

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
VALENCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE LA FASE
DE ESTIRADO EN EL PROCESO DE
EMBUTICIÓN PROFUNDA SOBRE CHAPA
DE ACERO BAJO EN CARBONO CON
REVESTIMIENTO MULTICAPA DE
POLÍMERO

Tesis Doctoral

Por

Miguel Ángel Sellés Cantó

Alcoy, 2009

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y DE MATERIALES

ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE LA
FASE DE ESTIRADO EN EL
PROCESO DE EMBUTICIÓN
PROFUNDA SOBRE CHAPA DE
ACERO BAJO EN CARBONO CON
REVESTIMIENTO MULTICAPA DE
POLÍMERO

Tesis Doctoral

Autor: Miguel Ángel Sellés Cantó

Directores: Dr. D. Vicente Jesús Seguí Llinares
Doctor Ingeniero en Organización Industrial
Dr. D. Miguel Jorge Reig Pérez
Doctor Ingeniero Industrial

*A mi mujer Elena,
y a mis pequeños Miguel y Laura.*

Agradecimientos

Deseo agradecer en primer lugar al Dr. D. Steven R. Schmid, de la *University of Notre Dame*, sus sabios consejos a la hora de realizar este trabajo. Quiero expresarle también mi gratitud por la posibilidad de hacer los ensayos en sus instalaciones, y por el trato recibido durante mi estancia en Estados Unidos.

Mi profundo agradecimiento a mis directores de tesis, los doctores D. Vicente Jesús Seguí Llinares y D. Miguel Jorge Reig Pérez, por su dedicación, consejos y sabia dirección.

También deseo agradecer toda la ayuda prestada en la fase experimental por parte de D. Kevin B. Peters y D. Leon P. Hluchota, ambos de la *University of Notre Dame*. Ellos me ayudaron con el montaje y posterior puesta a punto del simulador de estirado.

A mis compañeros del departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, y en especial, a los del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Gracias también a Samuel, Lourdes, Rafa y Antonio.

A mi madre, Teresa, a quien debo cuanto soy, y agradezco de corazón su esfuerzo, apoyo y dedicación a lo largo de toda mi formación. Gracias por el amor recibido. Y no me quiero olvidar de mi padre, Miguel, con quien pasé momentos muy felices. Que en paz descanse.

Mi más sincero agradecimiento a Elena, mi esposa, quien ha sufrido esta tesis y mis largas noches de insomnio con infinita paciencia. Le agradezco

tanto su apoyo emocional como sus consejos y comentarios técnicos, relacionados con el tratamiento estadístico y el diseño de experimentos.

Por último, quiero agradecer a la empresa Mittal-Arcelor la colaboración y financiación prestada al proporcionar los materiales utilizados en esta investigación.

Resumen

ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE LA FASE DE ESTIRADO EN EL PROCESO DE EMBUTICIÓN PROFUNDA SOBRE CHAPA DE ACERO BAJO EN CARBONO CON REVESTIMIENTO MULTICAPA DE POLÍMERO

El proceso de estirado es la fase más crítica en la fabricación de una lata metálica. Existe la posibilidad de utilizar como material de partida una chapa de acero revestida por tres capas de polímero, pero este revestimiento no debe de fallar ni romperse bajo ningún concepto, para que pueda ser considerado como una alternativa viable y eficaz al proceso tradicional. Durante el estirado, las deformaciones son muy severas y existen altas presiones entre la matriz y la pieza. La reducción de espesor que se produce en el estirado hace que se genere una gran cantidad de superficie nueva. El deterioro del revestimiento en esta delicada operación podría provocar que el alimento o bebida almacenado en el interior de la lata tuviese un contacto directo con el metal.

Como puede apreciarse, la clave fundamental en el uso de láminas de acero revestidas por capas de polímero en la fabricación de latas radica precisamente en la supervivencia de éstas al proceso del estirado. Otro aspecto muy importante es la rugosidad superficial de la nueva superficie generada, porque la lata se ha de poder decorar perfectamente.

El hecho de cambiar el método de fabricación tradicional de las latas de bebidas o de los envases metálicos, y utilizar en cambio este nuevo material previamente revestido, permite una notable reducción en la contaminación medioambiental generada al evitar la formación de compuestos orgánicos volátiles (COV's) en la fabricación de las capas de polímero. Esta reducción también es mayor al no utilizar lubricantes adicionales, ya que las capas de polímero sólido previamente revestidas sirven de auto-lubricante del proceso de la embutición. Estos objetivos, junto con el de la mejora de las características mecánicas y la adhesión de la pintura o imprimación decorativa, se consiguen con la utilización del material con el que se trabaja.

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica sobre el proceso de estirado en materiales revestidos, y algunos autores utilizan y argumentan el empleo del teorema del límite superior para la modelización del comportamiento del material. En la presente investigación, se realiza por primera vez la modelización del proceso del estirado para un material con un revestimiento de tres capas de polímero. Además, contempla los casos en los que se produce un estirado correcto y también aquellos en los que se produce uno defectuoso, ya sea por corte o desprendimiento de la capa superior de polímero.

Tras recibir por parte de la compañía Arcelor-Mittal dos materiales semejantes (un sustrato de acero revestido por tres capas de polímero), éstos se han sometido a prueba, según un Diseño de Experimentos realizado, para poder determinar la viabilidad de su utilización en la fabricación de latas. Para ello se ha utilizado un simulador de estirado diseñado y construido para trabajar en las condiciones más próximas a las reales, tal y como se hace en las industrias.

La validación de los modelos teóricos generados ha sido posible gracias al uso del simulador de estirado, proporcionando unos resultados que muestran una buena aproximación del comportamiento teórico con el real.

Por último, y después de exponer los distintos resultados obtenidos de forma tanto teórica como experimental, se ha realizado un análisis de los

mismos para determinar la viabilidad de la utilización de dichos materiales para la fabricación de envases metálicos que requieran del proceso del estirado en su fabricación. Los datos resultantes de este análisis indican que bajo ciertas condiciones es perfectamente posible utilizar uno de estos dos materiales para el fin propuesto, haciendo posible alcanzar los objetivos planteados. El ángulo de matriz es la variable más crítica de todas las analizadas, y con valores superiores a 7° , se daña alguna de las capas de polímero con las que está revestido el material.

Resum

ESTUDI I MODELITZACIÓ DE LA FASE D'ESTIRAMENT EN EL PROCÉS D'EMBUTICIÓ PROFUNDA SOBRE UNA XAPA D'ACER BAIXA EN CARBÓ AMB REVESTIMENT MULTICAPA DE POLÍMER

El procés d'estirament és la fase més crítica en la fabricació d'una llauna metàl·lica. Existeix la possibilitat d'utilitzar com a material de partida una xapa d'acer revestit per tres capes de polímer, però aquest revestiment no deu de fallar ni trencar-se baix cap concepte per a que pugui ser considerat com una alternativa viable i eficaç al procés tradicional. Durant l'estirament, les deformacions són molt severes i existeixen altes pressions entre la matriu i la peça. La reducció d'espessor que es produeix en l'estirament fa que es generi una gran quantitat de superfície nova. El deteriorament del revestiment en esta delicada operació podria provocar que l'aliment o beguda enmagatzemat a l'interior de la llauna tingueren un contacte directe amb el metall.

Com es pot apreciar, la clau fonamental en l'ús de llàmines d'acer revestit per capes de polímer en la fabricació de llaunes radica precisament en la supervivència d'estes al procés d'estirament. Un altre aspecte molt important és la rugositat superficial de la nova superfície generada, ja que la llauna s'ha de poder decorar perfectament.

El fet de canviar el mètode de fabricació tradicional de les llaunes de beguda o dels envasos metàl·lics, i utilitzar en canvi este nou material pre-revestit, permeteix una gran reducció en la contaminació mediambiental generada a

l'evitar la formació de compostos orgànics volàtils (COV's) en la fabricació de les capes de polímer. Esta reducció també és major al no utilitzar lubricants addicionals, ja que les capes de polímer sòlid preresvestides serveixen d'autolubricant del procés d'embutició. Estos objectius, junt amb el de la millora de les característiques mecàniques i l'adhesió de la pintura o imprimació decorativa, es coneixen amb la utilització del material amb el que es treballa.

S'ha fet una recerca bibliogràfica del procés d'estirament en materials revestits, i alguns autors utilitzen i argumenten l'ús del teorema del límit superior per a la modelització del comportament del material. En la present investigació, es fa per primera vegada la modelització del procés d'estirament per a un material amb un revestiment de tres capes de polímer. A més, contempla els casos en els quals es produeix un estirament correcte i també aquells en els que es produeix un de defectuós, ja siga per tall o per despenament de la capa superior de polímer.

Després de rebre per part de la companyia Arcelor-Mittal dos materials similars (un substrat d'acer revestit per tres capes de polímer), estos s'han sotmés a prova, segons el disseny d'experiments realitzat, per a poder determinar la viabilitat de la seua utilització en la fabricació de llaunes. S'ha emprat un simulador d'estirament dissenyat i construït per a treballar amb les condicions més pròximes a les reals, com es fa a les indústries.

La validació dels models teòrics generats ha sigut possible gràcies a l'ús del simulador d'estirament, proporcionant uns resultats que mostren una bona aproximació del comportament teòric amb el real.

Per últim, i després d'exposar els distints resultats obtinguts de forma tant teòrica com experimental, s'ha fet una anàlisi dels mateixos per a determinar la viabilitat de l'utilització dels mencionats materials per a la fabricació d'envasaments metàl·lics que requereixen del procés d'estirament en la seua fabricació. Les dades resultants d'esta anàlisi indiquen que, baix certes condicions, és perfectament possible emprar un d'estos dos materials per a la fi

proposada, fent possible aplegar als objectius plantejats. L'angle de la matriu és la variable més crítica de totes les analitzades, i amb valors superiors a 7° , es fereix alguna de les capes de polímer amb les quals està revestit el material.

Abstract

STUDY AND MODELING OF THE IRONING PROCESS ON A MULTI-LAYERED POLYMER COATED LOW-CARBON STEEL

The ironing process is the most crucial step in the manufacture of cans. Sheet steel covered by three polymer layers can be used as the starting material, but this coating must neither break nor fail in any manner in order to be considered as a viable and effective alternative to traditional practice. During ironing, the deformations are severe and high pressures exist at the tool-workpiece interface. Thickness reductions inherent in ironing require a large amount of surface generation. Deterioration of the coating in this delicate operation might enable direct contact of the stored food or drink with the metal.

As can be appreciated, the key to the use of polymer-coated steel sheets in the manufacture of cans lies in the survival of these layers during the ironing process. Another important issue is the roughness of the newly-generated surface, because it should be possible to decorate the can without any difficulty.

Changing the traditional manufacture of metallic containers such as cans and using this new coated material permits great reduction in environmental contaminants produced as a result of avoiding the formation of Volatile Organic Compounds (VOCs) during the manufacture of the polymer layers. This reduction is even greater because of not using additional lubricants due

to the self-lubricating property of the solid polymer coating layers during the drawing process. These objectives, together with the improvement of the mechanical characteristics and the adhesion of the painting or decorative priming, are realized by the use of the proposed material.

In the existing bibliography about ironing processes on coated materials, some authors propose the use of the Upper Bound Theorem for modeling the material behavior. The present research shows for the first time the modeling of the ironing process on a three-layer polymer coated material. In addition, it takes into account the cases in which successful ironing is produced and those in which ones the ironing is defective either by shaving or detachment of the upper layer of polymer.

Arcelor-Mittal provided two similar materials, both consisting of a steel substrate coated by three polymer layers. They have been tested according to the theory of design of experiments, in order to determine the feasibility of their use in the manufacture of cans. An ironing process simulator has been designed and constructed that works under conditions similar to those in industry.

Validation of the theoretically-generated models has been possible thanks to the use of the ironing simulator, providing results that show good agreement between the theoretical and real behaviors.

Finally, after obtaining the different results from the theoretical and experimental work, they have been analyzed to determine the feasibility of using these materials for the manufacture of metal containers that need the ironing process. The information obtained from this analysis shows that, under certain conditions, it is perfectly possible to use one of these two materials for the proposed purpose, making the proposed goals possible. The die angle is the most critical variable among all the ones studied, and when it takes values greater than 7° , some of the coating polymer layers are damaged.

Índice general

Agradecimientos	VI
Resumen	IX
Resum	XIII
Abstract	XVII
Índice de figuras	XXIII
Índice de tablas	XXVIII
Nomenclatura	XXXII
1. Introducción	1
1.1. La fase del estirado en la embutición profunda	1
1.2. Objetivo de la tesis	11
1.3. Motivación	14

2. Revisión bibliográfica	17
2.1. El estirado sin revestimiento	17
2.2. El estirado con polímero revestido	20
3. Modelización teórica	25
3.1. Las variables que intervienen en la fase de estirado	26
3.2. El análisis del límite	28
3.3. El teorema del límite superior	30
3.3.1. Los campos de velocidades discontinuas	31
3.3.2. El hodógrafo de velocidades	33
3.3.3. Consideraciones energéticas	35
3.4. Procedimiento matemático	38
3.5. Modelos de comportamiento	39
3.5.1. Modelo de estirado correcto	41
3.5.2. Modelo de estirado defectuoso	49
4. Metodología experimental	59
4.1. Análisis en dos dimensiones	59
4.2. Descripción y funcionamiento del simulador de estirado	62
4.3. La adquisición de los datos y la preparación de los experimentos	71
4.4. Preparación del material	76

4.4.1. Las matrices	76
4.4.2. Material experimental	79
4.5. Diseño de experimentos	89
5. Resultados	97
5.1. Análisis de las fuerzas	98
5.2. Resultados teóricos	105
5.3. Resultados experimentales	115
5.3.1. Análisis de la superficie	115
5.3.2. Diseño de Experimentos	123
5.4. Validación experimental de los modelos	129
6. Conclusiones	135
7. Proyección del trabajo y estudios futuros	139
Bibliografía	143
Apéndices	149
A. Modelización del estirado correcto. Programa en C++.	151
B. Modelización del estirado defectuoso. Programa en C++.	161

Índice de figuras

1.1. Las fases en el proceso de fabricación de una lata de dos piezas (<i>Manufacturing Engineering and Technology, 5ª ed, Kalpakjian, S. y Schmid, S.R., 2006</i>)	5
1.2. Etapas de desarrollo de esta tesis	13
3.1. Representación gráfica de la fase de estirado en la fabricación de una lata.	26
3.2. Campo de velocidades discontinuas para el <i>estirado</i> sin reves- timiento.	32
3.3. Localización sobre el hodógrafo de los bordes de la zona B con la zona C y con la matriz.	34
3.4. Localización del punto que representa a la zona B.	35
3.5. Hodógrafo final para el caso de la figura 3.2.	36
3.6. Campo de velocidades para el caso de un estirado correcto. . .	42
3.7. Hodógrafo para el caso de un estirado correcto.	45
3.8. Gráfica que muestra la potencia adimensional proporcionada por el modelo en función del ángulo de la matriz y la reducción aplicada.	49

3.9. Campo de velocidades para el caso de un estirado defectuoso sobre la capa superior de polímero.	51
3.10. Detalle del campo de velocidades en el estirado defectuoso. Se indica cuál es la longitud de contacto entre la matriz y la zona D.	52
3.11. Hodógrafo para el caso de un estirado defectuoso.	53
3.12. Gráfica que muestra la potencia adimensional proporcionada por el modelo de estirado defectuoso, en función del ángulo de la matriz y del espesor de la capa superior de polímero.	57
4.1. Sección de una lata durante la fase de estirado. El punzón del simulador está representado por una línea discontinua, siendo la parte izquierda del eje de simetría la parte de la lata que realmente se simula.	61
4.2. Configuración del simulador de estirado.	63
4.3. El simulador de estirado.	64
4.4. Vista en planta del simulador de estirado. El detalle A muestra la zona de estirado. Las galgas extensiométricas están colocadas de forma transversal sobre los soportes elásticos.	65
4.5. Vista parcial del montaje del simulador de estirado. Se puede observar con detalle la colocación de las galgas.	66
4.6. Vista posterior de los elementos de sujeción de la matriz.	67
4.7. Secuencia del momento en el que se produce el estirado.	67
4.8. Configuración utilizada del puente de Wheatstone con dos resistencias de 120Ω . V_e representa el voltaje de entrada o excitación, mientras que V_s es el voltaje de salida.	68

4.9. La válvula proporcional utilizada en el simulador.	69
4.10. Esquema del sistema hidráulico empleado en el simulador de estirado.	70
4.11. Método con el que se realizaron los agujeros a las tiras de material.	71
4.12. Dimensiones nominales de una tira de material para las pruebas.	72
4.13. Encoder rotacional utilizado para el cálculo del desplazamien- to y velocidad del punzón.	73
4.14. Representación típica de las salidas de las galgas al visualizarse en un osciloscopio.	74
4.15. La máquina universal de ensayos ATS 910-36 utilizada para el cálculo de las constantes de proporcionalidad de cada par de galgas.	75
4.16. Vista superior de una matriz. Para una mejor apreciación, se han exagerado las medidas de los ángulos y algunas longitudes.	77
4.17. Las cuatro matrices disponibles.	79
4.18. Esquema que muestra el método de la <i>co-laminación</i> para la aplicación de la capa(s) de polímero.	82
4.19. Esquema que muestra el método de la <i>co-extrusión</i> para la aplicación de la capa(s) de polímero.	82
4.20. Esquema en 2D del acero revestido por tres capas de polímero utilizado en los experimentos.	84
4.21. Esquema en 3D del metal base revestido por las tres capas de polímero.	84
4.22. Los dos materiales utilizados en los ensayos: 702 y 705.	85

4.23. Resultados de la prueba de dureza. (a) Indentaciones sobre la superficie del material 702; (b) Vista de detalle de una sola indentación.	87
4.24. Ensayo en el microscopio de fuerza atómica.	88
5.1. Diagrama de fuerzas durante el estirado. F_e es la fuerza que se mide en la dirección de estirado; F_r es la fuerza medida en la dirección radial; F_f es la fuerza de fricción sobre la superficie de la matriz y N es la fuerza normal sobre ésta.	98
5.2. La fuerza de fricción frente a la reducción experimentada por material al producirse el estirado, con $\phi = 10^\circ$ y $v_p = 0,75$ m/s.	99
5.3. La fuerza normal frente a la reducción experimentada por material al producirse el estirado, con $\phi = 10^\circ$ y $v_p = 0,75$ m/s.	99
5.4. Curva del modelo de regresión (fuerza de fricción, porcentaje de reducción).	100
5.5. Curva del modelo de regresión (fuerza normal, porcentaje de reducción).	101
5.6. La fuerza normal frente a la fuerza de fricción, con $\phi = 10^\circ$ y $v_p = 0,75$ m/s.	102
5.7. Curva del modelo de regresión (fuerza de fricción, fuerza normal).	103
5.8. Al aumentar la reducción, disminuye el coeficiente de fricción, pero no de forma lineal.	104
5.9. Curva del modelo de regresión (coeficiente de fricción, reducción).	104
5.10. Curvas de potencia optimizadas para los modelos del estirado correcto y defectuoso.	106

5.11. Curvas de potencia para ambos modelos utilizando los siguientes parámetros: $\%_{red} = 10\%$, $y_i = 0,254$ mm, $t_{1i} = t_{3i} = 0,0254$ mm, $t_{2i} = 0,0762$ mm, $k_m = 1,53k_p$, $m_1 = 1$, $m_2 = m_5 = 0,9$, $m_3 = m_4 = 0,03$	107
5.12. Representaciones tridimensionales de los datos de ángulo de matriz y de nivel de reducción frente a otras variables.	110
5.13. El ángulo crítico de la matriz frente a la reducción, utilizando los siguientes parámetros: $y_i = 0,254$ mm, $t_{1i} = t_{3i} = 0,0254$ mm, $t_{2i} = 0,0762$ mm, $k_m = 1,53k_p$, $m_1 = 1$, $m_2 = m_5 = 0,9$, $m_3 = m_4 = 0,03$	111
5.14. Curva del modelo de regresión (ángulo crítico de la matriz, reducción).	112
5.15. El ángulo crítico de la matriz frente al espesor inicial de la capa superior de polímero, utilizando los siguientes parámetros: $\%_{red} = 10\%$, $y_i = 0,254$ mm, $k_m = 1,53k_p$, $m_1 = 1$, $m_2 = m_5 = 0,9$, $m_3 = m_4 = 0,03$	113
5.16. Curva del modelo de regresión (ángulo crítico de la matriz, espesor inicial t_{3i}).	114
5.17. Imágenes tomadas de dos niveles de calidad superficial con un microscopio electrónico.	115
5.18. Microfotografías representativas de la superficie del material.	117
5.19. El Factor de Calidad Superficial Medio para el material 702 en función del ángulo de la matriz. Valores del FCS iguales o superiores a 8 indican un estirado correcto.	118
5.20. Las dos direcciones sobre las que se han tomado datos de la rugosidad superficial en las tiras de material estirado.	119

5.21. Las cuatro zonas donde se han realizado las mediciones de la rugosidad. Las pequeñas líneas rectas indican la posición exacta.	119
5.22. La rugosidad media tomada en las direcciones longitudinal (estirado) y transversal, en función del ángulo de la matriz. . .	122
5.23. El color azulado del sulfato de cobre en la primera fotografía indica que el daño no ha llegado al acero; mientras que en la segunda, después de limpiar el ácido, se aprecia con claridad que parte del acero había quedado expuesto sin ninguna capa de polímero.	123
5.24. Imagen de una tira de material una vez ha sido estirada. . . .	124
5.25. Análisis de la variación del FCS frente a las variables de proceso con el programa estadístico Design Expert TM	127
5.26. Curvas teóricas y experimentales obtenidas en el estirado correcto, con unas reducciones del 5 % y del 15 %. $v_p = 1m/s$. . .	130
5.27. Curva del modelo de regresión (5 % reducción, estirado correcto).	131
5.28. Curva del modelo de regresión (15 % reducción, estirado correcto).	131
5.29. Curva teórica y experimental obtenida en el estirado defectuoso, para un espesor de $t_{3i} = 0,0254$ mm. $v_p = 1$ m/s	132
5.30. Curva del modelo de regresión (estirado defectuoso)	133

Índice de tablas

3.1. Variables que influyen en el estirado de un material.	27
3.2. Planos de fricción y de cizalladura en el modelo de estirado correcto.	46
3.3. Planos de fricción y de cizalladura en el modelo de estirado defectuoso.	56
4.1. Distintas geometrías para las cuatro matrices disponibles. . . .	78
4.2. Composición del acero empleado en los materiales 702 y 705. .	86
4.3. Propiedades mecánicas del acero empleado en los materiales 702 y 705.	87
4.4. Mediciones de la dureza de las capas realizadas con el micros- copio de fuerza atómica.	88
4.5. Las cuatro variables de proceso del diseño de experimentos. . .	90
4.6. Niveles de las variables de proceso para los experimentos con la parte exterior de la tira de material.	92
4.7. Niveles de las variables de proceso para los experimentos con la parte interior de la tira de material.	93

4.8.	Listado de los 46 experimentos a realizar sobre la superficie exterior del material.	95
4.9.	Listado de los 11 experimentos a realizar sobre la superficie interior del material.	95
5.1.	Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos de las fuerzas de fricción y normal frente a la reducción experimentada por el material.	100
5.2.	Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos de la fuerza de fricción frente a la fuerza normal.	102
5.3.	Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos del coeficiente de fricción frente al porcentaje de reducción.	103
5.4.	Tabla con cuatro simulaciones utilizando el programa del estimado correcto. Cada columna es una simulación, y en las filas se muestran los valores adoptados por cada una de las variables.108	
5.5.	Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos del ángulo crítico de la matriz frente al porcentaje de reducción, utilizando los parámetros de la figura 5.13.	112
5.6.	Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos del ángulo crítico de la matriz frente al espesor inicial de la capa superior de polímero (t_{3i}), utilizando los parámetros de la figura 5.15.	113
5.7.	Tabla con el diseño de experimentos y los resultados obtenidos para el material 702, utilizando la parte exterior del material en contacto con la matriz.	120

5.8. Tabla con el diseño de experimentos y los resultados obtenidos para el material 702, utilizando la parte interior del material en contacto con la matriz.	121
5.9. Resultados del análisis de la varianza sobre el FCS.	124
5.10. Resultados del análisis de la varianza sobre el FCS.	125
5.11. Resultados del análisis de la varianza sobre la rugosidad, para el lado exterior.	125
5.12. Resultados del análisis de la varianza sobre la fuerza máxima en las direcciones radial y longitudinal, para el lado exterior. .	126
5.13. La sensibilidad de las variables resultado frente a las variaciones en las variables de proceso, para el lado exterior.	127
5.14. Resultados experimentales sobre la procesabilidad del material 702.	128
5.15. Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos experimentales y teóricos, para un estirado correcto.	130
5.16. Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos experimentales y teóricos, para un estirado defectuoso.	132

Nomenclatura

ϕ	Ángulo de la matriz
μ	Ángulo que forma la capa superior de polímero con la horizontal, durante el estirado
γ	Ángulo que forma la capa inferior de polímero con la horizontal, durante el estirado
v_p	Velocidad del punzón
P	Potencia disipada en el proceso
F	Fuerza aplicada
A	Área del plano
F_c	Fuerza en el plano de cizallamiento
P_c	Potencia disipada en un plano de cizallamiento
F_f	Fuerza en el plano de fricción
P_f	Potencia disipada en un plano de fricción
F_e	Fuerza medida en la dirección de estirado
F_r	Fuerza medida en la dirección radial
τ	Esfuerzo cortante en el plano. Ángulo que forma la capa intermedia de polímero con la horizontal, durante el estirado
l	Longitud del plano
a	Anchura del plano
k	Tensión de cizalladura
m	Coefficiente de fricción entre dos superficies
m_1	Coefficiente de fricción entre la superficie del metal y del punzón
m_2	Coefficiente de fricción entre el metal y la capa inferior de polímero

m_3	Coefficiente de fricción entre las capas de polímero intermedia e inferior
m_4	Coefficiente de fricción entre las capas de polímero intermedia y superior
m_5	Coefficiente de fricción entre la capa superior de polímero y la matriz
A_a	Área de contacto entre dos superficies
i	Número de planos de cizalladura
j	Número de planos de fricción
P_{total}	Potencia total disipada
\bar{k}	Resistencia a la cortadura media
γ_t	Deformación total por el esfuerzo cortante
k_i	Resistencia a la cizalladura de las capas de polímero
$k_{polimero1}$	Resistencia a la cizalladura de las capas de inferior
$k_{polimero2}$	Resistencia a la cizalladura de las capas de intermedia
$k_{polimero3}$	Resistencia a la cizalladura de la capa de polímero superior
k_{acero}	Resistencia a la cizalladura del acero
$espesor$	Anchura del material considerado
k_p	Resistencia a la cizalladura de la pieza
y_i	Espesor inicial del metal
t_{1i}	Espesor inicial de la capa de polímero inferior
t_{2i}	Espesor inicial de la capa de polímero intermedia
t_{3i}	Espesor inicial de la capa de polímero superior
y_f	Espesor final del metal
t_{1f}	Espesor final de la capa de polímero inferior
t_{2f}	Espesor final de la capa de polímero intermedia
t_{3f}	Espesor final de la capa de polímero superior
v_{AB}	Velocidad relativa entre las zonas A y B
l_{AB}	Longitud del plano entre las zonas A y B
R_a	Rugosidad media
V_e	Voltaje de entrada o excitación del puente de Wheatstone
V_s	Voltaje de salida del puente de Wheatstone
G	Ganancia del amplificador
V	Diferencia de voltaje medido
k_e	Constante de calibración en la dirección de estirado
k_r	Constante de calibración en la dirección radial

Capítulo 1

Introducción

1.1. La fase del estirado en la embutición profunda

El interior de las latas de bebidas que se comercializan en todo el mundo no es solamente un lugar para albergar refrescos o cerveza. Las latas se utilizan también en la actualidad para contener bebidas energéticas, café e incluso vino, como ya hizo por primera vez una empresa española en el año 2006 [1]. También se diseñan para uso con leche o sustancias medicinales. Como puede apreciarse, es muy alta la diversidad que pueden tener sus contenidos.

El volumen de producción anual de estas latas es muy elevado. A modo de ejemplo, el mercado mundial de latas de bebidas fue en 2007 de 253.000 millones de unidades, de las que más de 50.200 millones se llenaron en Europa, con un crecimiento frente a 2006 del 10,3% (el crecimiento más elevado en la última década), siendo el reparto total del mercado de prácticamente un 50% para las latas de refrescos y de otro 50% para las latas de cervezas [2], aunque el crecimiento fue algo mayor en el sector de cervezas (13%) que en el de refrescos (7%). El mercado ibérico (Portugal y España) continúa siendo el tercero en Europa en conjunto y el primero en latas de refresco, con

1. INTRODUCCIÓN

un crecimiento en el año 2007 del 9,2% en el caso de España, mientras que en Portugal lo fue del 12,7% [2]. Por lo que respecta a Estados Unidos, se fabrican más de cien mil millones de latas cada año (99.100 millones en el año 2005 [3]).

La competitividad entre los fabricantes es cada vez mayor, y además también aumenta la complejidad de los procesos de fabricación involucrados en la fabricación de las latas. Para reducir los costes al máximo y aumentar de manera significativa los beneficios, los fabricantes de latas ajustan hasta la millonésima parte de un euro el cálculo del coste de fabricación, pues la producción es muy elevada, y de hecho, una reducción del 1% en el peso de una lata puede ahorrar más de 20 millones de euros en costes. Las posibles modificaciones en el proceso de fabricación pueden aumentar o disminuir de forma importante el coste final, pudiendo llegar a tener un fuerte impacto en la industria.

La historia de la lata es una muestra de la prosperidad de la sociedad moderna. La lata de bebida se inventó a mediados de los años 30 en los Estados Unidos, donde la fábrica de cerveza *Krueger* (de Newark, en el estado de New Jersey) lanzó al mercado su producto el 24 de Enero de 1935. Se eligió la ciudad de Richmond, en Virginia, para realizar una prueba de mercado. Las primeras latas ya eran fabricadas por la *American Can Company*. Y fue en la fábrica de cerveza de *Felinfoel*, en Gales, donde se empezó a embotellar cerveza fuera de Estados Unidos utilizando latas. Corría por entonces el año 1936.

Pero el inventor de la lata como la conocemos hoy en día fue Erald Cleon Frazee (Dayton, Ohio), quien en 1959 integró en la parte superior de una lata de aluminio un anillo con el que se podía abrir la lata tirando de él con un dedo. En el año 1963 recibió la patente de Estados Unidos nº 3.349.949 por su innovador diseño, y vendió su invención a Alcoa y a la fábrica de cerveza de Pittsburg. Los primeros refrescos que se comercializaron con este sistema lo hicieron en el año 1964, y eran todos de cola.

Hoy en día, la industria de fabricación de latas es muy importante, y llega a emplear más de 35.000 trabajadores, solamente en los Estados Unidos [3]. Casi todas las latas de bebidas que se fabrican en los Estados Unidos están hechas de aluminio, mientras que las latas hechas en Europa y Asia están fabricadas por un 55 % de acero, y un 45 % de aleación de aluminio con manganeso y magnesio, elementos que proporcionan una mayor dureza y procesabilidad, pues el aluminio por sí solo es difícil de embutir (que no de estirar) [4]. El caso de España es una excepción dentro del mercado europeo, pues en las cuatro plantas que posee se utiliza solamente el acero como material para fabricar las latas [2].

Las modernas latas de bebidas y de comida se construyen utilizando dos o tres piezas. Las latas de tres piezas, que fueron las primeras en desarrollarse, están formadas por un cuerpo cilíndrico obtenido de una lámina o plancha de metal, el cual se suelda longitudinalmente mediante soldadura eléctrica. Los extremos del cilindro resultante se tapan posteriormente. Las latas de tres piezas se pueden fabricar en casi cualquier combinación de altura y diámetro. Este proceso es particularmente apropiado para la fabricación de latas con especificaciones varias, ya que es relativamente fácil cambiar la especificación de la lata que está siendo fabricada.

Las latas de dos piezas se fabrican partiendo de un disco de metal que cambia de forma hasta convertirse en un cilindro con fondo. Para cerrar completamente la lata, se sella con posterioridad un pequeño disco de metal. Mediante la *embutición*, se va modificando la forma de la chapa metálica sin cambiar su grosor. Con la *re-embutición* se cambia sucesivamente la forma de la lata de dos piezas hasta conseguir una con un diámetro menor, pero también sin cambiar su grosor. Por último, el proceso en el que se hacen más finas las paredes de una lata de dos piezas, haciéndola pasar a través de unos anillos especiales, se denomina en inglés *ironing*. No existe en español una palabra concreta que defina este último proceso. En algunos libros que han sido traducidos en latinoamérica se emplea la palabra *planchado* para referirse a este proceso, pero su utilización no es del todo correcta. En realidad, el

1. INTRODUCCIÓN

ironing es la fase de estirado que se produce en el proceso de la embutición profunda, por lo que se considera más apropiado referirse con la palabra *estirado* a este proceso que con la de *planchado*. De aquí en adelante, el empleo de la palabra *estirado* hará referencia por tanto a la fase de estirado que se produce en la embutición profunda al fabricar una lata.

Las ventajas de las latas de dos piezas frente a las de tres son evidentes, por su peso más ligero y también por el menor número de costuras. Estas propiedades hacen que sea más fácil decorar las latas y prevenir así la fuga de líquidos.

El esquema básico del proceso de fabricación de una lata moderna de bebida se muestra en la Figura 1.1. La mayoría de estas operaciones se realizan en una prensa mecánica de gran capacidad, con velocidades que oscilan entre los 60 y los 180 golpes por minuto. Las operaciones que son secuenciales se llevan a cabo mediante un solo golpe a través de una combinación múltiple de matrices.

- El material de partida es una banda de hojalata (acero recubierto de estaño) o bien de aluminio, enrollada en forma de bobina, con un ancho de 1,2 metros y una longitud de entre 4.000 y 8.000 metros. Las características mecánicas, las medidas y muy especialmente el grosor de esta lámina, así como su calidad superficial, se establecen entre el fabricante del metal (acero o aluminio) y el fabricante de latas, tomando como base unas especificaciones técnicas muy estrictas [5].
- La bobina de metal se hace pasar por una prensa, mediante el lubricador, obteniendo con un golpe vertical unos discos de metal (con un diámetro de 0,1397 m). El desperdicio derivado de esta fase se retira mediante aspiración y se compacta para su reciclado posterior. Los discos obtenidos de esta manera se llevan sobre una cinta transportadora magnética (para la hojalata) o de vacío (para el aluminio) hasta la etapa siguiente.
- En la etapa siguiente, se embute un disco hasta alcanzar la forma de una

1.1. LA FASE DEL ESTIRADO EN LA EMBUTICIÓN PROFUNDA

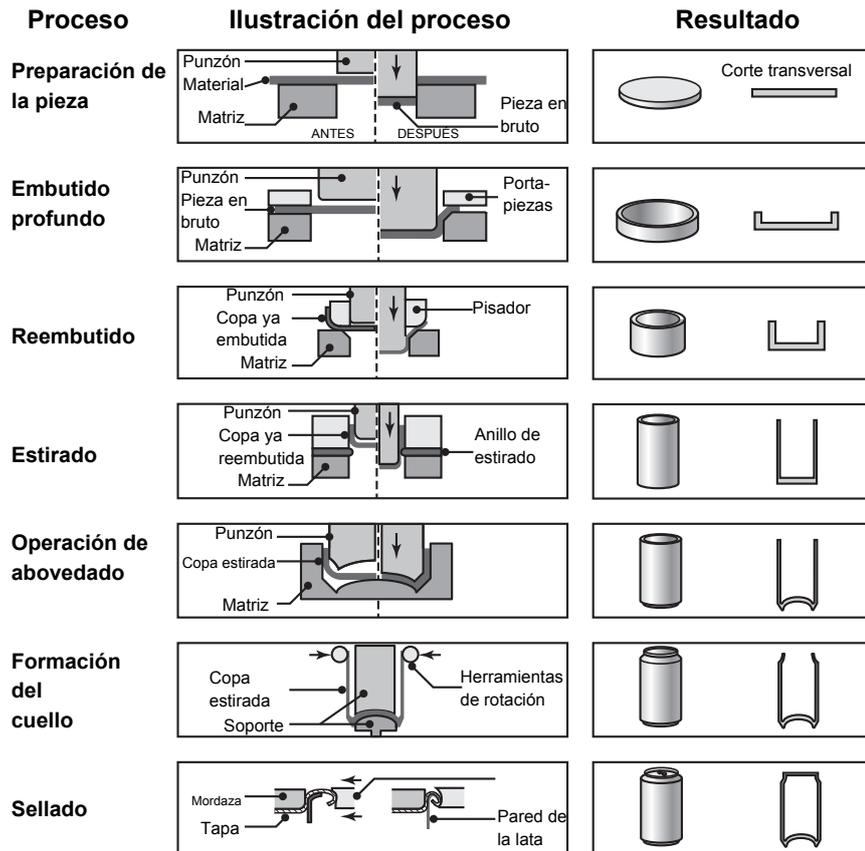


Figura 1.1: Las fases en el proceso de fabricación de una lata de dos piezas (*Manufacturing Engineering and Technology, 5ª ed, Kalpakjian, S. y Schmid, S.R., 2006*)

1. INTRODUCCIÓN

copa de 0,0889 m de diámetro, manteniendo el mismo espesor original en el fondo y en la pared. Se utiliza un dispositivo para sujetar fuertemente al disco en esta etapa, pudiendo controlar también la cantidad y velocidad del flujo de material en la zona de deformación.

- La copa vuelve a sufrir otro proceso de embutido hasta reducir el diámetro interior a 0,06604 m, otra vez sin variar el espesor de las paredes. La altura de las paredes es ahora de 0,05715 m.
- En el siguiente paso, se aplica el proceso del estirado a la copa hasta que el espesor de su pared sea el deseado. Se requiere que el estirado se realice en dos, o con más frecuencia, en tres fases sucesivas. Las tensiones y fricciones entre la copa y el punzón conducen al metal hacia la zona de deformación. A menudo se suele hacer más rugosa la superficie del punzón para incrementar el efecto de la fricción [6]. Lo que determina el grado de deformación que tiene lugar es la geometría del aro de estirado, en concreto de su ángulo de ataque o incidencia. Solamente se produce reducción de espesor en la pared, ya que la base mantiene el mismo espesor que tenía antes. La altura final de la lata al terminar este proceso suele estar alrededor de 0,127 m.
- En la siguiente fase, se realiza una operación de abovedado, la cual proporciona a la copa, una vez ya ha sido estirada, su base cóncava; y que entre otras funciones, ayuda al apilamiento de las latas en su almacenaje. A continuación, mediante la recortadora, se eliminan posibles ondulaciones que se hayan formado en el borde superior. Esto se debe a la *anisotropía* de la chapa, que produce una deformación diferente según la dirección seguida.
- La parte superior de la lata posee un diámetro menor que el del cuerpo; y para ello se precisa una nueva operación de procesado llamada *formación del cuello* (en inglés, *necking*). La reducción en el proceso del estirado se debe de hacer de tal manera que permita que la lata sea ligera, pero que el espesor de la pared sea lo suficientemente grueso como para asegurar una correcta formación del cuello y que además

sea lo suficientemente fuerte para poder aguantar bajo una fuerte compresión [6]. La formación del cuello se realiza simplemente por razones de coste del material; las tapas de las latas de bebidas se fabrican con la aleación de aluminio 5182, sin importar que la lata sea de acero o de aluminio. La aleación 5182 posee la ductilidad necesaria para poder formar la anilla no separable, conocida como *stay-on-tab*, en la tapa y permitir su apertura con facilidad; pero por contra, esta aleación es más pesada y cara que el material del cuerpo de la lata. La tapa se fabrica con un mayor espesor para soportar la presión interna, y constituye en la actualidad un 25 % del peso total de la lata [6]. Así pues, la formación del cuello permite fabricar tapas más pequeñas, haciendo que las latas sean menos caras y más ligeras.

- La tapa de la lata se suele estampar en una ubicación distinta de la del cuerpo de la lata, y se une a ésta, una vez ya ha sido llenada, mediante un proceso de sellado. Las operaciones de llenado y sellado no suelen realizarse por el fabricante de las latas, sino por la planta embotelladora o procesadora de alimentos.

Las operaciones de conformado del metal de embutido, re-embutido y estirado requieren una lubricación apropiada para asegurar tener los mejores resultados posibles y conseguir así una mayor eficiencia en el proceso global. El lubricante estándar en estos casos, suele ser una emulsión de aceite en agua formada por derivados del petróleo o aceites de parafina en concentraciones del 15-30 % durante la fase del embutido, y del 4-12 % durante la fase del estirado [7]. Se utiliza esta emulsión porque proporcionará la lubricación y los efectos refrigerantes necesarios para controlar las elevadas temperaturas de proceso debidas al calentamiento localizado producido por la deformación plástica del material. El lubricante aplicado puede contener varios aditivos que mejoren sus propiedades. La polaridad de la estructura molecular de los aditivos consiguen fuerzas de Van der Waals más fuertes entre las moléculas y las superficies metálicas, incrementando la cantidad de lubricante que se adhiere a la pieza. Los aditivos inorgánicos trabajan muy bien a altas presiones

1. INTRODUCCIÓN

y temperaturas, donde no lo hacen los lubricantes orgánicos. La lubricación en las operaciones de troquelado y de embutido se aplica mediante una película muy delgada, mientras que el lubricante en la fase del estirado se aplica utilizando como método un spray [7].

Durante el proceso de fabricación de la lata, restos del lubricante quedan adheridos al material, y por tanto, deben de ser eliminados, porque son tóxicos por su naturaleza y contribuyen negativamente al sabor del producto. Este proceso de limpieza se efectúa mediante un ciclo de lavado que se realiza entre las operaciones de abovedado de la base y posterior formación del cuello. El lubricante se suele recoger en tanques muy grandes donde posteriormente se le somete a un proceso de reciclado. Una vez ya han sido limpiadas, a las latas se les puede aplicar una capa delgada exterior que ayude en un futuro proceso de decoración. Este recubrimiento se realiza sumergiendo la lata en un baño de polímero; y tiene como fin el de proporcionar una buena superficie de adhesión para posteriores recubrimientos interiores y también para la pintura que se aplicará para fines decorativos en el exterior de la lata.

Llegados a este punto, la superficie de la lata no está preparada para estar en contacto directo con la comida o la bebida, ya que el anterior recubrimiento de la superficie interior es poroso, y esto produciría una contaminación por las partículas de metal. Para prevenir esto, se suele aplicar una resina termoestable, la cual es apta para estar en contacto directo con alimentos o bebidas, aplicándose en forma de spray en el interior de la lata. La aplicación de este recubrimiento plástico requiere de la utilización de un fluido disolvente, con el que está mezclada la resina termoestable, que posee grandes propiedades de adherencia, entre otras. Después de la aplicación del spray, la lata es introducida en un horno de curado a altas temperaturas. Éstas hacen que la resina reticule y quede adherida a la superficie interior de la lata, mientras que el fluido mencionado anteriormente, que contiene sustancias tóxicas (que junto con el carbono, puede tener elementos como hidrógeno, oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno), se evapora y se libera en forma de compuesto orgánico volátil (COV). El Real Decreto 117/2003, de 31 de Enero,

1.1. LA FASE DEL ESTIRADO EN LA EMBUTICIÓN PROFUNDA

sobre la limitación de emisiones de COVs, advierte sobre los efectos nocivos que tienen para la salud de las personas y del medio ambiente, regulando las actividades que los utilizan. Por tanto, para conseguir que el proceso no sea nocivo, se ha de intentar evitar utilizar en la medida de lo posible este tipo de compuesto. Si se requieren múltiples capas para el recubrimiento interior de la lata, cada una de las operaciones que se hagan con el spray requerirán de un tiempo de curado antes de la aplicación de la siguiente capa, produciendo cada operación de curado una serie de COVs. Después de completar todas las fases de curado, ya se puede decir que el recubrimiento polimérico está perfectamente adherido al interior de la lata, siendo seguro rellenarlo con comida o bebida.

Los fabricantes de latas están buscando continuamente soluciones que mejoren el proceso de fabricación y les permita producir latas a un precio más bajo. Además, las autoridades sanitarias ejercen una presión considerable para que estos fabricantes reduzcan la emisión de COVs. Una alternativa al tradicional proceso de fabricación es la utilización de una lámina de acero revestida por una capa de polímero. Este último ha de ser un termoplástico, por poseer una mejor capacidad de deformación que un material termoes estable, y que se pueda utilizar perfectamente para estar en contacto directo con los alimentos o bebidas. La fina capa de polímero se aplica a la lámina de acero mediante una operación de laminado. Se puede aplicar una o dos capas de polímero a un rollo de acero previamente precalentado, o bien por un lado solamente (una capa) o por ambos lados de la lámina de acero (dos capas exteriores de polímero). Esta operación se realiza mediante un tren de laminación. Inmediatamente, se enfrían las láminas precalentadas, y se produce una fuerte adhesión entre las distintas capas. El coste de una bobina de acero revestido es ligeramente superior al de uno sin revestir, pero es muy parecido al coste total de los materiales que se necesitan utilizando el método tradicional, es decir, el material sin revestimiento y la resina para revestir.

Cuando se decide utilizar una lámina ya prerevestida por una capa de polímero, las operaciones que se requieren para la formación de la lata son

1. INTRODUCCIÓN

prácticamente las mismas. Se somete también a la lámina de acero a las operaciones de embutido, reembutido, estirado y abovedado. Con un adecuado diseño y selección del revestimiento, la capa de polímero en el lado de la lata que está en contacto con la matriz ha de tener ciertas características de rozamiento que permitan que las operaciones se efectúen sin aplicar lubricación alguna. El agua se puede entonces utilizar como refrigerante exclusivo del proceso, eliminando de esta forma la utilización de aditivos perjudiciales o contaminantes. Como se ha mencionado con anterioridad, los revestimientos en forma de lámina sirven como una buena y segura superficie de contacto para los alimentos o bebidas. Si se realiza una selección correcta de los revestimientos de la lata que puedan soportar las operaciones de deformación plástica (revestimientos tanto exteriores como interiores), el recubrimiento interior que se necesita para poder llenar la lata estará presente una vez hayan concluido las operaciones de conformado de la misma. De esta manera, se pueden eliminar las operaciones con el spray y su posterior curado, y ya no se necesitaría el disolvente. Como resultado, desaparece la emisión de COVs y se consigue entonces que el proceso de fabricación de una lata sea más respetuoso con el medio ambiente. Una mejora adicional que se deriva de la utilización de este revestimiento es el hecho de conseguir una mayor protección frente a la corrosión.

Además del beneficio que se genera para el medio ambiente, el uso de una lámina con revestimiento de polímero hace que se reduzcan los costes en la fabricación de las latas. Si se eliminan las operaciones de lavado, aplicación de spray y curado, de la línea de producción, el tiempo global de proceso se reduce, así como el coste que supone mantener dichas operaciones. El coste del tratamiento de los COVs también se eliminaría, y en consecuencia, se produciría un aumento significativo en los beneficios de la empresa fabricante.

1.2. Objetivo de la tesis

El objetivo principal de esta tesis es estudiar la viabilidad en la utilización de una lámina de acero revestida por tres capas de polímero para ser utilizada en el proceso de fabricación de una lata, entre otras aplicaciones. Hasta la fecha, se han realizado con éxito experimentos con láminas revestidas por una sola capa de polímero, pero nunca con tres. Si se demostrase esta viabilidad, sería posible fabricar envases con una menor contaminación ambiental por la eliminación de los COV's. Las emisiones de compuestos orgánicos a la atmósfera pueden ser nocivas para la salud y producir importantes perjuicios a los recursos naturales. Consciente de lo anterior, el Consejo de Ministros de la Unión Europea aprobó, el 11 de marzo de 1999, la Directiva 1999/13/CE, que tiene por objeto prevenir o reducir los efectos nocivos que para las personas y el medio ambiente pueden derivarse del trabajo con disolventes orgánicos en cantidades importantes. En España, el trabajo con COV's está regulado por el Real Decreto 117/2003, sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades.

Además de mejorar las propiedades mecánicas de la lata, el uso de las láminas de acero revestidas por tres capas de polímero hace que el aislamiento entre la pared interior de acero y la bebida sea mucho mayor, cumpliendo con creces la estricta normativa de la FDA (Administración estadounidense para los alimentos y fármacos). El Centro para la seguridad alimentaria y nutrición aplicada, de la FDA, a través de la normativa 21 CFR 170.3 [8], establece las especificaciones que deben seguir los envases de alimentos y bebidas, indicando además los distintos grados de toxicidad de los materiales en contacto con la comida (FCS, Food Contact Substances).

El revestimiento de polímero está formado por tres capas: una está unida directamente al acero con una adhesión máxima; la siguiente capa (la intermedia), además de contener el color, proporciona fuerza y propiedades mecánicas; y la tercera capa está diseñada especialmente para poseer buenas

1. INTRODUCCIÓN

características en la fricción, y también en la dureza.

El estirado es el proceso más crítico (porque es donde el material sufre una mayor tensión y deformación) dentro del conjunto de operaciones necesarias para la obtención de una lata; y es por eso por lo que se le presta más atención en el presente trabajo de investigación. Se propone como alternativa al método tradicional de fabricación de latas, la utilización de un revestimiento de polímero que soporte la etapa de estirado y que tenga además buenas características reológicas. Se evaluará tanto de forma teórica como experimental la procesabilidad de la lámina de acero revestida.

Para poder determinar la viabilidad tecnológica de la utilización de este material en la fabricación de las latas, se ha diseñado un simulador de la fase de estirado en el proceso de la embutición profunda (*Ironing Simulator*), construido ex-profeso en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la Universidad de Notre Dame (EE.UU.), y contando con la financiación de la empresa siderúrgica Arcelor-Mittal. Este simulador modeliza el proceso del estirado en dos dimensiones.

El material utilizado para la realización de los experimentos ha sido fabricado por Arcelor-Mittal, según las características generales proporcionadas.

Para poder abordar con éxito el objetivo propuesto, se establece el siguiente plan de trabajo y desarrollo, cuyos puntos más importantes se resumen a continuación:

- ① Preparación de la lámina de acero revestido en pequeñas tiras. Éstas se estiran entonces en el simulador utilizando herramientas de carburo de titanio.
- ② De estos experimentos se recoge todo tipo de información: velocidad de estirado, reducción del material, fuerza realizada, etc.
- ③ Se analizan los resultados y se determina bajo qué condiciones las capas de polímero soportan el proceso del estirado.
- ④ Se realiza una validación de los datos experimentales con el modelo teórico generado con el modelo del límite superior, utilizando para ello

análisis de correlación.

- ⑤ Con la información proporcionada por este análisis teórico se podrán realizar predicciones sobre las características que debe tener el acero revestido, y se compararan con varias observaciones experimentales.

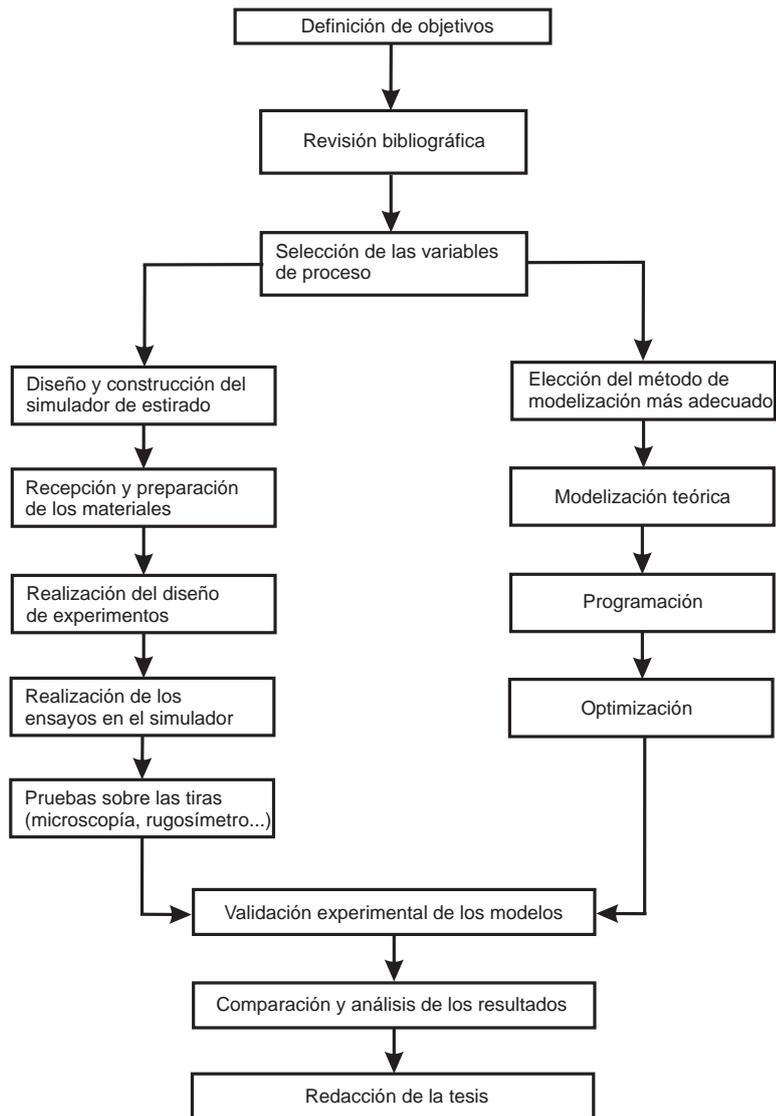


Figura 1.2: Etapas de desarrollo de esta tesis

Las etapas de desarrollo de la tesis se esquematizan en la figura 1.2. En primer lugar, se definen los objetivos a alcanzar con el desarrollo de la in-

1. INTRODUCCIÓN

investigación, para pasar con posterioridad a realizar una revisión bibliográfica para conocer si otros investigadores se han encontrado con la misma problemática, y de qué forma la han solucionado. También sirve para conocer las herramientas que utilizan, tanto para la modelización teórica como para la etapa experimental.

Mediante la selección de las variables de proceso se establecen los factores más importantes que influyen en la fase de estirado, y son esenciales para realizar una correcta modelización. También se tienen en cuenta para el diseño y construcción del simulador de estirado.

La modelización teórica se realiza tras elegir el método más conveniente. Con la programación de dos rutinas, se consigue implementar en un sencillo *software* las fórmulas que calculan con precisión el comportamiento del material. Estas rutinas se reprograman para que los resultados sean óptimos.

Por otro lado, se ha construido un simulador de estirado, en el cual se llevan a cabo los experimentos indicados por el Diseño de Experimentos. También se utiliza para realizar las pruebas que ayudaran a la validación experimental de los modelos teóricos generados.

Por último, y antes de proceder a la redacción de la tesis, se efectúa un completo análisis de los resultados obtenidos, tanto de forma teórica como experimental, llegando a una serie de conclusiones que son, al mismo tiempo, punto de partida para unas futuras líneas de trabajo.

1.3. Motivación

Si se logra demostrar la viabilidad de la utilización de este novedoso material para la fabricación de latas, las ventajas serian múltiples, y entre ellas se encuentran la mejora de las propiedades mecánicas de las latas, un menor impacto ambiental en su fabricación, un mayor aislamiento entre el contenido de la lata y la pared interior metálica, y una disminución de los costes de

fabricación al reducir las operaciones necesarias. Además, el hecho de utilizar láminas de acero ya preredadas, proporciona una mayor protección al metal ante la corrosión, como se ha comentado en el apartado anterior. Otra ventaja adicional de las capas de polímero radica en la utilización de éstas como lubricante sólido en los procesos de conformado, y especialmente, en el de la fase de estirado en la embutición profunda.

A pesar de llevar un recubrimiento interior de polímero, los líquidos contenidos en las tradicionales latas dejan en ocasiones un cierto sabor a metal en el paladar. Esto es debido a que el aislamiento entre la bebida y el metal no es correcto, por diversos motivos, como pueden ser algunas porosidades. El hecho de utilizar tres capas de polímero, como el material con el que se experimenta en esta tesis, hace que este aislamiento sea completo, y por consiguiente, no llegue a estar nunca en contacto el contenido de la lata con el metal.

La construcción del simulador de estirado proporciona los recursos físicos necesarios para futuros trabajos con otros tipos de material; y además, es fácilmente configurable para la adaptación a casos muy particulares. De igual manera, los programas realizados para la modelización teórica poseen una flexibilidad de cambios muy elevada, en la medida que se puede adaptar la simulación a cualquier configuración (tanto de material, de número de capas de polímero, de ángulos de matriz, etc.).

1. INTRODUCCIÓN

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

Hasta la fecha, se han publicado numerosos estudios sobre el proceso del estirado, estudiando la influencia de los parámetros de proceso, así como también el material empleado, el lubricante utilizado y las propiedades de las herramientas auxiliares, que afectan en mayor o menor medida a la calidad del resultado final. Como el uso de material revestido de polímero no está muy extendido a nivel industrial, casi todas las publicaciones que existen sobre investigaciones experimentales y teóricas están referidas solamente al estirado de material sin revestir. Sin embargo, si que existen algunos estudios que han explorado el uso de los polímeros como lubricantes sólidos para los procesos de la embutición, la extrusión y otras operaciones de conformado de metales.

2.1. El estirado sin revestimiento

La gran preocupación en el proceso del estirado es poder controlar los parámetros tribológicos. Es esencial poder minimizar la fricción existente entre la herramienta y la pieza, por las deformaciones que se generan en el proceso. Una baja fricción reduce la fuerza y la energía necesarias para poder

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

conseguir un determinado grado de deformación, y esto hace que se pueda utilizar maquinaria de menor potencia y mucho más económica. Además, se consumiría menos potencia y se conseguirían mayores deformaciones de una sola vez. Knepp y otros [9, 7] realizaron un análisis cualitativo de distintos lubricantes utilizados en la actualidad por la industria de fabricación de latas. En su estudio se experimenta con un lubricante patentado que utiliza una base de aceite, y que tiene en cuenta las consideraciones tribológicas y termodinámicas del proceso del estirado. Sus resultados resaltan las buenas cualidades de dicho lubricante en el proceso estudiado.

Son diversos los estudios experimentales que se han hecho sobre la tribología del proceso del estirado de metales. Saito y otros [10] han realizado experimentos sobre los mecanismos de fractura en el estirado de copas de aluminio. Identificaron tres situaciones distintas en las que el material salía defectuoso, según el tipo de sistema de lubricación utilizado.

Un investigador clave en el campo del estirado de metales ha sido Kuniaki Dohda, de la Universidad de Gifu, en Japón. En varias investigaciones, Dohda y otros [11-16] han realizado numerosos experimentos tribológicos del proceso de estirado de latas. Mediante la utilización de una máquina experimental que utilizaba un punzón y una matriz, caracterizaron el daño superficial del aluminio estirado valiéndose del coeficiente de fricción entre la pieza y la matriz [11]. Pudieron comprobar que se conseguía un mejor acabado superficial en la copa si se minimizaba el coeficiente de fricción sobre la superficie de la matriz. Además, hicieron también pruebas jugando con la viscosidad del lubricante utilizado, observando pequeñas variaciones en el acabado de la copa [12]. En otros experimentos similares que realizaron [13, 14] se analizan distintas variedades de materiales de herramientas. Se toman como variables de control la reducción conseguida, el ángulo de la matriz y la velocidad del punzón. Observaron en particular cómo utilizando una herramienta de acero con un tratamiento superficial de carburo de titanio conseguían unos bajos índices de fricción para reducciones medias. Unas pruebas las hicieron con la utilización de lubricantes, mientras que para otras prescindieron de ellos.

Avitzur [15] se centró en la realización de investigaciones más teóricas, y utilizó la función de la potencia del límite superior formulada por Prager y Hodge [16] para el estudio de una zona general de la deformación plástica, que a su vez está dividida en varias zonas rígidas más pequeñas.

Chang [17] presentó en su estudio un modelo analítico para el estirado de un material isotrópico. Desarrolló un modelo para la fuerza de estirado, utilizando para ello los métodos de los límites superior e inferior. En concreto, el método del límite inferior se utilizó para modelizar la plasticidad de la deformación. En cambio, empleó el método del límite superior para poder modelizar el comportamiento general del material en el estirado. El modelo desarrollado se compara finalmente con los experimentos de Huang y otros [18], alcanzando también resultados similares. Además, partiendo del modelo de fuerza de estirado, también desarrolló ecuaciones para el cálculo del ángulo óptimo de la matriz y también para el cálculo del ratio límite de estirado (al que le llama *LIR*). El ángulo óptimo de la matriz queda definido como aquel que minimiza la fuerza requerida de estirado, y su valor se incrementa cuando lo hace la fricción y el ratio de estirado.

Chang y Wang [19] realizaron otra modelización, pero en este caso se trataba de la fuerza de estirado de copas que previamente habían sido embutidas, utilizando el modelo de fricción de Coulomb. Sus predicciones teóricas se compararon con los experimentos de Saito y otros [10], con resultados excelentes, indicando que el modelo podría servir como una buena herramienta para analizar la influencia que ejercían los diferentes parámetros de proceso.

Rubio y otros [20] han estudiado cómo calcular la fuerza de embutición en el trabajo con hilo y chapa, realizando una comparación con los métodos de modelización con elementos finitos y con el método slab. Llegaron a la conclusión que con la simulación con elementos finitos se llegaba a unas soluciones más precisas que con el método slab. Por contra, este último método resultaba mucho más fácil de aplicar, sin la necesidad de cálculos complejos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Tirosh y otros [21] han realizado un interesante estudio en el cual presentan un proceso único de estirado hidrostático, donde el proceso tradicional es reemplazado por un dispositivo en el cual la pieza está sumergida en un baño de un fluido hidrostático. La presión del fluido ejerce una fuerza normal al eje del punzón, y también normal a la dirección de recorrido del punzón cuando pasa a través del anillo de estirado. Trabajos previos [22] han determinado que si se produce un incremento en la fricción entre la copa (pieza) y el punzón, resulta que se necesita menor fuerza en el punzón para llevar a cabo dicha operación. En el proceso de estirado hidrostático, la presión del fluido normal a la copa se utiliza para incrementar la carga transferida a la superficie del punzón y disminuir los esfuerzos de tensión generados sobre la pared de la copa, y conseguir de esta forma una reducción en la fuerza global necesaria. Los resultados se contrastaron de forma experimental utilizando análisis basados en los teoremas de los límites superior e inferior.

2.2. El estirado con polímero revestido

Son varios los estudios que se han centrado en el uso de revestimientos de polímero como lubricantes sólidos en el conformado de metales. Estos polímeros se han usado como lubricantes en operaciones como la embutición profunda y la extrusión [24-27]. Son varias las ventajas a la hora de utilizar un lubricante sólido frente a un lubricante en estado líquido. Cuando se utiliza un lubricante líquido con cierta viscosidad, como por ejemplo el aceite, la lubricación se consigue al estar separadas las dos superficies que se deslizan entre ellas por una fina capa de lubricante, lo cual ayuda a soportar una carga normal [23]. Sin embargo, cargas muy elevadas, arranques y paradas frecuentes, y otro tipo de situaciones pueden hacer que la capa de fluido se haga más fina, de tal manera que sea posible el contacto directo entre ambas superficies en zonas con una mayor rugosidad. Los lubricantes sólidos son muy útiles precisamente para eliminar este tipo de contacto directo, puesto que existe una barrera física entre las superficies. Materiales como el jabón, ceras,

grafito, fosfatos, polímeros, etc., pueden ser buenos ejemplos de lubricantes sólidos.

En otros estudios experimentales se han utilizado polímeros como lubricantes en operaciones de conformado de metales, y no solamente en el proceso de estirado. Mear y otros [24] analizaron el uso de láminas de lubricante plástico para diversas aplicaciones del proceso de la embutición profunda. Rao [25] investigó sobre el uso del polietileno como lubricante para la embutición profunda. Sugiere varios métodos de aplicación para el revestimiento, como puedan ser el pegado en adhesivo, la utilización de spray y el revestimiento por extrusión.

Eickenmeyer y otros [26] analizaron las ventajas tribológicas y ambientales de la utilización de una lámina de lubricante sólido frente a la lubricación tradicional de jabón en polvo, para la embutición. El uso del lubricante en estado sólido mejoró el rendimiento en la zona de trabajo. Además, vieron que era posible eliminar los aditivos químicos, para de esta manera, evitar la contaminación del agua y la generación de otros desechos propios del proceso.

Harkness [27] realizó un análisis cualitativo de varios lubricantes sólidos. Enumeró una larga lista de ventajas, desventajas y posibles usos.

Pero quien realmente contribuyó de manera clave al análisis teórico de la lubricación en estado sólido fue W.R.D. Wilson, de la Universidad de Washington. Muchas veces, los revestimientos son muy difíciles de modelar, y el hecho de tratar al lubricante como un sólido perfectamente rígido en términos de plasticidad, ha hecho posible el uso de los tradicionales métodos del límite superior e inferior para poder desarrollar las ecuaciones del modelo. Un análisis hidrodinámico del lubricante [28] hizo que Wilson encontrara una fórmula que calculara el espesor de la lámina de lubricante en casos tan diferentes como una extrusión o un forjado. Estos resultados se compararon también con los obtenidos de forma experimental, concluyendo que la rugosidad superficial tiene un gran efecto sobre los procesos de transporte del lubricante. Wilson y Halliday [29] realizaron un análisis utilizando el método

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

del límite superior de la lubricación sólida empleado con anterioridad en el proceso de la embutición. Ambos lograron una optimización de la función de energía, empleando para ello un campo de velocidades discontinuas y un hodógrafo, produciendo varias familias de curvas paramétricas para las distintas propiedades del material y geometrías del proceso. Los resultados del modelo se compararon posteriormente con los experimentos de embutición que realizaron Wilson y Cazeault [30], con resultados muy parecidos. Los materiales con los que trabajaron fueron una aleación de aluminio con revestimiento de jabón o cera de parafina.

Pero a pesar de las numerosas publicaciones existentes sobre otros revestimientos y procesos, se posee poca información sobre las características del estirado de una lámina revestida de polímero. Shimuzu [31] consiguió poder estirar una lata revestida de polímero. Realmente utilizó un proceso de embutición y estirado para la lata, que presentaba un revestimiento polimérico, presente en ambos lados de la misma. Se consiguieron reducciones que variaron entre el 10 % y el 50 %. En el proceso que se propuso, la parte última de las paredes de la lata se dejaba más gruesa que el resto porque la operación en la se formaba posteriormente el cuello se tenía que realizar con total garantía. Probó dos materiales distintos (con bases de aluminio y de acero) y consiguió estirarlos. Después, analizó visualmente las superficies de los revestimientos, sin apreciar daño alguno, tanto en la parte interior como en la exterior de las latas. En ambos casos, el revestimiento orgánico le sirvió para reemplazar el lubricante tradicional, que estaba basado en agua.

Con anterioridad a esta tesis, se han llevado a cabo otras investigaciones relacionadas con el revestimiento de polímeros en la Universidad de Notre Dame. Jaworski y Schmid [32] demostraron que las planchas laminadas de acero revestido de polímero se podían utilizar perfectamente para el proceso del estirado. Sus experimentos concluyeron en que solamente se podían conseguir buenos resultados en el estirado si los ángulos de la matriz eran bajos. En el caso del uso de ángulos más elevados, la capa de polímero adherida al acero quedaba seriamente dañada.

Tanto Kawai y otros [33] como Kenny y Sang [34] desarrollaron también un dispositivo para medir el coeficiente de fricción sobre la superficie de la matriz en el proceso de estirado. Con la ayuda de un punzón, se empujaba una tira de metal a través de un anillo. Utilizaron diversas variables, como la dirección del estirado, la reducción conseguida y la lubricación utilizada, para poder estudiar sus efectos en el coeficiente de fricción y acabado superficial.

Wang y otros [35] construyeron otro dispositivo, en el cual una tira de metal pequeña y fina se estiraba entre una matriz y un tambor rotatorio. Se midieron tanto el esfuerzo de torsión del tambor como las fuerzas normales y tangenciales en la matriz, para poder calcular los coeficientes de fricción del punzón y de la matriz. Van der Aa y otros [36] utilizaron un modelo de elementos finitos para simular el estirado de material metálico revestido de polímero. Verificaron sus resultados con un dispositivo sencillo de estirado de pequeñas tiras metálicas. Encontraron que la deformación por cizalladura era más acentuada en la parte del aluminio que en la del revestimiento (polímero), el cual solamente reducía su espesor.

Saito y otros [10], al igual que Kawai y otros [12], utilizaron otro dispositivo similar con punzón para el estirado de copas y poder medir las fuerzas de fricción existentes tanto en el punzón como en la copa.

Appleby y otros [37] utilizaron matrices transparentes en un aparato de embutición para poder medir las velocidades del material al pasar por ellas. De esta manera, obtuvieron información que les sirvió como entrada para poder realizar un análisis por elementos finitos. Doege y otros [38], al igual que Deneuille y Lecot [39], combinaron el uso de experimentos de estirado de tiras con un programa de elementos finitos para obtener coeficientes de fricción para la superficies de la matriz y del punzón. La aproximación numérica/experimental que realizan puede considerarse como una buena herramienta de análisis para el proceso del estirado.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Jaworski y otros [4] investigaron las características de fricción y de procesabilidad de dos aceros, uno con un recubrimiento de estaño y otro con un revestimiento de polímero. Huang y Schmid [40, 41] examinaron el efecto del calor en el estirado de una pieza de acero revestida de polímero. Esta investigación perseguía simular el uso propuesto de los aceros revestidos de polímero sin ningún refrigerante, en aquellos casos en los que la temperatura de la matriz sea más alta que la temperatura ambiente. Después de numerosos experimentos, demostraron también que el estirado sin un refrigerante como pueda ser el agua no es muy recomendable, debido en gran parte a la reducción significativa de la supervivencia del material al proceso.

Capítulo 3

Modelización teórica

Se ha desarrollado un modelo teórico del proceso de estirado del revestimiento de tres capas, para poder posteriormente llevar a cabo una comparación con los resultados experimentales obtenidos con el simulador de estirado. Se espera también que dicho análisis proporcione alguna idea sobre los mecanismos que regulan el proceso del estirado, y del papel que cada variable de proceso desempeña sobre el éxito final de la operación. Es en esta última consideración donde la obtención de un modelo teórico del proceso sería de gran ayuda.

Existe un número elevado de variables de proceso, como por ejemplo el grosor de los revestimientos, el ángulo del vértice de la matriz, el porcentaje de reducción, etc. Aunque el simulador de estirado posee la capacidad de poder cambiar todas estas variables de proceso de una forma fácil y rápida, los experimentos realizados no garantizan que se caracterice completamente el sistema. El hecho de tener un modelo teórico permitirá realizar predicciones sobre el posible éxito del estirado sobre revestimientos multicapa de polímero en aceros.

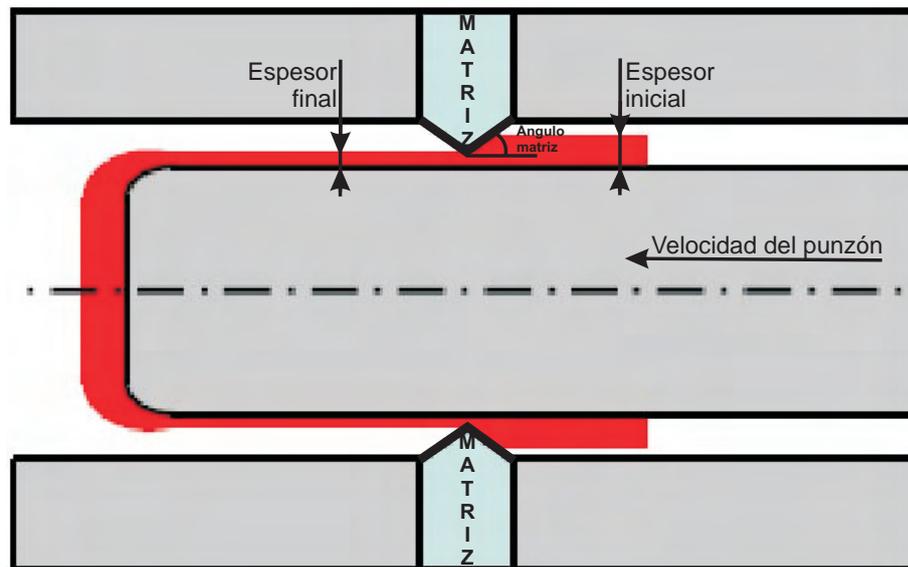


Figura 3.1: Representación gráfica de la fase de estirado en la fabricación de una lata.

3.1. Las variables que intervienen en la fase de estirado

Es importante conocer las variables que intervienen en la fase de estirado del proceso de la embutición profunda, para poder realizar de forma correcta la modelización teórica, e incluso el diseño y construcción del simulador de estirado.

En la figura 3.1 se puede observar la representación gráfica de una operación de estirado en el proceso de fabricación de una lata metálica. Las variables que influyen para que este proceso (tabla 3.1) sea exitoso son: el ángulo del vértice de la matriz, la reducción aplicada al material, la velocidad del punzón, el material y la temperatura [42]. En la figura solamente se representan las tres primeras.

Si el material cambia, lo hace también el coeficiente de fricción entre éste y la matriz, y entre éste y el punzón. Por tanto, cada material diferente hará

3.1. LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA FASE DE ESTIRADO

Variable
Material
Temperatura
Ángulo del vértice de la matriz
Reducción aplicada
Velocidad del punzón

Tabla 3.1: Variables que influyen en el estirado de un material.

que este coeficiente también cambie. Al mismo tiempo, la tensión de cortadura, es distinta para cada material, y los modelos teóricos generados han de contemplar esta posibilidad para que sean válidos para distintos materiales.

Cuando un metal es sometido a una temperatura elevada, éste modifica su estructura. En el caso de los metales, esta temperatura es muy superior a la necesaria para los polímeros. Al trabajar con un material revestido por capas de polímero termoplástico, la temperatura aplicada al mismo debe de estar acotada entre la temperatura de transición vítrea y la de fusión, pues el polímero sería inservible más allá de este último valor. Cuando la temperatura se encuentra entre estos valores, el polímero aumenta su viscosidad y su capacidad de deformación, incrementándose también su poder de lubricación [43]. La temperatura de la superficie es un factor muy importante en la lubricación, pues el trabajo necesario para vencer el rozamiento se genera en una capa muy delgada, y de forma rápida, de manera que la temperatura de la interfase aumenta hasta un punto que dependerá del rozamiento y de la conductividad térmica de los materiales [44].

Cuando se produce una reducción, el área de contacto entre la matriz y el material se ve reducida si el ángulo del vértice de esta matriz se incrementa. La *presión* que la matriz ejerce sobre el material en el espacio que existe entre ambos es casi independiente del ángulo de la matriz, y por tanto, la *fuerza* entre la matriz y el material aumenta al hacerlo el área de contacto mencionada [45]. Para cualquier material, existe una reducción máxima a la que puede ser sometido.

Por último, la velocidad del punzón, directamente proporcional a la potencia mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6, es una variable fundamental para el cálculo de las velocidades a través de las líneas de desplazamiento [44].

3.2. El análisis del límite

La mayor parte de la teoría del conformado de los metales se ocupa finalmente de la predicción de las tensiones mecánicas o de los esfuerzos que actúan durante la deformación del metal, y en consecuencia, de las fuerzas que se deben aplicar. A diferencia de la teoría general de la elasticidad y de la plasticidad, la mayor parte de la teoría del conformado de metales se puede expresar en función de las tensiones principales sin necesidad de recurrir al análisis tensorial [44].

El hecho de calcular las soluciones exactas que proporcionen las cargas que se requieren para el conformado de metales, y para la deformación plástica en general, es a menudo una tarea muy difícil. Por un lado, se debe establecer un equilibrio de tensiones; mientras que por otro, y de forma simultánea, se tiene que establecer también un comportamiento que sea cinemáticamente correcto para el flujo del material, a lo largo de toda la pieza en deformación. Afortunadamente, los *métodos del límite* eluden esta dificultad. Este procedimiento consiste en determinar el *límite inferior*, o sea, la carga que es demasiado pequeña para deformar el metal, y también en determinar el *límite superior*, o sea, la carga demasiado grande. La carga real debe entonces estar entre estos dos límites, y la habilidad en la aplicación del método descansa en la elección de los modelos de deformación que hacen esta diferencia lo más pequeña posible [44]. La diferencia entre ambos análisis radica en que el del límite inferior resuelve el problema del equilibrio de tensiones, mientras que el del límite superior lo hace con las condiciones cinemáticas del flujo del material. Debido a las deformaciones plásticas que se generan en el proceso del estirado, la utilización del método del límite superior será muy útil en la generación de una solución que garantice la deformación requerida por el

material.

Son varios los autores que utilizan el método del límite superior para la modelización de la embutición profunda. Chang [17] realiza una modelización de la fase de estirado en la embutición profunda utilizando para ello el teorema del límite superior, y compara los resultados obtenidos con los realizados de forma experimental al emplear dos ángulos de matriz: $10,2^\circ$ y $15,2^\circ$. La coincidencia entre datos es notable y concluye que el ángulo óptimo de matriz incrementa a medida que aumenta la fricción y la reducción aplicada.

Rubio y otros [46] buscan soluciones para los procesos de embutición con la aplicación del teorema del límite superior. Escogen la aplicación de este teorema como alternativa a los exigentes recursos y complejos cálculos que supone la aplicación del método de los elementos finitos. Estudian los efectos que las distintas zonas consideradas pueden tener sobre los resultados, y realizan comparaciones al tomar 1, 3 o 5 zonas rígidas en el modelo. Realizan al mismo tiempo un estudio sobre la fricción tomando como base dos hipótesis: Coulomb y fricción parcial entre la matriz y el material. En otros trabajos [47, 48] emplean el teorema del límite superior para realizar análisis energéticos en función de variables como la reducción experimentada, la fricción, el ángulo de la matriz... Este teorema también es utilizado para el cálculo de las pérdidas de energía producidas por el rozamiento en los procesos de embutición de tubos por un punzón de tipo cónico [49]. Por último, también analizan el endurecimiento del material en otro de sus trabajos [50], utilizando el teorema del límite superior y escogiendo tres tipos distintos de material: aleación de cobre, aluminio y acero inoxidable.

Delarbre y Montmitonnet [51] también realizan una modelización de la fase de estirado por el teorema del límite superior para la fabricación de recipientes metálicos. Al mismo tiempo, mediante el empleo de elementos finitos, consiguen modelizar igualmente el proceso. Ambos son validados mediante la realización de una serie de experimentos sobre acero inoxidable de un grosor de 1,1 mm, y utilizando 5 matrices distintas. En una de sus conclusiones se indica que el teorema del límite superior es una buena aproximación al mo-

delado mediante elementos finitos, con las limitaciones propias que presenta.

Courbon [52], Sun y otros [53], Huang y otros [54, 55, 41], y Jaworski y otros [32, 4] también adoptaron el teorema del límite superior como método para la modelización de la fase de estirado, por su sencillez de implementación, rapidez en el cálculo y su carácter generalista.

3.3. El teorema del límite superior

Como describen Hosford y Caddell [45] en su libro, el teorema del límite superior parte de la premisa de la existencia de un campo de flujo cinemáticamente admisible, dentro del cual el material sufre las deformaciones que sean necesarias hasta alcanzar su forma final. Un campo cinemáticamente admisible es aquel que satisface cualquier restricción de velocidad o desplazamiento impuestos por el sistema. Un ejemplo de restricción podría ser el hecho de forzar al material bajo deformación a que fluya paralelo a una superficie rígida, como pueda ser la superficie que tenga el punzón o la matriz. El material no puede penetrar dentro del punzón o de la matriz, ni tampoco salir. Tras calcularse la geometría de este flujo, la energía necesaria para hacer que se alcance la forma final se calcula utilizando las propiedades del material, para entonces poder determinar las cargas externas máximas que se pueden soportar. Como se ha visto con anterioridad, la predicción del límite superior para el cálculo de las cargas externas o de las tensiones aplicadas será igual o mayor que la solución real, como ha sido comprobado por varios investigadores [56, 16], pero atribuido de forma generalizada a Drucker y Prager [56]. Para realizar una buena aproximación a la solución exacta, se optimiza de forma numérica la geometría de las líneas de flujo para poder determinar la mínima energía disipada, así como la mínima carga externa a aplicar para poder realizar la deformación deseada. Como es obvio, el límite superior más bajo será la mejor aproximación a la solución real.

En la utilización del método del límite superior para los procesos de conformado de metales, a menudo conviene simplificar el problema a un plano en dos dimensiones, coincidiendo de esta manera con la misma simplificación realizada en los análisis experimentales de esta tesis. Además, se asume también que la pieza de material tiene un comportamiento perfectamente plástico, siendo ignorados los fenómenos de la acritud, con un aumento de la resistencia a la deformación, y también de la velocidad de deformación.

La mayor deficiencia que tiene el método del límite superior es que se necesitan conocer *a priori* los desplazamientos. Esto es corregido por la obtención de los posibles campos que indica la teoría de las líneas de deslizamiento, a través de la evidencia mostrada en los experimentos, o simplemente mediante el uso de la intuición. Los campos considerados en este trabajo se limitarán a los resultados encontrados en las pruebas de estirado efectuadas: estirado correcto y estirado defectuoso (corte o daño en alguna capa de polímero).

3.3.1. Los campos de velocidades discontinuas

Para poder aplicar el método del límite superior de una forma correcta, es necesario definir un campo de velocidades discontinuas. Éste consiste en la división de la zona general de deformación en un grupo de regiones más pequeñas, en las que se asume que la velocidad de cada partícula integrante se mantiene constante. En la figura 3.2 se representa de forma esquemática un campo de velocidades discontinuas para el estirado de una tira de material sin revestir. El dibujo no se encuentra a escala, ya que el ángulo de la matriz, ϕ , es mucho mayor que el realmente se suele utilizar. En este caso particular, la zona de deformación se ha dividido en tres zonas: A, B y C. El punzón y la matriz se referencian con las letras P y M, respectivamente. Se considera que la deformación se localiza sobre las líneas que definen su geometría. Cada línea dibujada corresponde a un plano en la dirección perpendicular a la superficie del punzón (es decir, en la dirección del grosor de la tira de material), puesto que la formulación del problema se ha efectuado en un

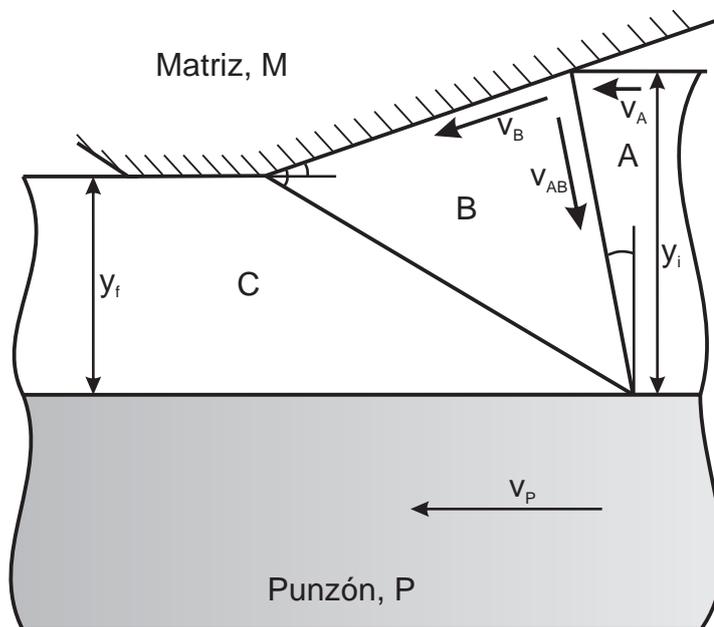


Figura 3.2: Campo de velocidades discontinuas para el *estirado* sin revestimiento.

plano de deformación en dos dimensiones, con un grosor finito. Es importante volver a recalcar que cada una de las zonas posee una velocidad constante de sus partículas, y a su vez, distinta de la de las partículas de otras zonas. Por lo tanto, estos planos representan una discontinuidad de la velocidad entre zonas. Cuando un material sufre deformación plástica, el flujo de éste debe de ser tal que la velocidad relativa entre zonas adyacentes, cuando se expresen en forma de vector, sea tangencial al plano de deformación. Así pues, cuando las partículas cruzan la frontera entre dos zonas, el cambio en su velocidad se produce solamente en la dirección de la frontera. Como se muestra en la figura 3.2, si la velocidad de la zona A se expresa como v_A y la velocidad de la zona B se expresa como v_B , la velocidad relativa v_{AB} debe de tener la dirección mostrada.

En los planos en los que el material contacta con una zona muy rígida, como pueda ser la matriz, se genera una disipación de energía causada por la fricción, como ocurre por ejemplo con el plano BM. Todos los demás planos, como el CB y el AB, se consideran planos en los que se disipa energía por cizallamiento. Tresca [57] fue quien observó en primer lugar que los planos de cizallamiento expresados de forma discreta eran el modo de deformación plástica seguido por todos los metales.

3.3.2. El hodógrafo de velocidades

La realización de un hodógrafo servirá para poder visualizar las velocidades relativas entre las distintas zonas de deformación. Por tanto, un hodógrafo no es ni más ni menos que la representación gráfica de velocidades. Puesto que se asume que cada zona del campo de discontinuidades representa un área o zona con velocidad constante, ésta quedaría representada en el hodógrafo por un simple punto. En las figuras 3.3-3.5 se representan varias etapas en la formación del hodógrafo para el campo de discontinuidades de la figura 3.2.

Para poder ilustrar los principios comentados con anterioridad, considé-

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

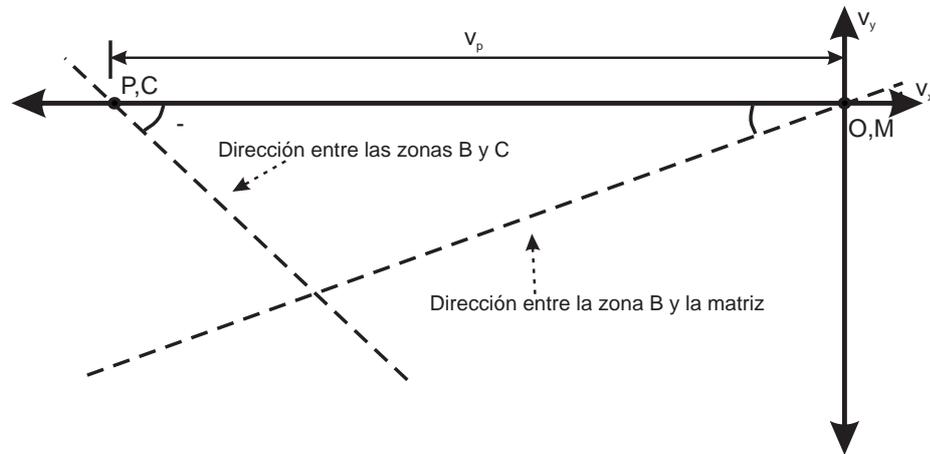


Figura 3.3: Localización sobre el hodógrafo de los bordes de la zona B con la zona C y con la matriz.

rese la zona B de la figura 3.2. Para poder localizar y situar una zona sobre el hodógrafo, se debe conocer como mínimo la posición de dos zonas adyacentes. Puesto que la matriz, M, se encuentra en un estado estacionario, es decir, sin velocidad alguna; su posición se emplaza en el origen, junto con el observador, O, como se puede apreciar en la figura 3.3. La velocidad del punzón v_p es un valor que se conoce inicialmente, así que el punto P se puede situar con facilidad a lo largo del eje de abscisas. Para poder asegurar la continuidad del flujo de material a su salida de la matriz, la zona C y el punzón deben de tener la misma velocidad en su paso por la parte más estrecha de la matriz. Con esta premisa, el punto C se sitúa sobre la misma posición que el punto P, es decir, el que representa a la velocidad del punzón. Estando ya localizadas la zona C y la matriz M, se puede perfectamente situar el punto representante de la velocidad de la zona B. Puesto que el material de la zona B solamente se puede mover a lo largo de las direcciones establecidas por sus bordes rígidos, el movimiento entre B y la matriz solamente puede existir en la dirección establecida por la superficie exterior de la matriz, formando un ángulo ϕ con la horizontal. Del mismo modo, la dirección de la velocidad relativa entre las zonas C y B debe ser la misma que la de la frontera CB. Si se observa la figura 3.3 se puede apreciar que esta dirección presenta un

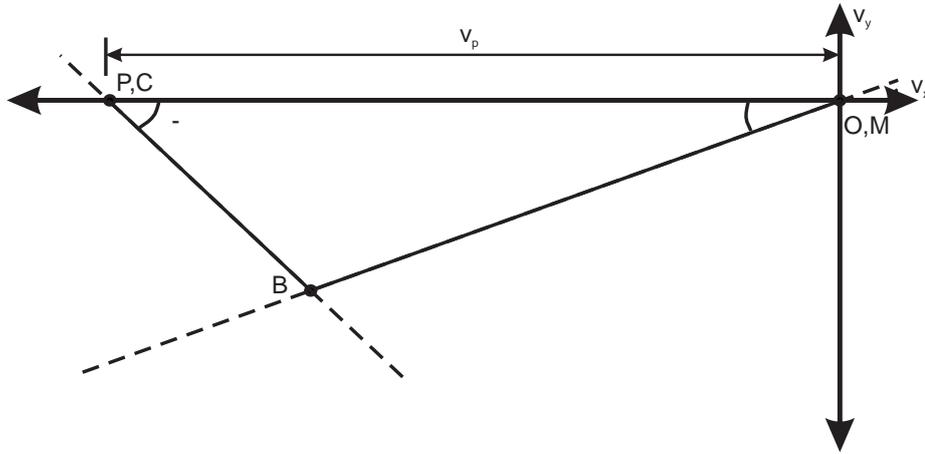


Figura 3.4: Localización del punto que representa a la zona B.

ángulo de $\omega - \phi$ respecto a la horizontal, exactamente igual que se mostraba en el campo de velocidades discontinuas. Puesto que el punto B pertenece a ambas líneas, solamente se puede definir su posición por el punto de intersección entre estas dos rectas, tal y como se puede apreciar en la figura 3.4. La velocidad de la zona que quedaría, la A, se dibujaría de una manera similar a como se ha hecho con la B, quedando definido su punto como se dibuja en la figura 3.5. Se puede apreciar como la zona A, que es aquella en la que todavía no se produce deformación alguna, posee una velocidad de sus partículas distinta a la que se mueve el punzón.

3.3.3. Consideraciones energéticas

Para poder determinar la carga necesaria para producir deformación plástica, se necesita conocer la cantidad de energía disipada en el proceso. Esta energía se puede calcular conociendo las pérdidas de energía por cizallamiento y por fricción, producidas en el campo de discontinuidades. La potencia queda definida con la ecuación

$$P = Fv, \quad (3.1)$$

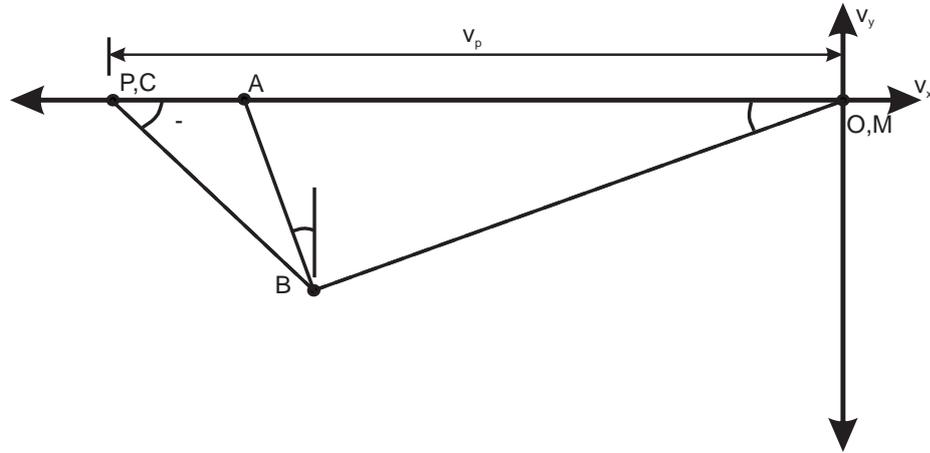


Figura 3.5: Hodógrafo final para el caso de la figura 3.2.

donde F es la fuerza aplicada y v es la velocidad. Como resultado, la potencia consumida en cada discontinuidad se puede determinar mediante la fuerza (ya sea por cizallamiento o por fricción), y la velocidad relativa a lo largo de ese plano. De esta manera, la fuerza de cizallamiento se puede expresar como

$$F_c = \tau A, \quad (3.2)$$

donde τ es el esfuerzo cortante a lo largo del plano, y A es el área de este plano. Sin embargo, puesto que el material es perfectamente plástico, τ se puede reemplazar por k , que es la tensión de cizalladura; y el área A también puede ser reemplazada por la , donde l es la longitud del plano, y a es el ancho. Así pues, la ecuación 3.2 también se puede expresar de la siguiente manera

$$F_c = kla, \quad (3.3)$$

La fuerza de fricción entre distintos materiales se puede expresar como una variación de la tensión de cizallamiento. Kalpakjian [58] describe que el cálculo del coeficiente de rozamiento de Coulomb no es exacto cuando se trabaja con cargas elevadas, como puedan ser las que se generan en trabajos de conformado de metal como por ejemplo el *estirado*. Para cargas muy elevadas

das, el contacto que se establece entre dos superficies suele generar pequeñas microsoldaduras en determinadas zonas, teniendo el conjunto una tensión cortante, τ_i . En el *estirado*, el deslizamiento de una superficie respecto a otra genera un esfuerzo cortante [45] que hará que sea menor la fuerza normal bajo la que se producirá la deformación plástica. Es en este caso donde se puede aplicar el modelo de Tresca [57], que expresa que

$$F_f = mkA_a = mkla, \quad (3.4)$$

donde m es el coeficiente de fricción que indica el grado de adhesión entre superficies, k es la tensión de cizalladura del material más blando, y A_a es el área de contacto entre ambas superficies ($A_a = la$).

Un valor de $m=0$ indica que entre las superficies no existe fricción alguna, mientras que $m=1$ indica que existe una total adhesión entre ambas superficies, y en consecuencia, el plano de fricción pasa a convertirse en un plano de cizalladura. La potencia que se disipa en un plano de fricción es

$$P_f = F_f v = mklav \quad (3.5)$$

y la que se disipa en uno de cizalladura es

$$P_c = F_c v = klav, \quad (3.6)$$

donde v es la velocidad relativa a lo largo del plano adyacente a dos zonas.

Las longitudes, l , de las ecuaciones 3.5 y 3.6, se obtienen del campo de velocidades discontinuas de forma que sean proporcionales a una longitud inicial conocida, como por ejemplo el espesor inicial de la tira de material, utilizando para ello relaciones trigonométricas. Las velocidades relativas, v , de las ecuaciones 3.5 y 3.6, se obtienen sin embargo del hodógrafo de velocidades. Por ejemplo, si se observan las figuras 3.2 y 3.5, la diferencia que existe en la velocidad sobre la frontera común de las zonas C y B está representada en el hodógrafo por la línea CB, ya que los puntos C y B representan las velocidades respectivas de dichas zonas. El valor de esta diferencia de velo-

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

cidad es sencillamente la longitud de la línea CB, que se calcula de forma proporcional a un valor ya conocido, que en este caso es el de la velocidad del punzón v_p , utilizando para ello relaciones trigonométricas. La potencia total disipada por el conjunto quedaría determinada por la siguiente expresión

$$P_{total} = \sum_i P_{c_i} + \sum_j P_{f_j}, \quad (3.7)$$

donde i es el número de planos de cizalladura, y j es el número de planos de fricción. Por el teorema de la conservación de energía, esta suma indicará la potencia requerida en el proceso.

3.4. Procedimiento matemático

Como se ha mencionado con anterioridad, la potencia requerida por el proceso, y determinada por la ecuación 3.7 será, por el teorema del límite superior, más elevada que la solución real. Por tanto, la minimización de la expresión anterior de potencia permitirá alcanzar una solución que se aproxime a la exacta.

Mediante la utilización del teorema del límite superior se establece que el campo de deformaciones tenga una geometría establecida *a priori*. La precisión del modelo dependerá en gran medida de esta geometría. Pero sin embargo, no hay manera posible de conocer la mejor geometría posible, debiéndose elegir una aproximación al resultado óptimo mediante la técnica de prueba y error. Se han probado, para cada modelo, varios tipos distintos de campos de discontinuidades, siendo comparados posteriormente. En cada uno de estos casos, se ha considerado estar más próximo a la solución real aquel de todos que requería de la menor potencia; pero sin embargo, la exactitud de esta afirmación está limitada por el número de campos dibujados, siendo más exacto aquel con mayores divisiones.

Para poder utilizar y desarrollar computerizadamente el teorema del límite superior se ha realizado la programación de dos programas (cuyos códigos se encuentran en los Apéndices A y B) que incorporan varias rutinas de computación numérica [59]. Estas son las conocidas como *powell*, *linmin*, *mnbrak*, *f1dim* y *brent*. Todas ellas persiguen minimizar una función dada, y han sido probadas y contrastadas con éxito por muchos investigadores de todo el mundo.

En la programación de los modelos se han incorporado todas las ecuaciones resultantes del hodógrafo de velocidades y de las líneas de deslizamiento, así como las del cálculo de la potencia. Para ello, se ha utilizado el lenguaje C++ (por el conocimiento sobre la programación en este lenguaje y porque se ha tenido acceso a las rutinas de computación numérica escritas en C++), habiéndose realizado algunas adaptaciones a los casos estudiados. El programa empieza asignando un valor a un punto en un espacio N -dimensional, y sigue desde allí una dirección indicada por un vector n hasta que se encuentra un valor más bajo de una función $f(P)$ de N variables. Después se sigue otra dirección indicada por el vector n hasta que nuevamente se encuentre otro valor más bajo, y así sucesivamente hasta que resulte imposible minimizar la función $f(P)$.

Todos los datos de salida se envían a un fichero a la espera de ser procesados y analizados con posterioridad.

3.5. Modelos de comportamiento

Para la presente investigación, se han tenido en cuenta dos posibles resultados como consecuencia del proceso de estirado sobre el material: estirado correcto y estirado defectuoso. En este último caso, el material, por diversas razones, sufre distintos daños que no lo hacen apto. Al estar revestido el acero por tres capas de polímero, si el material se daña en el proceso, se producirá una de estas tres consecuencias:

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

- que se haya dañado o se hayan producido cortes en la capa de polímero superior,
- que se hayan dañado o se hayan producido cortes en las capas superior e intermedia,
- que el daño o corte haya llegado hasta la tercera capa, la inferior.

Se han desarrollado dos modelos utilizando el teorema de límite superior: uno para el caso de producirse un estirado correcto, y otro para el caso de producirse un estirado defectuoso. La potencia necesaria para producir daños en las capas de polímero intermedia e inferior (ver figura 4.20), es en todos los casos, superior a la necesaria para producir solamente daños en la capa de polímero superior. Por ello, solamente se ha estudiado este último caso para la elaboración del modelo del estirado defectuoso.

Ambos modelos se caracterizan por seguir una serie de simplificaciones, que ayudan a reducir su complejidad. Como se ha especificado con anterioridad, se ignoran los efectos de la acritud en la deformación y de la velocidad de deformación. Los materiales se consideran que están en un estado rígido, y que son sólidos con un comportamiento perfectamente plástico con esfuerzos cortantes constantes, condición necesaria para que se produzca la deformación en los planos de corte definidos. Pero sin embargo, un polímero rara vez se comporta como un material perfectamente plástico, ni tampoco se deforma a lo largo de planos discretos. En cambio, el uso de una cantidad razonable de planos de deformación, mejorará la precisión en la estimación del cálculo de la potencia total. Así pues, según Challen y otros [60], se puede atribuir a un polímero una determinada resistencia al corte, con lo que se puede aplicar con más precisión un modelo perfectamente plástico, asumiendo una tensión de cortadura constante. Esta tensión queda definida, en valor medio, por la siguiente ecuación

$$\bar{k} = \frac{1}{\gamma_t} \int_0^{\gamma_t} k(\gamma) d\gamma, \quad (3.8)$$

donde \bar{k} es la resistencia a la cortadura media, γ_t es la deformación total por el esfuerzo cortante y k es la tensión de cortadura. En los modelos que se

presentan, la resistencia efectiva a la cortadura de las capas de polímero, k_i , se expresa en función de la resistencia a la cortadura de la pieza, k_p .

Cada unión entre dos materiales distintos de la pieza tiene un coeficiente de fricción único: la unión entre el punzón y el metal queda caracterizada por m_1 , la unión entre el metal y la capa inferior de polímero por m_2 , la unión entre la capa inferior e intermedia de polímero por m_3 , la unión entre la capa intermedia y superior por m_4 , y por último, con m_5 se caracteriza a la fricción existente entre la capa superior de polímero y la matriz.

3.5.1. Modelo de estirado correcto

En la figura 3.6 se representa un campo de velocidades para el caso de producirse un estirado correcto en un material revestido por tres capas. El diagrama no se ha dibujado a escala para mejorar la comprensión visual, y la nomenclatura aplicada para los coeficientes de fricción entre los distintos materiales es la mencionada con anterioridad. El plano G-Matriz tiene una longitud igual o mayor que la de la parte horizontal de la matriz.

Los planos de deformación, tanto en las capas de polímero como en el metal, se expresan en función de los ángulos α_1 hasta α_{10} , y de los ángulos β_1 hasta β_{11} , así como también según los valores especificados de reducción y de los ángulos ϕ , μ , τ y γ . Como se puede apreciar en la figura, se ha adoptado el criterio de enumerar los ángulos que forman las fronteras de regiones con la vertical haciendo uso de la letra griega α . Mientras tanto, con la letra griega β se enumeran los ángulos que forman entre sí algunas regiones adyacentes. El ángulo ϕ es el que forma la zona de la matriz donde contacta el material por primera vez con la horizontal, y coincide con el ángulo de la matriz. Los ángulos μ , τ y γ , son los que forman cada una de las tres capas de polímero con la horizontal, respectivamente.

Solamente se toman en consideración, para la elaboración del modelo, los ángulos mostrados en la figura 3.6, pues todos los ángulos se pueden expresar

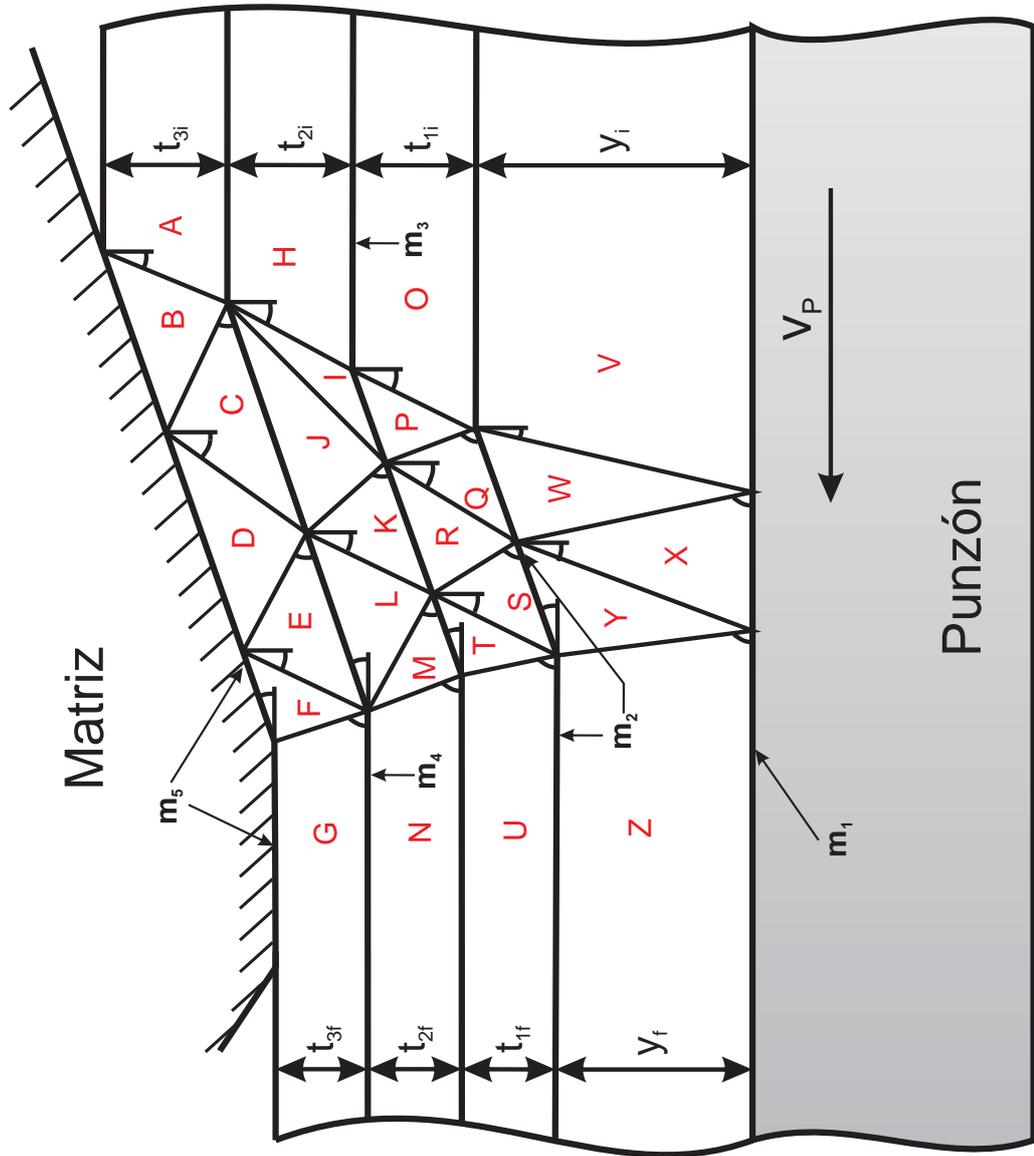


Figura 3.6: Campo de velocidades para el caso de un estirado correcto.

mediante ecuaciones trigonométricas como función de los descritos, y de las longitudes entre las fronteras de las zonas (identificadas con las letras del abecedario).

Todas estas ecuaciones han sido escritas posteriormente en el programa en C++ de la modelización. Como se puede apreciar en el código mostrado en el apéndice A, después de la inicialización de las variables, se ha procedido a añadir las ecuaciones para los cálculos de las longitudes de los planos entre zonas, en función de las variables mostradas en la figura 3.6. Las cuatro primeras longitudes que se calculan son:

$$l_{AB} = \frac{t_{3i}}{\cos(\alpha_1 \cdot \frac{\pi}{2})}, \quad (3.9)$$

$$l_{MATRIZ} = \frac{l_{AB} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \beta_1 \cdot \frac{\pi}{180} + \alpha_1 \cdot \frac{\pi}{180} + \mu\right)}{\text{sen}\left(\phi + \beta_1 \cdot \frac{\pi}{180} - \mu\right)}, \quad (3.10)$$

$$l_{BC} = \frac{l_{AB} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi - \alpha_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\text{sen}\left(\phi + \beta_1 \cdot \frac{\pi}{180} - \mu\right)}, \quad (3.11)$$

$$l_{JC} = \frac{l_{BC} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \beta_1 \cdot \frac{\pi}{180} + \alpha_2 \cdot \frac{\pi}{180} + \mu\right)}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 \cdot \frac{\pi}{180} - \mu\right)} \quad (3.12)$$

, donde l_{AB} , l_{MATRIZ} , l_{BC} y l_{JC} son las longitudes de los planos que delimitan las zonas A y B, B y la superficie de la MATRIZ, B y C, y J y C, respectivamente. Los ángulos se introducen en grados, realizando el programa los cálculos en radianes.

Considerando que la anchura de la tira de material es constante a lo largo de su longitud, y teniendo en cuenta que el volumen total ha de permanecer constante (por tratarse de un material ideal incompresible), la tensión que sufre el metal y las capas de polímero en la dirección del espesor debe de ser la misma. Por lo tanto, una reducción global del 20 % significará que cada una de las capas (las tres de polímero y la del metal) se reducirá un

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

20 % de manera individual, de tal forma que el espesor final queda fácilmente determinado para cualquier tipo de reducción aplicada.

El cálculo de las velocidades se debe realizar sobre el hodógrafo de la figura 3.7, en el que se muestran todos los ángulos a tener en consideración. El resto puede ser obtenido a través de relaciones trigonométricas. A modo de ejemplo, los ángulos β_{10} y β_{11} se expresan en función de l_{WV} y α_9 , y l_{XY} y α_{10} , respectivamente. La longitud de los planos B-Matriz, D-Matriz y F-Matriz deben de sumar el valor total de la longitud de contacto de la matriz en la zona de trabajo.

Al igual que se ha realizado en el programa con las ecuaciones de las longitudes, se ha procedido a escribir las ecuaciones para los cálculos de las velocidades, en función de las variables mostradas en la figura 3.7. Las cuatro primeras velocidades que se calculan son:

$$v_{ZY} = \frac{v_P \cdot \text{sen}(\gamma)}{\text{sen}\left(\pi - \gamma - \alpha_{10} \cdot \frac{\pi}{180}\right)}, \quad (3.13)$$

$$v_{UT} = \frac{v_P \cdot \text{sen}(\tau)}{\text{sen}\left(\pi - \tau - \beta_9 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}, \quad (3.14)$$

$$v_{NM} = \frac{v_P \cdot \text{sen}(\mu)}{\text{sen}\left(\pi - \mu - \beta_6 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}, \quad (3.15)$$

$$v_{GF} = \frac{v_P \cdot \text{sen}(\phi)}{\text{sen}\left(\pi - \phi - \beta_3 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} \quad (3.16)$$

, donde v_{ZY} , v_{UT} , v_{NM} y v_{GF} son las velocidades relativas de deslizamiento entre las zonas G y Y, G y T, G y M, y G y F, respectivamente. Al igual que se ha especificado anteriormente, también los ángulos se introducen en grados, realizando el programa los cálculos en radianes.

La ecuación 3.7 expresa la potencia total disipada en el proceso, y es función de los planos de cizalladura y de fricción existentes en el modelo. En

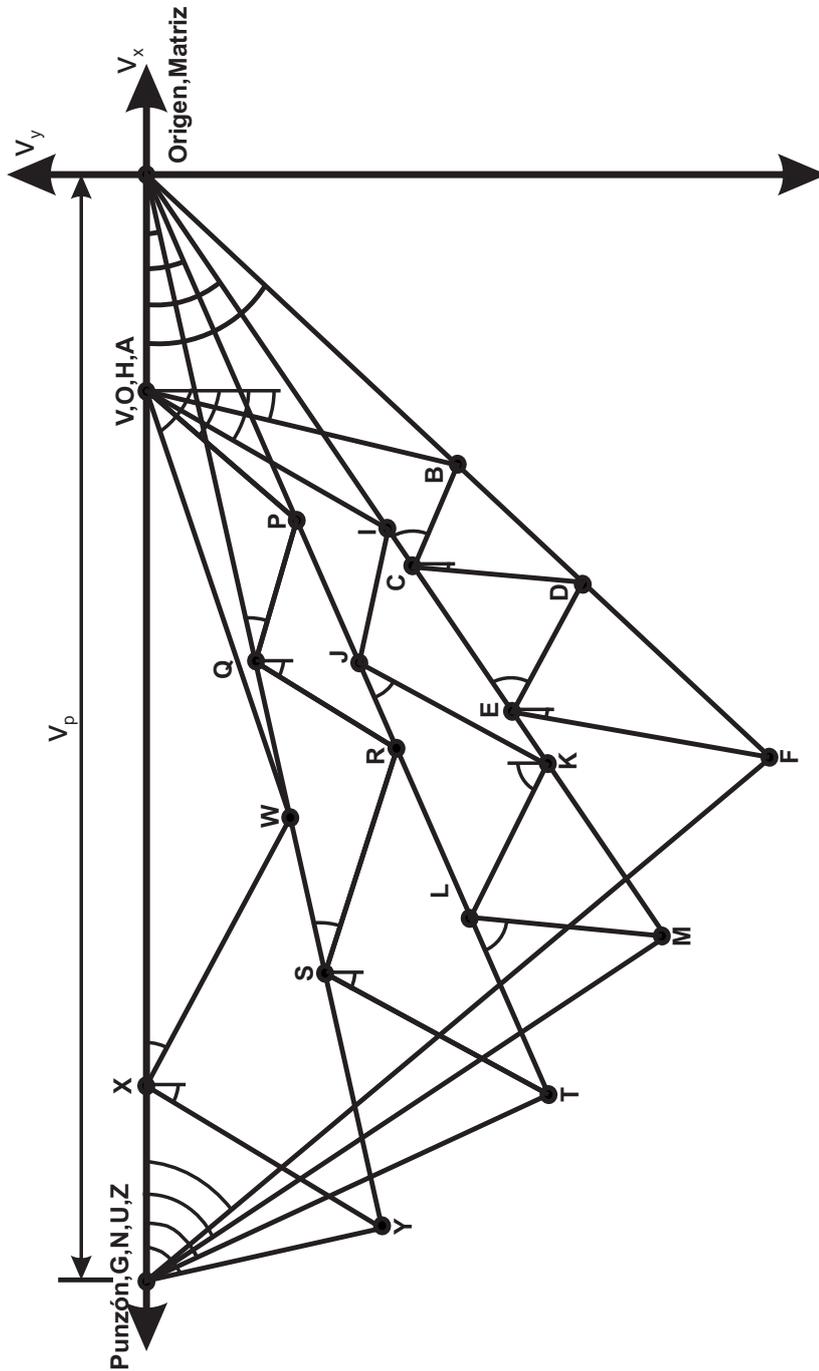


Figura 3.7: Hodógrafo para el caso de un estirado correcto.

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

Planos de cizalladura	Planos de fricción entre materiales	Planos de fricción con la matriz	Planos de fricción con el punzón
AB	GN	G-MATRIZ	Z-PUNZÓN
BC	EL	F-MATRIZ	X-PUNZÓN
CD	CJ	D-MATRIZ	V-PUNZÓN
DE	AH	B-MATRIZ	
EF	NV		
FG	MT		
HI	KR		
IJ	IP		
JK	HO		
KL	VZ		
LM	SY		
MN	QW		
OP	OV		
PQ			
QR			
RS			
ST			
TU			
VW			
WX			
XY			
YZ			

Tabla 3.2: Planos de fricción y de cizalladura en el modelo de estirado correcto.

la tabla 3.2 se muestran dichos planos clasificados según su naturaleza.

En el programa, partiendo de las ecuaciones de longitudes y de velocidades, se ha procedido al cálculo de las potencias disipadas en los distintos planos, considerando su naturaleza, utilizando las ecuaciones 3.5 y 3.6. Así pues, la potencia disipada en los distintos planos de cizalladura queda determinada por la siguiente expresión (se ha respetado la denominación de las variables utilizada en el programa):

$$\begin{aligned}
Potencia_{cizalladura} = & [(l_{OP} \cdot v_{VP} + l_{PQ} \cdot v_{QP} + l_{RQ} \cdot v_{RQ} + l_{SR} \cdot v_{SR} \\
& + l_{ST} \cdot v_{ST} + l_{UT} \cdot v_{UT}) \cdot k_{polimero1} \\
& + (l_{AB} \cdot v_{AB} + l_{BC} \cdot v_{BC} + l_{DC} \cdot v_{DC} + l_{ED} \cdot v_{ED} \\
& + l_{EF} \cdot v_{EF} + l_{FG} \cdot v_{FG}) \cdot k_{polimero3} \\
& + (l_{IH} \cdot v_{IH} + l_{IJ} \cdot v_{IJ} + l_{JK} \cdot v_{JK} + l_{LK} \cdot v_{LK} \\
& + l_{ML} \cdot v_{ML} + l_{NM} \cdot v_{NM}) \cdot k_{polimero2} \\
& + (l_{ZY} \cdot v_{ZY} + l_{XY} \cdot v_{XY} \\
& + l_{XW} \cdot v_{XW} + l_{VW} \cdot v_{VW}) \cdot k_{acero] \cdot espesor \quad (3.17)
\end{aligned}$$

, donde $k_{polimero1}$, $k_{polimero2}$ y $k_{polimero3}$ son las tensiones de cizalladura de las capas de polímero inferior, intermedia y superior, respectivamente. k_{acero} es la del acero, mientras que $espesor$ es la anchura del material considerado.

La potencia de fricción total disipada será el total de las potencias disipadas en aquellas zonas en la que existe fricción entre dos materiales. Así pues, se necesitan un total de cinco ecuaciones para cuantificar la potencia disipada por las fricciones del material con la matriz, del material con el punzón, de las capas de polímero entre ellas, y por último, del acero entre la capa inferior de polímero. Estas ecuaciones son:

$$\begin{aligned}
Potencia_Fric_{MATRIZ} = & (l_{FMATRIZ} \cdot v_{FMATRIZ} \\
& + l_{DMATRIZ} \cdot v_{DMATRIZ} \\
& + l_{BMATRIZ} \cdot v_{BMATRIZ}) \\
& \cdot m_5 \cdot k_{polimero3} \cdot espesor, \quad (3.18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Potencia_Fric_{PUNZON} = & (l_{XPUNZON} \cdot v_{GX} \\
& + l_{VPUNZON} \cdot (v_P - v_{VMATRIZ}))
\end{aligned}$$

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

$$\cdot m_1 \cdot k_{acero} \cdot espesor, \quad (3.19)$$

$$Potencia_FricACERO_POLIMERO2 = (l_{SY} \cdot v_{YS} + l_{QW} \cdot v_{QW}) \\ \cdot m_2 \cdot k_{polimero1} \cdot espesor, \quad (3.20)$$

$$Potencia_FricACERO_POLIMERO3 = (l_{TM} \cdot v_{MT} + l_{RK} \cdot v_{RK} + l_{IP} \cdot v_{IP}) \\ \cdot m_3 \cdot k_{polimero2} \cdot espesor, \quad (3.21)$$

$$Potencia_FricACERO_POLIMERO4 = (l_{EL} \cdot v_{EL} + l_{JC} \cdot v_{CJ}) \\ \cdot m_4 \cdot k_{polimero3} \cdot espesor \quad (3.22)$$

, donde $Potencia_Fric_{MATRIZ}$ y $Potencia_Fric_{PUNZON}$ son las potencias disipadas por la fricción existente entre la matriz y la capa superior de polímero, y entre el punzón y el material, respectivamente. Las potencias $Potencia_Fric_{ACERO_POLIMERO2}$, $Potencia_Fric_{ACERO_POLIMERO3}$ y $Potencia_Fric_{ACERO_POLIMERO4}$ son las disipadas por la fricción de las capas de polímero inferior y el punzón, inferior e intermedia, e intermedia y superior, respectivamente.

El cálculo de la potencia total se obtiene sumando las anteriores potencias, obteniendo la siguiente expresión:

$$P_{total} = \sum_i P_{c_i} + \sum_j P_{f_j} = Potencia_{cizalladura} + Potencia_Fric_{MATRIZ} \\ + Potencia_Fric_{PUNZON} \\ + Potencia_Fric_{ACERO_POLIMERO2} \\ + Potencia_Fric_{ACERO_POLIMERO3} \\ + Potencia_Fric_{ACERO_POLIMERO4} \quad (3.23)$$

La figura 3.8 representa las curvas de potencia del modelo de estirado correcto. Para una mejor comprensión de los datos representados, y para

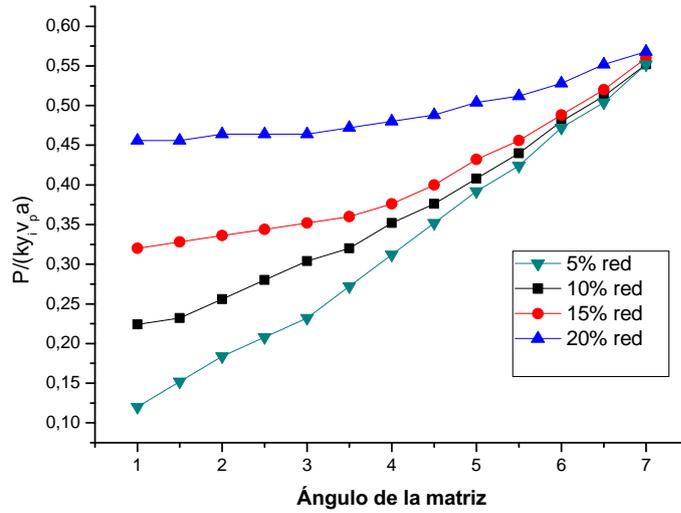


Figura 3.8: Gráfica que muestra la potencia adimensional proporcionada por el modelo en función del ángulo de la matriz y la reducción aplicada.

tratar con independencia la potencia de las variables propias de cada tira de material y de la velocidad del punzón, ésta se expresa en forma adimensional. Como se puede apreciar, cuanto mayor es la reducción que se quiera conseguir, mayor es la potencia disipada. Al mismo tiempo, indicar que también aumenta la potencia por cada incremento del ángulo de la matriz.

3.5.2. Modelo de estirado defectuoso

Son varias las consecuencias que produce sobre el material ensayado un estirado defectuoso: cortes a distintas profundidades, desprendimientos de capas, rotura al impactar el material con la matriz, etc. En este caso, solamente se modelizará aquella situación que menor potencia requiera, es decir, cuando solamente se producen daños en la capa superior de polímero. Si se produjese algún tipo de desperfecto en la capa intermedia o inferior, necesariamente tendría algún tipo de daño la superior. Los daños en otras capas más profundas requerirán un mayor gasto energético. En el apartado anterior, se ha mostrado que la potencia total disipada se expresaba como suma

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

de las potencias de cizalladura totales y las de fricción existentes. Cuando se modeliza el estirado defectuoso, se esquematiza el campo de velocidades con la capa de polímero superior desprendida (figura 3.9), con lo que se reducen los planos de fricción y de cizalladura, siendo esta reducción más significativa cuando se produce daño en la capa intermedia o inferior de polímero.

En la figura 3.9 se representa un campo de velocidades para el caso de producirse un estirado defectuoso sobre la capa superior de polímero. El diagrama no se ha dibujado a escala para mejorar la comprensión visual, y la nomenclatura aplicada para los coeficientes de fricción entre los distintos materiales es la mencionada con anterioridad, a excepción de la fricción existente en el plano CH, que está caracterizada por $m_{CH} = 1$, al existir una unión fuerte entre ambos polímeros, al tratarse la zona C como estacionaria, reduciéndose el plano a un simple caso de cizalladura [4].

La zona D representa a la parte de polímero de la capa superior que se ha desprendido totalmente, y cuyo grosor es, al no producirse estirado alguno, igual que su grosor inicial. Para definir la zona de contacto entre este material desprendido se empleará la aproximación representada en la figura 3.10, según el criterio seguido por Wilson y Halliday [29] en su estudio.

Al igual que en el modelo del estirado correcto, solamente se toman en consideración, para la elaboración del modelo, los ángulos y zonas mostrados en la figura 3.9, pues todos los ángulos se pueden expresar mediante ecuaciones trigonométricas como función de los descritos, y de las longitudes entre las fronteras de las zonas.

Todas estas ecuaciones han sido escritas posteriormente en el programa en C++ de la modelización del estirado defectuoso. Como se puede apreciar en el código mostrado en el apéndice B, después de la inicialización de las variables, se ha procedido a escribir las ecuaciones para los cálculos de las longitudes de los planos entre zonas, en función de las variables mostradas

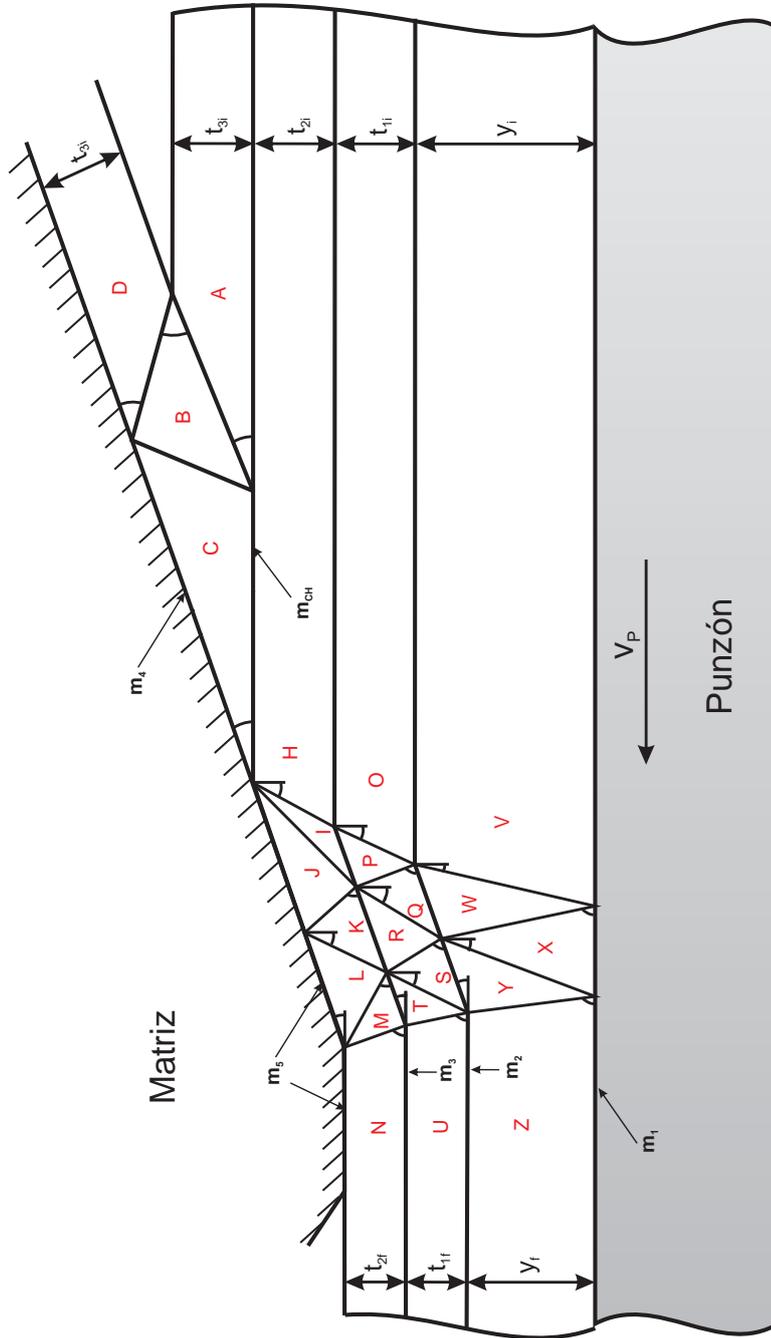


Figura 3.9: Campo de velocidades para el caso de un estirado defectuoso sobre la capa superior de polímero.

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

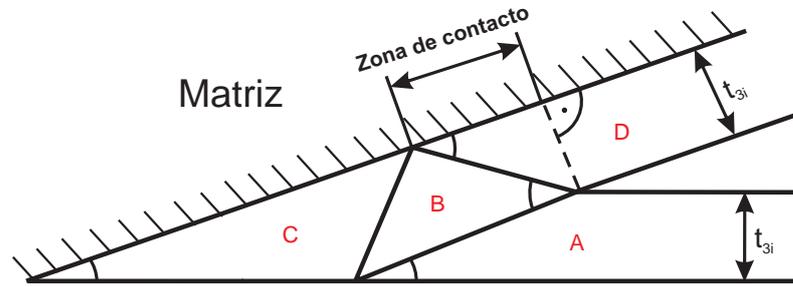


Figura 3.10: Detalle del campo de velocidades en el estirado defectuoso. Se indica cuál es la longitud de contacto entre la matriz y la zona D.

en la figura 3.9. Las cuatro primeras longitudes que se calculan son:

$$l_{AB} = \frac{t_{3i}}{\text{sen}(\mu)}, \quad (3.24)$$

$$l_{AH} = \cos(\mu) \cdot l_{AB}, \quad (3.25)$$

$$l_{DB} = t_{3i} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right), \quad (3.26)$$

$$l_{DMATRIZ} = \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot l_{DB} \quad (3.27)$$

, donde l_{AB} , l_{AH} , l_{DB} y $l_{DMATRIZ}$ son las longitudes de los planos que delimitan las zonas A y B, A y H, D y B, y D y la superficie de la matriz, respectivamente. Los ángulos se introducen en grados, realizando el programa los cálculos en radianes.

En la figura 3.11 se representa el hodógrafo para el caso del estirado defectuoso. Es importante señalar que la zona C es una zona muerta, es decir, estacionaria a efectos de la modelización [4].

Al igual que se ha realizado en el programa con las ecuaciones de las longitudes, se ha procedido a escribir las ecuaciones para los cálculos de las velocidades, en función de las variables mostradas en la figura 3.10. Las tres

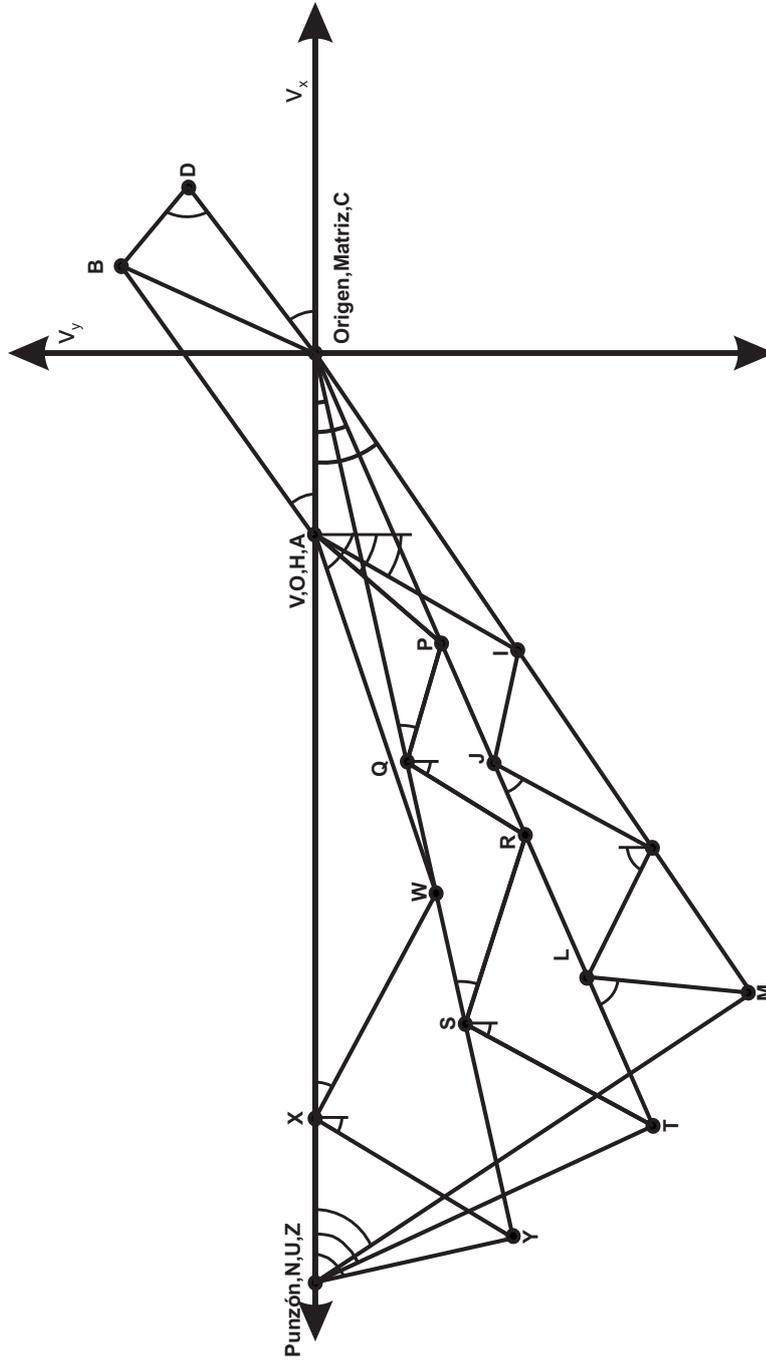


Figura 3.11: Hodógrafo para el caso de un estirado defectuoso.

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

primeras velocidades que se calculan son:

$$v_{ZY} = \frac{v_P \cdot \text{sen}(\gamma)}{\text{sen}\left(\pi - \gamma - \alpha_{10} \cdot \frac{\pi}{180}\right)}, \quad (3.28)$$

$$v_{UT} = \frac{v_P \cdot \text{sen}(\tau)}{\text{sen}\left(\pi - \tau - \beta_9 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}, \quad (3.29)$$

$$v_{NM} = \frac{v_P \cdot \text{sen}(\mu)}{\text{sen}\left(\pi - \mu - \beta_6 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} \quad (3.30)$$

, donde v_{ZY} , v_{UT} y v_{NM} son las velocidades relativas de deslizamiento entre las zonas Z y Y, U y T, y N y M, respectivamente.

En el programa, partiendo de las ecuaciones de longitudes y de velocidades, se ha procedido al cálculo de las potencias disipadas en los distintos planos, considerando su naturaleza, utilizando las ecuaciones 3.5 y 3.6. Así pues, las ecuaciones de las potencias disipadas en los distintos planos de cizalladura y de fricción quedan determinadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} Pot_{cizalladura} = & [(l_{OP} \cdot v_{OP} + l_{PQ} \cdot v_{PQ} + l_{RQ} \cdot v_{RQ} + l_{SR} \cdot v_{SR} + l_{ST} \cdot v_{ST} \\ & + l_{UT} \cdot v_{UT}) \cdot k_{polimero1} + (l_{AB} \cdot v_{AB} + l_{BC} \cdot v_{BC} \\ & + l_{DB} \cdot v_{DB}) \cdot k_{polimero3} + (l_{IH} \cdot v_{IH} + l_{IJ} \cdot v_{IJ} + l_{JK} \cdot v_{JK} \\ & + l_{LK} \cdot v_{LK} + l_{ML} \cdot v_{ML} + l_{NM} \cdot v_{NM}) \cdot k_{polimero2} \\ & + (l_{ZY} \cdot v_{ZY} + l_{XY} \cdot v_{XY} + l_{XW} \cdot v_{XW} \\ & + l_{VW} \cdot v_{VW}) \cdot k_{acero}] \cdot espesor, \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} Pot_{F_MATRIZ} = & l_{DMATRIZ} \cdot v_{DMATRIZ} + l_{LMATRIZ} \cdot v_{LMATRIZ} \\ & + l_{JMATRIZ} \cdot v_{JMATRIZ} \cdot m_5 \cdot k_{polimero3} \cdot espesor, \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} Pot_{F_PUNZON} = & (l_{XPUNZON} \cdot v_{ZX} + l_{VPUNZON} \cdot v_P \\ & - v_{VMATRIZ}) \cdot m_1 \cdot k_{acero} \cdot espesor, \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$Pot_{F_A_POL2} = (l_{SY} \cdot v_{SY} + l_{QW} \cdot v_{QW}) \cdot m_2 \cdot k_{polimero1} \cdot espesor, \quad (3.34)$$

$$Pot_{F_A_POL3} = (l_{TM} \cdot v_{TM}$$

$$+l_{RK} \cdot v_{RK} + l_{IP} \cdot v_{IP}) \cdot m_3 \cdot k_{polimero2} \cdot espesor, \quad (3.35)$$

$$Pot_{F_A_POL4} = (l_{CH} \cdot v_{CH}) \cdot m_4 \cdot k_{polimero3} \cdot espesor \quad (3.36)$$

, donde $Pot_{cizalladura}$ es la potencia disipada en los planos de cizalladura. Pot_{F_MATRIZ} y Pot_{F_PUNZON} son las potencias disipadas por la fricción existente entre la matriz y la capa intermedia de polímero (produciéndose un estirado correcto), y entre el punzón y el material, respectivamente. Las potencias $Pot_{F_A_POL2}$, $Pot_{F_A_POL3}$ y $Pot_{F_A_POL4}$ son las disipadas por la fricción de las capas de polímero inferior y el punzón, inferior e intermedia, y superior y la matriz, respectivamente.

El cálculo de la potencia total se obtiene sumando las anteriores potencias, obteniendo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} P_{total} = \sum_i P_{c_i} + \sum_j P_{f_j} = & Pot_{cizalladura} + Pot_{F_MATRIZ} \\ & + Pot_{F_PUNZON} + Pot_{F_A_POL2} \\ & + Pot_{F_A_POL3} + Pot_{F_A_POL4} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Como en la modelización del estirado correcto, la ecuación 3.7 expresa la potencia total disipada en el proceso, y se optimiza para todos los ángulos intervinientes, siempre y cuando pertenezcan a un campo de velocidades cinemáticamente admisible. Los planos de cizalladura y de fricción contemplados en este modelo son los que se muestran en la tabla 3.3.

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

Planos de cizalladura	Planos de fricción entre materiales	Planos de fricción con la matriz	Planos de fricción con el punzón
AB	NV	N-MATRIZ	Z-PUNZÓN
BC	MT	L-MATRIZ	X-PUNZÓN
BD	KR	J-MATRIZ	V-PUNZÓN
CH	FP	C-MATRIZ	
HI	HO	D-MATRIZ	
IJ	VZ		
JK	SY		
KL	QW		
LM	OV		
MN	CH		
OP	AH		
PQ			
QR			
RS			
ST			
TU			
VW			
WX			
XY			
YZ			

Tabla 3.3: Planos de fricción y de cizalladura en el modelo de estirado defectuoso.

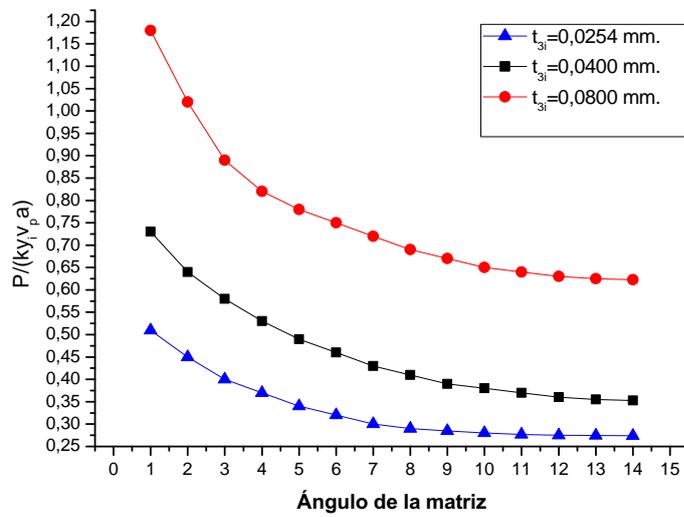


Figura 3.12: Gráfica que muestra la potencia adimensional proporcionada por el modelo de estirado defectuoso, en función del ángulo de la matriz y del espesor de la capa superior de polímero.

En la figura 3.12 se representan las curvas de potencia del modelo de estirado defectuoso. Como era predecible, un aumento en el espesor de la capa de polímero superior hace que aumente también la potencia disipada. Pero sin embargo, esta potencia disminuye a medida que el ángulo de la matriz va aumentando.

3. MODELIZACIÓN TEÓRICA

Capítulo 4

Metodología experimental

Para poder realizar el análisis experimental de la procesabilidad del material proporcionado, se ha diseñado y construido un simulador de estirado en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la Universidad de Notre Dame (EE.UU.), realizando una buena aproximación del proceso del estirado. Para el diseño y construcción se han tenido en cuenta las variables mostradas en la tabla 3.1. Los objetivos de esta máquina son los de simular con precisión la capacidad y potencia que a nivel industrial se requiere para el estirado de metales, así como el de poder permitir cambiar las variables de proceso. En el simulador se pueden colocar con relativa rapidez y sencillez las piezas que son objeto de análisis.

4.1. Análisis en dos dimensiones

Para poder simplificar de forma experimental el proceso del estirado, éste ha sido reducido a un problema de un solo plano (2 dimensiones). Es decir, que el estirado de la pared curva de una lata queda modelizado por el estirado de una tira metálica completamente plana. Es posible realizar dicha simplificación en dos dimensiones debido al pequeño valor que tiene el

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

grosor de la pared en relación con el diámetro de la lata, como describió Hill [61] en su trabajo. En la figura 4.1 se puede apreciar un corte longitudinal de la sección de una lata durante el proceso del estirado. La reducción y simplificación del problema a un solo plano requiere que no se tengan en cuenta deformaciones en cualquier plano normal al plano del corte de la sección. Como se puede apreciar en la figura, el área de la sección que se encuentra a la izquierda del eje de simetría es la porción que realmente se simula experimentalmente con el simulador de estirado. En esta simulación, la pared de la lata queda reemplazada por una pequeña tira plana de material. Se puede observar también en la figura que la operación se divide en tres zonas o regiones: la zona interior, en la que el material conserva el espesor inicial al no haber pasado todavía por el anillo de estirado; la zona de trabajo, que es donde por efecto de la presión y el ángulo del anillo se produce realmente la reducción de espesor; y la zona exterior, una vez el material ha pasado por el anillo de estirado y ha visto reducido su espesor, aumentando por tanto la longitud de la pared exterior.

Existen varias ventajas en la simulación del estirado de una lata en dos dimensiones frente al estirado real de una copa previamente embutida. La fabricación del anillo de estirado (matriz) para el estirado en dos dimensiones es más barata y más fácil que la fabricación de los anillos de estirado convencionales. Con esta matriz se pueden estudiar varias combinaciones distintas de ángulos de forma sencilla. Otra ventaja más radica en el hecho que al usar pequeñas tiras planas de material, la única preparación experimental previa es la de su corte de una lámina más grande; mientras que el hecho de utilizar una copa requeriría que la lámina se embutira y reembutira antes de iniciar el experimento de estirado. Por último, el empleo de estas tiras permite que el punzón tenga que ejercer una menor fuerza, haciendo que se reduzcan de forma significativa las especificaciones del equipo necesario. Todo este listado de ventajas coinciden con el objetivo de tener un dispositivo para las pruebas que sea simple y versátil, así como el de poder permitir el uso de modelos teóricos en dos dimensiones con cierta precisión.

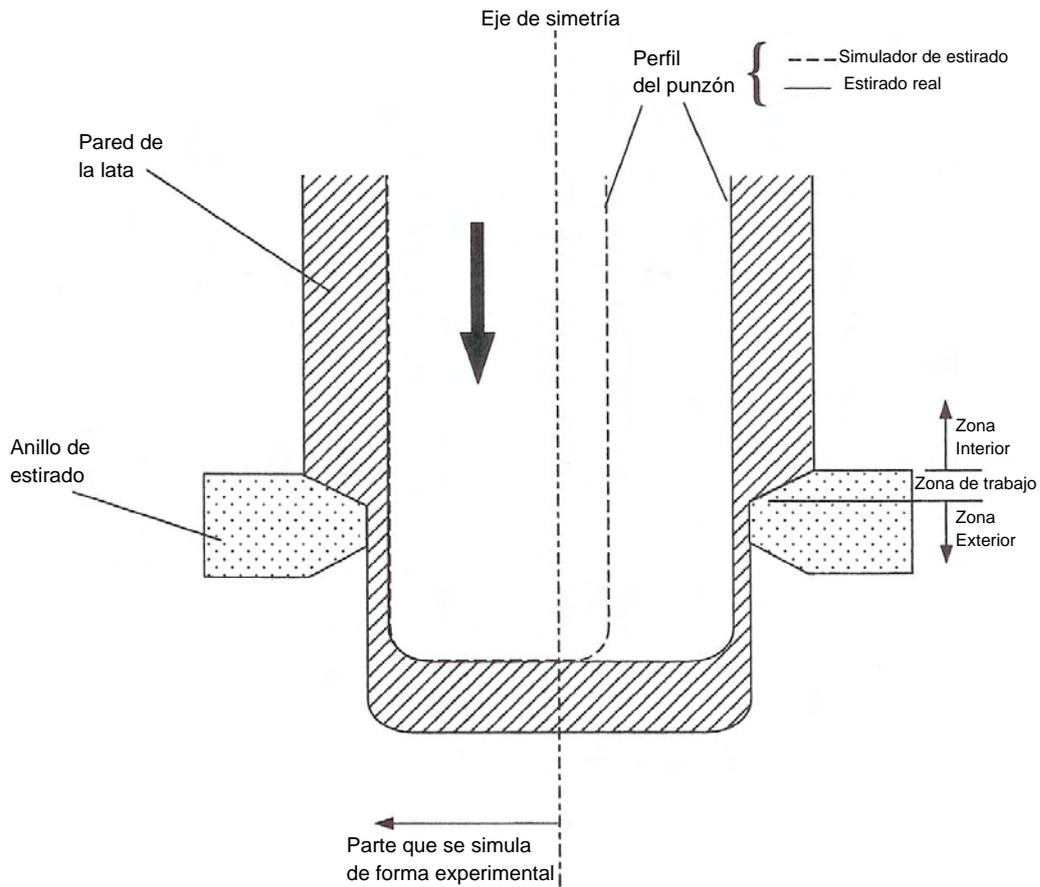


Figura 4.1: Sección de una lata durante la fase de estirado. El punzón del simulador está representado por una línea discontinua, siendo la parte izquierda del eje de simetría la parte de la lata que realmente se simula.

4.2. Descripción y funcionamiento del simulador de estirado

La figura 4.2 muestra un esquema de la disposición de elementos sobre la bancada principal del simulador de estirado. También se pueden ver dos fotografías del mismo en la figura 4.3. Todos estos componentes, a excepción de la matriz y de las tiras de material a estirar, están hechos de acero para poder formar un buen soporte que pueda aguantar a la operación de estirado. Cada una de estas partes está unida a una bancada de poco más de 5 centímetros de espesor (5,08 cm),^① la cual está montada sobre una mesa de acero para proporcionar rigidez al dispositivo.

Una tira de material,^④ se sitúa sobre un lateral del punzón,^③. El radio de curvatura que posee el punzón en su extremo delantero es de aproximadamente 1,25 cm. Dicha curvatura ha sido mecanizada en el punzón con la finalidad que la tira de material no se doblara alrededor de un ángulo vivo, el cual podría provocar tal concentración de tensiones en ese punto que hicieran que el material se dañase sin ser consecuencia directa del propio proceso de estirado. La rugosidad superficial en el punzón es de $R_a \approx 1,0 \mu\text{m}$. La forma de colocar la tira sobre el punzón se realiza mediante la utilización de un perno,^⑩ situado en el extremo delantero del punzón. Un tope metálico,^②, hace de guía y a su vez de tope lateral al punzón mientras éste hace su recorrido durante el estirado. En la figura se indica también la dirección por la que se mueve el punzón. El anillo de estirado representado en la figura 4.1, se reemplaza en el simulador de estirado por una herramienta intercambiable que hace de matriz,^⑤. Al realizar la modelización en dos dimensiones, este anillo queda por tanto reducido a una superficie totalmente plana. La herramienta intercambiable se coloca en el simulador en un hueco especialmente diseñado para ella,^⑥, de tal manera que quede bien fijada, en una orientación de 45° . Como puede apreciarse, el uso de una matriz rectangular puede permitir la existencia de cuatro geometrías distintas (por cada matriz utilizada), y una por cada vértice lateral. Esta geometría en los vértices se puede apre-

4.2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR DE ESTIRADO

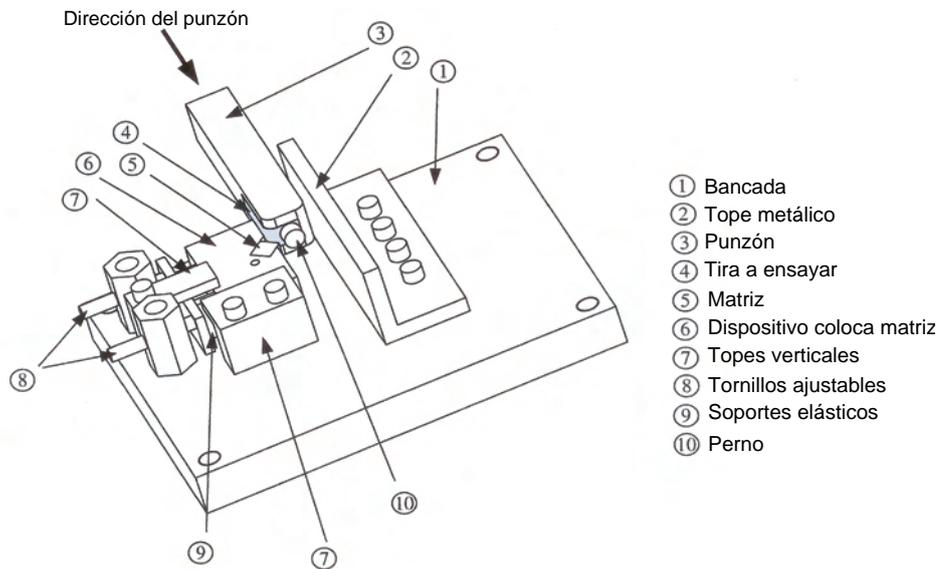


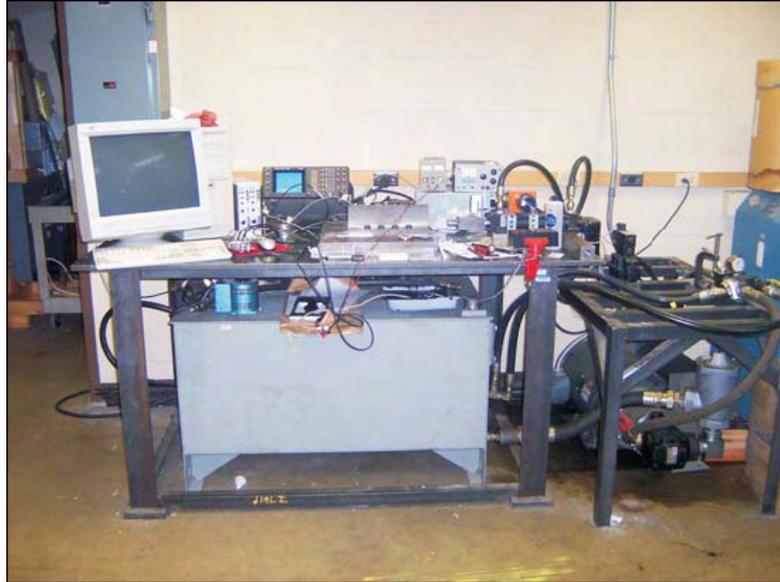
Figura 4.2: Configuración del simulador de estirado.

ciar mejor en el detalle A de la figura 4.4. Para poder instalar una geometría distinta, se puede hacer de manera muy simple con solamente rotar la matriz hasta la posición deseada. Se pueden tener cerca varias matrices, que incluso pueden ser de distintos materiales, para poder cambiar así de una manera fácil y rápida de experimento, sí así se desea.

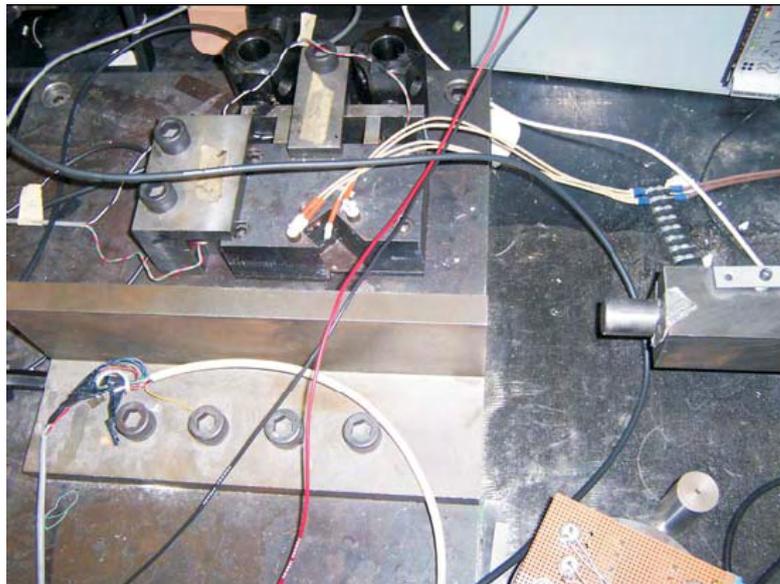
Un pequeño tornillo, no mostrado en la figura, restringe cualquier movimiento de la matriz en la dirección normal a la superficie de la bancada. Este tornillo se puede quitar para poder realizar con facilidad y rapidez los cambios de matriz. El dispositivo que fija la matriz, ⑥, posee cuatro soportes elásticos, ⑨, dos en cada uno de los dos lados adyacentes que se muestran en la figura 4.5, la cual es una vista de montaje del simulador de estirado. En cada uno de estos soportes hay montada una galga extensiométrica uniaxial de 120Ω de resistencia, en la orientación mostrada en la figura 4.5.

Se impide que el dispositivo que fija la matriz se mueva en dirección ortogonal a la bancada mediante la utilización de dos topes verticales, ⑦. Existe una pequeña holgura entre estos topes y la superficie superior del

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



(a) Vista general



(b) Detalle del punzón y de la zona de trabajo

Figura 4.3: El simulador de estirado.

4.2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR DE ESTIRADO

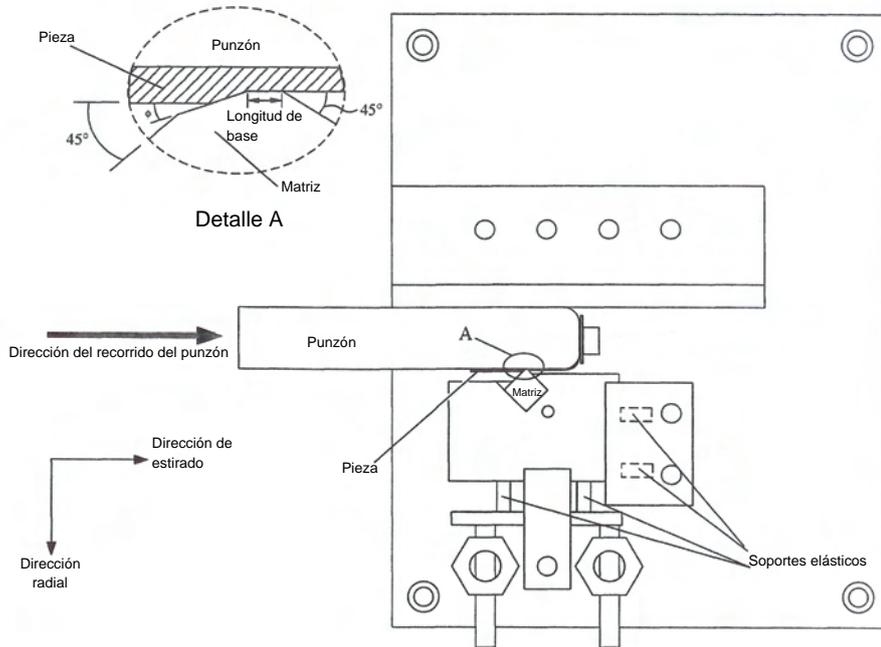


Figura 4.4: Vista en planta del simulador de estirado. El detalle A muestra la zona de estirado. Las galgas extensiométricas están colocadas de forma transversal sobre los soportes elásticos.

simulador, para asegurar que los toques no ejerzan ninguna fuerza normal a éste. Los dos soportes elásticos que se encuentran en la dirección del estirado están sujetos por su parte superior por uno de estos dos toques. En cambio, los dos soportes de la dirección radial están limitados por un extremo por un par de elementos ajustables mediante sendos tornillos sin fin,[®] (ver la figura 4.6).

Estos elementos ajustables controlan la holgura que existe entre la matriz y el punzón, y por tanto la reducción que pueda experimentar el material, simplemente moviendo el dispositivo de la matriz en la dirección radial. Como se podrá apreciar, con este sistema se puede ajustar cualquier variable que afecte a la reducción del material ensayado, incrementando de esta manera la flexibilidad del simulador. La forma en la que se calcula del porcentaje de reducción que ha sufrido el material después del estirado, se realiza mediante

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

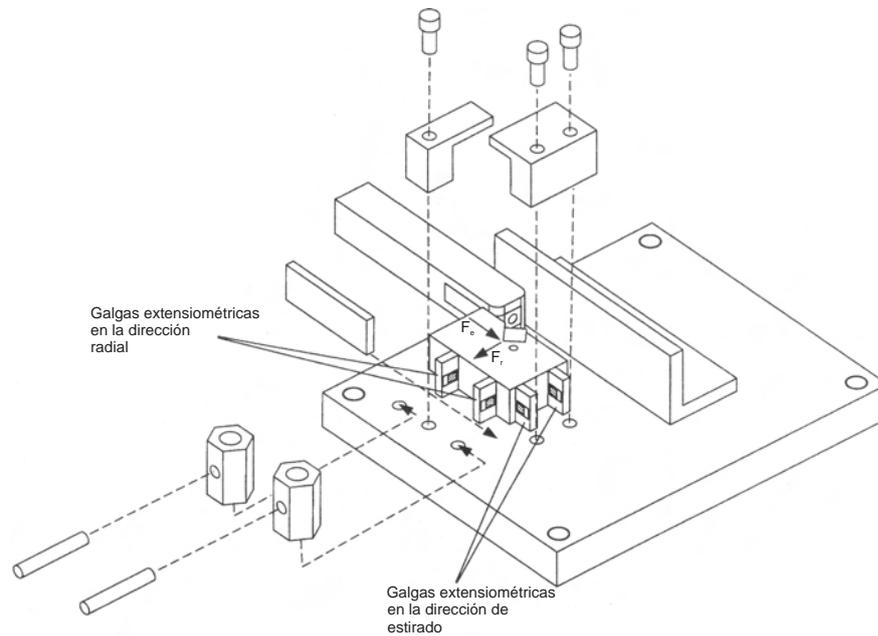


Figura 4.5: Vista parcial del montaje del simulador de estirado. Se puede observar con detalle la colocación de las galgas.

la medición de la diferencia entre los espesores inicial y final de la tira.

Mientras la tira está siendo estirada por el simulador (en la figura 4.7 se muestra una secuencia de fotografías del momento en el que se produce el estirado), el dispositivo en el que se encuentra la matriz produce una tensión de compresión sobre los soportes, debido a las fuerzas F_e y F_r , como se muestra en la figura 4.5. Un par de galgas detectan fuerza en la dirección radial, mientras que el otro par lo hace en la dirección de estirado. Cada uno de estos dos pares de galgas está conectado mediante cables a una configuración de célula de carga en dos puentes de Wheatstone, que se encuentran separados. Ambos utilizan una configuración en medio puente. Como se puede apreciar en la figura 4.8, las dos galgas se conectan en brazos opuestos del puente, siendo ocupados los dos lados restantes por sendas resistencias, para el equilibrado del mismo. En este tipo de configuración, el puente sumará la tensión registrada por cada una de estas galgas para obtener en la salida la tensión total en esa dirección.

4.2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR DE ESTIRADO

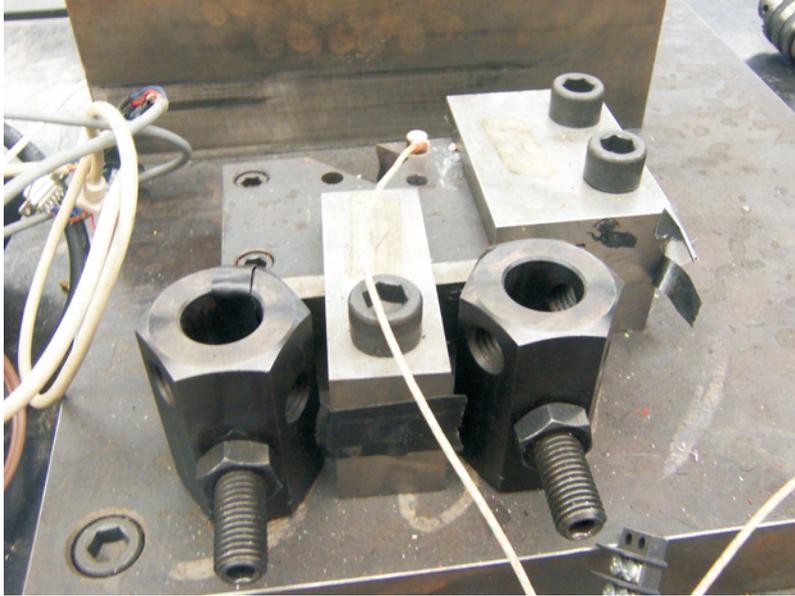


Figura 4.6: Vista posterior de los elementos de sujeción de la matriz.

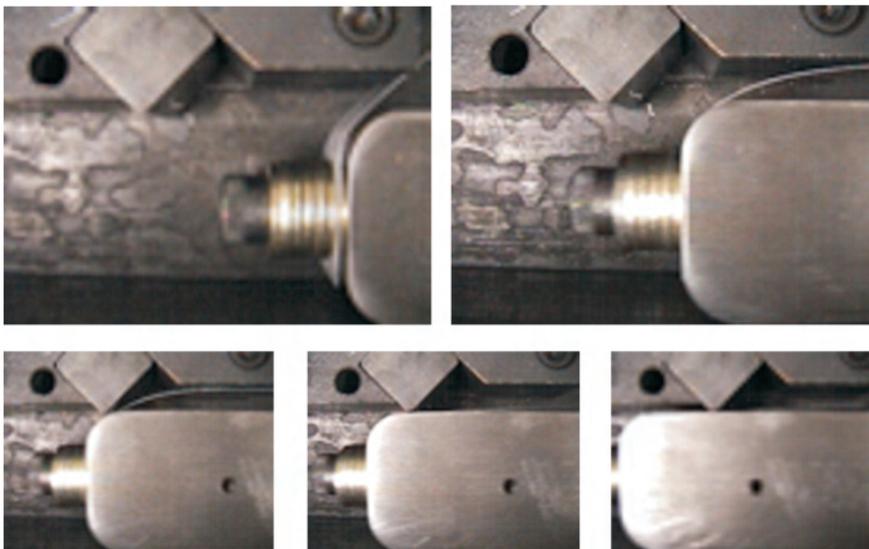


Figura 4.7: Secuencia del momento en el que se produce el estirado.

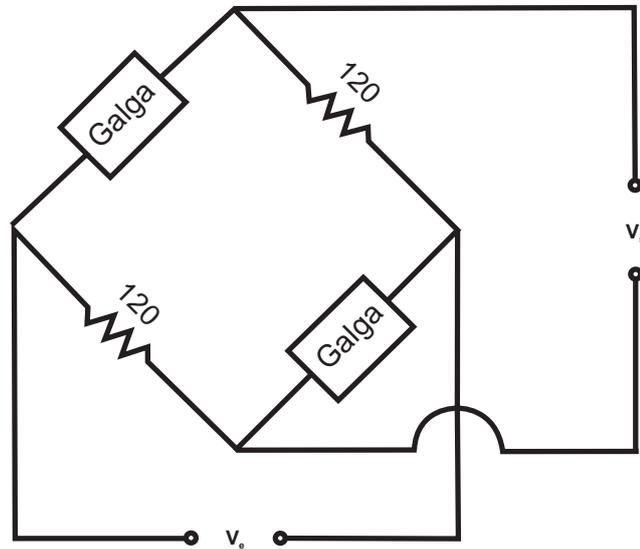


Figura 4.8: Configuración utilizada del puente de Wheatstone con dos resistencias de 120Ω . V_e representa el voltaje de entrada o excitación, mientras que V_s es el voltaje de salida.

A través de un sistema hidráulico, que se muestra representado en la figura 4.10, se le proporciona al simulador la capacidad de poder realizar el estirado. Un motor eléctrico de 30 CV, **1**, es capaz de mover una bomba hidráulica con un caudal de 121 l/min, **2**. Un fluido hidráulico, que es almacenado en un depósito, **3**, pasa a través de un filtro interno, **4**, hasta llegar a la bomba. La presión del sistema se regula mediante una válvula de descarga, **5**. La dirección y caudal del flujo se controlan a través de una válvula proporcional de dos fases, **6**, la cual recibe instrucciones a través de una señal de control que le llega por cable (ver la figura 4.9).

Una fuente de corriente se conecta a esta señal para proporcionar a la válvula una tensión que varía entre -10 V y $+10 \text{ V}$, estableciendo de esta manera la velocidad del punzón en el estirado. El signo de esta magnitud indicará el sentido de movimiento del punzón, pudiéndose extender o retraer, según se requiera. Dependiendo de la tensión aplicada, la válvula deja pasar un determinado flujo de fluido a un cilindro de 5 cm de diámetro, **7**, quedando



Figura 4.9: La válvula proporcional utilizada en el simulador.

determinada la velocidad del punzón, ③, que está montado al final del cilindro. La posición del punzón es registrada en todo momento por un sensor de movimiento lineal, colocado según se puede apreciar en la figura 4.10. El fluido regresa al depósito pasando a través de un filtro de retorno, ④. El sistema es capaz de producir una presión de trabajo de 17,24 MPa, la cual corresponde a una velocidad máxima del punzón de 1 m/s. La fuerza máxima que puede desarrollar el punzón, según estos datos, es de 35 kN. Las posibilidades de trabajo que puede ofrecer el simulador son comparables a las que se utilizan en la industria, cuyas velocidades oscilan entre 0,75 m/s y 1,5 m/s [62]. Uno de los mayores inconvenientes con los que continuamente se encontraban otros investigadores, era precisamente las bajas velocidades y las bajas fuerzas de estirado que conseguían en sus laboratorios, variables superadas con el simulador.

Dohda y otros [13, 14, 63, 64] desarrollaron un dispositivo similar de estirado de pequeñas tiras, con la finalidad de hacer experimentos tribológicos. Sus piezas tenían 450 mm de longitud, 10 mm de anchura, y entre 0,8-1,0 mm de espesor, siendo las velocidades de estirado de 10 mm/s. Aunque el

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

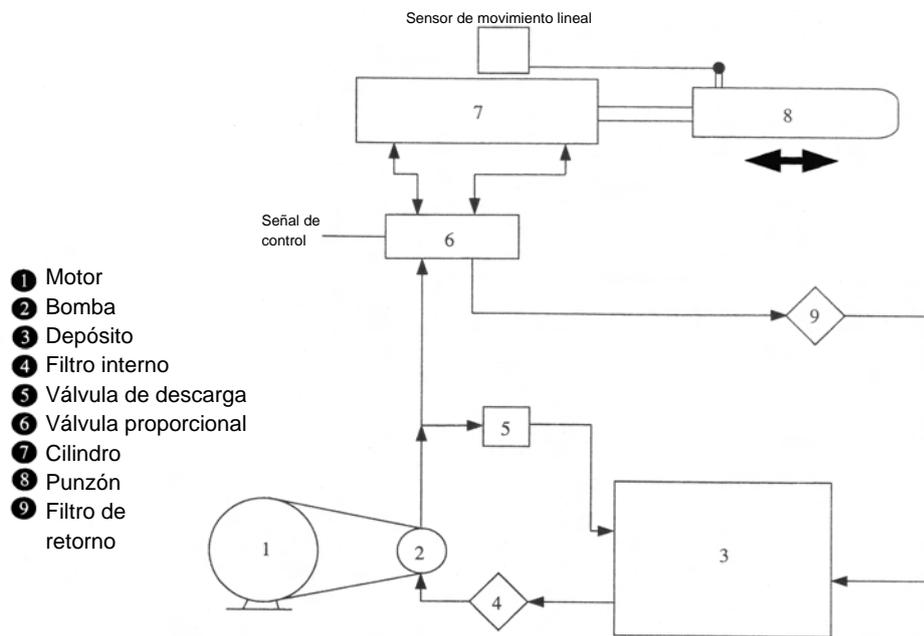


Figura 4.10: Esquema del sistema hidráulico empleado en el simulador de estirado.

4.3. LA ADQUISICIÓN DE LOS DATOS Y LA PREPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

simulador es similar en cuanto al diseño al realizado por Dohda y otros, el construido en esta tesis permite la utilización de tiras de material mucho más anchas, así como también poder trabajar a velocidades mucho más elevadas, semejantes a las utilizadas a nivel industrial. Además, es más sencillo poder cambiar la geometría en el proceso y también hacer lo mismo con las variables utilizadas.

4.3. La adquisición de los datos y la preparación de los experimentos

Para la realización de cada experimento de estirado en el simulador, se corta una pequeña tira de una de las chapas revestidas, con las dimensiones mostradas en la figura 4.12. También se le realiza un agujero para poder situarla sobre el punzón (ver la figura 4.11).



Figura 4.11: Método con el que se realizaron los agujeros a las tiras de material.

Para este tipo de experimentos de estirado en embutición profunda, Ja-

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

worski y otros [4] establecieron que la longitud del material a ensayar tenía que ser superior a 10 cm, para poder evaluar con certeza la reducción sufrida por el mismo. De la misma forma, la anchura tenía que ser igual o superior a 2 cm.

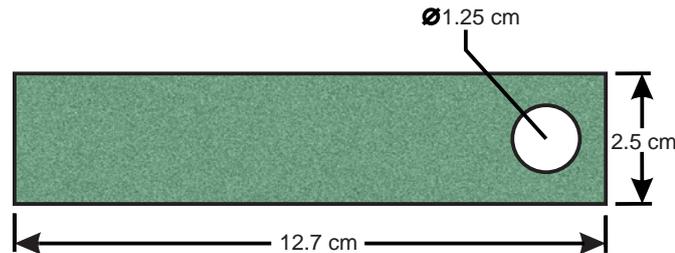


Figura 4.12: Dimensiones nominales de una tira de material para las pruebas.

Seguidamente, mediante la utilización de un micrómetro de tipo de bola y yunque, se registra el espesor inicial, y se toman mediciones en varios puntos de la superficie. A continuación, la tira se sitúa de forma rígida sobre el lateral del punzón con el uso del perno. El dispositivo que aloja a la matriz se mueve en dirección radial gracias a los dos elementos ajustables posteriores, hasta que se haga contacto con la tira de material. Cuando se inicia este contacto, los soportes elásticos sufren una compresión, que es detectada por el par de galgas extensiométricas unidireccionales situadas en la dirección radial. Las salidas de los puentes de Wheatstone descritos en la figura 4.8 se amplifican mediante sendos amplificadores 2311 (que además acondicionan las señales) y se visualizan en un osciloscopio digital Tektronix TDS 420. Pero es a través de una tarjeta de adquisición de datos donde se envían también estas señales a un ordenador, que las registra mediante el empleo del software LabView, en concreto su versión 1.7. La matriz se va moviendo en la dirección radial hasta que se detecta un cambio de voltaje, debido a la deformación elástica del soporte. La deformación elástica de la tira de material asegura que la distancia que existe entre la matriz y la superficie lateral del punzón sea menor que el espesor inicial, y que por tanto, se debería de producir un estirado sin ningún problema; regulando de esta manera el nivel de reducción

4.3. LA ADQUISICIÓN DE LOS DATOS Y LA PREPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

deseado en el estirado, para que cualquier error sistemático en esta parte del experimento se pueda eliminar con facilidad con este ajuste. Además, este método permite asegurar que la reducción no sea tan elevada y que haga que el material se rompa inmediatamente al entrar a la zona de trabajo. Puesto que el dispositivo donde va colocada la matriz no es completamente rígido, y puede haber a su vez algo de recuperación elástica en la tira de material, la reducción real no se puede conocer hasta que se complete el experimento y se mida el espesor final resultante.

Después de haber situado a la matriz en el lugar deseado, se retira hacia atrás utilizando unos tornillos sin fin hasta conseguir apartarse una determinada distancia del punzón, y así éste se sitúa en la posición inicial. A continuación, se mueve otra vez la matriz hasta el punto ajustado previamente, estando ya el simulador preparado para comenzar el experimento. La posición exacta del punzón se mide continuamente por un encoder lineal Siko IGV58-0054, con una resolución de 1000 pulsos/revolución (ver la figura 4.13).



Figura 4.13: Encoder rotacional utilizado para el cálculo del desplazamiento y velocidad del punzón.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

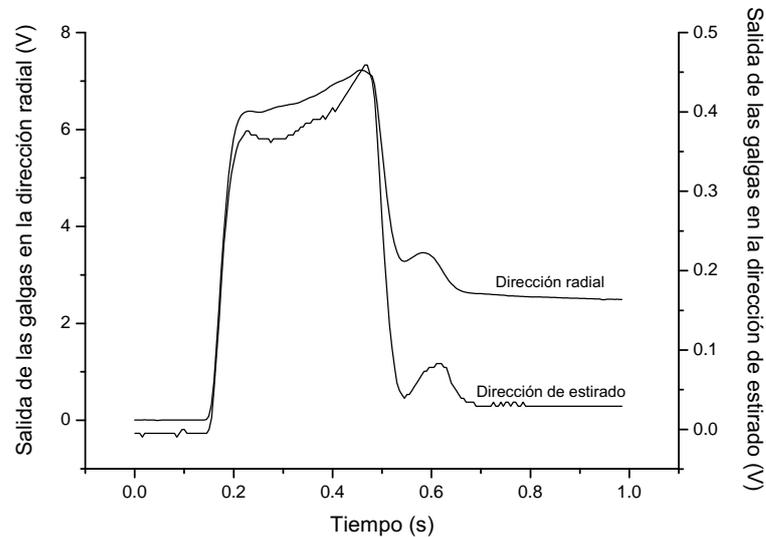


Figura 4.14: Representación típica de las salidas de las galgas al visualizarse en un osciloscopio.

La velocidad con la que se desplaza el punzón durante el experimento se conoce al medir la frecuencia de la salida del encoder con el software Lab-View. Cuando el simulador recibe la orden de empezar un nuevo experimento, entonces el punzón se extiende a la izquierda y empuja la tira a través del espacio existente entre la matriz y el propio punzón, quedando estirada.

Mientras la tira está siendo estirada, las salidas de las galgas extensiométricas se registran en un ordenador, y se almacenan sus valores. En la figura 4.14 se puede ver una gráfica típica con los valores obtenidos en un experimento. Se puede apreciar como existe una gran diferencia en las dos escalas verticales, correspondientes a cada uno de los dos pares de galgas. La fuerza que ejerce el punzón no es constante a lo largo de todo el recorrido, como se puede apreciar en la figura 4.14. La forma de estas curvas ya ha sido estudiada y comentada con anterioridad por Jianjun [65]: la fuerza de estirado se incrementa sustancialmente con el desplazamiento del punzón en la primera fase, se modera el crecimiento en la tercera fase, para alcanzar

4.3. LA ADQUISICIÓN DE LOS DATOS Y LA PREPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

rápidamente la fuerza máxima en la tercera fase, justo antes de completarse el proceso. Las diferencias de voltajes en las salidas de los puentes quedan registradas durante el proceso del estirado. Puesto que las parejas de galgas han sido colocadas de tal manera que midan la fuerza total de compresión en cada dirección, la diferencia de voltaje a la salida será proporcional a la carga total aplicada a cada grupo de soportes elásticos. Según Jaworski y otros [4], esta relación queda expresada por

$$F = kGV, \quad (4.1)$$

donde F es la fuerza total resultante, k es la constante de proporcionalidad, G es la ganancia del amplificador, y V es la diferencia de voltaje medido. La constante de proporcionalidad para cada par de galgas se ha determinado colocando el par de soportes en compresión en una máquina universal de ensayos ATS 910-36 (ver la figura 4.15).



Figura 4.15: La máquina universal de ensayos ATS 910-36 utilizada para el cálculo de las constantes de proporcionalidad de cada par de galgas.

Se han obtenido unos resultados para $k_e = 1,330$ N/V y para $k_r = 0,467$ N/V en las direcciones de estirado y radial, respectivamente. La fuerza en

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

la dirección de estirado y la fuerza en la dirección radial se pueden obtener fácilmente de la ecuación (4.1), conociendo las constantes k_e y k_r .

Después del estirado de cada tira de material, se ha efectuado una serie de análisis sobre las muestras como son una inspección superficial y una medición de la rugosidad. Con la ayuda de un rugosímetro Mitutoyo SJ-301, se han efectuado diversas mediciones para conocer distintos parámetros de la rugosidad superficial posterior al estirado. Para la detección visual de algún tipo de daño en el revestimiento, se ha utilizado un microscopio Olympus SZ, con un aumento máximo de 56 veces el tamaño original. Y por último, para conocer con detalle el alcance del daño producido en aquellas tiras con defectos, se ha empleado un microscopio electrónico de barrido. Además, en algunos casos se ha utilizado también un baño de sulfato de cobre para oxidar cualquier parte metálica en la superficie, indicando que el daño ha atravesado las tres capas de polímero. El color oscuro de la oxidación contrasta fuertemente con el color claro y brillante del revestimiento, siendo el daño fácilmente visible.

4.4. Preparación del material

4.4.1. Las matrices

La figura 4.16 muestra un esquema de la geometría de uno de los dos extremos de una matriz. Es posible obtener una nueva geometría en la matriz simplemente cambiando la posición de la misma, y rotando el ángulo de los vértices, cuyos valores se encuentran entre ϕ_1 y ϕ_4 . Además, existen matrices con dos tipos de longitudes de base (L) distintas, para un mismo tipo de ángulos. Todas las características de las cuatro matrices utilizadas en los experimentos, se encuentran en el listado de la tabla 4.1. Las matrices están hechas de carburo de titanio y han sido proporcionadas por la empresa Weirton Steel, del grupo Arcelor-Mittal. Una vez fueron fabricadas, cada

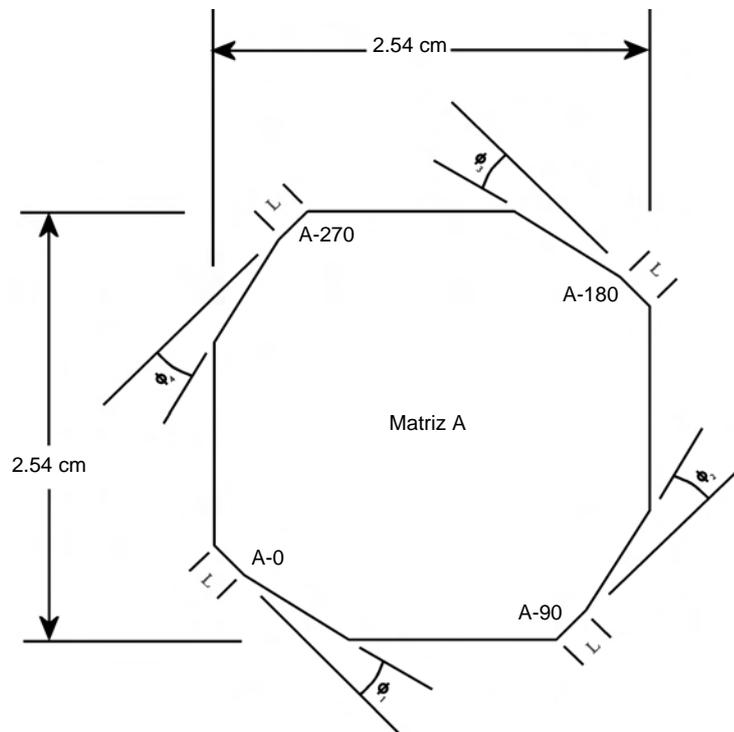


Figura 4.16: Vista superior de una matriz. Para una mejor apreciación, se han exagerado las medidas de los ángulos y algunas longitudes.

una de las superficies de sus cuatro vértices fue pulida con diamante hasta alcanzar una rugosidad media de $R_a = 0,06 \mu\text{m}$ en dichas superficies. En la figura 4.17 se muestra una fotografía de las cuatro matrices disponibles.

Cada vez que se preparaba el simulador para un nuevo ensayo, la superficie de la matriz se limpiaba con acetona para quitar la suciedad que pudiera quedar de un experimento anterior, así como cualquier tipo de grasa residual o, por ejemplo, material adherido a la matriz. El material que era imposible eliminarlo con acetona, se quitó con el uso de un material abrasivo de grano muy fino compuesto de óxido de aluminio, sin que se pudiera observar mediante medición ningún tipo de cambio en la rugosidad superficial producido por la utilización del abrasivo.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Identificación de cada lado de la matriz	Ángulos en los vértices, $\phi_1-\phi_4$ [°]	R_a [μm]	L (cm)
A 0	1	0,06	0,050
A 90	2	0,06	0,050
A 180	3	0,06	0,050
A 270	4	0,06	0,050
B 0	5	0,06	0,050
B 90	6	0,06	0,050
B 180	7	0,06	0,050
B 270	8	0,06	0,050
D 0	5	0,06	0,025
D 90	6	0,06	0,025
D 180	7	0,06	0,025
D 270	8	0,06	0,025
E 0	10	0,06	0,025
E 90	10	0,06	0,050
E 180	12	0,06	0,025
E 270	12	0,06	0,050

Tabla 4.1: Distintas geometrías para las cuatro matrices disponibles.

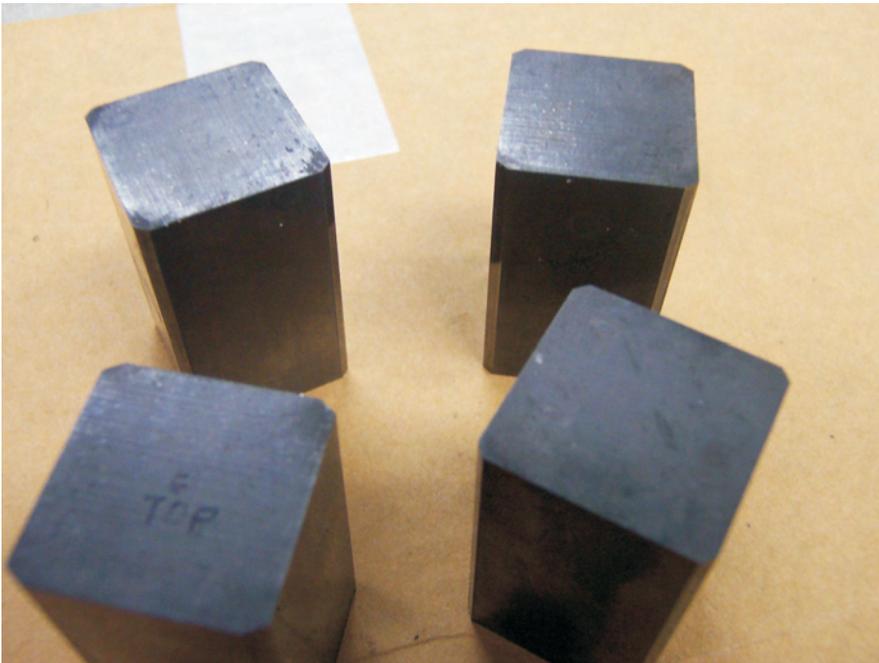


Figura 4.17: Las cuatro matrices disponibles.

4.4.2. Material experimental

La fabricación del acero revestido

El material base utilizado en la fabricación de los aceros para envases es un acero bajo en carbono (0,03 % - 0,13 %).

Este acero se prepara en bobinas laminadas en caliente -soldadas por sus extremos para formar una banda continua- y pasa por un proceso de decapado en baños de ácidos clorhídrico o sulfúrico calientes (entre 75°C y 90°C), en los cuales se disuelven los óxidos de hierro que se habían formado en la banda durante la laminación en caliente, preparando de esta forma la banda para la operación de laminación en frío. Son dos las acciones que tienen lugar en este paso: la primera es mecánica y se encarga de romper la cascarilla de óxidos, mientras que la segunda es de naturaleza química y consiste en un baño en ácido sulfúrico o clorhídrico.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Tras un intenso lavado con agua desmineralizada y un proceso de secado, la banda, que ahora tiene un espesor de apenas 20 mm, se aceita. A lo largo del proceso de decapado, que se realiza a una velocidad superior a los 350 metros por minuto, se comprueba también si la calidad superficial cumple con los requerimientos establecidos, midiendo la rugosidad superficial. Se cortan los bordes, por último, al ancho necesario.

La banda está ya en condiciones de pasar a la laminación en frío. Ésta sirve para reducir el espesor de la banda mediante una operación conjunta de compresión y tracción; y se produce en el tren tandem, formado por una serie de rodillos. La banda sufre una reducción progresiva. La reducción final llega al 90 % del espesor inicial de la banda.

Durante la laminación en frío el acero sufre una serie de modificaciones en su estructura que producen tensiones internas, aumentando su acritud y dureza.

Para regenerar su estructura y poder recuperar sus características mecánicas, la banda debe pasar por un proceso de recristalización, consistente en un calentamiento en torno a los 600°C, temperatura que se mantiene el tiempo necesario, seguido de un enfriamiento controlado.

Como consecuencia del recocido, la banda ha perdido su dureza y es necesario ajustarla a los valores necesarios, por lo que debe pasar a través de la línea de temperizado.

Esta consiste en una o dos cajas de rodillos donde la banda recibe una laminación suave, efectuada en seco, que reduce ligeramente su espesor (menos del 2 %) y a la vez regulariza la superficie. Con trenes de temperizado de mayor potencia y con empleo de lubricantes (en húmedo) se puede obtener reducciones del 30 al 50 % y poder endurecer el material.

Si la bobina ha de sufrir un proceso de estañado, es decir, se ha de convertir en hojalata, entonces ésta llega al sistema de recubrimiento electrolítico. Pasa por unos tanques en los que se procede a su limpieza electrolítica en una

solución alcalina, y a continuación lo hace bajo chorros de agua a presión. El decapado final se produce en una solución de ácido sulfúrico a una temperatura de 25°C a 40°C. La zona de deposición está constituida por una serie de cubas verticales a través de las cuales va pasando la chapa, formando bucles a una velocidad de unos 600 m/min. En este baño el estaño procedente de los ánodos está disuelto en forma iónica, depositándose sobre la banda (cátodo) cuando la corriente continua atraviesa el baño. Una vez recubierta la bobina, que sale de la cuba con un acabado mate, pasa por un nuevo lavado y posteriormente por un proceso muy importante: la fusión del estaño depositado electrolíticamente. Esto se realiza aplicando una tensión eléctrica entre los dos rodillos conductores que transportan la banda. La corriente eléctrica que pasa a través de ellos provoca, por el efecto Joule, un calentamiento que funde la película electrolítica de estaño. Con esto, además de dar brillo a la hojalata, se consigue mejorar la adherencia del recubrimiento y sobre todo formar la interfase, capa intermedia de aleación de hierro-estaño ($FeSn_2$) que mejora notablemente la resistencia a la corrosión.

Existen dos métodos para la aplicación de la(s) capa(s) de polímero sobre el metal base. En el primero de ellos, denominado de *co-laminación* (figura 4.18), las distintas capas de polímero se encuentran en su estado inicial en forma de bobina, y se aplican sucesivamente a la superficie del acero mediante rodillos de presión. Tras completar esta operación, el polímero se vuelve a calentar a cierta temperatura (temperatura de reflujo) para proporcionarle una mayor adherencia y una superficie brillante. En el método de la *co-extrusión* (figura 4.19), la capa de revestimiento se aplica mediante la extrusión directa del polímero sobre el metal base.

Características del material utilizado

Se ha desarrollado un nuevo acero revestido por varias capas de polímero para poder ser utilizado en la fabricación de envases. Este material presenta una ampliación interesante en la investigación del acero revestido, pues hasta la fecha nunca se había fabricado un acero revestido por tres capas de

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

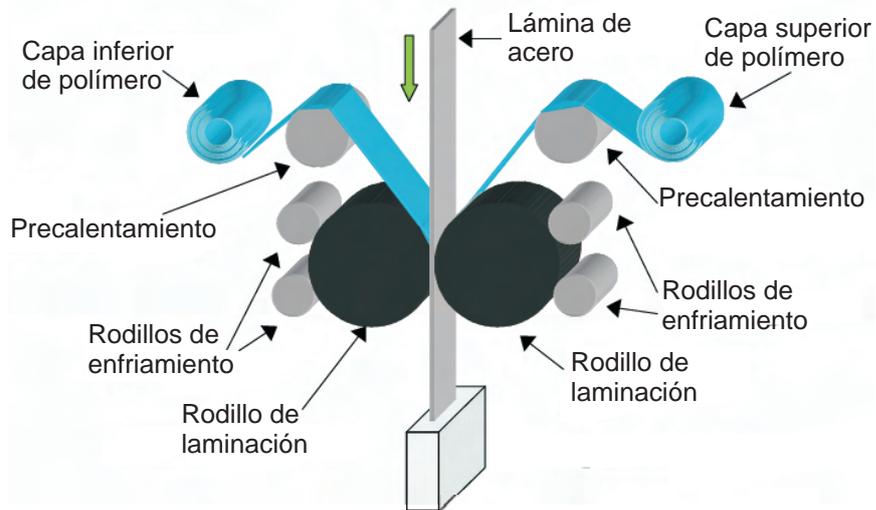


Figura 4.18: Esquema que muestra el método de la *co-laminación* para la aplicación de la capa(s) de polímero.

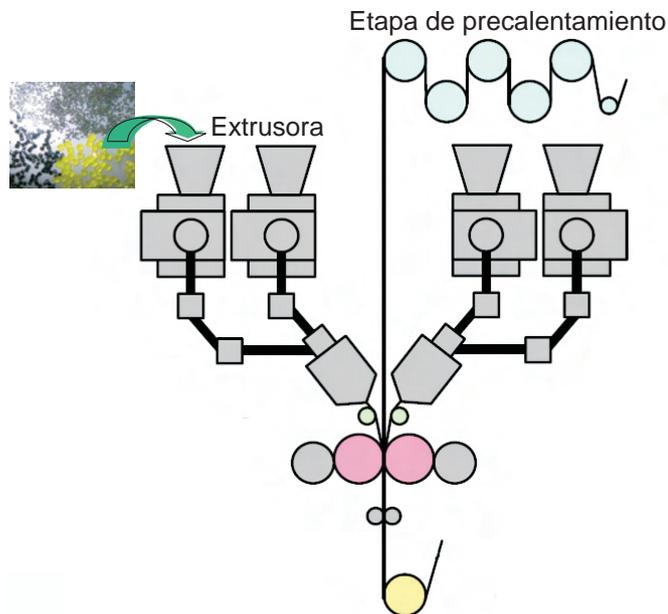


Figura 4.19: Esquema que muestra el método de la *co-extrusión* para la aplicación de la capa(s) de polímero.

polímero. Además, ofrece una serie de ventajas sobre el material de una sola capa, entre las que se encuentran:

- El polímero adherido al acero se puede seleccionar de tal manera que maximice la adhesión entre ambos.
- La superficie exterior puede incorporar la permeabilidad deseada para mejorar la capacidad de la decoración exterior.
- Las propiedades mecánicas de la capa intermedia se pueden modificar para incrementar la procesabilidad del conjunto.
- El espesor de cada capa se puede ajustar para alcanzar los objetivos de diseño propuestos.

Las distintas capas de polímero que son utilizadas como revestimientos en aceros, solamente son útiles si mantienen su integridad durante el procesado: cualquier tipo de fractura o defoliación pueden provocar corrosión en el envase y perjudicar al alimento o bebida que contienen en su interior. Según se indica en varios documentos relacionados con la deformación del metal en la fabricación de latas, se considera a la etapa del estirado como la más crítica para la supervivencia de las capas de polímero en el revestimiento. Durante el proceso del estirado, las presiones son muy elevadas, del orden de 800 MPa [36], así como la deformación que sufre el material al crear una nueva superficie.

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestra el esquema del nuevo revestimiento con tres capas de polímero. Este revestimiento presenta las siguientes características:

- El sistema de tres capas se puede colocar tanto en el lado de la lámina de acero orientado al punzón, como en el lado orientado a la matriz.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

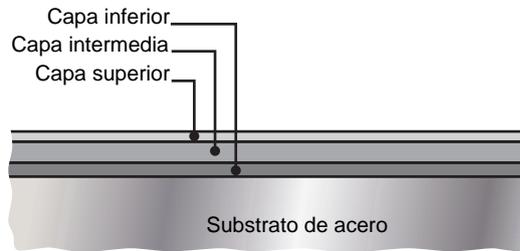


Figura 4.20: Esquema en 2D del acero revestido por tres capas de polímero utilizado en los experimentos.

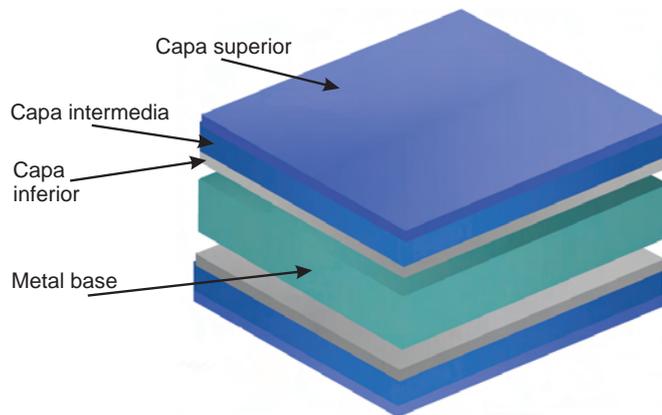


Figura 4.21: Esquema en 3D del metal base revestido por las tres capas de polímero.



Figura 4.22: Los dos materiales utilizados en los ensayos: 702 y 705.

- La capa que está adherida junto al sustrato de metal se le denomina capa de unión o inferior, seguida por la capa intermedia, y finalmente por la capa superior. Una relación común entre las capas inferior/intermedia/superior es 1:3:1.
- Para cumplir con los requerimientos que el cliente pueda solicitar, las capas se pueden reajustar. A continuación se describe una formulación que puede considerarse típica en un material de estas características:
 1. La capa inferior está formada por un copolímero de polipropileno y anhídrido maleico.
 2. La capa intermedia está formada por una combinación de polibuteno y un copolímero aleatorio.
 3. La capa superior estaría formada por una combinación de silicio en un polipropileno homopolímero, polibuteno y un copolímero aleatorio. Ninguna de las capas contiene sustancias perjudiciales para la salud, recogidas en el listado publicado por la FDA [66].

Existe gran flexibilidad a la hora de fabricar este material, siendo muchas las combinaciones de propiedades tanto químicas como mecánicas que se

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Elemento	Composición máxima (%)
Carbono	0,13
Manganeso	0,60
Fósforo	0,015
Azufre	0,03
Silicio	0,02
Cobre	0,06
Níquel	0,04
Cromo	0,06
Molibdeno	0,05
Aluminio	0,10
Otros elementos (cada uno)	0,02

Tabla 4.2: Composición del acero empleado en los materiales 702 y 705.

pueden alcanzar al variar su composición. Para la realización del presente estudio, se ha propuesto a Arcelor-Mittal la fabricación de dos materiales distintos, que finalmente han sido calificados con los números 702 y 705, para que les sirviese como referencia interna. Las capas de polímero son iguales para ambos materiales, siendo el sustrato de acero lo único que varía. El del material 702 tiene un espesor de 0,223 mm, siendo un acero sin recubrimiento alguno posterior a su fabricación. Sin embargo, el sustrato del material 705 tiene un espesor de 0,211 mm, pero con un recubrimiento de estaño (hojalata). Ambos materiales tienen una diferencia visible en el brillo superficial que poseen: el material 705 muestra un color ligeramente más blanco al ser observado con luz ambiental (ver figura 4.22). El sustrato es un acero de tipo L, cuyas especificaciones se encuentran recogidas en las normas ASTM A623 y A623M, cuya equivalencia española sería la norma UNE EN 10202, sobre aceros para embalaje. En las tablas 4.3 y 4.2 se pueden consultar las propiedades mecánicas y de composición del sustrato, respectivamente.

Además, ambos materiales tienen un doble revestimiento, es decir, que poseen tres capas de polímero tanto por el lado superior como por el inferior. El revestimiento de la zona inferior es completamente transparente, mientras que el superior presenta una tonalidad blanca. El color se consigue mediante

Propiedad	Valor
Ensayo de dureza Rockwell (HR30T)	57-65 RCR
Límite elástico	331-414 MPa
Carga de rotura	358-441 MPa
Alargamiento	18-24 (%)

Tabla 4.3: Propiedades mecánicas del acero empleado en los materiales 702 y 705.

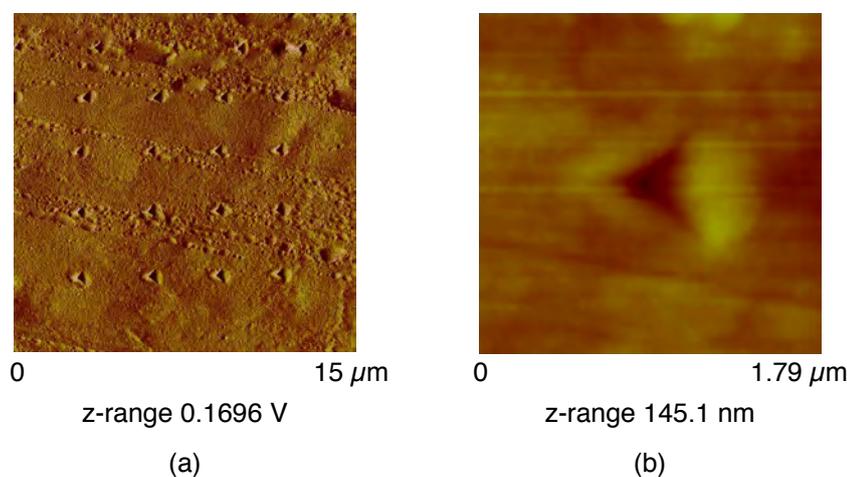


Figura 4.23: Resultados de la prueba de dureza. (a) Indentaciones sobre la superficie del material 702; (b) Vista de detalle de una sola indentación.

pequeñas cantidades de cargas que no afectan a las propiedades mecánicas de los polímeros.

La principal diferencia en la fabricación de estos materiales radica en la capa de estaño. Para el material 702 se ha utilizado una temperatura de reflujo más alta en el procesado de las capas de polímero, con lo cual presentaría una mayor resistencia que el material 705, cuyas capas de polímero no sobrevivieron a ningún experimento.

Con la ayuda de un microscopio de fuerza atómica (ver la figura 4.24), se han realizado una serie de pruebas de dureza para poder evaluar las propie-

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Material	Capa	Dureza (MPa)
705	Superior	88.3
702	Superior	228

Tabla 4.4: Mediciones de la dureza de las capas realizadas con el microscopio de fuerza atómica.

dades del polímero de la capa superior. En la figura 4.23 se puede observar la matriz de indentaciones realizada, siendo éstas siempre una pequeña fracción del espesor de la capa. En la tabla 4.4 se muestran los resultados de dureza obtenidos. Como se aprecia claramente, el material 702 posee una dureza mayor en su capa superior que la del material 705; pero se supone que esto debe ser así en todas las capas, es decir, que el material 702 es más resistente que el 705 en cada una de sus correspondientes capas debido a las temperaturas más altas de reflujo utilizadas en el procesado del mismo, como se ha comentado anteriormente.



Figura 4.24: Ensayo en el microscopio de fuerza atómica.

4.5. Diseño de experimentos

La planificación experimental es un método utilizado para organizar los experimentos y encontrar, en un proceso, qué variables son significativas, cómo se produce la interacción entre ellas, y cuál es la mejor condición que optimice el proceso. El procedimiento para resolver este problema generalmente implica dos pasos: (1) predecir las respuestas de las variables dependientes Y , ajustando las respuestas observadas usando una ecuación basada en los niveles de las variables independientes X y (2) buscar los niveles de las variables independientes X que simultáneamente producen los valores de las variables de respuestas predichas más convenientes.

Para ello se establece un diseño de experimentos (*DOE* en sus siglas en inglés) con el que se establezca la identificación de los factores (variables de proceso) que producen cambios en las variables respuesta (variables resultado de proceso).

Entre los distintos métodos que existen para desarrollar diseños de experimentos (diseños factoriales, diseños factoriales fraccionarios, diseño d-óptimo, análisis de regresión, superficie de respuesta, diseños por bloques,...), se adopta como técnica DOE la del diseño d-óptimo, permitiendo:

- Reducir a un valor mínimo el conjunto de simulaciones y ensayos a realizar para obtener resultados concluyentes sobre la interrelación entre las variables de proceso y los resultados del proceso considerados.
- Deducir la posible interrelación existente entre dos o más variables de proceso sobre un determinado resultado de proceso, de modo que no queden excluidas del análisis global.

El objetivo de la presente investigación es el de conocer si los materiales descritos en el apartado anterior pueden ser sometidos al proceso más crítico en la fabricación de las latas metálicas: el estirado en la fase de la embutición profunda.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la realización del diseño de experimentos, se han tomado en consideración las variables de proceso mostradas en la tabla 3.1. Los investigadores Deneuille y Lecot [39], Doege y otros [38], Delarbre y otros [51], Chang [17] y Jaworski y otros [4] han utilizado estas mismas variables en sus estudios sobre el proceso del estirado sobre láminas metálicas.

Es importante indicar que todos los experimentos se realizan a temperatura ambiente, siendo su valor de 25°C. De la misma forma, de los dos materiales disponibles para los experimentos, y como se ha especificado en el apartado anterior, solamente el material 702 es capaz de soportar sin daños el estirado en el simulador; por lo que todos los experimentos quedan supeditados a este material. Así pues, la variable *Material* tampoco se tendrá en consideración a la hora de realizar el diseño de experimentos.

El ángulo del vértice de la matriz (ϕ) es aquel que forma la superficie de la matriz con la que incide por primera vez el material al iniciarse el estirado, con el lateral del punzón. Con las matrices, es posible poder variar este ángulo entre 1° y 12°, según se ha indicado en la tabla 4.1.

La máxima *velocidad* que puede alcanzar el punzón es de 1 m/s, y es posible variarla para poder comprobar su efecto en la calidad final del estirado.

Variable	Abreviatura	Unidades
Ángulo del vértice de la matriz	AV	°
Velocidad del punzón	VP	m/s
Nivel de reducción	NR	%
Temperatura de la matriz	TM	°C

Tabla 4.5: Las cuatro variables de proceso del diseño de experimentos.

El *nivel de reducción* que ha de experimentar el espesor de la tira de material después de ser procesada se puede regular mediante sendos tornillos sin fin (según se indica en las figuras 4.2, 4.4 y 4.5), que aproximan o alejan la matriz al punzón; y se mide porcentualmente respecto al espesor inicial. A modo de ejemplo, si un material posee un espesor inicial de 100 mm antes

de ser sometido al proceso del estirado, y tras éste, su espesor final es de 85 mm, se ha producido entonces una reducción del 15 %.

El dispositivo que soporta a la matriz dispone cerca de ésta de dos resistencias calefactoras que, cuando se activan, hacen que la matriz aumente de *temperatura*. Mediante un termómetro de contacto superficial, se puede medir la temperatura a la que se encuentra su superficie antes de realizar un experimento.

La primera consideración de la aplicación del diseño de experimentos al proceso del estirado en la fase de la embutición profunda consiste en la determinación del número de niveles que se deben tomar para cada una de las cuatro variables de proceso, ya que de ello depende el correcto tratamiento posterior de los resultados de proceso.

A este respecto se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- El aumento del número de niveles en las variables de proceso supone un incremento en el número de simulaciones/ensayos a realizar, lo cual se traduce en un mayor tiempo de computación en el proceso de simulación, de extracción de información y de clasificación y tratamiento de la misma.
- El aumento del número de niveles permite una modelización polinómica de los resultados con expresiones de orden más elevado, lo cual permite aproximar con una mayor fiabilidad los resultados de proceso en función de sus variables.

Las experiencias más comunes suelen efectuarse con sólo dos niveles ya que con ello se puede determinar fácilmente la dependencia entre las variables de estudio y las variables independientes, aunque ello supone, como principal limitación, el poder modelizar el comportamiento sólo con expresiones lineales.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Variable de proceso		Niveles				
Ángulo del vértice de la matriz	°	2	4	6	8	10
Velocidad del punzón	m/s	0,5	0,75	1		
Nivel de reducción	%	5	10	15	20	
Temperatura de la matriz	°C	25	100			

Tabla 4.6: Niveles de las variables de proceso para los experimentos con la parte exterior de la tira de material.

En este caso, bajo la perspectiva de un diseño factorial, el número total de ensayos/simulaciones a realizar sería de $2^4 = 16$. En los experimentos realizados por Van der Aa y otros [36, 67], Huang y otros [40] y Jaworski y otros [4], se ha demostrado que este número es muy bajo, y que es necesario ampliar los números de niveles a considerar, especialmente en aquellas variables de proceso más significativas. Y esto es posible al utilizar el diseño d-óptimo, pues permite la realización de un diseño de experimentos con variables a distintos niveles. En la presente investigación, se dedicarán más niveles a las variables del *ángulo del vértice de la matriz* y al *nivel de reducción*, porque se ha demostrado en los trabajos de Van der Aa, Jaworki y Huang que estas variables son las más influyentes en el proceso, para que de esta forma se permita aproximar con una mayor fiabilidad los resultados de proceso.

En la tabla 4.6 se muestran las variables de proceso con los niveles seleccionados para realizar el estirado en la superficie exterior de cada tira (la matriz contacta con el material por su lado blanco). En cambio, en la tabla 4.7 se muestran las variables con los niveles seleccionados para efectuar el estirado por la superficie interior de las tiras (la matriz contacta con el material por su lado transparente). En este caso, se utiliza el diseño factorial de $2^4 = 16$ por no ser objetivo prioritario el estirado por la superficie interior de las tiras. Solamente en el caso que los resultados lo requiriesen, se ampliaría el número de niveles a considerar. Jaworski y otros [4] utilizaron este mismo diseño factorial en su investigación.

La elección del valor de los niveles no se ha realizado de forma arbitraria.

Variable de proceso		Niveles	
Ángulo del vértice de la matriz	°	4	8
Velocidad del punzón	m/s	0,5	1
Nivel de reducción	%	5	20
Temperatura de la matriz	°C	25	100

Tabla 4.7: Niveles de las variables de proceso para los experimentos con la parte interior de la tira de material.

Tanto Huang y otros [40] como Jaworski y otros [4] utilizaron en su diseño de experimentos los ángulos de matriz siguientes: 2° , 4° , 6° , 8° y 10° . Uno de los objetivos que tenían era poder determinar cual era el ángulo de la matriz crítico, es decir, conocer a partir de qué ángulo el estirado ya no se producía correctamente. Se aplicará el mismo criterio con el que ellos seleccionaron los ángulos, haciendo que no sean consecutivos, y escogiendo los ángulos pares, es decir, 2° , 4° , 6° , 8° y 10° .

El simulador de estirado es capaz de proporcionar una velocidad máxima de 1 m/s, valor que se escoge para uno de los tres niveles de la variable de la velocidad del punzón. Para los otros dos niveles se consideran los valores de 0,5 m/s y de 0,75 m/s como perfectamente válidos, al representar la mitad de la velocidad máxima y sus $3/4$ partes.

Los valores porcentuales de los niveles de reducción se han establecido en el 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, según se ha ido incrementando el valor de la reducción inicial del 5 %. Cada incremento ha sido del 5 % respecto al anterior valor, al igual que lo hicieron Jaworski y otros [4], y Huang y otros [54] en sus experimentos. Con las limitaciones de diseño del simulador y del material, ha sido muy complicado conseguir reducciones iguales o superiores al 30 %.

Se ha escogido el valor de 25°C como uno de los dos valores de la temperatura de la matriz, por ser esta la temperatura media ambiental medida en el laboratorio donde se han efectuado los experimentos. Para poder evaluar el efecto de un aumento considerable de la temperatura de la matriz,

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

se utilizaran los 100°C como la otra temperatura a considerar, es decir, un valor superior en cuatro veces a la temperatura ambiental. Los experimentos realizados por Jaworski y otros [4] demostraron sobre tiras de acero revestido por una sola capa de polímero, que los resultados eran distintos si se precalentaba la matriz a 100°C, mejorando sensiblemente la propiedades finales. Esta temperatura permite asegurar que no se alcanzará el punto de fusión de las capas de polímero, y que haga que se degraden.

Para la obtención del listado de los diferentes experimentos, se ha utilizado el programa Design ExpertTM, comercializado específicamente para la realización de diseños de experimentos y posterior tratamiento de los resultados. Tras seleccionar el método del diseño d-óptimo, y después de introducir las variables de proceso junto con sus niveles, se ha podido confeccionar un listado de los experimentos a realizar, con las combinaciones necesarias para que se puedan tener en cuenta todas las interacciones entre las variables de proceso consideradas; y simultáneamente obtener una modelización polinómica de segundo orden para cada uno de los indicadores propuestos.

Tanto el material 702 como el 705 poseen un revestimiento de tres capas de polímero por ambas caras. Solamente se puede estudiar el efecto del estirado de la cara exterior al punzón, pues la cara interior no sufre deformación ni daño algunos. Es por ello por lo que se han confeccionado dos listados: uno para las superficies exteriores, de color blanco; y otro para las superficies interiores, con las capas de polímero transparentes. Estos listados se muestran en las tablas 4.8 y 4.9. Como se puede apreciar, el número de experimentos a realizar en el estirado de la superficie interior es menor que el de la exterior. Esto es debido a que el material no sufre apenas daños por este lado (en cualquier caso, se ha podido contrastar) además que el estirado por la parte interior carece de interés para las industrias fabricantes de latas.

4.5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Número de experimento	Ángulo de vértice (°)	Velocidad del punzón (m/s)	Nivel de Reducción (%)	Temperatura de la matriz (°C)
1	8	0,75	20	25
2	4	0,75	10	25
3	10	0,75	20	25
4	8	1	20	25
5	4	0,5	5	100
6	8	0,5	20	100
7	6	0,5	5	25
8	2	0,5	10	25
9	8	0,75	15	25
10	6	1	15	25
11	4	0,5	10	100
12	8	0,5	15	100
13	6	1	10	25
14	10	1	20	100
15	2	1	15	25
16	6	1	20	100
17	10	0,5	10	25
18	10	1	5	25
19	4	1	5	25
20	2	0,5	20	25
21	6	0,5	10	100
22	2	0,5	5	100
23	4	0,5	20	25
24	10	0,75	5	100
25	8	0,5	5	25
26	2	0,75	5	25
27	2	0,5	15	100
28	8	1	10	25
29	6	0,5	20	25
30	2	1	10	100
31	2	1	20	100
32	8	1	5	100
33	8	0,75	10	100
34	10	1	15	100
35	10	0,5	15	25
36	6	0,75	15	100
37	4	0,75	20	100
38	4	1	15	100
39	4	1	20	25
40	10	0,5	20	100
41	6	1	5	100
42	10	0,75	10	100
43	6	0,75	5	25
44	2	0,75	20	100
45	4	0,75	15	25
46	8	0,75	5	100

Tabla 4.8: Listado de los 46 experimentos a realizar sobre la superficie exterior del material.

Número de experimento	Ángulo de vértice (°)	Velocidad del punzón (m/s)	Nivel de Reducción (%)	Temperatura de la matriz (°C)
1	4	1	5	100
2	4	1	20	100
3	4	0,5	5	100
4	8	0,5	20	100
5	4	0,5	20	25
6	4	0,5	5	25
7	8	0,5	5	25
8	8	1	5	100
9	8	1	5	25
10	4	1	20	25
11	8	1	20	25

Tabla 4.9: Listado de los 11 experimentos a realizar sobre la superficie interior del material.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se llevará a cabo un análisis de las fuerzas implicadas en la fase de estirado en el proceso de la embutición profunda, que servirá de ayuda para determinar la viabilidad y procesabilidad del nuevo material como alternativa en la fabricación de envases y latas metálicos. Además, se expondrán los resultados obtenidos tanto en la modelización teórica como tras la realización de los experimentos, así como los conseguidos al analizar las superficies de las tiras de material ya estiradas.

Las propiedades tribológicas se obtienen a partir de los datos obtenidos por el simulador de estirado. Como se ha comentado con anterioridad, para que el revestimiento de polímero sirva como superficie de contacto con los alimentos o bebidas, no se debe producir ningún daño en éste durante cualquiera de las operaciones de fabricación de la lata. Se han realizado numerosas pruebas para determinar la supervivencia de las capas de polímero al proceso de estirado, siendo verificado a través de los modelos del límite superior desarrollados en esta investigación, que quedan validados al contrastar los resultados teóricos con los experimentales.

5.1. Análisis de las fuerzas

Como se ha descrito en el capítulo 3, las galgas extensiométricas se utilizan para medir las fuerzas que se ejercen sobre la matriz durante la operación de estirado. En la figura 5.1 se muestra un diagrama en el que se muestra gráficamente la acción de las fuerzas sobre la matriz. Las deformaciones en la dirección de estirado \bar{e} y en la dirección radial \bar{r} se miden gracias a las parejas de galgas extensiométricas, siendo convertidas las diferencias de voltaje en las fuerzas F_e y F_r utilizando la ecuación 4.1. Una vez obtenidas estas fuerzas, entonces se convierten a las componentes normal y tangencial de la fuerza resultante ejercida sobre la matriz, N y F_f , respectivamente. Por estática, para que haya equilibrio en las direcciones \bar{n} y \bar{t} se ha de cumplir

$$N = F_r \cos\phi + F_e \sin\phi, \quad (5.1)$$

$$F_f = F_e \cos\phi - F_r \sin\phi, \quad (5.2)$$

donde N es la fuerza normal; F_f es la fuerza de fricción, y ϕ es el ángulo de la matriz.

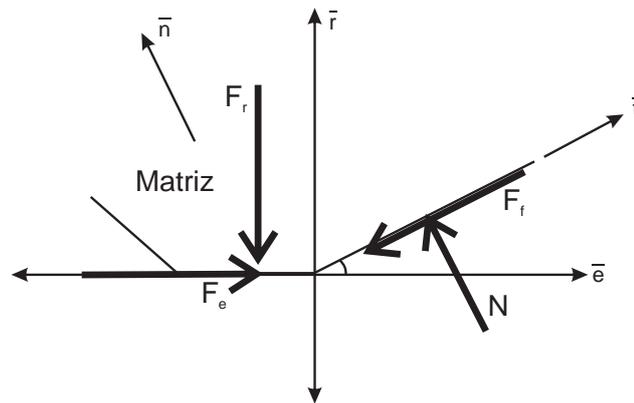


Figura 5.1: Diagrama de fuerzas durante el estirado. F_e es la fuerza que se mide en la dirección de estirado; F_r es la fuerza medida en la dirección radial; F_f es la fuerza de fricción sobre la superficie de la matriz y N es la fuerza normal sobre ésta.

Las figuras 5.2 y 5.3 representan la fuerza de fricción, F_f , y la fuerza normal, N , respectivamente, frente a la reducción aplicada al material 702, utilizando un ángulo de matriz de $\phi = 10^\circ$. Como se puede observar, los puntos representados siguen una tendencia ascendente, como se podría esperar. Cuanto mayor es la reducción aplicada sobre el material, mayor es la fuerza resultante sobre la matriz.

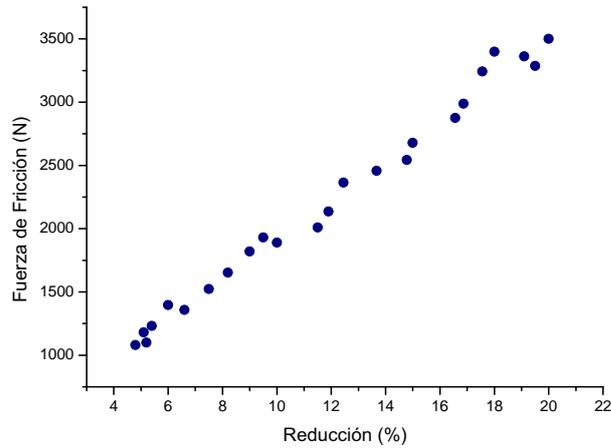


Figura 5.2: La fuerza de fricción frente a la reducción experimentada por material al producirse el estirado, con $\phi = 10^\circ$ y $v_p = 0,75$ m/s.

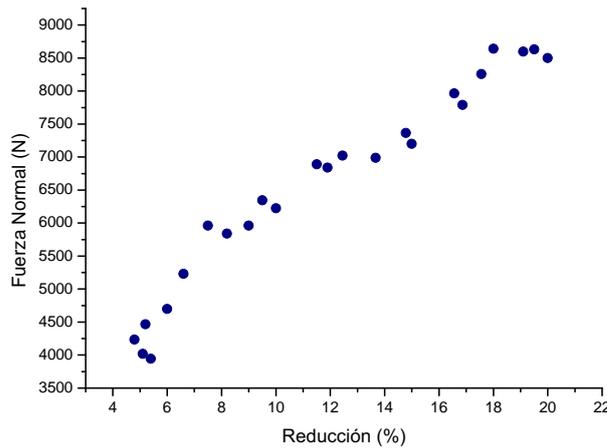


Figura 5.3: La fuerza normal frente a la reducción experimentada por material al producirse el estirado, con $\phi = 10^\circ$ y $v_p = 0,75$ m/s.

5. RESULTADOS

	Fuerza de fricción	Fuerza normal
Modelo con el mejor ajuste	Multiplicativo	Logarítmico
Factor de correlación	0,9945	0,9872
R^2	98,90 %	97,45 %
Error absoluto medio	0,032	193,214

Tabla 5.1: Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos de las fuerzas de fricción y normal frente a la reducción experimentada por el material.

Con el programa estadístico *Statgraphics v5.1* se han efectuado una serie de análisis de regresión sobre los datos reflejados en las figuras 5.2 y 5.3.

En la tabla resumen 5.1 se puede observar como el ajuste entre los datos de ambas curvas es muy elevado. El modelo que ofrece un mejor ajuste para los datos de la fuerza de fricción es el *multiplicativo*, mientras que el *logarítmico* es el que mejor lo hace para los de la fuerza normal. Estos ajustes se pueden ver con claridad en las figuras 5.4 y 5.5, donde gráficamente se representan las curvas de los dos modelos de regresión.

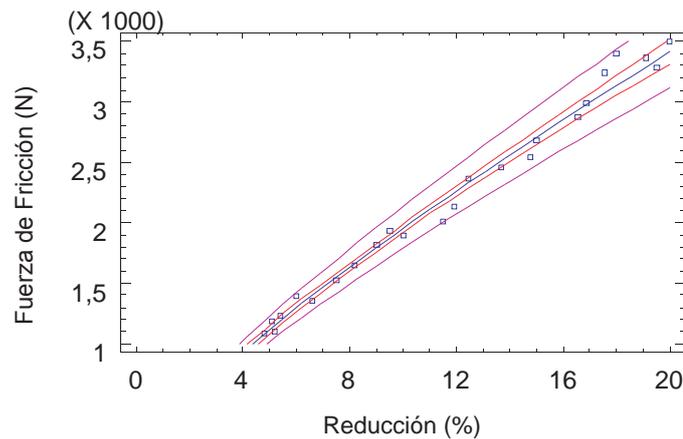


Figura 5.4: Curva del modelo de regresión (fuerza de fricción, porcentaje de reducción).

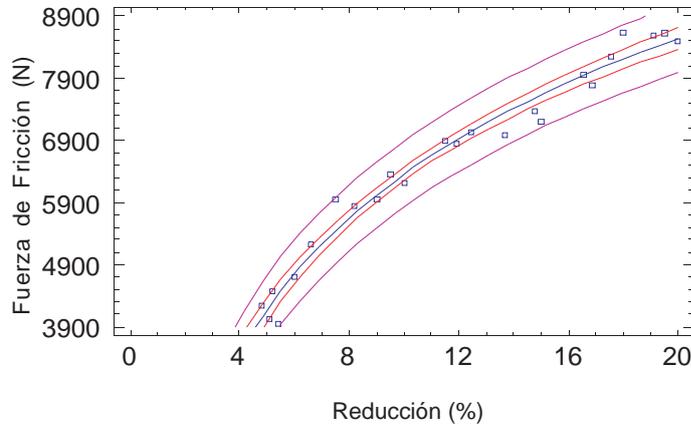


Figura 5.5: Curva del modelo de regresión (fuerza normal, porcentaje de reducción).

La ecuación de regresión para la curva de la fuerza de fricción es

$$\text{Fuerza de fricción} = 305,528 \cdot (\text{Porcentaje de reducción})^{0,80572}, \quad (5.3)$$

mientras que la de la curva de la fuerza normal es

$$\text{Fuerza normal} = -903,653 + 3154,19 \cdot \ln(\text{Porcentaje de reducción}) \quad (5.4)$$

La figura 5.6 representa a la fuerza normal frente a la fuerza de fricción para el material 702, el único que sobrevive a la fase de estirado. Utilizando la fórmula del modelo de fricción de Coulomb

$$F_f = \mu N, \quad (5.5)$$

se puede encontrar el coeficiente de fricción para el material, donde μ es el coeficiente de fricción de Coulomb, siendo también el valor de la pendiente de la línea de la figura 5.6. El valor de esta pendiente es de $\mu = 0,35$.

En la tabla 5.2 se puede observar como el ajuste entre los datos representados es muy elevado. El modelo que ofrece un mejor ajuste es el *exponencial*.

5. RESULTADOS

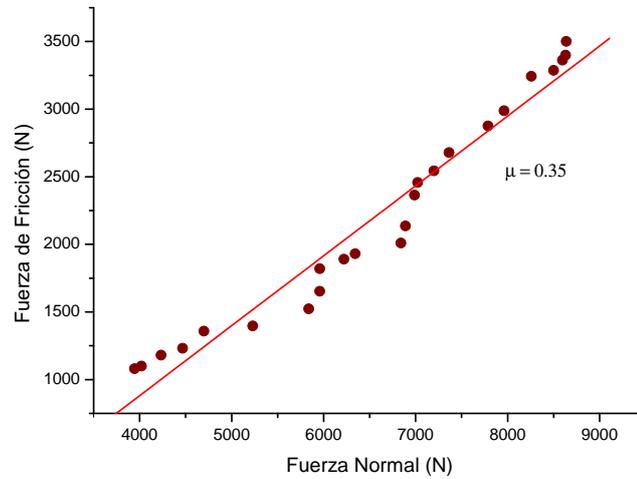


Figura 5.6: La fuerza normal frente a la fuerza de fricción, con $\phi = 10^\circ$ y $v_p = 0,75$ m/s.

Modelo con el mejor ajuste	Exponencial
Factor de correlación	0,9925
R^2	98,51 %
Error absoluto medio	0,037

Tabla 5.2: Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos de la fuerza de fricción frente a la fuerza normal.

Este ajuste se puede ver con claridad en la figura 5.7, donde gráficamente se representa la curva del modelo de regresión.

La ecuación de regresión es

$$\text{Fuerza de fricción} = e^{(5,97+0,00025 \cdot \text{Fuerza normal})} \quad (5.6)$$

Es más precisa la aplicación del coeficiente de Coulomb en aquellas situaciones en las que se somete al material a cargas elevadas, como lo es el conformado de metales, según se indica en el capítulo dedicado al conformado de éstos en el libro de Kalpakjian [58]. En la figura 5.8 se puede observar una gráfica que muestra el valor de μ frente a la reducción aplicada al mate-

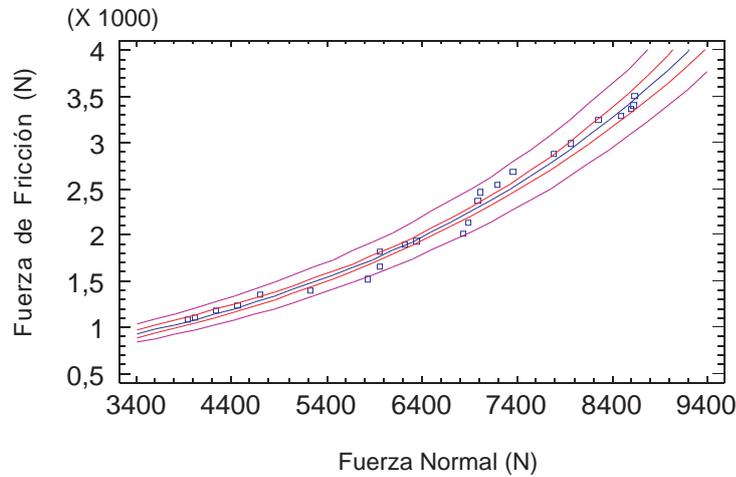


Figura 5.7: Curva del modelo de regresión (fuerza de fricción, fuerza normal).

Modelo con el mejor ajuste	Multiplicativo
Factor de correlación	-0,9952
R^2	99,06 %
Error absoluto medio	0,0233

Tabla 5.3: Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos del coeficiente de fricción frente al porcentaje de reducción.

rial. Según se puede apreciar, el coeficiente de fricción es menor conforme va aumentando la reducción, ya que la componente de la fuerza radial, F_r , es cada vez mayor al ir aumentando esta reducción; y esto hace que μ sea cada vez menor (ecuación 5.5).

En la tabla 5.3 se puede observar como el ajuste entre los datos representados es muy elevado. El modelo que ofrece un mejor ajuste es el *multiplicativo*. Este ajuste se puede ver con claridad en la figura 5.9, donde gráficamente se representa la curva del modelo de regresión.

5. RESULTADOS

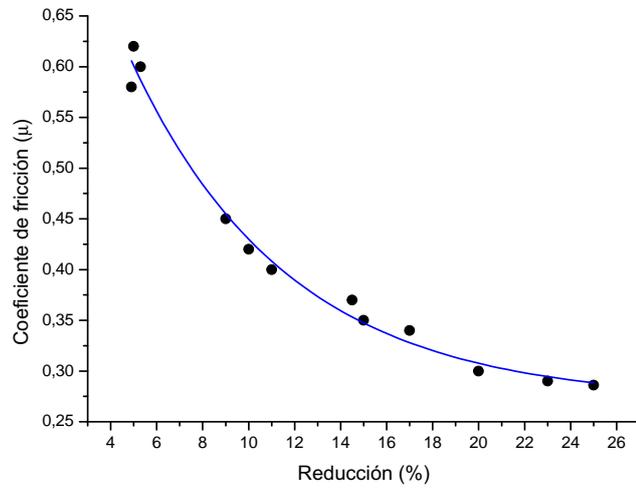


Figura 5.8: Al aumentar la reducción, disminuye el coeficiente de fricción, pero no de forma lineal.

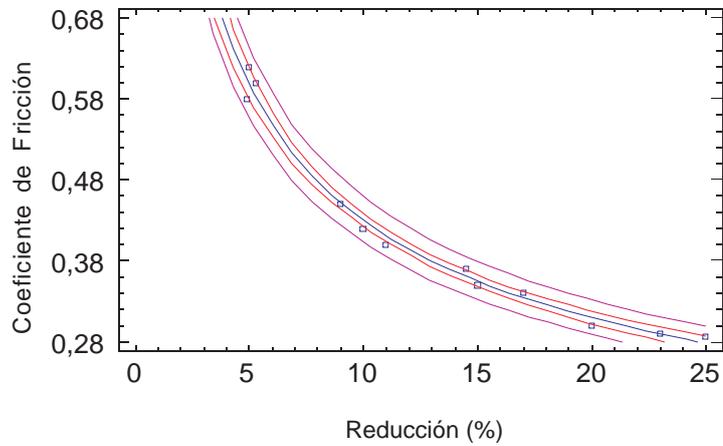


Figura 5.9: Curva del modelo de regresión (coeficiente de fricción, reducción).

La ecuación de regresión es

$$\text{Coeficiente de fricción} = 1,28 \cdot \text{Porcentaje de reducción}^{-0,47} \quad (5.7)$$

5.2. Resultados teóricos

Los dos modelos desarrollados del límite superior permiten la realización de un simple análisis de la procesabilidad del material en la fase de estirado para la embutición profunda. Se pueden obtener con facilidad curvas de potencia adimensionales del sistema, especificando para ello el material necesario y los parámetros de procesado; y se puede también optimizar la ecuación 3.7. Al mismo tiempo, se pueden relacionar en otras gráficas la potencia con la reducción, el ángulo de la matriz, etc. Todas estas gráficas serán distintas según el modelo empleado: estirado correcto o estirado defectuoso. El teorema del límite superior indica que el proceso seguirá aquel estado de deformación que requiera de la menor pérdida o disipación de potencia. El hecho de comparar las curvas de potencia para cada uno de los dos modelos, indicará cual será el modo de trabajo que se produce bajo ciertas condiciones.

En los siguientes resultados, la potencia requerida por el proceso ha sido adimensionalizada en la forma P/kay_iv_p , donde P es la potencia, k es la resistencia a la cortadura del material, a es la anchura de la tira de material, y_i es el espesor inicial del metal y v_p es la velocidad del punzón. La geometría del proceso se puede variar al cambiar las matrices, para conseguir distintos ángulos ϕ , según la disponibilidad mostrada en la tabla 4.1. Las distintas características del material se pueden encontrar en la tabla 4.3.

Puesto que existe una adhesión ideal en la modelización entre las superficies del punzón y del material, el coeficiente de fricción entre ambas tiene un valor de $m_1 = 1$ para los cálculos. A su vez, se expresa la tensión de cortadura de los revestimientos de polímero como una fracción de la del metal de sustrato. De la tabla 4.3, se puede extraer el límite elástico del metal, que es $Y_m = 372$ MPa, valor que se obtiene al tomar un valor intermedio entre el rango posible, proporcionando un valor de $k_m = 214,77$ MPa de resistencia a la cortadura, según el criterio de von Mises ($k = Y/\sqrt{3}$). Las capas de polímero están formadas por materiales como polipropilenos, polibutenos, copolímeros, etc. Los límites elásticos de los anteriores materiales no superan

5. RESULTADOS

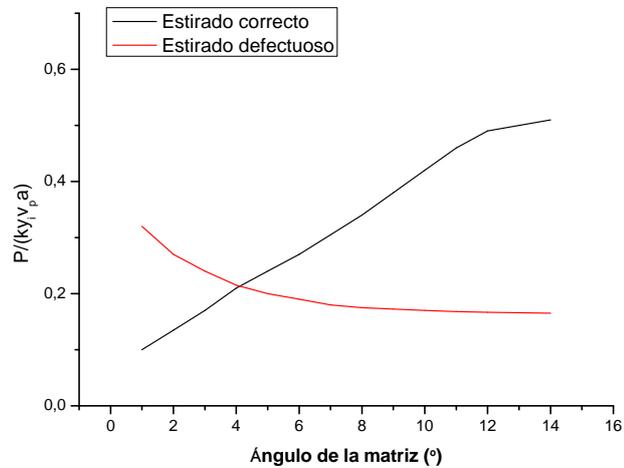


Figura 5.10: Curvas de potencia optimizadas para los modelos del estirado correcto y defectuoso.

los 243 MPa, según datos publicados la base de datos *Campus*TM. Así pues, se obtiene que $k_p = 140,37$ MPa y que la relación entre las resistencias a la cortadura es $k_m = 1,53k_p$. Para simplificar los cálculos, se estimará que los coeficientes de fricción entre polímeros sean iguales, es decir $m_3 \approx m_4$, para el modelo del estirado correcto.

En la figura 5.10 se pueden apreciar las curvas de potencia optimizadas para los modelos del estirado correcto y defectuoso, variando el ángulo de la matriz. Se puede apreciar que por debajo de cierto ángulo de matriz, en este caso $\phi \approx 4^\circ$, el estirado correcto requerirá de una menor potencia, siendo ésta la zona de trabajo preferida, por el teorema del límite superior. Por encima de este ángulo, el estirado defectuoso requerirá de menor potencia. Este ángulo crítico, ϕ_c , es de gran interés desde la perspectiva del conformado, pues determinará la geometría que deberá de tener la matriz para conseguir que el estirado se produzca de forma correcta al tratar aceros revestidos por tres capas de polímero.

La figura 5.11 muestra las curvas de potencia para un caso concreto, en el que la reducción que experimenta el material es del 10%. Los factores de fricción utilizados son $m_1 = 1$, $m_2 = m_5 = 0,9$, $m_3 = m_4 = 0,03$. Con todos

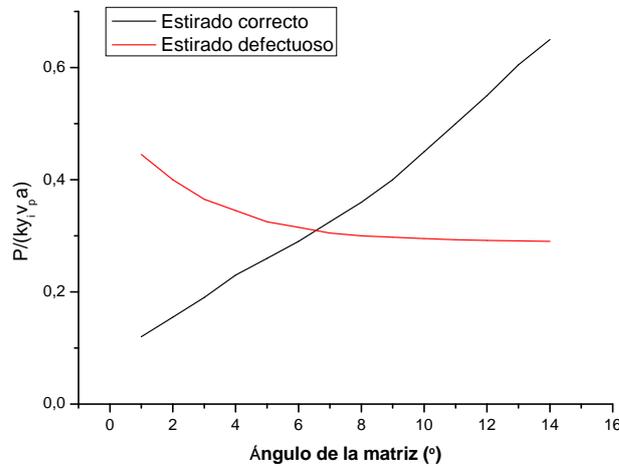


Figura 5.11: Curvas de potencia para ambos modelos utilizando los siguientes parámetros: $\%_{red} = 10\%$, $y_i = 0,254$ mm, $t_{1i} = t_{3i} = 0,0254$ mm, $t_{2i} = 0,0762$ mm, $k_m = 1,53k_p$, $m_1 = 1$, $m_2 = m_5 = 0,9$, $m_3 = m_4 = 0,03$.

estos datos, el ángulo crítico de la matriz es ahora $\phi_c = 6,7^\circ$.

Los programas generados para los modelos teóricos presentados permiten el cálculo rápido de las condiciones de proceso, y del comportamiento del material ante un cambio de cualquier variable en la fase del estirado. Ambos programas persiguen la minimización de la ecuación 3.7, mediante sucesivas aproximaciones y acotaciones en un espacio N-dimensional. Tanto la velocidad del punzón (v_P) como la anchura (a) del material son directamente proporcionales a la potencia, según las expresiones 3.6 y 3.5. Por ello, cualquier cambio en alguna de estas variables, se verá traducido en la ecuación 3.7 de forma proporcional.

Sucede lo mismo con las variables propias del material, las tensiones de cizalladura (k_i) y los coeficientes de fricción (m_i), como se deduce de las expresiones 3.23 y 3.37. Los programas buscan siempre los mínimos valores para estas variables. De hecho, han de tener un valor prefijado, superior a cero, para que la potencia final no sea nula. Lo mismo es aplicable para el espesor inicial de las diferentes capas, pues si no se prefijan a una determinada cantidad, el programa siempre buscará el nulo espesor, que es el que le

5. RESULTADOS

	Valor	Valor	Valor	Valor
Potencia	7234.56	256743.32	287654.89	310844.12
α_1	20.294	28.210	18.455	30.765
α_2	18.234	27.634	17.465	26.973
α_3	36.610	46.772	32.344	49.654
α_4	23.055	31.856	24.523	38.452
α_5	24.565	33.788	26.345	30.132
α_6	35.331	43.898	33.465	52.322
α_7	30.008	38.354	32.560	44.452
α_8	27.703	33.653	33.237	39.675
α_9	22.977	26.766	28.455	33.820
α_{10}	32.867	38.776	29.648	43.895
β_1	37.935	45.890	41.566	48.520
β_2	33.856	41.663	36.575	46.233
β_3	38.890	48.980	42.455	49.566
β_4	36.898	46.364	38.955	52.510
β_5	29.344	37.533	34.565	39.789
β_6	42.587	48.865	40.532	51.465
β_7	28.207	32.467	36.578	35.876
β_8	24.170	29.677	26.855	30.008
β_9	38.661	43.521	42.956	48.590
β_{10}	42.622	51.234	45.988	56.280
β_{11}	36.446	57.677	38.341	59.735
ϕ	0.5	0.5	7	7
μ	0.844	0.566	0.932	0.673
τ	0.552	0.678	0.896	0.734
γ	0.664	0.664	0.765	0.798
y_f	0.2413	0.1905	0.2413	0.1905
y_{1f}	0.0241	0.0190	0.0241	0.0190
y_{2f}	0.0723	0.0506	0.0723	0.0506
y_{3f}	0.0241	0.0190	0.0241	0.0190
y_i	0.254	0.254	0.254	0.254
y_{1i}	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
y_{2i}	0.0762	0.0762	0.0762	0.0762
y_{3i}	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254

Tabla 5.4: Tabla con cuatro simulaciones utilizando el programa del estirado correcto. Cada columna es una simulación, y en las filas se muestran los valores adoptados por cada una de las variables.

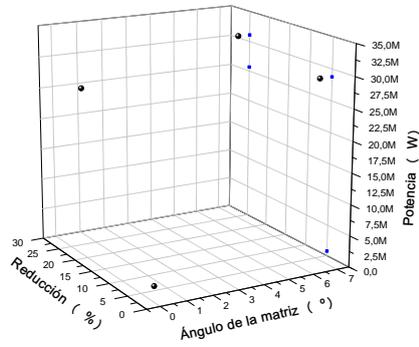
proporciona la mínima potencia.

En la tabla 5.4 se recogen los resultados de 4 simulaciones realizadas con el modelo de estirado correcto. Cada columna representa a una simulación, mientras que en las filas se muestran los valores adoptados por las variables para cada una de estas 4 simulaciones. La *Potencia* es la variable resultado, valor que el programa minimiza al máximo según unas condiciones establecidas desde el principio. Para todas estas simulaciones, se han utilizado los siguientes valores prefijados:

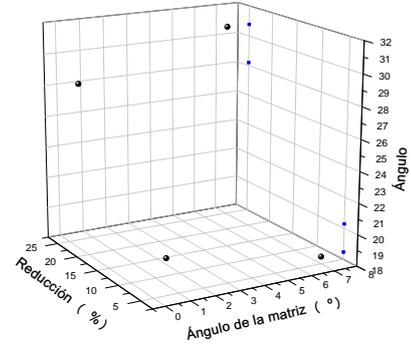
- Velocidad del punzón (v_P) = 1 m/s
- Anchura del material (a) = 16 mm
- Factor de fricción $m_1 = 1$
- Factor de fricción $m_2 =$ Factor de fricción $m_5 = 0,9$
- Factor de fricción $m_3 =$ Factor de fricción $m_4 = 0,03$
- Tensión de cizalladura de los polímeros (k_p) = 0,5
- Tensión de cizalladura del metal (k_m) = $1,53k_p$
- Espesor inicial de la capa superior de polímero (y_{3i}) = 0,0254 mm
- Espesor inicial de la capa intermedia de polímero (y_{2i}) = 0,0762 mm
- Espesor inicial de la capa inferior de polímero (y_{1i}) = 0,0254 mm
- Espesor inicial del acero (y_i) = 0,254 mm

En las cuatro simulaciones se han obtenido los valores de la *Potencia*, de todos los ángulos definidos como variables en el modelo, y de los espesores finales de las distintas capas; al fijar una reducción del 5 % y del 25 %, y la utilización de un ángulo de matriz de $0,5^\circ$ y de 7° . Los resultados obtenidos,

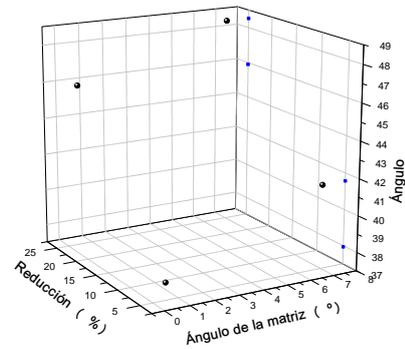
5. RESULTADOS



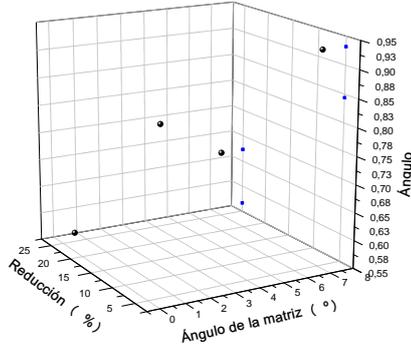
(a) Potencia



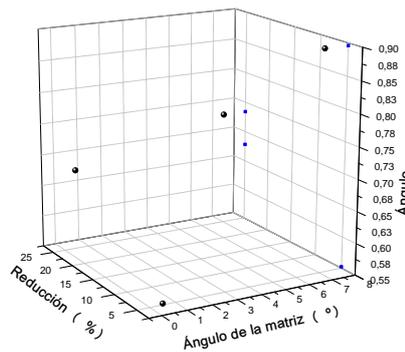
(b) Ángulo α_1



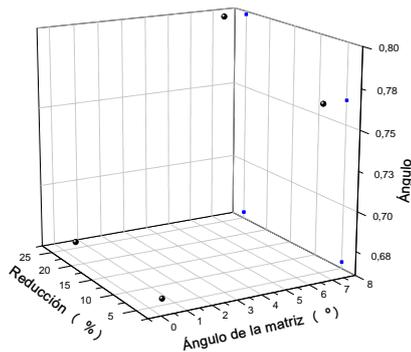
(c) Ángulo β_1



(d) Ángulo μ



(e) Ángulo τ



(f) Ángulo γ

Figura 5.12: Representaciones tridimensionales de los datos de ángulo de matriz y de nivel de reducción frente a otras variables.

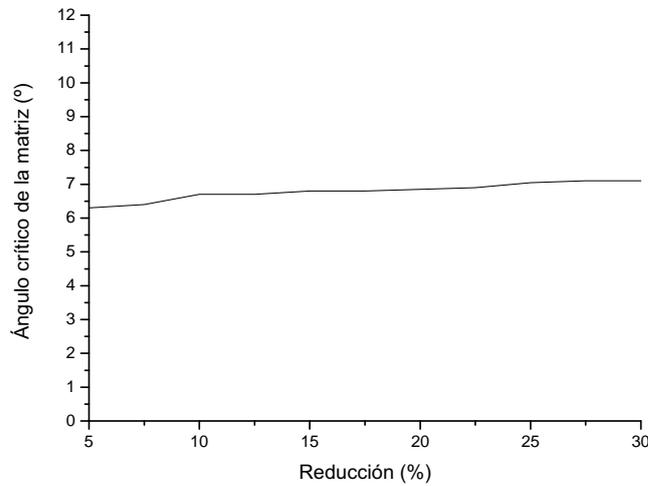


Figura 5.13: El ángulo crítico de la matriz frente a la reducción, utilizando los siguientes parámetros: $y_i = 0,254$ mm, $t_{1i} = t_{3i} = 0,0254$ mm, $t_{2i} = 0,0762$ mm, $k_m = 1,53k_p$, $m_1 = 1$, $m_2 = m_5 = 0,9$, $m_3 = m_4 = 0,03$.

representados de forma tridimensional para cada una de las variables se pueden ver en la figura 5.12. Los ángulos α y β no proporcionan información relevante, por lo que solamente se representan α_1 y β_1 .

Es importante destacar de estos datos que la *Potencia* aumenta con el ángulo de la matriz, y también con la reducción experimentada por el material. Con ángulos de matriz pequeños, la *Potencia* aumenta con mayor intensidad frente a la reducción.

El ángulo crítico de la matriz es muy sensible a los cambios en algunas variables de proceso y poco sensible a otras. La figura 5.13 representa al ángulo crítico en función de la reducción aplicada al material. Se puede apreciar claramente que la curva resultante muestra que para todas las reducciones comprendidas entre el 5% y el 30%, el ángulo ϕ_c solamente se ha incrementado en menos de un grado, indicando de alguna manera que el ángulo crítico de la matriz es prácticamente independiente de la reducción aplicada al material.

En la tabla 5.5 se puede observar como el ajuste entre los datos represen-

5. RESULTADOS

Modelo con el mejor ajuste	Multiplicativo
Factor de correlación	0,9785
R^2	95,76 %
Error absoluto medio	0,0062

Tabla 5.5: Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos del ángulo crítico de la matriz frente al porcentaje de reducción, utilizando los parámetros de la figura 5.13.

tados es elevado. El modelo que ofrece un mejor ajuste es el *multiplicativo*. Este ajuste se puede ver con claridad en la figura 5.14, donde gráficamente se representa la curva del modelo de regresión.

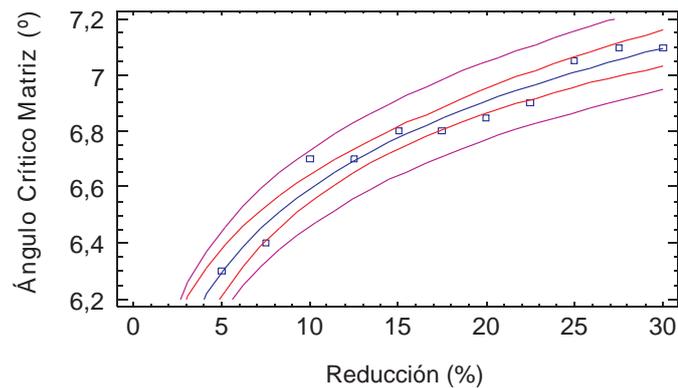


Figura 5.14: Curva del modelo de regresión (ángulo crítico de la matriz, reducción).

La ecuación de regresión es

$$\text{Ángulo crítico de la matriz} = 5,65305 \cdot \text{Porcentaje de reducción}^{0,0668435} \quad (5.8)$$

La figura 5.15 muestra la relación entre el ángulo crítico de la matriz y el grosor de la capa superior de polímero, t_{3i} . El espesor de esta capa es igual al de la capa de polímero inferior, t_{1i} ; siendo a su vez, tres veces menor que el de la capa de polímero intermedia, t_{2i} . Se puede observar que a medida se va

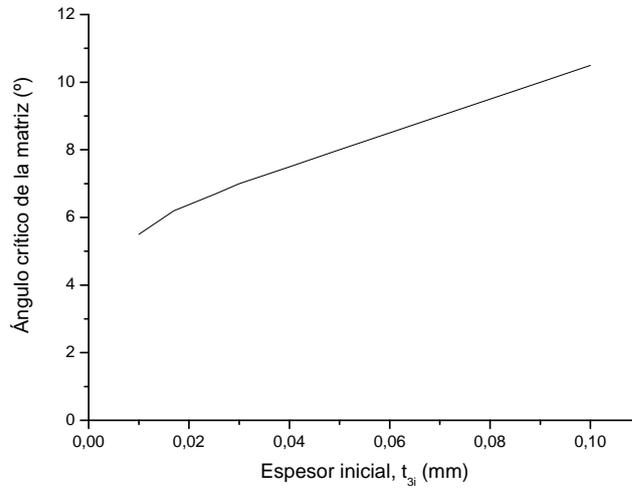


Figura 5.15: El ángulo crítico de la matriz frente al espesor inicial de la capa superior de polímero, utilizando los siguientes parámetros: $\%_{red} = 10\%$, $y_i = 0,254$ mm, $k_m = 1,53k_p$, $m_1 = 1$, $m_2 = m_5 = 0,9$, $m_3 = m_4 = 0,03$.

Modelo con el mejor ajuste	Lineal
Factor de correlación	0,9972
R^2	99,44 %
Error absoluto medio	0,083

Tabla 5.6: Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos del ángulo crítico de la matriz frente al espesor inicial de la capa superior de polímero (t_{3i}), utilizando los parámetros de la figura 5.15.

incrementando el espesor de la capa de polímero, también lo hace de manera significativa el valor del ángulo crítico de la matriz. Un incremento de cinco veces en el grosor de la capa de polímero se traduce en un incremento de cuatro grados en el valor del ángulo crítico de la matriz.

En la tabla 5.6 se puede observar como el ajuste entre los datos representados es muy elevado. El modelo que ofrece un mejor ajuste es el *lineal*. Este ajuste se puede ver con claridad en la figura 5.16, donde gráficamente se representa la curva del modelo de regresión.

5. RESULTADOS

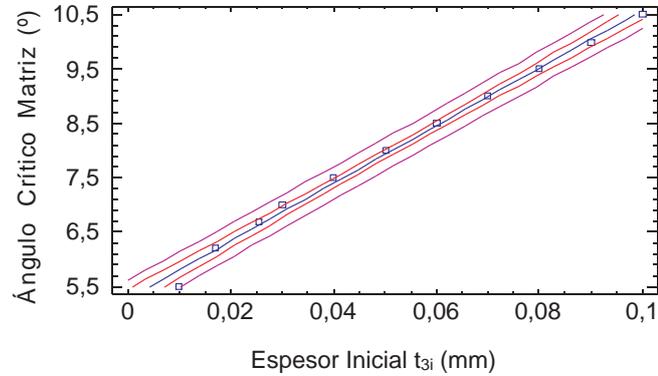


Figura 5.16: Curva del modelo de regresión (ángulo crítico de la matriz, espesor inicial t_{3i}).

La ecuación de regresión es

$$\text{Ángulo crítico de la matriz} = 5,27623 + 53,0424 \cdot \text{Espesor } t_{3i} \quad (5.9)$$

Wilson y Halliday [29] ya encontraron que para las operaciones de embutición, utilizando una aproximación teórica semejante a la que se ha presentado en esta investigación, el grosor de la capa de lubricante era proporcional al grosor inicial de la capa de polímero que actuaba como lubricante sólido. Sus resultados destacaban que un incremento en el grosor inicial de esta capa permitiría bajar la fuerza de embutición necesaria, al tener mayor cantidad de lubricante. Según se desprende de la figura 5.15, el ángulo crítico aumenta a medida que lo hace el espesor de las capas de polímero, es decir, que aumenta la posibilidad de obtener buenos resultados utilizando ángulos de matriz más agresivos. Esto solo es posible gracias a que la capa superior de polímero actúa como lubricante sólido, y cuanto mayor sea su espesor, mayor será el efecto de la lubricación, reduciendo el coeficiente de fricción entre la tira y la matriz, y también la fuerza necesaria para llevar a cabo la fase de estirado en la embutición profunda.

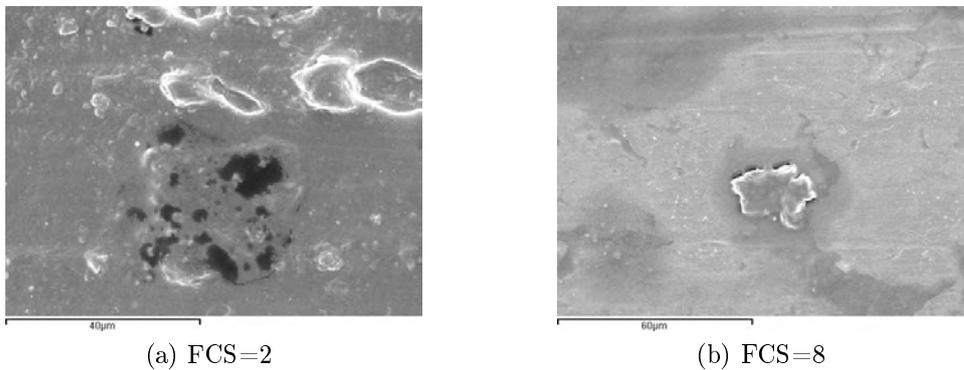


Figura 5.17: Imágenes tomadas de dos niveles de calidad superficial con un microscopio electrónico.

5.3. Resultados experimentales

5.3.1. Análisis de la superficie

Factor de Calidad Superficial

Tras realizar los correspondientes ensayos del diseño de experimentos en el simulador de estirado, se ha sometido al material resultante a una serie de pruebas de superficie para poder determinar si se han producido daños. Todas estas pruebas se han llevado a cabo en el lado del material que está en contacto con la matriz, pues las capas de polímero del lado del material que está en contacto con el punzón, en ningún momento han sufrido algún tipo de daño.

Entre estas pruebas se encuentra la inspección ocular, en la que fácilmente se detectan los daños sufridos por el material en su superficie, y en qué grado. Para poder cuantificar este nivel de daño en la superficie, se hará uso de un índice, denominado Factor de Calidad Superficial (FCS), que clasificará de forma cualitativa el daño superficial. Los valores que puede adoptar el FCS, junto con la inspección visual utilizada, son:

5. RESULTADOS

0. Daño grave. Al menos la capa superior de polímero queda completamente separada del material.
2. El material presenta zonas donde sí que ha sobrevivido el revestimiento y otras donde no lo ha hecho. La rugosidad superficial en las zonas de supervivencia es muy elevada (Fig. 5.17).
4. El revestimiento no ha sido agujereado, pero presenta zonas en las que todavía existen defectos y también una elevada rugosidad superficial.
8. No existe apenas daño en la superficie, solamente algún defecto pequeño (Fig. 5.17).
10. Estirado correcto. No existe ningún daño aparente en la superficie, siendo baja la rugosidad superficial.

Algunos ejemplos representativos de la aplicación de estos niveles en el Factor de Calidad Superficial, se pueden observar en la figura 5.18. En líneas generales, un FCS de 8 o 10 indica que se ha producido un buen estirado en el material, y que por tanto, si se vuelven a repetir las condiciones iniciales, es de esperar que se vuelva a tener éxito en el estirado. El revestimiento de las tres capas de polímero se mantiene entonces intacto, manteniendo su integridad y pudiendo satisfacer los requerimientos de diseño necesarios para proteger el material de la pared de la lata de sus contenidos. En cambio, un valor del FCS que esté entre 0 y 4, indica que existen defectos serios en el revestimiento del material, y que claramente no es aceptable para el uso alimentario. El hecho de asignar valores por debajo de 4 a las superficies con defectos, y por encima de 8 a las que no los tienen, hace que la diferenciación entre un estirado correcto y otro defectuoso sea, en términos cualitativos, muy clara.

La calidad superficial mostrada en la figura 5.18 podría verse mejorada si también lo hace el acabado superficial de la matriz. Las cuatro matrices de carburo de titanio que se utilizaron dejaron pequeñas marcas en algunas tiras de material. Estas se han fabricado utilizando un proceso de pulido por

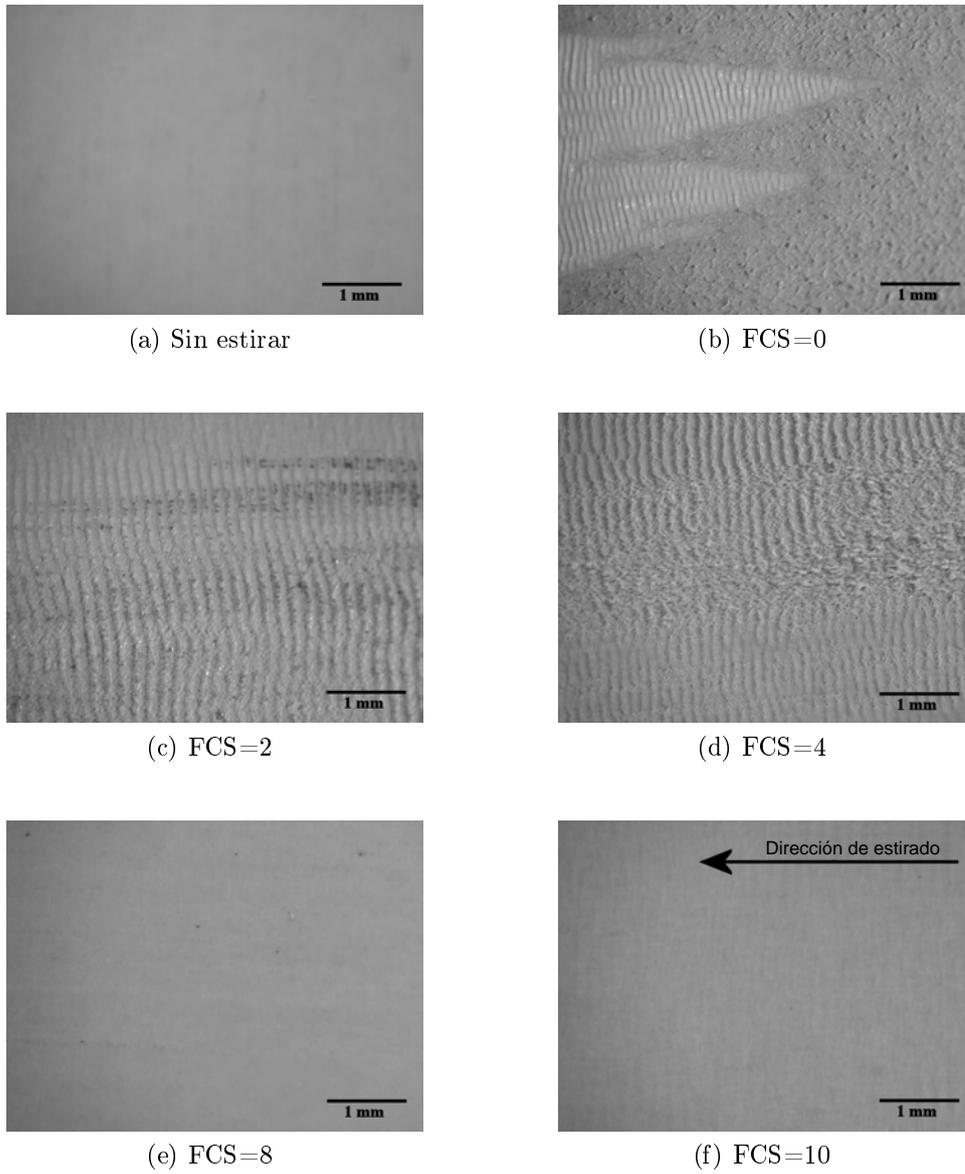


Figura 5.18: Microfotografías representativas de la superficie del material.

5. RESULTADOS

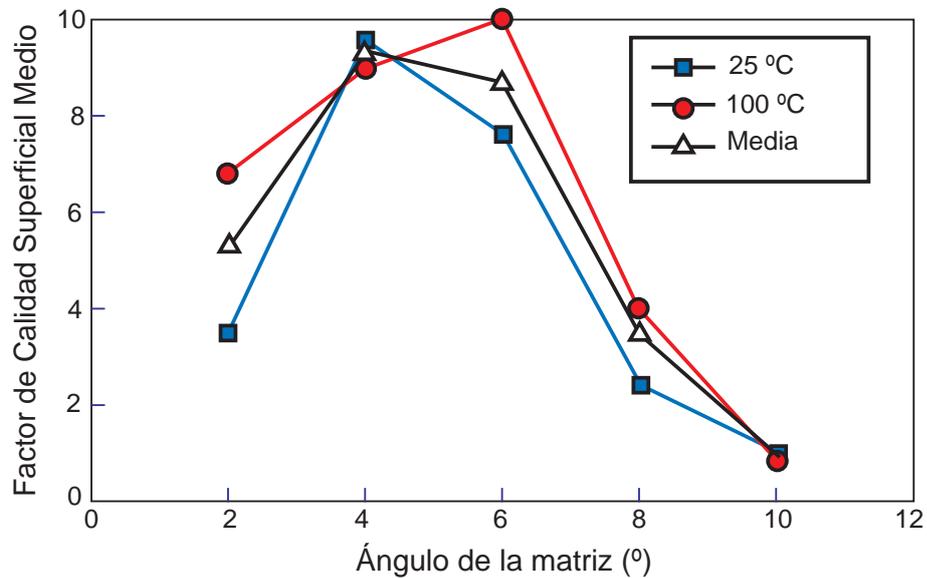


Figura 5.19: El Factor de Calidad Superficial Medio para el material 702 en función del ángulo de la matriz. Valores del FCS iguales o superiores a 8 indican un estirado correcto.

diamante, sin proceder con posterioridad a la realización de otro tratamiento superficial que mejorara las superficies; con el fin de ahorrar costes y tiempo para la presente investigación. Por tanto, con total seguridad se podrían mejorar las calidades superficiales a las que se les ha asignado el valor de 8 con la utilización de un mejor acabado superficial en las matrices.

En la figura 5.19 se representan unas curvas que relacionan el Factor de Calidad Superficial con el ángulo de la matriz utilizado, dependiendo de la temperatura a la que se ha realizado cada uno de los ensayos. Como se puede apreciar, para ángulos iguales o inferiores a 6°, el FCS es muy elevado. Por contra, para ángulos superiores a 6°, se obtienen piezas que por ser el FCS bajo, no serían aptas para el fin propuesto. La temperatura apenas influye en la calidad superficial, pero sí que se consigue alguna pequeña mejoría con una mayor temperatura en la matriz, como se puede observar.



Figura 5.20: Las dos direcciones sobre las que se han tomado datos de la rugosidad superficial en las tiras de material estirado.

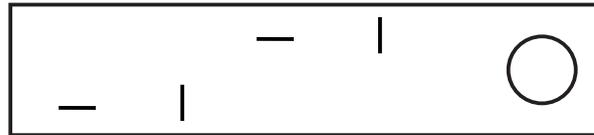


Figura 5.21: Las cuatro zonas donde se han realizado las mediciones de la rugosidad. Las pequeñas líneas rectas indican la posición exacta.

Medida de la rugosidad superficial como indicador de la procesabilidad

Uno de los objetivos perseguidos con los experimentos ha sido el de conocer si el revestimiento del material sobrevivía o no al estirado, y bajo qué condiciones. Pero uno de los factores importantes es saber, en caso de supervivencia, cómo ha quedado afectado este revestimiento; siendo la medida de la rugosidad superficial un buen método para cuantificar el grado de este defecto.

Las mediciones de rugosidad superficial realizadas a las tiras de material estirado -en ambos lados-, no tienen en cuenta, por ejemplo, si la capa de polímero superior ha desaparecido por completo, dejando intacta a la intermedia. En el caso de haberse producido este hecho en los resultados de algunos de los experimentos realizados, la medición de la rugosidad superficial falsearía la concepción de que al tener una buena medida en ésta, en consecuencia se estaría ante un estirado correcto. Pero es importante aclarar que en todas las pruebas realizadas, esta circunstancia no se dió en ningún caso, siendo la medida de la rugosidad superficial proporcional a la calidad del estirado.

5. RESULTADOS

Se ha utilizado un rugosímetro digital *Mitutoyo SJ-301* para realizar las mediciones a las tiras de material. Éstas se han efectuado según las indicaciones de la normativa internacional ISO 4287:1997. Los resultados obtenidos, para ambos lados del material estirado, se pueden extraer de las figuras 5.7 y 5.8. La rugosidad media (R_a) ha sido medida sobre la tira tanto en la dirección transversal como en la longitudinal, como se puede apreciar en la figura 5.20.

Número de Ensayo	Ángulo Vértice (°)	Vel. Máx. (m/s)	Nivel Reduc. (%)	Temp. (°C)	Factor Calidad Superf.	Rug. Long., R_a (μm)	Rug. Transv., R_a (μm)	Fuerza Radial (N)	Fuerza Estirado (N)
1	8	0,75	20	25	4	2.65	1.4	12280	3126
2	4	0,75	10	25	10	0.28	0.2	15244	2108
3	10	0,75	20	25	4	1.58	0.5	14453	7928
4	8	1	20	25	2	2.43	0.9	11269	2951
5	4	0,5	5	100	10	0.29	0.21	14003	2614
6	8	0,5	20	100	2	1.43	1.47	14260	4128
7	6	0,5	5	25	0	2.02	1.73	3086	1433
8	2	0,5	10	25	2	0.34	0.61	23248	4470
9	8	0,75	15	25	2	1.88	0.49	1685	2698
10	6	1	15	25	8	0.8	0.75	21412	5144
11	4	0,5	10	100	10	0.29	0.24	19589	5144
12	8	0,5	15	100	2	2.88	1.54	10537	6072
13	6	1	10	25	10	0.34	0.4	14550	3711
14	10	1	20	100	2	3.27	1.3	10360	2699
15	2	1	15	25	0	0.39	0.3	21140	2699
16	6	1	20	100	10	0.65	0.58	27650	9108
17	10	0,5	10	25	0	0.96	0.48	8847	3626
18	10	1	5	25	0	1.79	1.31	5537	2024
19	4	1	5	25	10	0.11	0.16	7656	1433
20	2	0,5	20	25	4	0.71	0.69	24800	4638
21	6	0,5	10	100	10	0.32	1.23	15781	4301
22	2	0,5	5	100	10	0.48	0.26	19589	4301
23	4	0,5	20	25	10	0.55	0.25	24512	4048
24	10	0,75	5	100	0	1.1	0.91	3994	1180
25	8	0,5	5	25	0	1.11	0.96	3427	1686
26	2	0,75	5	25	8	0.26	0.23	15420	3212
27	2	0,5	15	100	8	0.31	0.37	23230	4128
28	8	1	10	25	4	0.53	0.38	5722	2951
29	6	0,5	20	25	10	0.44	0.53	19990	5060
30	2	1	10	100	4	0.2	0.4	17860	2280
31	2	1	20	100	8	1.32	0.96	19990	4132
32	8	1	5	100	8	1.24	0.8	6562	2108
33	8	0,75	10	100	8	2.09	1.11	11425	4385
34	10	1	15	100	0	2.36	1.52	9863	2867
35	10	0,5	15	25	0	1.85	0.84	8339	5566
36	6	0,75	15	100	10	0.29	0.3	16386	4217
37	4	0,75	20	100	8	0.29	0.28	25148	4976
38	4	1	15	100	8	0.52	0.85	26528	6831
39	4	1	20	25	10	0.25	0.29	20852	3036
40	10	0,5	20	100	0	0.43	0.58	11601	5060
41	6	1	5	100	10	0.27	0.52	6337	2108
42	10	0,75	10	100	2	0.44	0.45	8964	3542
43	6	0,75	5	25	10	0.21	0.25	4453	1349
44	2	0,75	20	100	4	0.43	0.28	23852	2879
45	4	0,75	15	25	8	0.23	0.57	18525	3120
46	8	0,75	5	100	0	3.25	1.76	3460	2024

Tabla 5.7: Tabla con el diseño de experimentos y los resultados obtenidos para el material 702, utilizando la parte exterior del material en contacto con la matriz.

Las mediciones de la rugosidad se han realizado sobre la capa de polí-

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Número de Ensayo	Ángulo Vértice (°)	Vel. Máx. (m/s)	Nivel Reduc. (%)	Temp. (°C)	Factor Calidad Superf.	Rug. Long., R_a (μm)	Rug. Transv., R_a (μm)	Fuerza Radial (N)	Fuerza Estirado (N)
1	4	1	5	100	10	0.22	0.47	8242	1349
2	4	1	20	100	4	0.29	0.43	31128	6409
3	4	0,5	5	100	10	0.31	0.17	7626	1433
4	8	0,5	20	100	4	1.02	1.14	15146	4554
5	4	0,5	20	25	10	0.23	0.20	27232	3120
6	4	0,5	5	25	10	0.18	0.25	3085	843
7	8	0,5	5	25	2	1.29	0.81	1660	1180
8	8	1	5	100	4	0.9	0.97	4794	1518
9	8	1	5	25	4	0.57	0.43	4755	1518
10	4	1	20	25	10	0.20	0.22	24576	3457
11	8	1	20	25	8	1.62	0.8	17099	5735

Tabla 5.8: Tabla con el diseño de experimentos y los resultados obtenidos para el material 702, utilizando la parte interior del material en contacto con la matriz.

mero en las zonas representadas en la figura 5.21. La figura 5.22 muestra la rugosidad media de la parte exterior del material en función del ángulo de la matriz. Como se puede observar, la rugosidad longitudinal (es decir, en la dirección en la que se produce el estirado) muestra una mejor correlación con el ángulo de la matriz que la rugosidad transversal. También, se puede apreciar que para aquellos ángulos en los que se produce un estirado defectuoso, la rugosidad media longitudinal es superior (casi el doble) a la transversal. Esto es debido a que cuando el estirado no ha sido correcto, en muchos casos, la superficie del polímero tiende a arrugarse en la forma que se muestra en los apartados *c)* y *d)* de la figura 5.18. En esta situación, el rugosímetro detecta mayor rugosidad al desplazarse en la dirección longitudinal. Sin embargo, para ángulos de la matriz iguales o inferiores a 6° , la rugosidad transversal es ligeramente superior a la longitudinal, debido a que se ha producido un estirado correcto. El valor del índice de rugosidad media, R_a , indica que para ángulos inferiores a 8° , la calidad superficial es elevada, con lo que se puede deducir que se produce un estirado correcto con ángulos de la matriz por debajo de este valor. Esta afirmación es concordante con los resultados mostrados en la figura 5.19.

5. RESULTADOS

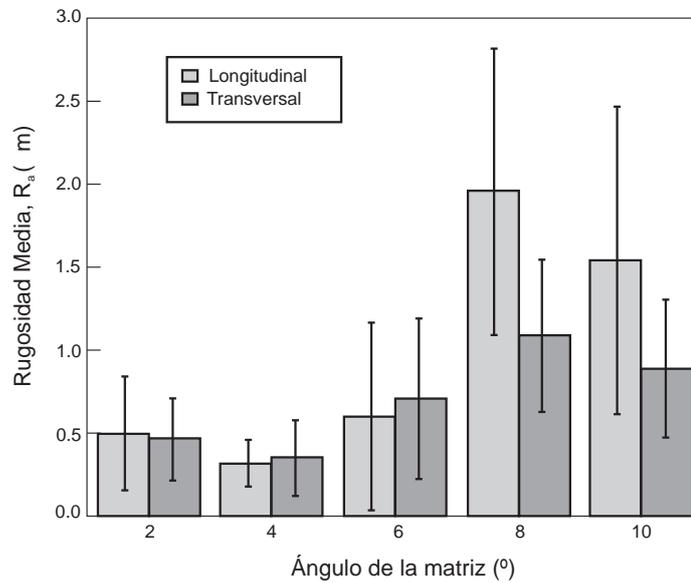


Figura 5.22: La rugosidad media tomada en las direcciones longitudinal (estirado) y transversal, en función del ángulo de la matriz.

Baño químico

Dentro de las muestras que resultaron como consecuencia de un estirado defectuoso, en algunas de ellas existía la duda de si el daño provocado en la superficie afectaba solamente a la capa superior, a ésta y la intermedia, o a las tres, quedando por tanto expuesto el metal del sustrato.

Al material resultante de un estirado defectuoso se le ha sometido a una prueba con sulfato de cobre (figura 5.23), mediante el cual se podía determinar, en caso de duda, si el daño ha afectado a las tres capas de polímero; pues el ácido atacaría al acero. De las pocas muestras de material que se han analizado, por la duda que generaban, solamente se ha reconocido que el daño llegaba hasta el acero en dos de ellas, y ambas fueron obtenidas utilizando un ángulo de matriz de 10° . Este dato demuestra que la utilización de un ángulo de matriz de 8° , a pesar de producir un estirado que no puede considerarse correcto, no llega a dañar por completo a las tres capas de polímero.



(a) Sin daño en las capas



(b) Las tres capas han sido dañadas

Figura 5.23: El color azulado del sulfato de cobre en la primera fotografía indica que el daño no ha llegado al acero; mientras que en la segunda, después de limpiar el ácido, se aprecia con claridad que parte del acero había quedado expuesto sin ninguna capa de polímero.

La simple observación visual de las tiras de material estirado indica que los mayores daños se producen sobre la capa superior.

5.3.2. Diseño de Experimentos

Según los resultados obtenidos de los experimentos listados en las tablas 5.7 y 5.8, y como se puede observar también en la figuras 5.19 y 5.22, el ángulo de la matriz utilizado de 2° no produce tan buenos resultados como los ángulos de 4° y 6° . Esto puede ser debido a que el ángulo de 2° es especialmente susceptible al radio de curvatura que posee el punzón en su extremo, puesto que no tiene un radio uniforme. En las tiras de material, existe siempre una primera zona de contacto (aproximadamente de 1 mm de espesor), en la que se puede observar algún tipo de daño en la superficie del material (figura 5.24); pero rápidamente se produce una transición, sin daño aparente en el material. De todas maneras, se estima que el ángulo de 2° debería de proporcionar resultados similares al ángulo de 4° ; pero en realidad esto no es así por la propia construcción del simulador de estirado.

De todos los resultados obtenidos, el más importante, y el que determina

5. RESULTADOS

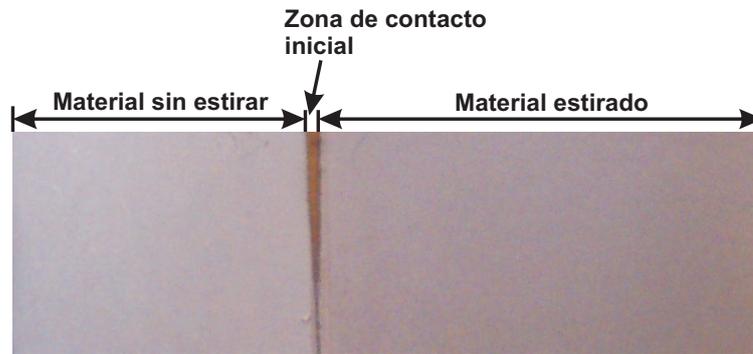


Figura 5.24: Imagen de una tira de material una vez ha sido estirada.

Variable	Lado interior (Suma de cuadrados)	Lado exterior (Suma de cuadrados)
Ángulo de la matriz	59.52	481.59
Velocidad del punzón	5.36	10.75
Nivel de Reducción	0.024	13.3
Temperatura	0.024	19.4

Tabla 5.9: Resultados del análisis de la varianza sobre el FCS.

la calidad del proceso, es el Factor de Calidad Superficial. Por tanto, en un primer análisis, se ha realizado una evaluación de los parámetros de proceso frente al FCS; obteniendo los resultados mostrados en la tabla 5.9. Como se puede apreciar, el ángulo de la matriz es la variable con más importancia del total de las cuatro variables analizadas. Y la diferencia respecto a la segunda es muy grande. Para el lado exterior de la tira de material, la segunda variable más importante es la temperatura, que tendría un peso mayor que el de la velocidad del punzón y el nivel de reducción experimentado. Este dato coincide con las curvas de la figura 5.19, en las que se obtiene mejores valores del FCS a mayor temperatura de la matriz.

La velocidad del punzón tiene un efecto menor sobre la calidad final, siendo las mayores velocidades las que ligeramente la aumentan. Se puede alcanzar un valor alto en el FCS si se aumenta por tanto la temperatura y la

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Variable	Lado interior (Suma de cuadrados)	Lado exterior (Suma de cuadrados)
Ángulo de la matriz	59,52	481,59
Velocidad del punzón	5,36	10,75
Nivel de Reducción	0,024	13,3
Temperatura	0,024	19,4

Tabla 5.10: Resultados del análisis de la varianza sobre el FCS.

Variable	Rugosidad Longitudinal (Suma de cuadrados)	Rugosidad Transversal (Suma de cuadrados)
Ángulo de la matriz	12,99	2,349
Velocidad del punzón	0,044	0,025
Nivel de Reducción	0,745	0,005
Temperatura	0,092	0,272

Tabla 5.11: Resultados del análisis de la varianza sobre la rugosidad, para el lado exterior.

velocidad, disminuyendo el nivel de reducción, y sobre todo, trabajando con ángulos de matriz iguales o inferiores a 6° .

También han sido analizados los restantes resultados, en función del grado de importancia que sobre su valor tienen las distintas variables de proceso. En las tablas 5.11 y 5.12 se pueden observar los resultados obtenidos, todos para el lado exterior del material 702, y muy similares a los del lado interior.

La rugosidad media, tanto la medida en la dirección transversal como en la longitudinal, depende prácticamente de ángulo de la matriz; pues según se puede apreciar en la tabla 5.11, es esta variable de proceso la que posee un valor más elevado que las otras variables, y de una forma muy destacada.

Si se analizan los datos de varianza para la fuerza máxima, los resultados cambian dependiendo de la dirección, según se puede apreciar en la tabla 5.12. En ambos casos, una variación del nivel de reducción al que se ve sometido el material durante el estirado, afecta en gran medida a los valores

5. RESULTADOS

Variable	F. Máx. Radial (Suma de cuadrados)	F. Máx. Estirado (Suma de cuadrados)
Ángulo de la matriz	10897787	323
Velocidad del punzón	19789	37534
Nivel de Reducción	7070095	419824
Temperatura	420512	43122

Tabla 5.12: Resultados del análisis de la varianza sobre la fuerza máxima en las direcciones radial y longitudinal, para el lado exterior.

de ambas fuerzas. Pero sin embargo, la fuerza máxima que se realiza en la dirección radial es más sensible a los cambios en el ángulo de la matriz. Esto es debido a que cuando no se produce un estirado correcto, el material que no pasa a través del hueco existente entre la matriz y el punzón, se queda junto con la matriz, realizando el punzón una mayor presión sobre la galga extensiométrica que mide la fuerza en la dirección radial.

Con la ayuda del programa estadístico Design ExpertTM, se ha podido evaluar también cómo se ve afectada una variable resultado, como por ejemplo el FCS, al variar los valores de las variables de proceso. En la figura 5.25 se puede ver una captura de pantalla en el momento en que se sometía a evaluación el FCS con el mencionado software.

Todas las evaluaciones realizadas (de manera cualitativa) a las variables resultado en función de las variables de proceso, se ven reflejadas en la tabla resumen 5.13. Como se puede apreciar, el mejor Factor de Calidad Superficial (FCS) se consigue utilizando: el ángulo de la matriz más bajo, la velocidad del punzón más alta, un nivel de reducción bajo y una temperatura de la matriz elevada. El mismo análisis es extensible a las otras variables resultado, en el que es destacable el hecho que la velocidad del punzón no influye de la misma forma en la determinación de las rugosidades medias en las direcciones transversal y longitudinal.

A modo de resumen general de los resultados experimentales obtenidos, la tabla 5.14 recoge los resultados de procesabilidad obtenidos en el simulador

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

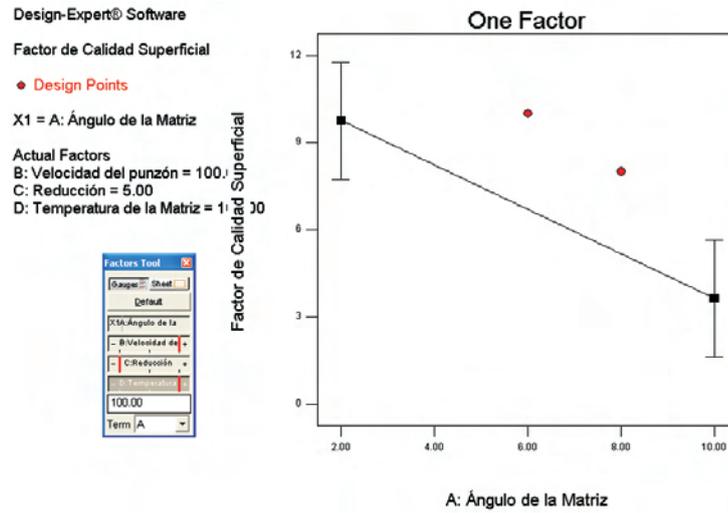


Figura 5.25: Análisis de la variación del FCS frente a las variables de proceso con el programa estadístico Design ExpertTM.

Variable Resultado	Variables de proceso			
	Ángulo de la matriz	Velocidad Punzón	Nivel Reducción	Temp. matriz
FCS (▲)	▼	▲	▼	▲
Rug. Long. (▼)	▼	▼	▼	▼
Rug. Transv. (▼)	▼	▲	▼	▼
Fuerza Radial (▼)	▲	▲	▼	▼
Fuerza Estirado (▼)	▲	▲	▼	▼

Tabla 5.13: La sensibilidad de las variables resultado frente a las variaciones en las variables de proceso, para el lado exterior.

5. RESULTADOS

Ángulos de la matriz (°)	Resultado
1	Estirado correcto
2	Estirado correcto
3	Estirado correcto
4	Estirado correcto
5	Estirado correcto
6	Estirado correcto
7	Estirado correcto/defectuoso
8	Estirado defectuoso
10	Estirado defectuoso
12	Estirado defectuoso

Tabla 5.14: Resultados experimentales sobre la procesabilidad del material 702.

de planchado para el material 702. Los resultados experimentales indican que el ángulo crítico de la matriz estaría entre los 6° y los 8°. Entonces, se han realizado experimentos posteriores utilizando el ángulo de 7°, obteniendo resultados dispares: unas veces se producía un estirado correcto (en concreto, 13); mientras que otras, éste era defectuoso (en un total de 11 experimentos). Por tanto, se puede concluir que el ángulo crítico de la matriz está en los 7°.

La figura 5.11 preveía un ángulo crítico para la matriz de $\phi_c = 6,7^\circ$. Es importante señalar que el ángulo crítico obtenido de forma experimental está muy próximo al calculado de forma teórica, al hacer uso de los dos modelos.

Los resultados de la tabla 5.14 se han repetido con frecuencia, a pesar de variar la reducción experimentada por el material, lo cual certifica la afirmación que ϕ_c es independiente del nivel de reducción, según se ha podido ver en la figura 5.11.

Es importante mencionar que para todos los ensayos realizados en el simulador, el revestimiento del lado interior del material no sufrió daños. Incluso utilizando elevados ángulos de matriz y también altos niveles de reducción, este revestimiento siempre permaneció intacto. Este comportamiento asegura que, en el peor de los casos, el revestimiento triple de polímero podrá ser

utilizado como un buen aislamiento entre el acero de la lata y la comida o bebida que albergue en su interior. El uso de este tipo de revestimiento en esta parte de la lámina de material eliminará la necesidad de utilizar un spray después de la fabricación de la lata. Además, este hecho elimina la tan dañina producción de COVs.

5.4. Validación experimental de los modelos

Con objeto de poder comprobar la fiabilidad de las estimaciones proporcionadas por los modelos teóricos sobre el comportamiento de un material revestido por tres capas de polímero al proceso de estirado; se han realizado un conjunto de experimentos para la evaluación de variables que permitan establecer una correlación directa con las proporcionadas por los modelos del límite superior.

Estas variables son: el ángulo de la matriz (AV), la reducción experimentada por el material (NR), la velocidad del punzón (VP) y la potencia. Ésta última no se obtiene de forma directa de los resultados experimentales, por lo que para conocer su valor y poder ser contrastado con el proporcionado por las modelizaciones teóricas es necesario hacer uso de la ecuación 3.1.

Uno de los los indicadores de la validez de los modelos teóricos desarrollados es el hecho que, en la sección anterior, se ha llegado a la conclusión que se produce un estirado correcto para aquellos ángulos de la matriz inferiores a 7° . Esta afirmación se aproxima al valor del ángulo crítico reflejado en la figura 5.11, fijado en $6,7^\circ$.

En la figura 5.26 se representan las curvas teóricas obtenidas en el estirado correcto para unas reducciones del 5% y del 15%. Al mismo tiempo, también se representan los datos de las fuerzas de estirado obtenidas en los experimentos de validación, realizados todos ellos en el simulador de estirado, con una $v_p = 1m/s$. Como se puede apreciar, las curvas experimentales

5. RESULTADOS

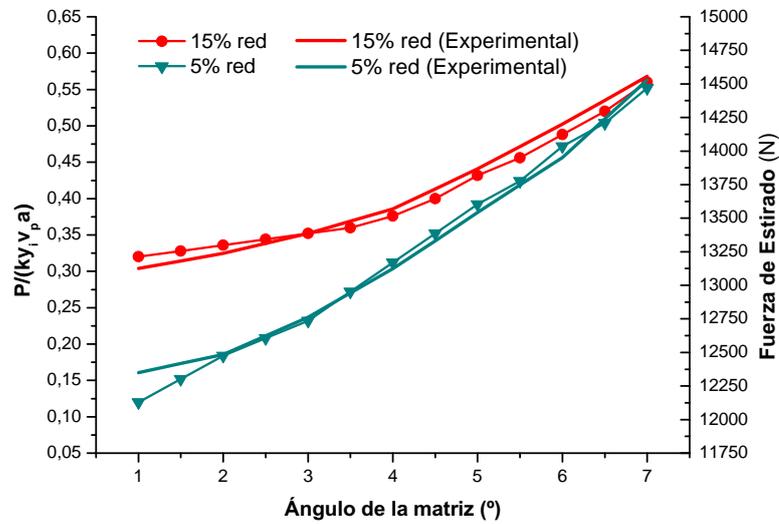


Figura 5.26: Curvas teóricas y experimentales obtenidas en el estirado correcto, con unas reducciones del 5% y del 15%. $v_p = 1m/s$.

tienen gran similitud con los resultados teóricos obtenidos. En ambos casos, para un ángulo de matriz de 7° , las fuerzas convergen hacia el valor de los 14.500 N.

Con el programa estadístico *Statgraphics v5.1* se han efectuado una serie de análisis de regresión sobre los datos reflejados en la figura 5.26 para conocer el grado de similitud y/o error entre los resultados obtenidos de forma teórica y experimental.

	5% Reducción	15% Reducción
Modelo con el mejor ajuste	Recíproco	Logarítmico
Factor de correlación	-0,9979	0,9991
R^2	99,58 %	99,82 %
Error absoluto medio	0,00203	0,001538

Tabla 5.15: Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos experimentales y teóricos, para un estirado correcto.

5.4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MODELOS

En la tabla resumen 5.15 se puede observar como el ajuste entre los datos teóricos y experimentales para ambas reducciones es muy elevado, y los errores absolutos medios son despreciables. El modelo que ofrece un mejor ajuste para los datos del 5% de reducción es el *recíproco*, mientras que el *logarítmico* es el que mejor lo hace para la reducción del 15%. Estos ajustes se pueden ver con claridad en las figuras 5.27 y 5.28, donde gráficamente se representan las curvas de los dos modelos de regresión.

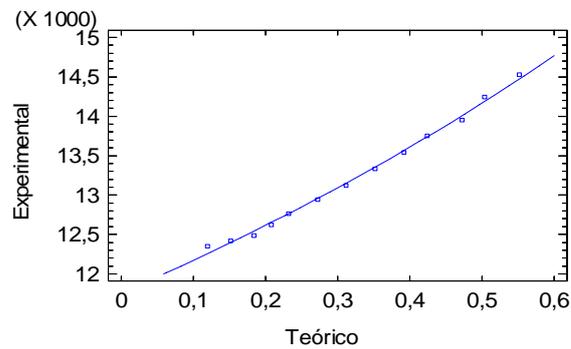


Figura 5.27: Curva del modelo de regresión (5% reducción, estirado correcto).

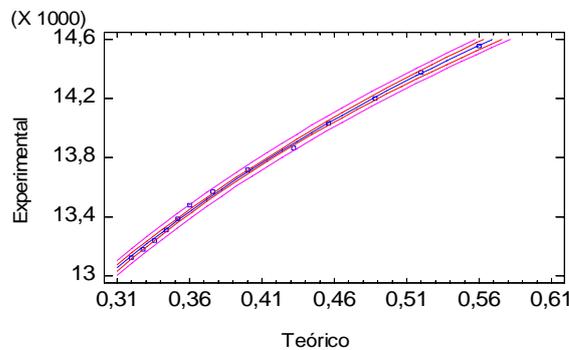


Figura 5.28: Curva del modelo de regresión (15% reducción, estirado correcto).

En la figura 5.29 se representa la curva teórica obtenida en el modelo del estirado defectuoso, para un espesor de $t_{3i} = 0,0254$ mm. Con los ángulos de matriz que producían sobre el material un estirado defectuoso, se han realizado una serie de experimentos de validación para conocer el grado de

5. RESULTADOS

Modelo con el mejor ajuste	Recíproco
Factor de correlación	-0,9976
R^2	99,53 %
Error absoluto medio	0,00186

Tabla 5.16: Tabla-resumen en la que se muestran los resultados del análisis de regresión sobre los datos experimentales y teóricos, para un estirado defectuoso.

aproximación a la curva teórica obtenida. Como se puede observar en la figura, el tramo experimental realizado adopta una línea decreciente muy próxima a la representación teórica.

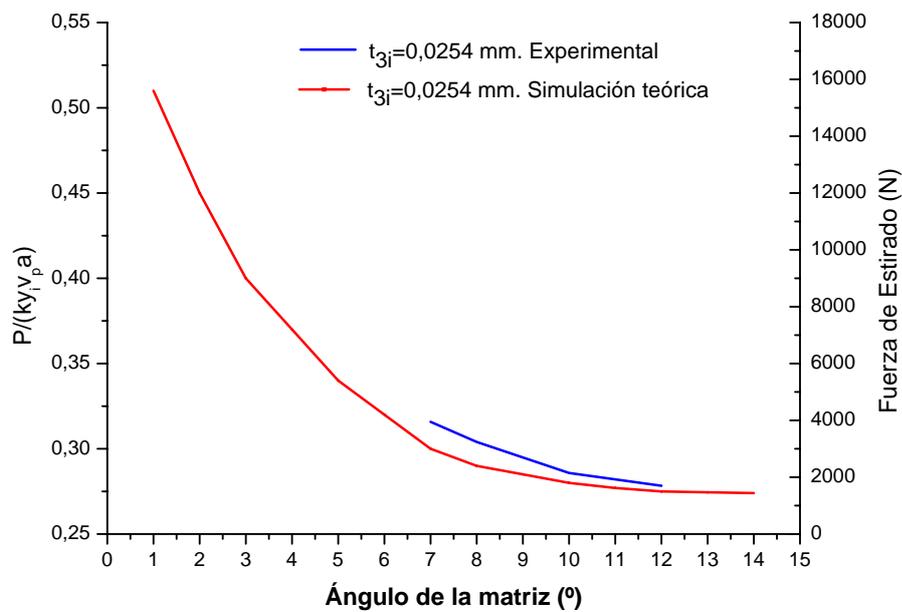


Figura 5.29: Curva teórica y experimental obtenida en el estirado defectuoso, para un espesor de $t_{3i} = 0,0254$ mm. $v_p = 1$ m/s

Al igual que se ha realizado con la gráfica de los resultados del estirado correcto, se han efectuado también una serie de análisis de regresión sobre los datos reflejados en la figura 5.29 para conocer el grado de similitud y/o error entre los resultados obtenidos de forma teórica y experimental.

5.4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MODELOS

En la tabla resumen 5.16 se puede observar como el ajuste entre los datos teóricos y experimentales es muy elevado, y el error absoluto medio es también despreciable. El modelo que ofrece un mejor ajuste es el *recíproco*. Estos ajustes se pueden ver con claridad en la figura 5.30, donde gráficamente se representa la curva del modelo de regresión.

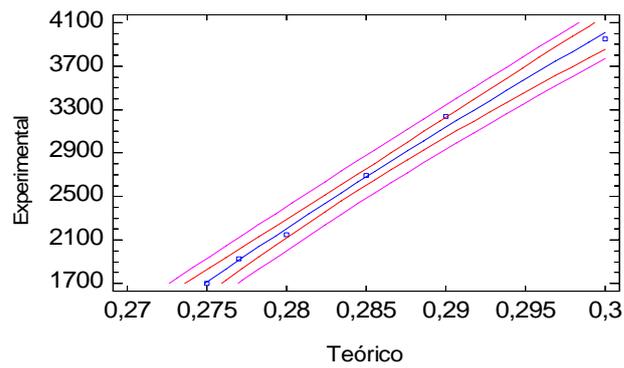


Figura 5.30: Curva del modelo de regresión (estirado defectuoso)

5. RESULTADOS

Capítulo 6

Conclusiones

El acero revestido por tres capas de polímero ha demostrado ser un material con una buena procesabilidad para la fabricación de envases metálicos, y en especial, latas de bebida. Según todos los datos recopilados y tratados en esta investigación se puede concluir que:

1. El material con el que se ha experimentado posee muy buena procesabilidad en su lado interior, es decir, en el que está en contacto con el punzón. Este hecho es muy significativo, pues este lado es el interior del envase en muchas operaciones de estirado, y refuerza la idea de poder eliminar las emisiones de COVs que se generan al formar el revestimiento interior polimérico utilizando el método tradicional.
2. Probablemente, el factor más importante que afecte al logro de un estirado correcto sea la propia composición del material y su método de fabricación. Esta afirmación es posible realizarla tras ver la diferencia tan drástica entre el comportamiento de los materiales 702 y 705, que aunque tienen la misma composición en las capas de polímero, difieren un poco en el grosor de la capa de acero y en el método de fabricación utilizado para cada uno de ellos.

6. CONCLUSIONES

3. El material 705, que utiliza un recubrimiento de estaño sobre el acero, no ha podido superar con éxito ningún ensayo en el simulador de estirado, bajo cualquier tipo de condición examinada. Sin embargo, el material 702, cuyo acero no presenta recubrimiento de hojalata, ha mostrado un buen comportamiento al estirado bajo ciertas condiciones.
4. El ángulo de la matriz es la variable de proceso más importante. Con el material 702, se han alcanzado estirados correctos con la utilización de un ángulo igual o inferior a 6° . Ángulos superiores a esta cifra han conducido a estirados defectuosos y al daño sobre la superficie del material, aunque el ángulo de 8° no ha producido daños sobre la capa inferior de polímero.
5. La velocidad del punzón es una variable no tan importante, que apenas tiene efecto sobre el estirado, como se ha podido comprobar en las tablas 5.10, 5.11 y 5.12. Éste mejora sensiblemente si la velocidad aumenta.
6. La temperatura de la matriz, al igual que ocurre con la velocidad del punzón, apenas tiene efecto sobre la calidad del estirado, como se deduce de las tablas 5.10, 5.11 y 5.12. Pero se observa una leve mejoría en éste si se aumenta la temperatura.
7. Los resultados obtenidos de forma experimental se aproximan con precisión a los previstos por los modelos matemáticos del teorema del límite superior utilizados, corroborando la bondad de estos últimos.
8. Los coeficientes de correlación y los errores absolutos medios obtenidos en los modelos de regresión realizados para la validación de los modelos, indican una muy buena aproximación de los modelos teóricos al comportamiento real del material en el estirado.
9. El ángulo crítico obtenido de forma experimental es de $\phi_c = 7^\circ$, mientras que el ángulo crítico teórico era de $\phi_c = 6,7^\circ$. Las desviaciones entre los resultados de los experimentos y los de la modelización teórica se pueden atribuir a las simplificaciones llevadas a cabo en la definición

de los modelos. A pesar de estas pequeñas diferencias, el buen comportamiento de las capas de polímero frente al estirado, hace que la utilización de este revestimiento pueda servir como lubricante y como una buena superficie de contacto para el contenido de una lata de dos piezas.

10. El valor del espesor inicial de las capas de polímero afecta de manera significativa al valor de ϕ_c . El nivel de reducción no parece afectar demasiado al ángulo crítico, según los datos obtenidos de forma experimental y teórica.

6. CONCLUSIONES

Capítulo 7

Proyección del trabajo y estudios futuros

Los resultados obtenidos en la investigación han sido satisfactorios ya que han permitido llevar a cabo la modelización y simulación de la fase de estirado en el proceso de la embutición profunda para un material revestido por tres capas de polímero, a un nivel industrial. No obstante de los diferentes resultados, se desprenden algunas líneas de trabajo futuro que pueden ser interesantes para profundizar en determinados aspectos que se salen del ámbito de esta investigación pero que pueden tener cierta relevancia en la fase de estirado. Entre los aspectos más importantes a considerar, merece la pena destacar los siguientes:

- Aproximar con una mayor fiabilidad los modelos de estirado generados a la realidad, tomando en consideración un mayor número de campos de velocidades y prescindiendo de algunas de las simplificaciones utilizadas en esta investigación; como puedan ser la acotación del problema a un plano en dos dimensiones, considerar que los materiales tienen un comportamiento perfectamente plástico, etc.

7. PROYECCIÓN DEL TRABAJO Y ESTUDIOS FUTUROS

- Aunque se han considerado cinco variables de proceso para la determinación de las condiciones óptimas, ya que, como se ha comprobado, determinan el comportamiento del proceso de estirado en simulación y de forma experimental, es factible la ampliación del número de variables de proceso a analizar (siempre y cuando tengan cabida en el seno del proceso de simulación) y desarrollar nuevas estrategias de optimización que aporten nuevos enfoques y criterios de resultados óptimos para el contraste y evaluación con mayor exhaustividad del proceso.
- Realizar un diseño de materiales que mejoren el procesado en las condiciones estudiadas en esta investigación, basándose en la modelización teórica generada.
- Ampliar el estudio de los efectos térmicos sobre el proceso de estirado del acero revestido por tres capas de polímero, similar al que Huang y otros [40] realizaron sobre acero con una única capa de poliéster, en el que vieron la influencia del aumento gradual de la temperatura de la matriz sobre el material, probando con dos velocidades distintas de procesado.
- Aunque se ha demostrado que la procesabilidad de la cara interior del material (la que debe estar en contacto con el alimento o bebida) es muy buena, se podría realizar un análisis más exhaustivo, semejante al que se ha realizado con la cara externa del material.
- El simulador de estirado ha tenido un buen comportamiento durante la fase experimental de esta investigación, y ha mostrado ser muy útil para la consecución del fin propuesto, siendo también un instrumento muy válido para poder realizar numerosos ensayos con otros materiales. No obstante, se pueden realizar en el futuro pequeñas mejoras encaminadas a conseguir una mejor precisión en el establecimiento de la velocidad del punzón y del porcentaje de reducción aplicada a la pieza.
- En la presente investigación se han realizado pruebas experimentales de la fase de estirado, pero con una sola pasada. Se abre, pues, un

interesante campo de trabajo que tenga en consideración el efecto sobre el material estudiado de más de una pasada en la fase de estirado, permitiendo una proyección del desarrollo llevado a cabo en esta tesis.

- El desarrollo de los modelos propuestos, y la construcción del simulador de estirado, permite ampliar su campo de aplicación hacia el desarrollo de estudios comparativos entre diferentes materiales con el objetivo de contrastar las características de procesabilidad de los mismos y permitir la evaluación de la procesabilidad del material para la correcta selección de materiales en determinadas condiciones de proceso.

7. PROYECCIÓN DEL TRABAJO Y ESTUDIOS FUTUROS

Bibliografía

- [1] Asociación de latas de bebidas. *Infolata*, Vol. 15. Asociación de latas de bebidas, 2008.
- [2] Beverage Can Makers Europe. *European can market report 2006/2007*. Bcme, 2007.
- [3] Can Manufacturers Institute, 2005. Statistics.
- [4] John A. Jaworski, Steven R. Schmid, y J.E. Wang. An experimental investigation of the survivability and friction characteristics of tin-coated and polymer-laminated steels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121(232-237), 1999.
- [5] UNE EN 10333. *Productos planos de acero destinados a estar en contacto con alimentos, productos y bebidas para consumo humano y animal. Acero recubierto de estaño (hojalata)*. Aenor - Una Norma Española., 2007.
- [6] W. Hosford y J. Duncan. The aluminum beverage can. *Scientific American*, 271:48–53, 1994.
- [7] J. Kneep. Lubrication in the manufacturing of drawn and ironed aluminum cans. *Lubrication Engineering*, 40(9):554–560, 1984.
- [8] FDA. Normativa 21 cfr 170.3 - office of food additive safety (ofas) at the u.s. food and drug administration's (fda) center for food safety and applied nutrition (cfsan).

BIBLIOGRAFÍA

- [9] J. Kneep y Jr. L. Sargent. Lubricants for drawing and ironing aluminum alloy beverage cans. *Lubrication Engineering*, 34(4):198–201, 1978.
- [10] M. Saito, H. Saiki, y N. Kawai. Experimental analysis of ironing of thin metal cups. *Journal of Engineering for Industry*, 111:56–63, 1989.
- [11] K. Dohda, M. Saito, H. Saiki, y N. Kawai. Tribology in the ironing process of aluminum cans. *Advanced Technology of Plasticity*, 3:1191–1198, 1990.
- [12] N. Kawai, K. Dohda, M. Saito, N. Hayashi, y Z. Wang. Friction behaviour in the cup ironing process of aluminum sheets. *Journal of Engineering for Industry*, 114:175–180, 1992.
- [13] K. Dohda y N. Kawai. Correlation among tribological indices for metal forming. *Lubrication Engineering*, 46(11):727–734, 1990.
- [14] K. Dohda y N. Kawai. Compatibility between tool materials and work-piece in sheet-metal ironing process. *Journal of tribology*, 112:275–280, 1990.
- [15] S. Avitzur. *Metal Forming: Processes and Analysis*. McGraw-Hill, 1968.
- [16] W. Prager y P. Hodge. *Theory of Perfectly Plastic Solids*. Chapman & Hall, 1951.
- [17] Der-Form Chang. An analytical model of the ironing process including redundant work effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 75:253–258, 1998.
- [18] Y-M. Huang, Y-H. Lu, y J-W. Chan. An elasto-plastic finite element and experimental study of the ironing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 26:53–80, 1991.
- [19] D. Chang y J.E. Wang. Influence of process parameters on the ironing of deep-drawn cups. *Journal of Materials Processing Technology*, 53:63–81, 1997.

- [20] E.M. Rubio, A.M. Camacho, L. Sevilla, y M.A. Sebastián. Calculation of the forward tension in drawing processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163:551–557, 2005.
- [21] J. Tirosh, D. Iddan, y M. Silviano. Hydrostatic ironing - analysis and experiments. *Journal of Engineering for Industry*, 114:237–243, 1994.
- [22] B. Avitzur. Ironing with unlimited restrictions. *Proceedings 18th International Manufacturing Conference*, pages 145–150, 1977.
- [23] F. Clauss. *Solid lubricants and self-lubricating solids*. Academic Press, 1972.
- [24] R. Mear y H. Topper. *Plastics as lubricants for deep drawing and press-work*. Sheet Metal Industries, 1963.
- [25] U.S. Rao. *Polyethylene as a lubricant for deep-drawing*. Sheet Metal Industries, 1967.
- [26] J. Eickemeyer, H. R. Vogel, J. Reichert, y M. Rehm. Some tribological and environmental aspects in metal drawing. *Tribology International*, 29(3):193–197, 1996.
- [27] D. Harkness. Solid-fil prelubricants: features and benefits. *Journal of the STLE*, pages 518–522, 1991.
- [28] W.R.D. Wilson. The mechanics of solid lubrication of metal forming processes. *Proceedings, First International Conference on Lubrication Challenges in Metal Working and Processing*, 1978.
- [29] W.R.D. Wilson y K. Halliday. An inlet zone analysis for the lubrication of a drawing process by a rigid-plastic solid. *Wear*, 42:135–148, 1977.
- [30] W.R.D. Wilson y P. Cazeault. Measurement of frictional characteristics in lubricated strip drawing. *Proceedings, North American Metalworking Research Conference*, pages 165–171, 1976.

BIBLIOGRAFÍA

- [31] K. Shimizu. Method of redrawing a predrawn coated metal can, 1996. US Patent 5,544,517, 13.8.1996.
- [32] John A. Jaworski y Steven R. Schmid. Survivability of laminated polymer lubricant films in ironing. *Tribology Transactions*, 1(32-38), 1999.
- [33] N. Kawai, T. Nakamura, y K. Dohda. Development of anti-weldability test in metal forming by means of strip-ironing type friction testing machine. *Journal of Engineering for Industry*, 104:375–382, 1982.
- [34] L.D. Kenny y H. Sang. Effect of particles on scoring and friction in ironing. *Metal Transfer and Galling in Metallic Systems*, pages 117–130, 1986.
- [35] X.J. Wang, D. Jonasson, y J.L. Duncan. Ironing dynamometer for studying wall ironing in the cupping process. *Proceedings of the 14th Conference*, pages 201–217, 2002.
- [36] H.C.E. Van der Aa, M.A.H. Van der Aa, P.J.G. Schreurs, F.P.T. Baaijens, y W.J. Van Veenen. An experimental and numerical study of the wall ironing process of polymer coated sheet metal. *Mechanics of Materials*, 32:423–443, 2000.
- [37] E.J. Appleby, C.Y. Ly, R.S. Rao, M.L. Devenpeck, P.K. Wright, y O. Richmond. Strip drawing: A theoretical-experimental comparison. *International Journal of Mechanical Science*, 5(26):351–362, 1984.
- [38] E. Doege, M.S. Ragab, y G.M.A. Galal. Experimental and numerical simulation of the ironing process by strip drawing. *Comp. Plasticity, Fundamentals and Applications*, pages 1345–1356, 1992.
- [39] P. Deneuve y R. Lecot. The study of friction in ironing process by physical and numerical modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 45:625–630, 1994.
- [40] Chen-Hsi Huang, Steven R. Schmid, y Jyhwen E. Wang. Thermal effects on polymer laminated steel formability in ironing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123:225–230, 2001.

- [41] Chen-Hsi Huang y Steven R. Schmid. Temperatures in ironing of polymer-coated steels. *SME Technical Paper*, 253, 2001.
- [42] Mikell P. Groover. *Fundamentos de manufactura moderna*. Prentice Hall, 1997. 1ª ed.
- [43] William F. Hosford. *Mechanical Behavior of Materials*, Vol. 1. Cambridge University Press, 2008.
- [44] Geoffrey W. Rowe. *Conformado de los metales*. Ediciones Urmo, 1 edición, 1972.
- [45] W. Hosford y R. Caddell. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, 3 edición, 2007.
- [46] E.M. Rubio Alvir, M.A. Sebastián Pérez, y A. Sanz Lobera. Mechanical solutions for drawing processes under plane strain conditions by the upper bound method. *Journal of Materials Processing Technology*, 133-134:539–545, 2003.
- [47] E.M. Rubio, R. Domingo, J.M. Arenas, y C. González. Energetic analysis of the drawing process by upper-bound techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156:1220–1226, 2004.
- [48] E.M. Rubio, C. González, M. Marcos, y M.A. Sebastián. Energetic analysis of tube drawing processes with fixed plug by upper bound method. *Journal of Materials Processing Technology*, 177:175–178, 2006.
- [49] E.M. Rubio, A.M. Camacho, M. Marcos, y M.A. Sebastián. Analysis of the energy vanished by friction in tube drawing processes with a fixed conical inner plug by the upper bound method. *Materials and Manufacturing Processes*, 23:690–697, 2008.
- [50] E.M. Rubio, M. Marín, R. Domingo, y M.A. Sebastián. Analysis of plate drawing processes by the upper bound method using theoretical work-hardening materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40:261–269, 2009.

BIBLIOGRAFÍA

- [51] Daniel Delarbre y Pierre Montmitonnet. Experimental and numerical study of the ironing of stainless steel cups. *Journal of Materials Processing Technology*, 91:95–104, 1999.
- [52] Joël Courbon. Damage evolution in a compressive forming process: ironing of beverage cans. *Scripta Materialia*, 48:1519–1524, 2003.
- [53] Changjie Sun, Shezhao Li, y Bingyi Wang. Analysis of the ironing of a bj-type constant velocity joint outer race with the upper bound element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 100:209–213, 2000.
- [54] Chen-Hsi Huang y Steven R. Schmid. Advances in ironing with polymer coated steels.
- [55] Chen-Hsi Huang y Steven R. Schmid. Multi-scale polymer properties with applications to solid lubricants in ironing. *WEAR*, (252):704–710, 2002.
- [56] D Drucker, W. Prager, y H. Greenberg. Extended limit design theorems for continuous media. *Journal of Applied Mathematics*, 9:381–389, 1952.
- [57] H. Tresca. On further application of the flow of solids. *Actas Instituto de Ingeniería Mecánica*, 30(301), 1878.
- [58] S. Kalpakjian. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Wesley, 3 edición, 1997.
- [59] William H. Press, Saul Teukolsky, William Vetterling, y Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in C++*, Vol. 2. Cambridge University Press, 2002.
- [60] J.M. Challen, L.J. Mclean, y L.B. Oxley. Plastic deformation of a metal surface in sliding contact with a hard wedge: its relation to friction and wear. *Actas de la Royal Society de Londres*, 394(1806):161–181, 1884.
- [61] R. Hill. *The mathematical theory of plasticity*. Oxford, 1959.

- [62] R. Davison y T. Gilbert. Evaluation of mos_2 additions to a bonded solid lubricant for severe ironing applications. *Lubrication Engineering*, 32(3):131–138, 1975.
- [63] K. Dohda. Tribological properties of thin hard coatings used in metal forming. *Proceedings, Japan International Tribology Conference*, pages 1973–1980, 1990.
- [64] K. Dohda, S. Kashiwaya, Z. Wang, y M.Ñaoi. Tribocharacteristics of galvanized sheet steel evaluated by strip-ironing type tribometer. *Proceedings, NAMRC XXII*, pages 401–406, 1994.
- [65] Wu Jianjun. The calculation of ironing force. *Journal of Materials Processing Technology*, 41:461–467, 1994.
- [66] FDA. Inventory of effective food contact substance (fcs) notifications - u.s. food and drug administration's (fda) center for food safety and applied nutrition (cfsan). Julio 2008.
- [67] M.A.H. Van der AA, P.J.G. Schreurs, y F.P.T. Baaijens. Modelling of the wall ironing process of polymer coated sheet metal. *Mechanics of Materials*, 33:555–572, 2001.

BIBLIOGRAFÍA

Apéndice A

Modelización del estirado correcto. Programa en C++.

```
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <cmath>
#include <fstream>
#include "nr.h"
#include "powell.cpp"
#include "linmin.cpp"
#include "mnbrak.cpp"
#include "f1dim.cpp"
#include "brent.cpp"

#define pi 3.141592653589793238462643383279

using namespace std;

// Driver para la rutina Powell

DP func(Vec_I_DP &x)
```

A. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO CORRECTO. PROGRAMA EN C++.

```
{
/* Las variables globales se definen a continuación */
double t1i=0;
double t2i=0;
double t3i=0;
double yi=0;
double ángulo_gamma=0, gamma=0;
double ángulo_tau=0, tau=0;
double ángulo_theta=0, theta=0;
double ángulo_mu, mu=0;
double t1f=0;
double t2f=0;
double t3f=0;
double yf=0;
double vP=0;
double m1=0,m2=0,m3=0,m4=0,m5=0; /* Factores de Fricción */
double espesor=0;
double k_polímero_1=0, k_polímero_2=0, k_polímero_3=0;
double k_acero=0; /* Resistencias a la cortadura */
double l_AB=0, l_BMATRIZ=0, l_BC=0, l_JC=0, l_DC=0, l_ED=0,
l_DMATRIZ=0, l_EF=0, l_EL=0, l_FG=0, l_FMATRIZ=0;
double l_NM=0, l_ML=0, l_LK=0, l_JK=0, l_IH=0, l_IJ=0;
double l_OP=0, l_PI=0, l_PQ=0, l_UT=0, l_QW=0, l_RQ=0, l_RK=0,
l_SR=0, l_ST=0, l_SY=0, l_TM=0, l_VW=0, l_XW=0;
double l_XY=0, l_IP=0, l_ZY=0, l_XPUNZÓN=0, l_VPUNZÓN=0;
double v_GY=0, v_GT=0, v_GM=0, v_GF=0, v_YMATRIZ=0, v_TMATRIZ=0,
v_MMATRIZ=0, v_FMATRIZ=0, v_GX=0, v_YX=0, v_XW=0, v_VW=0, v_FE=0;
double v_XV=0, v_SMATRIZ=0, v_ST=0, v_SR=0, v_RQ=0, v_QP=0,
v_VMATRIZ=0, v_VP=0, v_PMATRIZ=0, v_LMATRIZ=0, v_LM=0, v_LK=0;
double v_KJ=0, v_IV=0, v_IMATRIZ=0, v_IP=0, v_KMATRIZ=0, v_KI=0,
v_JI=0, v_ED=0, v_EMATRIZ=0, v_CD=0, v_CB=0, v_BV=0, v_JMATRIZ=0;
double v_BMATRIZ=0, v_CMATRIZ=0, v_DMATRIZ=0, v_CJ=0, v_MT=0,
v_EL=0, v_YS=0, v_WMATRIZ=0, v_QMATRIZ=0, v_QW=0, v_RMATRIZ=0,
v_RK=0; double Potencia_Corte=0, Potencia_Fricción_Matriz=0,
Potencia_Fricción_Punzón=0, Potencia_Fricción_Acero_Polímero_2=0,
```

```

Potencia_Fricción_Acero_Polímero_3=0,
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_4=0,Potencia=0;

/* Valores de entrada. */

cout << "¿Cual es el valor para t1i?";
cin >> t1i;
cout << "¿Cual es el valor para t2i?";
cin >> t2i;
cout << "¿Cual es el valor para t3i?";
cin >> t3i;
cout << "¿Cual es el valor para yi? ";
cin >> yi;
cout << "¿Cual es el valor para vP? ";
cin >> vP;

/* Valores fijos. Se pueden cambiar. */
espesor=0.016;
m1=1;
m2=0.03;
m3=0.03;
m4=0.03;
m5=1;
k_polímero_1=0.5;
k_polímero_2=0.5;
k_polímero_3=0.5;
k_acero=3.3*k_polímero_1;

/* Los ángulos deben ser ser introducidos en grados. */
theta=1; /* Inicialización de ángulo a valor arbitrario. */
mu=0.5; /* Inicialización de ángulo a valor arbitrario. */
tau=0.1; /* Inicialización de ángulo a valor arbitrario. */
gamma=0.01; /* Inicialización de ángulo a valor arbitrario. */
ángulo_gamma=gamma*pi/180;
ángulo_tau=tau*pi/180;

```

A. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO CORRECTO. PROGRAMA EN C++.

```
ángulo_mu=mu*pi/180;
ángulo_theta=theta*pi/180;

/* Ecuaciones. Longitudes. */

l_AB=t3i/cos(x[1]*pi/180);
l_BMATRIZ=(l_AB*sin((pi/2)-(x[11]*pi/180)+(x[1]*pi/180)
+ángulo_mu))/sin(ángulo_theta+(x[11]*pi/180)-ángulo_mu);
l_BC=(l_AB*sin((pi/2)-ángulo_theta-(x[1]*pi/180)))
/sin(ángulo_theta+(x[11]*pi/180)-ángulo_mu);
l_JC=(l_BC*sin((pi/2)-(x[11]*pi/180)+(x[2]*pi/180)+ángulo_mu))
/sin((pi/2)-(x[2]*pi/180)-ángulo_mu);
l_DC=(l_BC*sin(x[11]*pi/180))/sin((pi/2)-(x[2]*pi/180)-ángulo_mu);
l_ED=(l_DC*sin((pi/2)-(x[2]*pi/180)-ángulo_theta))/sin((pi/2)
-(x[2]*pi/180)-ángulo_mu);
l_DMATRIZ=(l_DC*sin((pi/2)-(x[12]*pi/180)+(x[2]*pi/180)
+ángulo_mu))/sin((pi/2)-(x[2]*pi/180)-ángulo_mu);
l_EF=(l_ED*sin(x[12]*pi/180))/sin((pi/2)-(x[3]*pi/180)-ángulo_mu);
l_EL=(l_ED*sin((pi/2)-(x[12]*pi/180)+(x[3]*pi/180)+ángulo_mu))
/sin((pi/2)-(x[3]*pi/180)-ángulo_mu);
l_FG=(l_EF*sin((pi/2)-ángulo_theta-(x[3]*pi/180)))
/sin((x[13]*pi/180)+ángulo_theta);
l_FMATRIZ=(l_EF*sin((pi/2)-(x[13]*pi/180)+(x[3]*pi/180)))
/sin((x[13]*pi/180)+ángulo_theta);
t3f=l_FG*sin(x[13]*pi/180);
t2f=(t3f*t2i)/t3i;
l_NM=t2f/sin(x[16]*pi/180);
l_TM=(l_NM*sin((x[16]*pi/180)+ángulo_tau-(x[15]*pi/180)))
/sin(x[15]*pi/180);
l_ML=(l_NM*sin(pi-(x[16]*pi/180)-ángulo_tau))/sin(x[15]*pi/180);
l_LK=(l_ML*sin(ángulo_mu-ángulo_tau+(x[15]*pi/180)))/sin((pi/2)
-ángulo_mu-(x[5]*pi/180));
l_JK=(l_LK*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[5]*pi/180)))
/sin(x[14]*pi/180);
l_IH=t2i/sin((pi/2)-(x[4]*pi/180));
```

```

l_OP=(t1i/sin((pi/2)-(x[6]*pi/180)));
l_PI=(l_OP*sin((pi/2)+(x[6]*pi/180)-(x[17]*pi/180)+
(ángulo_gamma)))/sin(ángulo_tau+(x[17]*pi/180)-ángulo_gamma);
l_IJ=sqrt((l_PI)*(l_PI)+(l_IH*l_IH)-2*l_PI*l_IH*cos((pi/2)
+ángulo_tau+(x[4]*pi/180)));
l_PQ=(sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[6]*pi/180))*(t1i/(sin((pi/2)-
(x[6]*pi/180)))))/sin(ángulo_tau+(x[17]*pi/180)-ángulo_gamma);
l_QW=(l_PQ*sin((pi/2)-(x[17]*pi/180)+ángulo_gamma
+(x[7]*pi/180)))/sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[7]*pi/180));
l_RQ=(sin((x[17]*pi/180))*l_PQ)/sin((pi/2)-ángulo_gamma
-(x[7]*pi/180));
l_RK=(l_RQ*sin((pi/2)-(x[18]*pi/180)+ángulo_gamma
+(x[7]*pi/180)))/sin((x[18]*pi/180)+ángulo_tau-ángulo_gamma);
l_SR=(l_RQ*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[7]*pi/180)))
/sin((x[18]*pi/180)+ángulo_tau-ángulo_gamma);
l_ST=(l_SR*sin((x[18]*pi/180)))/sin((pi/2)-ángulo_gamma
-(x[8]*pi/180));
l_SY=(l_SR*sin((pi/2)-(x[18]*pi/180)+ángulo_gamma
+(x[8]*pi/180)))/sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[8]*pi/180));
l_TM=(l_ST*sin((pi/2)-(x[19]*pi/180)+(x[8]*pi/180)))
/sin(ángulo_tau+(x[19]*pi/180));
l_UT=(l_ST*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[8]*pi/180)))
/sin(ángulo_tau+(x[19]*pi/180));
t1f=(l_UT*sin((x[19]*pi/180)));
yf=((yi*t1f)/t1i);
l_ZY=yf/(sin((x[10]*pi/180)));
l_XY=(yf*sin(ángulo_gamma+(x[10]*pi/180)))
/(sin((pi/2)-(x[0]*pi/180)-ángulo_gamma)*sin((x[10]*pi/180)));
l_XW=(yf*sin(ángulo_gamma+(x[10]*pi/180))*sin((pi/2)
-(x[0]*pi/180)))/(sin((x[20]*pi/180))*sin((pi/2)-ángulo_gamma
-(x[0]*pi/180))*sin((x[10]*pi/180)));
l_VW=(yf*sin(ángulo_gamma+(x[10]*pi/180))*sin((pi/2)
-(x[0]*pi/180))*sin(ángulo_gamma+(x[20]*pi/180)))
/(sin((x[20]*pi/180))*sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[0]*pi/180))
*sin((x[10]*pi/180))*sin((pi/2)-(x[9]*pi/180)-ángulo_gamma));

```

A. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO CORRECTO. PROGRAMA EN C++.

```
l_XPUNZÓN=(l_XY*sin((pi/2)+(x[0]*pi/180)-(x[20]*pi/180))
/sin(x[20]*pi/180);
l_VPUNZÓN=l_VW/sin(x[9]*pi/180);

/* Ecuaciones. Velocidades. */

v_GY=(vP*sin(ángulo_gamma))/sin((pi)-ángulo_gamma
-(x[10]*pi/180));
v_GT=(vP*sin(ángulo_tau))/sin((pi)-ángulo_tau-(x[19]*pi/180));
v_GM=(vP*sin(ángulo_mu))/sin((pi)-ángulo_mu-(x[16]*pi/180));
v_GF=(vP*sin(ángulo_theta))/sin((pi)-ángulo_theta
-(x[13]*pi/180));
v_YMATRIZ=(vP*sin(x[10]*pi/180))/sin((pi)-ángulo_gamma-
(x[10]*pi/180));
v_TMATRIZ=(vP*sin(x[19]*pi/180))/sin((pi)-ángulo_tau
-(x[19]*pi/180));
v_MMATRIZ=(vP*sin(x[16]*pi/180))/sin((pi)-ángulo_mu
-(x[16]*pi/180));
v_FMATRIZ=(v_GF*sin(x[13]*pi/180))/sin(ángulo_theta);
v_GX=(v_GY*sin((pi/2)+(x[0]*pi/180)-(x[10]*pi/180)))/sin((pi/2)
-(x[0]*pi/180));
v_YX=(v_GY*sin(x[10]*pi/180))/sin((pi/2)-(x[0]*pi/180));
v_XW=(v_YX*sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[0]*pi/180))
/sin((x[20]*pi/180)+ángulo_gamma);
v_VW=(v_XW*sin(x[20]*pi/180))/sin((pi/2)-(x[9]*pi/180));
v_XV=(v_VW*sin((pi/2)+(x[9]*pi/180)-(x[20]*pi/180))
/sin(x[20]*pi/180);
v_SMATRIZ=(v_TMATRIZ*sin((pi/2)-(x[8]*pi/180)-ángulo_tau))
/sin((pi/2)+(x[8]*pi/180)+ángulo_gamma);
v_ST=(v_TMATRIZ*sin(ángulo_tau-ángulo_gamma))/sin((pi/2)
+(x[8]*pi/180)+ángulo_gamma);
v_SR=(v_ST*sin((pi/2)-(x[8]*pi/180)-ángulo_tau))/sin(ángulo_tau
-ángulo_gamma+(x[18]*pi/180));
v_RQ=(v_SR*sin(x[18]*pi/180))/sin((pi/2)-ángulo_gamma-
(x[7]*pi/180));
```

```

v_QP=(v_RQ*sin((pi/2)-(x[7]*pi/180)-ángulo_tau))/sin(ángulo_tau
-ángulo_gamma+(x[17]*pi/180));
v_VMATRIZ=(vP-v_XV-v_GX);
v_VP=(v_VMATRIZ*sin(ángulo_tau))/sin((pi/2)-(x[6]*pi/180)
-ángulo_tau);
v_PMATRIZ=(v_VP*sin((pi/2)+(x[6]*pi/180)))/sin(ángulo_tau);
v_LMATRIZ=(v_MMATRIZ*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[15]*pi/180)))
/sin(pi-x[15]*pi/180);
v_LM=(v_MMATRIZ*sin(ángulo_mu-ángulo_tau))/sin(pi-x[15]*pi/180);
v_LK=(v_LM*sin((x[15]*pi/180)+ángulo_tau-ángulo_mu))/sin((pi/2)
+ángulo_mu-(x[5]*pi/180));
v_KJ=(v_LK*sin((pi/2)+ángulo_tau-(x[5]*pi/180)))
/sin(x[14]*pi/180);
v_IV=(v_VMATRIZ*sin(ángulo_mu))/sin((pi/2)-(x[4]*pi/180)
-ángulo_mu);
v_IMATRIZ=(v_IV*sin((pi/2)+(x[4]*pi/180)))/sin(ángulo_mu);
v_IP=sqrt(((v_IMATRIZ-(v_PMATRIZ*sin((pi/2)-ángulo_mu
+ángulo_tau)))*(v_IMATRIZ-(v_PMATRIZ*sin((pi/2)-ángulo_mu
+ángulo_tau)))+(v_PMATRIZ*sin(ángulo_mu-ángulo_tau))
*(v_PMATRIZ*sin(ángulo_mu-ángulo_tau))));
v_KMATRIZ=(v_KJ*sin(pi-(x[14]*pi/180)))/sin(ángulo_mu
-ángulo_tau);
v_KI=v_KMATRIZ-v_IMATRIZ;
v_JI=sqrt((v_KI)*(v_KI)+(v_KJ)*(v_KJ)-(2*v_KI*v_KJ
*cos((x[14]*pi/180)-ángulo_mu+ángulo_tau)));
v_FE=(v_FMATRIZ*sin(ángulo_theta-ángulo_mu))/sin((pi/2)
+(x[3]*pi/180)+ángulo_mu);
v_ED=(v_FE*sin((pi/2)-(x[3]*pi/180)-ángulo_theta))
/sin((x[12]*pi/180)+ángulo_theta-ángulo_mu);
v_EMATRIZ=(v_FE*sin((pi/2)-(x[3]*pi/180)-ángulo_theta))
/sin(ángulo_theta-ángulo_mu);
v_CD=(v_ED*sin(x[12]*pi/180))/sin((pi/2)-(x[2]*pi/180)
-ángulo_mu);
v_CB=(v_CD*sin((pi/2)-(x[2]*pi/180)-ángulo_theta))
/sin((x[11]*pi/180)+ángulo_theta-ángulo_mu);

```

A. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO CORRECTO. PROGRAMA EN C++.

```
v_BV=(v_VMATRIZ*sin(ángulo_theta))/
sin((pi/2)-(x[1]*pi/180)-ángulo_theta);
v_BMATRIZ=(v_BV*sin((pi/2)+(x[1]*pi/180)))/sin(ángulo_theta);
v_CMATRIZ=(v_CD*sin((pi/2)-(x[2]*pi/180)-ángulo_theta))
/sin(ángulo_theta-ángulo_mu);
v_DMATRIZ=(v_CD*sin((pi/2)+(x[2]*pi/180)+ángulo_mu))
/sin(ángulo_theta-ángulo_mu);
v_JMATRIZ=(v_KJ*sin((x[14]*pi/180)-ángulo_mu+ángulo_tau))
/sin(ángulo_mu-ángulo_tau);
v_CJ=sqrt(((v_JMATRIZ)*(v_JMATRIZ))+((v_CMATRIZ)*(v_CMATRIZ))
-(2*v_CMATRIZ*v_JMATRIZ*cos(ángulo_mu-ángulo_tau)));
v_MT=sqrt(((v_TMATRIZ)*(v_TMATRIZ))+((v_MMATRIZ)*(v_MMATRIZ))
-(2*v_TMATRIZ*v_MMATRIZ*cos(ángulo_mu-ángulo_tau)));
v_EL=sqrt(((v_EMATRIZ)*(v_EMATRIZ))+((v_LMATRIZ)*(v_LMATRIZ))
-(2*v_EMATRIZ*v_LMATRIZ*cos(ángulo_mu-ángulo_tau)));
v_YS=v_YMATRIZ-v_SMATRIZ;
v_WMATRIZ=(v_XW*sin(x[20]*pi/180))/sin(ángulo_gamma);
v_QMATRIZ=(v_QP*sin((pi)-(x[17]*pi/180)-ángulo_tau
-ángulo_gamma))/sin(ángulo_tau-ángulo_gamma);
v_QW=v_WMATRIZ-v_QMATRIZ;
v_RMATRIZ=(v_RQ*sin((pi/2)+(x[7]*pi/180)+ángulo_gamma))
/sin(ángulo_tau-ángulo_gamma);
v_RK=sqrt(((v_KMATRIZ)*(v_KMATRIZ))+((v_RMATRIZ)*(v_RMATRIZ))
-(2*v_KMATRIZ*v_RMATRIZ*cos(ángulo_mu-ángulo_tau)));

/* Ecuaciones de Potencia. */

Potencia_Corte((((1_OP*v_VP)+(1_PQ*v_QP)+(1_RQ*v_RQ)+(1_SR*v_SR)
+(1_ST*v_ST)+(1_UT*v_GT))*k_polímero_1)+(((1_AB*v_BV)+(1_BC*v_CB)
+(1_DC*v_CD)+(1_ED*v_ED)+(1_EF*v_FE)+(1_FG*v_GF))*k_polímero_3)+
(((1_IH*v_IV)+(1_IJ*v_JI)+(1_JK*v_KJ)+(1_LK*v_LK)+(1_ML*v_LM)+
(1_NM*v_MMATRIZ))*k_polímero_2)+((1_ZY*v_GY)+(1_XY*v_YX)
+(1_XW*v_XW)+(1_VW*v_VW))*k_acero)*espesor);
Potencia_Fricción_Matriz=((1_FMATRIZ*v_FMATRIZ)
+(1_DMATRIZ*v_DMATRIZ)+(1_BMATRIZ*v_BMATRIZ))*m5
```

```

*k_polímero_3*espesor;
Potencia_Fricción_Punzón=((l_XPUNZÓN*v_GX)+(l_VPUNZÓN*
(vP-v_VMATRIZ)))*m1*k_acero*espesor;
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_2=((l_SY*v_YS)
+(l_QW*v_QW))*m2*k_polímero_1*espesor;
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_3=((l_TM*v_MT)+(l_RK*v_RK)
+(l_IP*v_IP))*m3*k_polímero_2*espesor;
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_4=((l_EL*v_EL)+(l_JC*v_CJ))
*m4*k_polímero_3*espesor;

/* Potencia Total. */

Potencia=Potencia_Corte+Potencia_Fricción_Matriz
+Potencia_Fricción_Punzón+Potencia_Fricción_Acero_Polímero_2
+Potencia_Fricción_Acero_Polímero_3
+Potencia_Fricción_Acero_Polímero_4;

return Potencia;
}

int main(void)
{
    const int NDIM=21;
    const DP FTOL=1.0e-6;
    const DP p_d[NDIM]={0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1
,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1};
    int i,j,iter,ab;
    ofstream out("correcto.txt");
    if (!out)
    {
        cout << "El archivo no puede abrirse";
        exit(1);
    }
    DP fret;

```

A. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO CORRECTO. PROGRAMA EN C++.

```
Vec_DP p(p_d,NDIM);
Mat_DP xi(NDIM,NDIM);

for (i=0;i<NDIM;i++)
    for (j=0;j<NDIM;j++)
        xi[i][j]=(i == j ? 1.0 : 0.0);
NR::powell(p,xi,FTOL,iter,fret,func);
cout << "Iteraciones: " << iter << endl << endl;
cout << "El mínimo encontrado en:" << endl;
cout << fixed << setprecision(6);
for (i=0;i<=NDIM;i++) cout<<setw(12)<<p[i];
cout << endl << endl << "Valor mínimo de la función= ";
cout << setw(12) << fret << endl << endl;
cout << "El valor mínimo de la función se encuentra en:"
<< endl;
cout<<setw(12)<<1.0<<setw(12)<<2.0<<setw(12)<<3.0<< endl;

out << "Iteraciones: " << iter << endl << endl;
out << "El mínimo encontrado en: " << endl;
out << fixed << setprecision(6);
for (i=0;i<=NDIOM;i++) out << setw(12)<< p[i];
out << endl << endl << "Valor mínimo de la función= ";
out << setw(12) << fret << endl << endl;
out.close();
cin >> ab;
return 0;
}
```

Apéndice B

Modelización del estirado defectuoso. Programa en C++.

```
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <cmath>
#include <fstream>
#include "nr.h"
#include "powell.cpp"
#include "linmin.cpp"
#include "mnbrak.cpp"
#include "f1dim.cpp"
#include "brent.cpp"

#define pi 3.141592653589793238462643383279

using namespace std;

// Driver para la rutina Powell

DP func(Vec_I_DP &x)
```

B. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO DEFECTUOSO. PROGRAMA EN C++.

```
{
/* Las variables globales se definen a continuación */
double t1i=0;
double t2i=0;
double t3i=0;
double yi=0;
double ángulo_gamma=0, gamma=0;
double ángulo_mu=0, mu=0;
double ángulo_alpha=0, alpha=0;
double ángulo_beta=0, beta=0;
double ángulo_tau=0, tau=0, ángulo_Mo=0, ángulo_Co=0;
double ángulo_theta=0, theta=0;
double t1f=0;
double t2f=0;
double yf=0;
double vP=0;
double m1=0,m2=0,m3=0,m4=0,m5=0; /* Factores de Fricción */
double espesor=0;
double k_polímero_1=0, k_polímero_2=0, k_polímero_3=0;
double k_acero=0; /* Resistencias a la cortadura */

double l_AB=0, l_AH=0, l_DB=0, l_BMATRIZ=0, l_BC=0, l_JC=0,
l_DC=0, l_ED=0, l_DMATRIZ=0, l_EF=0, l_EL=0, l_FG=0, l_FMATRIZ=0;
double l_NM=0, l_ML=0, l_LK=0, l_JK=0, l_IH=0, l_CH=0,
l_LMATRIZ=0, l_IJ=0, Po=0, Co=0;
double l_OP=0, l_PI=0, l_PQ=0, l_UT=0, l_QW=0, l_RQ=0,
l_RK=0, l_SR=0, l_ST=0, l_SY=0, l_TM=0, l_VW=0, l_XW=0;
double l_XY=0, l_IP=0, l_ZY=0, l_XPUNZÓN=0, l_VPUNZÓN=0,
Flo=0, l_JMATRIZ=0;
double v_GY=0, v_GT=0, v_GM=0, v_GF=0, v_YMATRIZ=0, v_TMATRIZ=0,
v_MMATRIZ=0, v_FMATRIZ=0, v_GX=0, v_YX=0, v_XW=0, v_VW=0, v_FE=0;
double v_XV=0, v_SMATRIZ=0, v_ST=0, v_SR=0, v_RQ=0, v_QP=0,
v_VMATRIZ=0,v_VP=0, v_PMATRIZ=0, v_LMATRIZ=0, v_LM=0, v_LK=0;
double v_KJ=0, v_AD=0, v_AB=0, v_BD=0, v_AR=0, v_ZY=0, v_ZT=0,
v_ZX=0, v_IV=0, v_IMATRIZ=0, v_IP=0, v_KMATRIZ=0, v_KI=0, v_JI=0,
```

```
v_ED=0, v_EMATRIZ=0, v_CD=0, v_CB=0, v_BV=0, v_JMATRIZ=0;
double v_BMATRIZ=0, v_CMATRIZ=0, v_DMATRIZ=0, v_CJ=0, v_MT=0,
v_EL=0, v_YS=0, v_WMATRIZ=0, v_QMATRIZ=0, v_QW=0,
v_RMATRIZ=0, v_RK=0;
double Potencia_Corte=0, Potencia_Fricción_Matriz=0,
Potencia_Fricción_Punzón=0, Potencia_Fricción_Acero_Polímero_2=0,
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_3=0,
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_4=0, Potencia=0;
```

```
/* Valores de entrada. */
```

```
cout << "¿Cual es el valor para t1i?";
cin >> t1i;
cout << "¿Cual es el valor para t2i?";
cin >> t2i;
cout << "¿Cual es el valor para t3i?";
cin >> t3i;
cout << "¿Cual es el valor para yi? ";
cin >> yi;
cout << "¿Cual es el valor para vP? ";
cin >> vP;
```

```
/* Valores fijos. Se pueden cambiar. */
```

```
espesor=0.016;
vP=1;
m1=1;
m2=0.03;
m3=0.03;
m4=0.03;
m5=1;
t1i=0.0000254;
t2i=0.0001054;
t3i=0.0000254;
yi=0.000254;
k_polímero_1=0.5;
```

B. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO DEFECTUOSO. PROGRAMA EN C++.

```
k_polímero_2=0.5;
k_polímero_3=0.5;
k_acero=3.3*k_polímero_1;

/* Los ángulos deben ser ser introducidos en grados. */

theta=1; /* Inicialización de ángulo a valor arbitrario. */
tau=0.5; /* Inicialización de ángulo a valor arbitrario. */
gamma=0.25; /* Inicialización de ángulo a valor arbitrario. */
ángulo_gamma=gamma*pi/180;
ángulo_tau=tau*pi/180;
ángulo_theta=theta*pi/180;

/* Ecuaciones. Longitudes. */

l_AB=t3i/sin(ángulo_mu);
l_AH=cos(ángulo_mu)*l_AB;
l_DB=t3i*cos((pi/2)-ángulo_alpha);
l_DMATRIZ=sin((pi/2)-ángulo_alpha)*l_DB;
l_BC=sqrt((l_AB*l_AB)+(l_DB*l_DB)-2*l_AB*l_DB*cos(ángulo_beta));
Po=asin((l_DB*sin(ángulo_beta))/l_BC);
l_CH=(l_BC*sin(Po+ángulo_mu-ángulo_theta))/sin(ángulo_theta);
l_IH=t2i/sin((pi/2)-(x[4]*pi/180));
l_IJ=sqrt((l_PI)*(l_PI)+(l_IH*l_IH)-2*l_PI*l_IH*cos((pi/2)+
ángulo_tau+(x[4]*pi/180)));
t2f=(t1f*t2i)/t1i;
l_NM=t2f/sin(x[16]*pi/180);
l_ML=(l_NM*sin(pi-(x[16]*pi/180)-ángulo_tau))/sin(x[15]*pi/180);
l_LK=(l_ML*sin(ángulo_theta-ángulo_tau+(x[15]*pi/180)))
/sin((pi/2)-ángulo_theta-(x[5]*pi/180));
l_JK=(l_LK*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[5]*pi/180)))
/sin(x[14]*pi/180);
l_OP=(t1i/sin((pi/2)-(x[6]*pi/180)));
l_PI=(l_OP*sin((pi/2)+(x[6]*pi/180)-(x[17]*pi/180)+
(ángulo_gamma)))/sin(ángulo_tau+(x[17]*pi/180)-ángulo_gamma);
```

```

l_PQ=(sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[6]*pi/180))*(t1i/(sin((pi/2)
-(x[6]*pi/180)))))/sin(ángulo_tau+(x[17]*pi/180)-ángulo_gamma);
l_QW=(l_PQ*sin((pi/2)-(x[17]*pi/180)+ángulo_gamma+(x[7]*pi/180)))/
sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[7]*pi/180));
l_RQ=(sin((x[17]*pi/180))*l_PQ)/sin((pi/2)-ángulo_gamma
-(x[7]*pi/180));
l_RK=(l_RQ*sin((pi/2)-(x[18]*pi/180)+ángulo_gamma+(x[7]*pi/180)))/
sin((x[18]*pi/180)+ángulo_tau-ángulo_gamma);
l_SR=(l_RQ*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[7]*pi/180)))/
sin((x[18]*pi/180)+ángulo_tau-ángulo_gamma);
l_ST=(l_SR*sin((x[18]*pi/180)))/sin((pi/2)
-ángulo_gamma-(x[8]*pi/180));
l_SY=(l_SR*sin((pi/2)-(x[18]*pi/180)+ángulo_gamma+(x[8]*pi/180)))/
sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[8]*pi/180));
l_TM=(l_ST*sin((pi/2)-(x[19]*pi/180)+(x[8]*pi/180)))/
sin(ángulo_tau+(x[19]*pi/180));
l_UT=(l_ST*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[8]*pi/180)))/
sin(ángulo_tau+(x[19]*pi/180));
t1f=sin(x[19]*pi/180)*l_UT;
yf=((yi*t1f)/t1i);
l_ZY=yf/(sin((x[10]*pi/180)));
l_XY=(yf*sin(ángulo_gamma+(x[10]*pi/180)))/(sin((pi/2)
-(x[0]*pi/180)-ángulo_gamma)*sin((x[10]*pi/180)));
l_XW=(yf*sin(ángulo_gamma+(x[10]*pi/180))*sin((pi/2)
-(x[0]*pi/180)))/(sin((x[20]*pi/180))*sin((pi/2)-ángulo_gamma
-(x[0]*pi/180))*sin((x[10]*pi/180)));
l_VW=(yf*sin(ángulo_gamma+(x[10]*pi/180))*sin((pi/2)
-(x[0]*pi/180))*sin(ángulo_gamma+(x[20]*pi/180)))/
(sin((x[20]*pi/180))*sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[0]*pi/180))
*sin((x[10]*pi/180))*sin((pi/2)-(x[9]*pi/180)-ángulo_gamma));
l_XPUNZÓN=(l_XY*sin((pi/2)+(x[0]*pi/180)-(x[20]*pi/180)))/
sin(x[20]*pi/180);
l_VPUNZÓN=l_VW/sin(x[9]*pi/180);
l_LMATRIZ=(l_ML*sin((pi/2)+ángulo_tau+(x[5]*pi/180)
-(x[15]*pi/180)))/sin((pi/2)-ángulo_theta-(x[5]*pi/180));

```

B. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO DEFECTUOSO. PROGRAMA EN C++.

```
Flo=asin((l_IH*sin((pi/2)+ángulo_tau+(x[4]*pi/180)))/l_IJ);
l_JMATRIZ=(l_IJ*sin(pi-(x[14]*pi/180)-Flo))/sin((x[14]*pi/180)
+ángulo_theta-ángulo_tau);

/* Ecuaciones. Velocidades. */

v_ZY=(vP*sin(ángulo_gamma))/sin((pi)-ángulo_gamma-(x[10]*pi/180));
v_ZT=(vP*sin(ángulo_tau))/sin((pi)-ángulo_tau-(x[19]*pi/180));
v_GM=(vP*sin(ángulo_mu))/sin((pi)-ángulo_mu-(x[16]*pi/180));
v_YMATRIZ=(vP*sin(x[10]*pi/180))/sin((pi)-ángulo_gamma
-(x[10]*pi/180));
v_TMATRIZ=(vP*sin(x[19]*pi/180))/sin((pi)-ángulo_tau
-(x[19]*pi/180));
v_MMATRIZ=(vP*sin(x[16]*pi/180))/sin((pi)
-ángulo_theta-(x[16]*pi/180));
v_ZX=(v_ZY*sin((pi/2)+(x[0]*pi/180)-(x[10]*pi/180)))/sin((pi/2)
-(x[0]*pi/180));
v_YX=(v_ZY*sin(x[10]*pi/180))/sin((pi/2)-(x[0]*pi/180));
v_XW=(v_YX*sin((pi/2)-ángulo_gamma-(x[0]*pi/180)))
/sin((x[20]*pi/180)+ángulo_gamma);
v_VW=(v_XW*sin(x[20]*pi/180))/sin((pi/2)-(x[9]*pi/180));
v_XV=(v_VW*sin((pi/2)+(x[9]*pi/180)-(x[20]*pi/180)))
/sin(x[20]*pi/180);
v_SMATRIZ=(v_TMATRIZ*sin((pi/2)-(x[8]*pi/180)-ángulo_tau))
/sin((pi/2)+(x[8]*pi/180)+ángulo_gamma);
v_ST=(v_TMATRIZ*sin(ángulo_tau-ángulo_gamma))
/sin((pi/2)+(x[8]*pi/180)+ángulo_gamma);
v_SR=(v_ST*sin((pi/2)-(x[8]*pi/180)-ángulo_tau))
/sin(ángulo_tau-ángulo_gamma+(x[18]*pi/180));
v_RQ=(v_SR*sin(x[18]*pi/180))/sin((pi/2)-ángulo_gamma
-(x[7]*pi/180));
v_QP=(v_RQ*sin((pi/2)-(x[7]*pi/180)-ángulo_tau))
/sin(ángulo_tau-ángulo_gamma+(x[17]*pi/180));
v_VMATRIZ=(vP-v_XV-v_ZX);
v_VP=(v_VMATRIZ*sin(ángulo_tau))/sin((pi/2)-(x[6]*pi/180)
```

```

-ángulo_tau);
v_PMATRIZ=(v_VP*sin((pi/2)+(x[6]*pi/180)))/sin(ángulo_tau);
v_LMATRIZ=(v_MMATRIZ*sin((pi/2)-ángulo_tau-(x[15]*pi/180)))/sin(pi-x[15]*pi/180);
v_LM=(v_MMATRIZ*sin(ángulo_theta-ángulo_tau))/sin(pi-x[15]*pi/180);
v_LK=(v_LM*sin((x[15]*pi/180)+ángulo_tau-ángulo_theta))/sin((pi/2)+ángulo_theta-(x[5]*pi/180));
v_KJ=(v_LK*sin((pi/2)+ángulo_tau-(x[5]*pi/180)))/sin(x[14]*pi/180);
v_IV=(v_VMATRIZ*sin(ángulo_theta))/sin((pi/2)-(x[4]*pi/180)-ángulo_theta);
v_IMATRIZ=(v_IV*sin((pi/2)+(x[4]*pi/180)))/sin(ángulo_theta);
v_IP=sqrt(((v_IMATRIZ-(v_PMATRIZ*sin((pi/2)-ángulo_theta+ángulo_tau)))*(v_IMATRIZ-(v_PMATRIZ*sin((pi/2)-ángulo_theta+ángulo_tau))))+(v_PMATRIZ*sin(ángulo_theta-ángulo_tau))*(v_PMATRIZ*sin(ángulo_theta-ángulo_tau)));
v_KMATRIZ=(v_KJ*sin(pi-(x[14]*pi/180)))/sin(ángulo_theta-ángulo_tau);
v_KI=v_KMATRIZ-v_IMATRIZ;
v_JI=sqrt((v_KI)*(v_KI)+(v_KJ)*(v_KJ)-(2*v_KI*v_KJ*cos((x[14]*pi/180)-ángulo_theta+ángulo_tau)));
v_JMATRIZ=(v_KJ*sin((x[14]*pi/180)-ángulo_theta+ángulo_tau))/sin(ángulo_theta-ángulo_tau);
v_MT=sqrt(((v_TMATRIZ)*(v_TMATRIZ))+((v_MMATRIZ)*(v_MMATRIZ))-(2*v_TMATRIZ*v_MMATRIZ*cos(ángulo_theta-ángulo_tau)));
v_YS=v_YMATRIZ-v_SMATRIZ;
v_WMATRIZ=(v_XW*sin(x[20]*pi/180))/sin(ángulo_gamma);
v_QMATRIZ=(v_QP*sin((pi)-(x[17]*pi/180)-ángulo_tau-ángulo_gamma))/sin(ángulo_tau-ángulo_gamma);
v_QW=v_WMATRIZ-v_QMATRIZ;
v_RMATRIZ=(v_RQ*sin((pi/2)+(x[7]*pi/180)+ángulo_gamma))/sin(ángulo_tau-ángulo_gamma);
v_RK=sqrt(((v_KMATRIZ)*(v_KMATRIZ))+((v_RMATRIZ)*(v_RMATRIZ))

```

B. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO DEFECTUOSO. PROGRAMA EN C++.

```
- (2*v_KMATRIZ*v_RMATRIZ*cos(ángulo_theta-ángulo_tau));
v_DMATRIZ=(v_VMATRIZ*sin(angle_Mo))/sin(ángulo_Co);
v_AD=(v_VMATRIZ*sin(pi-ángulo_theta))/sin(ángulo_Co);
v_AB=(v_AD*sin(ángulo_alpha-ángulo_Co))/sin(ángulo_beta);
v_BD=(v_AD*sin(ángulo_mu-angle_Mo))/sin(ángulo_beta);
v_BMATRIZ=sqrt((v_AB)*(v_AB)+(v_VMATRIZ)*(v_VMATRIZ)
-(2*v_AB*v_VMATRIZ*cos(ángulo_mu)));

/* Ecuaciones de Potencia. */

Potencia_Corte((((1_OP*v_VP)+(1_PQ*v_QP)+(1_RQ*v_RQ)+(1_SR*v_SR)
+(1_ST*v_ST)+(1_UT*v_ZT))*k_polímero_1)+(((1_AB*v_AB)
+(1_BC*v_BMATRIZ)+(1_DB*v_BD))*k_polímero_3)+(((1_IH*v_IV)
+(1_IJ*v_JI)+(1_JK*v_KJ)+(1_LK*v_LK)+(1_ML*v_LM)
+(1_NM*v_MMATRIZ))*k_polímero_2)+((1_ZY*v_ZY)+(1_XY*v_YX)
+(1_XW*v_XW)+(1_VW*v_VW))*k_acero)*espesor;
Potencia_Fricción_Matriz=((1_DMATRIZ*v_DMATRIZ)
+(1_LMATRIZ*v_LMATRIZ)+(1_JMATRIZ*v_JMATRIZ))*m5
*k_polímero_3*espesor;
Potencia_Fricción_Punzón=((1_XPUNZÓN*v_ZX)+(1_VPUNZÓN
*(vP-v_VMATRIZ))*m1*k_acero*espesor;
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_2=((1_SY*v_YS)+(1_QW*v_QW))
*m2*k_polímero_1*espesor;
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_3=((1_TM*v_MT)+(1_RK*v_RK)
+(1_IP*v_IP))*m3*k_polímero_2*espesor;
Potencia_Fricción_Acero_Polímero_4=(1_CH*v_VMATRIZ)
*m4*k_polímero_3*espesor;

/* Potencia Total. */

Potencia=Potencia_Corte+Potencia_Fricción_Matriz
+Potencia_Fricción_Punzón+Potencia_Fricción_Acero_Polímero_2
+Potencia_Fricción_Acero_Polímero_3
+Potencia_Fricción_Acero_Polímero_4;
```

```

return Potencia;
}

int main(void)
{
    const int NDIM=21;
    const DP FTOL=1.0e-6;
    const DP p_d[NDIM]={0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,
0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1};
    int i,j,iter,ursupa;
    ofstream out("defecto.txt");
    if (!out)
    {
        cout << "El archivo no puede abrirse";
        exit(1);
    }
    DP fret;
    Vec_DP p(p_d,NDIM);
    Mat_DP xi(NDIM,NDIM);
    for (i=0;i<NDIM;i++)
        for (j=0;j<NDIM;j++)
            xi[i][j]=(i == j ? 1.0 : 0.0);
    NR::powell(p,xi,FTOL,iter,fret,func);
    cout << "Iteraciones: " << iter << endl << endl;
    cout << "El mínimo encontrado en:" << endl;
    cout << fixed << setprecision(6);
    for (i=0;i<=NDIM;i++) cout << setw(12)<< p[i];
    cout << endl << endl << "Valor mínimo de la función= ";
    cout << setw(12) << fret << endl << endl;
    cout << "El valor mínimo de la función se
encuentra en:" << endl;
    cout<<setw(12)<<1.0<<setw(12)<< 2.0<< setw(12)<< 3.0<<endl;

    out << "Iteraciones: " << iter << endl << endl;
    out << "El mínimo encontrado en:" << endl;

```

B. MODELIZACIÓN DEL ESTIRADO DEFECTUOSO. PROGRAMA EN C++.

```
out << fixed << setprecision(6);
for (i=0;i<=NDIM;i++) out << setw(12)<< p[i];
out << endl << endl << "Valor mínimo de la función= ";
out << setw(12) << fret << endl << endl;
out.close();
cin >> ursupa;
return 0;
}
```