_B se puede aplicar la Ecuación 5. 33.

$$\frac{F_B}{y_1 w} = \frac{\sigma_y y_1}{2r} \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) \tag{Ecuación 5. 33}$$

Donde σ_y es el límite elástico o de fluencia del fleje, y_1 es el espesor del fleje, w es el ancho del fleje, y r es el radio de curvatura. La razón $y_1/2r$ indica que F_B será una fracción significativa de la diferencia de cargas ($F_2 - F_1$), para el caso en que el fleje sea relativamente delgado y deslice sobre un radio pequeño.

Así, tomaremos este valor de fuerza de flexión calculada por la metodología de Swift y la introduciremos en la Ecuación 5. 6, resultado la relación para determinar los coeficientes de rozamiento, Ecuación 5. 34 , que es igual a las expresadas por Azushima (Azushima & Sakuramoto, 2006) y Shih (Shih & Wilson, 1999). En este proceso se acepta inicialmente que la flexión alrededor del radio está completamente en la zona lineal:

$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1 - F_B)}{\Theta(F_1 + F_2)} \tag{Ecuación 5. 34}$$

Ecuación que proporciona un valor del coeficiente de rozamiento.

Otra variante de esta ecuación, que utiliza la ley exponencial está disponible en la bibliografía consultada es la Ecuación 5. 35.

$$\mu = \frac{r + \frac{y_0}{2}}{r} \frac{\left(\ln \frac{F_2 - F_B}{F_1} \right)}{\Theta} = \frac{d + y_0}{d} \frac{\left(\ln \frac{F_2 - F_B}{F_1} \right)}{\Theta} \tag{Ecuación 5. 35}$$

5.6 Análisis de comportamiento en régimen Permanente. Herramienta lisa.

5.6.1 Análisis de comportamiento a velocidad constante. Régimen Permanente con ancho constante. Herramienta lisa.

Se van a estudiar la diferentes variables de tensión, deformación y desplazamiento que intervienen en le proceso.

El sistema se mueve a velocidad constante.

Se aceptará inicialmente que el fleje es suficientemente ancho para considerar una deformación plana. Se acepta que el volumen de material constante.

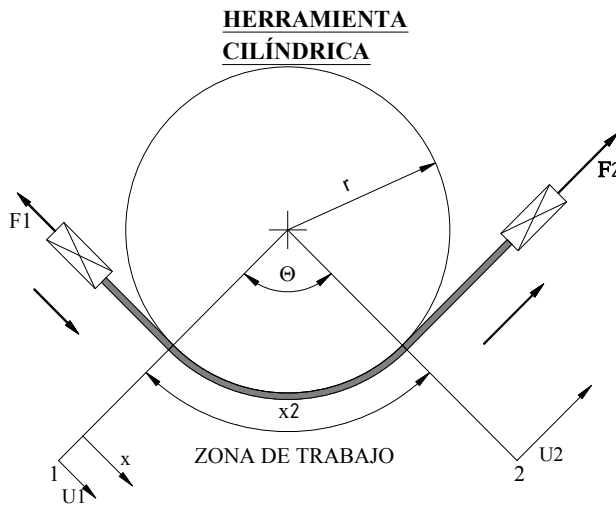


Figura 5. 13 Geomería del simulador de estampación

En condiciones de estabilidad, el volumen entrante es igual al saliente, por lo que el volumen por unidad de tiempo también lo es, por lo que para un ancho constante se pueden aceptar las relaciones de la Ecuación 5. 36:

$$U_1 y_1 = U_2 y_2 \rightarrow \frac{U}{U_1} = \frac{y_1}{y} \rightarrow y = \frac{U_1 y_1}{U} \tag{Ecuación 5. 36}$$

Donde U es la velocidad local (para una posición x intermedia) del fleje, e y es el espesor en esa coordenada, y los subíndices 1 y 2 indican las condiciones de entrada y salida respectivamente. Así, la deformación relativa circunferencial puede escribirse, como consecuencia de la suma de desplazamientos, Ecuación 5. 37.

$$\varepsilon = \ln \frac{U}{U_1} + \varepsilon_1 = \ln \frac{y_1}{y} + \varepsilon_1 \quad \text{Ecuación 5. 37}$$

Donde ε_1 en la deformación relativa a la entrada (inicial), y el otro término representa la variación durante la parte del arco de contacto considerada.

Aceptaremos (por su simplicidad) que el material se rige por la relación tensión–deformación uniaxial de Hollomon, utilizando la tensión y deformación equivalentes (siguiendo Von Mises). Esta ecuación se transforma para el caso de deformación plana (plane-strain) en la Ecuación 5. 38.

$$\bar{\sigma} = C \cdot \bar{\varepsilon}^n \rightarrow \sigma_{ps} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} C \right) \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{ps} \right)^n \quad \text{Ecuación 5. 38}$$

Y que permite hacer cálculos en el campo plástico con el solo dato de la deformación principal. Donde C es el coeficiente de resistencia y n el exponente de endurecimiento de deformación relativa

Para algunos materiales es muy adecuada la ecuación de Swift en el campo plástico, que tiene la siguiente forma, también en función de los parámetros equivalentes, Ecuación 5. 39 (Marciniak et al., 2002b),

$$\bar{\sigma} = C \cdot (\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \rightarrow \sigma_{ps} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} C \right) \cdot \left(\varepsilon_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{ps} \right)^n \quad \text{Ecuación 5. 39}$$

Si el fleje es relativamente delgado en comparación del el radio de la herramienta, el equilibrio circunferencial (y es espesor, w es ancho, τ_f es la carga de rozamiento en la entrecara) requiere que $d(\sigma y w) = \tau_f \cdot w \cdot dx$, donde σ es la tensión plana, operando se llega a la Ecuación 5. 40:

$$\frac{d(\sigma y)}{dx} = \tau_f \quad \text{Ecuación 5. 40}$$

Donde x es la distancia medida a lo largo de la entrecara desde la entrada en el interior y τ_f es la tensión local de rozamiento. Sustituyendo las relaciones antes indicadas y operando, se llega a la Ecuación 5. 41:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{\tau_f U^2 \left(\ln \left(\frac{U}{U_1} \right) + \varepsilon_1 \right)^{1-n}}{C y_1 U_1 \left(n - \ln \left(\frac{U}{U_1} \right) - \varepsilon_1 \right)} \quad \text{Ecuación 5. 41}$$

Siendo el caso de deformación plana se da que $\varepsilon_w=0$, y $\varepsilon_y=-\varepsilon_x$

La expresión de la deformación toma la siguiente forma, Ecuación 5. 42.

$$\frac{d(\varepsilon^n \cdot e^{\varepsilon^{1-\varepsilon}})}{dx} = \frac{\tau_f}{Cy_1} \tag{Ecuación 5. 42}$$

La Ecuación 5. 41 y la Ecuación 5. 42 habrán de ser integradas numéricamente.

El procedimiento de evaluación de las condiciones tribológicas tiene por objetivo obtener la diferencia de comportamiento de dos lubricante, por lo que no se va a desarrollar un modelo sobre el efecto de la rugosidad en las condiciones de desplazamiento.

5.6.2 Análisis de comportamiento a velocidad constante. Régimen Permanente con ancho variable. Herramienta lisa.

El anterior análisis representa la condición donde el ancho del fleje permanece constante durante el ensayo. En la práctica puede ocurrir algún estrechamiento. Podemos encontrar este efecto al considerar la solución para las condiciones de tensión plana. Esto introduce tres problemas:

1. La tensión–deformación relativa
2. Una reducción en el área donde actúa la fricción
3. Un cambio en el equilibrio debido a la inclinación de los vectores tensión.

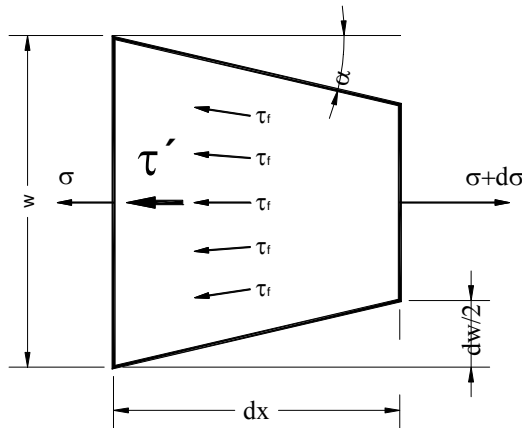


Figura 5. 14 Balance de fuerzas con cambio de ancho

Tomando el modelo de la Figura 5. 14 , y si se considera la equivalencia del desplazamiento con líneas de flujo, la tensión de cortadura τ_f se distribuye a ambos lados del eje horizontal, hasta una inclinación máxima α respecto al mismo eje.

Si discretizamos en trapecios simétricos respecto al eje central, Figura 5. 15 , que provengan de seccionar triángulos contiguos, con vértice en algún punto alejado L hacia la derecha. Cada triángulo tendrá el mismo vértice, con un ángulo de apertura de $d\alpha'$.

El seccionamiento se hace con dos verticales separadas por una distancia dx , que representan los extremos del tramo a analizar.

El elemento superficial es la diferencia entre el triángulo con extremo en la izquierda, y otro semejante que acaba en un punto dx más a la derecha:

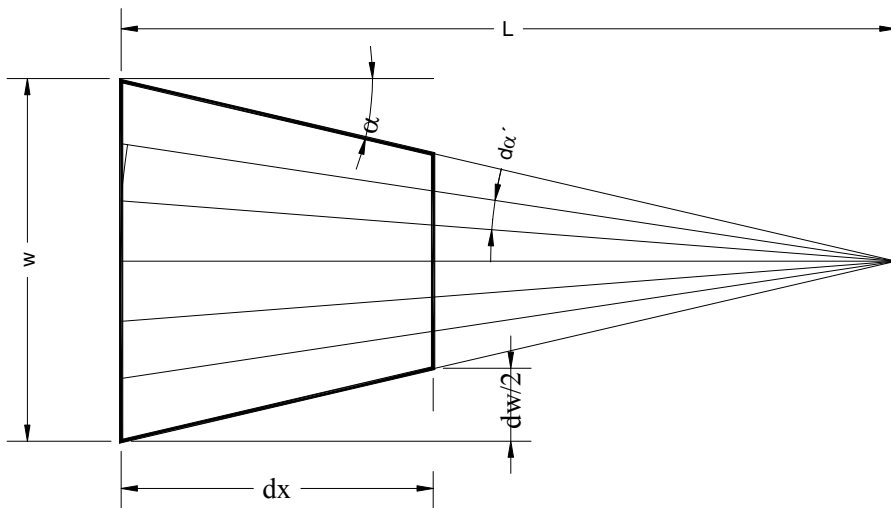


Figura 5. 15 Geometría de la lámina deformada

La superficie elemental diferencial es $dA = L.d\alpha'.dx$, τ_f es la tensión local de rozamiento sobre la superficie de contacto, y τ' es la tensión promedio que puede calcularse con la Ecuación 5. 43.

$$\tau' = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \tau_f \cdot \cos \alpha' \cdot d\alpha' = \tau_f \frac{\text{sen} \alpha}{\alpha} \quad \text{y} \quad \alpha = \text{arc tan} \left(\frac{dw}{2dx} \right) \quad \text{Ecuación 5. 43}$$

En el caso de elevadas deformaciones, se han medido estas, y los lados siguen una función lineal. A ambos lados se dan diferentes valores de deformación local ε_1 y ε_2 , y el ancho de la lámina es variable, siendo sus valores w_1 y w_2 . La ecuación de equilibrio de fuerzas $d(\sigma_y w) = \tau_f \cdot w \cdot dx$, ahora puede reescribirse del siguiente modo para un ancho

variable $d(\sigma y w) = \tau'_f (w_{medio}) dx = \tau_f \frac{\text{sen} \alpha}{\alpha} = (w - \frac{dw}{2}) dx$. El resultado queda como Ecuación 5. 44.

$$\frac{d(\sigma \cdot y \cdot w)}{dx} = \tau_f \frac{\text{sen} \alpha}{\alpha} \left(w - \frac{dw}{2} \right) \quad \text{Ecuación 5. 44}$$

En deformaciones pequeñas se ha aceptado la hipótesis de Bernoulli, que lleva al caso de deformación plana. Para grandes deformaciones, aparentemente no hay restricciones al alargamiento del fleje sobre la herramienta, por lo que se hace el supuesto de tracción simple, en donde aplicando las reglas del flujo plástico (Marciniak, Duncan, & Hu, 2002a), $\alpha=0 \rightarrow \beta=-1/2$ y la constancia de volumen lleva a que $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{1}{2} \varepsilon_1$ por

lo que a partir del conocimiento de la deformación longitudinal ε_1 pueden relacionarse el resto de dimensiones utilizando la definición de deformación verdadera, según la Ecuación 5. 45.

$$y = y_1 \cdot e^{-\frac{\varepsilon}{2}}; w = w_1 \cdot e^{-\frac{\varepsilon}{2}} \quad \text{Y} \quad x = x_1 \cdot e^{\frac{\varepsilon}{2}} \quad \text{Ecuación 5. 45}$$

Se han realizado diversas mediciones, y el ángulo α es despreciable, al operar sobre la ecuación de equilibrio, despreciando infinitésimos se ha llegado a la expresión que determina la Ecuación 5. 46.

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \tau_f \cdot \frac{e^{\frac{\varepsilon}{2}}}{y_1} \left(\frac{n}{\varepsilon} - 1 \right)^{-1} \quad \text{Ecuación 5. 46}$$

1.1.1 Modelo de variación de la deformación relativa.

Se va a desarrollar un modelo para calcular la deformación relativa a lo largo del tiempo.

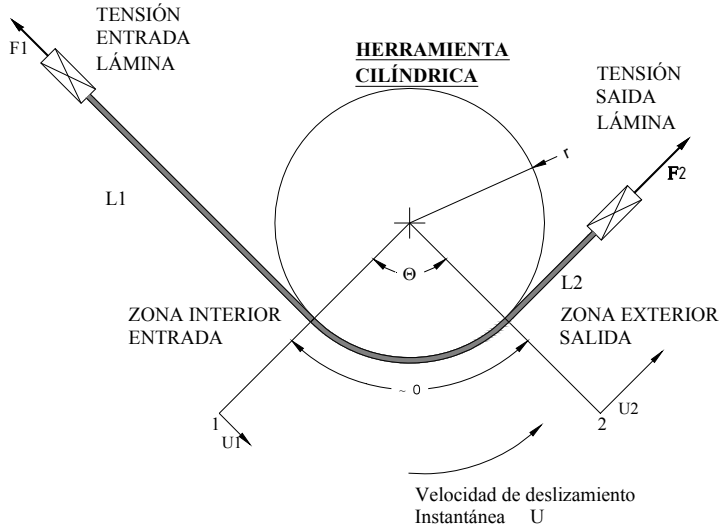


Figura 5. 16 Modelo de variación de la deformación relativa

El objetivo de este modelo es obtener los cambios en deformación relativa en la ejecución del ensayo. En el análisis no tenemos en cuenta la longitud de contacto en comparación con la longitud de las zonas de entrada y salida

Del análisis cinemático, las longitudes de la pieza en las zonas de entrada y salida vienen dadas por, según la Figura 5. 16 :

La zona de entrada se acerca a la zona de trabajo a una velocidad U_1 en el punto de entrada en contacto, que tras un tiempo ha disminuido de longitud una cantidad b . La zona de salida se va alargando, con una velocidad U_2 en el punto de salida. La relación entre ambas velocidades se denominará Z . $Z=U_2/U_1$

Siendo :

L_{10} y L_{20} , las longitudes de los tramos de entrada y salida antes del movimiento/deformación. L_1 y L_2 son las longitudes de ambos tramos tras la deformación, según la Ecuación 5. 47.

$$L_1=L_{10}-b \text{ y } L_2=L_{20}+Zb$$

Ecuación 5. 47

A partir de la geometría, definimos las deformaciones relativas verdaderas como la Ecuación 5. 48:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{L_1}{L_{10}}\right) \rightarrow L_{10} = L_1 \cdot e^{-\varepsilon_1}; \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{L_2}{L_{20}}\right) \rightarrow L_{20} = L_2 \cdot e^{-\varepsilon_2}$$

Ecuación 5. 48

$$L_2 \cdot e^{-\varepsilon_2} + L_1 \cdot e^{-\varepsilon_1} = L_{10} + L_{20} = L$$

Donde L_1 es la longitud de la pieza de trabajo en la entrada, L_2 es la longitud de la pieza de trabajo en la salida en algún instante t , L_{10} es la longitud inicial en la entrada, L_{20} es la longitud inicial en la salida y Z es la razón de velocidades entre la salida y la entrada.

Si consideramos los diagramas tensión-deformación verdaderos, en la zona plástica, y utilizando la ecuación de endurecimiento $\sigma = C \cdot \varepsilon^n$, en donde σ es la tensión verdadera, ε es la deformación verdadera. Dado que no se puede calcular la sección verdadera durante el ensayo, puede relacionarse la fuerza con la sección según la Ecuación 5. 49:

$$\sigma_{verdadera} = \left(\frac{F_{medida}}{A_{verdadera}}\right) \frac{A_{inicial}}{A_{inicial}} = \left(\frac{F_{medida}}{A_{inicial}}\right) e^\varepsilon = C \cdot \varepsilon^n$$

$$F_{medida} = A_{inicial} \cdot C \cdot \varepsilon^n \cdot e^{-\varepsilon}$$

Ecuación 5. 49

$$F_1 = A_1 \cdot C \cdot \varepsilon_1^n \cdot e^{-\varepsilon_1}; F_2 = A_1 \cdot C \cdot \varepsilon_2^n \cdot e^{-\varepsilon_2}$$

Donde A_1 es el área de la sección recta inicial de la pieza de trabajo, ε_1 y ε_2 son las deformaciones relativas iniciales de las entrada y salida de la pieza, C es el coeficiente de resistencia, y n es el coeficiente de endurecimiento de la deformación relativa.

El coeficiente de rozamiento promedio μ tomado de Wilson et al. (P. K. Saha et al., 1996) Viene dado por la Ecuación 5. 50.

$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1 - F_{BUB})}{\Theta(F_1 + F_2)}$$

Ecuación 5. 50

Donde F_1 y F_2 son las fuerzas sobre los extremos del fleje, F_B es la fuerza necesaria para el curvado y enderezado del fleje y Θ es el ángulo de abrazamiento. Sustituyendo en las anteriores, se obtiene la Ecuación 5. 51 :

$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1 - F_{BUB})}{\Theta(F_1 - F_2)} = \frac{2(\varepsilon_2^n e^{-\varepsilon_2} - \varepsilon_1^n e^{-\varepsilon_1} - F_{BUB})}{\Theta(\varepsilon_2^n e^{-\varepsilon_2} + \varepsilon_1^n e^{-\varepsilon_1})}$$

Ecuación 5. 51

5.7 Conclusión.

Se detallaron modelos de comportamiento del fleje en condiciones de deformación. Los modelos representan ecuaciones de difícil integración, y que permiten detectar las variables más importantes.

Se han obtenido ecuaciones que permiten evaluar el coeficiente de rozamiento promedio en condiciones de deformación plástica.

El siguiente paso consiste en elaborar procedimientos que permitan evaluar la ventaja en la utilización de lubricantes en materiales sometidos a estampación.

Capítulo 6

Los materiales y sus características.

Resumen:

Se detallan los utillajes para la obtención de las probetas. Se caracterizan los materiales en cuanto a curva Tensión-Deformación, Rugosidad Superficial y dimensiones. Se propone un parámetro evaluador de la variación de altura promedio de la capa superficial de asperezas. Se detallan las características de los equipos de medida y los procedimientos de medición. Finalmente se indican las características de viscosidad de los lubricantes a la temperatura de operación.

6 Los materiales y sus características.

Ya se ha reseñado el gran número de materiales utilizados en la fabricación de las estructuras de los automóviles. Para esta investigación se han obtenido muestras de algunos de los más representativos, sin embargo se han seleccionado dos tipos:

Dual Pase 600 (DP600) y TWIP.

Los aceros DP están muy extendidos tanto en las estructuras de vehículos, como en la fabricación de otro tipo de perfiles conformados. Se caracterizan por su buena formabilidad. Se han obtenido muestras en chapas galvanizadas, suministradas por General Motors (USA) y por Flinsa (España). En ambos casos el fabricante es Arcelor.

Los aceros TWIP son una novedad en cuanto a su utilización, la cantidad de artículos escritos sobre sus formidables propiedades es importante, sin embargo todavía está poco extendido. Se han obtenido unas muestras, y GM ha mostrado interés en su estudio, y para nuestro caso parece interesante comparar el comportamiento con el DP que es un acero ampliamente utilizado.

No se han obtenido los detalles de la composición de los aceros, solamente su denominación. Los donantes lo han considerado información no comunicable.

Las características previas obtenidas de cada material han sido:

Curvas tensión-deformación a diferentes velocidades de cabezal, para identificar su comportamiento bajo deformación plástica.

Rugosidad longitudinal y transversal, antes y después del tratamiento. Dato cuya variación permitirá conocer el efecto del tratamiento sobre las superficies.

Geometría de las probetas (ancho y espesor) cada 10 mm. Permitirá determinar el grado de deformación plástica reditual.

El objeto de este trabajo es comparar el efecto de los lubricantes.

6.1 La obtención de probetas.

El SFBT (Sistema de Flexión Bajo Tensión) que se utilizó fue diseñado para su utilización de probetas de aproximadamente 800 mm de longitud. Este tamaño de probeta se justificó por parte de los diseñadores para el caso de colocar accesorios de calentamiento y realizar ensayos de conformado en caliente (hot stamping). Esto fue una dificultad, dado que no se disponen de prensas para utilizar matrices de corte de este tamaño.

Por este motivo se diseñaron útiles de corte para la elaboración de probetas de dimensiones (longitud variable) adecuadas a las dimensiones del SFBT.

Se tomó como referencia la norma EN ISO 6892-1:2009. Con ancho de probeta de 12,5 mm, acuerdos de 20 mm y cabezas de al menos 25 mm.

6.2 Utillajes para la preparación de probetas.

Dada la dificultad de obtener probetas de gran longitud con una matriz convencional, se ha diseñado un útil de corte progresivo.

Se han construido tres útiles para el corte de las probetas: Matriz de corte con un bastidor para portar probetas de hasta 800 mm de longitud y anchos entre 6 y 15 mm. Para el arrastre en la máquina SFBT se han utilizado garras con tornillos de calibre M14, Figura 6. 1. Para la perforación se ha construido también un matriz de perforación que realiza agujeros de 15 mm de diámetro y también permite extraer probetas de 10x8 mm para micrografías.

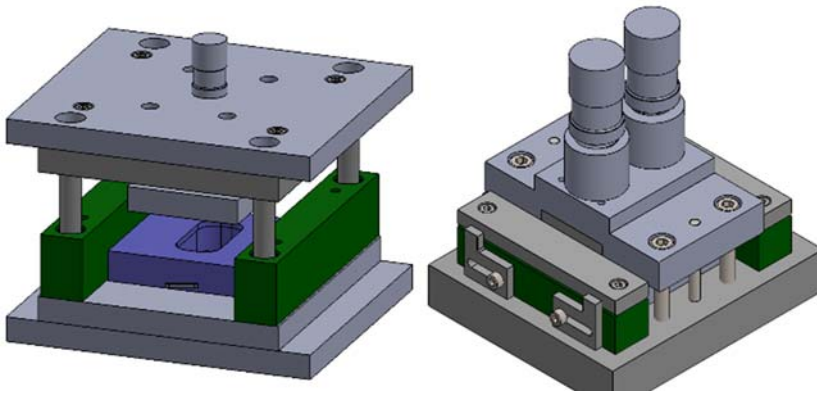


Figura 6. 1 Matriz de corte (izquierda). Matriz de perforación (derecha)

En la Ecuación 6. 2 se resume de forma visual los pasos para el corte del perímetro de las probetas, tras la obtención de trozos de fleje de longitud adecuada. Las probetas cortadas son de los siguientes tamaños.

Para los ensayos de Tracción: Probetas de 150 mm, ancho de 12,5 mm, Cabezas de 25 mm, y longitud ensayada de 50 mm.

Para ensayos de Conformado: Probetas de 400 mm, ancho de 7-8mm, Cabezas de 25 mm, y longitud ensayada de hasta 100 mm.



Figura 6. 2 Pasos en el corte de las probetas.

A la izquierda (1), bastidor con el fleje para ser cortado. A la derecha (2) fleje montado en la matriz para el corte progresivo. Las (3) indica el corte de un lado. Al final (4) la probeta a falta de practicarle dos agujeros de 15 mm de diámetro

6.3 Caracterización de los materiales. Curva de tensión-deformación.

Se han ensayado probetas a diferentes velocidades con objeto de conocer el comportamiento del material a diferentes velocidades de deformación.

Los ensayos se han realizado en la Máquina Universal Ibertest ELIB 30, ubicada en el Laboratorio de Ensayos Destructivos del DIMM de la UPV en la EPS de Alcoy, Figura 6.3 .

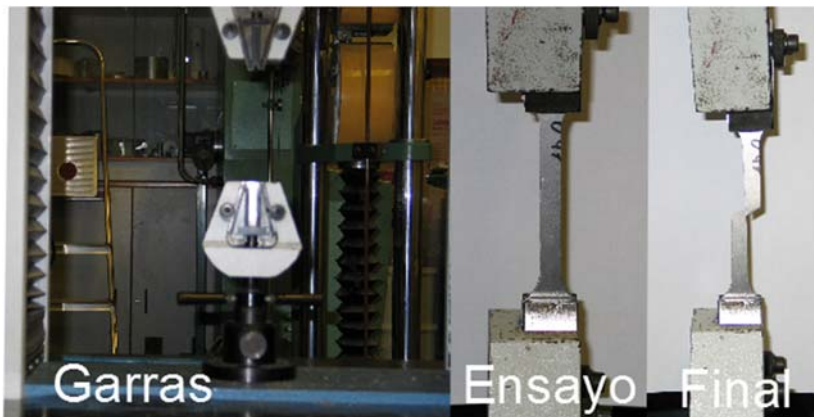


Figura 6.3 Detalle de las garras de la máquina universal, un momento de la ejecución del ensayo, y el final tras la rotura de la probeta

Dado que las velocidades de deformación relativa del ensayo SFBT van a ser de alrededor de $1s^{-1}$, y que conseguir valores comparables está fuera de las prestaciones de este equipo, se han realizado ensayos con velocidades crecientes (10,30,60,90 y 240 mm/min), con objeto de conocer la sensibilidad del material a la velocidad de deformación.

Se ha utilizado la EN ISO 6892-1:2009:

Las probetas tendrán una longitud calibrada de $L_c=60$ mm.

La verificación de la longitud se hará sobre un tramo de $L_0=50$ mm

Se presentan como resultados, referidos a las condiciones iniciales o nominales:

Límite Elástico del material, tomado como límite de proporcionalidad al 0,2% $R_{p0,2}=R_e$ (MPa)

Resistencia a tracción del material R_m (MPa)

Alargamiento porcentual a la rotura de la probeta medido sobre ella misma. A (%)

En primer lugar se presenta el acero DP600 obtenido de General Motors, en chapas galvanizadas de un espesor de 1,5 mm.

6.4 Caracterización del acero DP600 (GM).

Se han obtenido las siguientes curvas para diferentes velocidades de desplazamiento de las garras, a una temperatura ambiente de 24°C, Figura 6. 4 , el resumen de las principales características en la Tabla 6. 1 .

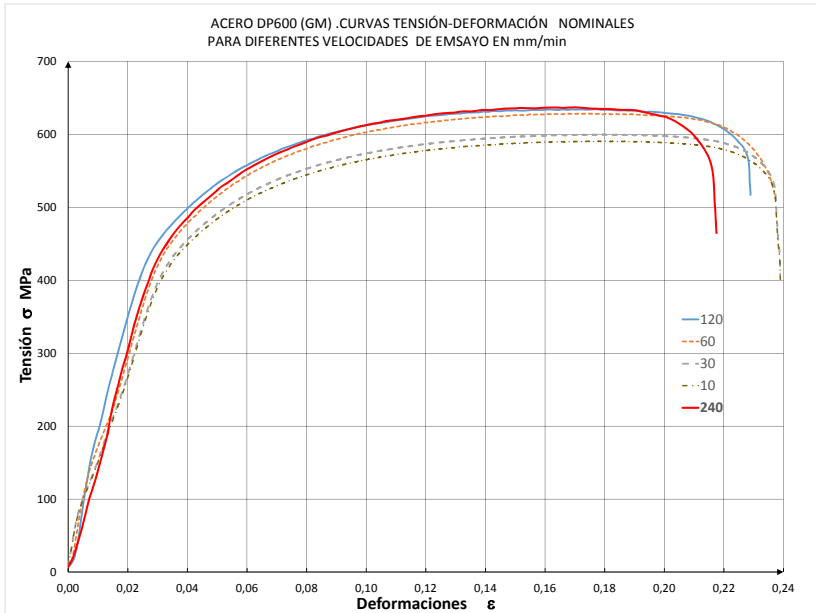


Figura 6. 4 DP600 (GM) Diagrama σ - ϵ (nominales) para velocidades de 10,30,60 , 120 y 240 mm/min

Tabla 6. 1 TABLA. Resultados de los ensayos de tracción DP600(GM)(Val. Nominales)

Probeta N°	Re(MPa)	Rm (MPa)	ϵ_m (% a la rotura)	Vel. mm/min
23	400	589	23%	10
24	400	599	23%	30
25	400	634	23%	60
28	400	634	23%	120
27	400	635	21%	240

En la Figura 6. 5 se puede observar el conjunto de probetas tras su ensayo.



Figura 6. 5 Probetas de DP600(GM) tras los ensayos

Todas las probetas presentan una rotura dúctil, Figura 6. 5, se aprecia la sensibilidad a la velocidad de desplazamiento del cabezal en el grupo de 10 a 240 mm/min, Figura 6. 4. La Figura 6. 6 indica el cálculo de los valores verdaderos de tensión-deformación.

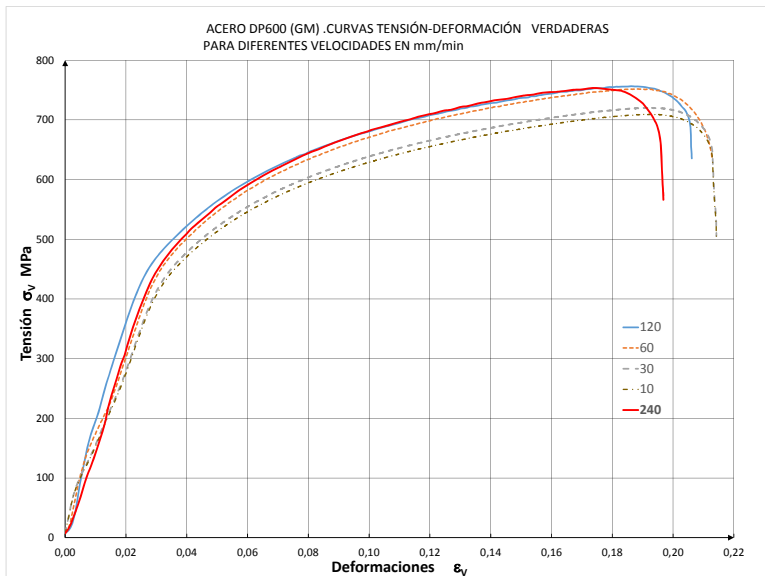


Figura 6. 6 DP600(GM) Diagrama σ - ϵ (verdad.) para velocidades de 10,30,60 , 120 y240 mm/min

Así mismo se trazaron las curvas correspondientes al DP600 suministrado por Flinsa, y se comprobó que los resultados eran prácticamente coincidentes con los obtenidos en el material suministrado por General Motors, por lo que se aceptó que seguían todas las mismas curvas. La Figura 6. 7 es un detalle de las probetas del DP600-Flinsa

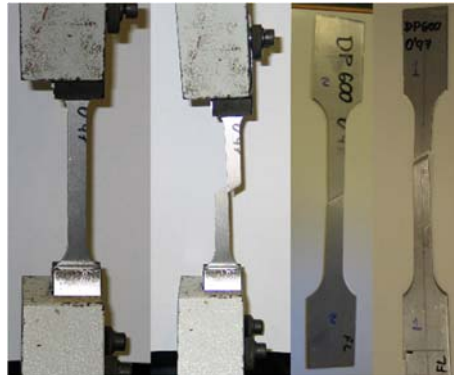


Figura 6. 7 Detalle de algunas de las probetas del material DP600 de Flinsa

6.5 Caracterización de acero TWIP (POSCO).

Se han obtenido las siguientes curvas para diferentes velocidades de desplazamiento de las garras, a una temperatura ambiente de 24°C, Figura 6. 8 TWIP .

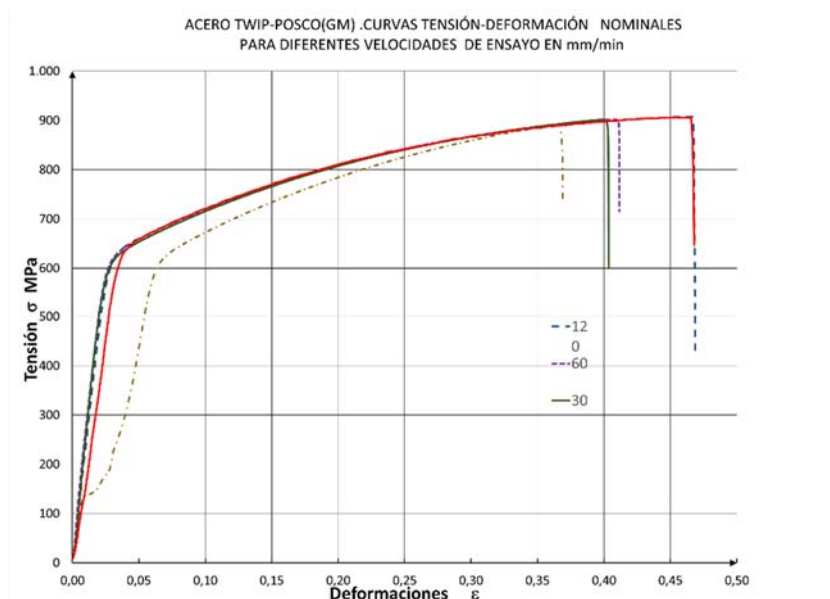


Figura 6. 8 TWIP (POSCO) Diagrama σ - ϵ (nominales) para velocidades de 19,39,60 , 120 y240 mm/min

La Tabla 6. 2 resume las principales características del TWIP.

Tabla 6. 2 Resultados de los ensayos de tracción TWIP(POSCO)

Probeta N°	Re(MPa)	Rm (MPa)	ϵ_m (% a la rotura)	Velocidad ensayo mm/min
39	574,5	890	37%	10
40	511,3	897	40%	30
41	517,9	900	41%	60
42	519	904	47%	120
43	535	900	47%	240

La Figura 6. 9 permite apreciar la rotura dúctil y la elevada deformación experimentada por las probetas



Figura 6. 9 Probetas de TWIP (POSCO) tras los ensayos

Todas las probetas presentan una rotura dúctil para la velocidad de desplazamiento del cabezal en el grupo de 10 a 240 mm/min.

Así mismo se han obtenido las gráficas correspondientes a los valores verdaderos, indicados en la Figura 6. 9 .

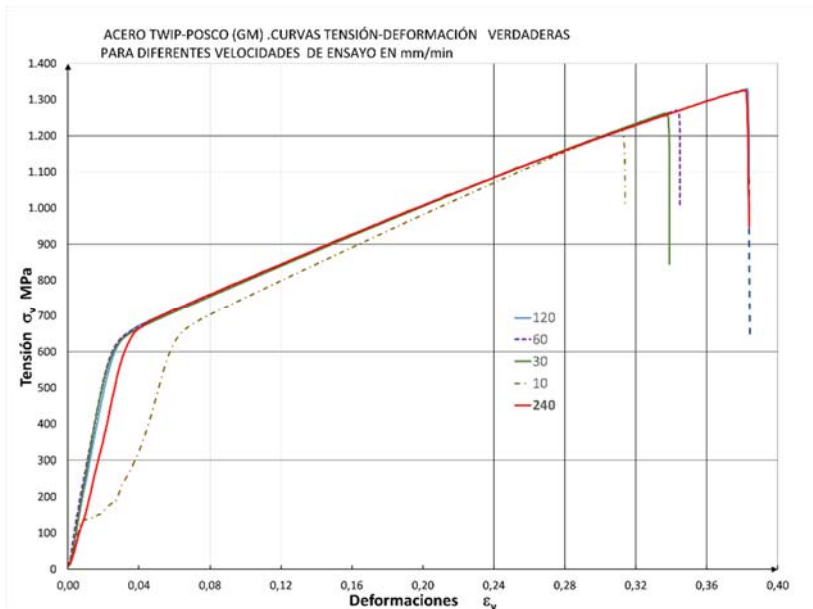


Figura 6. 10 TWIP (POSCO) Diagrama σ - ϵ (verdaderos) para velocidades de 19,39,60 , 120 y240 mm/min

La gráfica de valores verdaderos, Figura 6. 10, nos indica la poca sensibilidad a la velocidad de deformación en cuanto al endurecimiento, sin embargo indica un comportamiento muy diferente a los aceros no austeníticos. La gráfica correspondiente al ensayo a 10 mm/min indica un pequeño desplazamiento (incidente) respecto de la garra el inicio del ensayo.

6.1 Caracterización de los materiales. Dimensiones.

Se han pautado las probetas a intervalos de 10 mm, para cada posición se han realizado tres medidas de ancho y espesor. Se ha representado cada posición por su valor promedio.

Instrumentos para la medición:

Pie de rey Marca Mitutoyo CD 6-CW. Carrera de 150 mm y resolución de 0,01mm. Es una herramienta versátil y cómoda de utilizar Figura 6. 11.



Figura 6. 11 Pie de rey utilizado

Tornillo micrométrico, Figura 6. 12, para medir espesores de tubos, resolución 0,01 mm, carrera 25 mm, permite medir los espesores en elementos curvados, necesario para láminas alabeadas



Figura 6. 12 Micrómetro para espesores de tubo

Tornillo micrométrico, Figura 6. 13, resolución 0,01 mm, carrera 10 mm, permite medir con precisión espesores de chapas y sus anchos, es sensible a las variaciones de ancho.

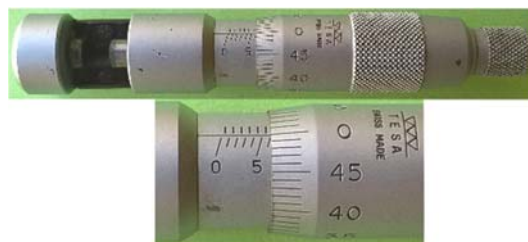


Figura 6. 13 Tornillo Micrométrico para chapas

Para cada probeta se ha obtenido un registro de sus dimensiones, Figura 6. 14, tanto de su ancho como de su espesor. Para los cálculos se utilizarán el valor promedio de la serie.

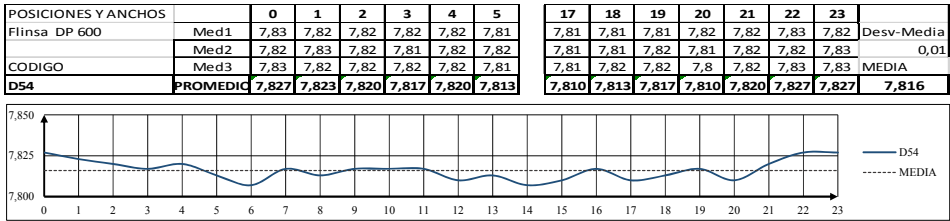


Figura 6. 14 Tabla y gráfico tipo utilizados para caracterizar el ancho de cada una de las probetas.

El procedimiento de fabricación permite utilizar diferentes longitudes de fleje. Para caracterizar la geometría de cálculo respecto a su posición en el SFBT, se ha utilizado el siguiente esquema geométrico, Figura 6. 15 .

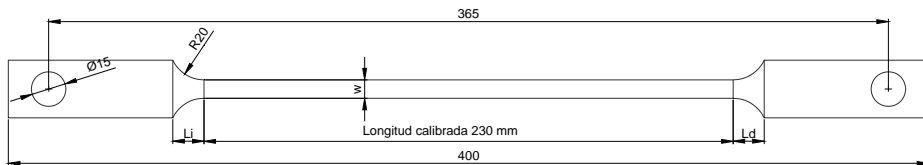


Figura 6. 15 Esquema geométrico de las probetas.

6.6 Caracterización de los materiales. Superficie.

Uno de los aspectos básicos en cualquier proceso de conformado es el resultado sobre las superficies.

Se ha estudiado la superficie de las probetas antes y después del ensayo, los procedimientos experimentales utilizados son:

Determinación de los valores de rugosidad mediante rugosímetro, que permite parametrizar el acabado superficial.

Observación de la superficie mediante lupa, indicará una primera aproximación del estado de las superficies, y permite comparar los dos estados.

Análisis mediante microscopía electrónica SEM, que permitirá observar rayaduras y erosiones y la evolución de la deformación de las asperezas.

6.7 Medición de la rugosidad superficial. Rugosímetro.

Se ha utilizado un rugosímetro digital Mitutoyo. Modelo SJ-301. Sus características principales son las siguientes.

Aparato portátil para análisis de la rugosidad superficial con pantalla de mando táctil e impresora integrados.

Pantalla LCD de grandes dimensiones se pueden leer valores de medición y gráficos de cálculo .

Cumple con las normas internacionales tales como DIN, ISO, ANSI y JIS.

Mediante la utilización de una tarjeta Compact-flash, pueden almacenarse hasta 20 mediciones.

Rangos de medición: Eje X 350 μm . eje Y 12,5 nm.

Velocidades de medición: Mediciones a 0,25 o 0,5 mm/s. Retroceso a 1 mm/s.

Características del palpador: Palpador por inducción. Rango de medición 350 μm . Punta de diamante. Radio de la punta 2 μm . Radio de patín 40 nm. Fuerza de medida/Palpado 0,75 mN.

Se han obtenido los archivos de todas las mediciones, así como el resultado calculado por el equipo, siendo utilizado como parámetro característico el valor Ra, que es el más conocido en la industria mecánica.

Las mediciones se han realizado sujetando las probetas a una superficie plana.

Los ajustes utilizados, de acuerdo con el manual del equipo son las siguientes:

Norma DIN 1990, Perfil de media R, Filtro de Gauss, Longitud de Cutt-Off $\lambda_c=0,8\text{mm}$, para tramos longitudinales se obtuvieron 5 muestras, en los tramos transversales el equipo admitía 3 muestras (debido al curvado alrededor del eje longitudinal del tramo conformado).En algunos casos de gran dificultad o pequeña longitud, se utilizó $\lambda_c=0,25\text{mm}$

La verificación de la rugosidad es una medición habitual en la industria mecánica. Este equipamiento puede considerarse como de uso cotidiano, y por tanto no extraño a una empresa de estampación.



Figura 6. 16 Rugosímetro digital y el palpador sobre el patrón de verificación, en el estado de calibración que se utiliza.

Antes de realizar las mediciones se calibró el equipo a la rugosidad del patrón. En la figura combinada se observa la pantalla del rugosímetro, en donde se ha obtenido la rugosidad del patrón, Figura 6. 16 .

Cada probeta se caracterizó por medidas previas a la deformación (una longitudinal y otra transversal) y posteriores (tres medidas tanto transversales como longitudinales)

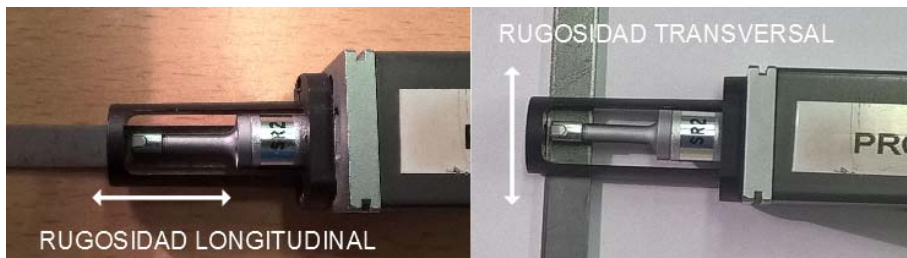


Figura 6. 17 Ensayos de rugosidad longitudinal y transversal realizados en cada una de las probetas

Para cada medición se obtienen una serie de medidas en la pantalla, de las cuales se seleccionó el valor Ra (media aritmética de los valores absolutos de las alturas máximas de crestas respecto a la media), definido en EN-ISO 4287:1999 . El filtro de Gauss transforma una superficie ligeramente curvada o alabeada en un perfil de medida plano. De cada medida se ha obtenido un archivo, que indica el perfil sobre una línea recta.

Los datos de cada medida son una hoja Excel en formato .CSV, que se utilizó para hacer los cálculos. El parámetro Ra indica un promedio sobre el total de elementos en valor absoluto, pero no hace ninguna discriminación sobre su distribución. Otro parámetro habitual es el valor eficaz R_q , definido en EN-ISO 4287:1999, y que se obtuvo posteriormente por cálculo.

A título de ejemplo se presentan algunos gráficos obtenidos antes y después del tratamiento de deformación, Figura 6. 18.

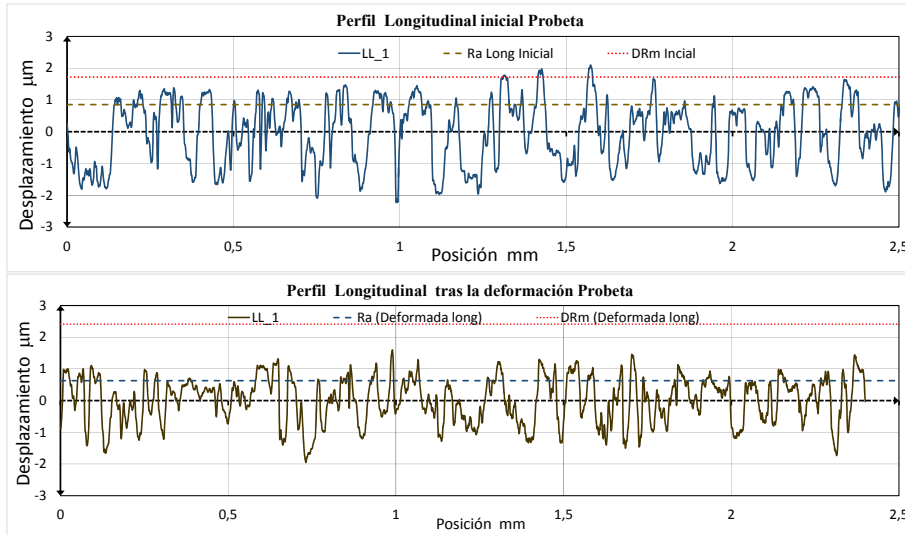


Figura 6. 18 Rugosidades en dirección longitudinal antes y después del conformado de la probeta TWIP(53)

En casi todos los casos se observó que la rugosidad Ra longitudinal disminuía tras el tratamiento. Si se imagina una línea media que represente el promedio de las crestas por encima del perfil de referencia, y otra de las que están por debajo, tras el tratamiento estas líneas promedio se han acercado. Este efecto, de aplanamiento, se observa perfectamente en las fotografías SEM.

Los valores representados en la figura anterior permiten introducir un parámetro de rugosidad:

Diferencia de rugosidades sobre el perfil medio DRm . Se calcula como la diferencia del valor promedio de las alturas de crestas sobre el perfil menos el promedio de los valores absolutos de las alturas de las crestas por debajo del perfil medio.

El caso de la rugosidad en la dirección transversal es diferente, la Figura 6. 19 expresa el comportamiento en le TWIP. Se compararon las diferencias de valor de rugosidad Ra, antes y después de la deformación, en direcciones longitudinal y transversal.

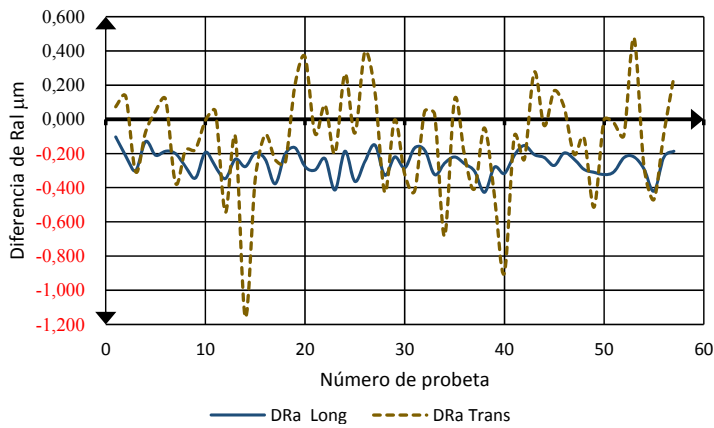


Figura 6. 19 Valores de Diferencias de valor de rugosidad Ra antes y después de la deformación, en direcciones longitudinal y transversal. Aceros TWIP

En la Figura 6. 20 se ve la influencia de las rayas, imputables a la herramienta o al desprendimiento de partículas, que invalida muchas de las mediciones como parámetro representativo.

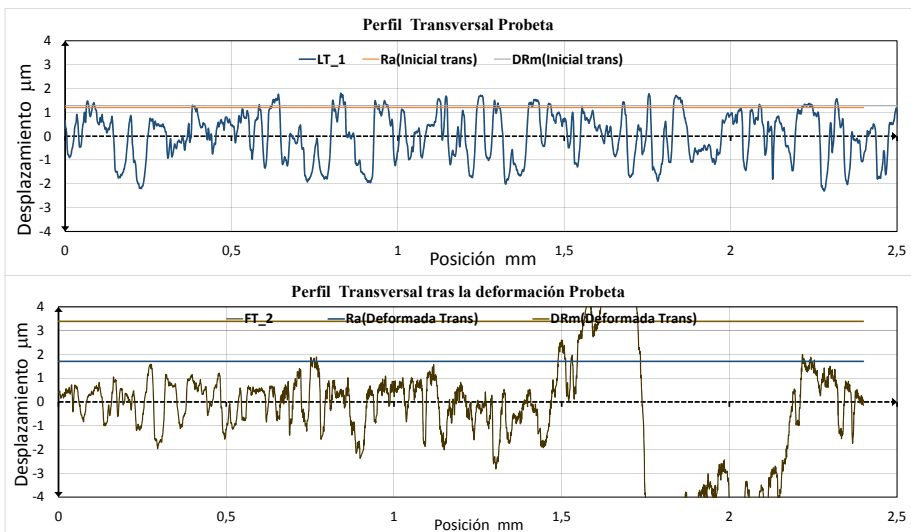


Figura 6. 20 Perfiles transversales antes y después de la deformación (Pobreta 53)

La Figura 6. 21 idealiza el promedio de las asperezas en dos zonas situadas por encima y debajo de la línea punteada, la separación entre las dos líneas de color tiene una altura que caracteriza el perfil analizado.

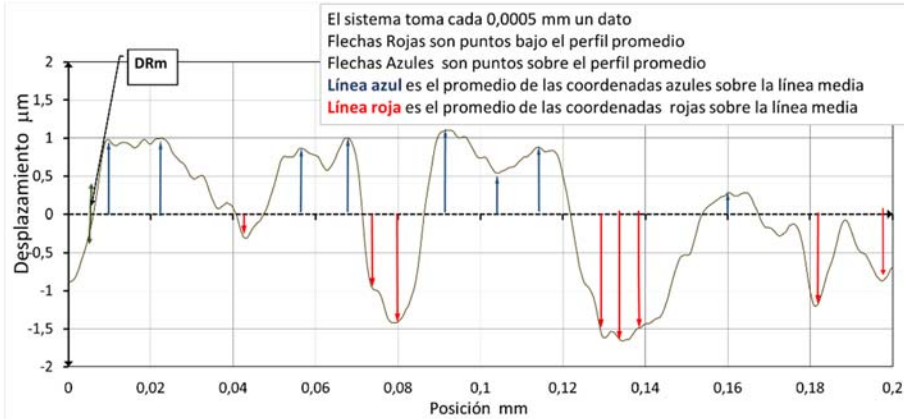


Figura 6. 21 DRm representa la distancia entre las líneas promedio a ambos lados de la línea base. Es la altura del rectángulo equivalente

En la Figura 6. 21 cada coordenada tiene un valor, positivo si está por encima de la línea de referencia, y se corresponde con una altura de cresta As_k y negativo si está por debajo y denominaremos Ai_j .

Las coordenadas k son de crestas por encima de la línea de referencia y las coordenadas j son de crestas por debajo de la línea de referencia. Se define DRm como la expresión indicada en la Ecuación 6. 1

$$DRm = \frac{1}{N_k} \sum_{k \geq 1} As_k - \frac{1}{N_j} \sum_{j \geq 1} As_j \quad \text{Ecuación 6. 1}$$

Si se idealiza la medición como un rectángulo de altura DRm , subíndice 1 para las condiciones iniciales y 2 para las posteriores al conformado. La reducción de la altura del rectángulo idealizado puede ser un indicador de la variación promedio de la rugosidad, como efecto de la operación. A esta variación equivalente de la rugosidad la denominaremos VRm , Ecuación 6. 2.

$$VRm = DRm_2 - DRm_1 \quad \text{Ecuación 6. 2}$$

Los valores negativos indican que la rugosidad idealizada como rectángulos ha disminuido, Figura 6. 22 .

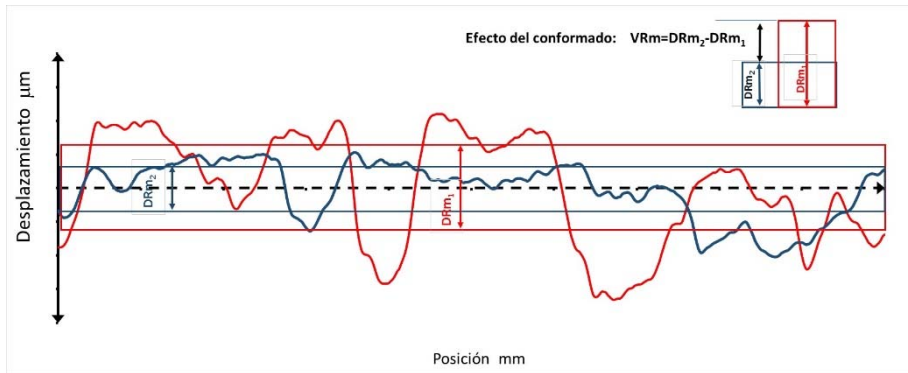


Figura 6. 22 VRm representa la diferencia entre capas de rugosidades. El resultado negativo indica la disminución.

6.8 Microscopía Electrónica SEM.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento capaz de ofrecer un variado rango de informaciones procedentes de la superficie de la muestra. Su funcionamiento se basa en barrer un haz de electrones sobre un área del tamaño que deseemos (aumentos) ,mientras en un monitor se visualiza la información que hayamos seleccionado en función de los detectores disponibles. De los disponibles en el Servicio de Microscopía de la U.P.V. se utiliza el siguiente:

Detector de electrones secundarios (SE): es el que ofrece la típica imagen en blanco y negro de la topografía de la superficie examinada. Es la señal más adecuada para la observación de la muestra por ser la de mayor resolución.

Ficha del equipo Figura 6. 22:

MARCA: JEOL. MODELO; JSM6300

APLICACIÓN: Detector de electrones secundarios (SE) FABRICANTE: JEOL

Las muestras utilizadas han sido fragmentos cortados del fleje, antes de su procesado, o posteriormente en la zona deseada. La superficie visionada por el microscopio es de $4 \times 4 \text{ mm}^2$. Las probetas han sido limpiadas previamente con acetona, primero por frotamiento y finalizando con dos baños. Al ser una superficie metálica no se requieren recubrimientos.



Fuente: Servicio de Microscopía de la UPV

Figura 6. 23 Microscopio Electrónico de Barrido SEM.

Se considera de gran utilidad, ya que va a permitir observar indentaciones, labrados y cambios importantes en la superficie, así como la distribución de huecos que permitan la posterior lubricación en el proceso de conformado.

6.9 Los Lubricantes.

Las normas de medio ambiente están generando notables cambios en los lubricantes a utilizar. No solo es necesario lubricar para conseguir menor consumo de energía, fuerzas controladas y acabados superficiales correctos. Además han de ser respetuosos con el medio ambiente, y seguros para los operadores. Están apareciendo lubricantes sólidos, nuevos recubrimientos (Bay et al., 2010) y aditivos, que significan cambios continuos bajo una permanente presión competitiva..

Se utilizaron dos lubricantes aptos para estampación de la marca Houghton, cedidos por la empresa Flinsa.

A efectos de esta investigación, las propiedades indicadas por el fabricante no son determinantes, y se pretende comparar su efecto en el proceso de estampación.

Los lubricantes utilizados son:

Houghto Draw S130. (Viscosidad dinámica a 23°C 30 cP) (Lubricante 2)

Houghto Draw B 75 Galv. (Viscosidad dinámica a 23°C 150 cP) (Lubricante 1)

Se dan estos valores por se la temperatura de ensayo y aproximadamente la misma en el procesado.

6.10 Conclusión.

Nuevos materiales a conformar, recubrimientos más eficaces, lubricantes en continua evolución, procesos más productivos y más veloces y mercados globalizados, son un reto

creciente. La agobiante presión de la competencia total lleva a buscar en cada coordenada temporal la mejor solución económica. La volatilidad de los mercados observada en los últimos años conlleva una dificultad creciente.

Considerar como un Sistema a optimizar la pieza a conformar, su material y recubrimiento (si existe), el lubricante, el proceso, sus parámetros y costes totales, es una necesidad económica, en muchos casos de supervivencia.

Es habitual que los transformadores dispongan que una máquina de ensayos a tracción, durómetros, viscosímetros e incluso equipos análisis por chispas. Así mismo es habitual disponer de programas de simulación del conformado. Pero no se ha constatado la existencia habitual de equipos de tribosimulación.

La mejor selección del conjunto pieza-lubricante para una condiciones de conformado, en condiciones de simulación, puede ser un factor de ventaja temporal y económica. Disponer de equipos y protocolos para conseguirlo un factor de competitividad.

Capítulo 7

El Simulador y el sistema de medición.

Resumen:

Se describen los diferentes módulos, accionamientos, sistemas de medición y control del simulador de estampación. Se define un modelo simplificado de la geometría del movimiento de una lámina ideal, sus relaciones geométricas y la cinemática de una probeta ideal.

7 El Simulador y el sistema de medición.

7.1 Antecedentes

Anteriormente se ha detallado la complejidad del proceso de estampación. Uno de los simuladores utilizados desde hace bastantes años es el denominado BUT (*Bending under tension test*), y también conocido como ensayo *Capstan friction test* (ensayo de rozamiento en cabrestante).

Siguiendo las ideas desarrolladas por autores como Wilson, Bay, Kim, Metzger, Wiklund, Fratini, se ha construido un simulador de una parte del proceso de conformado. El objetivo seleccionado ha sido la zona de contacto del radio de acuerdo del punzón, en su fase de movimiento en régimen permanente.

Para desarrollar esta investigación se formó un grupo de diseñadores de maquinaria. Su objetivo era el desarrollar un sistema que permitiese la simulación de la estampación en diversas condiciones tribológicas. Al definir las prestaciones declararon dos tipos de necesidades: Conformado a temperatura ambiente y Conformado en caliente.

Para el conformado a temperatura ambiente se tomó en consideración flejes de un ancho de 10 mm, con una resistencia a la rotura de alrededor de 1 GPa.

Consecuencia de las necesidades declaradas ha sido el dejar espacio para la incorporación de nuevos sistemas y elementos al conjunto del simulador. Al conjunto le denominaremos Sistema de Flexión bajo Tensión (SFBT)

7.2 Descripción del simulador.

El simulador ha sido diseñado y fabricado en varias etapas por grupos de diseño del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV.

Este sistema está constituido por: una estructura de aluminio de gran rigidez, un conjunto de elementos que generan el desplazamiento y el posicionamiento y un sistema de medida y almacenamiento de datos, Figura 7. 1.

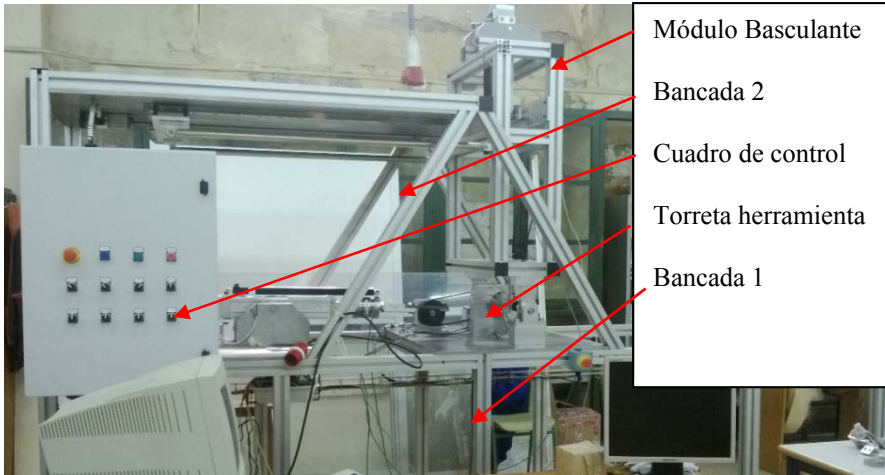


Figura 7.1 Vista general de Sistema de Flexión bajo Tensión (SFBT)

Se han utilizado perfiles de aluminio extruido, de la serie pesada, de 60x60 mm, las dimensiones son 3700 mm x 2100 mm x 1060 mm (longitud x altura x profundidad)

7.1.1 Elementos de movimiento y posición.

La simulación que se propone es el desplazamiento controlado de un fleje (que simula la pieza) alrededor de un cilindro (que simula la herramienta). El ángulo de contacto queda determinado por la posición relativa de los elementos del simulador.

El desplazamiento de la lámina se realiza mediante actuadores lineales, con velocidad y posición controladas. Las fuerzas (y tensiones) resultantes sobre el material son consecuencia de sus dimensiones y de su comportamiento elástico-plástico (curva y modo de deformación)

En el esquema siguiente, Figura 7. 2, se indican los elementos esenciales del sistema.

Elementos básicos:

Bancada 1, módulo fijo inferior.

Bancada 2 módulo fijo superior.

Módulo basculante, se mueve entre las dos bancadas

Barras de conexión.

Torreta de la herramienta.

Guía lineal de la barra de conexión

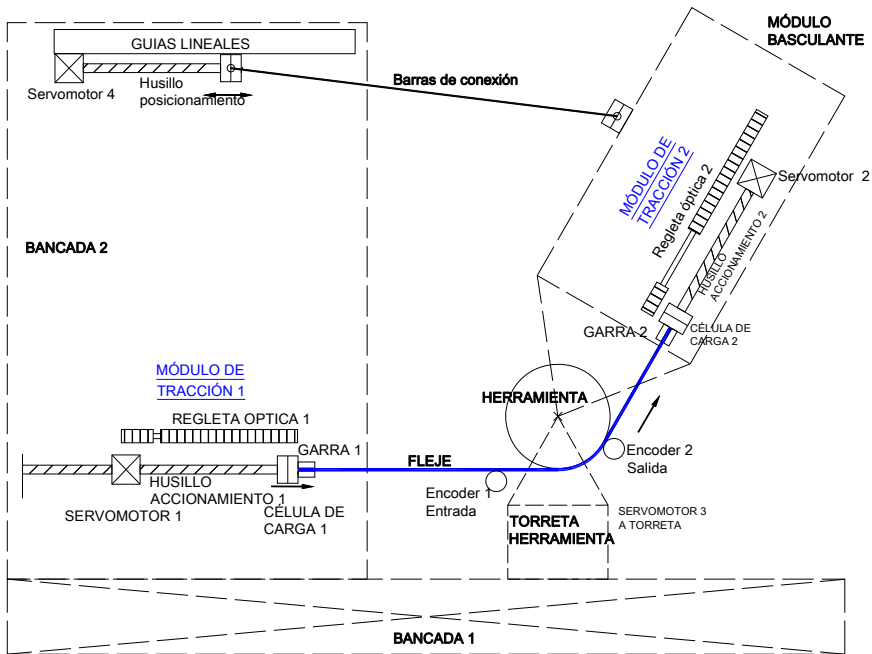


Figura 7. 2 Elementos básicos del sistema de flexión bajo tensión

El Módulo de tracción 1, de ángulo fijo, formado por un servomotor con freno, encoder incremental, reductor y husillo a bolas que generan un desplazamiento horizontal, en su extremo se sitúa una célula de carga y a la salida de esta la pinza que sujeta el extremo del fleje a ensayar. Sobre la carcasa del husillo de desplazamiento se ha colocado una regleta óptica de desplazamiento, que permite la medida directa del movimiento del extremo del fleje.

Todo este conjunto se encuentra anclado sobre la zona izquierda de la Bancada 1.

La bancada 2 es un elemento estructural fijo colocado sobre la Bancada 1, Figura 7. 4 , y que tiene por objeto soportar el sistema de basculación de la mesa rotativa. Está formado por cuatro pilares y una mesa superior (a modo de techo), Figura 7. 4 . En la parte inferior de la mesa se ha colocado una barra desplazable, que cubre casi todo su ancho y la recorre en gran parte de su longitud. En los extremos de la barra desplazable hay sendas articulaciones, que conectan con dos barras unidas al módulo basculante mediante cojinetes de fricción.

La barra desplazable está controlada por un motorreductor, con freno, que acciona una husillo a bolas, conducida mediante sendas guías lineales, una a cada lado de la parte inferior de la mesa. Cada posición de la barra desplazable significa un ángulo diferente del módulo basculante, y como resultado, un ángulo de abrazamiento diferente entre el fleje y la herramienta.

El módulo basculante es una estructura rígida, que gira alrededor de un eje coincidente con el del cilindro de la herramienta. Esta estructura contiene el módulo de tracción 2.

El “módulo de tracción 2”, Figura 7. 3, está formado por un motorreductor que acciona un husillo a bolas que mueve el vástago sobre el que se coloca la célula de carga, y en su extremo dispone de la pinza para el fleje; y al igual que en el caso anterior se ha colocado una regleta óptica que mide el desplazamiento del extremo del mismo. Los elementos son los mismos que en el módulo 1, pero colocados sobre un bastidor que se posiciona girando alrededor del mismo eje que la herramienta.

La simulación de la herramienta es un cilindro de acero templado, del mismo tipo de los utilizados en las matrices de estampación. El diámetro mínimo de la herramienta es de 15 mm. Esta herramienta puede girar en ambos sentidos, a velocidad controlada, o estar bloqueada. Estas opciones se controlan mediante un servomotor de accionamiento. El grupo de elementos se monta sobre una torreta colocada sobre la bancada 1.

Todo este conjunto de servomotores se controla desde un autómata gestionado desde un ordenador, mediante un programa de ensayos desarrollado al efecto.

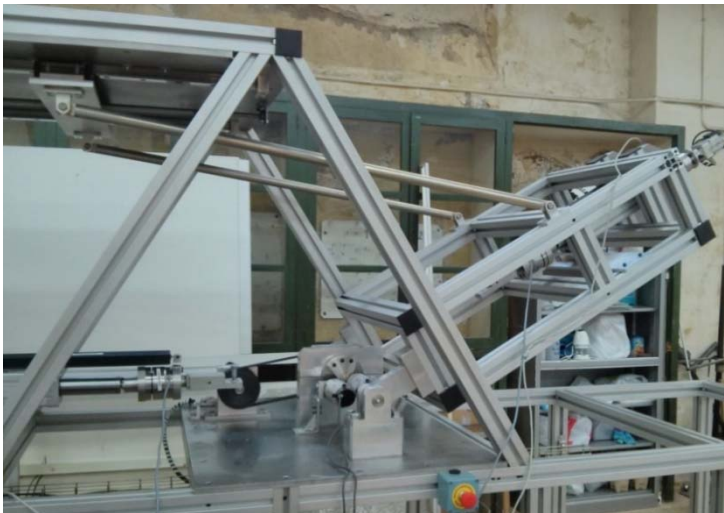


Figura 7. 3 Detalle del módulo basculante en un posición intermedia



Figura 7. 4 Detalle, desde la parte posterior, del sistema de movimiento del módulo basculante mediante patines, accionado por el husillo a bolas

7.1.2 *Desplazamientos.*

7.2.1.1 *Actuadores lineales. Movimiento del fleje.*

Se han utilizado dos actuadores lineales de husillo a bolas, de la marca Thomson, Mod T09-B2505MN050-13, con una carga máxima dinámica de 10 000 N, y velocidad máxima de desplazamiento de 0,3 m/s, velocidad máxima de entrada 4000 rev/min, una repetitividad de $\pm 0,05$ mm, y carga dinámica radial máxima de 300 N. El husillo interior tiene un diámetro nominal de 25 mm, un paso de 5 mm, y la tolerancia mecánica es de la clase T7, se ha adquirido con el “*Trunion mounting kit*”.

Para generar el movimiento se ha utilizado un servomotor con encoder incremental y freno, Omron R88M-G40030H-BS2, con una potencia de 400 W, velocidad máxima de 3000 rev/min, par máximo de 1,3 Nm y freno incorporado. Velocidad controlable 1 a 5000 rev/min, siendo su máxima velocidad en régimen permanente de 3000 rev/min. Su variabilidad de velocidad para la carga nominal es de 0,01% para el rango de velocidades de 0% a 100%. El encoder incremental genera 2500 pulsos por vuelta.

Para obtener un par adecuado se ha incorporado un reductor epicicloidal de la marca ZF PGE 12/1 Modelo PGE001-IA009-1A0, con una relación de transmisión $i=9$, montado como reducción 1/9.

7.2.1.2 Actuadores rotativos. Posicionamiento del módulo basculante

Para el posicionamiento del módulo basculante en el ángulo deseado (0 a 90°), se ha utilizado un husillo a bolas de 25 mm de diámetro, con motor igual a los indicados anteriormente. Para el guiado a lo largo del Módulo 2, se han utilizado guías lineales THK SR30 W (Serie pesada) con una carga estática máxima de 56 kN.

El control del ángulo puede hacerse tanto desde el cuadro eléctrico como desde el programa de gestión de los ensayos.

Para el posicionamiento se han realizado marcas bajo el techo del módulo 2. Para la nivelación se ha utilizado un nivel Bosch que permite una precisión de +/- 0,5°.

7.2.1.3 Actuadores rotativos. Giro de la herramienta.

El elemento que simula la herramienta es un cilindro de un diámetro de al menos 15 mm, soportado por una barra y un sistema de cojinetes que garanticen la rigidez, Figura 7. 5 . Con objeto de poder realizar diversos ensayos tribológicos, la herramienta tiene la posibilidad de permanecer frenada, o girar en ambos sentidos con velocidad controlada. Se ha utilizado un sistema de motor y reductor igual a los indicados anteriormente, unidos mediante una correa dentada a la torreta de la herramienta.

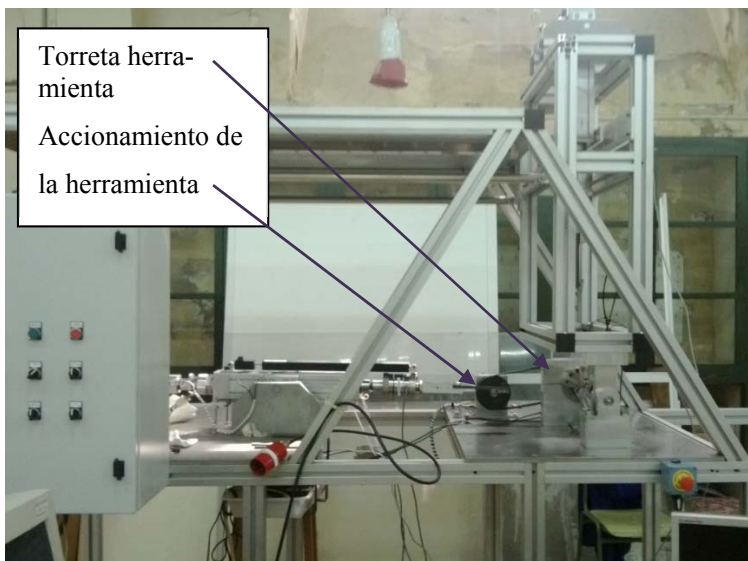


Figura 7. 5 Detalle de la parte central del SFBT

Se ha montado un cuadro de control con un autómata y controladores de cada uno de los motores, gestionados desde un programa de control original de Omron, o bien desde

pulsadores colocados en el cuadro, que permiten el posicionamiento y movimiento de sus elementos.

7.2.1.4 La herramienta de conformado

El elemento que simula la herramienta de conformado es un cilindro de al menos 15 mm (restricción constructiva impuesta por los diseñadores). En este caso se trata de un cilindro de 16 mm fabricado con acero según EN 10 027-2 N° 1.2379, con designación simbólica X153CrMoV12, que equivale a la denominación ANSI D2 y a la antigua F-521. Templado a una dureza de al menos 60 HRC, y con un acabado rectificado superior a N5.

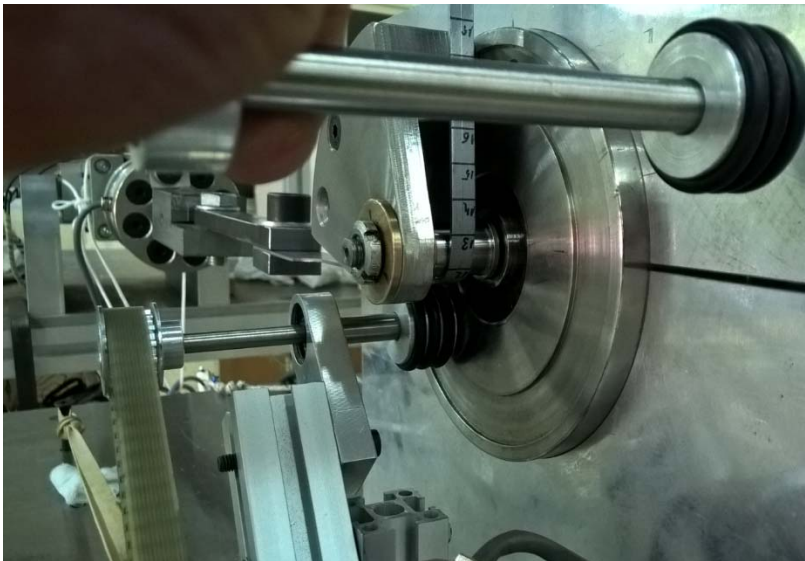


Figura 7. 6 Herramienta (cilindro) en contacto con el fleje. Se aprecian las ruedas de fricción y la garra de retención a la izquierda

7.2.2 El sistema de medida.

El objetivo del ensayo es medir fuerzas y desplazamientos que experimenta el fleje en su proceso de deformación sobre la herramienta, en los ángulos y velocidades determinados.

Se han utilizado elementos de medida de desplazamiento y de fuerzas. El conjunto de los datos se han adquirido y acumulado en ficheros mediante el equipo de la marca HBM QuantumX MX840 y el Software Catman 5.0

7.2.2.1 Medición de fuerzas.

Se han utilizado células de carga de la marca HBM U3/20kN precisión de clase 0,2, linealidad inferior a 0,2%, capaz de medir tanto tracción como compresión. Ambas vienen con certificado de calibración del fabricante.



Fuente:HBM

Figura 7. 7 Célula de carga HBM U3/20kN

Ambas células han sido colocadas en los extremos de los husillos actuadores con los acoplamientos suministrados por el fabricante.

7.2.2.2 Medición de desplazamientos. Regletas ópticas.

Se han colocado dos regletas ópticas Marca "ELAP", modelo PD500360LP1, con una resolución máxima de 0,005 mm (mediante cuadruplicación electrónica) y precisión de rejilla de $\pm 3\mu\text{m}/\text{m}$, Figura 7. 8 y su aplicación Figura 7. 9 .



Fuente:ELAP

Figura 7. 8 Regleta óptica ELAP PD500

Estos elementos de medida directa indicarán en desplazamiento que experimenta la célula de carga en su desplazamiento. Esta medida se va a corresponder con la que realizan los extremos de la zona delgada de las probetas.



Figura 7. 9 Vista de la regleta óptica montada sobre el actuador, y conectada al extremo de la célula de carga

7.2.2.3 Medición de desplazamientos. Encoders incrementales.

Para la medida de los desplazamientos a la entrada y salida de la herramienta se han colocado sendos encoders incrementales, Figura 7. 10. Cada uno de ellos recibe el giro de ruedas de fricción de 25 mm de diámetro, con una resolución de 2000 pulsos por vuelta, que representan $0,0393 \pm 0,0001$ mm/pulso. Encoder marca Omron E6C2-CWZ1X (resolución) 2M , obteniéndose el resultado de la medición en grados sexagesimales.

Para la sustentación de los encoders se ha montado un sistema de barras basculantes, tensadas con resortes, que siguen el movimiento del fleje.

En los extremos de los montajes de los encoders se montaron sendas ruedas de fricción, recubiertas con juntas tóricas, que detectan el desplazamiento del fleje, convirtiéndolo en giros, Figura 7. 10 y Figura 7. 11 . Los balancines están tensados por resortes para seguir el movimiento de la lámina en su carrera.



Figura 7. 10 Vista de los encoders montados sobre los balancines de aproximación

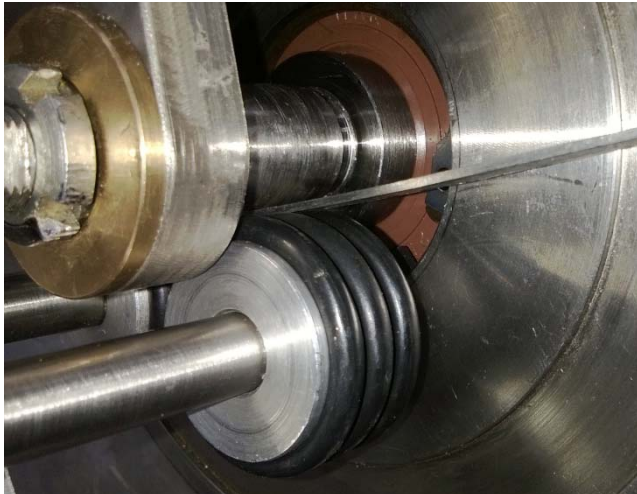


Figura7. 11 Detalle de las ruedas de fricción, en contacto con el fleje, y que transmiten el giro a los encoders

7.2.3 El control del sistema.

En el estado actual del sistema, el control de los movimientos y la adquisición de datos funcionan de forma independiente, de modo que se activa la adquisición, e inmediatamente se activa el movimiento (con tiempo programado), en cuanto acaba el ensayo se para la adquisición. A continuación se describen los elementos básicos.

7.2.3.1 Acondicionamiento de las señales de salida.

Se ha utilizado el programa de adquisición Catman AP 5.0, que controla el funcionamiento del módulo de amplificación y acondicionamiento Quantum-X MX840 de HBM, con una capacidad de hasta 8 canales.



QuantumX MX840B - 8-channel universal amplifier

Fuente:HBM

Figura 7. 12 Detalle del amplificador utilizado para la adquisición de datos

En la parte posterior, 8 conectores SubHD de 15 patillas permiten 8 dispositivos de media, numerados 1 a 4 en la línea superior, y 5 a 8 en la línea inferior, Figura 7. 12 .La línea inferior la permite la conexión de los encoders incrementales y regletas ópticas.

El módulo dispone de dirección MAC, y se conecta con un cable Ethernet a la entrada de red del Ordenador, con las direcciones IP que aparecen en la página 48 del manual del dispositivo. El conjunto se coloca en una bandeja oculta, Figura 7. 13.



Figura 7. 13 Detalle de la ubicación del QuantumX

7.2.3.2 La conversión de magnitudes en datos.

Las mediciones se realizan desde el programa Catman AP 5.0 de HBM, que dispone de la información de los diversos transductores, y transforma las señales en datos de medición; con la frecuencia que se le haya programado, pudiendo hacer un primer tratamiento mediante la incorporación de filtros y cálculos previos.

El programa Catman se estructura en un Módulo principal de Medida y Control, que realiza las mediciones y los cálculos en tiempo real, un sistema de base de datos y módulos de entradas y salidas que se comunican con los elementos de medida y así mismo pueden controlar dispositivos mediante eventos.

El resultado de este programa son ficheros en formato Excel. Los datos de cada transductor o los cálculos efectuados aparecen en columnas. La primera columna es la base de tiempo utilizada.

7.2.3.3 El conjunto de medida

El conjunto de medida se resume en el esquema siguiente, Figura 7. 14:



Figura 7. 14 Esquema del conjunto de medida: Transductores de ambos lados de la herramienta, Amplificación, Adquisición, tratamiento de señal y Archivo de resultados

Los diversos elementos se han detallado anteriormente, el fichero de salida EXCEL ofrece las siguientes columnas:

Columna 1:

Tiempo en segundos: Cada fila indica un instante secuencial, de forma que el salto entre filas es constante. El salto depende de la frecuencia de adquisición.

Columna 2:

Fuerza de la célula de carga 1 (F1), expresada en kN. Fuerza de frenado sobre el fleje

Columna 3:

Fuerza de la célula de carga 2 (F2), expresada en kN. Fuerza que estira el fleje.

Columna 4:

Ángulo girado por el encoder 1, situado a la entrada de la herramienta, y que mediante cálculo indica el desplazamiento del fleje en el punto de contacto.

Columna 5:

Ángulo girado por el encoder 2, situado a la salida de la herramienta, y que mediante cálculo indica el desplazamiento del fleje en el punto de contacto.

Columna 6

Medida de la regleta óptica 1. Desplazamiento, en mm, desde el inicio de la medida. Permite conocer el desplazamiento del extremo izquierdo de la probeta.

Columna 8

Medida de la regleta óptica 2. Desplazamiento, en mm, desde el inicio de la medida. Permite conocer el desplazamiento del extremo derecho de la probeta.

7.3 El proceso de estampación simplificado.

A continuación se describe el modelo de proceso de estampación que sirve de referencia para la aplicación del SFBT.

Se utilizaron como base bibliografía el texto de Marciniak et al.(Z. Marciniak, 2002), y la ampliación del mismo realizada por Duncan.(Pereira et al., 2009).

No fue objeto de este trabajo analizar la evolución de la presión y el contacto exacto de las superficies descritas extensamente por autores como Metzger (Y. S. Kim et al., 2012) o Boher (Le Roux et al., 2012), más relacionados con la evaluación del desgaste de las herramientas.



Figura 7. 15 Elementos básicos del conformado por estampación.

En el esquema de la Figura 7. 15, la lámina o chapa en bruto (*blank*) queda fijado a la matriz mediante elementos denominados prensa-chapas (*blank-holder*), que se apoyan en las camas (*draw-bed*). Este elemento puede bloquear completamente el extremo, o controlar la fuerza de rozamiento permitiendo algún deslizamiento. La matriz (*die*) está fabricada con acero para herramientas templado, con un acabado rectificado, y con bordes de radio determinado. El punzón (*punch*), situado en la parte superior, baja empujando y deformando la chapa contra el hueco de la matriz. Este elemento tiene características mecánicas parecidas a la matriz, gran dureza, y resistencia al desgaste, y se define por los radios de acuerdo en las zonas de máximo rozamiento.

La Figura 7. 16 , basada en las indicaciones de los autores indicados, refleja el movimiento relativo durante el conformado. Se consideró un elemento simétrico respecto al plano central vertical, y se identificaron seis puntos.

Punto 0, situado en el eje de simetría, y que físicamente no se desplaza respecto al punzón. Punto 1x, (la primera cifra indica el punto, la segunda indica la etapa) situado entre el 0 y el primer punto de contacto, 2x es el primer punto de la chapa que contacta con el radio del punzón. Punto 4x, situado inicialmente en el comienzo del radio de la matriz. El punto 5x que está en las proximidades del prensa chapas. El punto A está más allá del prensa-chapas, y se acepta en este análisis que no sufre movimiento ni deformación.

En el proceso de estampación se identifican tres fases o etapas. Se inicia con la aproximación en vacío, hasta que el punzón toca la lámina metálica, tensada por el prensa-chapas. A partir de este instante se inicia la deformación de la chapa (segunda etapa), en que los primeros puntos de contacto empujan hacia abajo, aumentando la zona de contacto en los radio de las herramientas. En este estadio la chapa se mueve, curvándose sobre el radio y al mismo tiempo desliza. El ángulo formado por el tramo 2x-4x crece

paulatinamente. Este segundo estadio se ha considerado por algunos autores como régimen transitorio (Pereira et al., 2009). Parte del material que entra en contacto con punzón se ha aproximado por flexión.

En caso de que el punzón siga bajando, el ángulo que el tramo 2x-4x forma con la horizontal aumentará.

El instante en que el punto que inició el contacto 20 se desprenda del borde de la herramienta, se ha denominado inicio del régimen permanente o estable (tercera fase). En este estadio todo el material bajo presión es material que proviene del estiramiento desde el lado derecho, y no a experimentado flexión previa.

El proceso se basa en el empuje de las zonas sombradas (punzón-matriz), contra la retención del prensa-chapas. Las zonas que no están en contacto con los bordes redondeados están sometidos a tracción. Las zonas en contacto con los bordes están sometidas a tracción, flexión, y compresión superficial (entre el fleje y el borde). Así mismo, y de acuerdo con los autores antes citados en este apartado, el estado de deformación en la zona curvada es aproximadamente deformación-plana (al menos en los estadios iniciales).

La Figura 7. 17 , indica los estados inicial y final. En la parte superior se indican las dimensiones iniciales. En la parte inferior se representan las dimensiones y posiciones finales, y el movimiento relativo al punto fijo A. Se aprecia que cada punto va a tener una velocidad diferente, dada su distancia al origen A, modificada durante el progreso de la deformación.

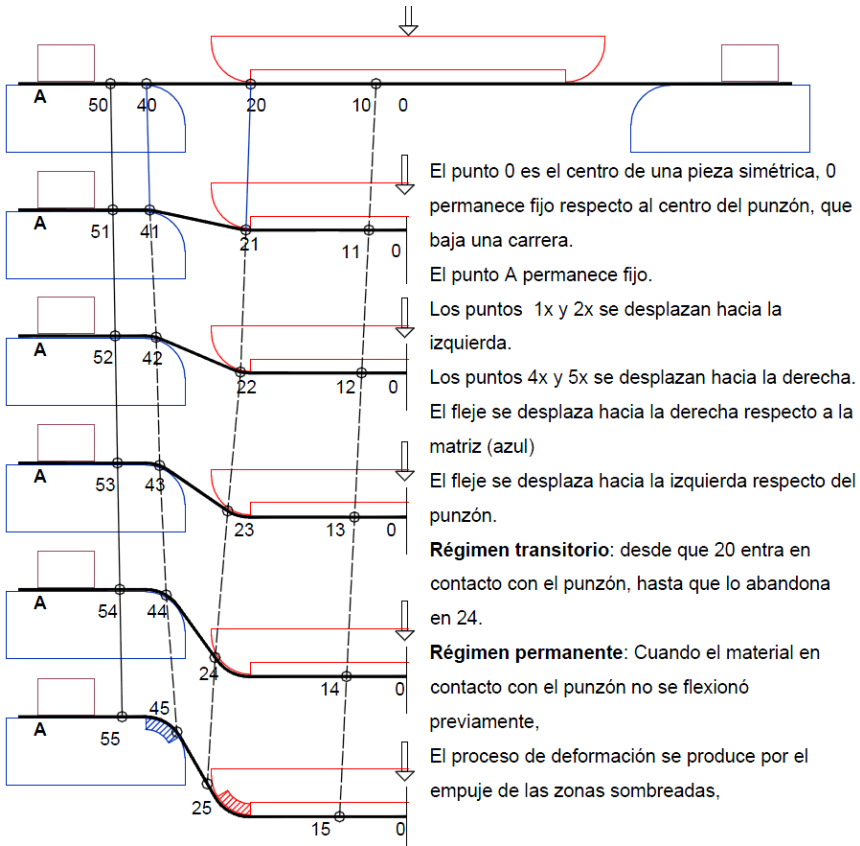


Figura 7. 16 Estepas en el proceso de conformado por estampación

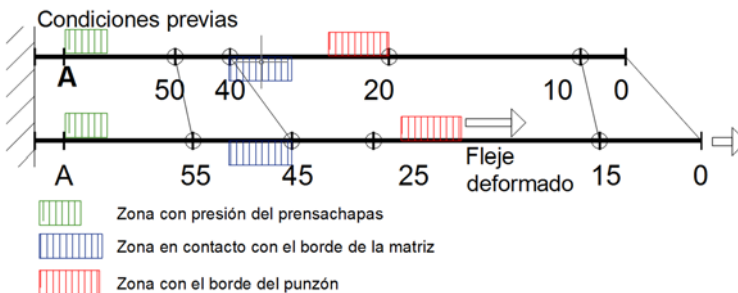


Figura 7. 17 Esquema de desplazamientos, la lámina desarrollada, respecto al origen fijo A

7.4 La simulación de la estampación.

En el apartado anterior se ha descrito, cualitativamente el proceso de estampación. La acción de los bordes de punzón y matriz son los responsables de la deformación.

El Sistema de Flexión Bajo tensión presenta un tipo de ensayo que simula el comportamiento del material con respecto a dichos bordes. Su funcionamiento general se ha descrito en apartados anteriores. A continuación se van a describir las opciones y las geometrías que permiten realizar mediciones.

El esquema siguiente, Figura 7. 18, indica las medidas de fuerza y las velocidades calculadas a partir de los datos obtenidos por del sistema de adquisición. Seleccionado un ángulo se genera una zona de contacto (sombreada) en la herramienta:

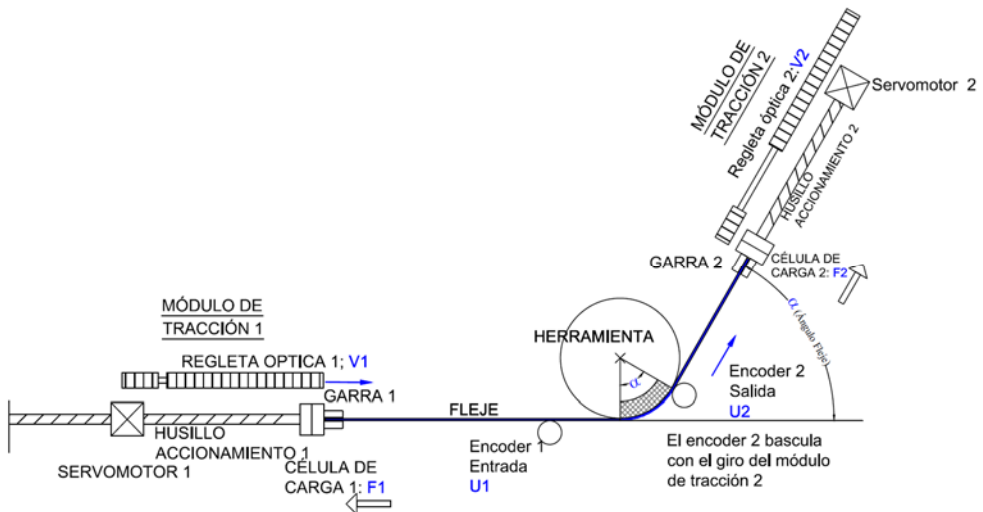


Figura 7. 18 Esquema del sistema SFBT

Las velocidades de movimiento V_1 y V_2 pueden definirse con precisión mediante el sistema de control, Figura 7. 18. En el apartado anterior se expresó que la lámina se mueve sobre el borde del punzón o la matriz.

Tomando el siguiente esquema, Figura 7. 19 , se calculó la longitud del fleje tras una carrera controlada.

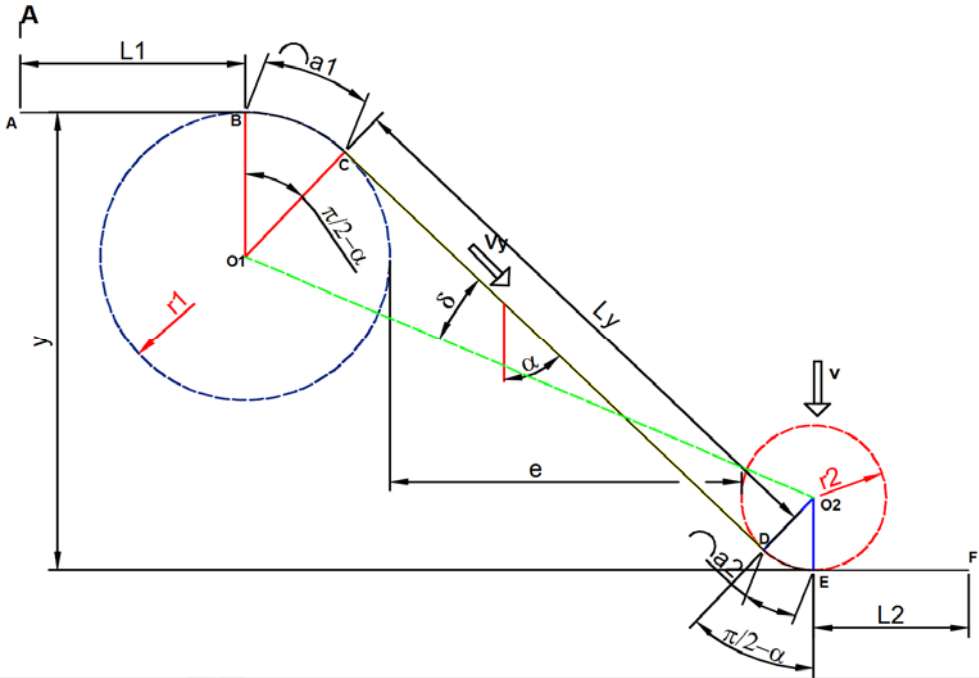


Figura 7. 19 Esquema geométrico del fleje en su proceso de deformación

En el esquema geométrico, Figura 7. 19 , L_1 es el tramo desde el punto con velocidad cero hasta el comienzo del radio de la matriz, el origen puede variar dependiendo de que el prensa-chapas permita algún movimiento. Las longitudes a_1 y a_2 son las de los arcos que se forman en el borde, y que dependen del ángulo α y los radios. L_y es el tramo entre los bordes, depende de los radios de borde r_1, r_2 . V_y es la velocidad a la que se alarga el fleje (en su totalidad). La carrera es y . La holgura entre matriz y punzón es e . L_t es la distancia entre los puntos B y E. Su variación es ΔL , Ecuación 7. 1.

$$\Delta L = \sqrt{(e + r_1 + r_2)^2 + (-r_1 - r_2 + t v)^2}$$

$$\cdot \sqrt{1 - \frac{(r_1 + r_2)^2}{((e + r_1 + r_2)^2 + (-r_1 - r_2 + t v)^2)}}$$

$$+ (r_1 + r_2) \left[\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) - 1 \right] - e$$

Ecuación 7. 1

A partir de la Ecuación 7. 1, es posible conocer mejor como varía la velocidad de alargamiento del tramo estudiado.

La siguiente gráfica, Figura 7. 20 presenta la evolución de la velocidad de estiramiento del tramo BE , V_y , dividida por la velocidad del punzón v , respecto al tiempo en segundos para velocidades del punzón $v= 1,5,10,50,100$ mm/s, respectivamente.

La velocidad de deformación afecta a todo el fleje, y requiere consideraciones posteriores.

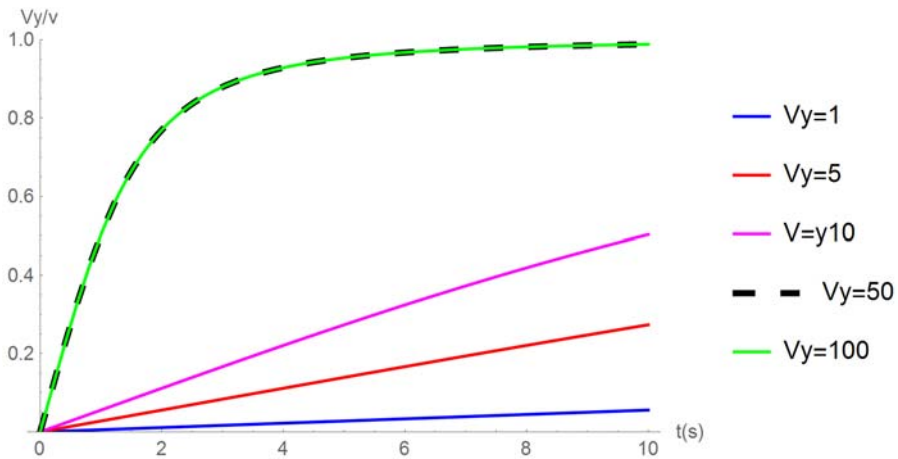


Figura 7. 20 Aceleración del tramo central del fleje (B-E)(L1=30mm, L2=90,e=100mm)

La longitud total del fleje varía continuamente durante el proceso de conformado, y afecta a todos los puntos situados entre A y 0.

7.4.1 La deformación perfecta.

Para hacer una primera aproximación, se considerará un caso en que no exista rozamiento, y que el material sea perfectamente flexible. La deformación calculada se distribuye uniformemente entre los dos extremos del material, de acuerdo con el siguiente esquema, Figura 7. 21.

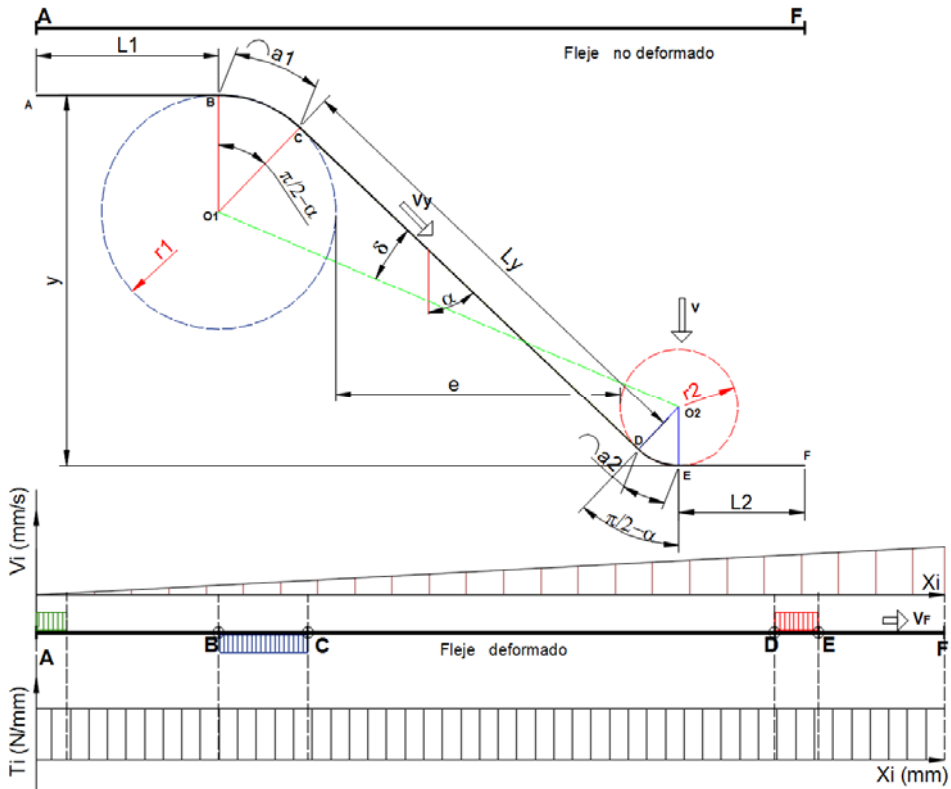


Figura 7. 21 Velocidad de deformación y Carga unitaria del fleje sin rozamiento. Caso ideal sin rozamiento y lámina perfectamente flexible.

La zona triangular representa la evolución de la velocidad instantánea, lineal para el caso de ausencia de rozamiento y si se desprecian los efectos de la flexión. Las zonas rectangulares, sombreadas de colores, representan los arcos en que existe contacto entre la lámina y las herramientas. La fuerza específica (fuerza por unidad de ancho) se distribuye uniformemente a lo largo de la lámina

La velocidad instantánea de cualquier punto dependerá de la velocidad instantánea del tramo central, y de la longitud total del fleje. Esta hipótesis representa la perfección en la deformación, dado que se deforman por igual todos los puntos.

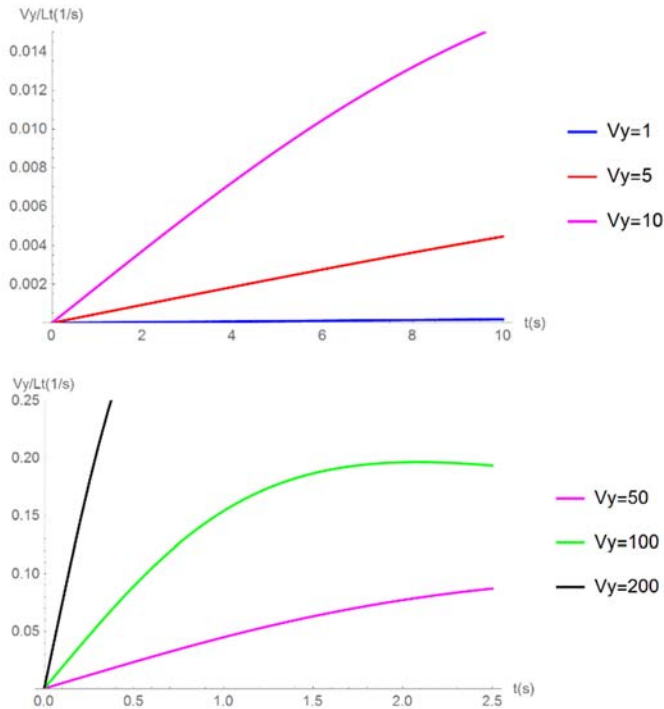


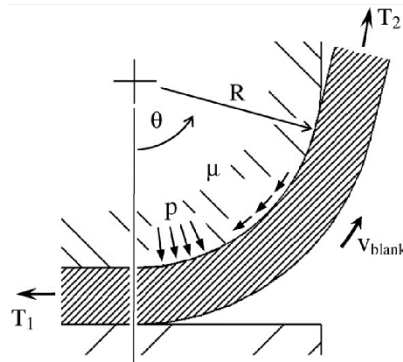
Figura 7. 22 Variación de la velocidad por unidad de longitud para diferentes velocidades del punzón, para $L1=30$, $L2=90$ y $e=150$.

El parámetro representado en la Figura 7. 22 es la velocidad de deformación relativa $\dot{\epsilon} = Vy/Lt$, que para una dimensión dada, aumenta con la velocidad del punzón, y para una velocidad determinada, aumenta al disminuir la longitud de la pieza conformada. El control de este parámetro reviste gran importancia en materiales sensibles a la variación de $\dot{\epsilon}$, dado que son necesarios mayores esfuerzos para el conformado, y el endurecimiento se produce más rápidamente

7.4.2 La deformación real.

La realidad dista de lo expresado anteriormente. Los materiales a ensayar requieren de un gran esfuerzo para su flexión. Es necesaria energía par estirar el material, y siempre existe rozamiento. El proceso de estampación es esencialmente un conjunto de estiramientos entre zonas curvas secuenciadas. En cada zona de contacto con una curvatura va a reproducirse el fenómeno de flexión baja tensión.

Las zonas rectas están sometidas a tracción simple. Las zonas curvadas experimentan la flexión como consecuencia de la carga de tracción en los extremos de la curvatura. Se ha considerado el análisis antes indicado de Marciniak y Duncan.



Fuente:(Pereira et al., 2009)

Figura 7. 23 Efecto de la zona de contacto sobre el fleje.

En la introducción se realizaron varios análisis sobre el modelo de polea plana. En el conformado puede servir de base para el análisis del fenómeno en los radios curvos del conjunto matriz-punzón.

La Figura 7. 23 indica un estado de desequilibrio de cargas, en que T_1 y T_2 son las cargas por unidad de ancho de fleje necesarias para que el fleje circule sobre la superficie curva a una velocidad V_{blank} . La diferencia $T_2 - T_1 > 0$ genera los siguientes efectos:

- Desplazamiento de la lámina sobre la superficie, contra el rozamiento.
- Curvado y enderezado sucesivo de las diferentes secciones que van pasando por el borde.
- Estiramiento de los tramos rectos
- Efectos superficiales: aplastamiento, rayado, desprendimientos.

A partir de estas ideas se va a completar el modelo del apartado anterior, que no tenía en cuenta estos efectos, se ha tomado como referencia los apartados 4.2.8 y 4.2.9 del libro (Marciniak et al., 2002b). Esta carga diferencial, desarrollada a lo largo del desplazamiento, representa la energía que se va consumiendo en cada uno de los efectos enunciados, más el calor desprendido.

La Figura 7. 24 presenta de forma cualitativa los efectos sobre la carga por unidad de ancho T (N/mm), el espesor t (mm), la deformación relativa principal ϵ_1 y v_i (mm/s) velocidad de desplazamiento de cada tramo respecto a un origen estacionario.

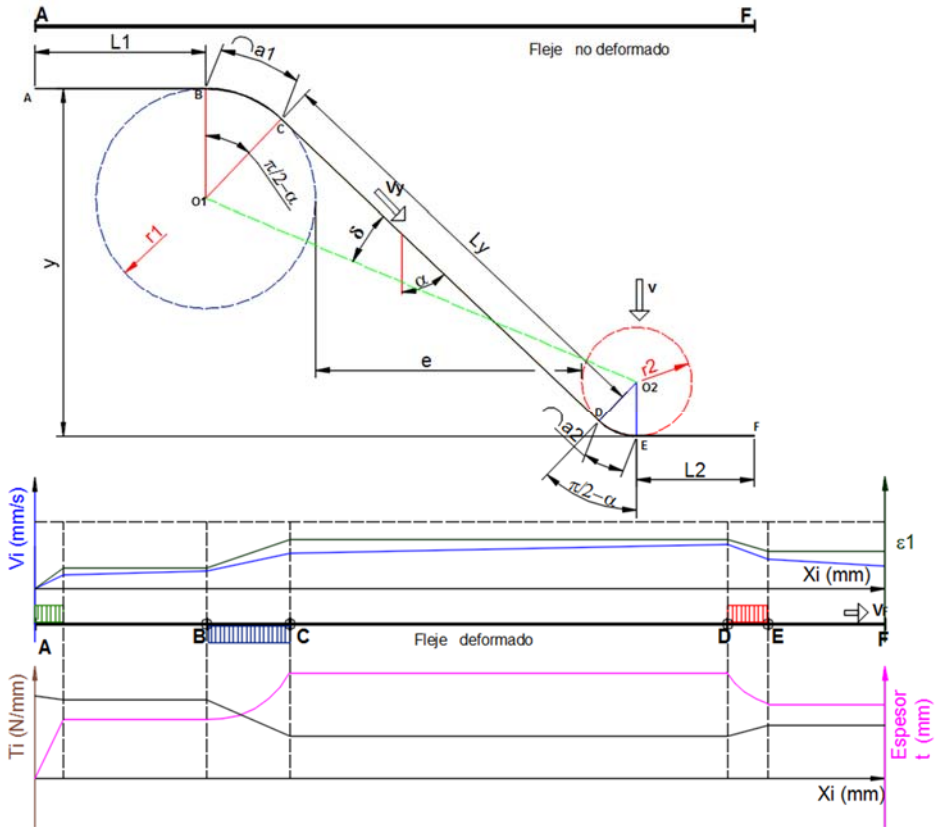


Figura 7. 24 Modelo de comportamiento idealizado del proceso de flexión bajo tensión

A la vista del modelo anterior, las zonas de curvatura son las que producen el arrastre en el conformado, el punzón es la acción, y la matriz hace de bastidor fijo. La fuerza neta entre ambos es la necesaria para el conformado, y la energía desarrollada en el proceso se distribuye en cada una de las fases de la estampación.

En el apartado 7.4.1. se supuso que no existía rozamiento ni rigidez, y los bordes tiraban en sentido contrario, produciendo la circulación de la lámina de forma uniforme en cuanto a tensión, deformación local y velocidad. En este apartado la energía necesaria para flexionar y enderezar el fleje en su circulación se resta de las cargas de estiramiento. Los rozamientos en los bordes frenan dicha circulación, restando fuerza cada vez que la lámina se encuentra con otro cambio de dirección.

Desde este modelo se aprecia que los efectos que absorban energía van en contra del conformado. La rigidez del material no es objeto de estudio, y su evaluación se ha realizado utilizando la ecuación de Swift (Y. S. Kim, 2004), que determina como F_B la carga necesaria para el curvado y enderezado de un fleje de ancho w y espesor t (a veces

$y)$, conociendo el valor del límite de fluencia del material σ_e . Anteriormente se han desarrollado modelos de rozamiento y su evaluación.

Los datos que se han declarado en la introducción para el análisis son:

- Dimensiones de la lámina: Ancho w (mm), Espesor t (y) (mm). Se medirán previamente
- Fuerza activa de arrastre F_2 (N), Fuerza de retención F_1 (N) (Ambos son medida directa del equipo sobre la base de tiempos)
- Velocidad a la que sale el material de la herramienta U_2 (mm/s)
- Velocidad a la que entra el material en la herramienta U_1 (mm/2)

Ambos valores de velocidad se obtendrán a partir de los datos de desplazamiento dados por los encoders y las reglas ópticas, mediante cálculo y el conocimiento de la geometría exacta de cada probeta.

- Deformaciones a la entrada y salida de la pieza.

Los valores de deformación relativa longitudinal ε_1 y ε_2 se obtendrán por medición de las longitudes de tramos calibrados antes y después del ensayo

- Radio de la herramienta r (mm)
- Ángulo de contacto Θ que se determinará en grados sexagesimales

7.1.3 Geometría de la medición.

Las células de carga siempre están alineadas con el fleje, dado que están sobre el bastidor que gira y determina el ángulo; de modo que su lectura es la fuerza alineada con la tangente a la herramienta (entrada o salida).

El ángulo de contacto es una variable que determinará la superficie teórica de contacto, y se fija haciendo bascular el módulo antes de realizar la medición.

Para la medición del desplazamiento del fleje antes y después de la herramienta se han utilizados los encoders, colocados en balancines. El contacto entre la rueda de fricción y el fleje se garantiza mediante el tensado con resortes.

Para la medición de los desplazamientos de los extremos de los flejes se han utilizado las regletas ópticas, que siempre están alineadas con los actuadores.

Par cálculos posteriores es necesario conocer las velocidades de entrada y salida del fleje exactamente en el punto de tangencia. Por motivos constructivos no se han podido colocar los encoders en el punto de tangencia para todos los casos, por lo que se detallan los cálculos a realizar, siguiendo el esquema de la Figura 7. 25.

El encoder 1 quedó situado a 25 mm del punto de entrada del fleje, que es permanente.

El encoder 2 quedó situado en el punto de salida para los ángulos de 30 y 60 °, y desplazado ligeramente en la dirección vertical en el ángulo de 90°.

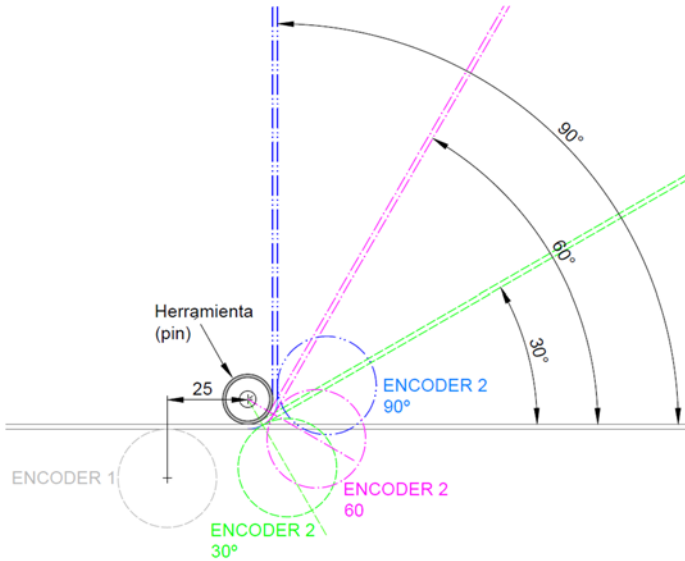


Figura 7. 25 Situación de los dos encoders al fleje en los tres ángulos de estudio.

En la Figura 7. 25 se presentan los encoders en las posiciones relativas respecto al centro del pin. A efectos de medición, se presenta en la siguiente Figura 7. 26 la posición desarrollada y las relaciones geométricas con respecto a una probeta de dimensiones genéricas.

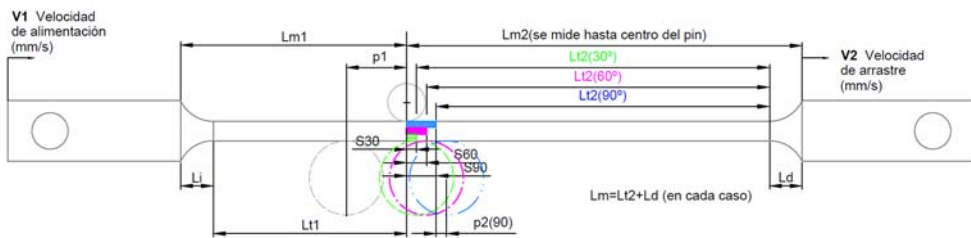


Figura 7. 26 Definición geométrica de la probeta para la determinación de las velocidades.

La Figura 7. 26 indica las dimensiones tomadas sobre la probeta a fin de determinar las velocidades U_1 y U_2 en los extremos de la probeta. Con estos datos y la longitud en contacto se puede evaluar la velocidad de deformación relativa (promedio) en la zona de presión. L_{m1} y L_{m2} se miden desde el canto de la puntera hasta el centro del pin.

S(30) ,S(60) y S(90) son las longitudes de arco de las zonas en contacto con la herramienta. Las otras dimensiones son evidentes. Todas ellas medidas en mm.

Con esta definición y los desplazamientos se determina en cualquier instante la posición de las probetas con respecto al punto de entrada al pin. La Figura 7. 27 indica un esquema de la variación de velocidades ente los extremos de la probeta.

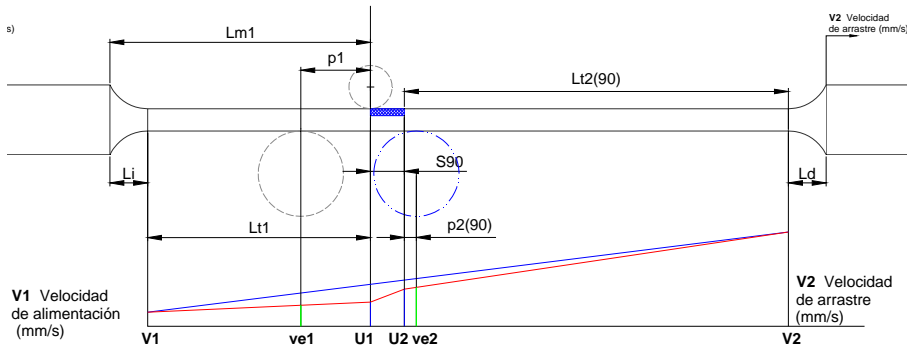


Figura 7. 27 Distribución de velocidades para la probeta con ángulo de 90°

En la Figura 7. 27 se presentan dos líneas de distribución de velocidad a lo largo de la probeta. La línea inclinada azul indica la distribución obtenida si no hubiese otros esfuerzos más que el simple alargamiento, con pendiente constante, es el caso de deformación perfecta. Las ordenadas indicarían la velocidad de cada punto respecto a un bastidor fijo, o con una velocidad V1.

La línea quebrada roja indica el efecto de retención que produce el contacto con la herramienta, se definen tres tramos. Comenzando desde la izquierda, V1 es la velocidad de entrada de material, ve1 es el cálculo de la velocidad realizado con el encoder 1, U1 es la velocidad calculada para el punto de entrada a la herramienta, asumiendo una ley lineal entre los tres puntos indicados, y el conocimiento, por medición, de la geometría.

El tercer tramo de color rojo indica, de izquierda a derecha, U2 es la velocidad de salida (puede corresponder con la velocidad generada por el punzón), ve2 es la velocidad calculada del encoder 2 y V2 es la velocidad de salida obtenida de la regleta. Se ha asumido una ley lineal en el tercer tramo.

En el esquema que se propone, el tramo de la izquierda la inclinación de la línea roja es menor que la azul (que representa el conformado ideal, no rozamiento y perfecta flexibilidad). En U1 se ha calculado la reducción de velocidad. En U2 se inicia otro tramo sin obstáculos y un nuevo crecimiento lineal hasta el extremo del material.

El tramo central es el de contacto con la herramienta. Es la zona donde se produce la acción más severa: Flexión, tracción, compresión sobre la superficie y acción sobre la rugosidad.

Se ha definido velocidad de deformación relativa como la velocidad de deformación dividida por la longitud deformada para indicar la severidad de una deformación.

7.4.3 Cinemática de la probeta.

En las figuras anteriores se han presentado tramos con variaciones lineales de velocidad. Se van a presentar ecuaciones que las definan, siendo las longitudes en mm, y los tiempos en segundos.

Dimensiones y velocidades:

- V1 Velocidad de alimentación 1 (calculada desde medidas de la regleta 1)
- ve1 Velocidad del encoder 1(calculada)
- U1 Velocidad de entrada a la herramienta, Ecuación 7. 2
- ve2 Velocidad del encoder 2/(calculada)
- V2 Velocidad de alimentación 1 (calculada desde medidas de la regleta 2)
- U2 Velocidad de salida de la herramienta, Ecuación 7. 2
- Lm1 Longitud medida desde el extremo de la cabeza y el centro del pin
- Li Longitud desde el extremo de la cabeza hasta el comienzo del tramo recto.
- p1 Distancia entre el centro del encoder 1 y el centro del pin.
- p2(i) Distancia entre el centro del pin y el encoder 2 en las posiciones i=30,60,90
- Ld Longitud desde el extremo de la cabeza hasta el comienzo del tramo recto.
- S(i) Longitud del arco de contacto i=30,60,90

Relaciones geométricas y cinemáticas, Ecuación 7. 2:

$$\frac{Lt1}{U1 - V1} = \frac{Lt1 - p1}{ve1 - V1} \rightarrow U1 = \frac{p1V1 + (Li - Lm1 + tV1)ve1}{Li - Lm1 + p1 + tV1}$$

$$\frac{V2 - U2}{Lt2} = \frac{ve2 - U2}{p2(i)} \rightarrow U2 = \frac{p2(i)V2 + (Ld - Lm2 - tV2)ve2}{Ld - Lm2 + p2(i) - tV2}$$

Ecuación 7. 2

Las deformaciones relativas instantáneas pueden obtenerse con facilidad de la medida directa realizada por las reglas ópticas y los encoders, Ecuación 7. 3 .

Sean las medidas

- ΔO₁ Paso incremental medido por la regla óptica 1
- ΔO₂ Paso incremental medido por la regla óptica 2
- Δe₁ Paso incremental medido por el encoder 1
- Δe₂ Paso incremental medido por el encoder 2
- ΔL₁ Paso incremental calculado a la entrada de la herramienta, ref. Ecuación 5. 47
- ΔL₂ Paso incremental calculado a la salida de la herramienta, ref. Ecuación 5. 47
- Lt₁₀ Longitud inicial del tramo izquierdo
- Lt₂₀ Longitud inicial del tramo derecho

El cálculo de las deformaciones relativas nominales instantáneas, e_{1k} y e_{2k} , puede realizarse con las siguientes ecuaciones, para un instante k (segundos), dado que la adquisición se ha realizado a pasos incrementales i .

A estas cantidades debería añadirse las pequeñas deformaciones elásticas debidas a la precarga. Las deformaciones verdaderas se calcularán con la ecuación logarítmica

$$e_{1k} = \frac{\Delta L_{1k} - \Delta O_{1k}}{Lt_{10} - \sum_{i=1}^k \Delta O_{1k}} ; e_{2k} = \frac{\Delta O_{2k} - \Delta L_{2k}}{Lt_{20} + \sum_{i=1}^k \Delta L_{2i}} ; \begin{matrix} \varepsilon_{1k} = \ln(1+e_{1k}) \\ \varepsilon_{2k} = \ln(1+e_{2k}) \end{matrix} \quad \text{Ecuación 7. 3}$$

Un valor aproximado puede hacerse utilizando el cálculo de desplazamientos realizados por los encoders, es la metodología que utilizo W.R.D.Wilson .

El cálculo de la velocidad de deformación relativa $\dot{\varepsilon}$ promedio a lo largo del pin es inmediata

$$\dot{\varepsilon} = \frac{U_2 - U_1}{S(i)} \quad \text{Ecuación 7. 4}$$

7.5 El simulador en funcionamiento.

Se han descrito las diferentes partes del simulador. A continuación se va a detallar el procedimiento de medida que se utilizó.

7.5.1 El sistema de adquisición y acondicionamiento de señal. Los datos de salida.

El sistema de medición tiene como nudo central el programa Catman AP y el equipo de amplificación QuantumX, ya detallados, y a continuación se va a explicar como se utilizó.

Todos los transductores se conectaron según las instrucciones de los fabricantes. Cada elemento dispone de una hoja de características que se introdujeron en la base de datos del sistema de adquisición.

Los encoders incrementales disponen de ruedas de fricción en sus extremos, con elementos elastoméricos; con objeto de comprobar su diámetro con las ruedas tensadas contra el fleje tensado se realizaron ensayos de desplazamiento para comprobar la calibración, obteniéndose un diámetro de 26,5 mm.

Antes de explicar los pasos seguidos en el proceso de ensayo, se presentan una serie de gráficos obtenidos a partir de las medidas directas, correspondientes a la probeta TWIP44. Las fuerzas y su diferencia son resultado directo del acondicionador de señal.

Los resultados de velocidades se han obtenido como cociente incremental en cada registro (línea de la hoja de Excel). Figura 7. 28, Figura 7. 29 Figura 7. 30 .

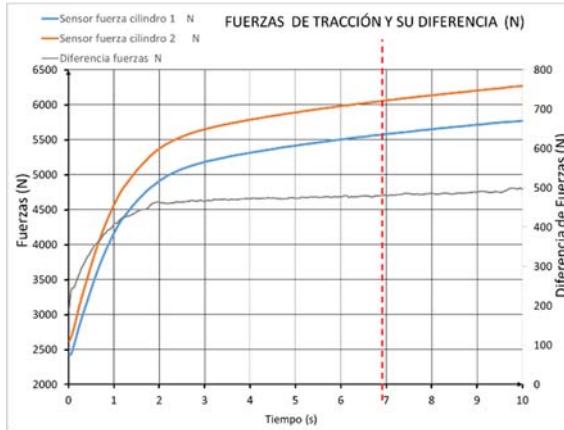


Figura 7. 28 Resultados de la medición simultánea de la fuerza de ambos actuadores

Se ha utilizado una frecuencia de muestreo de 50 muestras por segundo. Dada la duración de los ensayos, esta frecuencia daba archivos de datos de un tamaño aceptable para utilizarlos con Excel. La Figura 7. 28 indica las fuerzas activas de los actuadores.

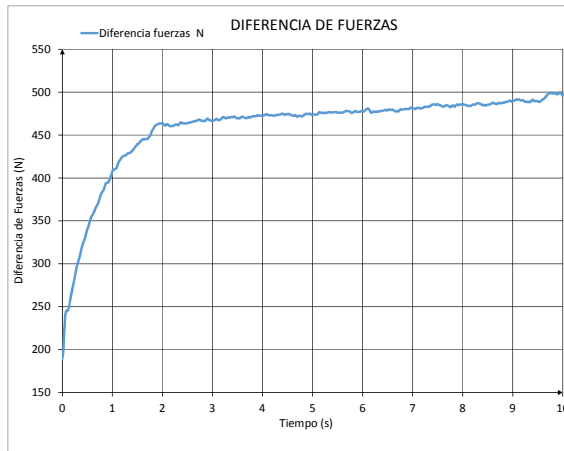


Figura 7. 29 Diferencia de fuerzas entre los actuadores

La Figura 7. 29 es la salida diferencia de fuerzas obtenida del Catman AP, y la Figura 7. 30 indica las velocidades calculadas de las dos reglas ópticas y los dos encoders, con línea roja se aprecia la diferencia de velocidades de los encoders, muy próxima a la que experimentan los puntos de entrada y salida del fleje sobre la herramienta

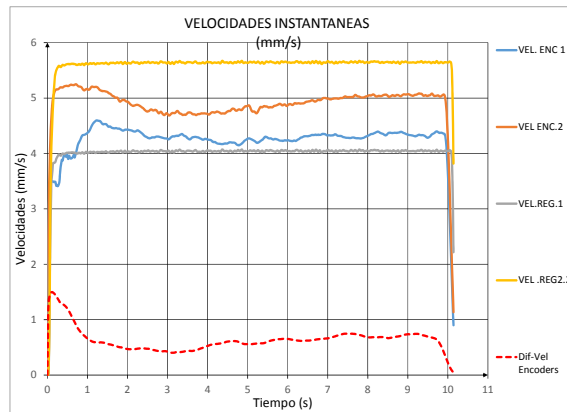


Figura 7. 30 Resultados calculados de las velocidades de los cuatro dispositivos de medida des desplazamiento.

7.5.2 El sistema de adquisición y acondicionamiento de señal. Pasos en los ensayos.

Cada ensayo estaba compuesto por la carga de la probeta en el simulador, la activación del sistema de medición, la simulación del conformado, que duró en esta investigación entre 3 y 10 segundos, el volcado de datos y la descarga de la probeta ensayada.

En este apartado se va a detallar el proceso de medición.

Operación previa a cada ensayo fue situar en el ángulo adecuado el Módulo de medida 2. Se habían seleccionado tres ángulos 30,60 y 90, consecuencia del diseño de experimentos factoriales realizado. Así mismo se habían seleccionado las velocidades y tiempo de ensayo en el sistema de control.

Antes de cargar la probeta se realizó en todos los casos una puesta a cero de todos los transductores, icono *Execute* de la Figura 7. 31.

Tras cargar la probeta se realizaba un tensado de la misma a una carga aproximada para que no hubiese holguras, generalmente alrededor de 1800 N en el actuador 2.

Antes de iniciar la simulación, se volvían a poner a cero los encoders y las regletas, u se ejecutaba el ensayo activando el icono de Start, Figura 7. 31 .

Al acabar el desplazamiento se marcaba el icono de final, y se guardaba el archivo de datos.

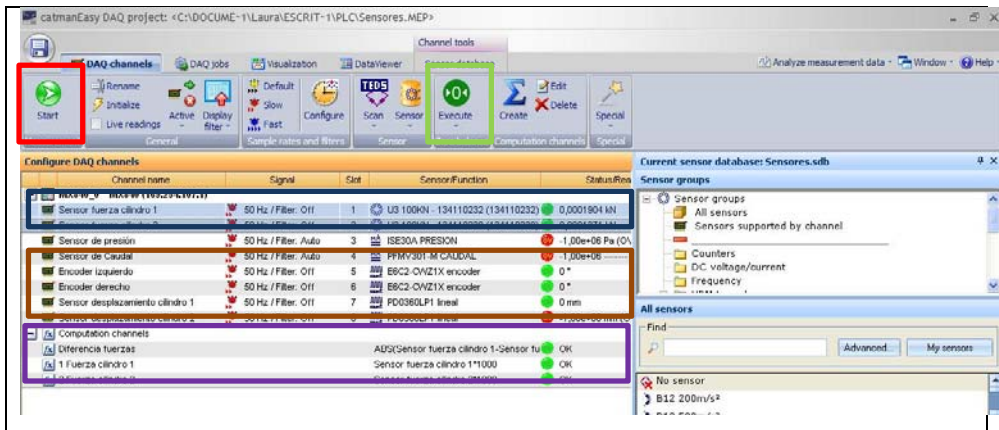


Figura 7. 31 Pantalla del control de la adquisición de Catman AP

La Figura 7. 31 indica en recuadros las diferentes zonas. El recuadro verde es el control de puesta a cero. El recuadro azul indica los transductores de fuerza. El recuadro marrón indica los transductores de desplazamiento. El recuadro magenta indica los cálculos programados que aparecerán en el fichero de salida. El recuadro rojo indica el control de inicio y final del ensayo. Al darlo por acabado aparece un menú de guardado del archivo Excel de datos.

7.5.3 El funcionamiento del simulador.

El sistema de simulación de Flexión Bajo Tensión se detalló al comienzo de este capítulo.

El módulo 1, es siempre horizontal, y en la actual programación hace las funciones de retención. El módulo 2 es basculante, pudiendo tomar cualquier ángulo entre 0° y 90° con la horizontal. Antes de realizar la simulación. Se ha de colocar en la posición programada. Los actuadores se colocarán en una posición que permitan desplazar la carrera programada.

Para realizar todas las operaciones se dispone de un programa de control sobre un sistema propio de Omron. A continuación se presenta la pantalla de control.

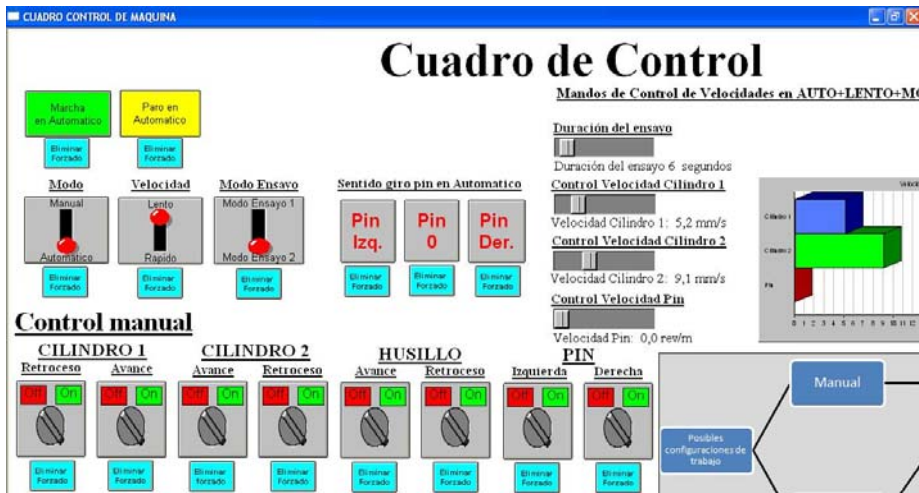


Figura 7.32 Cuadro de control del ensayo de simulación SFBT

El cuadro de control utilizado permite programar las velocidades de los diferentes actuadores, así como el tiempo de ensayo. El posicionamiento angular del Módulo de medida 2 solamente puede hacerse manualmente.

El sistema dispone de seguridades de funcionamiento de los motores dentro del programa de control.

7.6 Conclusión

Se dispone de un sistema que simula el conformado por estampación en condiciones controladas.

III. Resultados

Capítulo 8

Resultados. Estudio del DP600 (Flinsa)

Resumen:

El primer grupo de probetas va a ser sometido a la simulación del conformado. Se dispone de un número reducido de elementos de ensayo para el “Diseño de Experimentos Factorial”, que en este caso será fraccional. Se declaran los parámetros que se obtiene del sistema de medida, y a partir de ellos, utilizando el modelo de lámina perfecta, se definen hasta 12 parámetros candidatos a evaluar la diferencias entre los lubricantes.

Tras los resultados de los ensayos, se aplican a varios de los parámetros propuestos. Se discuten los resultados para decidir la sección de la probeta y las velocidades y tiempos de simulación.

8 Los resultados del DP600(Flinsa).

La empresa Flinsa suministró una cantidad limitada de fleje de acero DP600 de Arcelor, se llegaron a obtener 38 probetas utilizables.

Con esta cantidad limitada se planteó un estudio previo, con el fin de establecer un procedimiento inicial que permitiese obtener resultados del sistema de simulación.

Los objetivos iniciales fueron:

Establecer velocidades de entrada y salida de los actuadores.

Verificar el funcionamiento de todos los sistemas.

Determinar la frecuencia de muestreo necesaria para obtener resultados fiables.

Determinación el ancho de la probeta que pudiese ser deformado por el simulador llegando a la plastificación. En unas pruebas previas el sistema entraba en alarma alrededor de 8000 N (los diseñadores habían tomado un margen del 20% para esta fase del prototipo).

Ante la eventualidad de errores, se había utilizado una herramienta de prueba (rodaje), dejando par estudios posteriores una herramienta templada y rectificada.

También fue objetivo de esta primera experimentación el adquirir habilidad en el proceso de ensayo.

Como experimento complementario, se midieron las rugosidades antes y después del ensayo de conformado de todas las probetas.

8.1 La Herramienta de conformado.

Se ha caracterizado la superficie de la herramienta utilizada, se ha medido la rugosidad tanto longitudinal como transversal antes y después de su utilización. No había diferencias, dado que esta herramienta no templada ya había sido utilizada con unas 100 probetas anteriores.



Figura 8. 1 Caracterización de la rugosidad. Herramienta de rodaje

Las mediciones se realizaron en 12 tramos, siendo estos tanto longitudinales como transversales. Para cada tipo se han tomado tres tramos sobre la generatriz (A, B,C) y en los cuatro cuadrantes(1,2,3 y 4)

Los resultados detallados se dan en el Anexo A.

Los valores encontrados fueron:

Rugosidad media longitudinal $R_a = 1,44 \mu\text{m}$, $\sigma_a = 0,37 \mu\text{m}$ ($\lambda_c = 0,4 \text{ mm} \times 5$)

Rugosidad eficaz longitudinal $R_q = 2,135 \mu\text{m}$, $\sigma_a = 0,6884 \mu\text{m}$ ($\lambda_c = 0,25 \text{ mm} \times 2$)

En la Figura 8. 2 Figura 8. 3 se aprecian los perfiles de las zonas medidas con máxima y mínima rugosidad longitudinal y transversal, tomando como referencia el eje longitudinal de la herramienta.

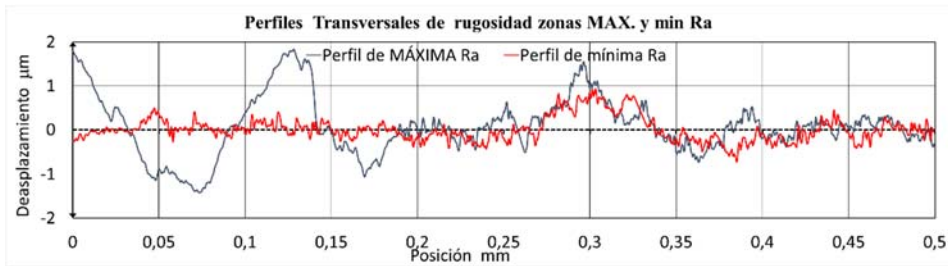


Figura 8. 2 Perfiles de rugosidades transversales

En el caso de la rugosidad longitudinal:

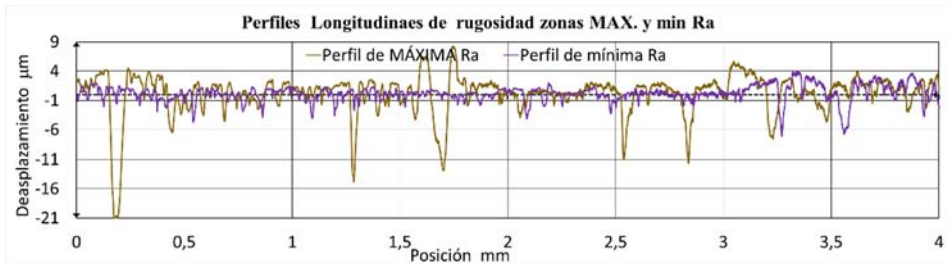


Figura 8. 3 Perfiles de rugosidades longitudinales

8.2 Las probetas

El material utilizado tiene un ancho alrededor de 8 mm, con un espesor de 0,95-0,98 mm, y recubrimiento de Zinc (valores detallados en el Anexo A).

Las características del material, obtenidas en la Máquina Universal de la EPSA fueron las siguientes:

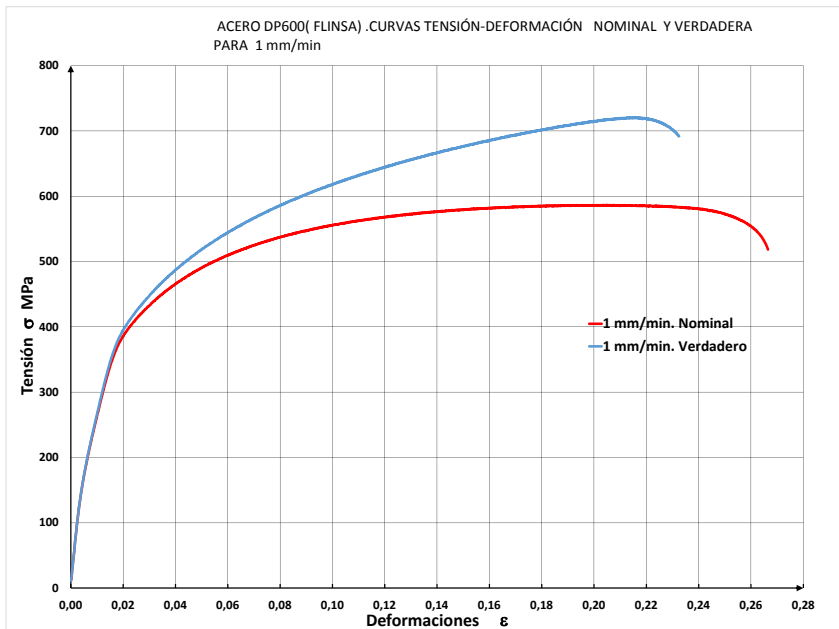


Figura 8. 4 Curva Tensión-Deformación Nominal y Verdadera DP600

La Figura 8. 5 indica las probetas que se obtuvieron para esta investigación.



Figura 8. 5 Conjunto de probetas DP600. Pruebas iniciales

8.3 Los Lubricantes.

Se han denominado

Lubricante 1: Houghto Draw B 75 Galv. (Viscosidad dinámica a 23°C 150 cP)

Lubricante 2 : Houghto Draw S130. (Viscosidad dinámica a 23°C 30 cP)

8.4 Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos factoriales se realizó en la primera instancia mediante el programa Design Expert, sin embargo se continuó utilizando el programa Statgraphics que incorpora todo el paquete estadístico en una única herramienta.

8.4.1 Variables de Ensayo

La velocidad de los accionamientos determinará la velocidad de deformación de la zona deformada. Las fuerzas producidas son consecuencia de la deformación experimentada, y siguen la curva σ - ε correspondiente a la velocidad de deformación instantánea.

El ángulo de abrazamiento, determinará la presión de contacto y la deformación acumulada para una carrera dada.

El tipo de lubricante, y su resultado en cuanto a fricción, que es el objetivo central de este trabajo.

El tiempo de ensayo, que determinará las fuerzas y deformaciones máximas.

8.4.1.1 La velocidad de ensayo.

El simulador puede mover los accionamientos con velocidades de hasta 25 mm/s. El programa de diseño de experimentos requiere de al menos 3 niveles para obtener superficie de respuesta (Montgomery, 2002).

La velocidad del actuador de entrada fue de 0,5mm/s. Se han seleccionado para el actuador de salida 25,5 , 15,5 y 5,5 mm/s, que representan velocidades diferenciales entre actuadores de 25, 15 y 5 mm/s, adecuadas para los requerimientos del programa estadístico.

El tiempo de ensayo sería distinto en cada velocidad, y determinado por el alargamiento máximo indicado por la curva característica. Para estas velocidades los tiempos fueron respectivamente 1, 2 y 4 segundos. Estos tiempos se correspondían con deformaciones de algo más del 10% sobre la longitud de la probeta, lejos de la zona de pérdida de estabilidad que podría estar alrededor del 18%. Se consideraron tiempos seguros para llegar a una importante deformación plástica sin rotura.

Las mediciones de resultados se realizaron en un desplazamiento de 15 mm. Para ellos se tomaron los valores de fuerza en los instantes 0,6 s, 1 s y 3 s, con las velocidades decrecientes.

8.4.1.2 El ángulo de ensayo.

La mayoría de los equipos encontrados en la bibliografía trabajan con un único ángulo de 90°. Otros ángulos podrían dar información de cómo se deforma el material en diferentes condiciones. Los ángulos seleccionados fueron de 90°, 60° y 30°.

8.4.1.3 *Los lubricantes.*

La estrategia de mejora que se propone es la comparación de lubricantes entre sí, y seleccionar el mejor en cuanto a la respuesta de las superficies.

Se denominaron del siguiente modo Lubricante 1 (Hughto Drive B75 Galv), Lubricante 2 (Hughto Drive S130), cedidos por gentileza de la empresa Flinsa, las viscosidades dinámicas ensayadas en laboratorio fueron respectivamente de 150 cP y 30 cP a una temperatura de 24°C, muy próxima a la de ensayo. Por lo que se consideraron valores de ensayo.

En este estudio preliminar se añadió en ensayo si lubricación, a fin de obtener otro factor para comparar su efecto.

8.4.2 *El diseño factorial del experimento.*

Se disponía de 3 factores a tres niveles. La realización del diseño factorial completo requiere de 3³ ensayos para cada experimento. Al disponer de 38 elementos, se forzó a un diseño factorial fraccional de 19 ensayos, con dos bloques iguales. El diseño se realizó con el programa Design Expert indicando la opción de aleatorizar el orden de ejecución.

Se obtuvo el siguiente orden para cada réplica.

Tabla 8. 1 Variables de ensayos de cada bloque

Ensayo N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Vel. Entrada (mm/s)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vel. Salida (mm/s)	15,4	25	15,6	5,4	15,6	5,4	15,4	15,4	15,4	25,5	25,5	25,5	5,4	5,4	15,4	5,4	25,5	5,4	25,5
ANGULO (°)	60	90	30	60	60	90	30	30	90	30	60	60	60	30	60	60	60	90	90
LUBRICANTE	2	NO	NO	1	NO	1	2	1	2	1	2	NO	2	1	1	NO	1	NO	2

8.4.3 *Datos que suministra el sistema de adquisición.*

Los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos se recogen en una hoja de cálculo descargada desde el sistema de acondicionamiento Catman AP, y tratados posteriormente con Excel. Las diferentes columnas indicaron las fuerzas instantáneas, así como los ángulos de encoder y posiciones de regletas ópticas. Ya se presentaron en el 7.2 estos datos. A continuación se indican, y posteriormente se transforman otros valores de comparación.

- F1 Fuerza del actuador 1, de retención (N)
- F2 Fuerza del actuador 2 de estiramiento (N)
- C1 Posición de la regleta óptica 1 (mm)
- C2 Posición de la regleta óptica 2 (mm)
- G1 Ángulo del encoder 1 (grados sexagesimales)
- G2 Ángulo del encoder 2 (grados sexagesimales)

El sistema de adquisición discretiza el tiempo en pasos incrementales exactamente iguales, que sirven como base de integración o derivación de paso constante.

8.4.4 Parámetros de caculo para los experimentos factoriales.

La calidad en cuanto al lubricante indica reducción del rozamiento (la calidad superficial se estudia en otros apartados). Tal como se vio en el modelo desarrollado en el capítulo anterior, existe una tensión tangencial del contacto por fricción τ_f , Ecuación 5. 3. A mayor tensión entre superficies, mayores pérdidas de energía por rozamiento, por lo que los parámetros constitutivos de esta tensión pueden ser parámetros válidos para evaluar el comportamiento.

Así mismo se producirá un efecto sobre la superficie de la pieza, que puede ser evaluado como posible parámetro.

Se consideró un conjunto de posibles parámetros que se detallan en los apartados siguientes.

8.4.4.1 Grupo de fuerzas y tensiones:

Diferencia de fuerzas para generar el movimiento, valido para probetas de las misma sección (incorpora la fuerza para flexionar y enderezar la lámina) (N)

$$F2-F1 \quad \text{Ecuación 8. 1}$$

Diferencia de fuerzas que provocan el arrastre por fricción. (N)

$$F2-F1-FB \quad \text{Ecuación 8. 2}$$

Fuerza de arrastre específica (MPa)

$$\frac{F1-F2}{w_2 \cdot y_2} \quad \text{Ecuación 8. 3}$$

Diferencia de Tensiones o Fuerza de arrastre específica de rozamiento (MPa)

$$\frac{F1 - F2 - FB}{w_2 \cdot y_2} \quad \text{Ecuación 8. 4}$$

Fuerza de rozamiento por unidad de ancho (N/mm)

$$\frac{F1 - F2 - FB}{w_2} \quad \text{Ecuación 8. 5}$$

Las tensiones que soportan los ramales se calcularon en valores nominales, conociendo el ancho y espesor de la probeta, y la fuerza instantánea obtenida de la medición.

w_1, w_2 Anchos iniciales de las probetas, de ambos ramales mm

y_1, y_2 Espesores del fleje, de ambos ramales mm

Los valores de las tensiones en un instante i son

$$\sigma_1 = F_1 / (w_1 \cdot y_1); \sigma_2 = F_1 / (w_2 \cdot y_2) \quad \text{Ecuación 8. 6}$$

8.4.4.2 Grupo de velocidades y deformaciones.

Los cálculos de velocidades se hicieron como velocidades promedio en cada paso o grupo de pasos. Siendo Δt un paso incremental constante, con $n > 1$, celdas consecutivas, O es el parámetro de posición recogido en el la hoja de cálculo resultado del ensayo, y S la velocidad instantánea promedio.

En caso de que n sea un número impar:

$$S_i = \left| \frac{\Delta O_{i-\frac{n-1}{2}} - \Delta O_{i+\frac{n-1}{2}}}{(n-1)\Delta t} \right| \quad \text{Ecuación 8. 7}$$

Para para n número par:

$$S_i = \left| \frac{\Delta O_{i-1} - \Delta O_{i+n-1}}{(n-1)\Delta t} \right| \quad \text{Ecuación 8. 8}$$

Con este procedimiento de han calculado todas las velocidades indicadas en 7.4.3:

- V1 Velocidad de alimentación 1 (calculada desde medidas de la regleta 1)
- ve1 Velocidad del encoder 1(calculada)
- ve2 Velocidad del encoder 2/(calculada)
- V2 Velocidad de alimentación 1 (calculada desde medidas de la regleta 2)

El valor de la velocidad de deformación relativa $\dot{\epsilon}$ se puede calcular con la Ecuación 7. 4, que relaciona la velocidad diferencial entre los extremos de la zona de contacto de la herramienta, con la longitud del arco que determinan.

El modelo de deformación perfecta prevé una deformación relativa igual en todo el fleje, así como una velocidad con aceleración uniforme respecto del extremo estático. Cuando aparece la fricción se genera una fuerza contraria a la del movimiento, que rompe la linealidad única del sistema, apareciendo tres tramos, de acuerdo con el modelo presentado en la Figura 7. 24.

Una mayor diferencia de velocidades en la zona de contacto, se corresponde con unas peores condiciones de deslizamiento, dado que existen tres pendientes de velocidad, Figura 7. 24, pueden obtenerse candidatos a representar el fenómeno.

La *velocidad de deformación relativa* indica lo rápido que se deforma un elemento unitario, para hacerlo específico, se referirá a la unidad de diferencia de velocidades entre los extremos de la probeta V_1 y V_2 ; U_1 y U_2 se calcularon según la Ecuación 7.2:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{U_2 - U_1}{\Theta \frac{d}{2}}; \quad \frac{\dot{\varepsilon}}{V_2 - V_1} = \frac{2(U_2 - U_1)}{\Theta.d.(V_2 - V_1)} \quad \text{Ecuación 8.9}$$

Si se toma la Figura 7. 24, y se incorpora la velocidad que tendría el fleje a en un instante dado t , en el punto de entrada de la herramienta, se define la velocidad U_e , como se detalla en la Figura 8. 6 .

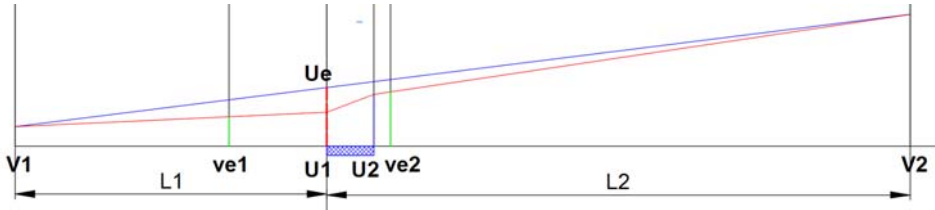


Figura 8. 6 Perfil de velocidades del fleje

La velocidad en el extremo izquierdo es V_1 y en el extremo derecho V_2 , siendo $V_2 - V_1$ la velocidad relativa ente ambos. Un punto situado en un instante t en una posición $L_1 = L_{10} - V_1.t$, donde L_{10} es la longitud inicial del tramo izquierdo de la probeta, Tendría una velocidad lineal U_e , en el modelo ideal, sin embargo se ha calculado una velocidad U_1 .

$L_2 = L_{20} + V_2.t$ es la distancia desde el extremo de la derecha al inicio del contacto.

La zona sombreada en azul, Figura 8. 6 , es la zona de contacto. La mayor proximidad de U_1 a U_e indica una mayor eficiencia. Tomado en valores relativos, la expresión toma la siguiente forma.

$$\frac{U_e - U_1}{U_e} = \frac{L_{20}(V_1 - U_1) + L_{10}(V_2 - U_1) + tU_1(V_1 - V_2)}{L_{20}V_1 + L_{10}V_2} \quad \text{Ecuación 8.10}$$

Para unas mismas condiciones de ensayo, y dimensiones de la probeta, se propone la variación de velocidad referida a la diferencia de velocidades entre los extremos. Cuanto menor sea, mayor será la eficiencia.

$$\frac{U_e - U_1}{V_2 - V_1} = \frac{\frac{L_{20}V_1 + L_{10}V_2}{L_{10} + L_{20} + t(V_2 - V_1)} - U_1}{(V_2 - V_1)} \quad \text{Ecuación 8.11}$$

Cuando mayor sea La velocidad de entada respecto a la diferencia de velocidades, mejor propagación de la deformación.

$$\frac{U_1}{(V_2 - V_1)}$$

Ecuación 8. 12

La velocidad U_1 referida a la que tendría el fleje ideal U_e indica una eficiencia en base 1.

$$\frac{U_1}{U_e} = \frac{(U_1 (L10 + L20 + t (V_2 - V_1)))}{((L10 - t V_1) (V_2 - V_1))}$$

Ecuación 8. 13

La Figura 8. 6 permite apreciar las diferentes pendientes, a la salida y entrada de la herramienta, entre el proceso ideal, y otro que no lo sea. Cuanto más próximas estén las líneas de velocidades a la ideal, más perfecto será el proceso, La razón de las pendientes indicará la eficiencia en la proximidad a la unidad. Se ha de tener en cuenta que el fleje no tiene una longitud constante, sino que aumenta continuamente.

$$R_p = \frac{((V_2 - U_2) (L10 + L20 + t (V_2 - V_1)))}{((V_2 - V_1) (L20 + V_2 t))} \text{ (a salida)}$$

Ecuación 8. 14

$$R_p = \frac{((U_1 - V_1) (L10 + L20 + t (V_2 - V_1)))}{((V_2 - V_1) (L10 + V_1 t))} \text{ (entrada)}$$

8.4.4.3 Grupo de coeficiente de rozamiento.

El parámetro coeficiente de rozamiento genera un adimensional, tal como se ha expuesto anteriormente, y se han explicitado varias ecuaciones para su determinación:

Coeficiente de Rozamiento 1:

Ecuación 5.6 de Wilson:

$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\Theta(F_1 + F_2)}$$

Coeficiente de Rozamiento 2:

$$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$$

Ecuación 8. 15

Coeficiente de Rozamiento 3:

Ecuación 5.9 (modificada):

$$\mu = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{D + y}{D} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$$

8.4.4.4 Grupo de parámetros relacionados con la superficie

El parámetro de rugosidad más habitual en la información técnica es la rugosidad promedio de las desviaciones absolutas respecto a la línea media, denominado Ra . La diferencia de rugosidades es un parámetro a analizar.

Sin embargo es posible hacer una evaluación de la variación, promedio, de la capa de asperezas. Con los resultados de los archivos generados por el rugosímetro indicado en el Capítulo 6, y la Ecuación 6. 2 se puede disponer de un parámetro que evalúe el resultado del lubricante sobre la capa superficial. Cuando sea posible, se diferenciará entre rugosidades longitudinales y transversales (según el eje longitudinal de la lámina).

8.4.4.5 Parámetros seleccionados

Para este experimento, de los anteriores parámetros, los más habituales son coeficientes de rozamiento, por lo que el sistema de va a referir a estos como parámetro de eficiencia inicial Ec. 5.6 modificada por la sustracción de le fuerza necesaria para la flexión y enderezamiento, y la Ec 8.13. Se complementará el estudio con el análisis de rugosidades transversales

El tipo de diseño de experimentos que se plantea no es completo, por lo que solamente puede llegarse a conclusiones parciales sobre la interacción e influencia de los factores sobre la variable.

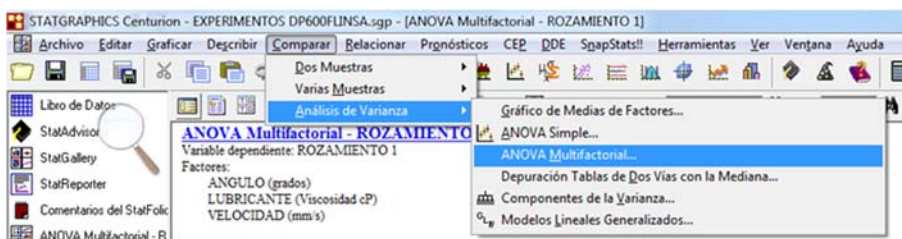
Los ensayos se realizaron en 2 bloque de 19 experimentos. Cada bloque se realizó en sesiones de 6 horas de trabajo continuado.

8.5 Resultados del Diseño factorial Fraccional.

El diseño inicial se realizó con Design Expert, sin embargo el análisis de los resultados tras la realización de los experimentos se realizó con Statgraphics.

Para el análisis factorial se utilizó la herramienta Análisis de Varianza Multifactorial del programa Statgraphics, y se utilizó la opción de convertir el experimento heredado en un experimento propio.

Los valores de medición se realizaron todos con un mismo desplazamiento total de 15 mm, que sería equivalente a una carrera de la misma longitud en un proceso de conformado.



Fuente: Statgraphics

Figura 8. 7 Menú Análisis Varianza Statgraphics.

8.5.1.1 Influencia de los bloques

Las deformaciones se realizaron en dos bloques de 19 ensayos cada una, en dos días consecutivos, en el mismo horario y los mismos operadores. Antes de iniciar un análisis

más detallado, se ha realizado un ANOVA en que la variable independiente sean los dos bloques, con objeto de saber si este nuevo factor es significativo..

Variable dependiente: Coeficiente de rozamiento 1

Variabes independientes:

Bloques 1 y 2.

A continuación, en la Tabla 8. 2 se detallan los principales resultados.

Tabla 8. 2 Resultados de ANOVA y LSD sobre los bloques de ensayos

Análisis de Varianza para ROZAMIENTO 1 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:BLOQUE	0,00000665944	1	0,00000665944	0,01	0,9321
RESIDUOS	0,0325653	36	0,000904593		
TOTAL (CORREGIDO)	0,032572	37			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por BLOQUE

Método: 95,0 porcentaje LSD

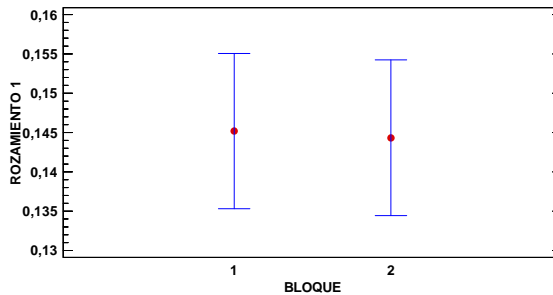
BLOQUE	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	19	0,144341	0,00690001	X
1	19	0,145178	0,00690001	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2		0,000837254	0,0197904

. indica una diferencia significativa.

COMPARACIÓN DE LAS MEDIAS DE LOS DOS BLOQUES DE ENSAYOS DP 600 (Flinsa)

Medias y 95,0% de Fisher LSD



Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

El Valor-P es superior a 0,05, por lo que la variable “bloques” no tiene significación estadística en la variable dependiente Rozamiento 1.

La prueba de múltiples rangos LSD indica los valores de las medias y errores de cada bloque, calculados por mínimos cuadrados..

El gráfico de comparación de medias indica dos medias y rangos de error casi coincidentes. Se puede concluir que no hay diferencias entre los dos bloques de ensayos, y se van a considerar como un único experimento.

8.5.1.2 Variables Velocidad, Viscosidad, Ángulo y Coeficiente de Rozamiento 1

Variable dependiente: Coeficiente de rozamiento 1

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (0, 30cP, 150cP), Velocidad de deslizamiento diferencial (5 mm/s, 15 mm/s, 25 mm/s).

Las tablas de resultados aparecen en el Anexo A.

Se utilizó el programa Statgraphics para el análisis y la Tabla 8. 3 indica los resultados.

Tabla 8. 3 Resultados de ANOVA

Análisis de Varianza para ROZAMIENTO 1 - Suma de Cuadrados Tipo III					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFACTOS PRINCIPALES					
A:ANGULO	0,0120898	2	0,00604491	68,52	0,0000
B:LUBRICANTE	0,00890062	2	0,00445031	50,45	0,0000
C:VELOCIDAD	0,000583611	2	0,000291806	3,31	0,0499
RESIDUOS	0,00273474	31	0,0000882175		
TOTAL (CORREGIDO)	0,032572	37			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Fuente: Statgraphics

Los factores Ángulo y Lubricante son muy significativos, por tener un Valor-P inferiores a 0,05. El factor velocidad tiene significación en la variabilidad del coeficiente de rozamiento.

La Tabla 8. 4 indica los valores del análisis LSD (Least Significant Difference), que ilustran los valores de las medias “Media LS” en cada caso, obtenida por mínimos cuadrados, y un intervalo de confianza de semiamplitud “Sigma LS” La columna de las x “Grupos Homogéneos” indica que las x situadas en la misma vertical no presentan diferencias significativas.

Se observó la incidencia del lubricante, y la gran influencia del ángulo de contacto.

Tabla 8. 4 Resultados LSD

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por LUBRICANTE					Método: 95,0 porcentaje LSD			
LUBRICANTE	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Con-traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
150	14	0,117629	0,00208626	x	0 - 30	.	0,01363	0,00501128
30	12	0,152064	0,00208626	x	0 - 150	.	0,0480652	0,00501128
0	12	0,165694	0,00192757	x	30 - 150	.	0,0344352	0,00646953
. indica una diferencia significativa.								
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por VELOCIDAD					Método: 95,0 porcentaje LSD			
VELOCIDAD	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Con-traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
5	12	0,143576	0,00208626	x	5 - 15	.	-0,00150699	0,00646953
15	14	0,145083	0,00208626	x	5 - 25	.	-0,0031516	0,00501128
25	12	0,146727	0,00192757	x	15 - 25	.	-0,00164461	0,00501128
. indica una diferencia significativa.								
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por ANGULO					Método: 95,0 porcentaje LSD			
AN- GULO	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos	Con-traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
30	10	0,128908	0,00293237	x	30 - 60	.	-0,00784194	0,00646953
60	18	0,13675	0,000977457	x	30 - 90	.	-0,0408195	0,00708702
90	10	0,169728	0,00218566	x	60 - 90	.	-0,0329776	0,00501128
. indica una diferencia significativa.								

Velocidad, Viscosidad y ángulo -Rozamiento

Variable	Value	Friction 1 (approx.)
Velocidad (mm/s)	0	0,166
	30	0,144
	150	0,118
LUBRICANTE (cP)	0	0,166
	30	0,152
	150	0,118
ANGULO (degrees)	0	0,129
	30	0,137
	90	0,169

La línea azul indica la escasa variabilidad producida con el rango de velocidades utilizado.

8.5.1.3 *Rugosidades transversales.*

Variable dependiente: Diferencia de rugosidades transversales Ecuación 6.2

$$VRm = DRm_2 - DRm_1$$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (0, 30cP, 150cP), Velocidad de deslizamiento diferencial (5 mm/s, 15 mm/s, 25 mm/s).

Tabla 8. 5 Resultados de ANOVA

Análisis de Varianza para Variación de Rugosidad Ra - Suma de Cuadrados Tipo III					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:ANGULO	0,386357	2	0,193179	2,18	0,1304
B:LUBRICANTE	0,184325	2	0,0921624	1,04	0,3659
C:VELOCIDAD	0,45898	2	0,22949	2,59	0,0914
RESIDUOS	2,7504	31	0,0887225		
TOTAL (CORREGIDO)	3,55106	37			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Fuente: Satatgraphics

Los factores considerados no tienen significación en la variación de la media, ya que ninguno es inferior a 0,05.

8.6 Resultados sobre la superficie. Microscopía.

Se realizaron dos pruebas con microscopio. Una primera con microscopio convencional para hacer un visionado general, en donde se pueden apreciar los efectos de la elevada rugosidad de la herramienta. Otra con SEM con objeto de observar los cambios más importantes sobre la rugosidad.

8.6.1 Observación con microscopio

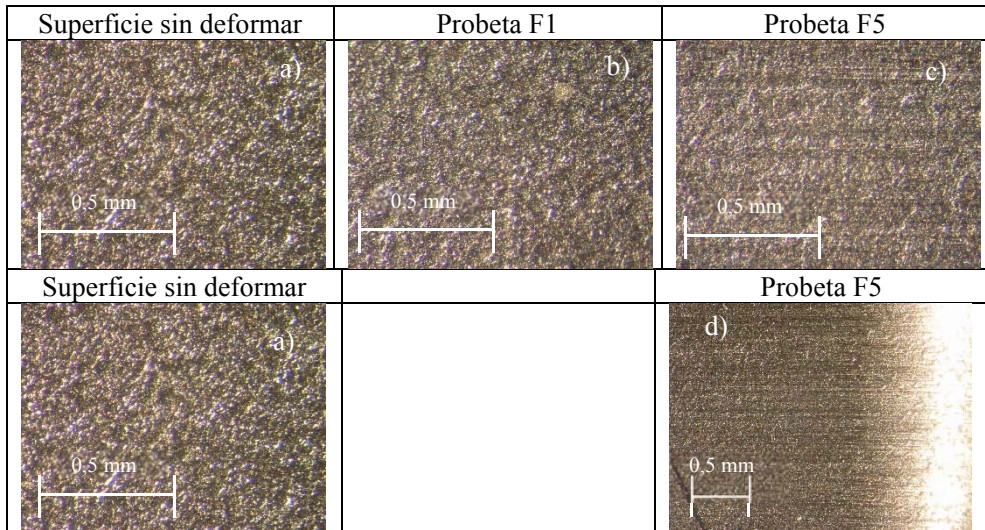


Figura 8. 8 Imágenes antes y después de deformar las probetas.

La Figura 8. 8 indica el cambio superficial, la probeta F5 muestra un evidente rayado.

La disminución de puntos brillantes desde a) a b) indica el aplanamiento de las asperezas. La distribución de sombras es uniforme en toda la superficie visionada

La probeta F1 se conformó a un ángulo de 60° , con una velocidad de 15,5 mm/s y con lubricante tipo 1.

La probeta F5 se conformó a un ángulo de 60° , con una velocidad de 15,5 mm/s y sin lubricante.

8.6.2 Observación con microscopio electrónico SEM.

Se realizaron pruebas de microscopía SEM con las mismas muestras

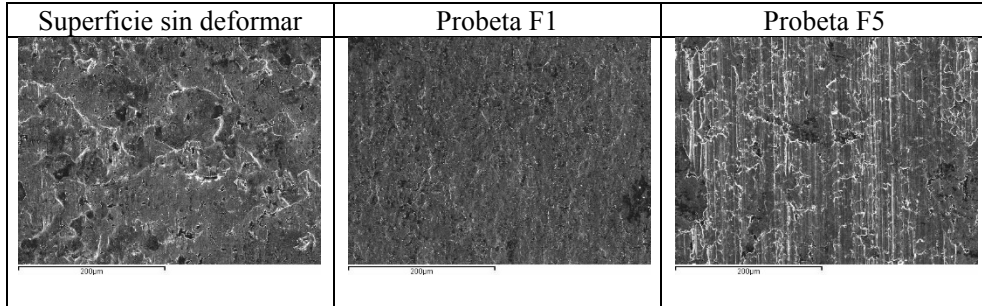


Figura 8. 9 Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM.

En la probeta F1 se aprecia un importante aplanado de las asperezas. En la probeta 5 se evidencia el fuerte rayado.

8.7 Los resultados del equipo de simulación

Las tablas de resultados se han transformado en las gráficas siguientes, Figura 8. 10 , que indican la evolución de la medida.

La parte superior de la Figura 8. 10 , indica la evolución de las fuerzas F1, F2 y su diferencia F2-F1.

La parte inferior de la figuras indica los cálculos realizados de velocidades de acuerdo con la Ecuación 8. 7 y la Ecuación 8. 8 .

El instante de medida es el correspondiente desplazamiento o carrera de 15 mm. Cada ensayo se arrancaba manualmente, por lo que el instante en que los actuadores iniciaban el movimiento dependía de la atención del operador. El tiempo total de desplazamiento ha sido el necesario para el desplazamiento indicado. En este caso 1,48 segundos.

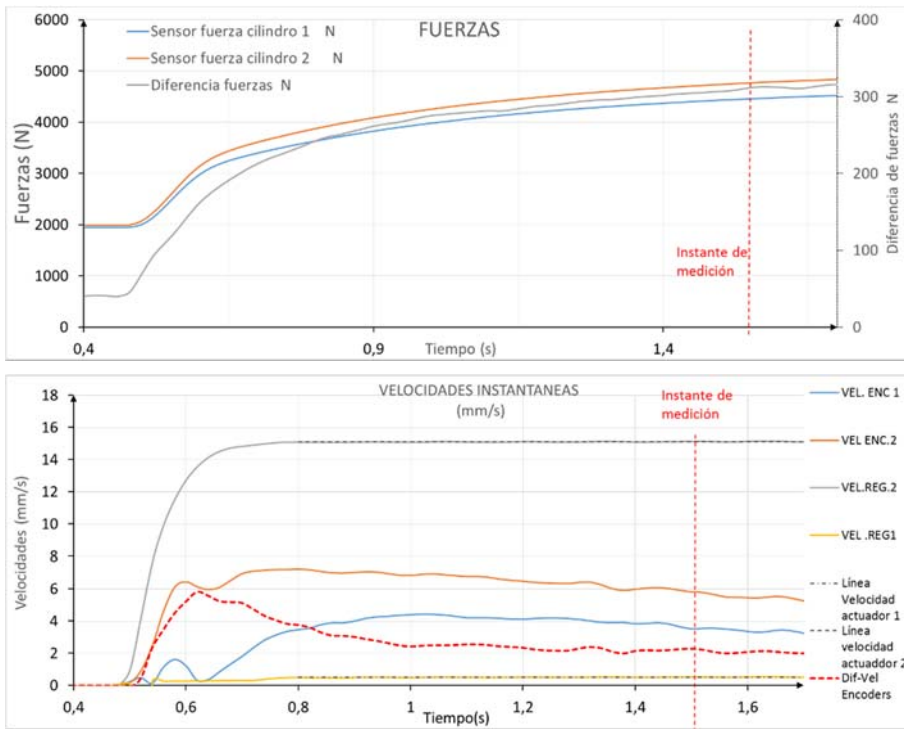


Figura 8.10 Gráficos de resultados, Fuerzas y velocidades. Probeta FL33

8.8 Discusión

Se realizaron los ensayos en dos sesiones diferentes. Sin embargo se comprobó que esta separación no tuvo un efecto significativo en los resultados, apartado 8.4.4.1.

Las velocidades de deformación se seleccionaron en base a la máxima velocidad que permitía la máquina, y de modo que estuviesen equiespaciados (requerimiento de Statgraphics). La velocidad real de estampación puede ser diferente, pues la velocidad del punzón suele estar alrededor de 15 m/minuto en muchas ocasiones. Sin embargo la velocidad de 25,5 mm/s fue una limitación del equipo.

Se encontró también que la máxima tracción que podían hacer los husillos quedó limitada a unos 8000 N. Esto determinó la sección deformable, dado que se quería una importante deformación plástica que permitiese a posteriori comprobar el estado de carga real.

En la tabla de resultados del Anexo se indican 8 roturas de probeta. Muchas fracturas se produjeron lejos de la salida de la herramienta, por lo que es causa de un exceso de deformación.

La suposición de tomar la deformación del ensayo referida a toda la probeta no tuvo en cuenta la gran discrepancia entre deformaciones, que en este caso tuvo un valor promedio ϵ_1/ϵ_2 del 35%.

Los resultados de ANOVA han de ser tenidos en cuenta:

La influencia del factor velocidad es creciente, pero no es comparable a la de los otros dos factores. Esto indica que se está siempre en una misma zona de la curva de Stribeck, y que la variación dada no es significativa en cuanto a variación de coeficiente de rozamiento.

La gran significación de los otros dos factores, “Ángulo” y “Lubricante” queda indicada por Valor-P igual a cero.

El aumento del rozamiento con el ángulo, se explica por someter al material a un aplastamiento durante mucho más recorrido. Los huecos, inicialmente llenos de aceite, van siendo menos profundos conforme se aplanan las asperezas, habiendo una mayor proporción de superficie en contacto real (A. C. Cárcel, C. Ferrer, & Pérez, 2004), y que probablemente se encuentre en condiciones de capa límite, o incluso peor.

Sin embargo las imágenes indican que la carencia de lubricación tiene resultados indeseables en la superficie, donde se apreció un evidente rayado en la probeta F5 (no lubricada), y que no aparece reflejado en las diferencias de rugosidades entre antes y después del tratamiento.

La longitud de la zona deformada y marcada por la herramienta fue muy pequeña para su verificación y medida, alrededor de unos 30 mm en el caso mayor (15 mm/s x 2 s). La zona que inicialmente ya estaba en contacto con la probeta, y por tanto deformada plásticamente, no puede tenerse en cuenta a efectos de simulación de la estampación. Para el caso de un ángulo de 90°, el arco de contacto inicial sería de 12,48 mm, con lo que la zona a estudiar sería de otros 8 mm (en el caso de 5mm/s x 4 s), y que es escasa para medir rugosidad longitudinal. Téngase en cuenta que el proceso comienza con el primer contacto de la herramienta con la lámina.

En estas condiciones se han podido verificar las rugosidades transversales, pero no quedó espacio suficiente para utilizar el rugosímetro en las condiciones indicadas por el fabricante.

Las gráficas presentadas en la Figura 8. 10 son la evolución de las fuerzas y su diferencia a lo largo del ensayo. Se aprecia su tendencia creciente a lo largo del ensayo.

Las gráficas correspondientes a las velocidades obtenidas por los encoders indican una falta de contacto del sistema en parte del recorrido.

8.9 Conclusiones parciales.

La velocidad de ensayo es excesiva para los medios de verificación posterior, ya que no permiten la comprobación de la evolución de la superficie en sentido longitudinal. Se propone reducir la velocidad de modo que el resultado de la probeta deformada a la salida sea al menos el arco inicial más unos 20 mm. Con objeto de aumentar esta distancia, se puede aumentar la velocidad de entrada, y reducir la velocidad de salida a fin de que el ensayo sea más largo, y más fácilmente verificable.

La no utilización de lubricante ha permitido comprobar sus efectos sobre la superficie. El objeto de este trabajo es la mejora a través de la selección del lubricante más eficiente, por lo que la siguiente etapa de ensayo debería ser con los lubricantes en todos los casos.

Se debe comprobar y verificar el correcto funcionamiento de los encoders, a fin de poder medir las velocidades a la entrada y salida de la herramienta.

Anticipando la metodología de selección, en este caso se ha utilizado el coeficiente de rozamiento como indicador. La mejor opción, con menor coeficiente de rozamiento, fue el aceite Houghto Draw B 75 Galv.

Los resultados de ANOVA evidencian diferencias en el cálculo de los rozamientos de cada uno de los aceites.

Se propuso continuar los ensayos con las correcciones indicadas.

Capítulo 9

Resultados. Estudio del DP600 (GM)

Resumen:

Se aplica el procedimiento completo al material. Se obtienen los resultados para todos los parámetros. Se aplica Diseño Factorial de Experimentos. Se realiza la discusión de los mismos, definiendo los indicadores de eficiencia de los mismos, que junto a la forma de la curva de diferencias permitirán seleccionar los que tengan mejor comportamiento. Finalmente quedan cinco parámetros de eficiencia que explican la diferencia entre los dos lubricantes.

Se compara el funcionamiento de todos los parámetros, a través de una simulación, que permite clasificarlos en dos grupos.

Se aplica el modelo, seleccionando los parámetros de ensayo y aplicando un parámetro eficiente y otro que no era.

Se realiza una discusión sobre los resultados de los ensayos y el cálculo, que servirá para acomodar el procedimiento al siguiente material estudiado.

9 El DP600(GM)

El Laboratorio Central de Investigación de GM remitió diferentes materiales para su evaluación frente a la deformación en el conformado.

Uno de los parámetros a obtener es el comportamiento ante el rozamiento, y este trabajo es una oportunidad para su estudio.

Se remitieron láminas cortadas de 800x50 mm de Dual Phase 600, con superficie galvanizada.

9.1 La Herramienta de conformado.

Secaracterizó la superficie de la herramienta utilizada, se midió la rugosidad tanto longitudinal como transversal antes y después de su utilización. No había diferencias, dado que esta herramienta templada ya había sido utilizada con unas 5 probetas anteriores para comprobar su funcionamiento.



Figura 9. 1 Caracterización de la rugosidad. Herramienta de rodaje

Las mediciones se realizaron en 12 tramos, tomados tanto longitudinales como transversales. Para cada tipo se han tomado tres tramos sobre la generatriz (A,B,C), aproximadamente los extremos y el centro; y cuatro cuadrantes(1,2,3 y 4)

Los resultados detallados se dan en el Anexo B, de resultados de DP 600 (GM).

Los valores encontrados fueron:

Rugosidad media longitudinal $R_a= 0,1075 \mu m, \sigma_a=0,0584 \mu m (\lambda_c=0,8mm \times 5)$

Rugosidad eficaz longitudinal $R_q= 0,1325 \mu m, \sigma_a= 0,0606 \mu m (\lambda_c=0,8mm \times 5)$

Rugosidad media transversal $R_a= 0,21 \mu m, \sigma_a=0,128 \mu m (\lambda_c=0,25 mm \times 2)$

Rugosidad eficaz transversal $R_q= 0,3 \mu m, \sigma_a= 0,1806 \mu m (\lambda_c=0,25 mm \times 2)$

En la Figura 9. 2 la Figura 9. 3, se aprecian los perfiles de las zonas medidas con máxima y mínima rugosidad longitudinal y transversal, tomando como referencia el eje longitudinal de la herramienta. Figuras a mayor escala se presentan en el Anexo B.

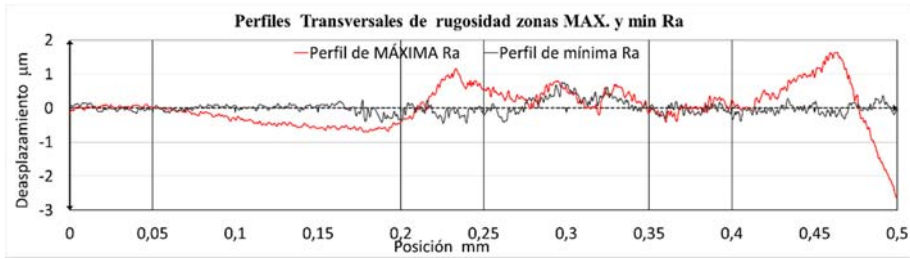


Figura 9. 2 Perfiles de rugosidades transversales

En el caso de la rugosidad longitudinal:

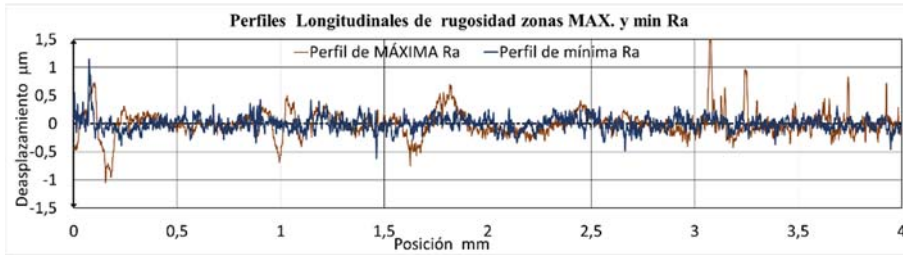


Figura 9. 3 Perfiles de rugosidades longitudinales

9.2 Las probetas

El material utilizado tiene la sección que se indica en la tabla del Anexo-B, con un espesor de 1,42-150 mm, con recubrimiento de Zinc.

Las características del material, obtenidas en la Máquina Universal de la EPSA fue la siguiente, Figura 9. 4 :

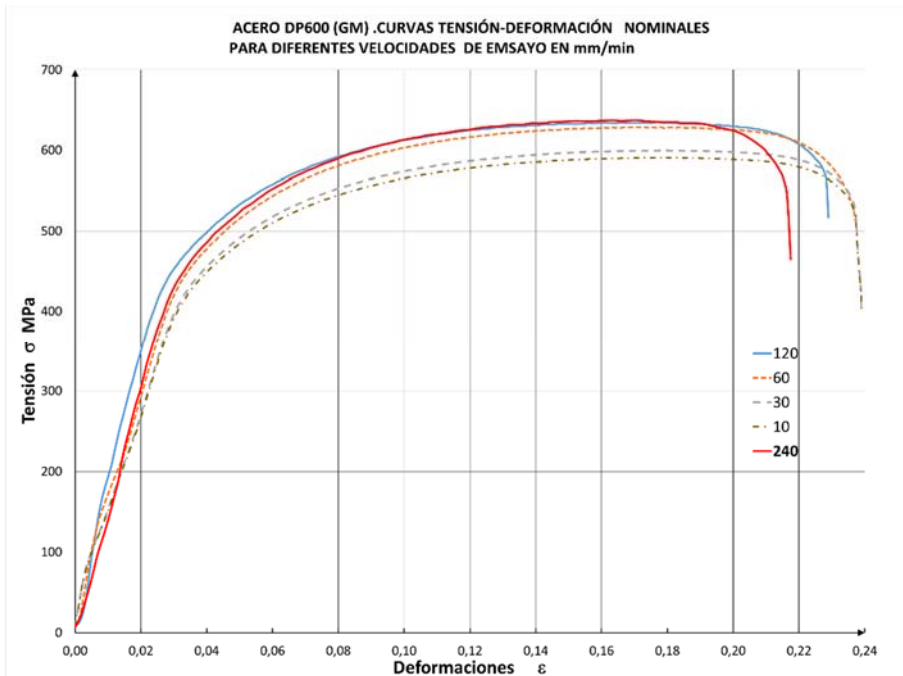


Figura 9. 4 Curva Tensión-Deformación Nominal DP600

La Figura 9. 5 indica uno de los bloques de probetas que se obtuvieron para esta investigación.

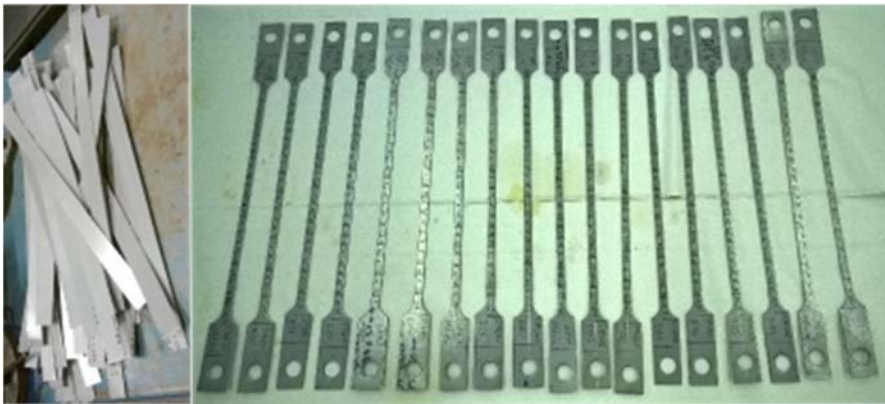


Figura 9. 5 Conjunto de probetas DP600 (GM). Antes y después de la preparación. Bloque 2

Las medidas de rugosidad realizadas en todas las probetas permitieron obtener perfiles pre-post conformado, Figura 9. 6.

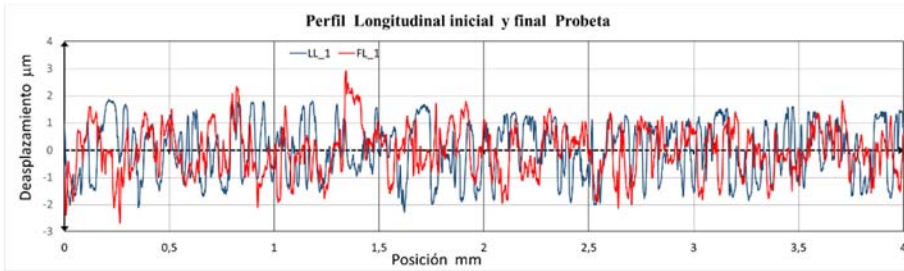


Figura 9. 6 Perfiles Rugosidad. Probeta D1. LL-Pre. y FI-Post. Conformado

Las tablas de dimensiones y rugosidades se presentan en el Anexo B

La **Figura 9. 7** es la micrografía de la lámina. Se parecía la capa de recubrimiento de Zinc

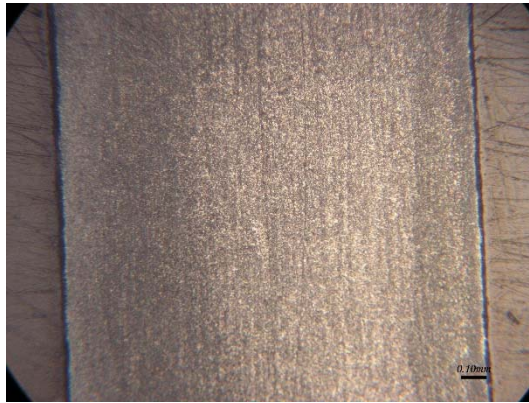


Figura 9. 7 Micrografía del DP600

9.3 Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos y su análisis posterior se realizó íntegramente con el programa Statgraphics.

9.3.1 Variables de Ensayo

Se consideraron los siguientes.

La velocidad de los accionamientos, que determinará la velocidad de deformación de la zona deformada.

Las fuerzas producidas son consecuencia de la deformación experimentada, y siguen la curva σ - ϵ correspondiente a la velocidad de deformación instantánea.

El ángulo de abrazamiento, que determinará la presión de contacto y la deformación acumulada para una carrera dada.

El tipo de lubricante, y su resultado en cuanto a fricción, que es el objetivo central de este trabajo.

El tiempo de ensayo, que determinará las fuerzas y deformaciones máximas, no se incorpora al análisis de Statgraphics.

9.3.1.1 *La velocidad de ensayo.*

Como resultado de la experiencia del primer experimento de dos bloques, se debía buscar una combinación de tres pares de velocidades que pudiesen incorporarse en el programa de Statgraphics como variable, y que estuviesen equiespaciados. El control del sistema se hace sobre las velocidades de los actuadores, y la velocidad a que se desplaza el fleje sobre la herramienta es un resultado del rozamiento.

Así mismo, la longitud de la zona tratada debía poder verificarse en cuanto a rugosidad longitudinal, a fin de su posterior verificación.

La combinación de parámetros que se utilizó Tabla 9. 1

Tabla 9. 1 Combinación de parámetros

Velocidad de entrada	Velocidad de salida	Velocidad promedio	Velocidad diferencial nominal	Tiempo de ensayo	Longtud mínima tratada	Longitud Tramo derecho	Deformación relativa máxima
mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	s	mm(1)	mm	(2)
4	5	4,5	1	9	36	100	9%
4	7	5,5	3	7	28	100	21%
4	9	6,5	5	5	20	100	25%

(1) caso de que solamente se alimentase desde la izquierda.

(2) caso de que solamente se deformase el tramo de la derecha.

El valor de la deformación máxima es inferior a los experimentos del DP600 (Flinsa), y se consideró suficientemente seguro. Para poder verificar el estado de fuerzas se medirá la deformación de cada ramal, y solamente se puede hacer si queda deformación plástica residual, por lo que se tomaron estos valores como un límite aceptable.

Las mediciones de resultados se realizaron en un desplazamiento de 25 mm. Para ellos se tomaron los valores de fuerza en los instantes 4,9 s, 3,472 s y 2,778 s, con las velocidades crecientes.

9.3.1.2 *El ángulo de ensayo.*

La mayoría de los equipos encontrados en la bibliografía trabajan con un único ángulo de 90°. Otros ángulos podrían dar información de cómo se deforma el material en diferentes condiciones. Los ángulos seleccionados fueron de 90°, 60° y 30°.

9.3.1.3 Los lubricantes.

La estrategia de mejora que se propone es la comparación de lubricantes entre sí, y seleccionar el mejor en cuanto a la respuesta de las superficies.

Se denominaron del siguiente modo, Lubricante 1 (Hughto Drive B75 Galv), y Lubricante 2 (Hughto Drive S130), cedidos por gentileza de la empresa Flinsa., las viscosidades dinámicas ensayadas en laboratorio fueron respectivamente de 150 cP y 30 cP a una temperatura de 24°C, muy próxima a la de ensayo. Por lo que se consideraron valores de ensayo.

9.3.2 El diseño factorial del experimento.

Se disponía de 2 factores a tres niveles y un factor a 2 niveles. La realización del diseño factorial completo requiere de $3^2 \cdot 2^1$ ensayos para cada experimento, 18 probetas por bloque. Se obtuvieron 54 probetas, más 4 de repuesto para posibles errores, se podrían hacer hasta tres réplicas.

Se tomó la opción de Diseño Multifactorial Multinivel (Statgraphics).

Se obtuvo la siguiente secuencia para cada réplica, Tabla 9. 2 , determinado por el diseño generado por Statgraphics con la opción de aleatorizar orden.

Se produjeron tres fallos en los ensayos, lo que obligó a utilizar tres de las probetas de repuesto.

Tabla 9. 2 Variables de ensayos de cada bloque

BLOQUE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vel. entrada	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vel. salida	5	7	7	5	7	5	9	9	5	9	7	9	5	9	9	7	7
ANGULO	90	30	60	30	60	30	60	60	90	60	90	90	30	90	60	30	90
LUBRICANTE	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2
PROBETA Nº	55	56	3	4	5	6	7	8	57	10	11	12	13	14	15	16	17
BLOQUE	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Vel. entrada	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vel. salida	7	5	9	5	7	5	9	9	5	7	9	9	9	7	7	7	5
ANGULO	30	60	90	90	90	60	60	30	90	30	90	30	30	60	60	30	90
LUBRICANTE	1	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2
PROBETA Nº	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
BLOQUE	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Vel. entrada	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vel. salida	7	9	7	5	9	9	5	5	5	7	9	5	9	7	7	9	5
ANGULO	90	90	30	60	60	30	60	30	90	30	90	90	90	90	60	60	30
LUBRICANTE	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2
PROBETA Nº	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
																	54

9.4 Parámetros de eficiencia del sistema en proceso.

9.4.1 Datos obtenidos desde el sistema de adquisición.

Los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos se recogen en una hoja de cálculo descargada desde el sistema de acondicionamiento Catman AP, y tratados posteriormente con Excel. Las diferentes columnas indicaron las fuerzas instantáneas, así como los ángulos de encoder y posiciones de regletas ópticas. Ya se presentaron en el 7.2 estos datos. A continuación se indican.

F1	Fuerza del actuador 1, de retención (N)
F2	Fuerza del actuador 2 de estiramiento (N)
C1	Posición de la regleta óptica 1 (mm)
C2	Posición de la regleta óptica 2 (mm)
G1	Ángulo del encoder 1 (grados sexagesimales)
G2	Ángulo del encoder 2 (grados sexagesimales)

El sistema de adquisición discretiza el tiempo en pasos incrementales exactamente iguales, que sirven como base de integración o derivación de paso constante.

9.4.2 Parámetros de cálculo para los experimentos factoriales.

La calidad en cuanto al lubricante indica reducción del rozamiento (la calidad superficial se estudia en otros apartados). Tal como se vio en el modelo desarrollado en el capítulo anterior, existe una tensión tangencial del contacto por fricción τ_f . A mayor tensión entre superficies, mayores pérdidas de energía por rozamiento, por lo que los parámetros constitutivos de esta tensión pueden ser parámetros válidos para evaluar el comportamiento.

Así mismo se producirá un efecto sobre la superficie de la pieza, que puede ser evaluado como posible parámetro.

Se consideraron posibles los posibles parámetros que se detallan en los apartados siguientes.

9.4.3 Parámetros seleccionados

Los parámetros que se van a utilizar en este experimento son los de la Tabla 9. 3, ya definidos en el capítulo 8.

En esta ocasión se evalúan todos sobre los resultados de los ensayos.

Tabla 9. 3 Parámetros de eficiencia

$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\Theta(F_1 + F_2)} \text{ (Restando la fuerza de Swift)}$	Ecuación 5.6
$\mu = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{D+y}{D} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	Ecuación 5.9
$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	Ecuación 8. 15
$\frac{F1 - F2 - FB}{w_2 \cdot y_2}$	Ecuación 8. 4
$\frac{F1 - F2 - FB}{w_2}$	Ecuación 8. 5
$\dot{\epsilon} = \frac{U_2 - U_1}{\Theta \frac{d}{2}}; \quad \frac{\dot{\epsilon}}{V_2 - V_1} = \frac{2(U_2 - U_1)}{\Theta \cdot d \cdot (V_2 - V_1)}$	Ecuación 8. 9
$\frac{Ue - U_1}{V_2 - V_1} = \frac{\frac{L20V_1 + L10V_2}{L10 + L20 + t(V_2 - V_1)} - U_1}{(V_2 - V_1)}$	Ecuación 8. 11
$\frac{U_1}{(V_2 - V_1)}$	Ecuación 8.12
$\frac{U_1}{Ue} = \frac{(U_1 (L10 + L20 + t (V_2 - V_1)))}{((L10 - t V_1) (V_2 - V_1))}$	Ecuación 8. 13
$Rp = \frac{((U_1 - V_1) (L10 + L20 + t (V_2 - V_1)))}{((L10 - V1t) (V_2 - V1))} \text{ (a la entrada)}$	Ecuación 8. 14
$VRm = DRm_2 - DRm_1 \text{ (Longitudinal o transversal)}$	Ecuación 6. 2

9.4.3.1 Realización de los experimentos

Los experimentos del aparato anterior reflejaron que los bloques no tenían influencia en los resultados de los parámetros de eficiencia.

La teoría sobre los experimentos exige siempre la no incorporación (dentro de lo posible) de otros factores modificadores.

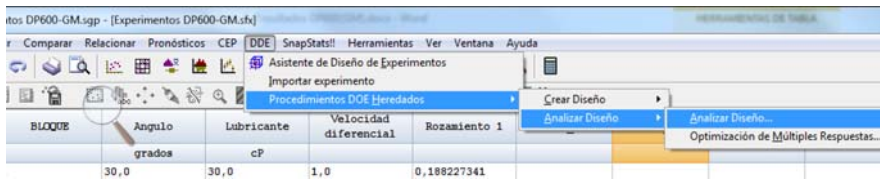
Con objeto de seguir la ortodoxia, se realizaron el conjunto de experimentos en una sesión continua desde las 8:00 hasta las 24:00 del mismo día. Se siguió el orden de ensayos, previamente aleatorizado, definido por el programa Statgraphics.

9.5 Resultados del Diseño factorial completo.

El diseño de experimentos y su evaluación se realizó con el programa Stat Graphics.

Para el análisis factorial se utilizó la herramienta Análisis de Varianza Multifactorial del programa Statgraphics, Figura 9. 8 .

Los valores de medición se realizaron todos con un mismo desplazamiento total de 25 mm, que sería equivalente a una carrera de la misma longitud en un proceso de conformado.



Fuente: Statgraphics

Figura 9. 8 Menú Análisis de Experimentos de Statgraphics.

Posteriormente se realizó el ANOVA de los factores, y se obtuvieron las líneas de regresión.

9.5.1 Influencia de los bloques

Las deformaciones se realizaron en tres bloques de 18 ensayos cada uno, ejecutados en una sola jornada. Para descartar la influencia de los bloques, se realiza un ANOVA de los mismos sobre le Rozamiento 1.

Variable dependiente: Coeficiente de rozamiento 1

Variabes independientes:

Bloques 1, 2 y3.

En la Tabla 9. 4 se detallan los principales resultados.

Tabla 9. 4 Resultados de ANOVA y LSD sobre los bloques de ensayos

Análisis de Varianza para Rozamiento 1 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:BLOQUE	0,000515469	2	0,000257735	0,52	0,5958
RESIDUOS	0,0251252	51	0,000492651		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0256407	53			

Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

El Valor-P es superior a 0,05, por lo que la variable bloques no tiene significación estadística en la variable dependiente Rozamiento 1.

9.5.2 Coeficiente de Rozamiento 1.

Variable dependiente: Coeficiente de rozamiento 1. Ecuación 5.6
$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\Theta(F_1 + F_2)}$$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad de deslizamiento diferencial (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Las tablas de resultados aparecen en el Anexo-B

Se utilizó el programa Statgraphics para el análisis y la Tabla 9. 5 indica los resultados.

Tabla 9. 5 Resultados de ANOVA. Rozamiento 1. Ec. 5.6

Análisis de Varianza para Rozamiento 1 - Suma de Cuadrados Tipo III					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Ángulo	0,00536237	2	0,00268119	19,15	0,0000
B:Lubricante	0,00965094	1	0,00965094	68,92	0,0000
C:Velocidad diferencial	0,00390632	2	0,00195316	13,95	0,0000
RESIDUOS	0,00672104	48	0,000140022		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0256407	53			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Fuente:Statgraphics

Los factores Ángulo, Lubricante y velocidad diferencial son muy significativos, por tener un Valor-P inferiores a 0,05.

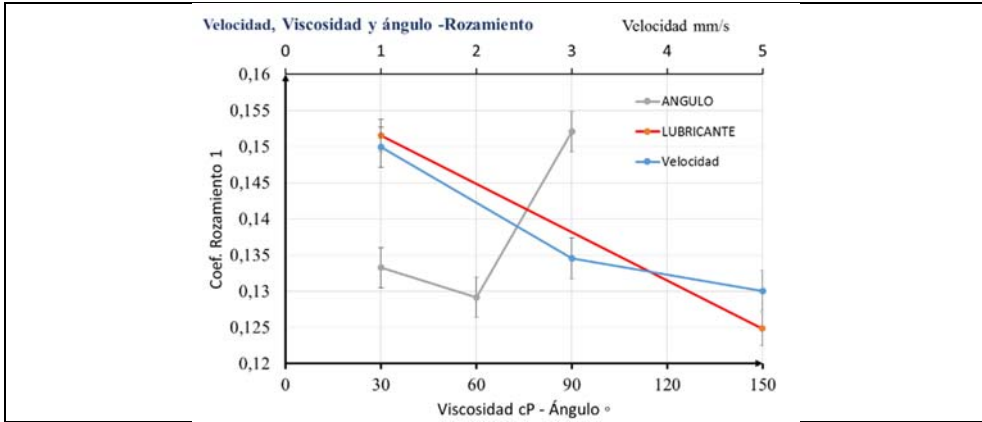
La Tabla 9. 6 indica los valores del análisis LSD (Least Significant Difference), que ilustran los valores de las medias “*Media LS*” en cada caso, obtenida por mínimos cuadrados, y un intervalo de confianza de semiamplitud “*Sigma Ls*” La columna de X “*Grupos Homogéneos*” indica que as X situadas en la misma vertical no presentan diferencias significativas.

Tabla 9. 6 Resultados LSD . Rozamiento 1. Ec. 5.6

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por LUBRICANTE				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
<i>Lubricante</i>	<i>Ca-sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé-neos</i>
150	27	0,124801	0,00227728	x
30	27	0,151539	0,00227728	x
<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	
30 - 150	.	0,0267373	0,00647537	
. indica una diferencia significativa.				
Pruebas de Múltiple Rangos para Rozamiento 1 por Velocidad diferencial				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
<i>Veloci-dad dife-rencial</i>	<i>Ca-sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé-neos</i>
5	18	0,130055	0,00278908	x
3	18	0,134538	0,00278908	x
1	18	0,149916	0,00278908	x
<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	
1 - 3	.	0,0153783	0,00793068	
1 - 5	.	0,0198612	0,00793068	
3 - 5	.	0,00448284	0,00793068	
. indica una diferencia significativa.				
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por ANGULO				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
<i>An-gulo</i>	<i>Ca-sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho-mogéneos</i>
60	18	0,129183	0,00278908	x
30	18	0,133262	0,00278908	x
90	18	0,152065	0,00278908	x
<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	
30 - 60	.	0,00407849	0,00793068	
30 - 90	.	-0,0188028	0,00793068	
60 - 90	.	-0,0228812	0,00793068	
. indica una diferencia significativa.				

Las cifras en rojo indican l intervalos en los que se dan diferencias significativas

Tabla 9. 7 Gráfico Resultado LSD. Rozamiento 1. Ec. 5.6



La línea azul, Tabla 9. 7 , indica la variabilidad con el rango de velocidades utilizado
Ecuación obtenida en el ajuste:

$$\text{Rozamiento } 1 = 0,197958 + 0,000313379.\text{Angulo} - 0,000222811.\text{Lubricante} - 0,0104532.\text{Velocidad diferencial}$$

9.5.3 Coeficiente de Rozamiento 2.

Variable dependiente: Coeficiente de Rozamiento 2 . Ec 8.15
$$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

En el Anexo-B se detallan las tablas de resultados.

Los P-Valor son altamente significativos para cada una de las variables, el diagrama de Pareto (ver Anexo-B) indica al lubricante como el factor con mayor influencia. La Figura 9. 9 presenta el gráfico de medias por grupos de valores de las variables, junto con sus intervalos.

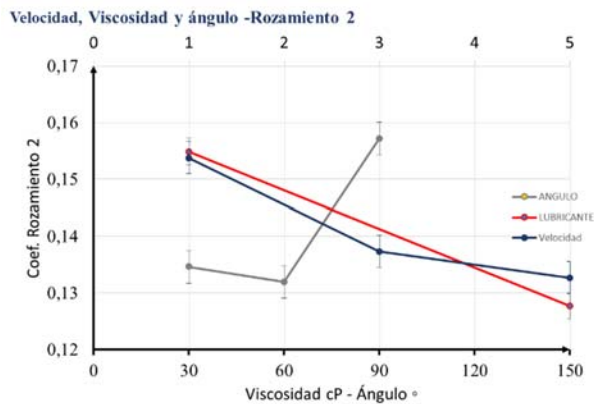


Figura 9. 9 Medias Coeficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15

Ecuación obtenida en el ajuste:

$$\text{Rozamiento } 2 = 0,201201 + 0,000375039.\text{Angulo} - 0,000226283.\text{Lubricante} - 0,0110881.\text{Velocidad diferencial}$$

9.5.4 Coeficiente de Rozamiento 3.

Variable dependiente: Coeficiente de Rozamiento 3. Ec 5.9
$$\mu = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{D+y}{D} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

En el Anexo-B se detallan las tablas de resultados.

Los P-Valor son altamente significativos para cada una de las variables, el diagrama de Pareto (Ver Anexo-B) indica al lubricante como el factor con mayor influencia. Se presenta la gráfica de medias en la Figura 9. 10.

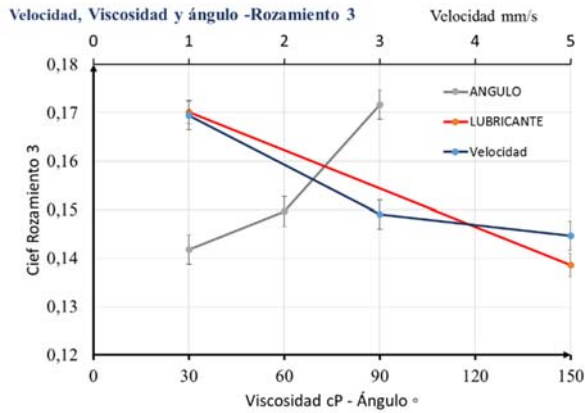


Figura 9. 10 Medias Coeficiente de Rozamiento 3 . Ec 5.7

Ecuación obtenida en el ajuste:

$$Rozamiento\ 3 = 0,219825 + 0,000409078.Angulo - 0,000246946.Lubricante - 0,0121207.Velocidad\ diferencial$$

9.5.5 Diferencia de Tensiones.

Variable dependiente:

Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ecuación 8.4 $\frac{F1 - F2 - FB}{w_2 \cdot y_2}$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

El análisis de ANOVA del experimento reflejó que todos los factores son altamente significativos, siendo el factor ángulo el de mayor impacto, Figura 9. 11.

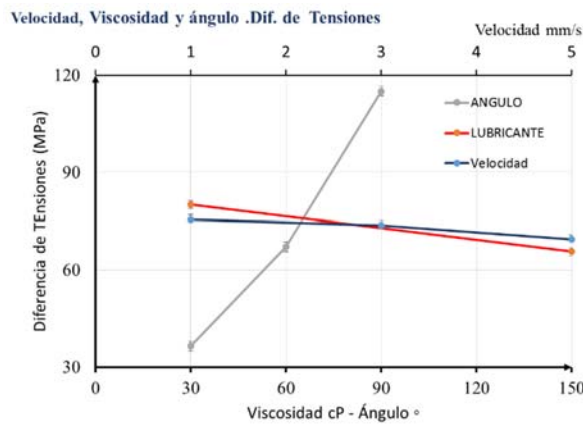


Figura 9. 11 Medias Diferencia Tensiones. Ec 8.4

Ecuación obtenida en el ajuste:

$$Diferencia Tensiones (Ec.8.4) = -12,7851 + 1,30984.Angulo - 0,120408.Lubricante + 3,19701.Velocidad\ diferencial$$

9.5.6 Diferencia de fuerzas específica.

Variable dependiente:

Diferencia de fuerzas específica por unidad de ancho entre los dos ramales.

$$\text{Ecuación 8.5} \quad \frac{F1 - F2 - FB}{w_2}$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Se comprueba que las tres variables son significativas. Las más significativa es el ángulo, Figura 9. 12.

En el Anexo-B se detallan las tablas de resultados.

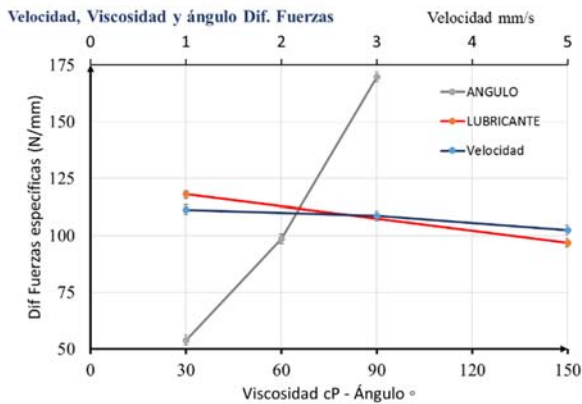


Figura 9. 12 Medias Diferencia fuerzas-ancho. Ecuación 8. 5

Ecuación obtenida en el ajuste

$$Dif\ Fuerzas\ Especifica\ (Ec\ 8.5) = -18,8786 + 1,93151.Angulo - 0,176603.Lubricante + 4,70404.Velocidad\ diferencial$$

Los resultados indican que el lubricante no es el factor con mayor influencia.

9.5.7 Velocidad de deformación relativa específica.

Variable dependiente: Velocidad de deformación específica Ecuación 8.9

$$\frac{\dot{\epsilon}}{V_2 - V_1} = \frac{2(U_2 - U_1)}{\Theta.d.(V_2 - V_1)}$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

La Velocidad diferencial y el ángulo tienen un P-Valor por debajo de 0,05, la lubricación no es un factor significativo, Figura 9. 13.

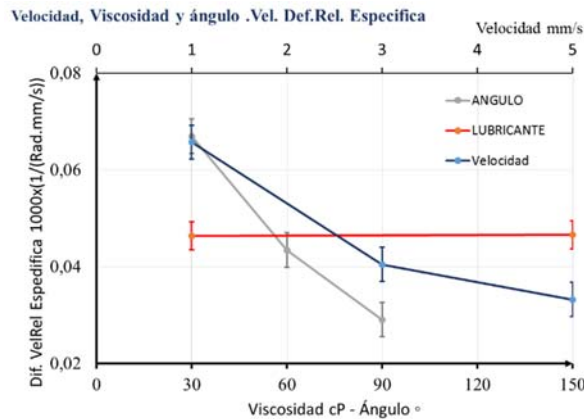


Figura 9. 13 Grafico Medias LSD Vel. Def. Relativa. Ecuación 8. 9

Se evidencia la escasa variabilidad asociada a la Lubricación.

La ecuación de regresión:

$$Vel\ def\ rela\ especi\ ec\ 8.9 = 0,180118 - 0,000632001.Angulo + 0,00000205864.Lubricante - 0,01713.Velocidad\ diferencial$$

9.5.8 Salto de velocidades relativo

Variable dependiente: Velocidad de deformación específica.

$$\text{Ecuación. 8.11 } \frac{Ue - U_1}{V_2 - V_1}$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

La variable ángulo es la única significativa en este experimento, estando las otras variables lejos de ser significativas, Figura 9. 14.

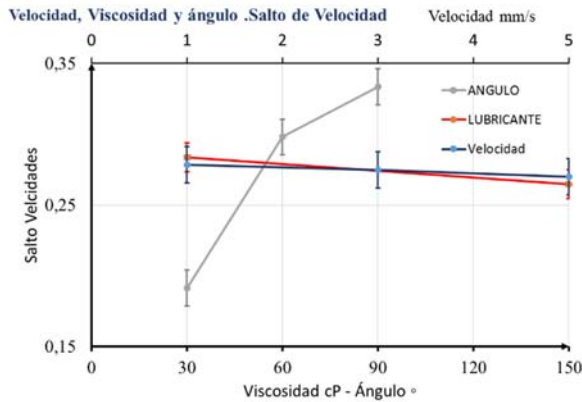


Figura 9. 14 Valores del Salto de Velocidades Relativo. Ec. 8.11

Ecuación de regresión:

$$\text{Salto de velocidad ecuación 8.11} = 0,171677 + 0,0023663 * \text{Angulo} - 0,000158477 * \text{Lubricante} - 0,00447039 * \text{Velocidad diferencial}$$

9.5.9 Velocidad de entrada relativa.

Variable dependiente: Velocidad de entrada relativa, Ecuación. 8.12 $\frac{U_1}{(V_2 - V_1)}$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Los resultados del diseño de experimentos indicaron que la única variable significativa fue la velocidad diferencial, Figura 9. 15.

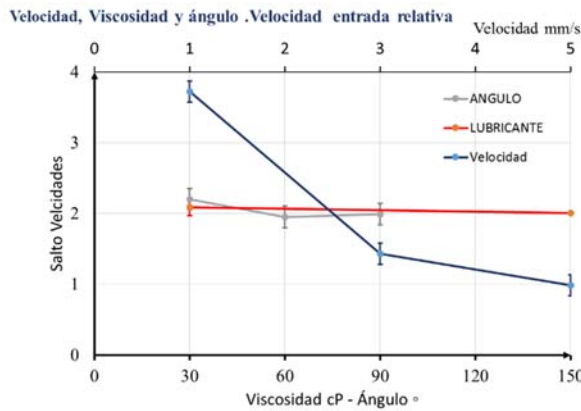


Figura 9. 15 Valores de Velocidad de entrada relativa. Ec. 8.12

El resultado del ajuste:

Razón-velo $U1/(V2-V1)$ Ec8.12 = 10,2636 - 0,0035647.Ángulo + 0,000719533.Lubricante - 1,44071.Velocidad diferencial

9.5.10 Salto de velocidad.

Variable dependiente: Salto de velocidad Ecuación. 8.13 $\frac{U_1}{U_e}$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

El resultado del Diseño en Statgraphics indica que son significativas la Velocidad Diferencial y el Ángulo de contacto, Figura 9. 16.

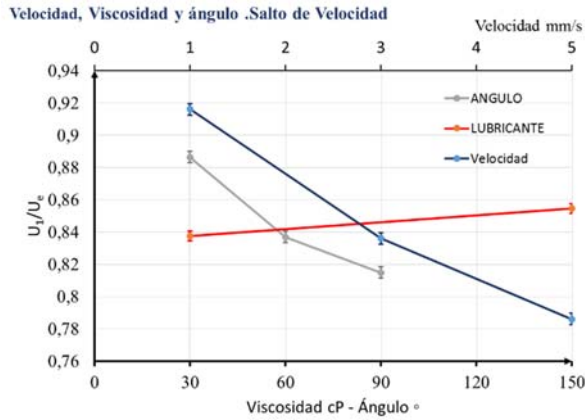


Figura 9. 16 Grafico Medias LSD. Salto Velocidad U_1/U_c . Ecuación 8. 13

La ecuación obtenida en el ajuste:

$$\text{Salto Velocidad (Ec.8.13)} = 1,28812 - 0,00119356.\text{Angulo} + 0,000142822.\text{Lubricante} - 0,0684325.\text{Velocidad diferencial}$$

9.5.11 Razón de pendientes a la entrada

Variable dependiente: Razón de pendientes a la entrada, R_p Ecuación 8.14

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30° , 60° , 90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Los resultados del diseño de experimentos indican que ninguna de las variables tiene significación, Figura 9. 17.

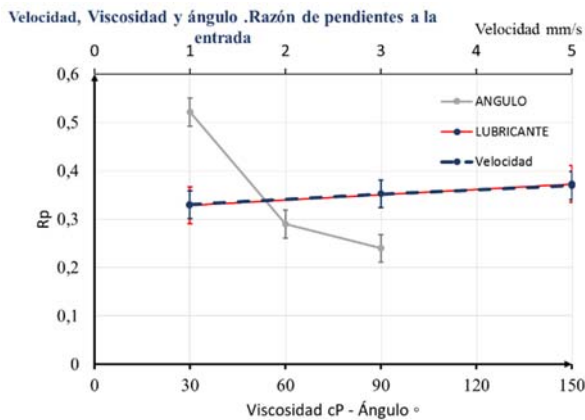


Figura 9. 17 Medias LSD. Razón de pendientes de entrada

Los gráficos de medias e intervalos de confianza de las tres variables están completamente solapados, no influyendo en la variabilidad de la media

El resultado del ajuste de regresión:

Razón de pendientes a la entrada = 0,483368 - 0,00470079.Angulo + 0,000359767.Lubricante + 0,020856.Velocidad diferencial

9.5.12 Diferencia de rugosidades longitudinales.

Variable dependiente: Diferencia de rugosidades longitudinales Ecuación 6.2

$$VRm = DRm_2 - DRm_1$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

El resultado del diseño de experimentos revela que la variable lubricación es significativa en este caso, con P-Valor =0,033, Figura 9. 18.

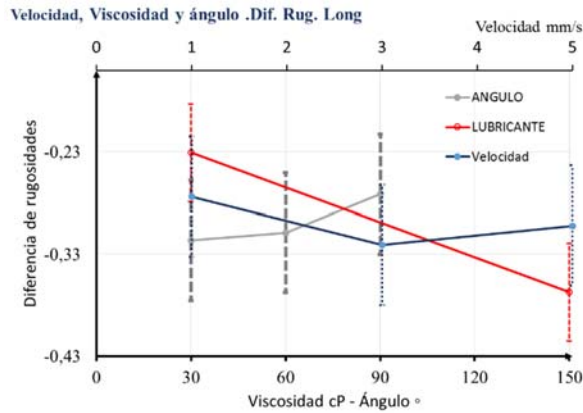


Figura 9. 18 Valores de Diferencia de rugosidades longitudinales. Ec. 6.2

Ecuación obtenida en el ajuste:

Diferencia Rug Long (Ec 6.2) = -0,363258 + 0,000752812.Angulo + 0,00113623.Lubricante - 0,0148284.Velocidad diferencial

9.5.13 Diferencia de rugosidades transversales

Variable dependiente: Diferencia de rugosidades transversales R_t Ecuación 6.2

$$VR_m = DR_{m_2} - DR_{m_1}$$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Tabla 9. 8 Análisis de Varianza de la variación de Rugosidad Transversal

Análisis de Varianza para Diferencia Rug Tansv

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Angulo	6,10803	1	6,10803	5,08	0,0287
B:Lubricante	2,40076	1	2,40076	2,00	0,1639
C:Velocidad diferencial	2,20718	1	2,20718	1,84	0,1816
bloques	0,179248	2	0,0896239	0,07	0,9282
Error total	57,6683	48	1,20142		
Total (corr.)	68,5635	53			

El resultado de ANOVA indica que el ángulo es significativo, sin embargo este resultado no se consideró útil en el estudio

Resultado del ajuste:

$$Diferencia\ Rug\ Tansv = 1,92703 - 0,0137302.Angulo + 0,0035142.Lubricante - 0,260642.Velocidad\ diferencial$$

9.6 Resultados sobre la superficie. Rugosidades medidas.

La Figura 9. 19 presenta, de forma resumida, el conjunto de rugosidades longitudinales y transversales antes y tras el proceso de simulación de la estampación.

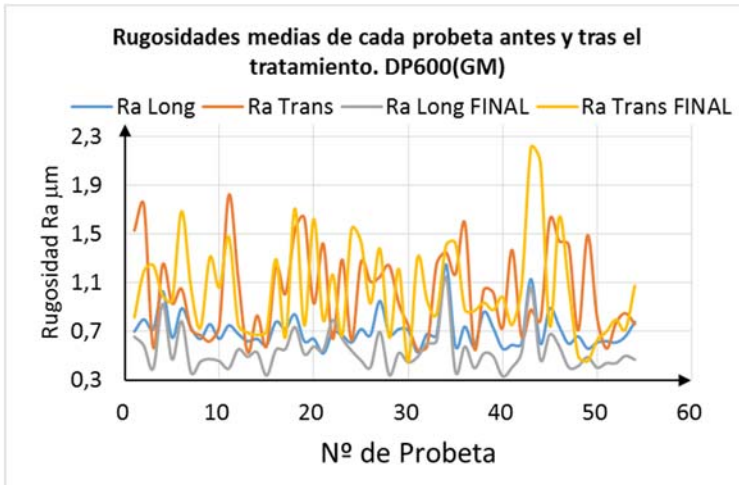


Figura 9. 19 Rugosidades obtenidas Ra DP600(GM)

Se aprecia la zonificación de las rugosidades longitudinales antes y después de la deformación.

9.7 Resultados sobre la superficie. Microscopía.

Se han realizado dos pruebas con microscopio. Una primera con microscopio convencional para hacer un visionado general, en donde se pueden apreciar los efectos de la elevada rugosidad de la herramienta. Otra con SEM con objeto de observar los cambios más importantes sobre la rugosidad.

9.7.1 Observación con microscopio

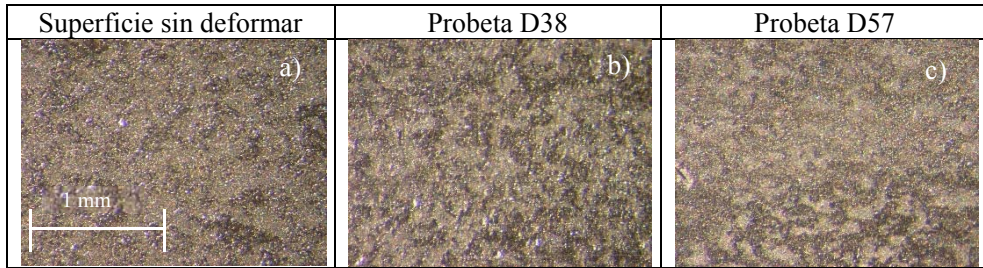


Figura 9. 20 Imágenes antes y después de deformar las probetas.

La Figura 9. 20, (a,b y c) indican la evolución del conformado. La distribución de superficies brillantes se ha cambiado como consecuencia del aplanamiento de las crestas de las rugosidades. No se aprecian efectos de daño superficial a la escala indicada

9.7.2 Observación con microscopio electrónico SEM.

Se realizaron pruebas de microscopía SEM con las mismas muestras

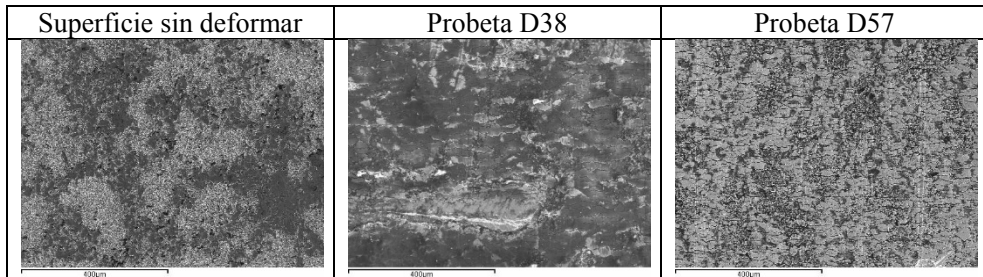


Figura 9. 21 Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x150

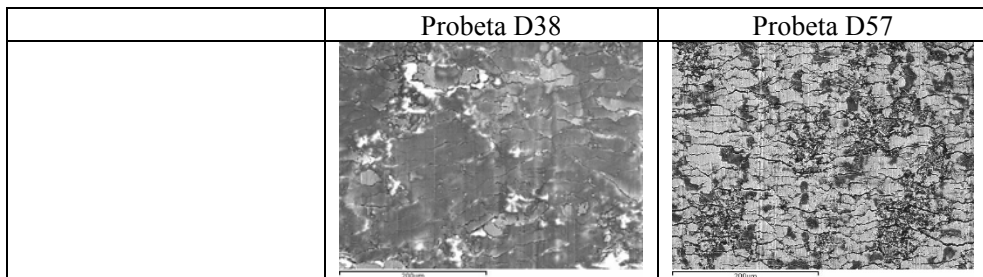


Figura 9. 22 Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x300

La probeta D38 se conformó a un ángulo de 90° , con una velocidad de 4-9 mm/s y con lubricante tipo 2.

La probeta D57 se conformó a un ángulo de 90° , con una velocidad de 14-9 mm/s y con lubricante tipo 1.

En ambas probetas se apreciaba un ligero rayado, Figura 9. 21 y Figura 9. 22.

9.8 Los resultados del equipo de simulación

Las tablas de resultados se han transformado en las gráficas siguientes que indican la evolución de la medida.

La Figura 9. 23 indica la evolución de las fuerzas a lo largo del ensayo de la probeta D54. Se presenta la Fuerzas F2 (tracción Cilindro 2), F1 (retención Cilindro 1) y la diferencia F2-F1. El punto de medida es el que se ha tomado como referencia en todos los casos

La Figura 9. 24 indica los cálculos realizados de velocidades de acuerdo con la las Ecuaciones 8.7 y 8.8.

El instante de medida es el correspondiente desplazamiento o carrera de 25 mm. Cada ensayo se arrancaba manualmente, por lo que el instante en que los actuadores iniciaban el movimiento dependía de la atención del operador. El tiempo total de desplazamiento ha sido el necesario para el desplazamiento indicado. En este caso 4,07 segundos.

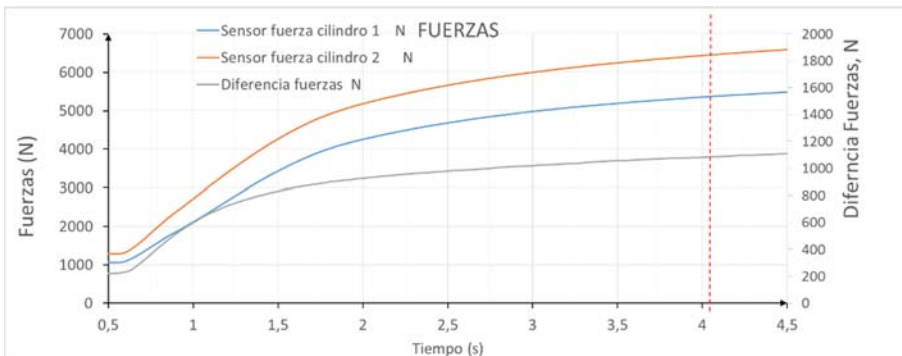


Figura 9. 23 Gráficos de resultados, Fuerzas y velocidades. Probeta D54

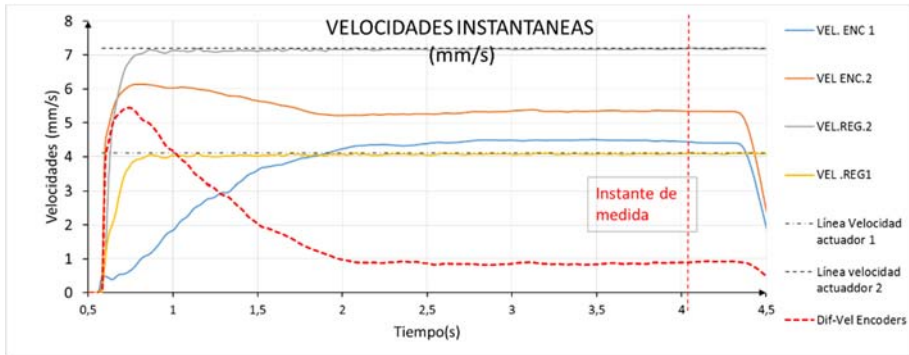


Figura 9. 24 Gráficos de resultados, Fuerzas y velocidades. Probeta D54

9.9 Discusión

Se realizaron los ensayos en forma secuencial durante una única jornada. Se comprobó mediante ANOVA que entre los tres boques ensayados no habían diferencias.

Las velocidades de deformación se seleccionaron en base a conseguir una superficie medible en cuanto a rugosidad longitudinal, y de modo que estuviesen equiespaciados (requerimiento de Statgraphics).

La tabla de los resultados se presenta íntegramente en el Anexo-B.

Se produjeron 5 roturas, en esta ocasión todas fueron a la salida de la herramienta

Los resultados de ANOVA han de ser tenidos en cuenta.

Se realizaron los experimentos correspondientes a 12 factores de eficiencia.

La variable independiente “Lubricante” ha resultó ser significativa en 5 de los factores, tal como se resumen en la Tabla 9. 9

Tabla 9. 9 Resumen de las variables significativa respecto a los parámetros de eficiencia

Variable	Lubricante	Ángulo	Velocidad
	Significación		
Coefficiente de rozamiento 1. Ecuación 5.6	SI	SI	SI
Coefficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15	SI	SI	SI
Coefficiente de Rozamiento 3. Ec 5.9	SI	SI	SI
Dif.de tensiones entre ramales. Ecuación 8. 4	NO	NO	NO
Diferencia de fuerzas específica (por unidad de ancho) entre los dos ramales. Ecuación 8. 5	SI	SI	SI
Salto de velocidades relativo. Ecuación. 8.11	NO	SI	NO

Velocidad de entrada relativa, Ecuación. 8.12	NO	NO	SI
Salto de velocidad Ecuación. 8.13	NO	NO	NO
Velocidad de deformación específica Ec. 8.9	NO	NO	NO
Razón de pendientes de entrada Rp Ec.. 8.14	NO	NO	NO
Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2	SI	NO	NO
Diferencia de rugosidades trans. Rt Ecuación 6.2	NO	SI	NO

En el conjunto de parámetros de eficiencia se encontraron además de los ya esperados Coeficientes de rozamiento 1, 2 y 3, otros dos más.

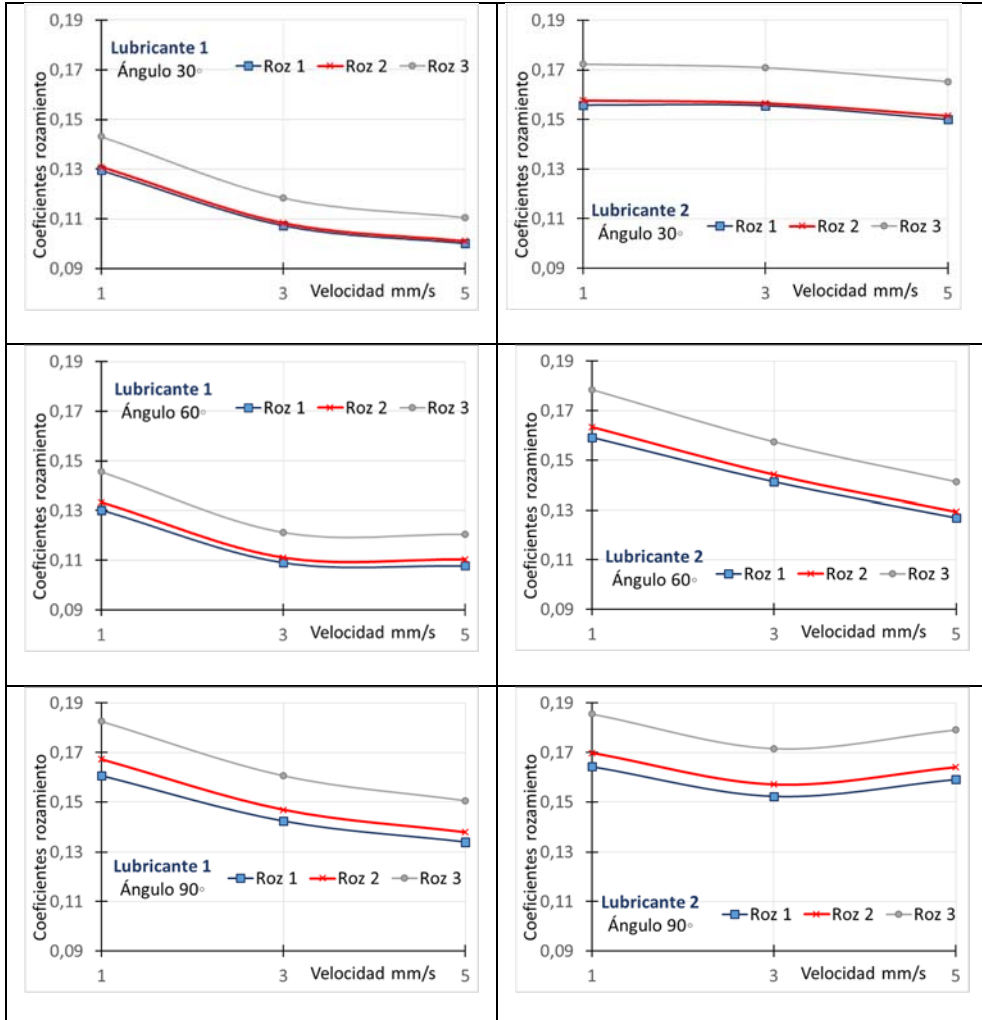
El correspondiente a la Ecuación 8. 5 está relacionado con el par de rozamiento, por lo que puede considerarse como derivado de los mismos parámetros que los coeficientes de rozamiento.

El segundo parámetro adicional es la Diferencia de Rugosidades longitudinales, según Ec. 6.2

9.9.1 Los Coeficientes de Rozamiento

Como análisis complementario, la Tabla 9. 10 refleja las posiciones relativas de los resultados de los parámetros Coeficiente de Rozamiento 1,2 y 3, para las 18 combinaciones de funcionamiento. Cada punto indica para una velocidad y ángulo el valor promedio de las tres medias (una de cada bloque). La columna de la izquierda se refiere al Lubricante 1, y la columna de la derecha al Lubricante 2.

Tabla 9. 10 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento



Los coeficientes se han calculado para un ángulo de contacto (30°, 60° y 90°), es mejor comportamiento del Lubricante 1 respecto al lubricante 2 en todos los casos.

Para encontrar el indicador más eficiente, se propuso seleccionar la configuración que suministrase mayor diferencia de medidas para las mismas condiciones reales.

Esta diferencia se definió como un Δ Parámetro, según la Ecuación 9. 1.

Al aplicarlo al Coeficiente de Rozamiento (promedio de configuraciones iguales):

$$\Delta Parámetro = |Parámetro.Lub1 - Parámetro.Lub2|$$

$$\Delta Coef = |Coef.Roz.Lub1 - Coef.Roz.Lub2|$$

Ecuación 9. 1

Para poder comparar diferentes configuraciones se utilizó en valor relativo mediante la definición de una $\Delta Diferencia$, Ecuación 9. 2

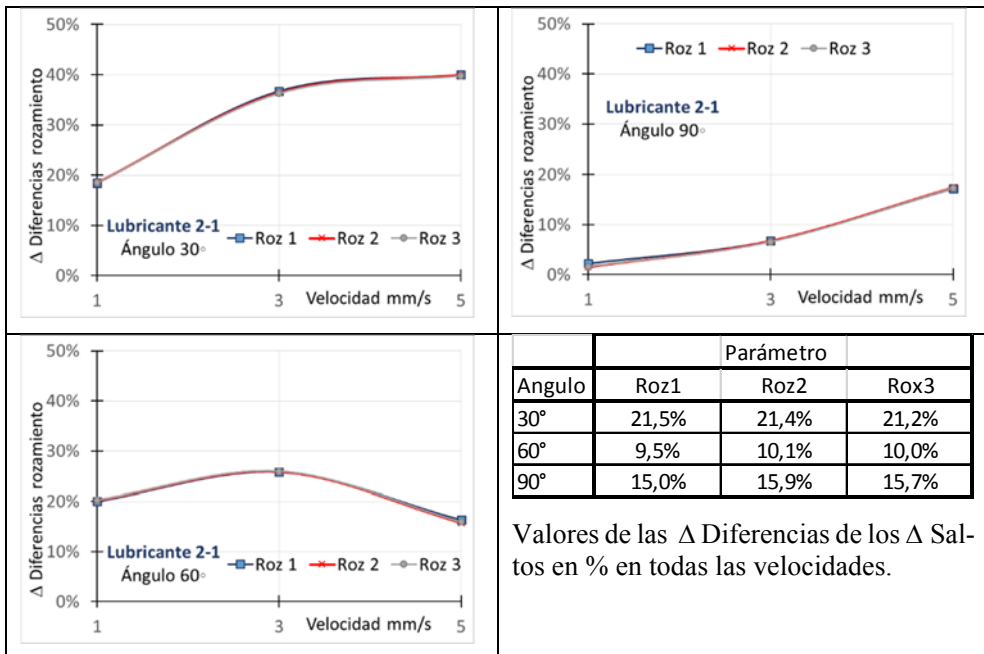
$$\Delta Diferencia = \frac{Parámetro.Lub1 - Parámetro.Lub2}{\left(\frac{Parámetro.Lub1 + Parámetro.Lub2}{2}\right)}$$

$$\Delta Diferencia.Coefi.Roz = \frac{|Coef.Roz.Lub1 - Coef.Roz.Lub2|}{\left(\frac{Coef.Roz.Lub1 + Coef.Roz.Lub2}{2}\right)}$$

Ecuación 9. 2

Cuanto mayor sea el $\Delta Parámetros$ y mayor la $\Delta Diferencia$ (en términos relativos), mejor discriminación se hará entre los lubricantes. Los resultados se presentan en la Tabla 9. 11.

Tabla 9. 11 Diferencias de rozamientos entre dos lubricantes Lub2 – Lub1



Valores de las $\Delta Diferencias$ de los $\Delta Saltos$ en % en todas las velocidades.

La Tabla 9. 11 indica tanto la posición relativa de las diferencias, Para cada ángulo, cuanto más uniformes sean los valores, mayor flexibilidad se podrá aceptar en cuanto a

seleccionar diferentes combinaciones, a fin de incorporar otro factor de comparación, se definió un parámetro de uniformidad, que es la simple diferencia de $\Delta Diferencias$ para cada ángulo, y que se denominó $\Delta Salto$, y aparece en la cuarta celda de la Tabla 9.11.

$$\Delta Salto = \Delta Diferencia_{M\acute{A}X} - \Delta Diferencia_{min}$$

Ecuación 9.3

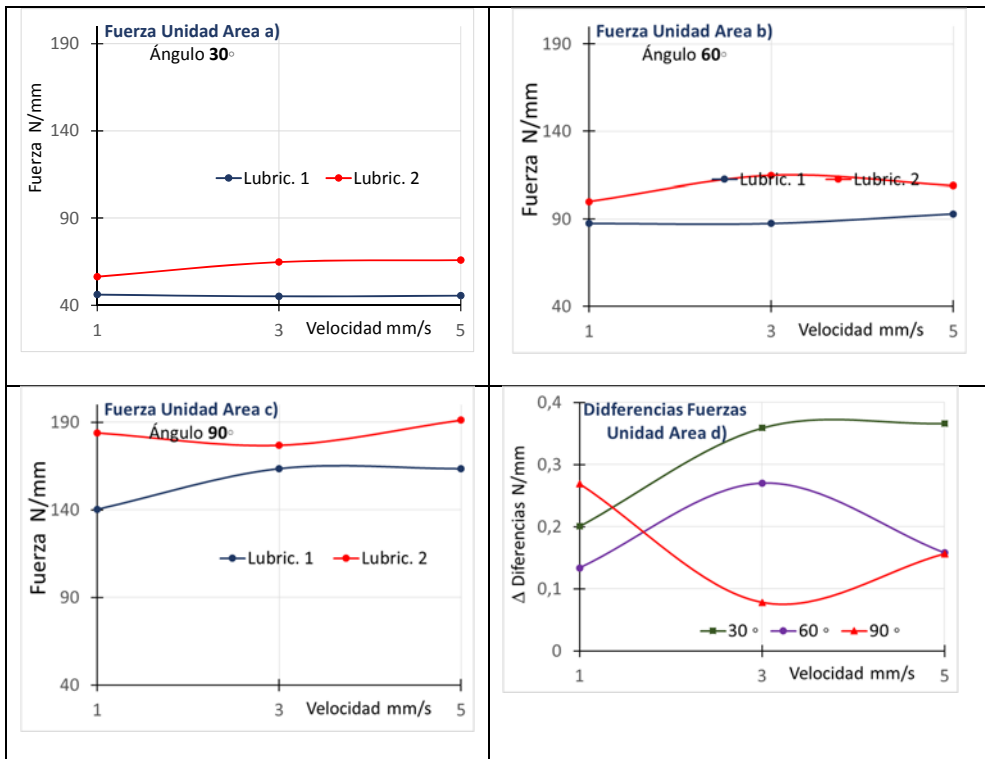
Cuanto más alineados sean los resultados, menor será el parámetro $\Delta Salto$. El conjunto de parámetros seleccionado ha de ser sobre todo útil. Los parámetros indicados solamente servirán para diferenciar entre los conjuntos de parámetros.

9.9.2 Diferencia de Fuerzas Específica

El cuarto parámetro cuya variación es significativa respecto a la lubricación es la “Diferencia de Fuerzas Específica”, respecto a la unidad de ancho, según la Ecuación 8. 5. Parámetro que puede ser eficiente cuando los flejes sean del mismo espesor.

La Tabla 9. 12 , presenta las medias de las 18 combinaciones de parámetros. La figura d) indica las Δ Salto para cada ángulo y velocidad, siendo la peor medición la correspondiente al ángulo de 90°, donde de la herramienta ha estado más tiempo en contacto con la lámina.

Tabla 9. 12 Parámetro Diferencia de Fuerzas Específica.



Las Δ Salto de las mediciones en cada ángulo de contacto de la figura d):

Variación en cada ángulo			
	30°	60°	90°
Ángulo	16,57	13,63	19,09

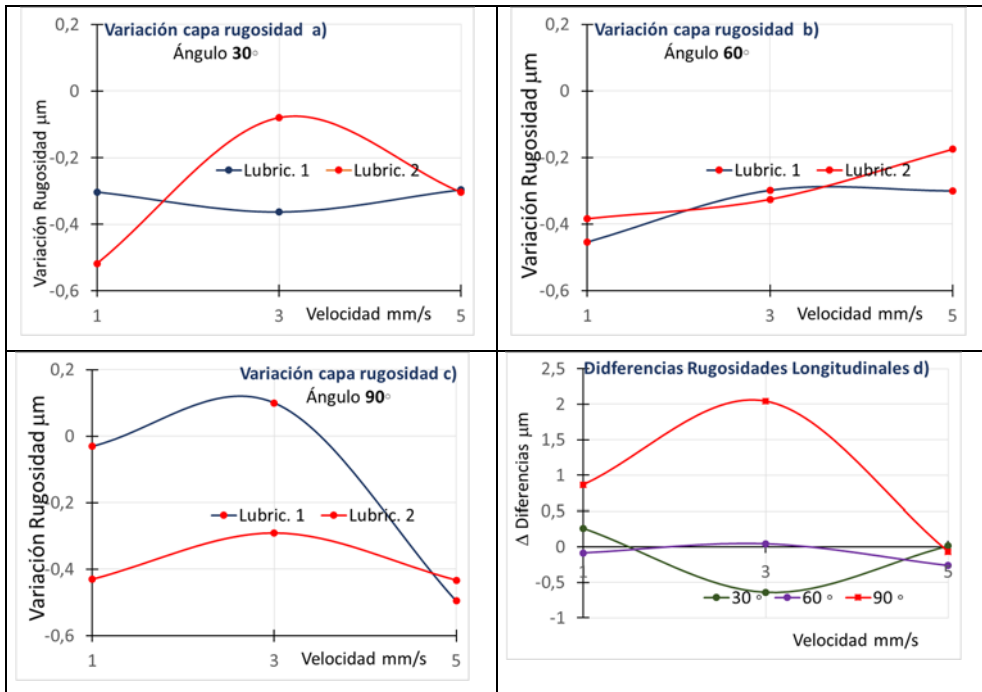
9.9.3 Diferencia de rugosidades longitudinales

La diferencia de rugosidades longitudinales, calculada con la ecuación 6.2, hace referencia a los cambios de la altura media de la capa de asperezas, y puede complementar los datos de coeficientes de rozamiento ya conocidos.

Los resultados de los ensayos indican valores negativos (reducción de la rugosidad), el lubricante que mejor opere será aquel que menos modifique la rugosidad, por esta razón la constante de la variable viscosidad es positiva en las ecuaciones ajustadas, reduciendo el valor absoluto.

A continuación, Tabla 9. 13, se resume los conjuntos de mediciones de las Diferencias de Rugosidades Longitudinales, según Ecuación. 6.2.

Tabla 9. 13 Resultados de las Diferencias Rugosidades Longitudinales



Las Δ Salto de las mediciones en cada ángulo de contacto de la figura d):

Variación en cada ángulo			
	30°	60°	90°
Ángulo	0,90	0,31	2,11

La mejor opción en este caso sería medir con un ángulo de 90° a velocidades bajas, puesto que representa el mayor tramo sin cambio de signo.

9.9.4 Comparación de las ecuaciones.

Como resumen se indican las ecuaciones obtenidas por Stargraphics para los casos en que la Viscosidad ha resultado significativa, Tabla 9. 14.

Tabla 9. 14 Ecuaciones obtenidas con significación de la viscosidad

Rozamiento 1 = 0,197958 + 0,000313379.Angulo - 0,000222811.Lubricante - 0,0104532.Velocidad diferencial
Rozamiento 2 = 0,201201 + 0,000375039.Angulo - 0,000226283.Lubricante - 0,0110881.Velocidad diferencial
Rozamiento 3 = 0,219825 + 0,000409078.Angulo - 0,000246946.Lubricante - 0,0121207.Velocidad diferencial
Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) = -18,8786 + 1,93151.Angulo - 0,176603.Lubricante + 4,70404.Velocidad diferencial
Diferencia Rug Long (Ec 6.2) = -0,363258 + 0,000752812.Angulo + 0,00113623.Lubricante - 0,0148284.Velocidad diferencial

Tomando como referencia la constante de cada ecuación de la Tabla 9. 14, las tres ecuaciones de Coeficiente de Rozamiento son similares, la Diferencia de fuerzas Específica es la que más se aproxima al orden de magnitud de la constante.

Con objeto de comprobar su comportamiento simulado, se dieron los valores de las variables a las ecuaciones obtenidas por el ajuste de mínimos cuadrados realizados por Stargraphics, con objeto de comprobar su variabilidad al aplicar los modelos obtenidos.

A cada ecuación se le aplican las nueve combinaciones (1,3 y 5 mm/s; 30,60 y 90°) que determinan las variables Velocidad y ángulo, se obtiene una línea. A cada línea se le aplica una viscosidad de lubricante (30, 60, 90, 120,150 CP). Por cada viscosidad se obtiene una matriz de 12 filas (una por parámetro) con nueve columnas. Para cada viscosidad se caracteriza cada una de las filas por su Δ Diferencia, Ecuación 9. 4 , entre los valores máximo y mínimo por fila. Cada fila representa todas las medidas que se obtendrían de un mismo material, con todas las opciones de medición.

$$\Delta Diferencia = \frac{ParámetroMAX - Parámetro\ min}{\left(\frac{ParámetroMAX + Parámetro\ min}{2} \right)} \tag{Ecuación 9. 4}$$

Cada matriz se ha transformado en un vector columna asociado a una viscosidad. Ahora se forma una matriz en que cada columna representa los rangos de medida y las filas se relacionan con las ecuaciones ajustadas de los parámetros. La serie de figuras que siguen son la representación de las variabilidades de cada una de las ecuaciones en la simulación de las viscosidades antes indicadas.

La Figura 9. 25 representa la curva la variabilidad de cada una de las ecuaciones al aplicar las diversas viscosidades. Curvas paralelas al eje, y próximos a lo horizontal indican un buen comportamiento del parámetro.

Para poder discriminar entre ellas, se desglosa la figura en grupos. En primer lugar se eliminó la curva correspondiente a la Rugosidad Transversal, según Ecuación 6. 2 .

En la Figura 9. 26 se separaron las ecuaciones con menor variabilidad (más robustas). Son los tres coeficientes de rozamiento, y la variación del Salto de Velocidad, que no varía con la viscosidad. El salto de Rugosidad Longitudinal solamente es estable en las bajas viscosidades.

En la Figura 9. 27 se separaron los parámetros con mayor variabilidad.

Las ecuaciones con gran variabilidad darán valores muy diferentes al cambiar la viscosidad. Las ecuaciones con poca variabilidad darán valores dentro de un rango más estrecho, y por tanto más fácilmente controlable.

Se hace notar, que se ha hecho una clasificación visual entre las curvas de la Figura 9. 25 , observando la figura no es necesario establecer ningún criterio

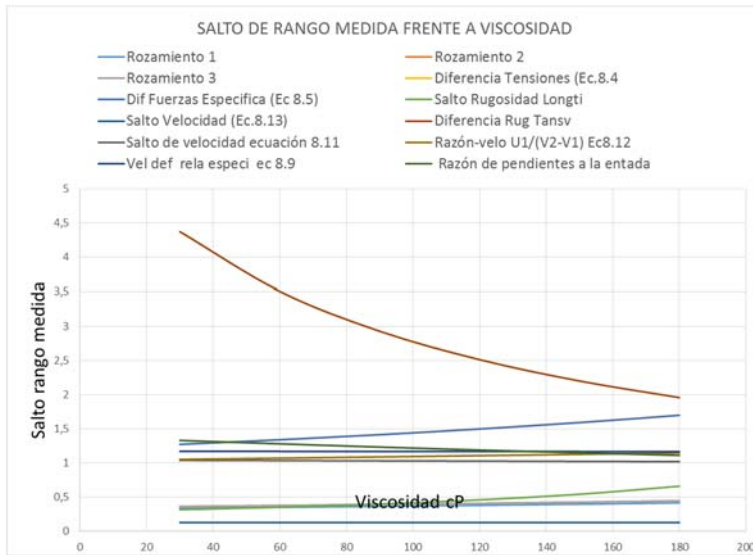


Figura 9. 25 Conjunto de curvas de variabilidad de cada Ecuación .DP600(GM)

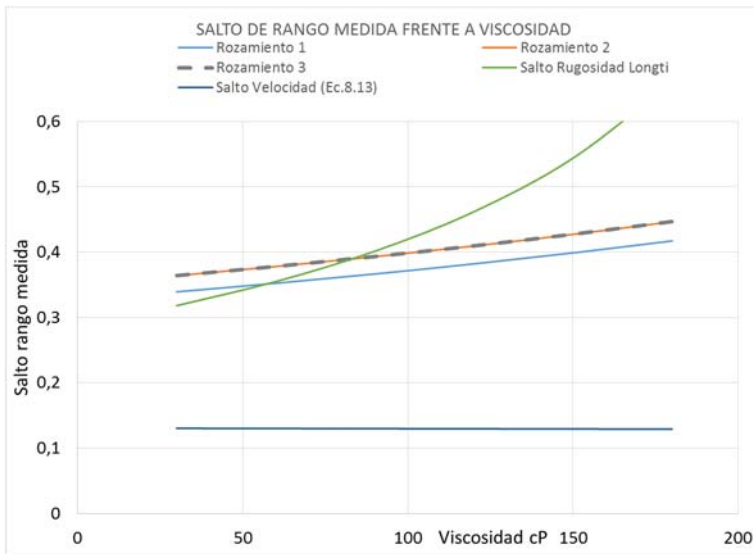


Figura 9. 26 Conjunto de curvas de baja variabilidad .DP600(GM)

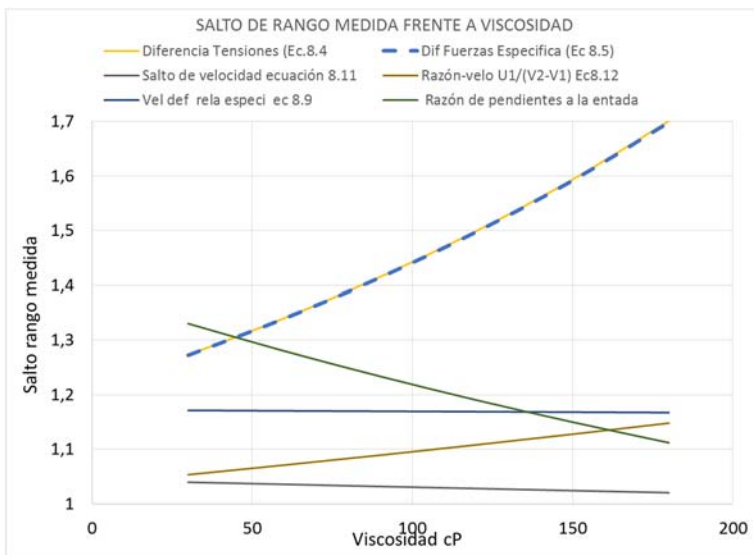


Figura 9. 27 Conjunto de curvas de alta variabilidad .DP600(GM)

9.9.5 Otras consideraciones

Las gráficas presentadas en la Figura 9. 23 indican un arranque lento de los sistemas de adquisición mediante encoder, siendo adecuado el funcionamiento cuando siguen una trayectoria aproximadamente paralela a las regletas ópticas.

9.9.5.1 Velocidad sobre la probeta

Con objeto de tener un orden de magnitud de la influencia de la velocidad del punzón sobre el movimiento sobre la herramienta se realizaron correlaciones, se detallan a continuación, indicándose en rojo, los factores más significativos en cada magnitud, Tabla 9. 15 y Tabla 9. 16 .

Tabla 9. 15 Velocidades diferenciales U2-U1 (mm/s)

V2-V1 mm/s	Angulo Contacto		
	30	60	90
1	0,37	0,65	0,69
3	0,88	0,92	0,95
5	1,08	1,14	1,16

Tabla 9. 16 Factores sobre la velocidad de la herramienta

$90(U2-U1)/((V2-V1)(Angulo)) = 1,93485 - \mathbf{0,120018} \cdot V2 \text{ HOJAS} - 0,00768674 \cdot \text{ANGULO} - 0,00167843 \cdot \text{Velocidad Diferencial} - 0,00008542 \cdot \text{Viscosidad en cP}$
$(U2-U1) = 0,159964 + 0,0402502 \cdot V2 \text{ HOJAS} + 0,00253714 \cdot \text{ANGULO} + \mathbf{0,104629} \cdot \text{Velocidad Diferencial} - 0,000559194 \cdot \text{Viscosidad en cP}$
$(U1+U2)/2 = 3,15441 + 0,000393898 \cdot \text{Viscosidad en cP} + 0,0698903 \cdot \text{Velocidad Diferencial} - 0,00292562 \cdot \text{ANGULO} + \mathbf{0,311962} \cdot (v1+v2)/2$
$(U1+U2)/2 = 3,594 - 0,00305052 \cdot \text{ANGULO} + 0,000438581 \cdot \text{Viscosidad en cP} + \mathbf{0,212051} \cdot V2 \text{ HOJAS}$

La viscosidad no tiene apenas influencia en la variación de velocidad.

9.10 Aplicación del modelo

A la vista de los datos anteriores puede seleccionarse una combinación de parámetros que permita evaluar las diferencias en cuanto a comportamiento del lubricante.

El conjunto de Coeficientes de Rozamiento son los mejores parámetros de estudio, están en la zona de baja variabilidad y para comparar la calidad, para hacer la comparación, el candidato fue Coeficiente de Rozamiento 1 (Ecuación 5. 6) se tomó también del otro grupo el Parámetro Razón de Velocidades (Ecuación 8. 12), que no es candidato de acuerdo con los criterios antes indicados.

Se tomó la combinación de ángulo de 30° y velocidad

Se tomaron:

Lubricante 1, probetas: D13, D31 y D42

Lubricante 2, probetas: D16, D29 y D47.

Se recuperaron las gráficas, y se hicieron mediciones en 9 puntos equiespaciados, desde el instante que se utilizó en los experimentos, y se retrocedió hasta la mitad del tiempo, obteniendo luego los intervalos iguales. Los instantes relativos se denominaron 1 a 9.

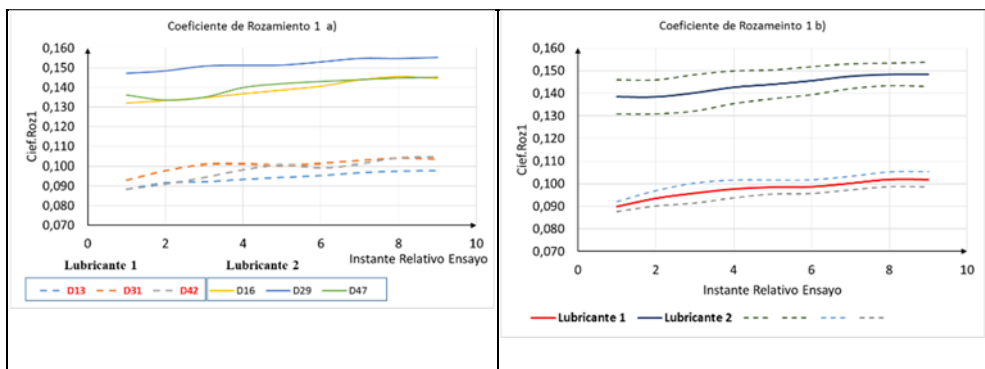


Figura 9. 28 Resultados de la aplicación de Roz1.

La Figura 9. 28 indica en el lado izquierdo los resultados de las seis probetas desde el 50% hasta el 100% de la deformación de referencia, la gráfica de la derecha indica las medias y los recorridos del parámetro. Se evidenció el mejor comportamiento ante el Parámetro Coeficiente de Rozamiento 1 del Lubricante 1.

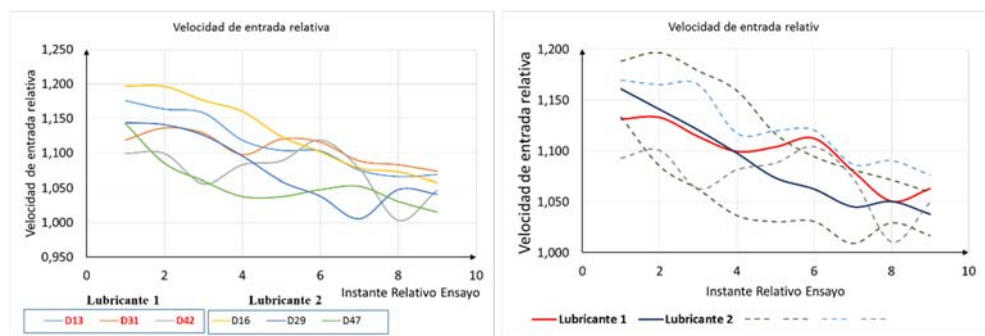


Figura 9. 29 Resultados de la aplicación de Vel. Entrada Relativa

La Figura 9. 29 evidencia que el parámetro Razón de Velocidades (Ecuación 8. 12) no es útil para discriminar entre lubricantes. El procedimiento de selección de parámetros evidencia que el descarte era correcto.

9.11 Conclusiones parciales.

La serie de probetas se deformó lo suficiente para medir tanto las rugosidades longitudinales como transversales.

Los resultados revelan la posibilidad de hacer la evaluación de la capa de asperezas.

Las deformaciones permanentes en los dos ramales permitían comprobar el estado de carga que indicaba el sistema de medición

La rotura de algunas probetas indican que es conveniente probar anticipadamente los niveles de deformación para evitar las roturas.

El funcionamiento de los encoders impidió utilizarlos como acumuladores de las deformaciones de entrada y salida de la probeta, se hace necesario hacer ajustes para su correcto funcionamiento.

Los resultados correspondientes a los Rozamientos 1, 2 y 3 mostraron siempre la diferencia de medidas entre los dos lubricantes, Tabla 9. 10. La Tabla 9. 11 mostraba que los ángulos de contacto 30° y 60° daban mediciones con una diferencia mayor entre los dos aceites.

Los resultados del parámetro Diferencia de fuerzas específica (Ecuación 8. 5) mostraron que el Lubricante 1 siempre fue mejor, dado que se requería menor diferencia de fuerzas para realizar el movimiento. El ángulo de 30° presentó las mayores diferencias y por lo tanto el que mejor marcaba la superioridad del Lubricante 1.

El resumen de la -“Diferencia de Rugosidades Longitudinales”-, que indica cómo se reduce el espesor idealizado de la capa de asperezas se detalló en la Tabla 9. 13. Los resultados no indicaron siempre una diferencia del mismo signo entre los dos lubricantes, el mejor ángulo para comparar fue el de 90°, ángulo que es el peor para los otros cuatro parámetros.

En la simulación se ha evidenciado la eficacia del Parámetro de comparación Rozamiento 1, frente al Velocidad de entrada relativa, que no había sido seleccionado.

Como conclusión provisional se consideraron los Coeficientes de Rozamiento 1,2 y 3 como indicadores consistentes, y los otros dos parámetros Diferencia de fuerzas específica (Ecuación 8. 5) es un candidato próximo a los anteriores. Las Diferencias de Rugosidades Longitudinales pueden ser incorporadas como parámetro de análisis complementario.

La velocidad del fleje sobre la probeta no depende fundamentalmente del lubricante. Los parámetros fundamentales son las velocidades absoluta y relativa del punzón. La influencia del factor lubricante no es significativa directamente. Sin embargo a más rozamiento, mayor fuerza del actuador, y mayor potencia consumida a la misma velocidad

Capítulo 10

Resultados. Estudio del TWIP (POSCO)

Resumen:

Este es el último material ensayado. Su comportamiento en deformación es muy diferente del visto en el Capítulo 9.

Se realizan los ensayos, Se aplica Diseño Factorial de Experimentos, quedando cinco candidatos, y se obtienen los índices de eficiencia de cada uno de ellos.

Se simula el comportamiento de las ecuaciones seleccionadas.

Se discute en cada candidato su eficiencia particular. Finalmente se aplica el modelo.

10 Resultados. Estudio del TWIP (POSCO)

El Laboratorio Central de Investigación de GM remitió diferentes materiales para su evaluación frente a la deformación en el conformado.

Uno de los parámetros a obtener es el comportamiento ante el rozamiento, y este trabajo es una oportunidad para su estudio.

Se remitieron láminas cortadas de 800x50 mm de TWIP, con superficie recubierta de film protector.

La herramienta fue la misma que se utilizó con el DP600 (GM).

10.1 Las probetas

El material utilizado tiene la sección que se indica en el Anexo-C, con un espesor de 1,17-1,21 mm, sin recubrimiento de Zinc.

Las características del material, obtenidas en la Máquina Universal de la EPSA fueron las siguientes, Figura 10. 1 para los datos nominales:

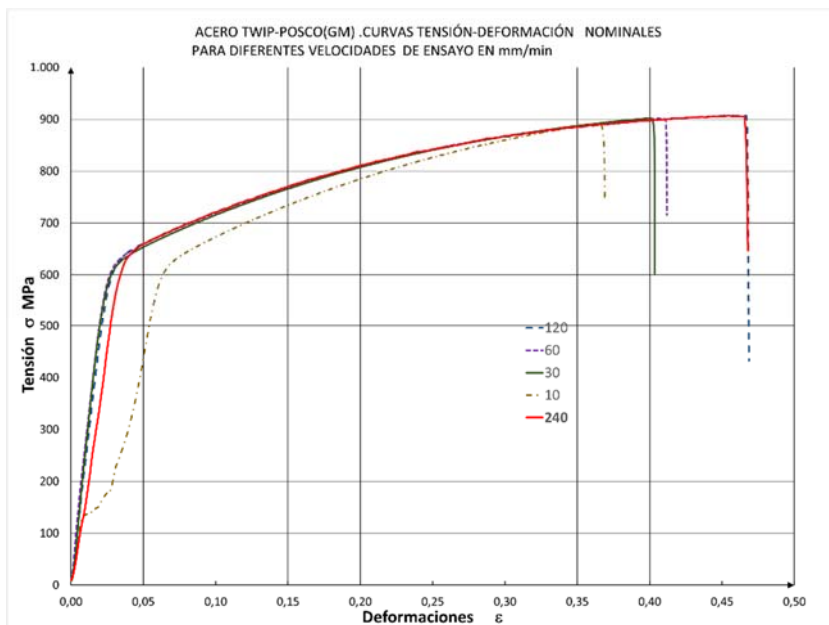


Figura 10. 1 Curva Tensión-Deformación Nominal TWIP

La Figura 10. 2 muestra uno de los bloques de probetas que se obtuvieron para esta investigación.



Figura 10. 2 Conjunto de probetas TWIP (GM). Antes y después de la preparación. Bloque 1

Las medidas de rugosidad permitieron obtener perfiles pre-post conformado, Figura 10. 3 .

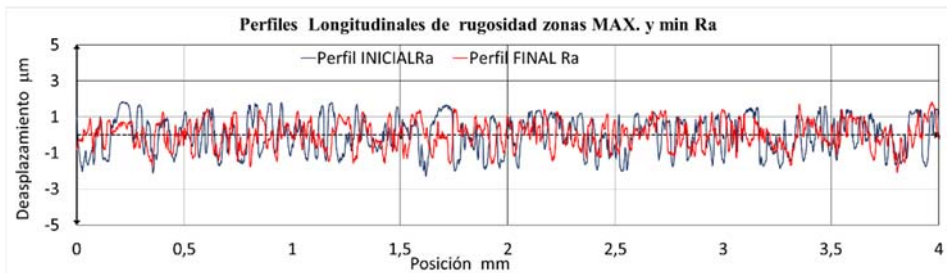


Figura 10. 3 Perfiles Rugosidad. Probeta T1. LL-Pre. FI-Post. Conformado

Las tablas de dimensiones y rugosidades se presentan en el Anexo B

10.2 Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos se realizó íntegramente con el programa Statgraphics.

10.2.1 Variables de Ensayo

Se tomaron las mismas variables que en el caso DP600(GM): ángulo de contacto, velocidad de los actuadores y los mismos lubricantes

10.2.1.1 *La velocidad de ensayo.*

Como resultado de la experiencia del primer experimento de dos bloques, se debía buscar una combinación de tres pares de velocidades que pudiesen incorporarse en el programa de Statgraphics como variable, y que estuviesen equiespaciados. El control del sistema se hace sobre el desplazamiento de los actuadores, y la velocidad a que se desplaza el fleje sobre la herramienta es un resultado de este control.

Así mismo, la longitud de la zona tratada debía poder verificarse en cuanto a rugosidad longitudinal.

Se tomó la siguiente combinación de velocidades:

Tabla 10. 1

Velocidad de entrada	Velocidad de salida	Velocidad promedio	Velocidad diferencial nominal	Tiempo de ensayo	Longtud mínima tratada	Longitud Tramo derecho	Deformación relativa máxima
mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	s	mm(1)	mm	(2)
4	5	4,5	1	10	40	100	10%
4	7	5,5	3	7	28	100	21%
4	9	6,5	5	5	20	100	25%

(1) caso de que solamente se alimentase desde la izquierda.

(2) caso de que solamente se deformase el tramo de la derecha.

El valor de la deformación máxima es equivalente al caso del DP600 (GM), y se consideró suficientemente seguro. Para poder verificar el estado de fuerzas se medirá la deformación de cada ramal, y solamente se puede hacer si queda deformación plástica residual, por lo que se tomaron estos valores como un límite aceptable.

Las mediciones de resultados se realizaron en un desplazamiento de 36 mm. Para ellos se tomaron los valores de fuerza en los instantes 5 s, 7 s y 10 s, con las velocidades decrecientes.

10.2.1.2 *El ángulo de ensayo.*

La mayoría de los equipos encontrados en la bibliografía trabajan con un único ángulo de 90°. Otros ángulos podrían dar información de cómo se deforma el material en diferentes condiciones. Los ángulos seleccionados fueron de 90°, 60° y 30°.

10.2.1.3 *Los lubricantes.*

La estrategia de mejora que se propone es la comparación de lubricantes entre sí, y seleccionar el mejor en cuanto a la respuesta de las superficies.

Se obtuvieron se denominaron del siguiente modo Lubricante 1 (Hughto Drive B75 Galv), Lubricante 2 (Hughto Drive S130), cedidos por gentileza de la empresa Flinsa., las viscosidades dinámicas ensayadas en laboratorio fueron respectivamente de 150 cP

y 30 cP a una temperatura de 24°C, muy próxima a la de ensayo. Por lo que se consideraron valores de ensayo.

10.3 El diseño factorial del experimento.

Se disponía de 2 factores a tres niveles y un factor a 2 niveles. La realización del diseño factorial completo requiere de $3^2 \cdot 2^1$ ensayos para cada experimento, 18 probetas por bloque. Se obtuvieron 54 probetas, más 4 de repuesto para posibles errores.

Se tomó la opción de Diseño Multifactorial Multinivel.

Se obtuvo la siguiente secuencia para cada réplica, determinado por el diseño generado por Statgraphics con la opción de aleatorizar el orden, Tabla 10. 2.

Tabla 10. 2 Variables de ensayos de cada bloque

BLOQUE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Vel. entrada	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Vel. salida	5	7	7	6	7	5	5	9	9	6	9	7	9	6	9	9	7	7
ANGULO	90	30	60	30	60	30	60	60	90	60	90	90	30	90	60	30	90	30
LUBRICANTE	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1
PROBETA N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
BLOQUE	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Vel. entrada	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vel. salida	7	6	9	6	7	6	9	9	6	7	9	9	9	7	7	7	6	6
ANGULO	30	60	90	90	90	60	60	60	30	90	30	90	30	30	60	60	30	90
LUBRICANTE	1	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2
PROBETA N°	19	20	21	36	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	22
BLOQUE	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Vel. entrada	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vel. salida	7	9	7	6	9	9	6	6	6	7	9	6	9	7	7	9	6	7
ANGULO	90	90	30	60	60	30	60	30	90	30	30	90	90	90	60	60	30	60
LUBRICANTE	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2
PROBETA N°	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54

10.4 Parámetros de eficiencia del sistema en proceso.

10.4.1 Datos que suministra el sistema de adquisición.

Los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos se recogen en una hoja de cálculo descargada desde el sistema de acondicionamiento Catman AP, y tratados posteriormente con Excel. Las diferentes columnas indicaron las fuerzas instantáneas, así como los ángulos de encoder y posiciones de regletas ópticas. Ya se presentaron en el 7.2 estos datos. A continuación se detallan.

F1	Fuerza del actuador 1, de retención (N)
F2	Fuerza del actuador 2 de estiramiento (N)
C1	Posición de la regleta óptica 1 (mm)
C2	Posición de la regleta óptica 2 (mm)
G1	Ángulo del encoder 1 (grados sexagesimales)
G2	Ángulo del encoder 2 (grados sexagesimales)

El sistema de adquisición discretiza el tiempo en pasos incrementales exactamente iguales, que sirven como base de integración o derivación de paso constante.

10.4.2 Parámetros de caculo para los experimentos factoriales.

La calidad en cuanto al lubricante indica reducción del rozamiento (la calidad superficial se estudia en otros apartados). Tal como se vio en el modelo desarrollado en los capítulos anteriores, existe una tensión tangencial del contacto por fricción τ_f . A mayor tensión entre superficies, mayores pérdidas de energía por rozamiento, por lo que los parámetros constitutivos de esta tensión pueden ser parámetros válidos para evaluar el comportamiento.

Así mismo se producirá un efecto sobre la superficie de la pieza, que puede ser evaluado como posible parámetro.

Se consideraron los posibles parámetros que se detallan en los apartados siguientes.

10.4.3 Parámetros seleccionados

Diferencia de fuerzas para generar el movimiento, valido para probetas de las misma sección (incorpora la fuerza para flexionar y enderezar la lámina) (N)

Los parámetros que se van a utilizar en este experimento son los de la siguiente tabla, ya definidos en el capítulo 8.

Tabla 10. 3 Parámetros de eficiencia

$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\Theta(F_1 + F_2)}$ (Corregido con la fuerza necesaria para flexionar el fleje)	Ecuación 5.6
$\mu = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{D + y}{D} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	Ecuación 5.9
$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	Ecuación 8. 15
$\frac{F1 - F2 - FB}{w_2 \cdot y_2}$	Ecuación 8. 4
$\frac{F1 - F2 - FB}{w_2}$	Ecuación 8. 5
$\dot{\epsilon} = \frac{U_2 - U_1}{\Theta \frac{d}{2}}; \quad \frac{\dot{\epsilon}}{V_2 - V_1} = \frac{2(U_2 - U_1)}{\Theta \cdot d \cdot (V_2 - V_1)}$	Ecuación 8. 9
$\frac{Ue - U_1}{V_2 - V_1} = \frac{L20V_1 + L10V_2}{L10 + L20 + t(V_2 - V_1)} \cdot U_1$	Ecuación 8. 11
$\frac{U_1}{(V_2 - V_1)}$	Ecuación 8.12
$\frac{U_1}{Ue} = \frac{(U_1 (L10 + L20 + t (V_2 - V_1)))}{((L10 - t V_1) (V_2 - V_1))}$	Ecuación 8. 13
$Rp = \frac{((U_1 - V_1) (L10 + L20 + t (V_2 - V_1)))}{((L10 - V1t) (V2 - V1))}$	Ecuación 8. 14
$VRm = DRm_2 - DRm_1$ (Longitudinal o transversal)	Ecuación 6. 2

10.4.3.1 Realización de los experimentos

Los experimentos de los Capítulos 8 y 9 reflejaron que los bloques no tenían influencia en los resultados de los parámetros de eficiencia.

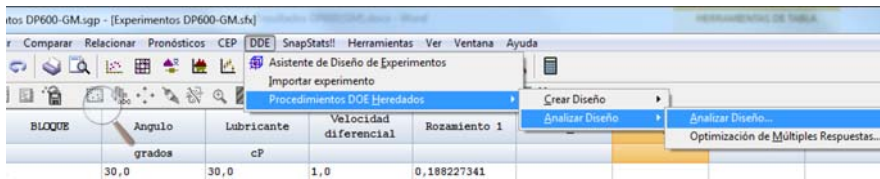
La teoría sobre los experimentos exige siempre la lo incorporación (dentro de los posible) de otros factores modificadores.

Con objeto de seguir la ortodoxia, se realizaron el conjunto de experimentos en una sesión continua desde las 8:00 hasta las 24:00 del mismo día. Se siguió el orden de ensayos, con orden aleatorio, definido por el programa Statgraphics.

10.5 Resultados del Diseño factorial completo.

Para el diseño factorial, su análisis y el Análisis de Varianza Multifactorial se utilizó el programa Statgraphics, Figura 10. 4 .

Los valores de medición se realizaron todos con un mismo desplazamiento total de 36 mm, que sería equivalente a una carrera de la misma longitud en un proceso de conformado.



Fuente: Statgraphics

Figura 10. 4 Menú Análisis de Experimentos de Statgraphics.

Posteriormente se realizará ANOVA de los factores para obtener sus curvas y líneas de regresión.

10.5.1 Influencia de los bloques

Las deformaciones se realizaron en tres bloques de 18 ensayos cada uno realizados en una sola jornada. Para descartar la influencia de los bloques, se realiza un ANOVA de los mismos sobre le Rozamiento 1.

Variable dependiente: Coeficiente de rozamiento 1

Variables independientes:

Bloques 1, 2 y3.

En la Tabla 10. 4 se detallan los principales resultados.

Tabla 10. 4 Resultados de ANOVA y LSD sobre los bloques de ensayos

Análisis de Varianza para Rozamiento 1 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:BLOQUE	0,00000133819	2	6,69096E-7	0,00	0,9985
RESIDUOS	0,0224703	51	0,000440594		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0224716	53			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

El Valor-P es superior a 0,05, por lo que la variable bloques no tiene significación estadística en la variable dependiente Rozamiento 1.

10.5.2 Coeficiente de Rozamiento 1.

Variable dependiente: Coeficiente de rozamiento 1. Ecuación 5.6
$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\Theta(F_1 + F_2)}$$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Las tablas de resultados aparecen en el Anexo-C.

Se utilizó el programa Statgraphics para el análisis y la Tabla 10. 5 indica los resultados.

Tabla 10. 5 Resultados de ANOVA. Rozamiento 1. Ec. 5.6

Análisis de Varianza para Rozamiento 1					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Ángulo	0,00191344	1	0,00191344	10,89	0,0018
B:Lubricante	0,0112996	1	0,0112996	64,33	0,0000
C:Velocidad diferencial	0,000825723	1	0,000825723	4,70	0,0351
bloques	0,00000133819	2	6,69096E-7	0,00	0,9962
Error total	0,00843159	48	0,000175658		
Total (corr.)	0,0224716	53			

Fuente:Statgraphics

Los factores Ángulo, Lubricante y velocidad diferencial son muy significativos, por tener un Valor-P inferiores a 0,05.

La Tabla 10. 6 indica los valores del análisis LSD (Least Significant Difference), que ilustran los valores de las medias “*Media LS*” en cada caso, obtenida por mínimos cuadrados, y un intervalo de confianza de semiamplitud “*Sigma Ls*” La columna de X “*Grupos Homogéneos*” indica que as X situadas en la misma vertical no presentan diferencias significativas.

Tabla 10. 6 Resultados LSD . Rozamiento 1. Ec. 5.6

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por LUBRICANTE								
Método: 95,0 porcentaje LSD								
<i>Lubricante</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>	<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Limites</i>
150	27	0,104279	0,000925611	X	30 - 150	.	0,028931	0,00263195
30	27	0,13321	0,000925611	X	. indica una diferencia significativa.			

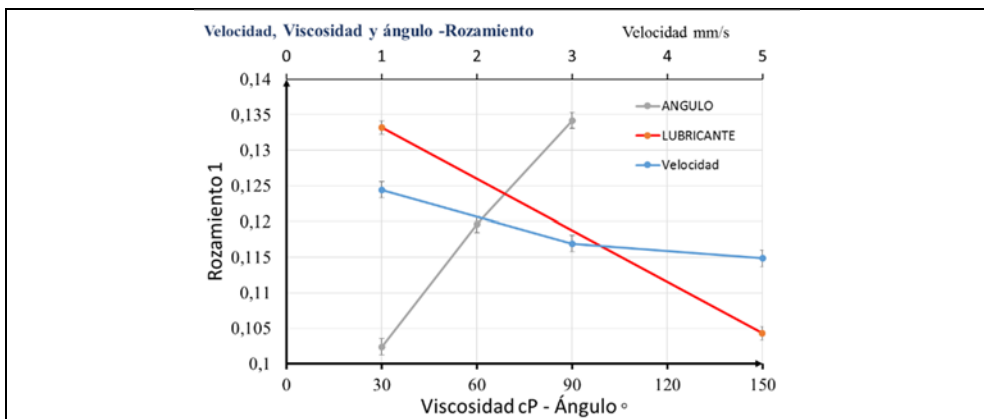
Método: 95,0 porcentaje LSD					Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>Veloci- dad dife- rencial</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé- neos</i>	1 - 3	.	0,00754271	0,00322347
5	18	0,114873	0,00113364	X	1 - 5	.	0,00957847	0,00322347
3	18	0,116909	0,00113364	X	3 - 5	.	0,00203576	0,00322347
1	18	0,124452	0,00113364	X	. indica una diferencia significativa.			

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por ANGULO					Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>An- gulo</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho- mogéneas</i>	30 - 60	.	0,031839	0,00322347
60	18	0,102379	0,00113364	X	30 - 90	.	0,0145809	0,00322347
90	18	0,119637	0,00113364	X	60 - 90	.	-0,0172581	0,00322347
30	18	0,134218	0,00113364	X	. indica una diferencia significativa.			

Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

Se observa como en la zona de velocidades 3 y 5 no hay diferencia significativa (ya ocurrió en el CD600 GM).

Tabla 10. 7 Gráfico Resultado LSD. Rozamiento 1. Ec. 5.6



La línea azul indica la escasa variabilidad con el rango de velocidades utilizado

Ecuación obtenida en el ajuste:

$$\text{Rozamiento 1} = 0,162208 - 0,000243016 \cdot \text{Angulo} - 0,000241092 \cdot \text{Lubricante} - 0,00239462 \cdot \text{Velocidad diferencial}$$

10.5.3 Coeficiente de Rozamiento 2.

Variable dependiente: Coeficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15 $\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

En el Anexo-C se detallan las tablas de resultados.

Análisis de Varianza para Rozamiento 2

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Angulo	0,00105497	1	0,00105497	5,61	0,0220
B:Lubricante	0,0120442	1	0,0120442	64,02	0,0000
C:Velocidad diferencial	0,000949438	1	0,000949438	5,05	0,0293
bloques	0,00000220875	2	0,00000110438	0,01	0,9941
Error total	0,00903058	48	0,000188137		
Total (corr.)	0,0230814	53			

Fuente : Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

Figura 10. 5 Análisis de Varianza del Experimento .Rozamiento 2

Los P-Valor son altamente significativos para cada una de las variables, el diagrama de Pareto (Ver Anexo-C) indica al lubricante como el factor con mayor influencia. Se presenta la gráfica de medias.

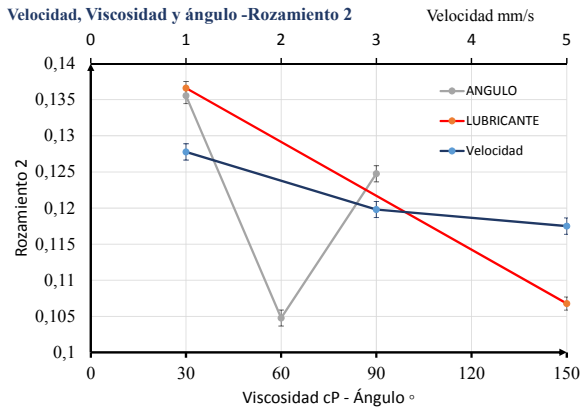


Figura 10. 6 Medias Coeficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15

Ecuación obtenida en el ajuste:

$$\text{Rozamiento 2} = 0,162621 - 0,000180446.\text{Angulo} - 0,000248909.\text{Lubricante} - 0,00256775.\text{Velocidad diferencial}$$

10.5.4 Coeficiente de Rozamiento 3.

Variable dependiente: Coeficiente de Rozamiento 3. Ec 5.9
$$\mu = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{D+y}{D} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

A Análisis de Varianza para Rozamiento 3

Fuente	Suma de Cuadros	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Angulo	0,00121771	1	0,00121771	5,61	0,0219
B:Lubricante	0,0139344	1	0,0139344	64,19	0,0000
C:Velocidad diferencial bloques	0,00110151	1	0,00110151	5,07	0,0289
Error total	0,01042	48	0,000217083		
Total (corr.)	0,0266769	53			

Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

Figura 10. 7 Análisis de Varianza del Experimento .Rozamiento 3

En el Anexo-C se detallan las tablas de resultados del ANOVA multifactorial.

Los P-Valor son altamente significativos para cada una de las variables, el diagrama de Pareto (Ver Anexo-C) indica al lubricante como el factor con mayor influencia. Se presenta la gráfica de medias.

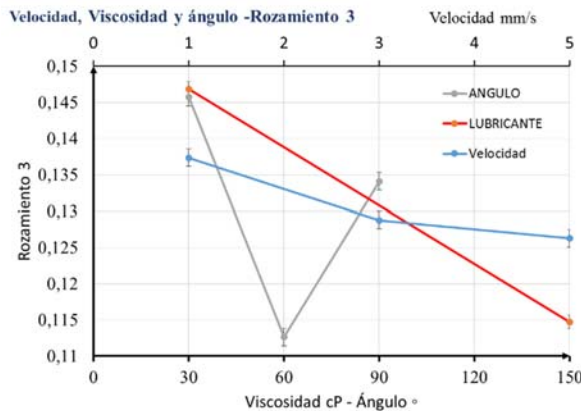


Figura 10. 8 Medias Coeficiente de Rozamiento 3 . Ec 5.7

Ecuación obtenida en el ajuste:

$$Rozamiento\ 3 = 0,174831 - 0,000193865.Angulo - 0,000267729.Lubricante - 0,00276575.Velocidad\ diferencial$$

10.5.5 Diferencia de Tensiones.

Variable dependiente:

Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ecuación 8. 4 $\frac{F1 - F2 - FB}{w_2 \cdot y_2}$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°, 60°, 90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Análisis de Varianza para Diferencia Tensiones (Ecuación 8. 4)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Angulo	47557,8	1	47557,8	766,49	0,0000
B:Lubricante	4777,04	1	4777,04	76,99	0,0000
C:Velocidad diferencial	88,8219	1	88,8219	1,43	0,2374
bloques	22,8763	2	11,4381	0,18	0,8322
Error total	2978,23	48	62,0464		
Total (corr.)	55424,8	53			

Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

Figura 10. 9 Análisis de Varianza del Experimento. Diferencia de tensiones.

Las variables Ángulo y Lubricante son altamente significativas.

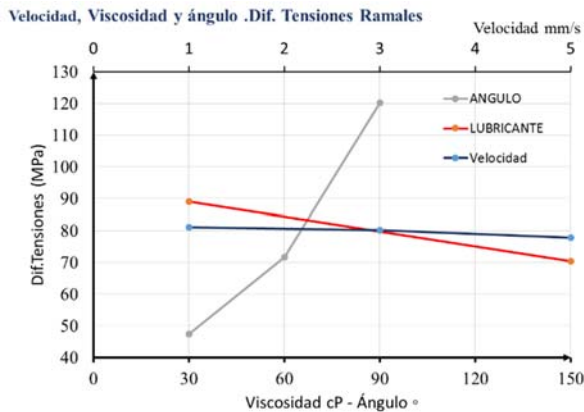


Figura 10. 10 Medias .Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ec 8.4

Ecuación obtenida en el ajuste:

Diferencia Tensiones (Ecuación 8. 4) = 18,8083 + 1,21154.Angulo - 0,156759.Lubricante + 0,785378.Velocidad diferencial

10.5.6 Diferencia de fuerzas específica.

Variable dependiente:

Diferencia de fuerzas por unidad de ancho entre los dos ramales.

$$\text{Ecuación 8.5 } \frac{F1 - F2 - FB}{w_2}$$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30c P, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Análisis de Varianza para Dif Fuerzas Especifica Ecuación 8. 5

Fuente	Suma de Cuadros	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Angulo	68395,1	1	68395,1	776,47	0,0000
B:Lubricante	6984,76	1	6984,76	79,30	0,0000
C:Velocidad diferencial bloques	114,171	1	114,171	1,30	0,2606
Error total	54,7666	2	27,3833	0,31	0,7343
Total (corr.)	4228,05	48	88,0844		
	79776,9	53			

Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

Figura 10. 11 Análisis de Varianza del Experimento. Diferencia de fuerzas por unidad de ancho,

Las variables Ángulo y Lubricante son altamente significativas.

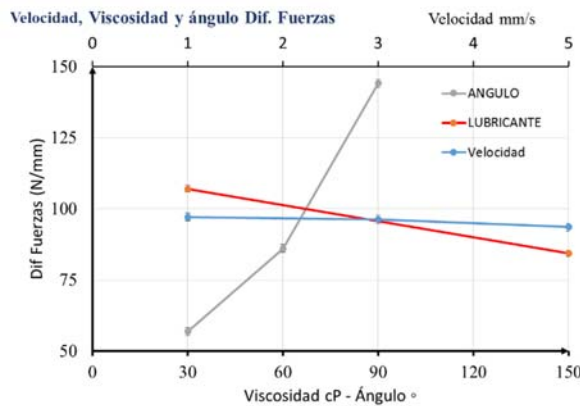


Figura 10. 12 Medias. Diferencia fuerzas-ancho. Ecuación 8. 5

Ecuación obtenida en el ajuste

$$\text{Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.9)} = 22,8149 + 1,45291.\text{Angulo} - 0,189552.\text{Lubricante} + 0,890424.\text{Velocidad diferencial}$$

Los resultados indican que el lubricante no es el factor con mayor influencia.

10.5.7 Velocidad de deformación relativa específica.

Variable dependiente: Velocidad de deformación específica Ecuación 8.9

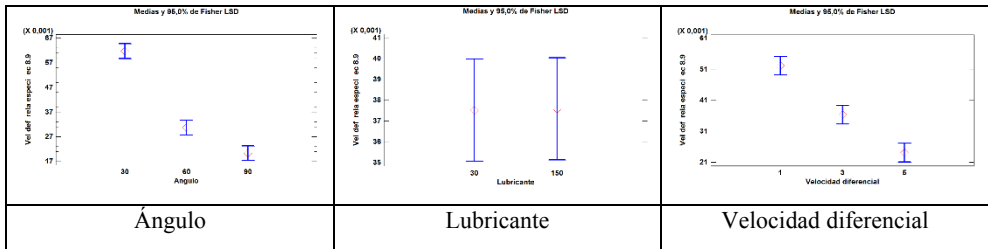
$$\frac{\dot{\epsilon}}{V_2 - V_1} = \frac{2(U_2 - U_1)}{\Theta.d.(V_2 - V_1)}$$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

El resultado del experimento no revela ningún efecto significativo sobre la varianza de la media. Ningún P-Valor está por debajo de 0,05.

Tabla 9. 8 Gráfico Medias Diferencia Tensiones. Ecuación 8. 4



Fuente: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

Los resultados anteriores se evidencian en el solape de los rangos de variabilidad en el grupo de lubricantes.

10.5.8 Salto de velocidades relativo

Variable dependiente: Velocidad de deformación específica Ecuación. 8.11 $\frac{U_e - U_1}{V_2 - V_1}$

Variabes independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

En este caso son significativas las variables ángulo y velocidad, no siendo determinante el tipo de lubricación.

La Figura 10. 13 presenta las medias para este caso

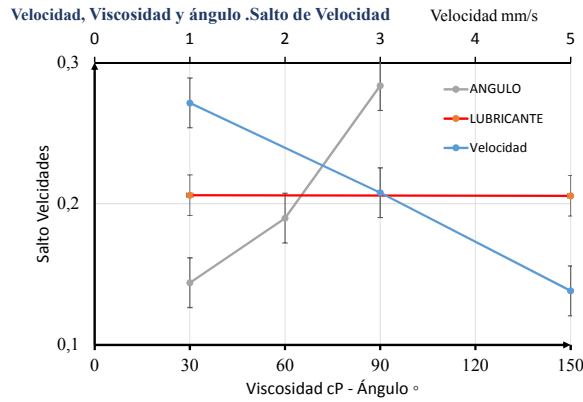


Figura 10.13 Valores del Salto de Velocidades Relativo. Ec. 8.11

10.5.9 Velocidad de entrada relativa.

Variable dependiente: Velocidad de entrada relativa, Ecuación. 8.12 $\frac{U_1}{(V_2 - V_1)}$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Los resultados del diseño de experimentos indicaron que la única variable significativa fue la velocidad diferencial, Figura 10.14.

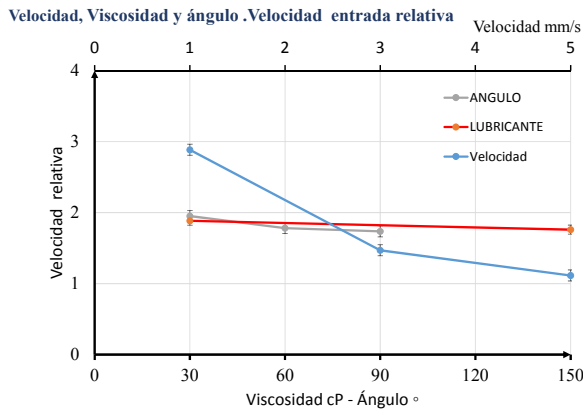


Figura 10.14 Valores de Velocidad de entrada relativa. Ec. 8.12

10.5.10 Salto de velocidad.

Variable dependiente: Salto de velocidad Ecuación. 8.13 $\frac{U_1}{U_e}$

VARIABLES INDEPENDIENTES:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

El resultado del Diseño en Statgraphics indica que la única variable significativa es el ángulo, Figura 10. 15. Las otras variables presentan solapes.

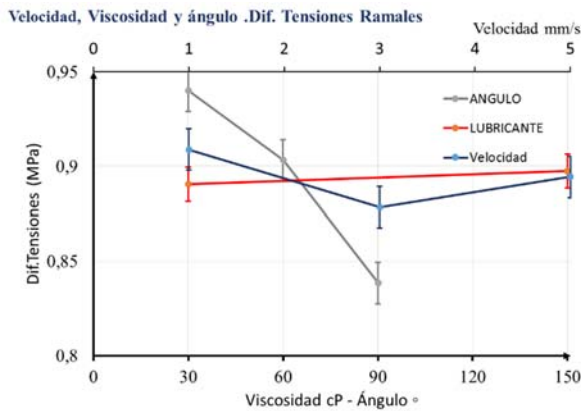


Figura 10. 15 Medias de Salto de velocidad Ecuación. 8.13

10.5.11 Razón de pendientes a la entrada

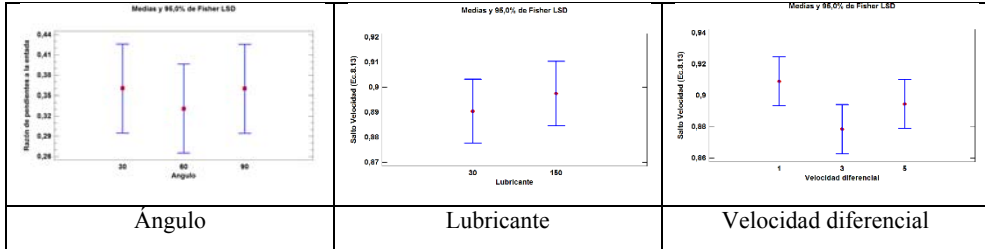
Variable dependiente: Razón de pendientes a la entrada, Rp Ecuación 8.14

VARIABLES INDEPENDIENTES:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30 cP, 150cP), Velocidad de deslizamiento de deslizamiento diferencial (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Los resultados del diseño de experimentos indican que ninguna de las variables tiene significación, Tabla 10. 9.

Tabla 10. 9 Gráfico Medias Velocidad de entrada normalizada. Ec 8.14



Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

Los gráficos de medias e intervalos de confianza de las tres variables están completamente solapados, no influyendo en la variabilidad de la media

10.5.12 Diferencia de rugosidades longitudinales.

Variable dependiente: Diferencia de rugosidades longitudinales Ecuación 6.2

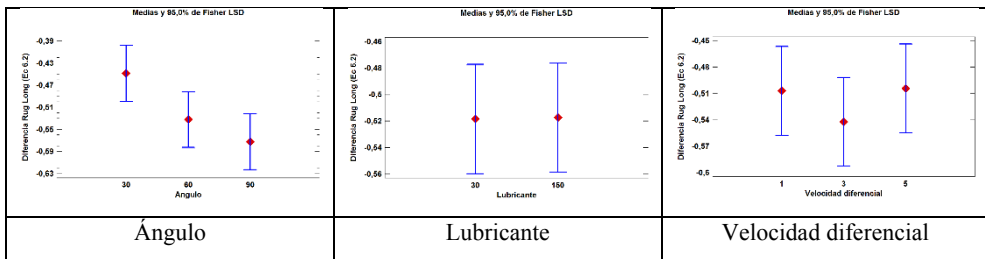
$$VRm = DRm_2 - DRm_1$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150cP), Velocidad de deslizamiento de deslizamiento diferencial (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

El resultado del diseño de experimentos revela que la variable ángulo es la única significativa. No es relevante para este estudio, Tabla 10. 10.

Tabla 10. 10 Gráfico Medias Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2



Fuente_: Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

10.5.12.1 Diferencia de rugosidades transversales

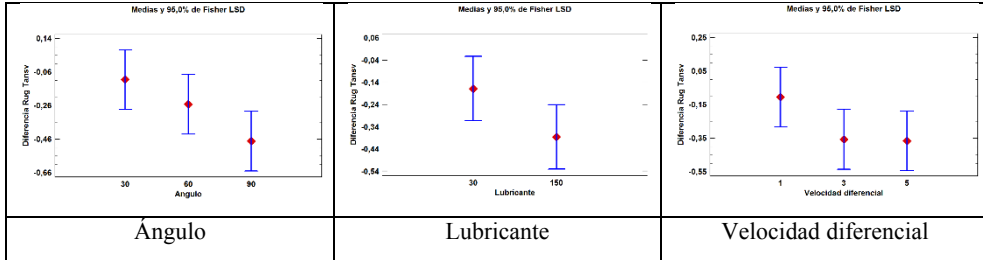
Variable dependiente: Diferencia de rugosidades transversales Rt Ecuación 6.2

$$VRm = DRm_2 - DRm_1$$

Variables independientes:

Ángulo de abrazamiento (30°,60°,90°), Viscosidad del Lubricante (30cP, 150 cP), Velocidad diferencial del movimiento (1 mm/s, 3 mm/s, 5 mm/s).

Tabla 10. 11 Gráfico Medias Diferencia de rugosidades transversales Ec. 6.2



Fuente : Cálculo con Statgraphics Centurión XVI

El resultado de ANOVA indica que el ángulo es significativo, sin embargo este resultado no se consideró significativo en el estudio, Tabla 10. 11.

10.6 Rugosidades medidas.

La Figura 10. 16 resume el conjunto de rugosidades longitudinales y transversales antes y tras el proceso de simulación de la estampación. Se aprecia la diferenciación entre rugosidades longitudinales *Ra* Pre-Post, especialmente las rugosidades longitudinales.

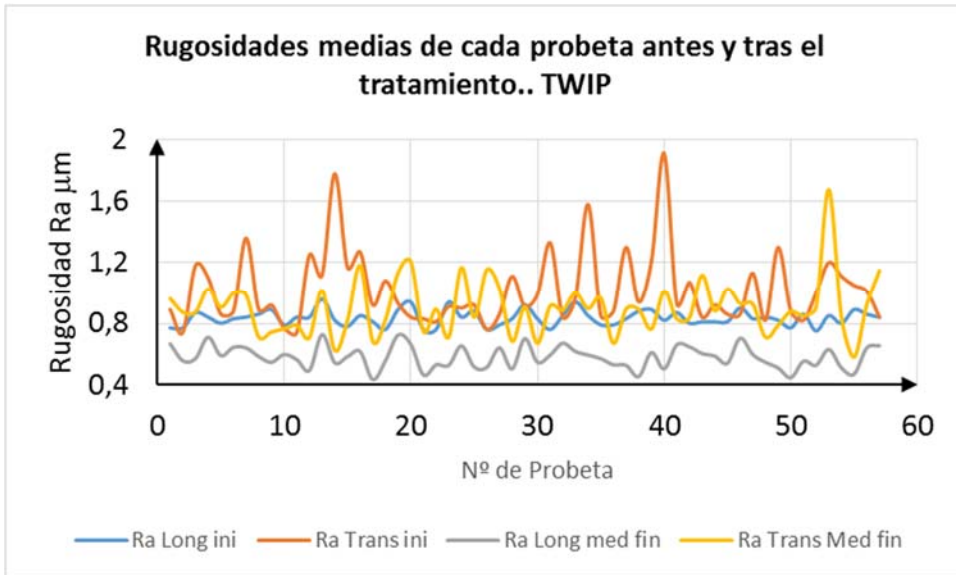


Figura 10. 16 Rugosidades antes y tras la deformación. TWIP

10.7 Resultados sobre la superficie. Microscopía.

Se han realizado dos pruebas con microscopio. Una primera con microscopio convencional para hacer un visionado general, en donde se pueden apreciar los efectos de la elevada rugosidad de la herramienta. Otra con SEM con objeto de observar los cambios más importantes sobre la rugosidad.

10.7.1 Observación con microscopio

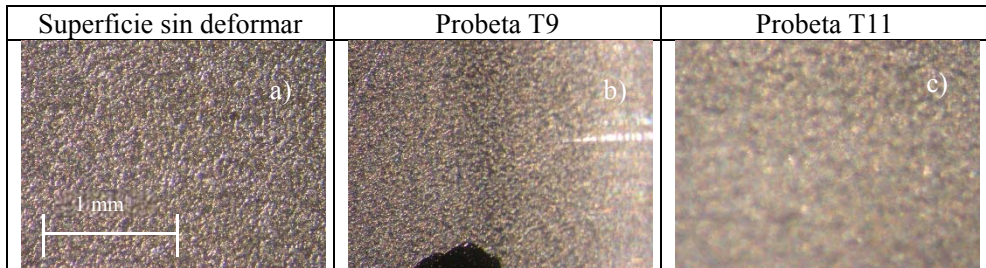


Figura 10. 17 Imágenes antes y después de deformar las probetas.

La Figura 10. 17 indica la evolución del conformado. La distribución de superficies brillantes se ha cambiado como consecuencia del aplanamiento de las crestas de las rugosidades. No se aprecian efectos de daño superficial a la escala indicada

10.7.2 Observación con microscopio electrónico SEM.

Se realizaron pruebas de microscopía SEM con las mismas muestras, Figura 10. 18.

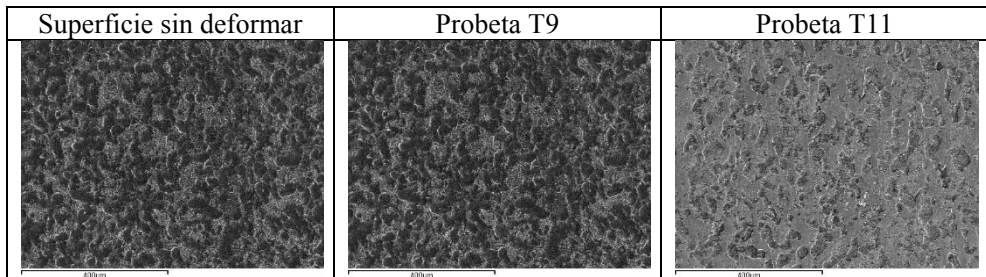


Figura 10. 18 Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x150

La probeta T9 se conformó a un ángulo de 90°, con una velocidad de 4-9 mm/s y con lubricante tipo 1.

La probeta t11 se conformó a un ángulo de 90°, con una velocidad de 14-9 mm/s y con lubricante tipo 2.

No se apreciaron rayados en las probetas analizadas

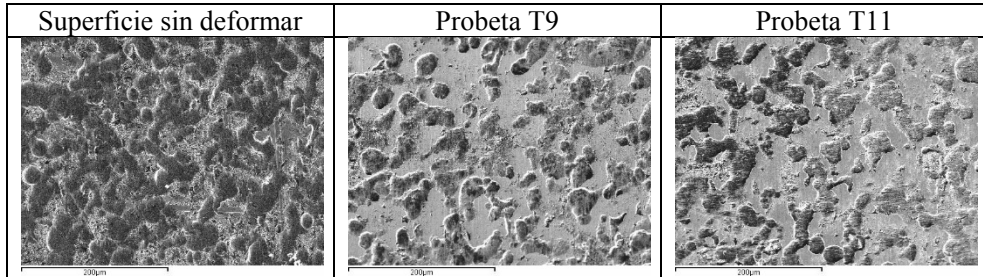


Figura 10. 19 Imágenes antes y después de deformar las probetas.SEM. 5kV x300

En ambas probetas se observa la elevada deformación de las asperezas por aplanamiento, Figura 10. 19. No se han apreciado efectos de rayado.

10.8 Los resultados del equipo de simulación

Las tablas de resultados se han transformado en las gráficas como la Figura 10. 20 y la Figura 10. 21 que indican la evolución de la medida.

La Figura 10. 20 presenta la evolución de las fuerzas a lo largo del ensayo de la probeta T44. Se presenta la Fuerzas F2 (tracción Cilindro 2), F1 (retención Cilindro 1) y la diferencia F2-F1. El punto de medida es el que se ha tomado como referencia en todos los casos

La Figura 10. 21 indica los cálculos realizados de velocidades de acuerdo con la las Ecuaciones 8.7 y 8.8.

El instante de medida es el correspondiente desplazamiento o carrera de 36 mm. Cada ensayo se arrancaba manualmente, por lo que el instante en que los actuadores iniciaban el movimiento dependía de la atención del operador. El tiempo total de desplazamiento ha sido el necesario para el desplazamiento indicado. En este caso 6,9 segundos.

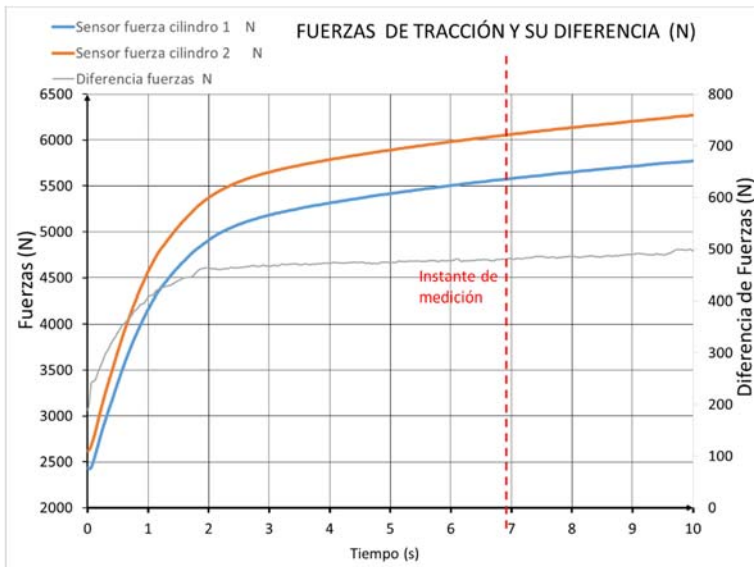


Figura 10. 20 Gráficos de resultados. Probeta T44

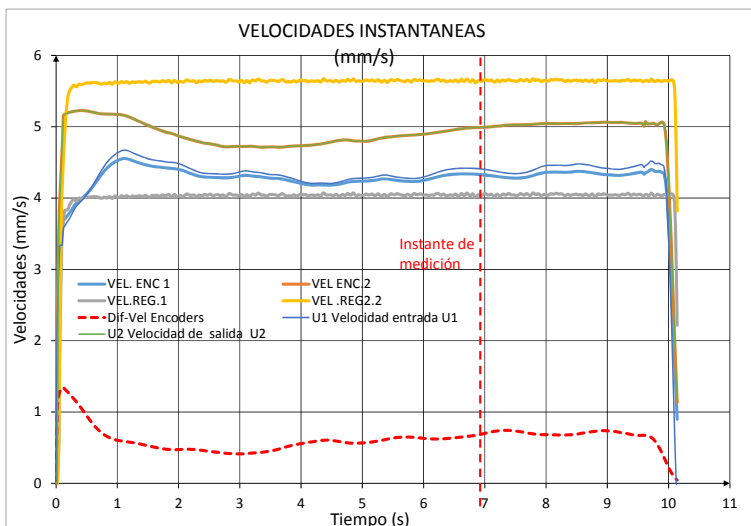


Figura 10. 21 Gráficos de resultados, velocidades. Probeta T44

10.8.1 Comentarios a la deformación

La gran deformación permitió comprobar el efecto de las tensiones residuales en las diferentes zonas, es habitual encontrar en la bibliografía gráficos con el alabeo posterior a la deformación. Esta curvatura impidió medir la variación en el ancho. Así mismo dificultó la verificación de la rugosidad.

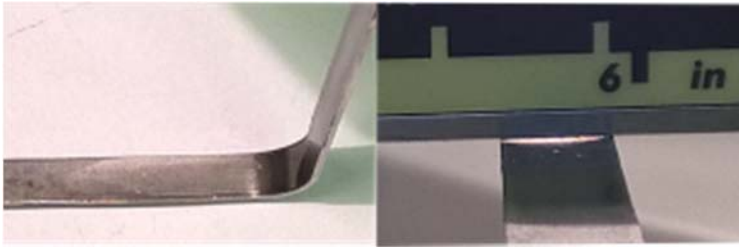


Figura 10. 22 Efecto de deformación sobre flejes conformados

10.9 Discusión

Se realizaron los ensayos en forma secuencial durante una única jornada. Se comprobó mediante ANOVA que entre los tres boques ensayados no había diferencias

Las velocidades de deformación se seleccionaron en base a conseguir una superficie medible en cuanto a rugosidad longitudinal, y de modo que estuviesen equiespaciadas (requerimiento de Statgraphics).

La tabla de los resultados los parámetros que han tenido relación con la lubricación se presenta íntegramente en el Anexo-C.

No se produjeron roturas en los ensayos

Los resultados de ANOVA han de ser tenidos en cuenta:

Se realizaron los experimentos correspondientes a 12 factores de eficiencia.

La variable independiente “Lubricante” ha resultó ser significativa en 5 de los factores, tal como se resumen en la Tabla 10. 12.

Tabla 10. 12 Resumen de las variables significativa respecto a los parámetros de eficiencia

Variable	Lubri- cante	Ángulo	Veloci- dad
	Significación		
Coeficiente de rozamiento 1. Ecuación 5.6	SI	SI	SI
Coeficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15	SI	SI	SI
Coeficiente de Rozamiento 3. Ec 5.9	SI	SI	SI

Diferencia de tensiones entre ramales. Ecuación 8. 4	SI	SI	NO
Diferencia de fuerzas específica (por unidad de ancho) entre los dos ramales. Ecuación 8. 5	SI	SI	NO
Salto de velocidades relativo. Ecuación. 8.11	NO	SI	SI
Velocidad de entrada relativa, Ecuación. 8.12	NO	SI	NO
Salto de velocidad Ecuación. 8.13	NO	SI	SI
Velocidad de deformación específica Ec. 8.9	NO	SI	NO
Razón de pendientes de entrada Rp Ec.. 8.14	NO	SI	SI
Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2	NO	NO	NO
Diferencia de rugosidades trans. Rt Ecuación 6.2	NO	SI	NO

En el conjunto de parámetros de eficiencia se encontraron cinco coeficientes. Los tres relativos a coeficientes de rozamiento, y los correspondientes a las Ecuación 8. 4 y Ecuación 8. 5, que están relacionados con el par de rozamiento.

En esta ocasión la diferencia de rugosidades no ha evidenciado influencia de la lubricación, aunque la Figura 10. 16 evidenció que estaban en franjas diferentes.

Las gráficas presentadas en la Figura 10.22 indican un arranque lento de los sistemas de adquisición mediante encoder, siendo adecuado el funcionamiento cuando siguen una trayectoria aproximadamente paralela a las regletas ópticas.

10.9.1 Los Coeficientes de Rozamiento

Como análisis complementario, la Tabla 10. 13 refleja las posiciones relativas de los resultados de los parámetros Coeficiente de Rozamiento 1,2 y 3. Para las 18 combinaciones de funcionamiento. Cada punto indica para una velocidad y ángulo el valor promedio de las tres medias (una de cada bloque). La columna de la izquierda se refiere a Lubricante 1, y la columna de la derecha al Lubricante 2.

Tabla 10. 13 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento

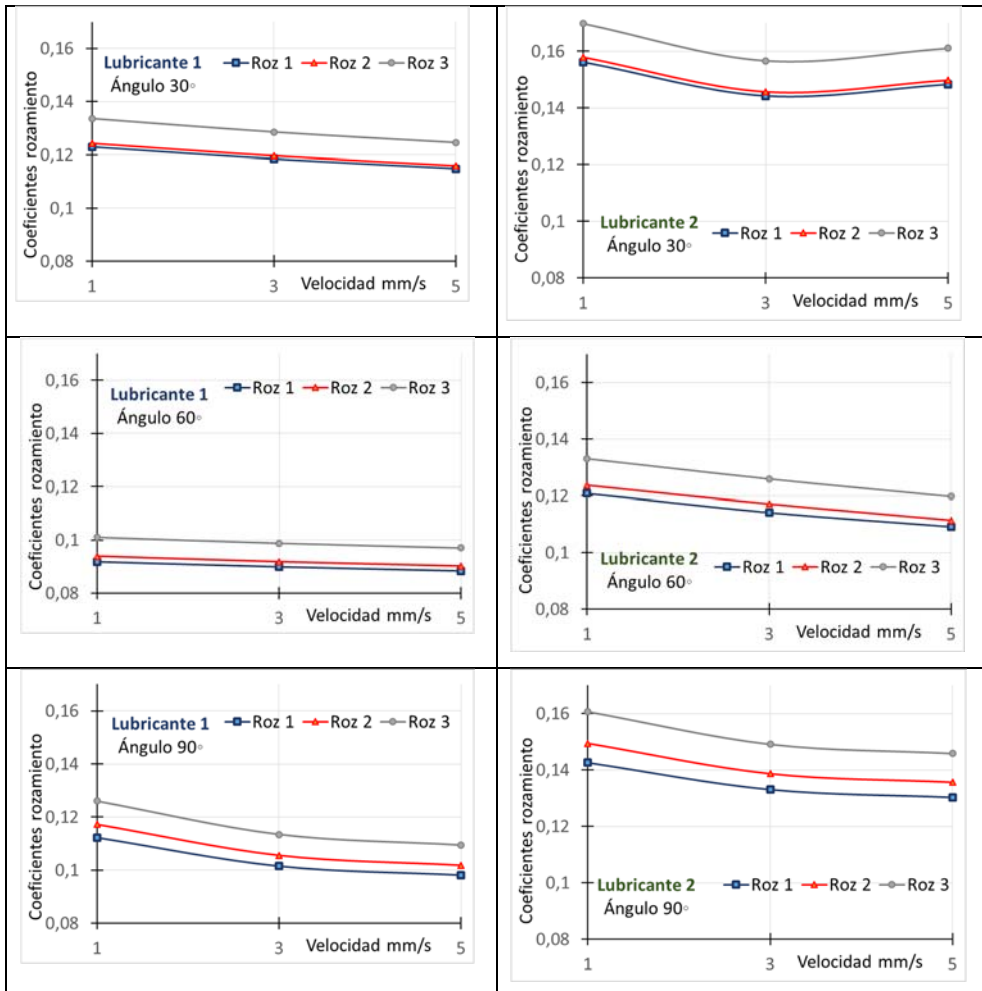
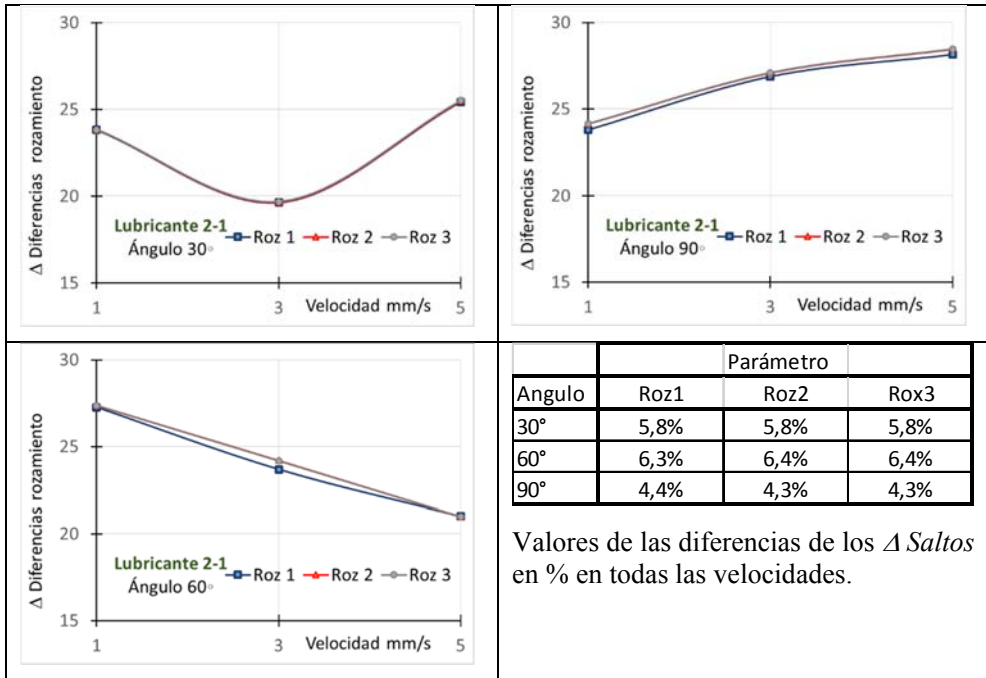


Tabla 10. 14 Diferencias de rozamientos entre dos lubricantes Lub2 – Lub1



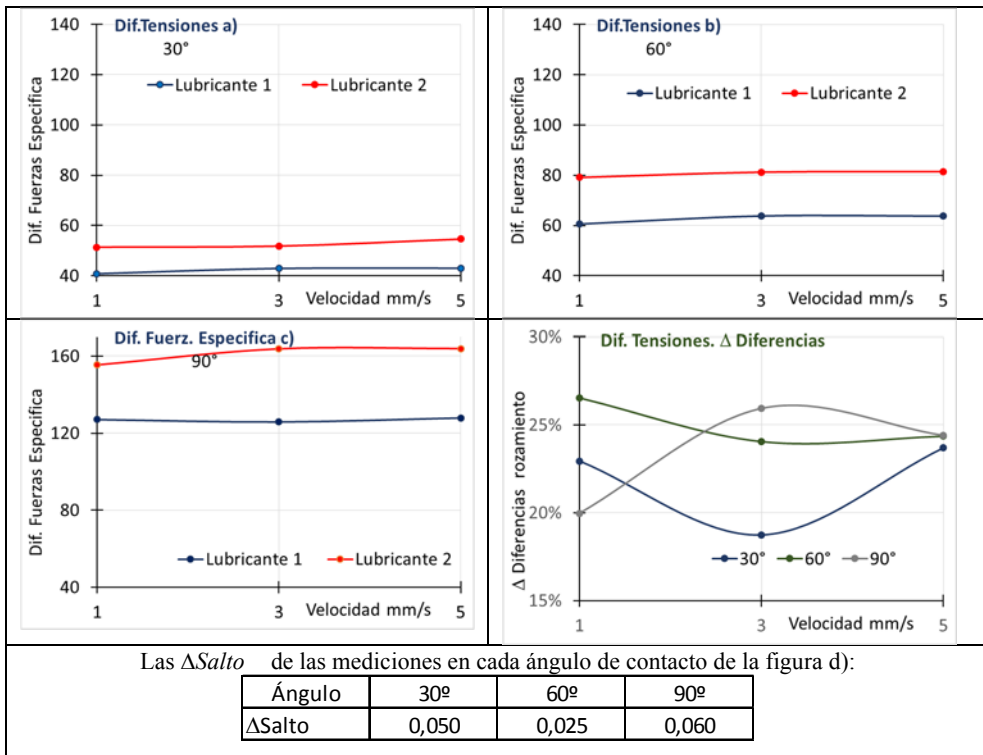
La Tabla 10. 14 indica tanto la posición relativa de las Δ Diferencias calculadas según Ecuación 9. 2 Para cada ángulo. Los Δ Saltos calculados según la Ecuación 9. 3 se sitúan en la cuarta celda. Los tres ángulos son equivalentes en cuanto a salto, pero el ángulo de 90 ° indica mejor las diferencias.

10.9.2 Diferencia de Tensiones.

El cuarto parámetro que ha mostrado, y cuya variación es significativa respecto a la lubricación es la “Diferencia de Tensiones”, según la Ecuación 8. 4 .

La Tabla 10. 15 , presenta las medias de las 18 combinaciones de parámetros. La figura d) indica las Δ Salto para cada ángulo y velocidad, siendo la peor medición la correspondiente al ángulo de 90°, donde de la herramienta ha estado más tiempo en contacto con la lámina.

Tabla 10. 15 Parámetro Diferencia de Tensiones.

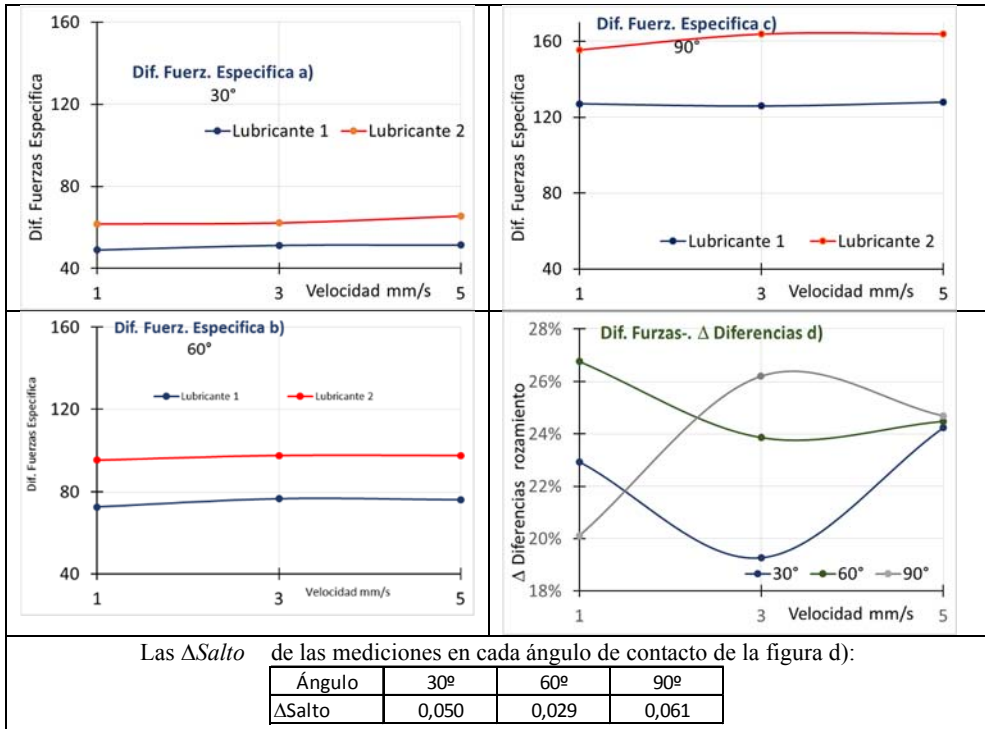


10.9.3 Diferencia de Fuerzas Específica

El quinto parámetro que ha mostrado, y cuya variación es significativa respecto a la lubricación es la “Diferencia de Fuerzas Específica”, respecto a la unidad de ancho, según la Ecuación 8. 5. Parámetro que puede ser eficiente cuando los flejes sean del mismo espesor.

La Tabla 10. 16, presenta las medias de las 18 combinaciones de parámetros. La figura d) indica las Δ Salto para cada ángulo y velocidad, siendo la peor medición la correspondiente al ángulo de 90°, donde la herramienta ha estado más tiempo en contacto con la lámina, en esta ocasión la mejor opción es la correspondiente al ángulo de 60°.

Tabla 10. 16 Parámetro Diferencia de Fuerzas Específica.



10.9.4 Comparación de las ecuaciones.

Como resumen se indican las ecuaciones obtenidas por Statgraphics para los casos en que la Viscosidad ha resultado significativa.

Tabla 9. 17 Ecuaciones obtenidas con significación de la viscosidad

<i>Rozamiento 1</i> = 0,162208 - 0,000243016.Ángulo - 0,000241092.Lubricante - 0,00239462.Velocidad diferencial
<i>Rozamiento 2</i> = 0,162621 - 0,000180446.Ángulo - 0,000248909.Lubricante - 0,00256775.Velocidad diferencial
<i>Rozamiento 3</i> = 0,174831 - 0,000193865.Ángulo - 0,000267729.Lubricante - 0,00276575.Velocidad diferencial
<i>Diferencia Tensiones (Ec.8.4)</i> = 18,8083 + 1,21154.Ángulo - 0,156759.Lubricante + 0,785378.Velocidad diferencial
<i>Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5)</i> = 22,8149 + 1,45291.Ángulo - 0,189552.Lubricante + 0,890424.Velocidad diferencial

Para el caso del Acero TWIP (Posco) se va a hacer la misma clasificación en tres gráficas. En la Figura 10. 23 se presentan las curvas de todas las ecuaciones, se eliminó la correspondiente a las Rugosidades Transversales, y quedaron dos grupos de ecuaciones.

Si se comparan los recorridos de las curvas de bajo recorrido, Figura 9. 26 y Figura 10. 24 de los dos materiales, se observa que en el caso del TWIP los resultados tuvieron menos variabilidad, aunque la deformación fue mucho mayor.

El resto de líneas presenta variabilidades en el mismo orden de magnitud, Figura 9. 27 y Figura 10. 25 .

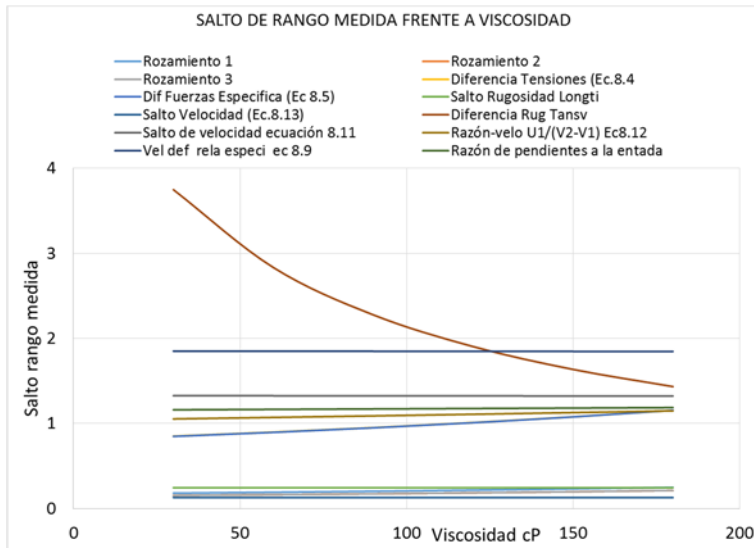


Figura 10. 23 Conjunto de curvas de variabilidad de cada Ecuación .TWIP(POSCO)

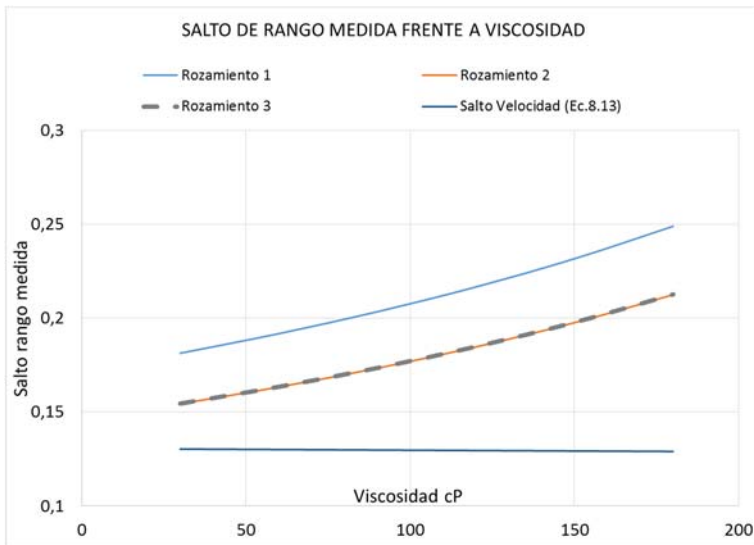


Figura 10. 24 Conjunto de curvas de baja variabilidad .TWIP (Posco)

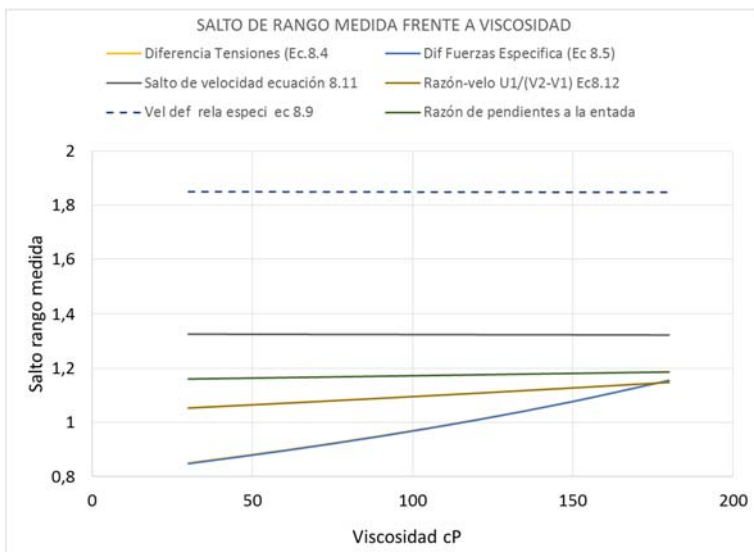


Figura 10. 25 Conjunto de curvas de elevada variabilidad .TWIP (Posco)

10.9.5 Otras consideraciones

Las gráficas presentadas en la Figura 10. 21 indican un arranque lento de los sistemas de adquisición mediante encoder, siendo adecuado el funcionamiento cuando siguen una trayectoria aproximadamente paralela a las regletas ópticas.

10.9.5.1 Velocidad sobre la probeta

Con objeto de tener un orden de magnitud de la influencia de la velocidad del punzón sobre el movimiento sobre la herramienta se realizaron correlaciones, se detallan a continuación, Tabla 10. 18 y Tabla 10. 19 indicándose en rojo, los factores más significativos en cada magnitud.

Tabla 10. 18 Velocidades diferenciales U2-U1 (mm/s)

V2-V1 mm/s	Angulo Contacto		
	30	60	90
1	0,54	0,52	0,50
3	0,80	0,84	0,78
5	0,70	0,89	1,01

Tabla 10. 19 Factores sobre la velocidad de la herramienta

$90.(U2-U1)/((V2-V1)Angulo) = 1,78975 - 0,116657.V2 - 0,00853907.ANGULO + 0,0125109.Vel-$ $coidad Diferencial + 0,000120197.Viscosidad \text{ en cP}$
$(U2-U1) = -0,233983 + 0,00123145.ANGULO - 0,0286446.Velcoidad Diferencial -$ $0,00020881.Viscosidad \text{ en cP} + 0,135719.V2$
$(U1+U2)/2 = 1,37949 - 0,00810591.ANGULO + 0,0280975.Velcoidad Diferencial +$ $0,000203114.Viscosidad \text{ en cP} + 0,743316.(V1+V2)/2$
$(U1+U2)/2 = 2,72961 - 0,00836792.ANGULO + 0,000249283.Viscosidad \text{ en cP} + 0,40676.V2$

De nuevo la viscosidad no es significativa en la velocidad a la que se mueve la lámina sobre la herramienta

10.10 Aplicación del modelo

A la vista de los datos anteriores puede seleccionarse una combinación de parámetros que permita evaluar las diferencias en cuanto a comportamiento del lubricante.

El conjunto de Coeficientes de Rozamiento son los mejores parámetros de estudio, están en la zona de baja variabilidad y para comparar la calidad, El candidato fue Coeficiente de Rozamiento 2 (Ecuación 5. 6) se tomó también del otro grupo el Parámetro Diferencia de fuerzas específica.

Se tomó la combinación de ángulo de 90° y velocidad 5, que es la mejor opción de la Tabla 10. 14.

Se tomaron:

Lubricante 1, probetas: T9, T30, T49

Lubricante 2, probetas: T11, T21 y t38

Se recuperaron las gráficas, y se hicieron mediciones en 9 puntos equiespaciados, desde el instante que se utilizó en los experimentos, y se retrocedió hasta la mitad del tiempo, obteniendo luego los inérvalos iguales. Los instantes relativos se denominaron 1 a 9.

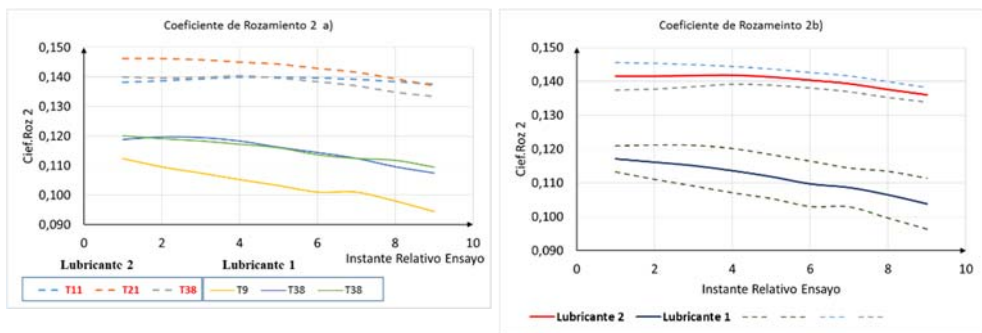


Figura 10. 26 Resultados Coeficiente Roz2

La Figura 10. 26 presenta las diferencias de los dos lubricantes, se ha utilizado el parámetro Coeficiente de Rozamiento 2.

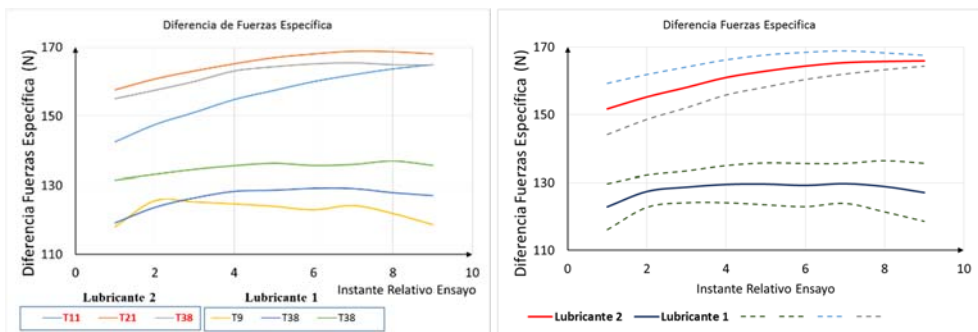


Figura 10. 27 Resultados del parámetro Diferencia de Fuerzas Específica

La Figura 10. 27 presenta los resultados de la utilización del parámetro Diferencia de Fuerzas Específica. Se observa que diferenció claramente entre la calidad de los dos aceites.

10.11 Conclusiones parciales.

La serie de probetas se deformó lo suficiente para medir tanto las rugosidades longitudinales como transversales.

Los resultados revelan la posibilidad de hacer la evaluación de la capa de asperezas.

No se produjeron roturas de probetas

El funcionamiento de los encoders impidió utilizarlos como acumuladores de las deformaciones de entrada y salida de la probeta, se hace necesario hacer ajustes para su correcto funcionamiento.

El conjunto de factores a seleccionar ha de ser estable en cuanto a su crecimiento con las variables. Las diferencias han de ser suficientes para poder discriminar entre dos aceites.

La viscosidad no es un factor determinante en la velocidad

IV. Discusión y Conclusiones

Capítulo 11

Discusión

Resumen:

Tras los ensayos y resultados obtenidos, se discute la validez de los mismos, y se valoran las diferentes situaciones que se han presentado en el curso de la investigación en los diferentes aspectos tales como las probetas fabricadas, los parámetros de eficiencia para cada material y proceso en conjunto de ensayo.

11 Discusión

En el Capítulo 7 se definió un modelo simplificado del proceso de estampación.

Los modelos de distribuciones continuas de presión entre las superficies de contacto aparentes ha sido desmentido por diversos autores (Pereira et al., 2008), (Y. S. Kim et al., 2012).

En la bibliografía se han encontrado multitud de estudios que relacionan la rugosidad con las condiciones de lubricación hidrodinámica, tomando el coeficiente de rozamiento como función de la viscosidad (Lee et al., 2002).

La relación entre las características de rozamiento y el acabado superficial también ha sido objeto de estudio, y de elaborada soluciones matemáticas para su simulación (Hsu & Yang, 2001).

Tal como se indicó en el Capítulo 2, la necesidad de aligeramiento de los vehículos ha llevado a buscar materiales más resistentes. Esta necesidad ha llevado a mayores esfuerzos en los útiles de conformado. Por otro lado, el conformado a mayores presiones se enfrenta también a la necesidad de lubricantes respetuosos con el medio ambiente (Bay et al., 2010). La incorporación de lubricantes sólidos e incluso de recubrimientos poliméricos permanentes son dificultades/opportunidades añadidas.

Este trabajo se enfocó a la capacidad de los procesadores de discriminar entre varias opciones de lubricantes a su disposición.

En los catálogos de los proveedores de lubricantes se han encontrado una gran cantidad de fluidos. Se añade a estos una extensa gama de aditivos para su adaptación las condiciones particulares del procesador.

La decisión de elegir un fluido o sólido lubricante, y los posibles aditivos de mejora podría ser una decisión basada en algún tipo de ensayo asumible por los industriales.

Ya se justificó en el Capítulo 7, que un menor rozamiento significa mayor uniformidad en la deformación, y como consecuencia una mejora en el producto.

En el Capítulo 7 se describió un prototipo de simulador, basado en el desarrollado por W.R.D. Wilson (Shih & Wilson, 1999), con modificaciones sustanciales de diseño para aumentar sus capacidades de medición. Sus capacidades estaban determinadas por las soluciones adoptadas por los diseñadores, que resultaron ser de desplazamiento a velocidades de hasta 25 mm/s, en un ángulo de contacto comprendido entre 0 y 90°, y la fuerza máxima de tiro hasta unos 8000 N.

El prototipo inicial cargaba probetas de hasta 800 mm de longitud, pero esto representó una desventaja a la hora de controlar la calidad del fleje cortado. La fuerza máxima es un factor limitador de la sección de la probeta. Tras los primeros intentos se modificó

sistema de sujeción de los encoders y se rediseñaron las garras para probetas de menores dimensiones.

Para el corte de las probetas se construyeron dos útiles. Una matriz que realizaba el corte en dos operaciones, y un punzón para la perforación de los agujeros de las puntas. Con probetas de alrededor de 400 mm fue posible conseguir buena calidad y precisión en el corte de las probetas.

Se obtuvieron muestras de Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS). De entre estos se seleccionaron dos tipos para hacer experimentos sobre el comportamiento de un fleje en el proceso de conformado.

Se seleccionó el DP600 por ser uno de los materiales estructurales que más partes de estructura de automóvil conforma (cerca del 70% del BIW). De este material se obtuvieron dos lotes, uno donado por la empresa Flinsa, del cual se obtuvieron 40 probetas, y otro donado por el Centro de Investigación de GM, del cual se obtuvieron 58 probetas.

El otro material Seleccionado fue el TWIP, fabricado como material experimental por POSCO, y donado por GM, del cual se obtuvieron 59 probetas. La razón de esta selección son las extraordinarias características de este material, ver Anexo C, para la fabricación de cajas de impacto en automóviles. Este material se caracteriza por tener una estructura austenítica, que se mantiene en el proceso de deformación.

Ambos materiales fueron ensayados en la Máquina Universal de Ensayos de Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV en EPS de Alcoy, obteniéndose las curvas a varias velocidades.

Tras el corte, se hizo un pautado de las probetas, tomando en cada centímetro tres medidas de su ancho y espesor. Así mismo se tomaron tres medidas de rugosidad longitudinal y transversal antes de la deformación.

Con esta base de información se consideró que las probetas estaban caracterizadas.

El primer grupo de probetas (DP600 suministrado por Flinsa) se tomó como prototipo de medición. Permitió decidir el ancho de las probetas las condiciones de procesado de la segunda tanda.

Para la investigación se tomó el procedimiento estadístico de Diseño Factorial de Experimentos, que utiliza el ANOVA, permite determinar la importancia de los factores y obtener líneas de regresión y superficies de respuesta.

Sin embargo se produjeron roturas. Los ensayos posteriores con el DP600 (GM) indicaron que la sensibilidad a la velocidad de deformación en este material había de ser tenida en cuenta

El primer Diseño Factorial se realizó con el Software Design Expert, pero se continuó inmediatamente con el paquete estadístico Statgraphics, que incorpora los procedimientos estadísticos junto con el Análisis de Experimentos.

La primera investigación, con dos bloques de 19 probetas, presentó fallos en la parte correspondiente a los funcionamientos de los encoders, por lo que la información adquirida solamente fue válida (para todas las probetas) en cuanto a las fuerzas. Estos fallos fueron corregidos para la siguiente investigación.

Los factores seleccionados fueron la velocidad, el ángulo de contacto y el lubricante. Ángulos de 30,60 y 90°. Velocidades de 25, 15 y 5 mm/s. En el factor lubricación se utilizaron los lubricantes Houghto Draw S130 (Viscosidad dinámica a 23°C 30 cP) , Houghto Draw B 75 Galv. (Viscosidad dinámica a 23°C 150 cP) , y se incorporó el funcionamiento en seco como 0 cP.

La deformación adicional debida a la flexión fue tomada del libro de Marciniak (Z. Marciniak, 2002) y $\epsilon=y/\rho$, donde y es el espesor y ρ el radio de la herramienta, que era el alrededor de 0,12

Los tiempos fueron seleccionados para llegar a una gran deformación, que permitiesen posteriores medidas de deformación plástica.

Se produjeron varias roturas, y la longitud de contacto fue muy reducida para la evaluación del rozamiento longitudinal. El tiempo de ensayo fue pequeño, y presentó problemas en el tiempo de arranque del sistema, La gráfica de la parte inferior de la Figura 8. 10 indicaba que al menos eran necesarios 0,3 segundo para que el sistema de medida de los encoders se estabilizase. Y, como indica la misma figura había algún tipo de perdida de contacto en el instante inicial, lo cual debería resolverse.

A partir de los resultados tabulados se tomó, para posteriores investigaciones, como ancho de referencia entre 7 y 8 mm, y que el tiempo de ensayo no bajase de 3 segundos.

Se analizaron tres coeficiente de rozamiento y la rugosidad transversal, en los tres coeficientes el lubricante fue un factor significativo, no siéndolo para la rugosidad.

El conjunto de resultados se resumen a continuación.

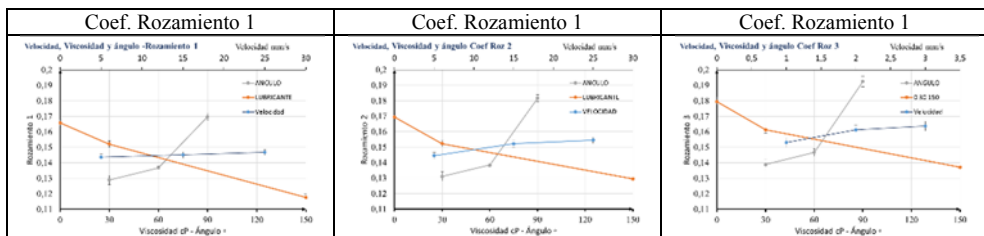


Figura 11. 28 Resultados LSD. Rangos de Medias

El mal acabado superficial indujo a no utilizar posteriormente el nivel de Lubricación 0 cP (sin aceite) en los otros materiales.

11.1 El DP600 (GM)

Para la segunda etapa se generaron un grupo de 12 parámetros (Apdo. 8.4.4.) que se relacionaban con la calidad de las condiciones de deformación. Y se generó un diseño factorial equilibrada con 18 ensayos por bloque, y un total de tres bloques.

Se cambió la herramienta por una con un excelente acabado, templada, tal como se indica en el Anexo B.

Se utilizó el Programa Statgraphcis, tanto para el diseño de experimentos como para su posterior análisis.

Se realizaron los ensayos con el DP600. Los resultados obtenidos indicaron que la lubricación fue un factor significativo en los siguientes parámetros:

Tabla 11. 1 Factores del ensayo DP600 (GM)

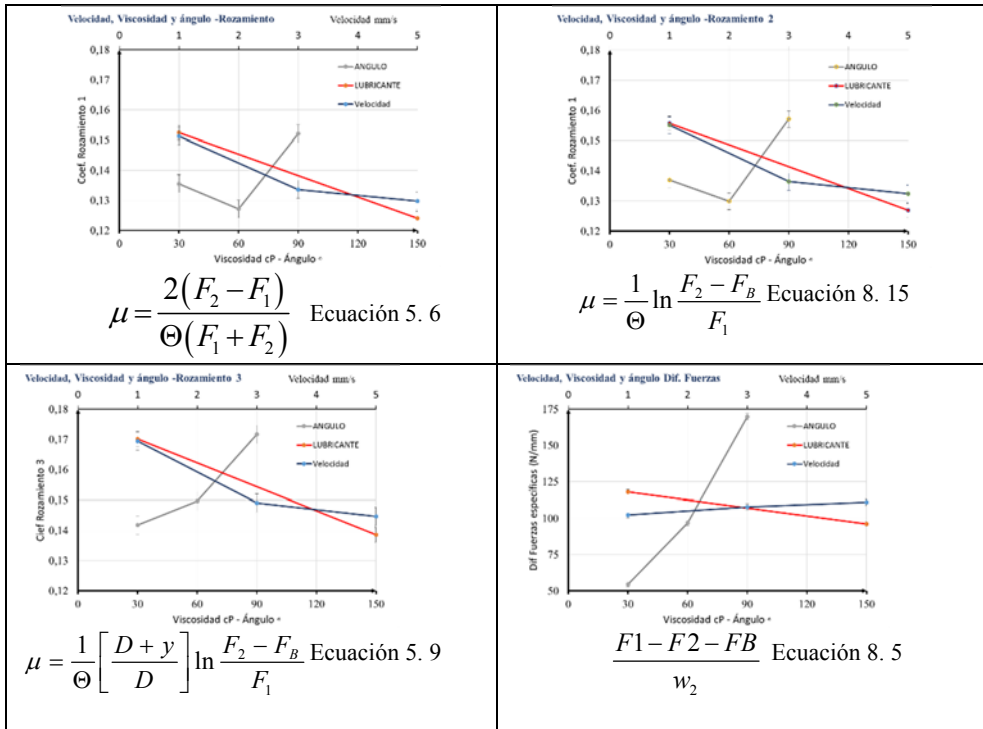
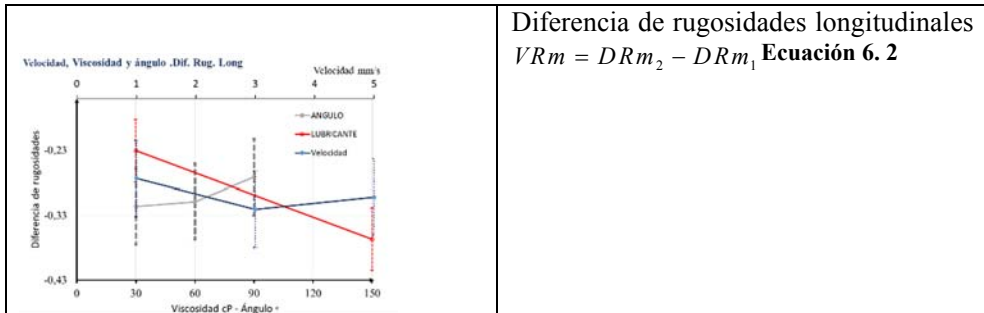


Tabla 11.1 Continuación



En el apartado 9.1 se compararon los resultados obtenidos por cada parámetro, y se establecieron unos índices de calidad de la medición. Δ Parámetro (Ecuación 9. 1) y Δ Diferencia (Ecuación 9. 2) que indican la variabilidad de las medidas sobre condiciones idénticas, la primera en valor absoluto y la segunda y normalizada. El Δ Salto (Ecuación 9. 3) que indica la diferencia entre los valores normalizado. Así mismo la forma de la distribución de resultados tiene importancia. Una distribución en una línea creciente indicará la influencia del factor estudiado, cuando se producen comportamientos tipo parabólico con un máximo o mínimo intermedio indica una baja calidad de al medida. Que las curvas de resultados se crucen indica inestabilidad en la medida.

El análisis SEM indicó un ligero rayado del la superficie, muy inferior al que se observó en la primera tanda de probetas DP600, y desvelaba la rotura de la capa límite, y esto para los dos lubricantes. Por lo que este análisis no podría indicar mejora de uno de los dos.

Del conjunto de opciones, para los Coeficiente de Rozamiento, siguiendo la Tabla 9. 11, la mejor opción fue medir con ángulos de 60° para cualquiera de las velocidades indicadas. Se consideraron aceptables los tres ángulos de medida porque los resultados de cada lubricante siempre se mantuvieron paralelos. En caso de que los aceites diesen resultados próximos, la máxima diferencia se encuentra en el ángulo de medida de 30° a velocidad elevada.

Para la Diferencia de Fuerzas Específica, Tabla 9. 12, la mejor opción parecía otra vez medir en ángulos de 30°, y el ángulo de 90° es la opción menos ventajosa.

El último parámetro que resultó ser significativo fue la variación de la capa de asperezas, calculada siguiendo la Ecuación 6. 2. y que aparece en la Tabla 9. 13. Las sucesivas curvas indican cruces en diferentes condiciones. Este cambio de signo en las diferencias hace que no sea un parámetro uniforme. La mejor opción en este caso es medir con un ángulo de 90°, es la zona más larga entre dos cruces.

Finalmente, el apartado 9.10 se utilizó el conjunto de criterios antes expuesto y se comprobó la clara diferenciación entre los lubricantes.

Estos resultados son de los ensayos reales, no los de la simulación de las ecuaciones que se realizó en el Apartado 9.9.4, en se dieron valores a las ecuaciones y se comprobó su diferente posicionamiento en el plano de datos.

Como consideración final, cabe comentar que el cálculo correspondiente al parámetro Fuerza Específica que aparece en el apartado 9.10 se hizo tomando como base el ancho inicial de la probeta. Realmente las probetas sufrieron deformaciones plásticas permanentes de alargamiento de alrededor del 6%, y reducciones permanentes de anchura de alrededor del 2,7%. Estas variaciones de anchura hacen la medida aceptable en cuanto a precisión.

11.2 El acero TWIP (Posco).

Este material presenta una característica diferente en su deformación, por una parte no presentó sensibilidad a la velocidad de deformación (en el rango estudiado) y por otra su capacidad de deformación plástica se incrementó con la velocidad de deformación. Pero no todos son ventajas, su corte en la cizalla presentó dificultades, y se mostró como un material poco dócil.

Dada su gran capacidad de deformación, se alargó el tiempo de ensayo para conseguir deformaciones plásticas permanentes en todos los casos. Se pudieron comprobar las cargas a partir de la deformación con un único diagrama de deformaciones.

No se produjo ninguna rotura en los ensayos.

Al analizar los resultados, resultaron significativos cinco parámetros, con diferencias con respecto al DP600 (GM). En la Tabla 11. 2 se presenta el resumen de los resultados

Tabla 11. 2 Factores del ensayo DP600 (GM)

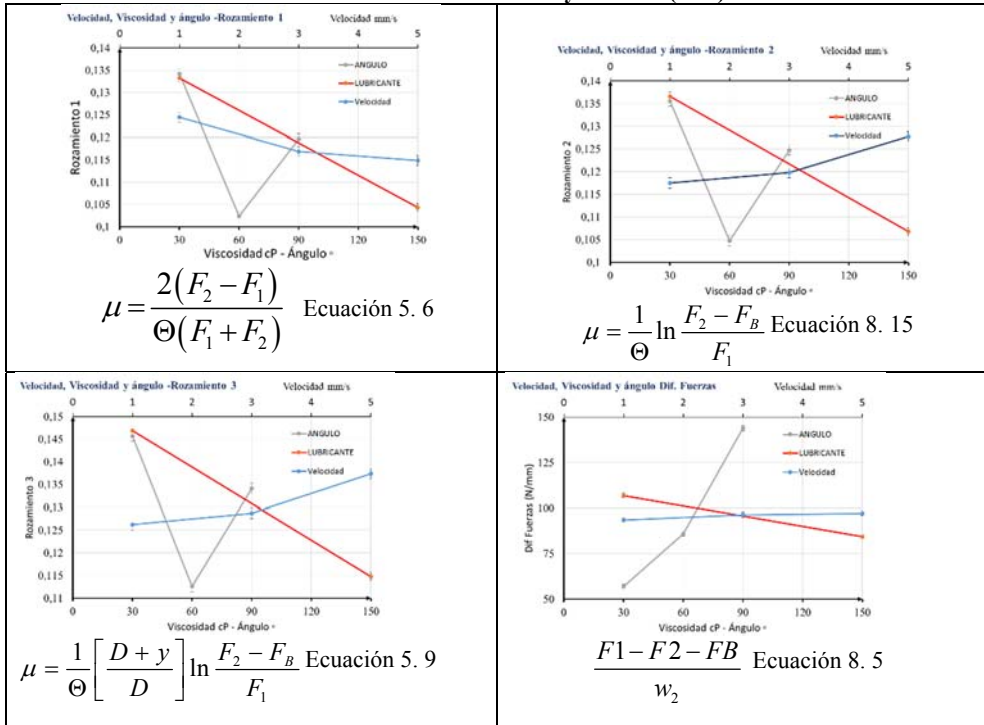
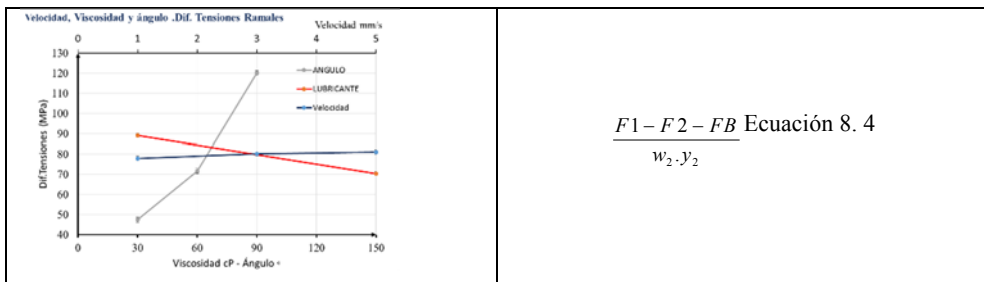


Tabla 11.2 (Continuación)



En esta ocasión la mejor opción fue el ángulo de 90° para los coeficientes de rozamiento. Para la diferencia de tensiones (Ecuación 8. 4) el mejor ángulo fue el de 60°, Tabla 10. 14. Para el caso de la Diferencia de fuerzas específica (Ecuación 8. 5) se repite la misma opción.

La aplicación de los mejores parámetros se pudo comprobar en el apartado 10.10, en que se pudo diferenciar perfectamente de entre los dos lubricantes.

Las deformaciones verdaderas permanentes medidas en el conjunto de probetas de la simulación fueron alrededor de 0,12 para la dirección longitudinal, y alrededor de 0,07 para la transversal

11.3 Los parámetros.

Se han comparado dos materiales con comportamiento muy dispar. Se propusieron 12 posibles parámetros para comparar la eficacia relativa de los lubricantes Cuatro demostraron eficacia para los dos materiales, dos parámetros que han mostrado utilidad parcial, y varios que no parecen ser útiles.

Ser resume en la Tabla 11. 3 las ecuaciones en que la lubricación resultó significativa, y útil para comparar las condiciones de lubricación.

Tabla 11. 3 Parámetros significativos en lubricación

	Criterio/Parámetro	SIGNIFICACIÓN	
		DP600(GM)	TWIP(POSCO)
1	Coefficiente de rozamiento 1. Ecuación 5.6	SI	SI
2	Coefficiente de Rozamiento 2 . Ec 8.15	SI	SI
3	Coefficiente de Rozamiento 3 . Ec 5.9	SI	SI
4	Diferencia de tensiones Ec 8.4	NO	SI
5	Diferencia de fuerzas específica Ec 8.5	SI	SI
6	Velocidad de deformación específica Ecuación 8.9	NO	NO
7	Velocidad de deformación específica Ecuación. 8.11	NO	NO
8	Velocidad de entrada relativa, Ecuación. 8.12	NO	NO
9	Salto de velocidad Ecuación. 8.13		
10	Razón de pendientes a la entrada, Rp Ecuación 8.14	NO	NO
11	Diferencia de rugosidades longitudinales Ecuación 6.2	SI	NO
12	Diferencia de rugosidades transversales Rt Ecuación 6.2	NO	NO

11.4 Las probetas.

El tamaño de las probetas debería estar relacionado con las capacidades del equipo de medida. En futuras realizaciones podrían acortarse, facilitando su corte mediante una matriz, y permitiendo mejor precisión en su perfil longitudinal.

La sección de la probeta se determinaría relacionando el diagrama σ - ϵ nominal con la deformación máxima a conseguir en el conformado, y con la fuerza máxima segura del actuador.

La rugosidad, en caso de utilizarse como característica de calidad, debería medirse en la zona de la probable deformación, tanto longitudinal como transversalmente, antes y tras el tratamiento.

El pautado longitudinal permitió comprobar las deformaciones plásticas obtenidas, y verificar el funcionamiento del sistema de medida. Un pautado realizado por impresión laser sería muy favorable. El pautado fue útil para la caracterización dimensional previa y posterior a la deformación. En caso de fallo del sistema de medición, podría determinarse el coeficiente de rozamiento mediante ecuaciones derivadas del tipo de la Ecuación 5. 51 . Así mismo, los datos obtenidos podrían ser útiles para determinar la sensibilidad a la velocidad de deformación del material.

En la verificación de las probetas se debería comprobar habitualmente la uniformidad en el espesor, a fin de garantizar la estabilidad de la lámina.

Los experimentos se realizaron con tres réplicas. Este número ha tenido buen resultado, hasta realizar un estudio de optimización parece un número prudente de ensayos.

11.5 El equipo de medida

El equipo de medición, acondicionamiento y registro de señal realiza mediciones directas de fuerzas y desplazamientos

11.5.1 La medición de las fuerzas

Cualquier equipo tendrá un rango de medida que limita sus prestaciones. El equipo utilizado disponía de actuadores que permiten fuerzas de hasta 10kN, lo que determinó la sección, en este caso fue de alrededor de 7 mm para aceros de alta resistencia. La tendencia observada en otros equipos equivalentes es anchos de 15 mm, a fin de evitar el efecto indeseable de los bordes del fleje. Actuadores de mayor fuerza permitirían un ensayo más uniforme. El siguiente escalón es de 20kN, que podría ser una buena solución.

En el ensayo se midieron dos fuerzas, la que tracciona y la que retiene el fleje. A partir de las mediciones directas se calcularon los desplazamientos y velocidades de los puntos en que se inicia y acaba el contacto. Los ensayos se realizaron de igual forma para ambos materiales, y sin embargo se observaron comportamientos diferentes.

Cuando se calcularon los parámetros referentes a fuerzas, se restó la Fuerza destinada a flexionar y enderezar el fleje. Para este cálculo se utilizó la ecuación de Swift (Ecuación 5. 33). En esta ecuación se toma como parámetro característico del material su Límite de fluencia a la cortadura, aplicado a las asperezas.

Sin embargo el comportamiento de las superficies de ambos materiales manifestó diferencias. Los parámetros no se comportaron igual. Al observar las gráficas Tensión-deformación verdearas (ver Anexos de cada material), se observa que la ventana de conformado del TWIP es mucho más extensa que la del DP600 (GM). Al calcular el valor de F_B en la Ecuación 5. 33, se les ha tratado como si estuviésemos ante un material perfectamente plástico.

Al comparar las gráficas obtenidas en la Figura 9. 28 y Figura 10. 26 aparece que el coeficiente de rozamiento en el proceso del DP60 (GM) es creciente, que se explica por el aumento de presión, el aplanamiento de las asperezas, y la pérdida de lubricante el volumen de los huecos de aceite. La primera interpretación se basaría en la Ecuación 5. 11, la fracción de área que está en régimen de capa límite aumenta respecto a la que sigue un régimen hidrodinámico. El contacto adhesivo aumenta y con él el rozamiento.

Sin embargo en el caso de la Figura 10. 26 , que hace referencia al TWIP, el coeficiente se reduce al aumentar la deformación, a pesar de que aumenta la presión, pues la reducción de ancho es evidente, alrededor del 7% residual.

Queda por resolver este problema.

Una solución sería prescindir del cálculo de la ecuación de Swift, utilizando otro procedimiento. Una opción es medir el par de fricción sobre el eje de la herramienta. Esto puede hacerse con cierta aproximación midiendo la intensidad de mantener el eje vivo, o bien incorporando un transductor de par en serie con este eje. La segunda solución es la que utiliza (Bay et al., 2008) , incorpora un transductor de par. Esta segunda solución significa ocupar otro de los canales de entrada en el equipo QuantumX, y que ahora está libre, y obtener un valor de par de rozamiento con la misma base de tiempo que las fuerzas.

11.5.2 La medición de desplazamientos

Las carreras de los actuadores eran de 300 mm. Se consideraron adecuadas para el posicionamiento de las probetas.

Los transductores miden desplazamientos lineales o angulares.

La velocidad de desplazamiento del fleje quedó limitada a 25 mm/s. Las velocidades de desplazamiento reales en estampación están alrededor de 200 mm/s, sin embargo esto no se consideró un factor limitador a efecto de discriminación entre lubricantes.

En una carrera de estampación a las velocidades indicadas, el punto crítico es la zona de bajas velocidades (donde el régimen hidrodinámico desaparece) y que está cerca del final del recorrido, donde llega a detenerse. Velocidades del equipo mayores ampliarían el campo de medición, pero al mismo tiempo requerirá de mayor fuerza de tiro por parte del actuador (sensibilidad a la velocidad de deformación por parte del material).

Mejoras interesantes en el proceso de medición serían: el posicionamiento automático inicial de la probeta, y la integración del ensayo con el programa Catman AP. Con esta modificación el operador solamente tendría que preocuparse en que se realice el ensayo, o pararlo en caso de emergencia.

Se ha seguido en la bibliografía las características de otros equipos equivalentes. Una de las limitaciones es la capacidad de tracción. Si se tiene en cuenta que el material va a

seguir una curva σ - ϵ , la velocidad de aplicación elevada hace subir la curva en muchos casos.

El sistema de control ordena a los actuadores moverse a una velocidad, y la fuerza que realizan es una consecuencia de la citada curva, para una sección nominal dada una deformación se produce una reacción del fleje.

Para velocidades elevadas los ensayos tendrán que ser cortos. Esto es una dificultad para la validez (teórica) de los datos, dado que el material que está en contacto con la herramienta al inicio del ensayo ya ha sido flexionado, y no es parte del proceso de estampación. Es necesario que todo el material viejo haya circulado más allá de la herramienta, para garantizar que se está midiendo parámetros de la estampación. Aunque posiblemente los resultados sean aceptable a afectos de comparar los lubricantes.

Para el caso de este sistema de simulación, con una herramienta de diámetro 15mm, los arcos en contacto inicial son los indicados en la Tabla 11. 4 .

Tabla 11. 4 Arcos iniciales en el ensayo

Angulo	Arco (mm)
30	3,93
60	7,85
90	11,78

Ensayos rápidos (25 mm/s) llevan a que el fleje se haya roto en menos de 1 segundo, sin que el punto de contacto 1 (entrada) haya llegado a recorrer todo el arco de contacto.

Velocidades de bajada de matriz de 12 m/minuto equivalen a 200 mm/s, velocidad a la que bajará el punzón. Sin embargo esta velocidad se va a distribuir a todo lo largo de la pieza, por lo que si se asume una distribución casi lineal, para una pieza de 100 mm de longitud, que tenga un radio en su centro de 7,5 mm, la velocidad diferencial de entrada-salida será de unos 15mm/s, (2mm/s por mm de radio).

Las velocidades obtenidas en el ensayo dependieron de la velocidad de entrada, tal como su puede apreciar en las ecuaciones obtenidas en la Tabla 9. 16 y Figura 10. 20 , que son las ecuaciones de regresión obtenidas de los datos de las tablas de los Anexos B y C.

En las primeras pruebas realizadas se intentó este tipo de ensayo, pero se produjeron roturas antes de obtener una superficie deformada suficientemente larga. Esto obligó a reducir la velocidad, para poder verificar piezas completas.

Por otra parte, la velocidad diferencial en el borde de la matriz va acompañada de una velocidad media de deslizamiento, que no produce estiramiento, pero que afecta al régimen hidrodinámico y al desgaste de la herramienta.

Por las limitaciones del equipo, no se ha podido comprobar la diferencia entre velocidades elevadas y las utilizadas.

Si el equipo es dedicado únicamente a la comparación de lubricantes, puede no ser tan importante obtener probetas íntegras, y aceptar como resultado los registros aunque se produzcan roturas.

Los resultados de los encoders presentaron problemas en el período del arranque. Las mediciones de los encoders en los instantes del arranque fueron, a pesar de los reajustes realizados, inestables.

Con posterioridad a los ensayos se comprobó que el conjunto de garra1 basculaba ligeramente en los primeros momentos del estiramiento, hasta que la carga era tal que equilibraba el peso del conjunto.

Como consecuencia de esta disfunción las mediciones de desplazamiento acumuladas no integran fielmente el movimiento del fleje. A partir de que las dos trayectorias encoder-1 y encoder-2 son aproximadamente paralelas se consideró que la medición era correcta, y las velocidades obtenidas verdaderas.

Se ha utilizado una frecuencia de muestreo de 50Hz, que para las velocidades utilizadas ha sido suficiente. En caso de aumentar las velocidades, podría aumentarse esta frecuencia.

11.6 El protocolo de medición

El conjunto de probetas ensayadas y analizadas mediante el Diseño Factorial de Experimentos dio un conjunto de resultados que permitieron seleccionar una combinación de parámetros de medida que resultaros útiles:

Parámetro de evaluación (de entre los 12 propuestos)

Ángulo de contacto

Velocidad de ensayo.

Se encontró que la variabilidad de la medida tomaba valores mínimos para ciertas configuraciones. Además dado un ángulo de medida, aquella combinación que diese mayores diferencias entre los dos lubricantes, y que al mismo tiempo tuviese menos variabilidad al cambio de velocidad, sería el mejor candidato.

Se propusieron posibles combinaciones de medición en Tabla 9. 11, Tabla 9. 12, Tabla 9. 13 , Tabla 9. 11, Tabla 10. 14, Tabla 10. 15 y Tabla 10. 16.

También era importante la forma de la línea, se consideró que cuanto más horizontal fuese la curva, más estable es la medición, y que en caso de curvatura, la existencia de máximo o mínimos notables reducía su utilidad, esto se aplicó para ambos materiales en los apartados 9.10 y 10.10, encontrándose que los parámetros seleccionados con las configuraciones recomendadas permitían diferenciaciones claras entre lubricantes.

Capítulo 12

Conclusiones.

Resumen:

Se detallan las principales conclusiones de respecto a mejoras en el equipo, el formato final del modelo de comparación y la contestación a la pregunta con que comenzaba este trabajo.

12 Conclusiones

En los ensayos se utilizaron probetas con características definidas, con un prototipo en fase de evolución y se empleó un procedimiento en desarrollo.

12.1 Las probetas.

Utilizar probetas de longitud máxima 400mm

Fabricar útiles que permitan el corte de la probeta en una sola operación.

Pautado laser de las probetas

Dentro de lo posible utilizar probetas de 15 mm de ancho

En caso de utilizar el criterio de Variación de Rugosidad Longitudinal (Ec 6.2) medir la rugosidad previa en la zona que va a deformarse.

Verificar ancho y espesor cada 1 cm de longitud.

La deformación debería ser compatible con la preservación de la integridad de la probeta, teniendo en cuenta la que la deformación pro flexión $\varepsilon=y/r$, donde ε es la deformación unitaria, y es el espesor de la probeta y r es el radio de la herramienta. La deformación total es la suma entre el valor indicado y el de tracción para que se mide con el equipo.

Tres probetas por lubricante.

12.2 El equipo de medición

En caso de utilizar aceros avanzados de alta resistencia, utilizar actuadores de 20KN.

Integrar el control del equipo de deformación con el programa de adquisición (Catman 5.0 XP).

El automatismo ha de permitir que el operador se mantenga alejado del cabezal, y solo sea necesario un operador.

El automatismo mejoraría si se incorporase un posicionamiento inicial, tensado de la probeta y retorno tras el ensayo.

Incorporar un transductor de par, acoplado al sistema de amplificación QuantumX.

En caso de verificación de la rugosidad, la velocidad debe permitir el avance de suficiente longitud de material, no menos de 25 mm para un ángulo de 90°.

La frecuencia de muestreo de 50Hz resultó adecuada para ensayos de más de 3 segundo. Para velocidades mayores sería mejor aumentar la frecuencia.

El protocolo de medición:

Los parámetros de que resultaron mejores para los dos materiales fueron:

Tabla 12. 1 Parámetro generales

Parámetro	Ecuación	Ángulo/Velocidad
Coefficiente de rozamiento 1. Ecuación 5.6	$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\Theta(F_1 + F_2)}$	60°/Cualquiera
Coefficiente de Rozamiento 2. Ec 8.15	$\mu = \frac{1}{\Theta} \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	60°/Cualquiera
Coefficiente de Rozamiento 3. Ec 5.9	$\mu = \frac{1}{\Theta} \left[\frac{D+y}{D} \right] \ln \frac{F_2 - F_B}{F_1}$	60°/Cualquiera
Diferencia de fuerzas específica. Ec 8.5	$\frac{F_1 - F_2 - F_B}{w_2}$	60°/3mm/s

Los Parámetros que resultaron mejores para un solo material

Tabla 12. 1 Parámetro generales

Parámetro	Ecuación	Ángulo/Velocidad
Diferencia de rugosidades longitudinales Ecuación 6.2 (DP600 POSCO)	$VRm = DRm_2 - DRm_1$	90° /5 mm/s
Diferencia de tensiones Ec 8.4 (TWIP)	$\frac{F_1 - F_2 - F_B}{w_2 \cdot y_2}$	60° / Cualquiera

12.3 La Solución.

La pregunta, en esencia, fue muy sencilla: ¿Qué lubricante debo utilizar?

Ahora ya disponía de un criterio fundado en el Método Científico.

¡En todos los parámetros de comparación siempre fue mejor el Lubricante1!

Capítulo 13

Futuras Investigaciones.

Resumen:

Este capítulo es la consecuencia del trabajo realizado. Se plantean cuatro posibles líneas de trabajo, relacionadas con el equipo de simulación y la actual evolución de los nuevos materiales

13 Futuras investigaciones

El trabajo desarrollado ha permitido contestar algunas cuestiones. Sin embargo han quedado más preguntas que respuestas. Parece que cada vez que se cerraba una puerta, quedaban abiertas varias. El listado que se presenta a continuación no va a parar de crecer, pero establecí un orden.

13.1 Ampliación de la validez de la metodología de medición a diferentes tipos de aceros. Optimización del protocolo

La presente Tesis se centró en dos aceros, sin embargo el portafolios que presenta AISI para la construcción de estructuras automotrices es extensa. Preparar una base de datos de metodologías para cada tipo de acero puede ser de gran ayuda para su mejor utilización.

En este mismo proceso se modificaría el equipo a fin de trabajar con anchos de fleje mayores. Del conjunto de estudios se buscaría determinar el número de ensayos mínimo para garantizar la fidelidad de la medición.

13.2 Aplicación de la metodología a lubricantes sólidos.

La utilización de lubricantes sólidos tiene ventajas en cuanto a la limpieza de las superficies, y el control, no se conoce el comportamiento de estos lubricantes en el tipo de ensayo de Flexión Bajo Tensión.

13.3 Parámetros de medición para aluminios utilizados en la estructuras de automóvil

En el Capítulo 2 se explicitó la imparable entrada de los Aluminios en la fabricación de BIW. Algunas de las investigaciones que se consultaron promovían ecuaciones de Coeficiente de Rozamiento basadas en indicadores y comparaban Aceros y Aluminios. Se propone aplicar o modificar el protocolo de mediciones a los diversos tipos de Aluminios utilizados tanto en BIW como en cerramientos.

13.4 Aplicación y desarrollo de un protocolo de medición para la comparación de lubricantes para estampación en caliente (Hot Stamping)

La incesante evolución de los automóviles ha llevado a pasar de los Aceros de Alta Resistencia a los Aceros de Ultra Elevada Resistencia, que en muchos casos se conforman en caliente. Comprobar las condiciones de lubricación para estos materiales puede ser crítico, tanto para su conformado, como para el mantenimiento de máquinas y utillajes. Se pretende modificar el SFBT para las condiciones de conformado en caliente, y adaptar el protocolo de medición a estas condiciones.

VI. Referencias

Referencias Bibliográficas y otras fuentes

- A. C. Cárcel, C. Ferrer, & Pérez, M. A. (2004). Mecanismos de fricción en la estampación de chapas electrocincadas para automóviles. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- AIMME-OTEA(Valencia). (2009). ESTUDIO DEL EMPLEO DE NUEVOS MATERIALES PARA LAS APLICACIONES TRADICIONALES DE LOS FABRICADOS METÁLICOS. *INFORME*.
- Aluminum Association, I. W., D.C. (2010). Life Cycle Impact Assessment of Aluminum Beverage Cans, from <http://www.container-recycling.org/assets/pdfs/aluminum/LCA-2010-AluminumAssoc.pdf>
- Andreasen, J., Olsson, D., Chodnikiewicz, K., & Bay, N. (2006). Bending Under Tension Test With Direct Friction Measurement. [10.1243/095440505X32913]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(1), 73-80.
- Andreasen, J. L., Bay, N., Andersen, M., Christensen, E., & Bjerrum, N. (1997). Screening the performance of lubricants for the ironing of stainless steel with a strip reduction test. [doi: DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07462-5]. *Wear*, 207(1-2), 1-5.
- AUTOMOTIVE, C. (2009). POCKET BOOK OF STEEL. *CORUS AUTOMOTIVE*, from www.corusautomotive.com
- Azushima, A., & Sakuramoto, M. (2006). Effects of Plastic Strain on Surface Roughness and Coefficient of Friction in Tension-Bending Test. [doi: DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60422-3]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 303-306. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60422-3
- Batchelor, A. W., & Stachowiak, G. W. (1995). Tribology in materials processing. [doi: DOI: 10.1016/0924-0136(94)01689-X]. *Journal of Materials Processing Technology*, 48(1-4), 503-515.
- Bay, N., Azushima, A., Groche, P., Ishibashi, I., Merklein, M., Morishita, M., . . . Yoshida, M. (2010). Environmentally benign tribo-systems for metal forming. [doi: DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.007]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(2), 760-780. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.007
- Bay, N., Olsson, D. D., & Andreasen, J. L. (2008). Lubricant test methods for sheet metal forming. [doi: DOI: 10.1016/j.triboint.2007.11.017]. *Tribology International*, 41(9-10), 844-853. doi: 10.1016/j.triboint.2007.11.017
- Bay, N., & Wanheim, T. (1976). Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact. *Wear*, 38(2), 201-209. doi: 10.1016/0043-1648(76)90069-7
- Blaxter, L., Hughes, C., & Tight, M. (2000). *Cómo se hace una investigación* (1ª ed.). Barcelona: Editorial Gedisa.
- Boher, C., Attaf, D., Penazzi, L., & Levallant, C. (2005). Wear behaviour on the radius portion of a die in deep-drawing: Identification, localisation and evolution of the surface damage. *Wear*, 259(7-12), 1097-1108. doi: 10.1016/j.wear.2005.02.101
- Boher, C., Le Roux, S., Penazzi, L., & Dessain, C. (2012). Experimental investigation of the tribological behavior and wear mechanisms of tool steel grades in hot stamping of a high-strength boron steel. *Wear*, 294-295(0), 286-295. doi: 10.1016/j.wear.2012.07.001

- Campestrini, M., & Mock, P. (2011). European Vehicle Market Statistics. , from <http://www.theicct.org/european-vehicle-market-statistics>
- Carcel, A. C., Palomares, D., Rodilla, E., & Puig, M. A. P. (2005). Evaluation of vegetable oils as pre-lube oils for stamping. [doi: DOI: 10.1016/j.matdes.2004.08.010]. *Materials & Design*, 26(7), 587-593. doi: 10.1016/j.matdes.2004.08.010
- Coduti, P. L. (1987). Tribological behavior of solid lubricant films on bare and coated sheet steel products. *SAE Technical Papers*. doi: 10.4271/870648
- COMISIÓN EUROPEA. (2009). REGLAMENTO (CE) No 443/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de los turismos nuevos como parte del enfoque integrado de la Comunidad para reducir las emisiones de CO2 de los vehículos ligeros Retrieved 5.6.2009, from <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32009R0443:es:NOT>
- COMISIÓN EUROPEA. (2010, 2010). Informe de situación sobre la aplicación del enfoque integrado de la Comunidad para reducir las emisiones de CO2 de los vehículos ligeros, from <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0656:FIN:ES:PDF>
- COMISIÓN EUROPEA. (2011). COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52011DC0112:EN:NOT>
- Cooman, B. C., Chen, L., Kim, H. S., Estrin, Y., Kim, S. K., & Voswinckel, H. (2009). State-of-the-Science of High Manganese TWIP Steels for Automotive Applications. [10.1007/978-1-84882-454-6_10]. *Microstructure and Texture in Steels*, 165-183. doi: 10.1007/978-1-84882-454-6_10
- Cooman, B. C. D., Chin, K.-g., & Kim, J. (2011). High Mn TWIP Steels for Automotive Applications *New Trends and Developments in Automotive System Engineering*.
- Coubrough, G. J., Alinger, M. J., & Van Tyne, C. J. (2002). Angle of contact between sheet and die during stretch-bend deformation as determined on the bending-under-tension friction test system. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00781-1]. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 69-75. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00781-1
- DaimlerChrysler AG, M. C. G., D-70546 Stuttgart. (2007). Environmental Certificate Mercedes-Benz C-Class, from http://www3.mercedes-benz.com/fleet-sales/de/assets/documents/umweltz_w204_broschuere.pdf
- Darendeliler, H., Akkök, M., & Yücesoy, C. A. (2002). Effect of variable friction coefficient on sheet metal drawing. [doi: DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00099-8]. *Tribology International*, 35(2), 97-104.
- Davies, G. (2012). Chapter 3 - Materials for consideration and use in automotive body structures. In G. Davies (Ed.), *Materials for Automobile Bodies* (pp. 93-143). Oxford: Butterworth-Heinemann.

- Davies, R. G., & Stewart, W. S. (1990). Influence of Die Material Upon the Coefficient of Friction of Zinc Coated Steels. *Zinc-Based Steel Coating Systems: Metallurgy and Performance*, 243-250.
- Deng, Z., & Lovell, M. R. (2000). Effects of lubrication and die radius on the friction behavior of Pb-coated sheet steels. [doi: DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00430-0]. *Wear*, 244(1-2), 41-51. doi: 10.1016/S0043-1648(00)00430-0
- Dohda, K. (1998, 1990). *Tribological properties of thin hard coatings used in metal forming*. Paper presented at the Japan International Tribology Conference. II, Tokio.
- Ducker. (2008). Aluminum use in cars
<http://aluminumtransportation.org/downloads/Ducker%20North%20American%20Final%20Report%202009%20-%20II.pdf>.
- Ducker. (2012). Aluminum in 2012 North American Light Vehicles
<http://aluminumtransportation.org/downloads/NALVAluminumSurveyExecutiveSummaryFINAL07SEPT2011.pdf>.
- Ducker WorldWide. (2014). 2015 North American Light Vehicle Aluminum Content Study.
- Energy, U. S. D. o. (2007). U.S. Energy Requirements for Aluminum Production, from http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/aluminum/pdfs/al_theoretical.pdf
- Feng An, Deborah Gordon, Hui He, Drew Kodjak, a., & Rutherford, D. (2007). Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards. *International Council on Clean Transportation*, from <http://www.theicct.org/passenger-vehicle-greenhouse-gas-and-fuel-economy-standards>
- Fratini, L., Lo Casto, S., & Lo Valvo, E. (2006). A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming. [doi: DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.008]. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(1), 16-21. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.008
- Gerrard, J., & Kandlikar, M. (2007). Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on 'green' innovation and vehicle recovery. *Journal of Cleaner Production*, 15(1), 17-27. doi: 10.1016/j.jclepro.2005.06.004
- Ghosh, A., & Hecker, S. (1975). Failure in thin sheets stretched over rigid punches. *Metallurgical Transactions A*, 6(5), 1065-1074. doi: 10.1007/bf02661361
- Hamrock, B. J., & D.Dowson. (1981). *Ball Bearing Lubrication*. New York. USA: John Willey and Sons,.
- Hao, S., Klamecki, B. E., & Ramalingam, S. (1999). Friction measurement apparatus for sheet metal forming *Wear* (Vol. 224, pp. 1-7).
- Hayhurst, D. R., & Chan, M. W. (2005). Determination of friction models for metallic die-workpiece interfaces. [doi: DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2004.12.008]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(1), 1-25.
- Hsu, T. C., & Yang, T. S. (2001). The Computer Simulation of Tribological Influence on Strain Path and Forming Limit in Punch Stretching of Sheet Metal.

- [10.1007/s001700170157]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(6), 393-399.
- Hua-Chu, S., & William, W. (1999). Effects of Contact Pressure and Strain on Friction in Sheet-Metal Forming. *Tribology Transactions*, 42(1), 144-151.
- IDAE. (2012a). Consumo de carburante y las emisiones de CO₂ (Consumption of fuel and the emission of CO₂). , from <http://www.idae.es/Coches/portal/Consumo.aspx>
- IDAE. (2012b). Guía de Vehículos de Turismo en España. con indicación de los consumos y emisiones de CO₂ (Guide of Vehicles of Tourism in Spain. with indication of the consumptions and emission of CO₂). , from <http://www.idae.es/Coches/PDF/GuiaFinalN.pdf>
- Inc., P. E. (2001). ULSAB-AVC Engineering Report <http://www.worldautosteel.org/Projects/ULSAB-AVC/Programme-Detail.aspx> (Vol. Ch2- Program Targests).
- Inc., P. E. S. (2001). USLAB-AVC Engineering Report <http://www.worldautosteel.org/Projects/ULSAB-AVC/Programme-Detail.aspx> (Vol. Ch6-Body-In-WhiteConcept).
- Jeswiet, J. (1998). A comparison of friction coefficients in cold rolling. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00142-3]. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 239-244. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00142-3
- Jonasson, M., Wihlborg, A., & Gunnarsson, L. (1998). Analysis of surface topography changes in steel sheet strips during bending under tension friction test. [doi: DOI: 10.1016/S0890-6955(97)00090-4]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(5-6), 459-467.
- Joun, M. S., Moon, H. G., Choi, I. S., Lee, M. C., & Jun, B. Y. (2009). Effects of friction laws on metal forming processes. [doi: DOI: 10.1016/j.triboint.2008.06.012]. *Tribology International*, 42(2), 311-319. doi: 10.1016/j.triboint.2008.06.012
- Kim, H., Altan, T., & Yan, Q. (2009). Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests. [doi: DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.10.007]. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 4122-4133. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.10.007
- Kim, H., Han, S., Yan, Q., & Altan, T. (2008). Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS). [doi: DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.029]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 299-304. doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.029
- Kim, H., Sung, J. H., Sivakumar, R., & Altan, T. (2007). Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test. [doi: DOI: 10.1016/j.ijmactools.2007.04.014]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(14), 2120-2132.
- Kim, H. Y., Hwang, B. C., & Bae, W. B. (2002). An experimental study on forming characteristics of pre-coated sheet metals. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01088-3]. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), 290-295.
- Kim, S.-k. C.-d., (KR), Chin, Kwang-geun (Chunlanam-do, KR), Kim, Seong-ju (Chunlanam-do, KR). (2008). United States Patent No.

- Kim, Y. S., Jain, M. K., & Metzger, D. R. (2012). Determination of pressure-dependent friction coefficient from draw-bend test and its application to cup drawing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 56(0), 69-78. doi: 10.1016/j.ijmactools.2011.12.011
- Kong, Y., Wang, X., & WAGONER, R. H. Development of a new friction test device in sheet forming.
- Korzekwa, D. A., Dawson, P. R., & Wilson, W. R. D. (1992). Surface asperity deformation during sheet forming. [doi: DOI: 10.1016/0020-7403(92)90028-F]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 34(7), 521-539.
- Kosanov, J., Lenard, J. G., Uhrig, J., & Wallfarth, B. (2006). The effect of lubricant additives on the coefficient of friction in the flat-die test. [doi: DOI: 10.1016/j.msea.2006.04.090]. *Materials Science and Engineering: A*, 427(1-2), 274-281. doi: 10.1016/j.msea.2006.04.090
- Le, H. R., & Sutcliffe, M. P. F. (2001). A Semi-Empirical Friction Model for Cold Metal Rolling. *Tribology Transactions*, 44(2), 284 - 290.
- Le, H. R., & Sutcliffe, M. P. F. (2002). Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication. [doi: DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00104-9]. *Tribology International*, 35(2), 123-128. doi: 10.1016/S0301-679X(01)00104-9
- Le, H. R., Sutcliffe, M. P. F., Wang, P., & Burstein, G. T. (2005). Surface generation and boundary lubrication in bulk forming of aluminium alloy. [doi: DOI: 10.1016/j.wear.2004.10.011]. *Wear*, 258(10), 1567-1576. doi: 10.1016/j.wear.2004.10.011
- Le Roux, S., Boher, C., Penazzi, L., Dessain, C., & Tavernier, B. (2012). A methodology and new criteria to quantify the adhesive and abrasive wear damage on a die radius using white light profilometry. *Tribology International*, 52(0), 40-49. doi: 10.1016/j.triboint.2012.02.018
- Lee, B. H., Keum, Y. T., & Wagoner, R. H. (2002). Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00784-7]. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 60-63. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00784-7
- Lenard, J. G. (2002). *Metal forming Science and Practice* (First ed.). Oxford: ELSEVIER SCIENCE Ltd.
- Leu, D.-K. (2009). A simple dry friction model for metal forming process. [doi: DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.05.027]. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2361-2368.
- Lo, S.-W., & Tsai, S.-D. (2002). Real-Time Observation of the Evolution of Contact Area Under Boundary Lubrication in Sliding Contact. *Journal of Tribology*, 124(2), 229-238. doi: 10.1115/1.1387027
- Lo, S.-W., Yang, T.-C., Shih, Z.-M., & Lin, S.-C. (2009). Effects of Surface Roughening on Asperity Flattening. [10.1007/s11249-009-9434-6]. *Tribology Letters*, 35(1), 67-75. doi: 10.1007/s11249-009-9434-6
- Lo, S.-W., & Yang, T.-S. (2003). A New Mechanism of Asperity Flattening in Sliding Contact---The Role of Tool Elastic Microwedge. *Journal of Tribology*, 125(4), 713-719. doi: 10.1115/1.1574518

- Lovell, M., Higgs, C. F., Deshmukh, P., & Mobley, A. (2006). Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants. [doi: DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.045]. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3), 87-90. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.045
- Lovell, M. R., & Deng, Z. (1999). Experimental investigation of sliding friction between hard and deformable surfaces with application to manufacturing processes. [doi: DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00263-X]. *Wear*, 236(1-2), 117-127.
- Lovell, M. R., & Deng, Z. (2002). Characterization of interfacial friction in coated sheet steels: influence of stamping process parameters and wear mechanisms. [doi: DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00097-4]. *Tribology International*, 35(2), 85-95. doi: 10.1016/S0301-679X(01)00097-4
- Marciniak, Z., Duncan, J. L., & Hu, S. J. (2002a). 2 - Sheet deformation processes. In Z. M. L. D. J. Hu (Ed.), *Mechanics of Sheet Metal Forming (Second Edition)* (pp. 14-29). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Marciniak, Z., Duncan, J. L., & Hu, S. J. (2002b). 4 - Simplified stamping analysis. In Z. M. L. D. J. Hu (Ed.), *Mechanics of Sheet Metal Forming (Second Edition)* (pp. 45-60). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Matuszak, A. (2000a). Determination of the frictional properties of coated steel sheets. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00599-9]. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 107-111. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00599-9
- Matuszak, A. (2000b). Factors influencing friction in steel sheet forming. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00625-7]. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 250-253. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00625-7
- Metals, K. o. (2012). Wrought Aluminum Alloys for General and Special Applications: Part One, from <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=210>
- Montgomery, D. C. (2002). *Diseño y Análisis de Experimentos* (2ª ed.). Mexico: Limusa-Wiley, cop.
- Narayananamy, R., & Loganathan, C. (2007). The influence of friction on the prediction of wrinkling of prestrained blanks when drawing through a conical die. [doi: DOI: 10.1016/j.matdes.2005.10.018]. *Materials & Design*, 28(3), 904-912.
- Nine, H. D. (1978). Drawbead Forces in Sheet Metal Forming. In D. Koistinen & N.-M. Wang (Eds.), *Mechanics of Sheet Metal Forming* (pp. 179-211): Springer US.
- Pereira, M. P., Duncan, J. L., Yan, W., & Rolfe, B. F. (2009). Contact pressure evolution at the die radius in sheet metal stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3532-3541. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.010
- Pereira, M. P., Yan, W., & Rolfe, B. F. (2008). Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming. *Wear*, 265(11-12), 1687-1699. doi: 10.1016/j.wear.2008.04.042
- Pereira, M. P., Yan, W., & Rolfe, B. F. (2010). Sliding distance, contact pressure and wear in sheet metal stamping. *Wear*, 268(11-12), 1275-1284. doi: 10.1016/j.wear.2010.01.020
- Pereira, M. P., Yan, W., & Rolfe, B. F. (2012). Wear at the die radius in sheet metal stamping. *Wear*, 274-275(0), 355-367. doi: 10.1016/j.wear.2011.10.006

- R. Le, H., & Sutcliffe, M. P. F. (2003). Evolution of Surface Pits on Stainless Steel Strip in Cold Rolling and Strip Drawing. *Journal of Tribology*, 125(2), 384-390.
- R.A. Day. (2005). *Cómo escribir y publicar trabajos científicos*. Phoenix: The Oryx Press,.
- Saha, P. K., Wilson, W. R. D., & Timsit, R. S. (1996). Influence of surface topography on the frictional characteristics of 3104 aluminum alloy sheet. [doi: DOI: 10.1016/0043-1648(95)06881-3]. *Wear*, 197(1-2), 123-129. doi: 10.1016/0043-1648(95)06881-3
- SAHA, P. M. (1993). *Boundari friction measurements in sheet metal forming*. DOCTOR OF PHILOSOPHY, NORTHWESTERN UNIVERSITY, EVANSTON, ILLINOIS.
- SAKURAI, T. (2008). The Latest Trends in Aluminum Alloy Sheets for Automotive Body Panels, from http://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_28/022-028.pdf
- Samuel, M. (2002). Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01233-X]. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(1), 94-103.
- Saniei, M., & Salimi, M. (2006). Development of a mixed film lubrication model in cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3), 575-581. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.049
- Schey, J. (1984). Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear. *Journal of Applied Metalworking*, 3(2), 173-173. doi: 10.1007/bf02833697
- Sefton, H. (2000). *A friction sensor for a sheet metal forming simulator*. Queen's University, Kingston. Retrieved from http://www.nlc-bnc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape4/PQDD_0020/MQ54039.pdf
- Shih, H. C., & Wilson, W. R. D. (1999). Effects of contact pressure and strain on friction in sheet-metal forming *Tribology Transactions* (Vol. 42, pp. 144-151).
- Sørensen, C. G., Bech, J. I., Andreasen, J. L., Bay, N., Engel, U., & Neudecker, T. (1999). A Basic Study of the Influence of Surface Topography on Mechanisms of Liquid Lubrication in Metal Forming *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (Vol. 48, pp. 203-208).
- Sutcliffe, M. P. F. (1988). Surface asperity deformation in metal forming processes. [doi: DOI: 10.1016/0020-7403(88)90010-0]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 30(11), 847-868. doi: 10.1016/0020-7403(88)90010-0
- Sutcliffe, M. P. F., Combarieu, R., & Montmitonnet, P. (2004). Effect of additives on friction during plane strain compression of aluminium strip. [doi: DOI: 10.1016/j.wear.2004.07.001]. *Wear*, 257(9-10), 1071-1080. doi: 10.1016/j.wear.2004.07.001
- Sutcliffe, M. P. F., Combarieu, R., Repoux, M., & Montmitonnet, P. (2003). Tribology of plane strain compression tests on aluminium strip using ToF-SIMS analysis of transfer films. [doi: DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00295-8]. *Wear*, 254(1-2), 65-79. doi: 10.1016/S0043-1648(02)00295-8
- Sutcliffe, M. P. F., & Georgiades, F. (2002). Characterisation of pit geometry in cold-rolled stainless steel strip. [doi: DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00247-8]. *Wear*, 253(9-10), 963-974.
- Tan, X. (2002). Comparisons of friction models in bulk metal forming *Tribology International* (Vol. 35, pp. 385-393).

- Tieu, A. K., & Liu, Y. J. (2004). Friction variation in the cold-rolling process. [doi: DOI: 10.1016/S0301-679X(03)00048-3]. *Tribology International*, 37(2), 177-183. doi: 10.1016/S0301-679X(03)00048-3
- Torabinejad, V., Zarei-Hanzaki, A., Sabet, M., & Abedi, H. R. (2011). The effect of low temperature annealing on the mechanical behavior of cold rolled dual-phase Twinning-Induced Plasticity steel. [doi: DOI: 10.1016/j.matdes.2010.12.032]. *Materials & Design*, 32(4), 2345-2349.
- Ungureanu, C., Das, S., & Jawahir, I. (2007). Life-cycle cost analysis: aluminum versus steel in passenger cars. *TMS (the minerals, metals & materials society)*.
- Vallance, D., & Matlock, O. (1992). Application of the bending-under-tension friction test to coated sheet steels. [10.1007/BF02649250]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1(5), 685-693. doi: 10.1007/BF02649250
- W. F. HOSFORD, R. M. C. (2011). *METAL FORMING, Mechanics and Metallurgy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wang, X. J., Duncan, J. L., & Devenpeck, M. L. (1983). Punch friction tests for sheet metal forming. *Journal of Applied Metalworking*, 3(1), 3-11. doi: 10.1007/bf02833871
- Wang, X. Z., & Masood, S. H. (2011). Investigation of die radius arc profile on wear behaviour in sheet metal processing of advanced high strength steels. *Materials & Design*, 32(3), 1118-1128. doi: 10.1016/j.matdes.2010.11.005
- Weidel, S., & Engel, U. (2007). Surface characterisation in forming processes by functional 3D parameters. [10.1007/s00170-006-0644-x]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(1), 130-136. doi: 10.1007/s00170-006-0644-x
- Weidel, S., Engel, U., Merklein, M., & Geiger, M. (2009). Basic investigations on boundary lubrication in metal forming processes by in situ observation of the real contact area. [10.1007/s11740-009-0198-5]. *Production Engineering*. doi: 10.1007/s11740-009-0198-5
- Wihlborg, A., & Gunnarsson, L. (2000). A frictional study of uncoated EBT steel sheets in a bending under tension friction test. [doi: DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00319-1]. *Wear*, 237(1), 129-136.
- Wiklund, D., Rosén, B.-G., & Gunnarsson, L. (2008). Frictional mechanisms in mixed lubricated regime in steel sheet metal forming. [doi: DOI: 10.1016/j.wear.2006.08.032]. *Wear*, 264(5-6), 474-479. doi: 10.1016/j.wear.2006.08.032
- Wiklund, D., Rosén, B. G., & Wihlborg, A. (2009). A friction model evaluated with results from a bending-under-tension test. [doi: DOI: 10.1016/j.triboint.2009.05.008]. *Tribology International*, 42(10), 1448-1452. doi: 10.1016/j.triboint.2009.05.008
- Wilson, W. R. D., & Kokoska, E. A. (1975). The influence of lubricant composition on the lubricant breakdown in upsetting between overhanging dies. [doi: DOI: 10.1016/0043-1648(75)90202-1]. *Wear*, 32(1), 25-32. doi: 10.1016/0043-1648(75)90202-1
- Wilson, W. R. D., & Sheu, S. (1988a). Influence of surface topography on viscoplastic asperity lubrication. [doi: DOI: 10.1016/0043-1648(88)90220-7]. *Wear*, 124(3), 311-326. doi: 10.1016/0043-1648(88)90220-7

- Wilson, W. R. D., & Sheu, S. (1988b). Real area of contact and boundary friction in metal forming *International Journal of Mechanical Sciences* (Vol. 30, pp. 475-489).
- Witik, R. A., Payet, J., Michaud, V., Ludwig, C., & Månson, J.-A. E. (2011). Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(11), 1694-1709. doi: 10.1016/j.compositesa.2011.07.024
- Wohlester, F. K. m. A. f. R. (2006). Communication Module Mass Reduction.
- Wohlester, F. K. m. A. f. R. (2007). Determination of Weight Elasticity of Fuel Economy <http://www.worldautosteel.org/uploaded/FkaReportWeightElasticityStudy062107FINAL.pdf>.
- WorldAutoSteel. (2009). Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines.
- Wright, R. N., & Schurman, T. (1990). Die friction variations in simulated sheet metal forming. *Sheet Metals in Forming Processes*, 113-121.
- Y. S. Kim, M. K. J., and D. R. Metzger. (2004). A Finite Element Study of Capstan Friction Test. *NUMIFORM 2004 - Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, 712, 2264-2269. doi: doi.org/10.1063/1.1766872
- Yanagida, A., & Azushima, A. (2009). Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test. [doi: DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.091]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), 247-250. doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.091
- Yanagida, A., Kurihara, T., & Azushima, A. (2010). Development of tribo-simulator for hot stamping. [doi: DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.10.007]. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 456-460. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.10.007
- Yang, T.-S. (2007). A Refined Friction Modeling for Lubricated Metal Forming Process. [10.1007/s11249-007-9233-x]. *Tribology Letters*, 27(3), 289-300.
- Yang, T.-S., & Hsu, T.-C. (2001). Forming limit analysis of hemispherical-punch stretch forming. [doi: DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01104-9]. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(1-2), 32-36.
- Yuqi, L., & Junhua, L. (2006). Numerical constraint disposal for boundary friction in sheet metal forming. [doi: DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.003]. *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1-3), 4-7. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.003
- Z. Marciniak, J. L. D., S.J. Hu. (2002). *Mechanics of sheet metal forming* (2 ed.). Oxford: Burlington Butterworth-Heinemann
- Zhang, S., Hodgson, P. D., Duncan, J. L., Cardew-Hall, M. J., & Kalyanasundaram, S. (2002). Effect of membrane stress on surface roughness changes in sheet forming. [doi: DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00101-1]. *Wear*, 253(5-6), 610-617. doi: 10.1016/S0043-1648(02)00101-1

V. Anexos

ANEXO A. Tablas de Resultados DP600(Flinsa). Gráficos complementarios.

Tabla A. 1 Herramienta de conformado (rodaje). Rugosidad Longitudinal

Posición	A	A	B	B	C	C
Cuadrante	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq
N1	0,07	0,1	0,08	0,11	0,26	0,26
N2	0,09	0,13	0,08	0,1	0,08	0,08
N3	0,09	0,11	0,08	0,11	0,07	0,07
N4	0,16	0,23	0,13	0,19	0,1	0,1

Promedio Ra= 0,1075 μm , $\sigma_a=0,0584 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,8 \text{ mm x } 5$)

Promedio Rq= 0,1325 μm , $\sigma_a= 0,0606 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm x } 2$)

Tabla A. 2 Herramienta de rodaje Rugosidad Transversal

Posición	A	A	B	B	C	C
Cuadrante	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq
2NT1	0,17	0,24	0,15	0,31	0,19	0,24
2NT2	0,18	0,25	0,17	0,16	0,13	0,18
2NT3	0,18	0,27	0,14	0,2	0,59	0,85
2NT4	0,22	0,32	0,18	0,27	0,22	0,31

Promedio Ra= 0,21 μm , $\sigma_a=0,128 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm x } 2$)

Promedio Rq= 0,3 μm , $\sigma_a= 0,1806 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm x } 2$)

Tabla A. 3 Perfil longitudinal y transversal de rugosidad de la herramienta de conformado

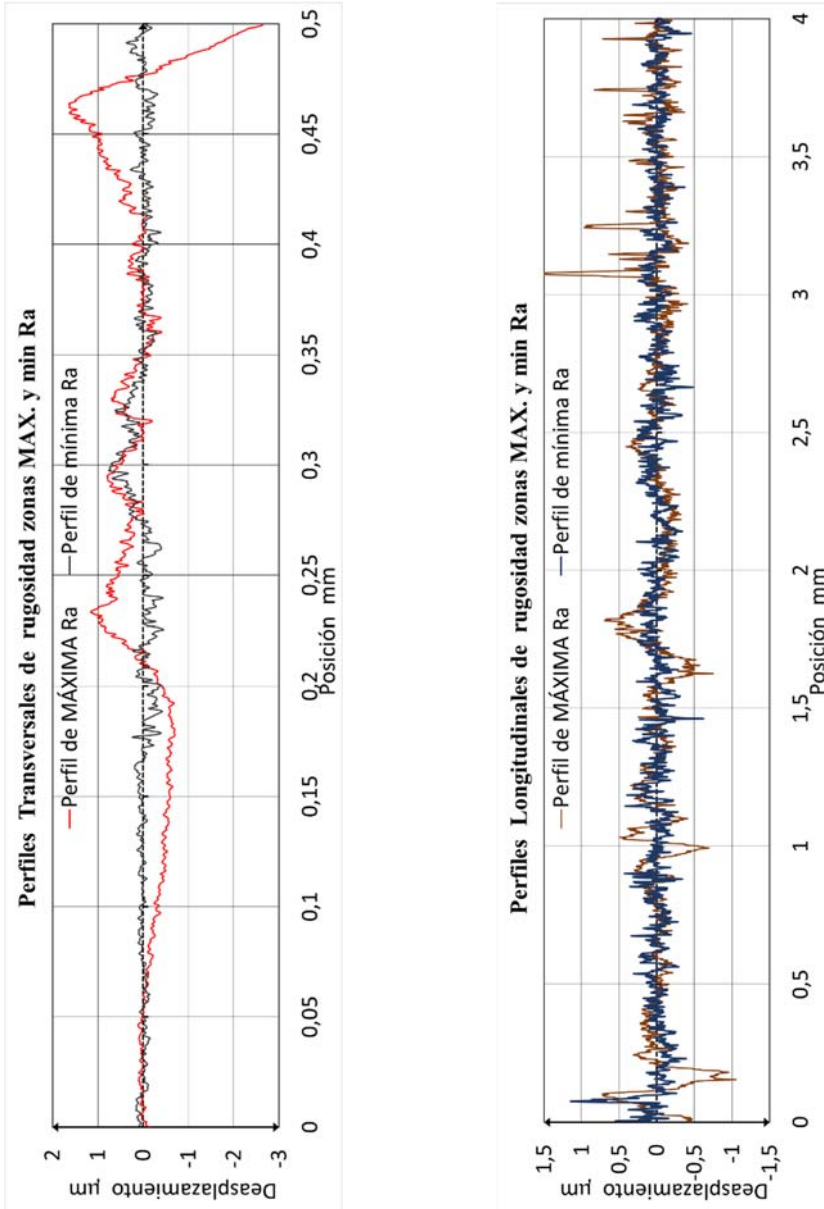


Tabla A. 4 DP600 (Flinsa) Resultados Bloque 1

Nº	Vel. Entr.	Vel. Sal.	ANGU LO	LUBRI CANTE	PROBETA Nº	t(s)	F1 (en 15 mm)	F2 (en 15 mm)	Ancho inicial	Espesor Inicial
1	0,5	15,4	60	2	1	2	3.715,47	4.365,01	7,53	0,95
2	0,5	25	90	NO	2	1	2.927,51	4.159,37	7,26	0,95
3	0,5	15,6	30	NO	3	1	3.910,57	4.275,94	7,44	0,95
4	0,5	5,4	60	1	4	3	3.688,81	4.309,66	7,44	0,95
5	0,5	15,6	60	NO	5	1	3.873,74	4.683,41	7,65	0,95
6	0,5	5,4	90	1	6	3	3.677,98	4.599,86	7,18	0,95
7	0,5	15,4	30	2	7	1	4.020,30	4.348,20	7,73	0,95
8	0,5	15,4	30	1	8	1	4.443,82	4.775,43	7,77	0,95
9	0,5	15,4	90	2	9	1	3.210,78	4.448,07	7,43	0,95
10	0,5	25,5	30	1	10	1	3.698,14	3.964,26	6,90	0,95
11	0,5	25,5	60	2	11	1	3.620,44	4.277,67	7,35	0,95
12	0,5	25,5	60	NO	12	1	3.831,82	4.608,18	7,77	0,95
13	0,5	5,4	60	2	13	3	3.843,67	4.467,57	7,13	0,95
14	0,5	5,4	30	1	14	4	4.059,36	4.343,74	7,33	0,95
15	0,5	15,4	60	1	15	2	3.618,61	4.217,81	7,37	0,95
16	0,5	5,4	60	NO	16	4	3.678,10	4.395,49	7,31	0,95
17	0,5	25,5	60	1	17	1	3.948,84	4.590,04	7,80	0,95
18	0,5	5,4	90	NO	18	4	3.113,38	4.448,84	7,44	0,95

Nº	Fb(Swift)	Coef.Roz1	Cor.Roz2	Cef.Roz 3	Dif. Rug. Ra	EVENTOS	$\epsilon 1/\epsilon 2$
1	87,10	0,133	0,135	0,143	0,363	ROTURA	0,259
2	114,65	0,201	0,206	0,218	0,833	ROTURA	0,022
3	45,85	0,149	0,150	0,159	0,750	ROTURA	0,862
4	86,05	0,128	0,129	0,137	0,467		0,377
5	88,46	0,161	0,163	0,173	0,327	ROTURA	0,621
6	113,26	0,124	0,127	0,134	0,127	ROTURA	0,195
7	47,62	0,128	0,129	0,136	0,500		0,393
8	47,86	0,118	0,118	0,125	0,350		0,482
9	117,30	0,186	0,190	0,202	0,063	ROTURA	0,072
10	42,48	0,111	0,112	0,119	0,457		0,848
11	85,04	0,138	0,140	0,148	0,410		0,498
12	89,80	0,155	0,157	0,167	0,217		0,251
13	82,40	0,124	0,126	0,133	0,400		0,325
14	45,18	0,109	0,109	0,116	1,287		0,663
15	85,27	0,125	0,127	0,134	0,000		0,364
16	84,54	0,150	0,152	0,161	0,200		0,460
17	90,17	0,120	0,125	0,132	1,270		0,373
18	117,44	0,205	0,210	0,223	0,320		0,036

Tabla A. 5 DP600 (Flinsa) Resultados Bloque 2											
Nº	Vel. Entr.	Vel. Sal.	ANGU LO	LUBRI CANTE	PROBETA Nº	t(s)	F1(en 15 mm)	F2(en 15 mm)	Ancho inicial	Espesor Inicial	
19	0,5	25,5	90	2	19	1	3.148,34	4.389,58	7,65	0,95	
20	0,5	15,1	60	2	20	2	3.919,74	4.617,72	8,02	0,95	
21	0,5	25	90	NO	21	1	3.384,18	4.751,32	7,88	0,95	
22	0,5	15,4	30	NO	22	2	3.918,58	4.280,13	7,36	0,95	
23	0,5	5,4	60	1	23	4	4.080,51	4.718,39	7,64	0,95	
24	0,5	15,4	60	NO	24	2	3.654,84	4.370,64	7,29	0,98	
25	0,5	5,4	90	1	25	4	3.587,30	4.539,19	8,26	0,95	
26	0,5	15,4	30	2	26	2	4.306,95	4.678,11	7,90	0,95	
27	0,5	15,4	30	1	27	2	4.410,37	4.715,20	8,00	0,95	
28	0,5	15,4	90	2	28	2	3.206,93	4.460,63	7,63	0,95	
29	0,5	25,5	30	1	29	1	4.483,68	4.814,42	7,85	0,98	
30	0,5	25,5	60	2	30	1	3.714,58	4.393,84	7,56	0,95	
31	0,5	25,5	60	NO	31	1	4.031,39	4.841,70	8,14	0,95	
32	0,5	5,4	60	2	32	4	3.689,97	4.343,61	7,64	0,95	
33	0,5	5,4	30	1	33	4	4.314,62	4.610,49	7,75	0,95	
34	0,5	15,4	60	1	34	2	3.855,45	4.474,51	7,75	0,95	
35	0,5	5,4	60	NO	35	4	3.877,12	4.618,78	7,45	0,95	
36	0,5	25,5	60	1	36	1	3.741,96	4.347,93	7,29	0,95	
37	0,5	5,4	90	NO	37	4	3.548,55	5.031,74	7,96	0,95	
38	0,5	25,5	90	2	38	1	2.850,05	3.999,17	6,76	0,95	

Nº	Fb(Swift)	Coef.Roz1	Cor.Roz2	Cef.Roz 3	Dif. Rug. Ra	EVENTOS	$\epsilon 1/\epsilon 2$
19	120,79	0,189	0,194	0,205	0,320	ROTURA	0,146
20	92,75	0,135	0,137	0,145	0,180	ROTURA	0,218
21	124,29	0,195	0,199	0,211	0,667		0,111
22	45,35	0,147	0,148	0,157	0,570		0,572
23	88,29	0,119	0,121	0,128	0,810		0,278
24	89,67	0,149	0,151	0,160	0,693		0,270
25	130,37	0,129	0,131	0,139	0,403		0,153
26	48,67	0,137	0,138	0,146	0,473		0,360
27	49,25	0,107	0,108	0,114	0,277		0,605
28	120,47	0,188	0,193	0,204	0,257		0,086
29	51,48	0,115	0,115	0,122	0,767		0,812
30	87,41	0,139	0,141	0,150	0,650		0,310
31	94,14	0,154	0,156	0,165	0,577		0,398
32	88,29	0,134	0,136	0,144	0,520		0,260
33	47,75	0,106	0,107	0,113	0,127		0,709
34	89,65	0,121	0,123	0,130	-0,070		0,379
35	86,18	0,147	0,149	0,158	0,447		0,395
36	84,26	0,123	0,125	0,132	0,013	ROTURA	0,041
37	125,60	0,201	0,206	0,218	0,813		0,145
38	106,71	0,194	0,198	0,210	0,243		0,026

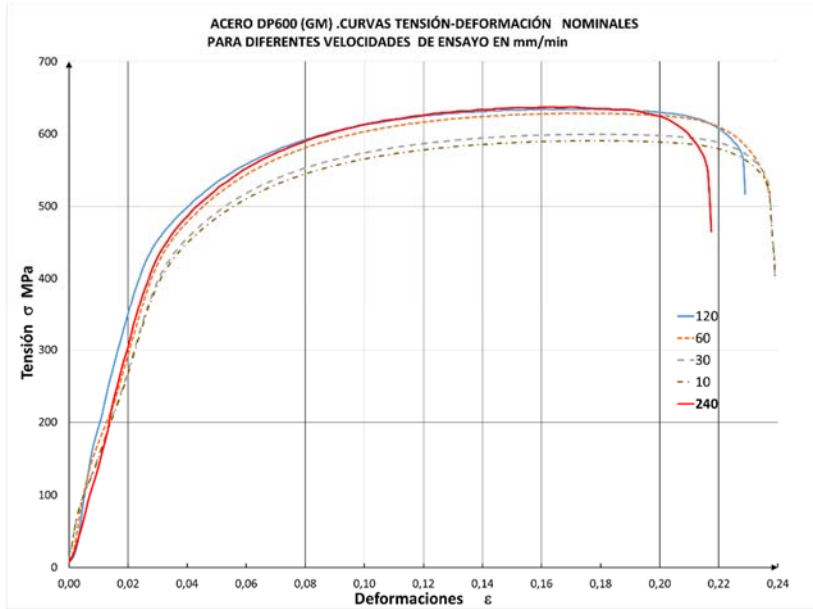


Figura A. 1 Curvas Tensión-Deformación. Nominal. DP600 (GM)

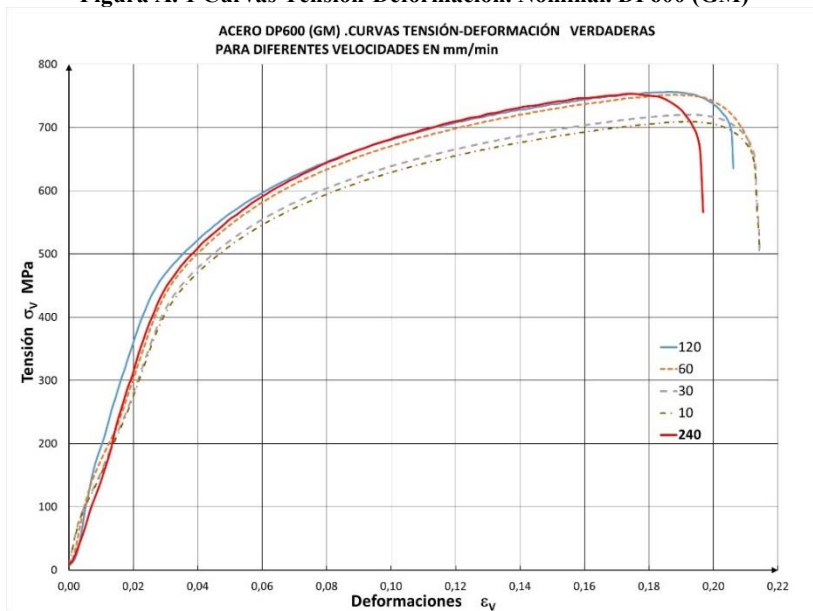


Figura A. 2 Curvas Tensión-Deformación. Verdadero. DP600 (GM)

Tabla A. 6 Medias e intervalos de los parámetros de Diseño

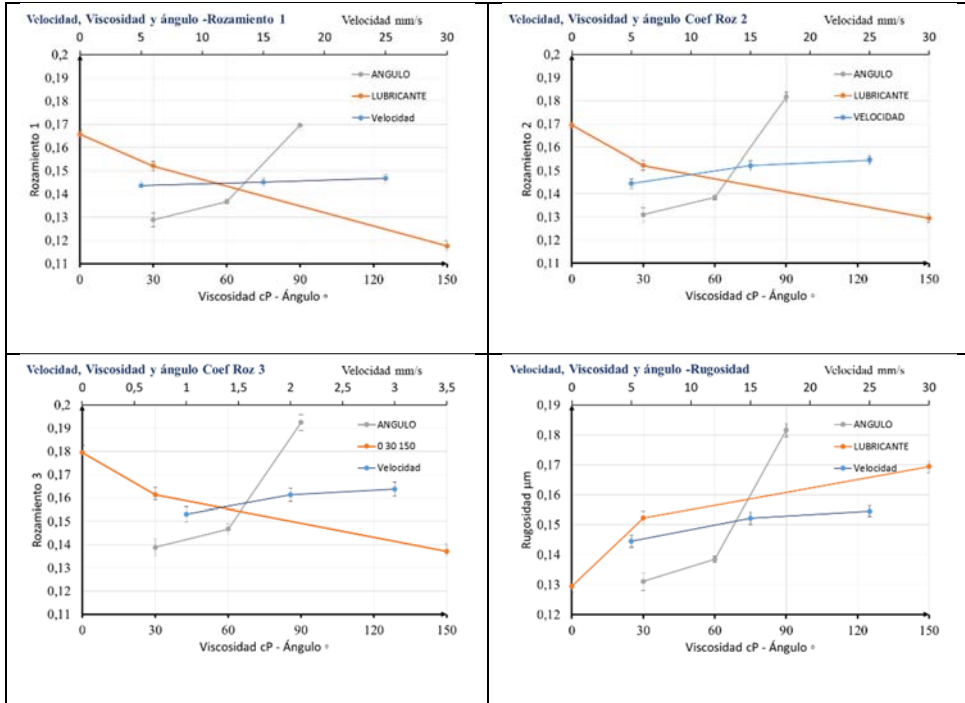


Tabla A. 7 Ecuaciones de ajuste resultado de los Experimentos.

$\text{ROZAMIENTO 1} = 0,107547 + 0,000764296 \cdot \text{ANGULO} - 0,000234414 \cdot \text{LUBRICANTE} + 0,000435307 \cdot \text{VELOCIDAD}$
$\text{Rozamiento 2} = 0,106451 + 0,000818619 \cdot \text{ANGULO} - 0,00023904 \cdot \text{LUBRICANTE} + 0,000452064 \cdot \text{VELOCIDAD}$
$\text{ROZAMIENTO 3} = 0,112796 + 0,000866844 \cdot \text{ANGULO} - 0,000253256 \cdot \text{LUBRICANTE} + 0,000479781 \cdot \text{VELOCIDAD}$
$\text{Variación de Rugosidad Ra} = 0,629128 - 0,0029218 \cdot \text{ANGULO} - 0,000450138 \cdot \text{LUBRICANTE} + 0,00164707 \cdot \text{VELOCIDAD}$

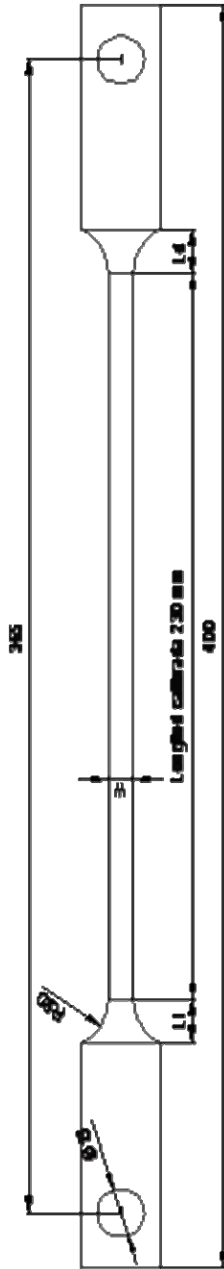


Figura 6.15 Esquema geométrico de las probetas.

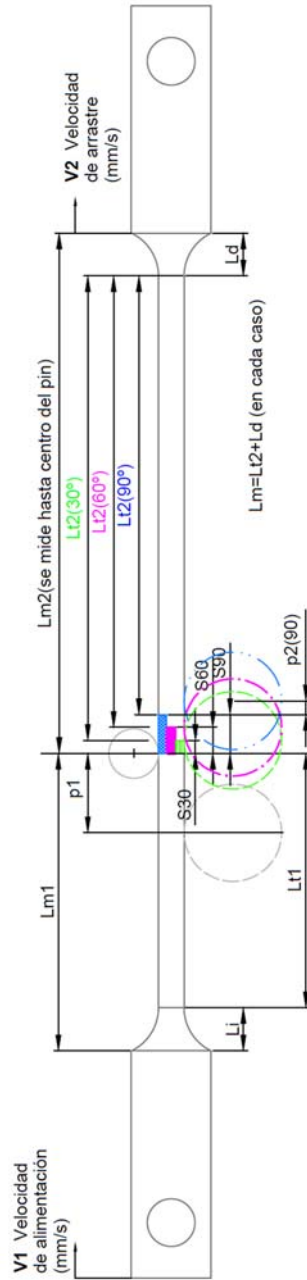


Figura 7.26 Definición geométrica de la probeta para la determinación de las velocidades.

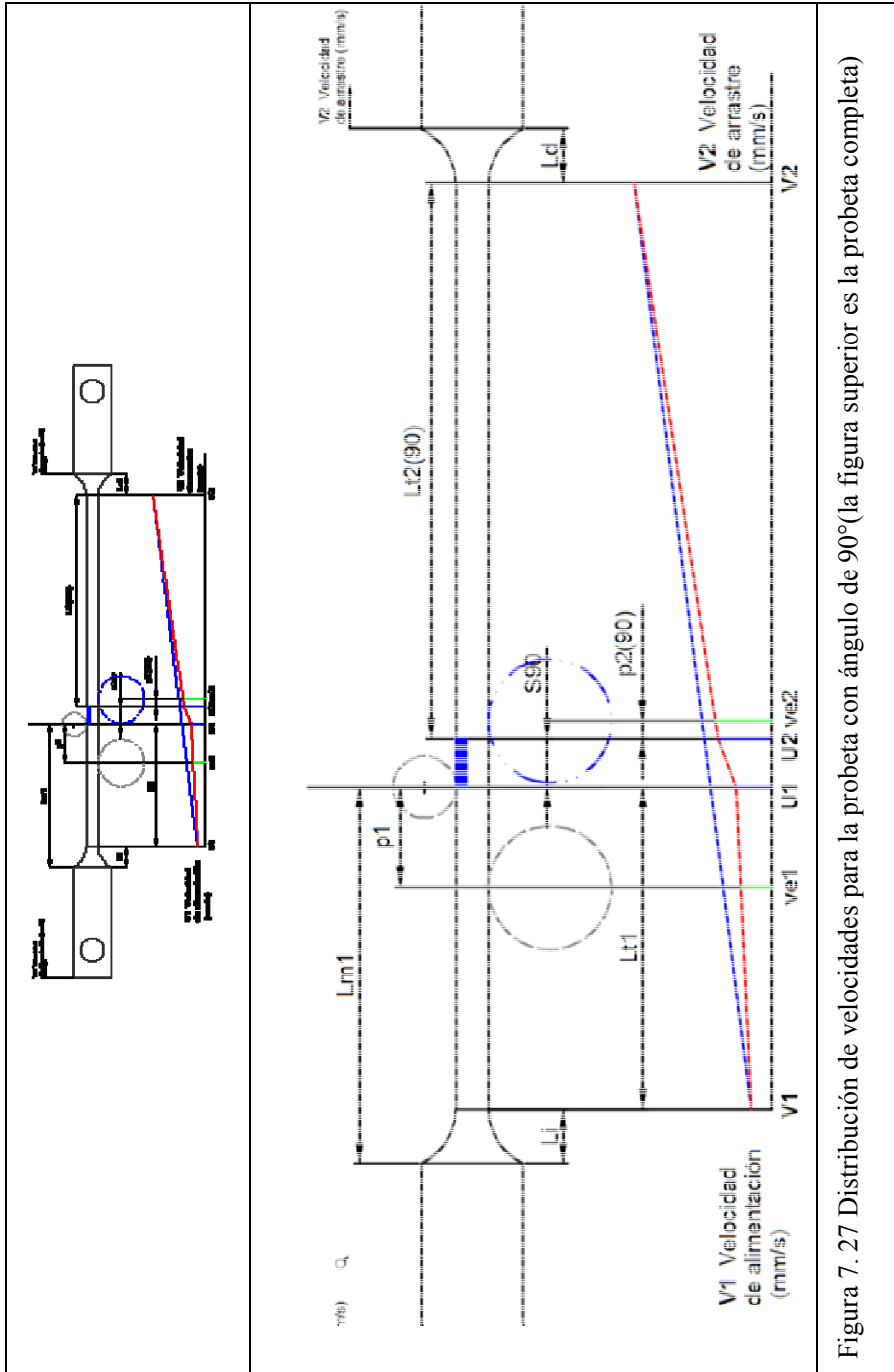


Figura 7. 27 Distribución de velocidades para la probeta con ángulo de 90°(la figura superior es la probeta completa)

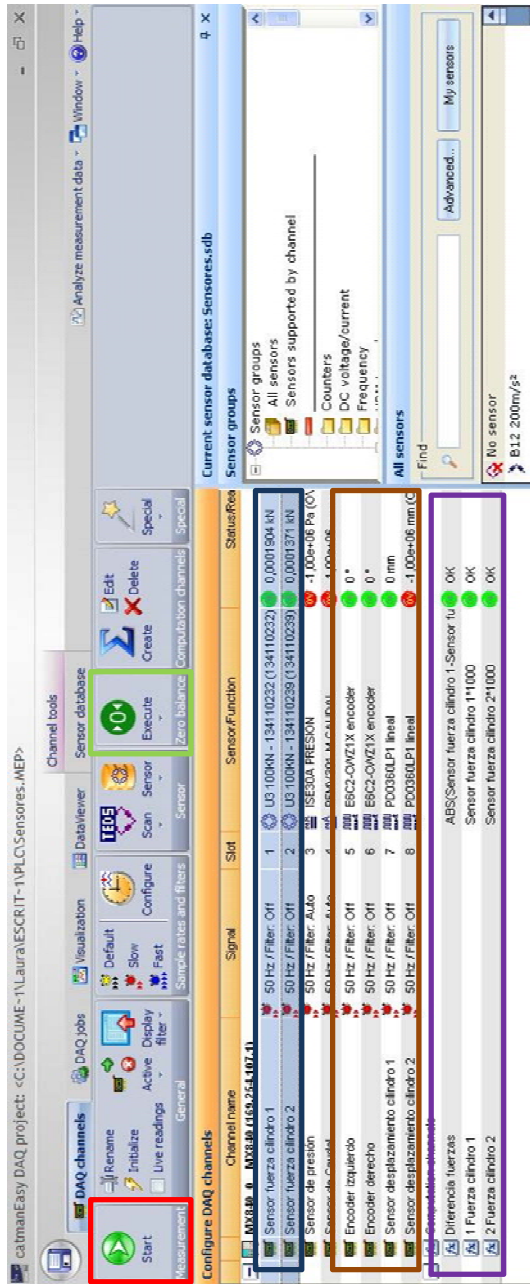


Figura 7. 31 Pantalla del control de la adquisición de Catman AP

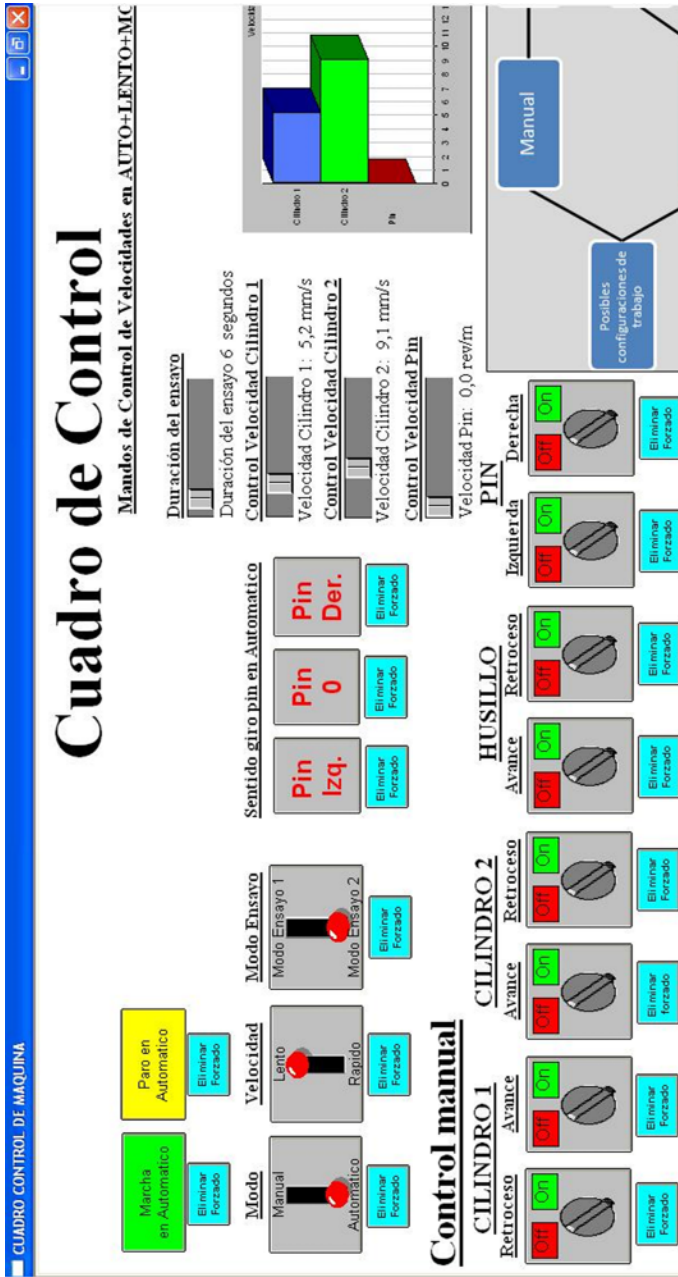


Figura 7. 32 Cuadro de control del ensayo de simulación SFBT

Anexo B. Resultados DP600 (GM)

Tabla B. 1 Herramienta de conformado. Rugosidad Longitudinal

Posición	A	A	B	B	C	C
Cuadrante	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq
N1	0,07	0,1	0,08	0,11	0,26	0,26
N2	0,09	0,13	0,08	0,1	0,08	0,08
N3	0,09	0,11	0,08	0,11	0,07	0,07
N4	0,16	0,23	0,13	0,19	0,1	0,1

Promedio Ra= 0,1075 μm , $\sigma_a=0,0584 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,8 \text{ mm} \times 5$)

Promedio Rq= 0,1325 μm , $\sigma_a=0,0606 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm} \times 2$)

Las posiciones A (extremo izquierdo). B (centro) y C (extremo derecho) son las zonas de medida.

Tabla B. 2 Herramienta de rodaje Rugosidad Transversal

Posición	A	A	B	B	C	C
Cuadrante	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq
2NT1	0,17	0,24	0,15	0,31	0,19	0,24
2NT2	0,18	0,25	0,17	0,16	0,13	0,18
2NT3	0,18	0,27	0,14	0,2	0,59	0,85
2NT4	0,22	0,32	0,18	0,27	0,22	0,31

Promedio Ra= 0,21 μm , $\sigma_a=0,128 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm} \times 2$)

Promedio Rq= 0,3 μm , $\sigma_a=0,1806 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm} \times 2$)

Las posiciones A (extremo izquierdo). B (centro) y C (extremo derecho) son las zonas de medida.

La figura siguiente indica los perfiles de rugosidades Máxima y Mínima de las 12 zonas medidas, en los sentidos longitudinal y transversal.

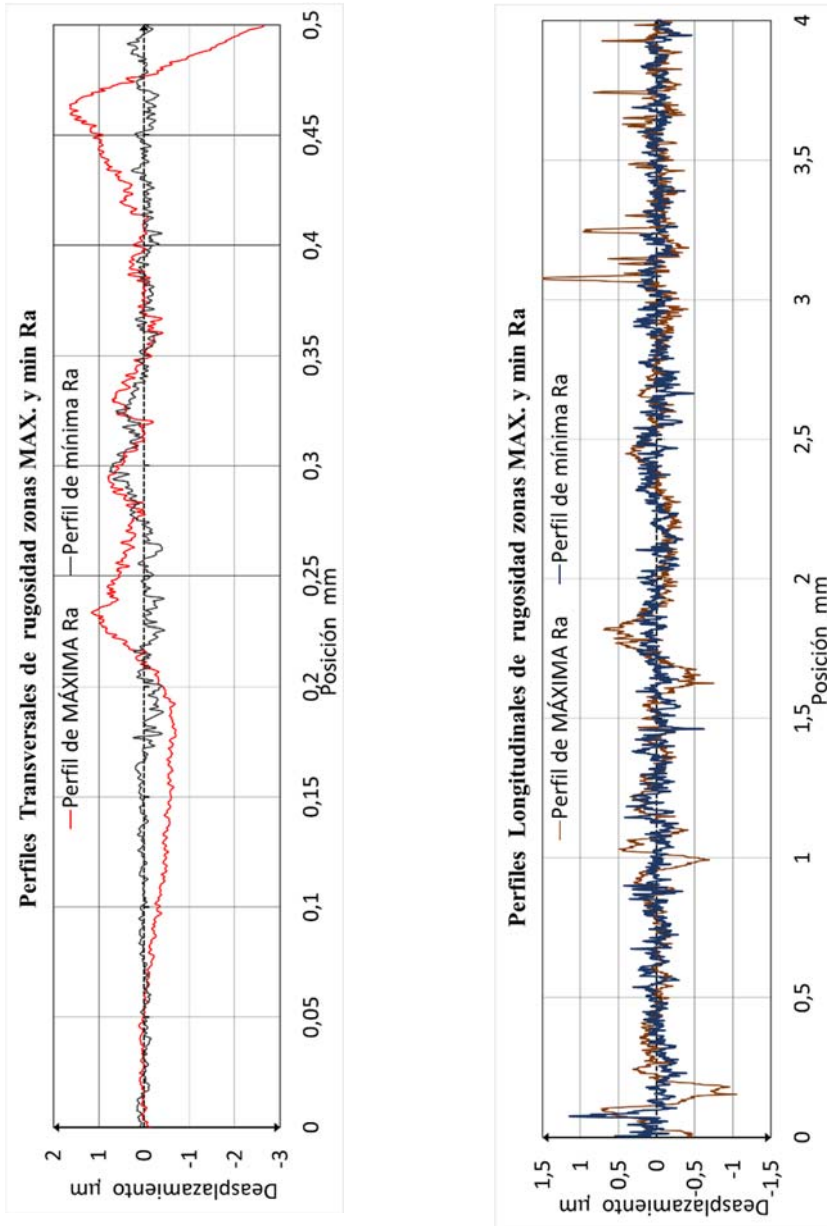


Figura B. 1 Perfil longitudinal y transversal de rugosidad de la herramienta de conformado

Tabla B. 3 Resultados Bloque 1,2 a)

Nº	BLO-QUE	Vel. entrada	Vel. salida	ANGULO	Viscosidad en cP	PRO. Nº	t(s)	F1 (en 25)	F2 (en 25)
1	1	4,1	5,2	90	30	55	4	5.006,8	6.830,1
2	1	4,1	7,3	30	30	56	4	5.466,7	6.000,8
3	1	4,1	7,3	60	150	3	3	5.456,8	6.284,3
4	1	4,1	5,2	30	150	4	4	4.990,5	5.451,1
5	1	4,1	7,3	60	30	5	4	5.376,4	6.363,3
6	1	4,1	5,2	30	30	6	5	4.847,1	5.344,7
7	1	4,1	5,2	60	30	7	5	4.182,8	5.179,7
8	1	4,1	9,1	60	150	8	4	6.443,7	7.447,3
9	1	4,1	9,1	90	150	57	3	5.148,6	6.635,3
10	1	4,1	5,2	60	150	10	5	5.566,4	6.518,7
11	1	4,1	9,1	90	30	11	3	4.786,9	6.491,5
12	1	4,1	7,3	90	150	12	4	4.751,3	6.215,1
13	1	4,1	9,1	30	150	13	3	6.212,4	6.659,5
14	1	4,1	5,2	90	150	14	6	3.389,0	4.706,8
15	1	4,1	9,1	60	30	15	3	5.800,9	6.833,8
16	1	4,1	9,1	30	30	16	3	5.986,4	6.578,4
17	1	4,1	7,3	90	30	17	4	4.823,3	6.504,2
18	1	4,1	7,3	30	150	18	4	5.635,6	6.080,3
1	2	4,1	7,3	30	150	19	4	5.512,4	5.941,9
2	2	4,1	5,2	60	30	20	5	4.031,4	4.989,6
3	2	4,1	9,1	90	30	21	3	5.497,9	7.183,8
4	2	4,1	5,2	90	150	22	5	3.956,6	5.225,5
5	2	4,1	7,3	90	150	23	4	4.136,0	5.546,8
6	2	4,1	5,2	60	150	24	6	4.200,3	5.041,2
7	2	4,1	9,1	60	150	25	3	5.778,2	6.691,3
8	2	4,1	9,1	60	30	26	3	5.610,1	6.671,4
9	2	4,1	5,2	30	150	27	6	4.759,9	5.215,7
10	2	4,1	7,3	90	30	28	4	4.677,1	6.278,9
11	2	4,1	9,1	30	30	29	3	6.136,1	6.781,5
12	2	4,1	9,1	90	150	30	3	5.132,0	6.760,0
13	2	4,1	9,1	30	150	31	3	6.212,6	6.678,2
14	2	4,1	7,3	30	30	32	4	6.088,9	6.757,1
15	2	4,1	7,3	60	30	33	4	5.224,2	6.381,3
16	2	4,1	7,3	60	150	34	4	5.365,9	6.292,5
17	2	4,1	5,2	30	30	35	6	4.816,3	5.377,5
18	2	4,1	5,2	90	30	36	6	4.922,6	6.624,7

Tabla B. 4 Resultados Bloque 1,2 b)

PRO. Nº	Ancho inicial w	Espesor Inicial y	Dif Fuerz. Especifica (F1-F2)/(wy)	Fb (Swift) N	Coef .Roz1 Ec.5.6	Vel.def. relvel. increm Ec. 8.9	Cor.Roz-2 Ec.5.9	Cef.Roz 3 Ec. 8.15
55	7,48	1,48	165,37	284,40	Coef.Roz1	0,63	0,17	0,19
56	7,14	1,42	52,70	98,23	0,17	0,58	0,15	0,16
3	7,53	1,46	75,23	205,76	0,15	0,30	0,10	0,11
4	7,78	1,47	40,25	114,82	0,10	0,53	0,13	0,14
5	7,44	1,50	88,45	214,45	0,13	0,29	0,13	0,14
6	7,88	1,48	53,82	117,03	0,13	0,75	0,14	0,16
7	7,73	1,49	86,52	219,97	0,14	0,38	0,16	0,18
8	8,34	1,47	81,89	230,82	0,16	0,19	0,11	0,12
57	7,67	1,47	131,86	289,85	0,11	0,12	0,13	0,15
10	7,69	1,49	73,67	218,74	0,13	0,39	0,12	0,13
11	7,30	1,47	158,87	275,83	0,12	0,17	0,17	0,18
12	7,33	1,48	134,90	280,86	0,16	0,16	0,14	0,15
13	7,40	1,50	40,26	113,70	0,14	0,44	0,10	0,11
14	7,49	1,47	119,75	282,89	0,10	0,47	0,17	0,19
15	7,74	1,47	90,80	214,27	0,16	0,26	0,13	0,14
16	7,54	1,45	54,19	108,14	0,12	0,44	0,15	0,16
17	7,67	1,48	148,00	293,96	0,15	0,18	0,16	0,18
18	7,39	1,48	40,77	109,79	0,16	0,32	0,11	0,12
19	7,02	1,50	40,82	107,74	0,11	0,40	0,11	0,12
20	7,40	1,50	86,35	213,27	0,11	0,68	0,16	0,18
21	7,99	1,48	142,61	305,98	0,16	0,17	0,14	0,16
22	7,82	1,42	114,25	275,79	0,14	0,33	0,14	0,16
23	7,19	1,50	130,85	282,83	0,14	0,22	0,15	0,17
24	7,79	1,47	71,26	215,71	0,15	0,46	0,13	0,14
25	7,69	1,44	82,42	204,39	0,13	0,22	0,11	0,12
26	7,44	1,50	95,14	214,40	0,11	0,18	0,13	0,15
27	7,31	1,50	41,60	112,20	0,13	0,84	0,13	0,15
28	7,48	1,47	145,76	282,51	0,13	0,21	0,16	0,17
29	7,81	1,47	56,23	115,17	0,15	0,31	0,16	0,17
30	7,69	1,50	141,17	302,50	0,16	0,13	0,15	0,16
31	7,62	1,50	40,74	117,02	0,14	0,46	0,10	0,11
32	8,12	1,50	55,05	123,88	0,10	0,60	0,16	0,18
33	7,42	1,47	96,47	205,49	0,16	0,34	0,16	0,17
34	8,03	1,46	79,05	219,28	0,16	0,26	0,12	0,13
35	7,63	1,49	49,34	115,69	0,12	0,51	0,17	0,18
36	7,99	1,47	144,96	301,86	0,17	0,40	0,16	0,17

Tabla B. 5 Resultados Bloque 1,2 c)

PRO. Nº	U1	U2	V1	V2	DRmT Ecuación 6.2	Salto de velocidad de ecuación 8.13	L10	L20
55	5,71	6,74	4,1	10	-1,452	0,864	126,12	94,34
56	4,49	5,63	4,1	10	-1,147	0,688	119,02	114,85
3	4,83	5,84	4,1	7,2	1,243	0,854	133,76	94,08
4	4,37	4,66	4,1	5,1	-0,607	0,969	117,33	116,43
5	4,59	5,53	4,1	7,2	-0,084	0,839	119,62	108,34
6	4,38	4,70	4	5,1	1,268	0,985	116,28	114,54
7	4,19	4,78	4,1	5,2	0,637	0,926	112,25	117,76
8	5,20	6,23	4	9	1,393	0,851	114,67	116,84
57	4,81	5,78	4,05	9	1,436	0,760	117,84	100,32
10	4,27	4,71	4,1	10	0,711	0,646	126,12	94,34
11	4,32	5,76	4	9	-1,678	0,690	116,68	102,37
12	4,51	5,35	4,1	7,2	-0,755	0,833	113,06	109,25
13	5,17	6,36	4,1	9	0,264	0,865	104,07	124,16
14	4,21	4,79	4,1	5,1	-0,379	0,932	113,03	105,50
15	4,60	5,95	4,1	9	0,228	0,742	115,55	113,53
16	5,00	6,20	4,2	9	0,146	0,822	106,61	122,24
17	4,29	5,30	4,1	7,15	-0,767	0,779	120,41	100,12
18	4,72	5,31	4,1	7,2	0,291	0,886	110,34	122,54
19	4,75	5,52	4,1	7,2	-2,068	0,900	106,81	126,86
20	4,05	4,88	4,1	5,15	1,532	0,895	113,95	113,29
21	4,61	5,94	4,1	9	-1,402	0,723	123,77	104,02
22	4,20	4,80	4,1	5,15	1,039	0,923	117,93	105,05
23	4,17	5,27	4	7,2	-1,214	0,785	109,76	113,70
24	4,16	4,85	4,1	5,15	1,878	0,914	120,36	109,52
25	4,94	6,13	4,1	9	0,282	0,791	117,00	110,36
26	4,76	5,74	4,1	9	-0,288	0,775	109,69	112,80
27	4,31	4,81	4,1	5,1	0,388	0,957	115,48	115,68
28	4,33	5,28	4,1	7,2	-1,264	0,809	109,11	113,51
29	5,02	5,91	4,1	9	0,564	0,854	99,26	128,87
30	4,59	5,56	4,1	9	-0,661	0,743	109,76	108,87
31	5,26	6,46	4,1	9	1,325	0,864	110,72	120,27
32	4,63	5,68	4,1	7,2	0,390	0,865	111,17	117,52
33	4,44	5,55	4,1	7,2	-1,385	0,824	113,52	114,17
34	4,60	5,49	4,1	7,2	0,080	0,843	120,80	112,13
35	4,31	4,64	4,1	5,15	0,797	0,945	121,27	102,52
36	4,12	4,79	4,1	5,1	-1,499	0,906	123,77	104,02

Tabla B. 6 Resultados Bloque 1,2 D)

PRO. Nº	Instante ensayo-t segundos	Ue	Salto de velocidad ecuación 8.11	Vel def rela especi ec 8.9	Rp razón pendiente a la entrada Ec. 8.14
55	4,9	6,609	0,152	0,014	0,642
56	3,472	6,531	0,345	0,046	0,162
3	3,472	5,653	0,266	0,039	0,469
4	4,9	4,507	0,142	0,072	0,652
5	3,472	5,469	0,285	0,036	0,355
6	4,9	4,450	0,061	0,070	0,851
7	4,9	4,531	0,305	0,064	0,220
8	2,778	6,110	0,182	0,025	0,568
57	2,778	6,325	0,306	0,016	0,334
10	4,9	6,609	0,397	0,009	0,066
11	2,778	6,266	0,389	0,023	0,143
12	3,472	5,414	0,291	0,022	0,314
13	2,778	5,978	0,164	0,058	0,571
14	4,9	4,516	0,307	0,046	0,262
15	2,778	6,203	0,327	0,033	0,238
16	2,778	6,082	0,225	0,060	0,425
17	3,472	5,501	0,399	0,027	0,132
18	3,472	5,323	0,195	0,046	0,506
19	3,472	5,274	0,170	0,060	0,551
20	4,900	4,524	0,451	0,095	-0,117
21	2,778	6,381	0,361	0,022	0,225
22	4,900	4,550	0,333	0,046	0,223
23	3,472	5,308	0,357	0,028	0,126
24	4,900	4,548	0,371	0,080	0,131
25	2,778	6,248	0,266	0,029	0,393
26	2,778	6,140	0,282	0,024	0,323
27	4,900	4,504	0,196	0,121	0,515
28	3,472	5,360	0,331	0,024	0,186
29	2,778	5,881	0,175	0,044	0,519
30	2,778	6,175	0,324	0,016	0,235
31	2,778	6,090	0,169	0,059	0,583
32	3,472	5,355	0,233	0,081	0,425
33	3,472	5,391	0,307	0,043	0,263
34	3,472	5,456	0,276	0,034	0,369
35	4,900	4,564	0,240	0,076	0,457
36	4,900	4,546	0,429	0,054	0,038

Tabla B. 7 Resultados Bloque 3 e)

Nº	BLO- QUE	Vel. entrada	Vel. salida	ANGULO	Viscosi- dad en cP	PRO. Nº	t(s)	F1 (en 25)	F2 (en 25)
1	3	4,1	7,3	90	150	37	4	5.050,3	6.643,9
2	3	4,1	9,1	90	30	38	3	4.627,7	6.452,9
3	3	4,1	7,3	30	30	39	4	5.473,5	6.056,9
4	3	4,1	5,2	60	30	40	6	4.321,3	5.358,7
5	3	4,1	9,1	60	150	41	3	5.687,2	6.608,0
6	3	4,1	9,1	30	150	42	3	6.108,3	6.569,0
7	3	4,1	5,2	60	150	43	6	3.981,0	4.865,9
8	3	4,1	5,2	30	150	44	6	5.144,2	5.631,0
9	3	4,1	5,2	90	150	45	6	3.239,7	4.643,4
10	3	4,1	7,3	30	150	46	4	5.648,8	6.081,8
11	3	4,1	9,1	30	30	47	3	5.700,7	6.262,4
12	3	4,1	5,2	90	30	48	6	3.929,9	5.502,0
13	3	4,1	9,1	90	150	49	3	5.224,0	6.733,6
14	3	4,1	7,3	90	30	50	4	4.612,9	6.129,6
15	3	4,1	7,3	60	150	51	4	5.668,7	6.578,9
16	3	4,1	9,1	60	30	52	3	5.447,6	6.431,1
17	3	4,1	5,2	30	30	53	6	5.457,4	6.049,8
18	3	4,1	7,3	60	30	54	4	5.374,9	6.460,9

Tabla B. 8 Resultados Bloque 3 f)

PRO. Nº	Ancho inicial w	Espesor Inicial y	Dif Fuerz. Especifica (F1-F2)/(wy)	Fb (Swift) N	Coef .Roz1 Ec.5.6	Vel.def. relvel. increm Ec. 8.9	Cor.Roz-2 Ec.5.9	Cef.Roz 3 Ec. 8.15
37	7,53	1,50	141,01	296,45	0,14	0,19	0,15	0,16
38	7,53	1,46	165,90	280,85	0,18	0,12	0,18	0,20
39	7,21	1,47	55,02	106,40	0,16	0,50	0,16	0,17
40	8,26	1,44	87,19	219,51	0,16	0,55	0,17	0,18
41	7,56	1,47	82,85	209,34	0,11	0,22	0,11	0,12
42	7,55	1,50	40,70	115,90	0,10	0,41	0,10	0,11
43	7,76	1,46	78,36	210,43	0,15	0,67	0,15	0,16
44	7,84	1,50	41,54	119,60	0,13	0,57	0,13	0,14
45	7,22	1,49	130,48	280,31	0,18	0,38	0,19	0,21
46	7,35	1,48	39,91	109,21	0,11	0,48	0,11	0,12
47	6,99	1,48	52,13	103,84	0,14	0,36	0,15	0,16
48	7,51	1,49	140,45	291,65	0,17	0,57	0,18	0,20
49	7,56	1,47	135,77	285,84	0,13	0,14	0,13	0,15
50	7,19	1,47	143,48	271,74	0,15	0,17	0,15	0,17
51	7,69	1,44	82,21	204,28	0,11	0,26	0,11	0,12
52	7,28	1,48	91,28	204,31	0,13	0,20	0,13	0,14
53	7,62	1,50	51,84	117,00	0,16	0,80	0,16	0,17
54	7,82	1,44	96,46	207,66	0,14	0,23	0,14	0,16

Tabla B. 9 Resultados Bloque 3 g)

PRO. Nº	U1	U2	V1	V2	DRmT Ec. 6.2	Salto de velocidad ecuación 8.13	L10	L20
37	4,50	5,47	4,1	7,1	0,598	0,831	116,953	107,765
38	4,50	5,53	4,1	9	-0,069	0,683	133,758	94,076
39	4,57	5,48	4,05	7,2	-0,268	0,863	110,121	122,498
40	4,21	4,79	4,05	5,15	0,459	0,935	117,694	113,225
41	4,91	6,03	4,05	9	-1,295	0,808	109,881	116,659
42	5,14	6,04	4,1	9	0,817	0,847	108,681	119,667
43	4,07	4,82	4,1	5,1	2,590	0,905	110,676	116,563
44	4,34	4,77	4,1	5,15	2,605	0,954	120,650	111,386
45	4,19	4,80	4,1	5,1	-1,774	0,929	113,544	107,511
46	4,80	5,63	4,1	7,2	-1,774	0,883	120,607	115,760
47	4,98	6,06	4,1	9	-0,644	0,835	103,529	124,788
48	4,21	4,88	4,1	5,1	-0,461	0,931	115,485	104,371
49	4,51	5,73	4,1	9	-2,023	0,719	115,295	105,041
50	4,52	5,34	4,1	7,2	-0,571	0,829	115,190	104,451
51	4,79	5,63	4,05	7,2	0,222	0,885	117,454	110,451
52	4,73	5,88	4,1	9	0,009	0,778	109,091	119,576
53	4,36	4,72	4,1	5,15	-0,414	0,975	104,935	126,716
54	4,59	5,35	4,1	7,2	0,591	0,854	112,760	116,404

Tabla B. 10 Resultados Bloque 3 h)

PRO. Nº	Instante ensayo-t segundos	Ue	Salto de velocidad Ec. 8.11	Vel def rela especi ec 8.9	Rp razón pendiente a la entrada Ec. 8.14
37	3,472	5,411	0,304	0,026	0,304
38	2,778	6,583	0,426	0,017	0,160
39	3,472	5,292	0,230	0,070	0,417
40	4,900	4,505	0,265	0,063	0,361
41	2,778	6,082	0,236	0,027	0,424
42	2,778	6,070	0,190	0,044	0,529
43	4,900	4,490	0,425	0,091	-0,090
44	4,900	4,545	0,199	0,100	0,532
45	4,900	4,514	0,321	0,049	0,225
46	3,472	5,434	0,205	0,065	0,524
47	2,778	5,966	0,200	0,053	0,474
48	4,900	4,524	0,311	0,053	0,267
49	2,778	6,276	0,360	0,020	0,188
50	3,472	5,458	0,302	0,021	0,311
51	3,472	5,414	0,198	0,032	0,541
52	2,778	6,076	0,275	0,028	0,319
53	4,900	4,476	0,108	0,081	0,700
54	3,472	5,373	0,253	0,029	0,385

Curvas características DP600 (GM)

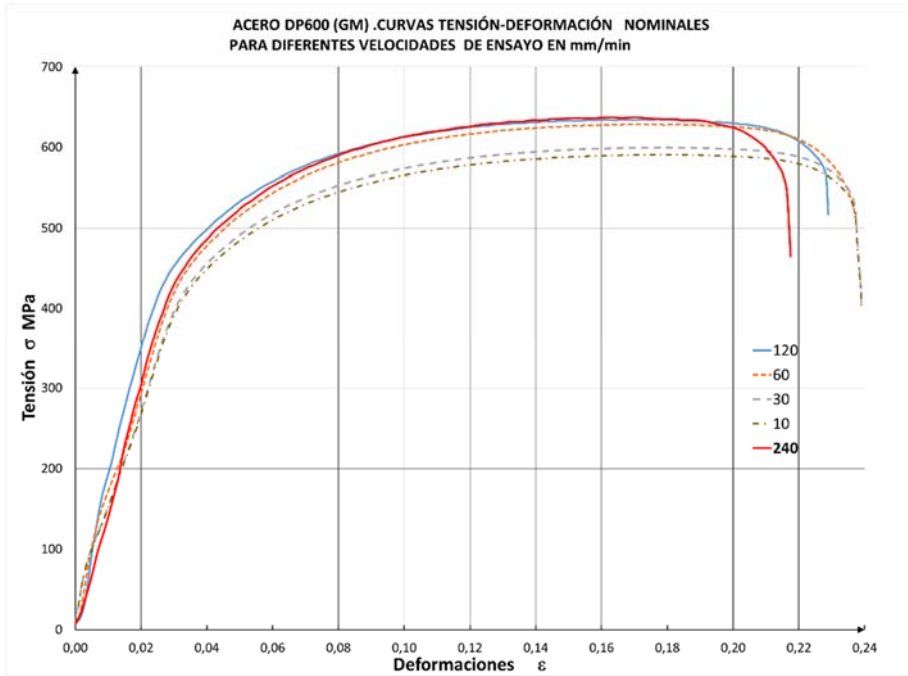


Figura B. 2 Curvas Tensión-Deformación. Nominal. DP600 (GM)

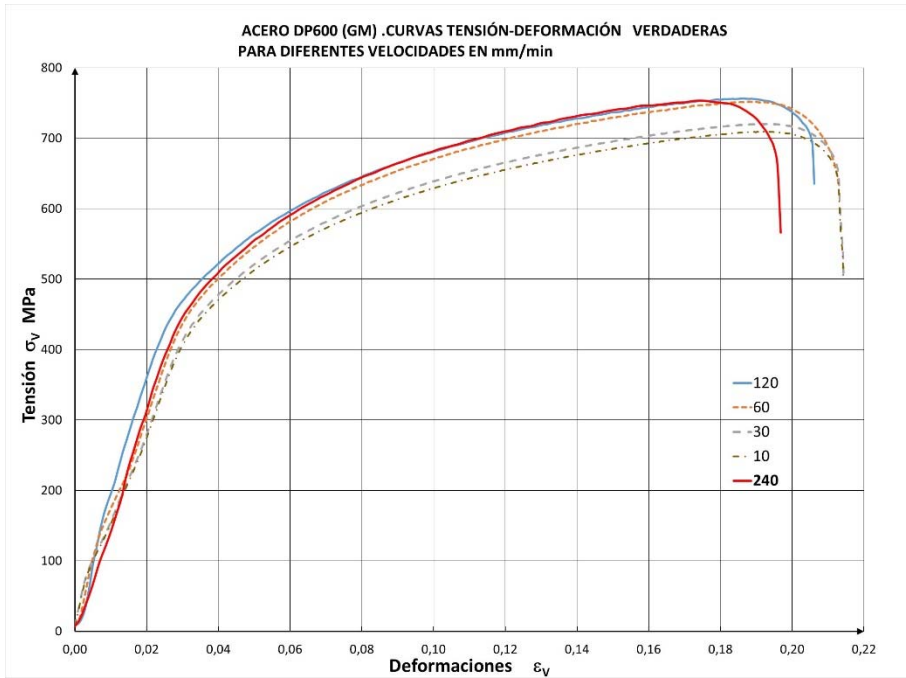


Figura B. 3 Curvas Tensión-Deformación. Verdadero. DP600 (GM)

Resultado del Diseño de Experimentos

SE detallan los resultados obtenidos con Statgraphics del Diseño de Experimentos y ANOVA de las diferentes combinaciones de variables de entrada y de eficiencia estudiadas.

En el diagrama de Pareto las variables que rebasan la línea vertical azul son significativas

Tabla B. 11 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 1. Ec. 5.6

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por LUBRICANTE																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
Lubri- cante	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogé- neos																
150	27	0,124039	0,00240395	X																
30	27	0,152481	0,00240395	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Con- traste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 150</td> <td>*</td> <td>0,0284426</td> <td>0,00683557</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	30 - 150	*	0,0284426	0,00683557								
Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
30 - 150	*	0,0284426	0,00683557																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Rozamiento 1 por Velocidad diferencial																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
Veloci- dad dife- rencial	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogé- neos																
5	18	0,129821	0,00294423	X																
3	18	0,133653	0,00294423	X																
1	18	0,151306	0,00294423	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Con- traste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 - 3</td> <td>*</td> <td>0,0176532</td> <td>0,00837182</td> </tr> <tr> <td>1 - 5</td> <td>*</td> <td>0,0214846</td> <td>0,00837182</td> </tr> <tr> <td>3 - 5</td> <td></td> <td>0,00383134</td> <td>0,00837182</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	1 - 3	*	0,0176532	0,00837182	1 - 5	*	0,0214846	0,00837182	3 - 5		0,00383134	0,00837182
Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
1 - 3	*	0,0176532	0,00837182																	
1 - 5	*	0,0214846	0,00837182																	
3 - 5		0,00383134	0,00837182																	
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 1 por ANGULO																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
An- gulo	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Ho- mogéneos																
60	18	0,127154	0,00294423	X																
30	18	0,135561	0,00294423	X																
90	18	0,152065	0,00294423	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Con- traste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 60</td> <td>*</td> <td>0,00840709</td> <td>0,00837182</td> </tr> <tr> <td>30 - 90</td> <td>*</td> <td>-0,0165033</td> <td>0,00837182</td> </tr> <tr> <td>60 - 90</td> <td>*</td> <td>-0,0249104</td> <td>0,00837182</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	30 - 60	*	0,00840709	0,00837182	30 - 90	*	-0,0165033	0,00837182	60 - 90	*	-0,0249104	0,00837182
Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
30 - 60	*	0,00840709	0,00837182																	
30 - 90	*	-0,0165033	0,00837182																	
60 - 90	*	-0,0249104	0,00837182																	
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos																				
<p style="text-align: center;">Diagrama de Pareto Estandarizada para Diferencia Rug Tansv</p> <p style="text-align: right;">Fuente: Statgraphics</p>																				
$\text{Rozamiento 1} = 0,197958 + 0,000313379 * \text{Angulo} - 0,000222811 * \text{Lubricante} - 0,0104532 * \text{Velocidad diferencial}$																				

El nivel de significancia α correspondiente a la línea vertical en el gráfico. Las barras que se extienden más allá de la línea azul son estadísticamente significativas en el nivel de $\alpha=0,05$

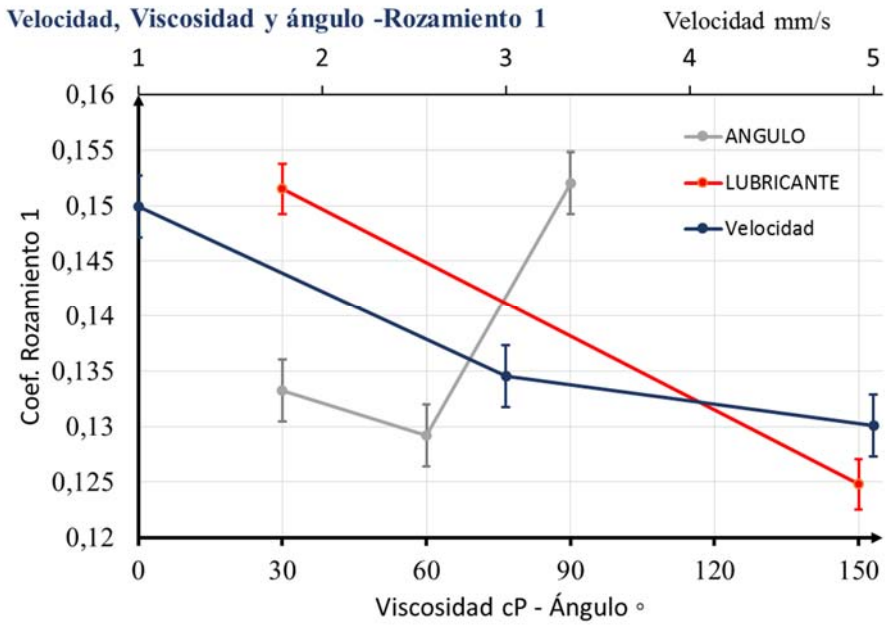


Figura B. 4 Resultados de Rozamiento 1. Ec. 5.6

Tabla B. 12 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 2. Ec. 5.9

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 2 por LUBRICANTE				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
<i>Lubri- cante</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé- neos</i>
150	27	0,12689	0,00248915	X
30	27	0,155772	0,00248915	X
<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	
30 - 150	*	0,0288826	0,00707784	
* indica una diferencia significativa.				
Pruebas de Múltiple Rangos para Rozamiento 2 por Velocidad diferencial				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
<i>Veloci- dad dife- rencial</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé- neos</i>
5	18	0,132424	0,00304858	X
3	18	0,136444	0,00304858	X
1	18	0,155125	0,00304858	X
<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	
1 - 3	*	0,0186806	0,00866855	
1 - 5	*	0,0227011	0,00866855	
3 - 5		0,00402053	0,00866855	
* indica una diferencia significativa.				
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 2 por ANGULO				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
<i>An- gulo</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho- mogéneos</i>
60	18	0,129886	0,00304858	X
30	18	0,136968	0,00304858	X
90	18	0,157139	0,00304858	X
<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	
30 - 60		0,00708244	0,00866855	
30 - 90	*	-0,0201707	0,00866855	
60 - 90	*	-0,0272531	0,00866855	
* indica una diferencia significativa.				
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos				
Diagrama de Pareto Estandarizada para Rozamiento 2				
Fuente: Statgraphics				
$\text{Rozamiento 2} = 0,201201 + 0,000375039 * \text{Angulo} - 0,000226283 * \text{Lubricante} - 0,0110881 * \text{Velocidad diferencial}$				

Velocidad, Viscosidad y ángulo -Rozamiento 2

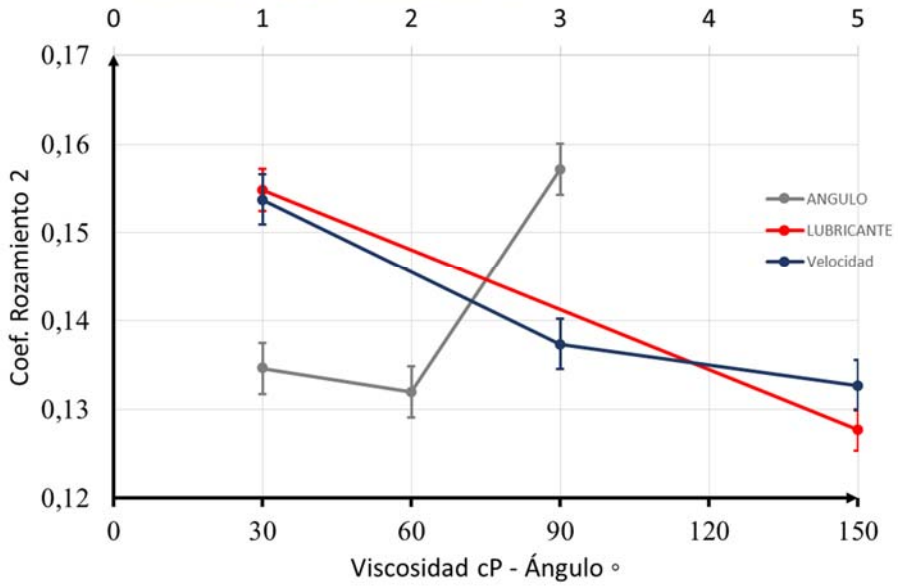


Figura B. 5 Resultados de Rozamiento 2. Ec. 5.9

Tabla B. 13 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 3. Ec. 8.15

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 3 por LUBRICANTE																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Lubricante</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>																
150	27	0,138601	0,00271751	X																
30	27	0,170124	0,00271751	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Con-traste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 150</td> <td>*</td> <td>0,0315224</td> <td>0,00772716</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	30 - 150	*	0,0315224	0,00772716								
<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
30 - 150	*	0,0315224	0,00772716																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Rozamiento 3 por Velocidad diferencial																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Velocidad dife-rencial</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>																
5	18	0,144635	0,00332826	X																
3	18	0,149005	0,00332826	X																
1	18	0,169448	0,00332826	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Con-traste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 - 3</td> <td>*</td> <td>0,0204433</td> <td>0,0094638</td> </tr> <tr> <td>1 - 5</td> <td>*</td> <td>0,0248125</td> <td>0,0094638</td> </tr> <tr> <td>3 - 5</td> <td></td> <td>0,00436923</td> <td>0,0094638</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	1 - 3	*	0,0204433	0,0094638	1 - 5	*	0,0248125	0,0094638	3 - 5		0,00436923	0,0094638
<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
1 - 3	*	0,0204433	0,0094638																	
1 - 5	*	0,0248125	0,0094638																	
3 - 5		0,00436923	0,0094638																	
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 3 por ANGULO																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>An-gulo</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>																
60	18	0,141815	0,00332826	X																
30	18	0,149637	0,00332826	X																
90	18	0,171635	0,00332826	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Con-traste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 60</td> <td></td> <td>0,00782234</td> <td>0,0094638</td> </tr> <tr> <td>30 - 90</td> <td>*</td> <td>-0,021998</td> <td>0,0094638</td> </tr> <tr> <td>60 - 90</td> <td>*</td> <td>-0,0298204</td> <td>0,0094638</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	30 - 60		0,00782234	0,0094638	30 - 90	*	-0,021998	0,0094638	60 - 90	*	-0,0298204	0,0094638
<i>Con-traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
30 - 60		0,00782234	0,0094638																	
30 - 90	*	-0,021998	0,0094638																	
60 - 90	*	-0,0298204	0,0094638																	
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos																				
<p align="center">Diagrama de Pareto Estandarizada para Rozamiento 3</p>																				
<p align="right">Fuente: Statgraphics</p>																				
<p>Rozamiento 3 = 0,219825 + 0,000409078*Angulo - 0,000246946*Lubricante - 0,0121207*Velocidad diferencial</p>																				

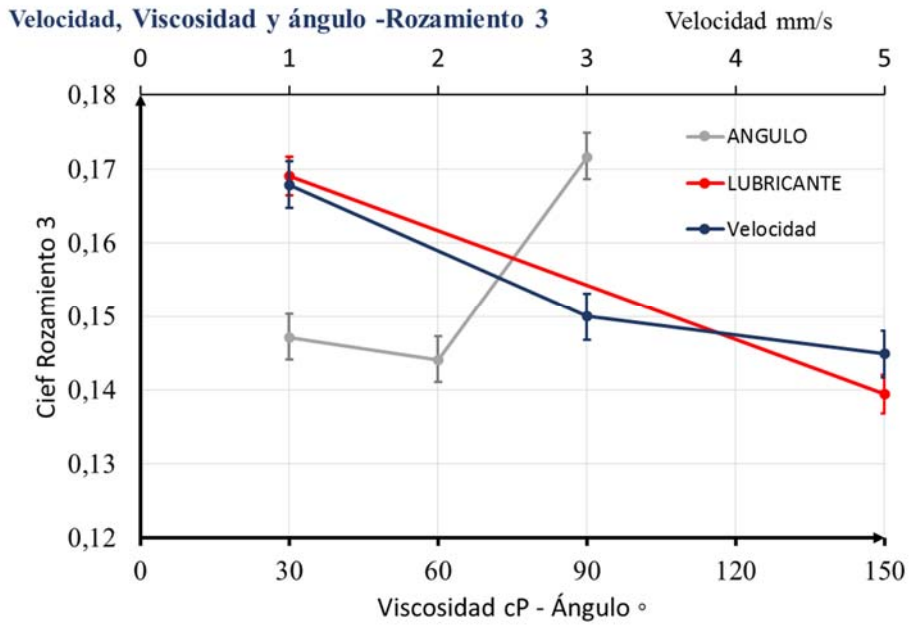


Figura B. 6 Resultados de Rozamiento 3. Ec. 8.15

Figura B. 7 Resultados de Diferencia de Fuerzas Ec. 8.5

Pruebas de Múltiple Rangos para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) por LUBRICANTE																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Lubri- cante</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho- mogéneos</i>																
150	27	96,2249	1,66408	X																
30	27	118,009	1,66408	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Contraste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 150</td> <td>*</td> <td>21,7842</td> <td>4,73177</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	30 - 150	*	21,7842	4,73177								
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
30 - 150	*	21,7842	4,73177																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) por Velocidad diferencial																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Velocidad diferen- cial</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé- neos</i>																
1	18	102,303	2,03808	X																
3	18	107,941	2,03808	XX																
5	18	111,106	2,03808	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Contraste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 - 3</td> <td></td> <td>-5,63839</td> <td>5,79521</td> </tr> <tr> <td>1 - 5</td> <td>*</td> <td>-8,80329</td> <td>5,79521</td> </tr> <tr> <td>3 - 5</td> <td></td> <td>-3,1649</td> <td>5,79521</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	1 - 3		-5,63839	5,79521	1 - 5	*	-8,80329	5,79521	3 - 5		-3,1649	5,79521
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
1 - 3		-5,63839	5,79521																	
1 - 5	*	-8,80329	5,79521																	
3 - 5		-3,1649	5,79521																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) por Angulo																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>An- gulo</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho- mogéneos</i>																
30	18	54,648	2,03808	X																
60	18	96,8758	2,03808	X																
90	18	169,827	2,03808	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Contraste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 60</td> <td>*</td> <td>-42,2277</td> <td>5,79521</td> </tr> <tr> <td>30 - 90</td> <td>*</td> <td>-115,179</td> <td>5,79521</td> </tr> <tr> <td>60 - 90</td> <td>*</td> <td>-72,9513</td> <td>5,79521</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	30 - 60	*	-42,2277	5,79521	30 - 90	*	-115,179	5,79521	60 - 90	*	-72,9513	5,79521
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
30 - 60	*	-42,2277	5,79521																	
30 - 90	*	-115,179	5,79521																	
60 - 90	*	-72,9513	5,79521																	
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos																				
<p style="text-align: center;">Diagrama de Pareto Estandarizada para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5)</p> <p style="text-align: right;"> + - </p>																				
Fuente: Statgraphics																				
<p>Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) = -18,8786 + 1,93151*Angulo - 0,176603*Lubricante + 4,70404*Velocidad diferencial</p>																				

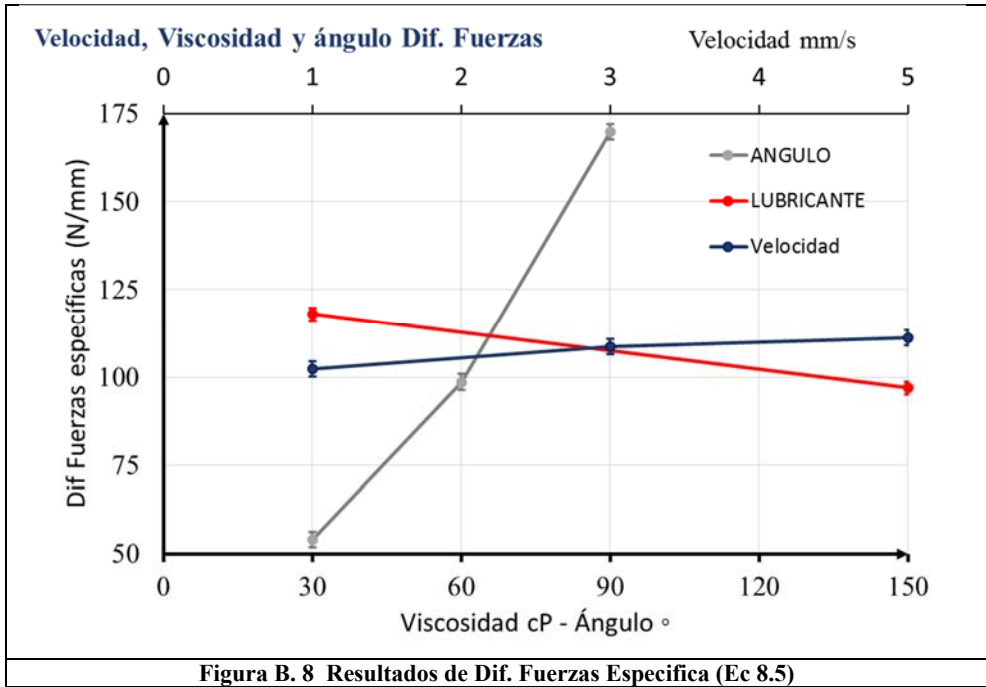
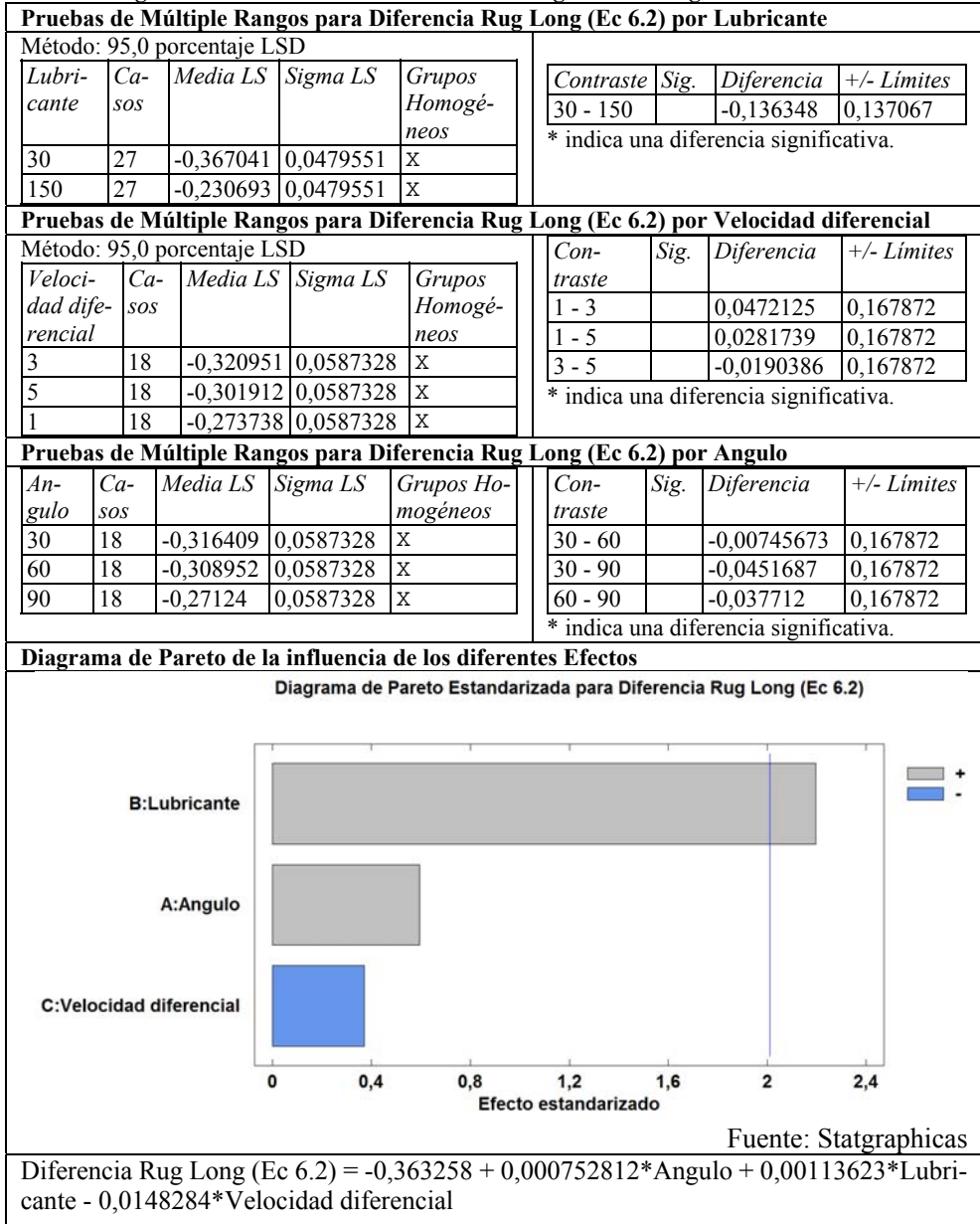
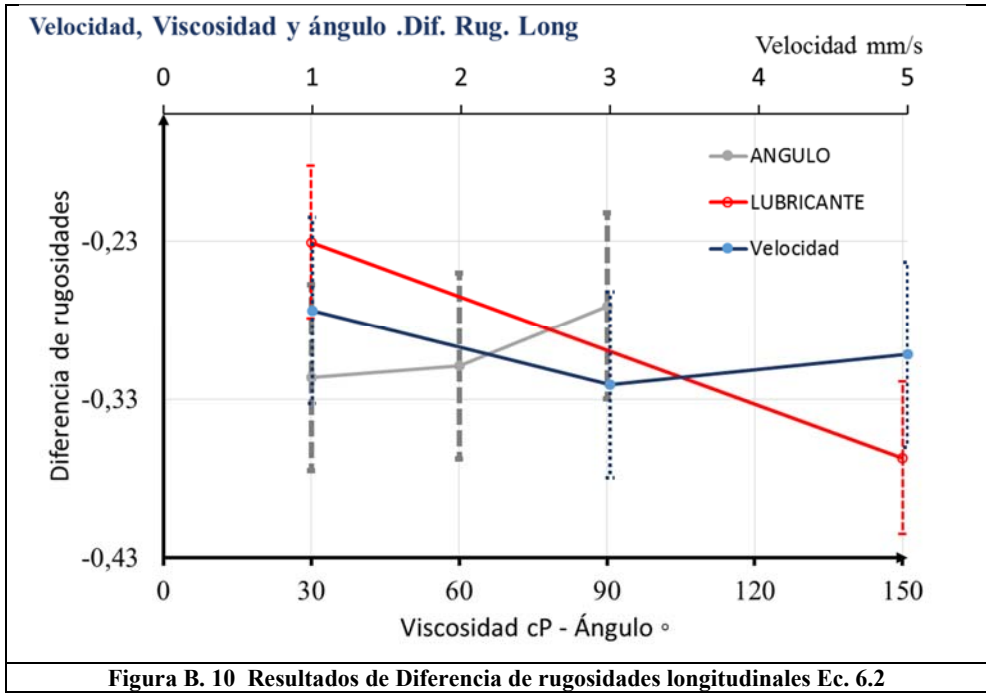


Figura B. 9 Resultados de Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2





Rugosidades:

Tabla B. 14 Rugosidad inicial y Final. Longitudinal y Transversal. Probeta D1

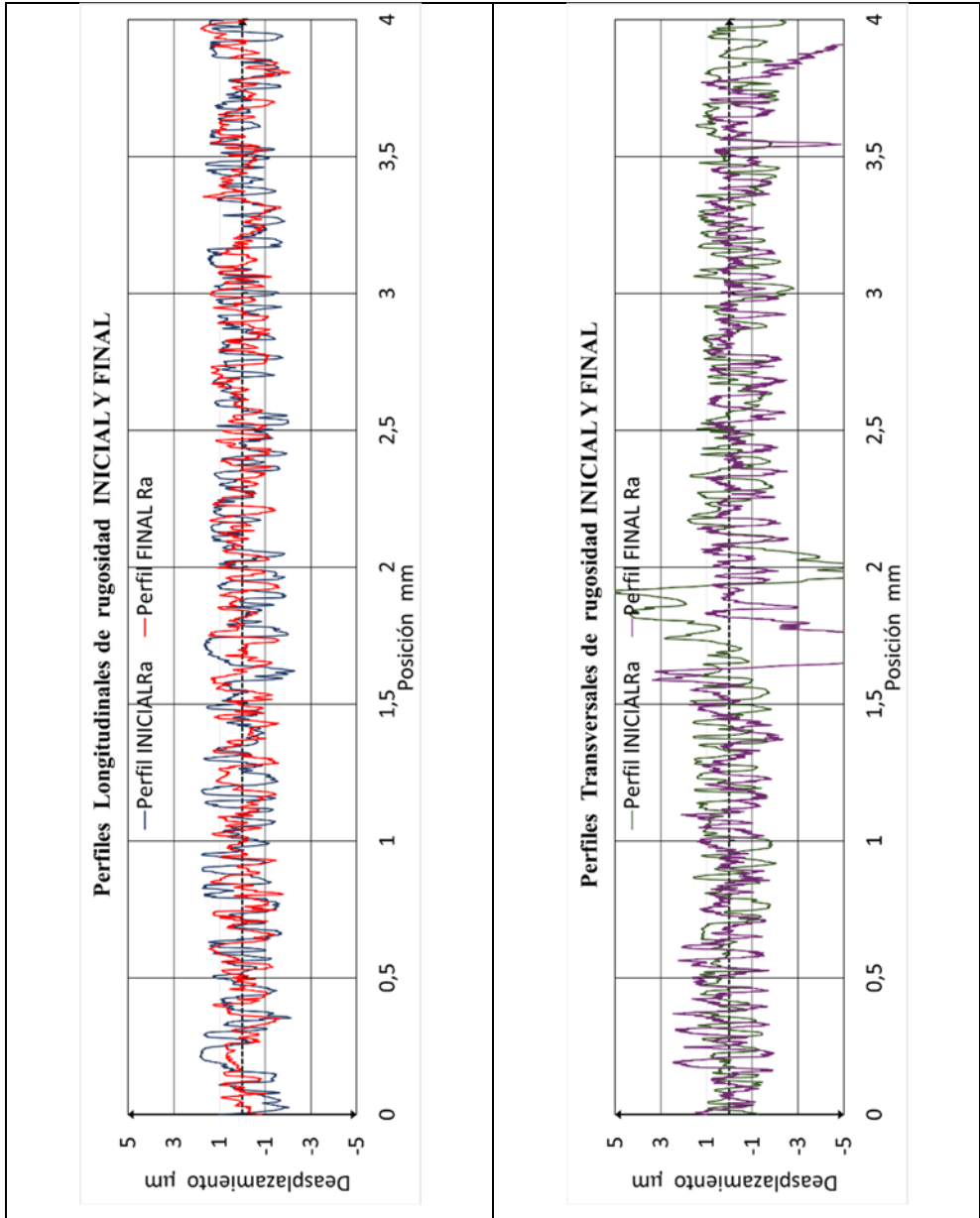


Tabla B. 15 Rugosidades medidas Ra (µm) , Longitudinal y Transversal

PROB.	INICIAL		FINAL		PROB.	INICIAL		FINAL		PROB.	INICIAL		FINAL	
	Ra Long	Ra Trans	Ra Long	Ra Trans		Ra Long	Ra Trans	Ra Long	Ra Trans		Ra Long	Ra Trans	Ra Long	Ra Trans
D55	0,7	1,53	0,657	0,817	D19	0,62	1,63	0,513	0,750	D37	0,58	0,56	0,400	0,870
D56	0,8	1,74	0,583	1,193	D20	0,64	0,93	0,577	1,623	D38	0,86	1,04	0,520	0,937
D3	0,72	0,57	0,397	1,243	D21	0,52	1,42	0,547	0,793	D39	0,73	1,02	0,497	0,877
D4	1,03	1,25	0,927	0,993	D22	0,69	0,64	0,793	1,167	D40	0,56	0,73	0,333	0,983
D5	0,65	0,93	0,470	0,953	D23	0,67	1,29	0,643	0,667	D41	0,59	1,37	0,407	0,753
D6	0,89	1,05	0,783	1,687	D24	0,61	0,63	0,543	1,540	D42	0,6	0,66	0,527	1,070
D7	0,73	0,72	0,363	1,060	D25	0,72	1,27	0,463	1,437	D43	1,13	0,88	1,060	2,210
D8	0,64	0,67	0,453	0,730	D26	0,67	1,11	0,407	0,930	D44	0,6	0,79	0,467	2,087
D57	0,76	0,62	0,473	1,310	D27	0,95	1,15	0,697	1,380	D45	0,89	1,62	0,677	0,743
D10	0,64	0,75	0,457	1,063	D28	0,68	1,24	0,343	0,650	D46	0,74	1,44	0,577	1,640
D11	0,75	1,82	0,397	1,477	D29	0,72	0,93	0,523	1,213	D47	0,6	1,41	0,407	1,077
D12	0,68	1,14	0,553	0,757	D30	0,71	0,75	0,447	0,450	D48	0,66	0,71	0,417	0,500
D13	0,62	0,53	0,493	0,690	D31	0,53	0,55	0,493	1,310	D49	0,56	1,49	0,490	0,457
D14	0,64	0,83	0,530	0,673	D32	0,68	0,58	0,603	0,957	D50	0,61	0,82	0,403	0,627
D15	0,59	0,58	0,340	0,703	D33	0,67	1,25	0,623	0,843	D51	0,62	0,56	0,440	0,700
D16	0,78	1,23	0,550	1,293	D34	1,25	1,35	1,150	1,403	D52	0,61	0,77	0,440	0,797
D17	0,72	1,01	0,557	0,653	D35	0,58	1,17	0,370	1,427	D53	0,66	0,85	0,500	0,717
D18	0,84	1,53	0,737	1,710	D36	0,74	1,59	0,577	0,880	D54	0,78	0,76	0,470	1,077

Tabla B. 16 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento.Lub1

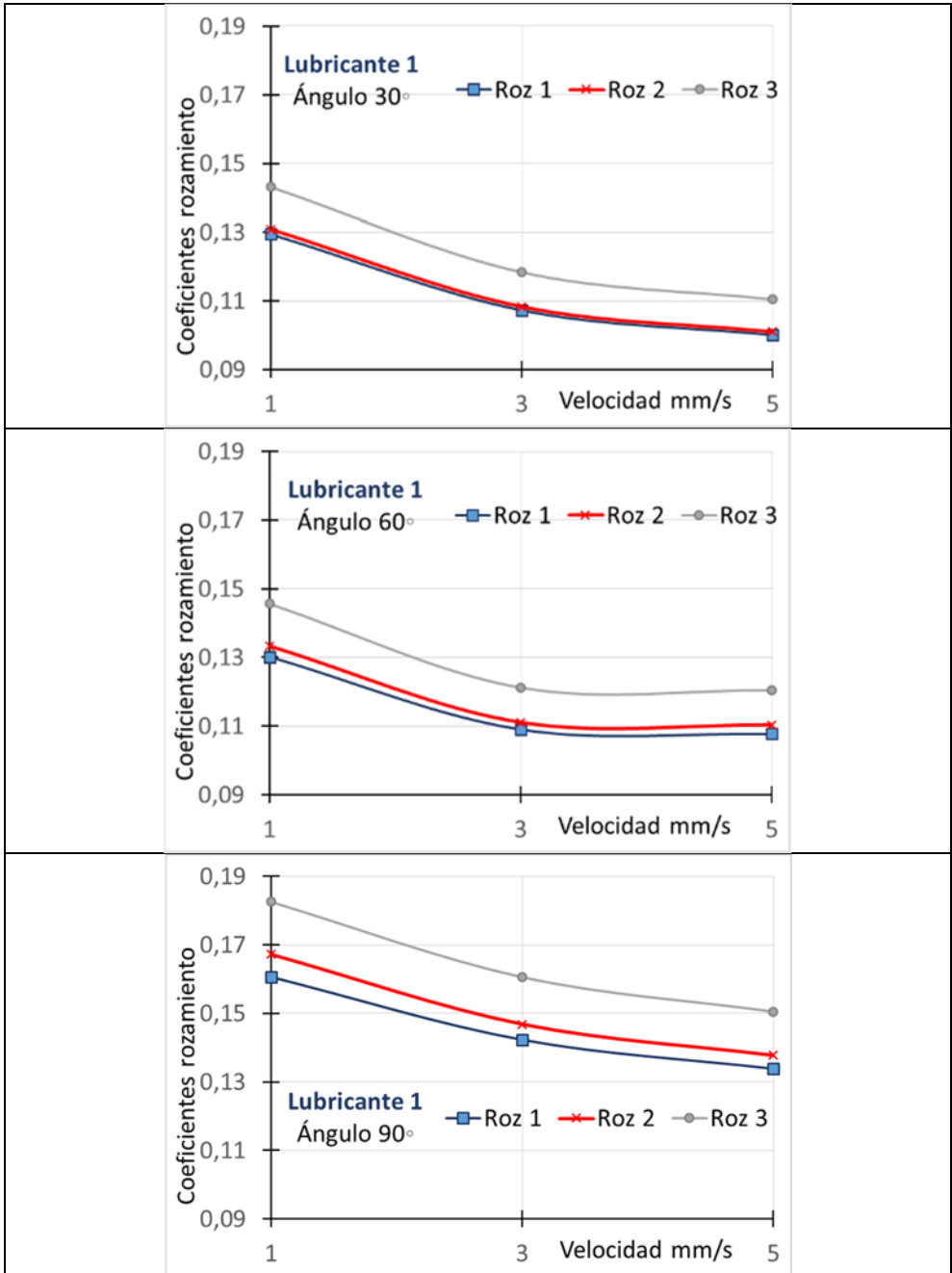
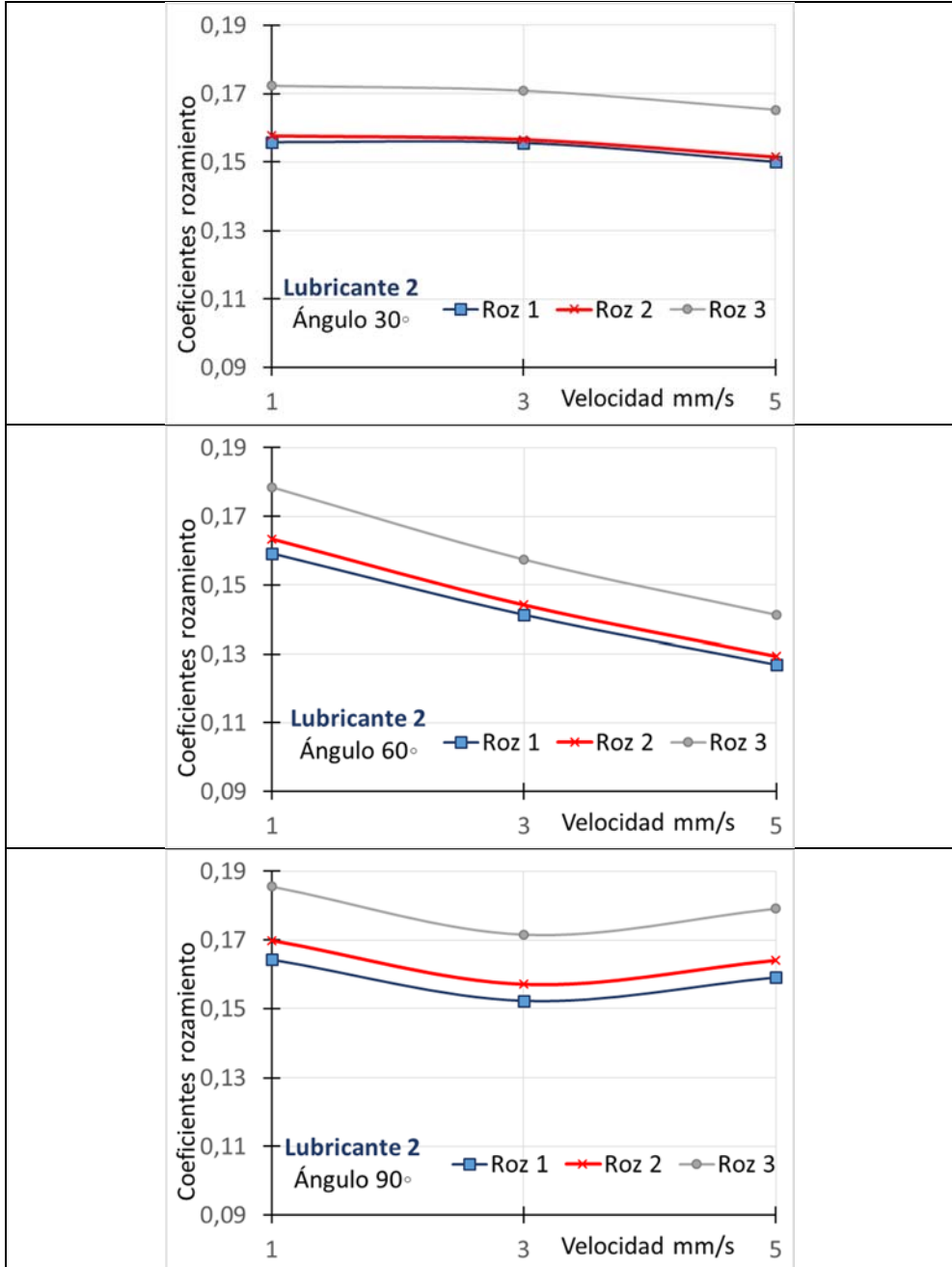


Tabla B. 17 Resumen de las medias de los coeficientes de los Coeficientes de Rozamiento.Lub2



Anexo C. Resultados TWIP (POSCO)

Tabla C. 1 Herramienta de conformado. Rugosidad Longitudinal

Posición	A	A	B	B	C	C
Cuadrante	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq
N1	0,07	0,1	0,08	0,11	0,26	0,26
N2	0,09	0,13	0,08	0,1	0,08	0,08
N3	0,09	0,11	0,08	0,11	0,07	0,07
N4	0,16	0,23	0,13	0,19	0,1	0,1

Promedio Ra= 0,1075 μm , $\sigma_a=0,0584 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,8 \text{ mm x } 5$)

Promedio Rq= 0,1325 μm , $\sigma_a= 0,0606 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm x } 2$)

Las posiciones A (extremo izquierdo). B (centro) y C (extremo derecho) son las zonas de medida.

Tabla C. 2 Herramienta de rodaje Rugosidad Transversal

Posición	A	A	B	B	C	C
Cuadrante	Ra	Rq	Ra	Rq	Ra	Rq
2NT1	0,17	0,24	0,15	0,31	0,19	0,24
2NT2	0,18	0,25	0,17	0,16	0,13	0,18
2NT3	0,18	0,27	0,14	0,2	0,59	0,85
2NT4	0,22	0,32	0,18	0,27	0,22	0,31

Promedio Ra= 0,21 μm , $\sigma_a=0,128 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm x } 2$)

Promedio Rq= 0,3 μm , $\sigma_a= 0,1806 \mu\text{m}$ ($\lambda_c=0,25 \text{ mm x } 2$)

Las posiciones A (extremo izquierdo). B (centro) y C (extremo derecho) son las zonas de medida.

La figura siguiente indica los perfiles de rugosidades Máxima y Mínima de las 12 zonas medidas, en los sentidos longitudinal y transversal.

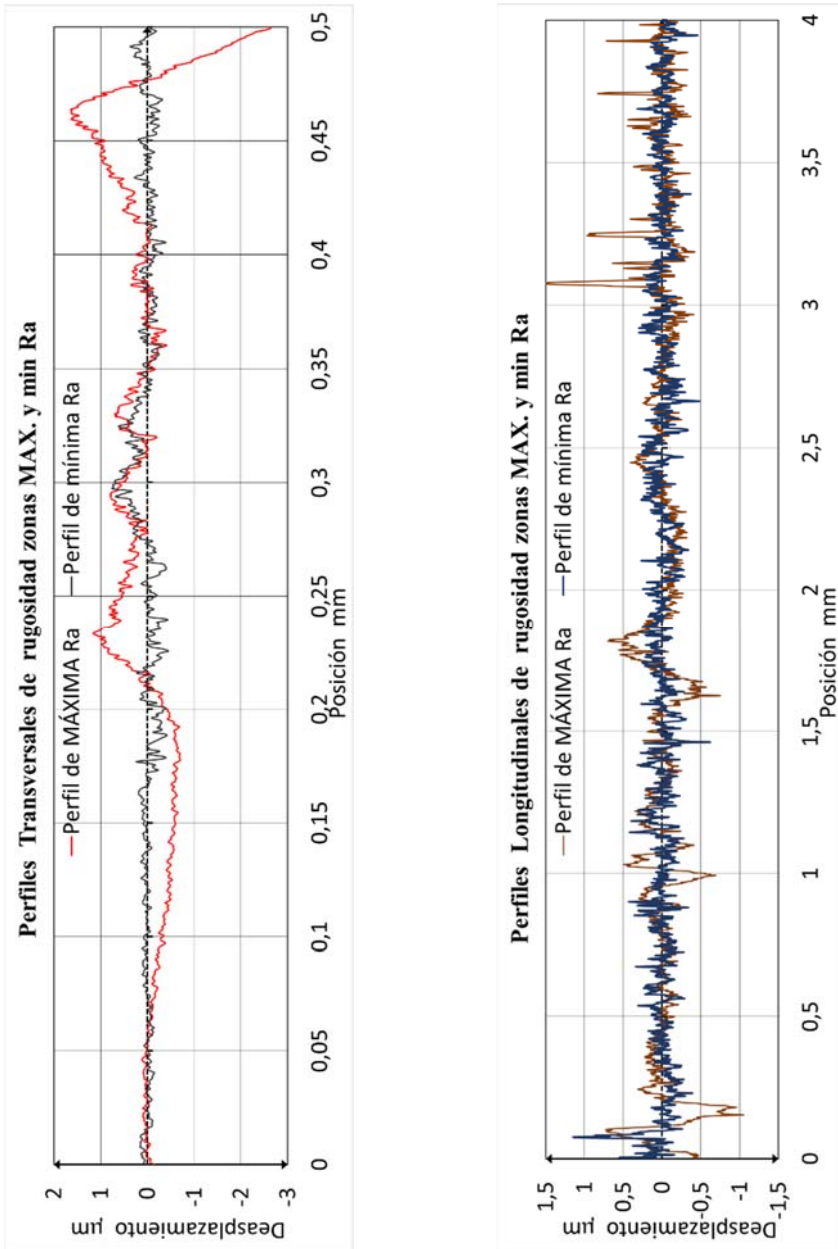


Figura C. 1 Perfil longitudinal y transversal de rugosidad de la herramienta de conformado

Tabla C. 3 Resultados Bloque 1,2 a)

	BLOQUE	ANGULO	Viscos. en cP	PROBETA	Tiempo s	V1 Vel entr. mm/s	V2 Vel salida mm/s	F1 (en 36 mm)	F2 (en 36 mm)	Ancho inicial mm	Espes Inicial mm	Dif Fuerzas/ unidad ancho Ec 8.5	Fb(Swift) N
1	1	90	30	1	10	4,1	5,15	4.101,2	5.662,4	7,407	1,190	154,117	419,6
2	1	30	30	2	6	4,1	7,2	5.871,3	6.448,2	7,442	1,190	62,336	113,0
3	1	60	150	3	7	4,1	7,2	5.929,4	6.722,5	7,709	1,195	69,907	254,2
4	1	30	150	4	9	4,1	5,6	5.410,0	5.884,7	7,550	1,190	47,699	114,6
5	1	60	30	5	7	4,1	7,2	5.575,2	6.559,3	7,538	1,190	97,845	246,5
6	1	30	30	6	9	4,1	5,15	5.011,9	5.568,0	7,241	1,190	61,619	109,9
7	1	60	30	7	10	4,1	5,2	5.144,8	6.107,8	7,107	1,190	102,804	232,4
8	1	60	150	8	4	4,1	9,2	5.653,7	6.448,5	7,791	1,190	69,309	254,8
9	1	90	150	9	5	4,1	9,2	5.616,2	6.975,1	7,613	1,200	120,898	438,5
10	1	60	150	10	10	4,1	5,6	5.932,9	6.769,1	8,058	1,190	71,067	263,5
11	1	90	30	11	5	4,1	9	5.139,0	6.812,7	7,603	1,190	163,487	430,7
12	1	90	150	12	7	4,1	7,2	5.435,5	6.836,9	7,457	1,200	130,340	429,5
13	1	30	150	13	5	4,1	9	6.354,0	6.887,6	7,798	1,200	53,003	120,4
14	1	90	150	14	10	4,1	5,6	4.547,0	5.878,4	7,375	1,175	125,301	407,3
15	1	60	30	15	5	4,1	9	5.935,0	6.907,5	7,758	1,190	92,650	253,7
16	1	30	30	16	5	4,1	9	6.093,8	6.703,0	7,619	1,200	64,516	117,6
17	1	90	30	17	7	4,1	7,2	5.520,9	7.358,8	8,260	1,200	164,896	475,8
18	1	30	150	18	7	4,1	7,2	5.968,7	6.473,7	7,613	1,190	51,161	115,5
1	2	30	150	19	7	4,1	7,2	5.907,4	6.390,3	7,430	1,190	49,821	112,8
2	2	60	30	20	10	4,1	5,6	5.228,2	6.213,8	8,143	1,210	87,220	275,3
3	2	90	30	21	5	4,1	9	5.560,2	7.357,0	8,085	1,210	163,685	473,5
4	2	90	150	36	10	4,1	5,6	4.856,1	6.301,5	7,711	1,210	128,883	451,6
5	2	90	150	23	7	4,1	7,2	5.371,6	6.810,0	8,002	1,190	123,115	453,3
6	2	60	150	24	10	4,1	5,6	5.317,3	6.111,1	7,627	1,210	70,263	257,9
7	2	60	150	25	5	4,1	9	5.812,9	6.658,9	7,348	1,200	81,878	244,4
8	2	60	30	26	5	4,1	9	6.373,8	7.417,4	8,062	1,200	96,191	268,1
9	2	30	150	27	10	4,1	5,6	5.636,0	6.144,1	7,661	1,200	50,899	118,2
10	2	90	30	28	7	4,1	7,2	5.411,4	7.177,2	8,009	1,200	162,887	461,3
11	2	30	30	29	5	4,1	9	6.130,4	6.756,0	7,697	1,190	66,103	116,8
12	2	90	150	30	5	4,1	9	5.659,0	7.056,1	7,536	1,200	127,789	434,1
13	2	30	150	31	5	4,1	9	6.070,4	6.568,2	7,552	1,180	50,997	112,7
14	2	30	30	32	7	4,1	7,2	5.996,7	6.611,3	7,704	1,200	64,350	118,9
15	2	60	30	33	7	4,1	7,2	5.424,8	6.401,6	7,316	1,200	100,272	243,3
16	2	60	150	34	7	4,1	7,2	5.758,0	6.603,6	7,751	1,200	75,832	257,8
17	2	30	30	35	10	4,1	5,6	5.891,9	6.504,7	7,972	1,210	61,180	125,1
18	2	90	30	22	10	4,1	5,6	4.594,6	6.176,7	7,497	1,210	152,474	439,1

Tabla C. 4 Resultados Bloque 1,2 b)

PROBETA	Coef. Roz1	Coef. Roz-2 Ec.5.9	Cef. Roz 3 Ec. 8.15	U1 Velocidad Entrada mm/s	U2 Velocidad Salida mm/s	DRmL Ec. 6.2	DRmT Ec. 6.2	Salto vel. ecua 8.13	L10 mm	L20 mm
1	0,149	0,156	0,168	4,259	4,769	-0,204	0,006	0,953	120,55	97,59
2	0,144	0,145	0,156	4,853	5,763	-0,420	0,224	0,905	120,71	110,42
3	0,081	0,083	0,089	4,962	5,802	-0,600	-0,692	0,926	120,32	110,70
4	0,122	0,123	0,132	4,237	4,946	-0,731	0,006	0,891	129,78	97,59
5	0,116	0,119	0,127	4,617	5,488	-0,414	0,015	0,837	133,78	99,02
6	0,161	0,163	0,175	4,226	4,672	-0,424	0,264	0,952	132,75	98,01
7	0,124	0,127	0,136	4,258	4,618	-0,390	-0,799	0,971	132,05	95,14
8	0,085	0,087	0,094	5,469	6,382	-0,555	-0,390	0,880	120,71	110,42
9	0,093	0,097	0,104	5,657	6,740	-0,700	-0,354	0,918	117,53	105,83
10	0,086	0,088	0,095	4,229	4,917	-0,377	-0,017	0,888	133,78	99,02
11	0,132	0,138	0,148	4,559	5,608	-0,536	0,063	0,735	121,84	98,62
12	0,101	0,105	0,113	4,339	4,967	-0,660	-1,054	0,799	122,92	99,82
13	0,119	0,120	0,129	6,087	6,970	-0,250	-0,167	0,966	129,06	102,22
14	0,113	0,118	0,126	4,270	4,714	-0,545	-2,320	0,886	138,48	86,22
15	0,107	0,109	0,117	5,828	6,688	-0,391	-0,762	0,949	120,82	110,37
16	0,147	0,148	0,159	5,922	6,661	-0,410	-0,611	0,942	129,45	104,35
17	0,135	0,140	0,151	4,347	5,154	-0,723	-0,474	0,799	127,94	96,29
18	0,120	0,121	0,130	5,033	5,830	-0,389	-0,590	0,938	122,92	112,38
19	0,115	0,116	0,125	4,987	5,708	-0,311	0,471	0,927	123,18	109,86
20	0,119	0,122	0,131	4,274	4,815	-0,545	0,738	0,906	133,29	95,68
21	0,130	0,136	0,146	4,322	5,188	-0,597	-0,164	0,682	128,04	96,48
36	0,113	0,119	0,127	4,267	4,839	-0,602	-0,891	0,920	118,11	103,78
23	0,103	0,107	0,115	4,377	4,936	-0,470	0,163	0,812	120,24	103,52
24	0,090	0,092	0,099	4,307	4,959	-0,470	0,163	0,789	131,30	96,90
25	0,092	0,094	0,101	5,715	6,573	-0,709	-0,172	0,926	122,07	108,02
26	0,107	0,110	0,118	5,844	6,844	-0,973	-0,485	0,933	127,44	104,41
27	0,126	0,128	0,137	4,381	4,989	-0,296	0,258	0,930	131,63	100,52
28	0,132	0,137	0,148	5,564	6,773	-0,817	-0,962	0,900	125,70	111,97
29	0,151	0,152	0,164	5,720	6,449	-0,416	0,004	0,925	125,17	110,61
30	0,096	0,100	0,108	5,603	6,826	-0,535	-0,616	0,906	125,70	111,97
31	0,116	0,117	0,126	5,974	6,467	-0,332	-0,867	0,974	120,58	110,80
32	0,150	0,152	0,163	4,993	5,673	-0,358	-0,027	0,931	122,06	112,30
33	0,118	0,121	0,130	4,641	5,604	-0,629	0,011	0,862	122,65	108,24
34	0,091	0,093	0,100	4,405	5,384	-0,525	-1,355	0,821	120,68	108,70
35	0,150	0,152	0,163	4,398	4,853	-0,489	0,182	0,926	132,06	102,12
22	0,135	0,141	0,152	4,227	4,711	-0,498	-0,219	0,897	137,09	85,94

Tabla C. 5 Resultados Bloque 1,2 c)

PROBETA	Instante ensayo-t segundos	Ue mm/s	Salto de velocidad ecuación 8.11	Vel def rel. Espec. ec 8.9	Rp razón pendiente entrada Ec. 8.14
1	6,993	4,471	0,184	0,035	0,550
2	5	5,360	0,163	0,070	0,598
3	5	5,355	0,127	0,033	0,686
4	6,433	4,754	0,345	0,114	0,209
5	5	5,514	0,290	0,034	0,365
6	6,993	4,441	0,215	0,107	0,513
7	13,426	4,386	0,107	0,036	0,667
8	4	6,215	0,146	0,021	0,647
9	4	6,162	0,097	0,017	0,766
10	6,433	4,765	0,357	0,055	0,194
11	4	6,201	0,328	0,017	0,254
12	5	5,433	0,353	0,016	0,179
13	4	6,300	0,043	0,043	0,903
14	6,433	4,818	0,365	0,024	0,238
15	4	6,140	0,064	0,021	0,847
16	4	6,286	0,074	0,036	0,833
17	5	5,438	0,341	0,020	0,241
18	5	5,366	0,107	0,062	0,737
19	5	5,381	0,127	0,056	0,692
20	6,433	4,719	0,278	0,041	0,381
21	4	6,341	0,412	0,014	0,099
36	6,433	4,637	0,231	0,029	0,419
23	5	5,392	0,327	0,014	0,215
24	5	5,458	0,360	0,024	0,211
25	4	6,174	0,094	0,021	0,779
26	4	6,264	0,086	0,025	0,806
27	6,433	4,711	0,236	0,104	0,459
28	4	6,182	0,126	0,020	0,703
29	4	6,187	0,095	0,036	0,776
30	4	6,182	0,118	0,020	0,722
31	4	6,134	0,033	0,024	0,921
32	5	5,360	0,118	0,053	0,709
33	5	5,385	0,240	0,037	0,421
34	5	5,368	0,311	0,038	0,240
35	6,433	4,750	0,235	0,073	0,458
22	6,433	4,714	0,286	0,023	0,402

Tabla C. 6 Resultados Bloque 3 a)

	BLOQUE	ANGULO	Viscos. en cP	PROBETA	Tiempo s	V1 Vel entr. mm/s	V2 Vel salida mm/s	F1 (en 36 mm)	F2 (en 36 mm)	Ancho inicial mm	Espes Inicial mm	Dif Fuerzas/ unidad ancho Ec 8.5	Fb(Swift) N
1	3	90	150	37	7	4,1	7,2	5.416,6	6.836,9	7,818	1,200	124,077	450,3
2	3	90	30	38	5	4,1	9	5.730,6	7.529,4	8,093	1,200	164,667	466,2
3	3	30	30	39	7	4,1	7,2	5.805,3	6.363,7	7,395	1,210	59,822	116,0
4	3	60	30	40	10	4,1	5,6	5.143,5	6.099,5	7,393	1,210	95,506	250,0
5	3	60	150	41	5	4,1	9	5.802,0	6.616,4	7,371	1,195	77,497	243,1
6	3	30	150	42	5	4,1	9	6.125,0	6.600,4	7,255	1,200	50,089	112,0
7	3	60	150	43	10	4,1	5,6	5.452,2	6.335,3	8,025	1,200	76,791	266,9
8	3	30	150	44	10	4,1	5,6	5.451,0	5.927,3	7,433	1,210	48,387	116,6
9	3	90	150	45	10	4,1	5,6	4.860,5	6.272,2	7,608	1,210	127,003	445,6
10	3	30	150	46	7	4,1	7,2	6.300,8	6.838,8	7,890	1,200	52,746	121,8
11	3	30	30	47	5	4,1	9	5.931,0	6.526,9	7,297	1,210	65,974	114,5
12	3	90	30	48	10	4,1	5,6	5.052,4	6.885,3	8,430	1,200	159,828	485,6
13	3	90	150	49	5	4,1	9	5.721,3	7.236,8	7,906	1,190	135,047	447,8
14	3	90	30	50	7	4,1	7,2	4.955,3	6.578,9	7,339	1,200	163,631	422,7
15	3	60	150	51	7	4,1	7,2	5.641,7	6.512,4	7,368	1,210	84,363	249,1
16	3	60	30	52	5	4,1	9	5.901,4	6.903,4	7,319	1,200	103,647	243,4
17	3	30	30	53	10	4,1	5,6	5.907,2	6.547,2	8,237	1,200	62,273	127,1
18	3	60	30	54	7	4,1	7,2	5.730,0	6.696,9	7,545	1,210	94,329	255,1

Tabla C. 7 Resultados Bloque 3 b)

PROBETA	Coef.Roz1	Coef.Roz-2 Ec.5.9	Cef.Roz 3 Ec. 8.15	U1 Velocidad Entrada mm/s	U2 Velocidad Salida mm/s	DRmL Ec. 6.2	DRmT Ec. 6.2	Salto vel. ecua 8.13	L10 mm	L20 mm
37	0,101	0,105	0,113	4,349	4,976	-0,602	-0,891	0,796	124,63	97,23
38	0,128	0,133	0,143	4,519	5,558	-0,470	0,163	0,712	122,31	97,89
39	0,139	0,140	0,151	4,831	5,739	-0,562	-0,901	0,899	122,93	110,35
40	0,120	0,123	0,132	4,231	4,721	-0,573	-0,388	0,896	134,29	96,39
41	0,088	0,090	0,096	5,711	6,488	-0,408	-0,214	0,950	115,87	112,26
42	0,109	0,110	0,118	5,644	6,417	-0,307	-0,533	0,977	107,83	139,95
43	0,100	0,102	0,110	4,284	4,699	-0,390	0,451	0,901	130,56	98,70
44	0,121	0,122	0,131	4,328	4,891	-1,028	-0,299	0,915	126,70	83,75
45	0,111	0,115	0,124	4,251	4,827	-0,520	0,241	0,879	139,08	80,64
46	0,121	0,122	0,131	5,723	6,531	-0,449	0,120	0,991	107,83	139,95
47	0,148	0,149	0,160	6,210	6,822	-0,460	-0,408	1,009	121,60	109,73
48	0,144	0,150	0,162	4,456	4,846	-0,602	-0,244	0,939	132,53	85,48
49	0,105	0,109	0,117	4,829	5,628	-0,593	-0,906	0,772	121,41	97,78
50	0,133	0,138	0,149	4,253	5,071	-0,634	-0,045	0,789	123,02	98,12
51	0,098	0,100	0,107	5,228	5,879	-0,615	0,065	0,954	129,61	100,19
52	0,113	0,115	0,124	5,724	6,685	-0,434	-0,180	0,944	119,04	110,48
53	0,157	0,159	0,171	4,381	4,813	-0,446	0,981	0,924	130,48	103,54
54	0,108	0,112	0,120	4,973	5,737	-0,583	-0,517	0,919	123,74	104,55

Tabla C. 8 Resultados Bloque 3 c)

	Instante ensayo-t segundos	Ue mm/s	Salto de velocidad ecuación 8.11	Vel def rel. Espec. ec 8.9	Rp razón pendiente entrada Ec. 8.14
37	5	5,460	0,359	0,016	0,183
38	4	6,345	0,358	0,016	0,187
39	5	5,376	0,176	0,070	0,573
40	6,433	4,721	0,306	0,037	0,320
41	4	6,012	0,060	0,019	0,850
42	4	5,775	0,027	0,038	0,921
43	6,433	4,754	0,313	0,033	0,281
44	6,433	4,732	0,252	0,084	0,448
45	6,433	4,837	0,391	0,031	0,204
46	4	5,775	0,011	0,040	0,969
47	4	6,154	0,095	0,030	1,027
48	6,433	4,748	0,182	0,019	0,610
49	4	6,255	0,291	0,013	0,338
50	5	5,390	0,355	0,020	0,182
51	5	5,479	0,081	0,025	0,818
52	4	6,065	0,068	0,023	0,835
53	6,433	4,741	0,240	0,069	0,439
54	5	5,413	0,142	0,030	0,665

Curvas características TWIP (GM)

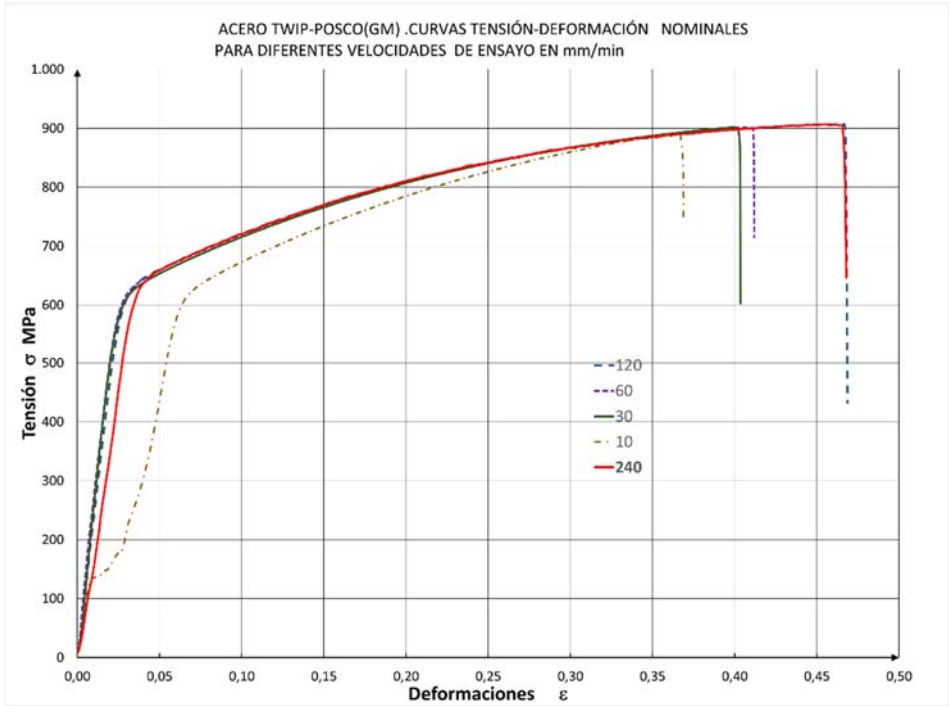


Figura C. 2 Curvas Tensión-Deformación. Nominal. TWIP (GM)

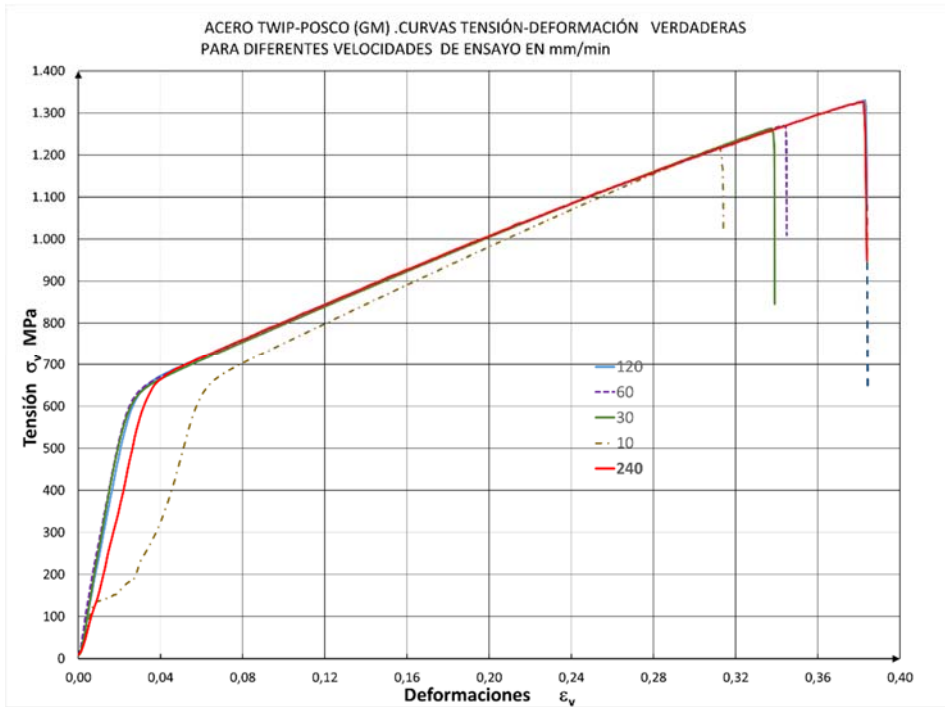


Figura C. 3 Curvas Tensión-Deformación. Verdadero. TWIP (GM)

Resultado del Diseño de Experimentos

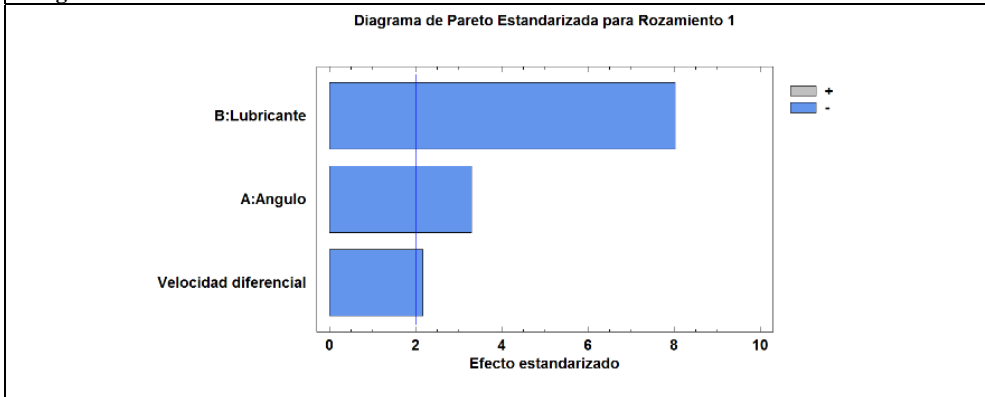
SE detallan los resultados obtenidos con StatGraphics del Diseño de Experimentos y ANOVA de las diferentes combinaciones de variables de entrada y de eficiencia estudiadas.

En el diagrama de Pareto las variables que rebasan la línea vertical azul son significativas

Tabla B. 9 Resultados LSD . Pareto y ANOVA experimento. Rozamiento 1. Ec. 5.6

Análisis de Varianza del Experimento para Rozamiento 1					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Angulo	0,00191344	1	0,00191344	10,89	0,0018
B:Lubricante	0,0112996	1	0,0112996	64,33	0,0000
C:Velocidad diferencial	0,000825723	1	0,000825723	4,70	0,0351
bloques	0,00000133819	2	6,69096E-7	0,00	0,9962
Error total	0,00843159	48	0,000175658		
Total (corr.)	0,0224716	53			

Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos



Fuente: Statgraphics

$$\text{Rozamiento 1} = 0,162208 - 0,000243016 * \text{Angulo} - 0,000241092 * \text{Lubricante} - 0,00239462 * \text{Velocidad diferencial}$$

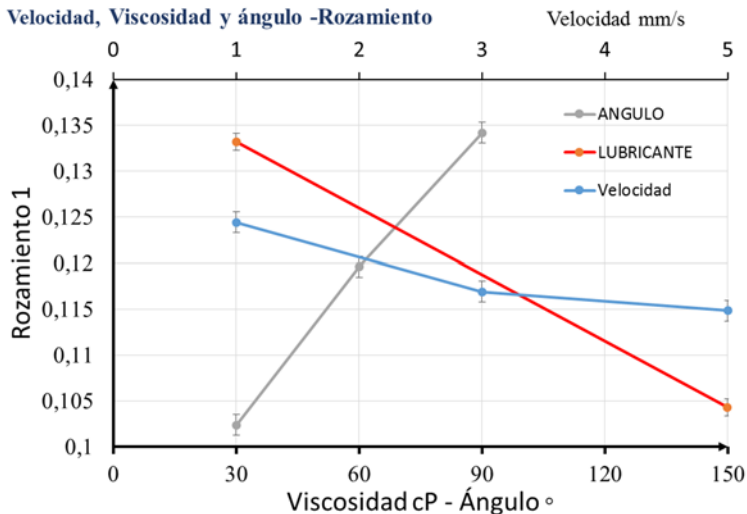


Figura C. 4 Resultados de Rozamiento 1. Ec. 5.6

Tabla C. 10 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 2. Ec. 5.9

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 2 por LUBRICANTE																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Lubri- cante</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé- neos</i>																
150	27	0,106755	0,000911702	X																
30	27	0,136624	0,000911702	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Con- traste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 150</td> <td>*</td> <td>0,0298691</td> <td>0,00260586</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	30 - 150	*	0,0298691	0,00260586								
<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
30 - 150	*	0,0298691	0,00260586																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Rozamiento 2 por Velocidad diferencial																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Velocidad diferen- cial</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé- neos</i>																
5	18	0,117503	0,0011166	X																
3	18	0,119792	0,0011166	X																
1	18	0,127774	0,0011166	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Con- traste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 - 3</td> <td>*</td> <td>0,00798155</td> <td>0,00319152</td> </tr> <tr> <td>1 - 5</td> <td>*</td> <td>0,010271</td> <td>0,00319152</td> </tr> <tr> <td>3 - 5</td> <td></td> <td>0,00228944</td> <td>0,00319152</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	1 - 3	*	0,00798155	0,00319152	1 - 5	*	0,010271	0,00319152	3 - 5		0,00228944	0,00319152
<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
1 - 3	*	0,00798155	0,00319152																	
1 - 5	*	0,010271	0,00319152																	
3 - 5		0,00228944	0,00319152																	
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 2 por ANGULO																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>An- gulo</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho- mogéneos</i>																
60	18	0,104756	0,0011166	X																
90	18	0,124743	0,0011166	X																
30	18	0,13557	0,0011166	X																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Con- traste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 60</td> <td>*</td> <td>0,0308138</td> <td>0,00319152</td> </tr> <tr> <td>30 - 90</td> <td>*</td> <td>0,0108268</td> <td>0,00319152</td> </tr> <tr> <td>60 - 90</td> <td>*</td> <td>-0,019987</td> <td>0,00319152</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	30 - 60	*	0,0308138	0,00319152	30 - 90	*	0,0108268	0,00319152	60 - 90	*	-0,019987	0,00319152
<i>Con- traste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
30 - 60	*	0,0308138	0,00319152																	
30 - 90	*	0,0108268	0,00319152																	
60 - 90	*	-0,019987	0,00319152																	
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos																				
<p style="text-align: center;">Diagrama de Pareto Estandarizada para Rozamiento 2</p>																				
Fuente:																				
Statgraphics																				
Rozamiento 2 = 0,162621 - 0,000180446*Angulo - 0,000248909*Lubricante - 0,00256775*Velocidad diferencial																				

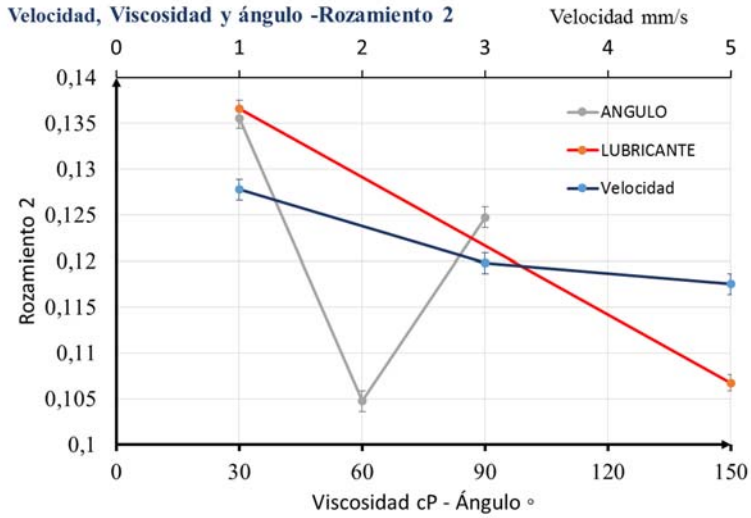


Figura C. 5 Resultados de Rozamiento 2. Ec. 5.9

Tabla C. 11 Resultados LSD. Pareto y Medias. Rozamiento 3. Ec. 8.15

Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 3 por LUBRICANTE																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
Lubri- cante	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogé- neos																
150	27	0,114742	0,000976248	x																
30	27	0,14687	0,000976248	x																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Con- traste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 150</td> <td>*</td> <td>0,0321275</td> <td>0,00279035</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	30 - 150	*	0,0321275	0,00279035								
Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
30 - 150	*	0,0321275	0,00279035																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Rozamiento 3 por Velocidad diferencial																				
Pruebas de Múltiple Rangos para ROZAMIENTO 3 por ANGULO																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
An- gulo	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Ho- mogéneos																
60	18	0,11261	0,00119565	x																
90	18	0,134088	0,00119565	x																
30	18	0,14572	0,00119565	x																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Con- traste</th> <th>Sig.</th> <th>Diferencia</th> <th>+/- Límites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 60</td> <td>*</td> <td>0,0331101</td> <td>0,00341747</td> </tr> <tr> <td>30 - 90</td> <td>*</td> <td>0,0116319</td> <td>0,00341747</td> </tr> <tr> <td>60 - 90</td> <td>*</td> <td>-0,0214782</td> <td>0,00341747</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	30 - 60	*	0,0331101	0,00341747	30 - 90	*	0,0116319	0,00341747	60 - 90	*	-0,0214782	0,00341747
Con- traste	Sig.	Diferencia	+/- Límites																	
30 - 60	*	0,0331101	0,00341747																	
30 - 90	*	0,0116319	0,00341747																	
60 - 90	*	-0,0214782	0,00341747																	
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos																				
<p align="center">Diagrama de Pareto Estandarizada para Rozamiento 3</p>																				
Fuente: Statgraphics																				
$\text{Rozamiento 3} = 0,174831 - 0,000193865 * \text{Angulo} - 0,000267729 * \text{Lubricante} - 0,00276575 * \text{Velocidad diferencial}$																				

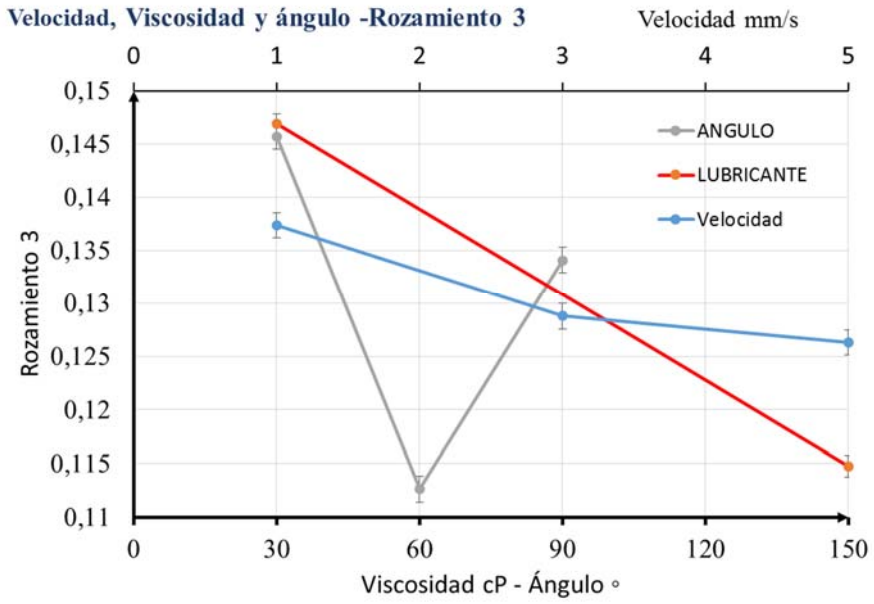


Figura C. 6 Resultados de Rozamiento 3. Ec. 8.15

Figura C. 7 Resultados de Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ec 8.4

Método: 95,0 porcentaje LSD					Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Lubri- cante	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Ho- mogéneos	30 - 150	*	18,811	2,77259
150	27	70,3431	0,975073	X	* indica una diferencia significativa.			
30	27	89,1542	0,975073	X				

Método: 95,0 porcentaje LSD					Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Velocidad diferen- cial	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogé- neos	1 - 3		-2,31455	3,39572
1	18	77,93	1,19422	X	1 - 5		-3,14151	3,39572
3	18	80,2445	1,19422	X	3 - 5		-0,826964	3,39572
5	18	81,0715	1,19422	X	* indica una diferencia significativa.			

Método: 95,0 porcentaje LSD					Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
An- gulo	Ca- sos	Media LS	Sigma LS	Grupos Ho- mogéneos	30 - 60	*	-24,2278	3,39572
30	18	47,4419	1,19422	X	30 - 90	*	-72,6925	3,39572
60	18	71,6697	1,19422	X	60 - 90	*	-48,4647	3,39572
90	18	120,134	1,19422	X	* indica una diferencia significativa.			

Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos

Fuente: Statgraphics

Diferencia Tensiones (Ec.8.4) = 18,8083 + 1,21154*Angulo - 0,156759*Lubricante + 0,785378*Velocidad diferencial

Fuente_ : Cálculo con StatGraphics Centurión XVI

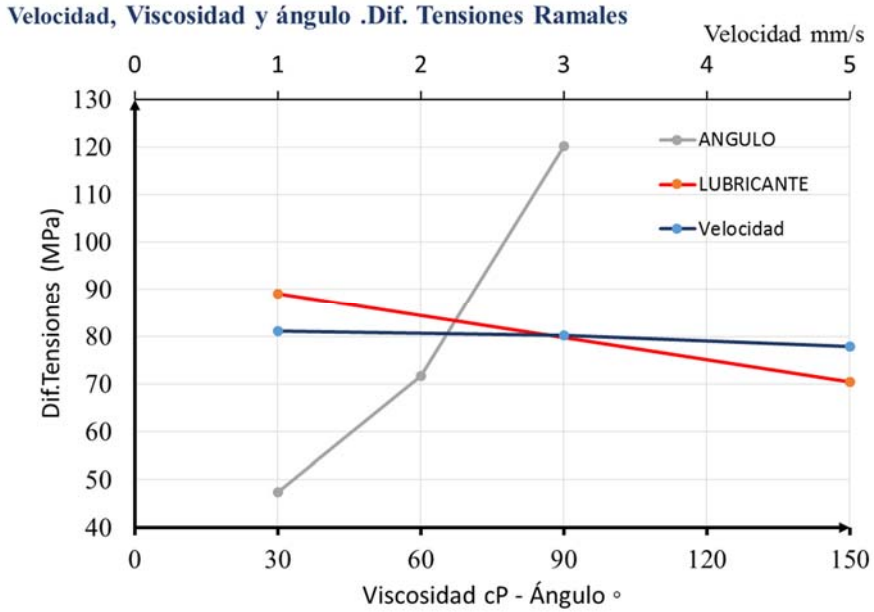


Figura C. 8 Resultados de Diferencia de tensiones entre los dos ramales. Ec 8.4

Figura C. 9 Resultados de Diferencia de Fuerzas Ec. 8.5

Pruebas de Múltiple Rangos para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) por LUBRICANTE																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Lubri- cante</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho- mogéneos</i>																
150	27	84,2283	1,16724	x																
30	27	106,975	1,16724	x																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Contraste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 150</td> <td>*</td> <td>22,7462</td> <td>3,31902</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	30 - 150	*	22,7462	3,31902								
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
30 - 150	*	22,7462	3,31902																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) por Velocidad diferencial																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>Velocidad diferen- cial</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogé- neos</i>																
1	18	93,5176	1,42957	x																
3	18	96,2073	1,42957	x																
5	18	97,0793	1,42957	x																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Contraste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 - 3</td> <td></td> <td>-2,68963</td> <td>4,06495</td> </tr> <tr> <td>1 - 5</td> <td></td> <td>-3,5617</td> <td>4,06495</td> </tr> <tr> <td>3 - 5</td> <td></td> <td>-0,872065</td> <td>4,06495</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	1 - 3		-2,68963	4,06495	1 - 5		-3,5617	4,06495	3 - 5		-0,872065	4,06495
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
1 - 3		-2,68963	4,06495																	
1 - 5		-3,5617	4,06495																	
3 - 5		-0,872065	4,06495																	
Pruebas de Múltiple Rangos para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) por Angulo																				
Método: 95,0 porcentaje LSD																				
<i>An- gulo</i>	<i>Ca- sos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Ho- mogéneos</i>																
30	18	56,8321	1,42957	x																
60	18	85,9651	1,42957	x																
90	18	144,007	1,42957	x																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Contraste</i></th> <th><i>Sig.</i></th> <th><i>Diferencia</i></th> <th><i>+/- Límites</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 - 60</td> <td>*</td> <td>-29,133</td> <td>4,06495</td> </tr> <tr> <td>30 - 90</td> <td>*</td> <td>-87,1749</td> <td>4,06495</td> </tr> <tr> <td>60 - 90</td> <td>*</td> <td>-58,0419</td> <td>4,06495</td> </tr> </tbody> </table> <p>* indica una diferencia significativa.</p>					<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>	30 - 60	*	-29,133	4,06495	30 - 90	*	-87,1749	4,06495	60 - 90	*	-58,0419	4,06495
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>																	
30 - 60	*	-29,133	4,06495																	
30 - 90	*	-87,1749	4,06495																	
60 - 90	*	-58,0419	4,06495																	
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos																				
<p align="center">Diagrama de Pareto Estandarizada para Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5)</p>																				
<p align="right">Fuente: Statgraphics</p>																				
<p>Dif Fuerzas Especifica (Ec 8.5) = 22,8149 + 1,45291*Angulo - 0,189552*Lubricante + 0,890424*Velocidad diferencial</p>																				
<p align="right">Fuente_: Cálculo con StatGraphics Centurión XVI</p>																				

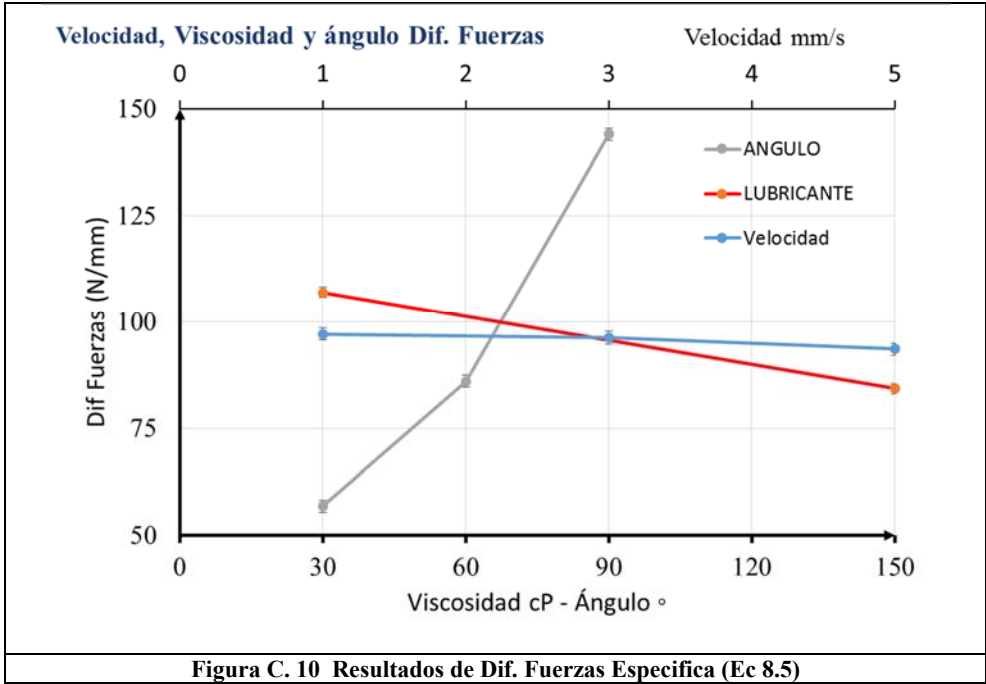


Figura C. 11 Resultados de Diferencia de rugosidades longitudinales Ec. 6.2

Pruebas de Múltiple Rangos para Diferencia Rug Long (Ec 6.2) por Lubricante													
Pruebas de Múltiple Rangos para Diferencia Rug Long (Ec 6.2) por Velocidad diferencial													
Pruebas de Múltiple Rangos para Diferencia Rug Long (Ec 6.2) por Angulo													
Diagrama de Pareto de la influencia de los diferentes Efectos													
<p style="text-align: center;">Diagrama de Pareto Estandarizada para Diferencia Rug Long (Ec 6.2)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>Datos del Diagrama de Pareto Estandarizado</caption> <thead> <tr> <th>Efecto</th> <th>Valor Estandarizado</th> <th>Signo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B:Lubricante</td> <td>~2,2</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>A:Angulo</td> <td>~0,6</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>C:Velocidad diferencial</td> <td>~0,4</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">Fuente: Statgraphics</p>		Efecto	Valor Estandarizado	Signo	B:Lubricante	~2,2	+	A:Angulo	~0,6	+	C:Velocidad diferencial	~0,4	-
Efecto	Valor Estandarizado	Signo											
B:Lubricante	~2,2	+											
A:Angulo	~0,6	+											
C:Velocidad diferencial	~0,4	-											
$\text{Diferencia Rug Long (Ec 6.2)} = -0,425166 + 0,000752812 \cdot \text{Angulo} + 0,00113623 \cdot \text{Lubricante} - 0,00704348 \cdot \text{Velocidad diferencial}$													

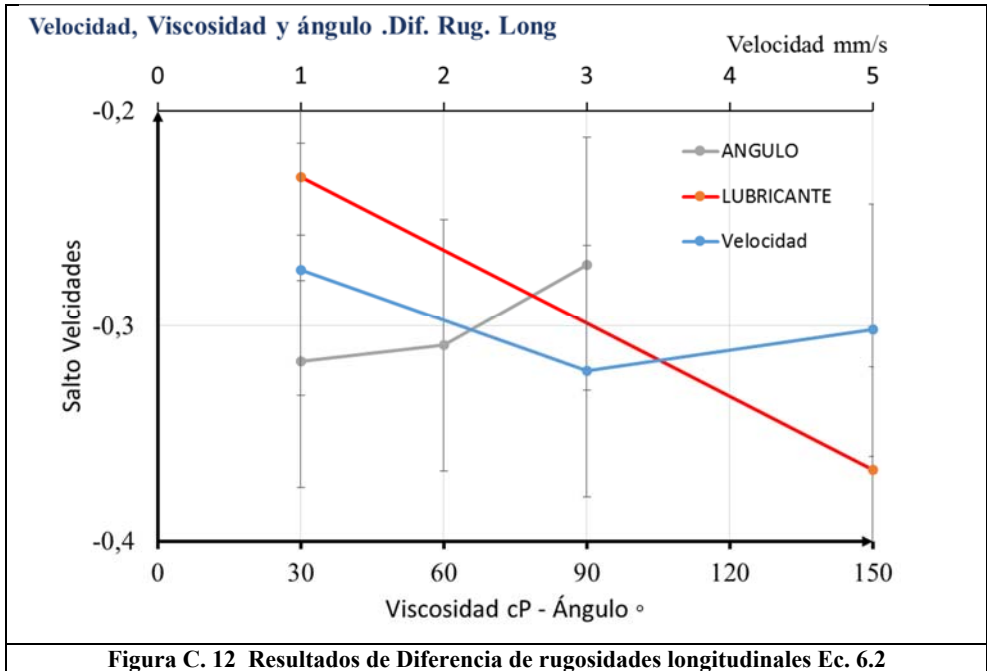


Tabla C. 12 Rugosidad inicial y Final. Longitudinal y Transversal. Probeta T1

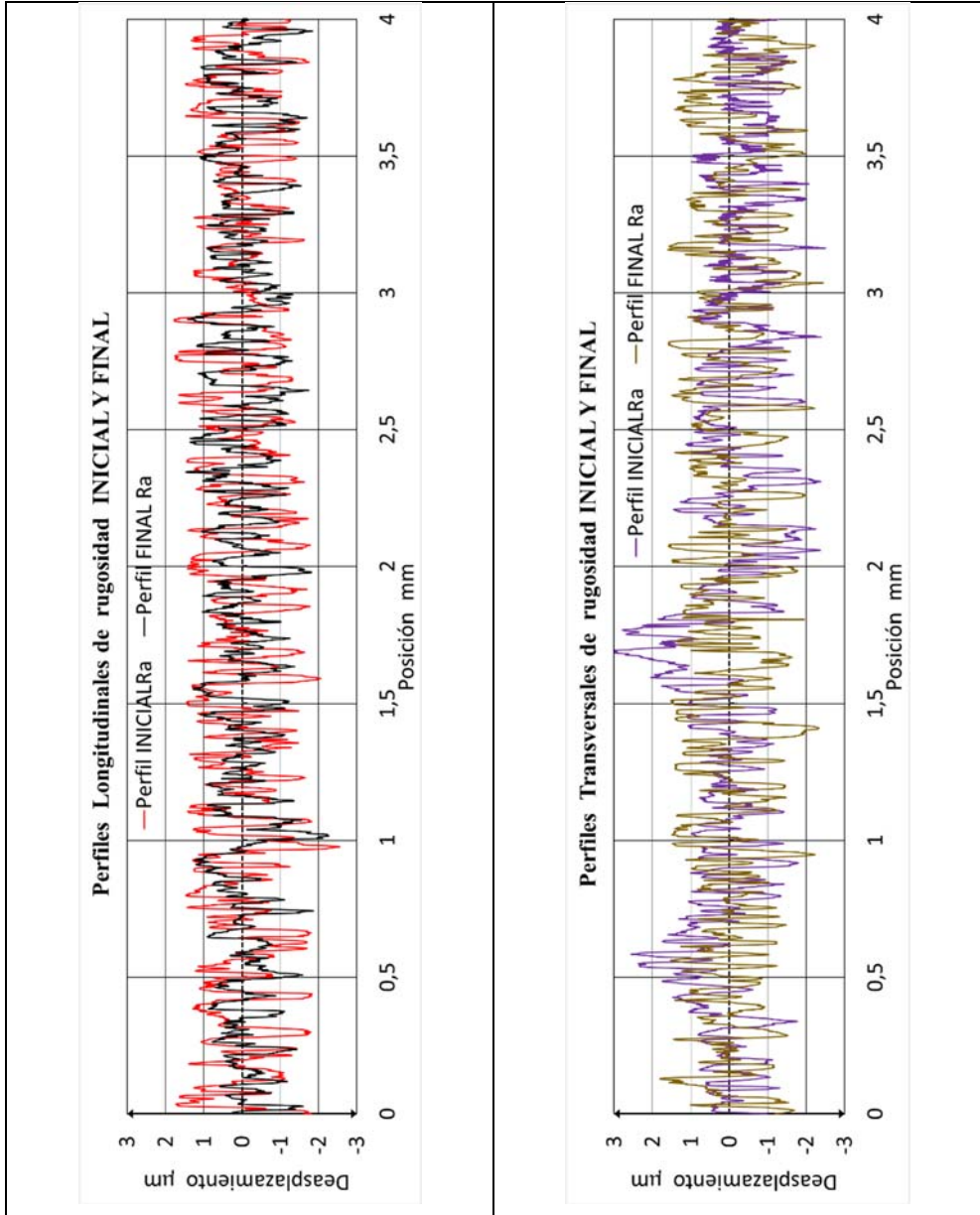


Tabla C. 13 Rugosidades medidas Ra (μm), Longitudinal y Transversal

PROB.	INICIAL		FINAL		T19	INICIAL		FINAL		PROB.	INICIAL		FINAL	
	Ra Long	Ra Trans	Ra Long	Ra Trans		0,89	0,93	Ra Long	Ra Trans		Ra Long	Ra Trans	Ra Long	Ra Trans
T1	0,77	0,89	0,667	0,963	T20	0,94	0,84	0,723	1,133	T37	0,83	1,3	0,527	0,893
T2	0,77	0,74	0,557	0,873	T21	0,76	0,83	0,663	1,207	T38	0,88	0,94	0,453	0,890
T3	0,87	1,18	0,570	0,873	T22	0,76	0,81	0,463	0,747	T39	0,89	1,21	0,610	0,763
T4	0,84	1,1	0,710	1,027	T23	0,94	0,91	0,530	0,893	T40	0,82	1,91	0,503	1,010
T5	0,8	0,86	0,590	0,907	T24	0,84	0,9	0,527	0,710	T41	0,87	0,93	0,660	0,830
T6	0,83	0,88	0,643	0,997	T25	0,88	0,92	0,653	1,167	T42	0,8	1,07	0,647	0,837
T7	0,84	1,36	0,640	0,987	T26	0,76	0,76	0,517	0,840	T43	0,81	0,84	0,603	1,117
T8	0,86	0,89	0,583	0,710	T27	0,79	0,86	0,513	1,153	T44	0,81	0,92	0,587	0,883
T9	0,89	0,92	0,547	0,743	T28	0,83	1,11	0,640	1,030	T45	0,81	0,86	0,540	1,027
T10	0,79	0,77	0,597	0,763	T29	0,92	0,91	0,503	0,683	T46	0,9	0,86	0,703	0,930
T11	0,84	0,74	0,563	0,787	T30	0,83	0,99	0,700	0,907	T47	0,83	1,13	0,597	0,927
T12	0,84	1,25	0,493	0,707	T31	0,76	1,33	0,547	0,670	T48	0,84	0,82	0,547	0,710
T13	0,96	1,12	0,727	1,017	T32	0,85	0,84	0,593	0,913	T49	0,82	1,3	0,510	0,787
T14	0,82	1,78	0,543	0,623	T33	0,94	0,97	0,670	0,887	T50	0,77	0,88	0,447	0,877
T15	0,78	1,17	0,583	0,820	T34	0,85	1,58	0,617	1,000	T51	0,86	0,82	0,553	0,850
T16	0,85	1,27	0,617	1,180	T35	0,79	0,85	0,593	0,897	T52	0,75	1	0,527	0,907
T17	0,81	0,92	0,433	0,683	T36	0,79	0,88	0,570	0,967	T53	0,85	1,2	0,630	1,677
T18	0,76	1,08	0,557	0,823	T36	0,79	0,88	0,530	0,670	T54	0,8	1,11	0,510	0,840

