



Universitat de Girona

**CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DEL PROCESO
DE DOBLADO AL AIRE DE CHAPA. MODELO
DE PREDICCIÓN DEL ÁNGULO DE
RECUPERACIÓN Y DEL RADIO DE DOBLADO
FINAL**

Maria Luisa GARCIA-ROMEUE DE LUNA

ISBN: 84-689-5327-X

Dipòsit legal: GI-I416-2005



Universitat de Girona

Innovació a l'enginyeria i les organitzacions

Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Contribución al estudio del proceso de
doblado al aire de chapa. Modelo de
predicción del ángulo de recuperación y
del radio de doblado final.**

TESIS DOCTORAL

Doctoranda: María Luisa García-Romeu de Luna

Director: Dr. Quim de Ciurana i Gay

Girona, Julio de 2005

*A mis hermanas Julietas y Marta Siglinda,
recordad ser las mujeres que queráis ser.*

A mis padres Julio Carlos y Maria Luisa.

Agradecimientos

Vendrán días en que el peso que hoy te abruma se hará liviano.

Vendrán días en que ese peso no será carga sino bagaje.

Vendrán días, han de venir.

Manolo García

A mi director de tesis, Quim de Ciurana, por su confianza en mi, su entusiasmo en mi trabajo y por su fuente inagotable de dosis de ánimo con las que me ha asistido durante el desarrollo de este trabajo.

Quiero agradecer la ayuda recibida para realizar la experimentación de doblado a Enric Sánchez de la empresa Samar't por su colaboración en proporcionar las probetas de aluminio y a Lluís Clapés de la empresa Matriçats, por la rapidez en proporcionar las de acero inoxidable. Al grupo de investigación AMADE por cedernos amablemente el uso de las máquinas de su laboratorio para los ensayos de doblado y de tracción del material, además del tiempo y los consejos de Benigne Corbella y Josep Costa. También quiero agradecer la ayuda prestada por el Servei de Microscopia de la UdG en la obtención de imágenes de las chapas dobladas, en especial a Jordi Blàvia por su disposición, interés y buenos consejos. Y finalmente a Genís Turon y a Jordi Vicens por su ayuda en la construcción del utillaje de doblado. Agradecer además a éste último sus golpes de maza, la rapidez en el pulido y su desconocida habilidad “graffitera”.

A mis compañeros del Àrea d'Enginyeria dels Processos de Fabricació, a Marta Albertí y Lluís Clapés con los que es y ha sido estupendo compartir asignaturas; y a Marc Sabater y Marta Reig, por sus ánimos en estos últimos meses. A mis compañeros del grupo de investigación GREPP, y en especial a Martí Casadesús, Rudi de Castro y Gersa Giménez porque con ellos las reuniones y *workshops* adquieren un tono más organizativo. Y a los compañeros del área vecina, con los que en algún momento u otro, durante estos años, he compartido despacho, Lluís Ripoll, Narcís Gascons, Norbert Blanco y Joan Andreu Mayugo.

A mis amigos, ya que gracias a ellos la espera de que llegaran “estos días” ha sido más llevadera. A Inés, por los cafés de invierno y las coca-colas de verano en las que compartimos las mismas preocupaciones, por su apoyo en los ratos de desánimo y por sus recomendaciones siempre certeras. A Dani con el que comparto muchísimas cosas además de una afición, para algunos más que notable, por el cine. A Quei por ser la mejor amiga que se puede tener. A Clara y a Josep M^a T. pues entre otras cosas han cuidado de mi espalda. A Cris, pues además de ser un contrapunto a mi mundo universitario logró sin querer mi reciente afición al gimnasio. A Ivan y Àlex, por el número 3. Y a Fafa, por ser uno de mis amigos más antiguos.

A mis padres, Julio y Maria Luisa, y a mis hermanas Marta S. y Julietas, pues sin duda sin su apoyo incondicional no estaría dónde estoy ni sería quién soy.

Y muy especialmente, a J.A., mi compañero del despacho de al lado, por su gran y fabulosa capacidad de convertirlo todo en algo sencillo.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Descripción del dominio de aplicación.....	1
1.1.1 Características generales de los procesos de chapa	2
1.2 Motivación de la tesis.....	4
1.3 Objetivo de la tesis.....	5
1.4 Plan preliminar de desarrollo de la tesis.....	6
1.5 Contenido de la tesis.....	7
1.6 Medios utilizados en la realización de la tesis.....	8
Capítulo 2 Doblado y recuperación.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.1.1 Fabricación de componentes por conformado de chapa.....	12
2.1.2 La ingeniería concurrente y los procesos de conformado de chapa.....	13
2.1.3 Simulación y sistemas CAE para procesos de conformado de chapa.....	16
2.2 Tecnología de doblado	19
2.2.1 Doblado al aire y doblado a fondo	21
2.2.2 Parámetros relacionados con el doblado	23
2.3 Doblado al aire.....	32
2.3.1 Equipamiento para el doblado al aire.....	33
2.3.2 Aspectos geométricos del doblado al aire.....	34
2.3.3 Propiedades del material en el doblado al aire	35
2.3.4 Parámetros del proceso y problemas de precisión relacionados	39
2.3.5 Modelos de doblado y Control adaptativo	41
2.4 Recuperación o <i>Springback</i>	44
2.4.1 Definiciones iniciales de recuperación	45
2.4.2 Variables de influencia sobre la recuperación	48
2.4.3 Tensiones residuales y recuperación.....	49
2.4.4 Recuperación en diferentes tipos materiales	50
Capítulo 3 Modelado del doblado al aire y de la recuperación	53
3.1 Introducción.....	53
3.2 Modelos analíticos y formulaciones para el doblado al aire.....	54
3.2.1 Hipótesis básicas en la mecánica del proceso de doblado	54

3.2.2 Trabajos precursores en la formulación de la recuperación.....	56
3.2.3 Aproximaciones fundamentales para los modelos de doblado al aire.....	60
3.2.4 Modelos de relevancia en relación con el doblado al aire y la recuperación.....	63
3.3 Doblado al aire y método de elementos finitos	72
3.3.1 Revisión histórica sobre la evolución de los procesos de chapa y su análisis por elementos finitos	73
3.3.2 Aplicación de los <i>FEA</i> en la predicción de la recuperación	74
3.3.3 Consideraciones a la simulación de la recuperación mediante <i>FEA</i>	77
3.4 Recuperación y redes neurales.....	78
3.5 Recuperación en otros procesos de deformación.....	81
3.6 Establecimiento del problema	82
Capítulo 4 Experimentación y análisis de resultados	85
4.1 Introducción.....	85
4.2 Caracterización del material	86
4.2.1 Montaje experimental	87
4.2.2 Descripción del espécimen /probeta.....	87
4.2.3 Descripción de experimento	88
4.2.4 Análisis de resultados.....	88
4.2.5 Resultados obtenidos	92
4.3 Experimentación de doblado al aire	93
4.3.1 Descripción del espécimen /probeta.....	93
4.3.2 Montaje experimental	94
4.3.3 Ejecución del experimento de doblado al aire	100
4.4 Técnica de análisis de las imágenes digitales.....	105
4.4.1 Preparación del espécimen.....	108
4.4.2 Análisis de la Imágenes Digitales. Medición de la curvatura.....	109
4.5 Análisis y Resultados obtenidos	121
4.6 Discusión de los resultados.....	125
4.6.1 Repetibilidad de los resultados obtenidos	125
4.6.2 Error respecto al modelo rígido plástico.....	127
4.6.3 Ángulo de doblado final y Radio de doblado final.....	129
4.6.4 Recuperación.....	132
4.6.5 Síntesis de la discusión.....	146
Capítulo 5 Modelo de predicción de la geometría final y de la recuperación	147
5.1 Introducción.....	147
5.2 Red neural artificial.....	148

5.3 Planificación de la red neural.....	151
5.3.1 Definición de la tarea.....	152
5.3.2 Viabilidad del estudio.....	152
5.3.3 Especificación de entradas y salidas	152
5.3.4 Adquisición de datos.....	153
5.4 Ciclo de desarrollo de la red	154
5.4.1 Diseño de red.....	154
5.4.2 Pre-procesamiento y Post-procesamiento de los datos	157
5.4.3 Entrenamiento de red.....	157
5.4.4 Análisis del error post-entrenamiento.....	163
5.4.5 Esquema del algoritmo de entrenamiento.....	163
5.5 Presentación de resultados de entrenamiento.....	164
5.5.1 Condiciones iniciales.....	164
5.5.2 Algoritmos de entrenamiento.....	165
5.5.3 Red neural adoptada	175
5.6 Presentación de resultados de los modelos	180
5.6.1 Predicción de la recuperación.....	182
5.6.2 Predicción del radio final de doblado.....	183
5.6.3 Predicción de la penetración del punzón.....	184
5.7 Modelo de predicción	185
Capítulo 6 Conclusiones y Trabajos Futuros	187
6.1 Introducción.....	187
6.2 Conclusiones.....	188
6.3 Trabajos futuros	191
Capítulo 7 Referencias.....	193

Lista de símbolos

Material

E	Módulo de Young (GPa)
n	Exponente de endurecimiento por deformación
C	Constante de endurecimiento por deformación (MPa)
ν	Ratio de Poisson
S_Y	Esfuerzo de fluencia bajo tracción uniaxial (MPa)
Γ	Ratio de endurecimiento anisótropo
A_r	Ratio de área de reducción en el ensayo a tracción
ε	Deformación real
e	Deformación ingenieril
σ	Esfuerzo real
S	Esfuerzo ingenieril
σ_x	Esfuerzo en la dirección x (MPa)
ε_x	Deformación en la dirección x
ε_o	Deformación en la cara más exterior del doblado o de la fibra más exterior
ε_i	Deformación en la cara más interior del doblado
ε_f	Deformación real de la fractura
ε_0	Pre-deformación en la ecuación de Ludwik-Nadai o de Swift

Geometría del doblado

R	Radio de doblado (interior),(mm.)
k	Curvatura (mm^{-1} .)
w	Ancho de la pieza doblada (mm.)
t	Grosor de la chapa (mm.)
S	Longitud del arco de doblado (mm.)
β_f	Ángulo (final) de doblado ($^\circ$)
β_i	Ángulo inicial de doblado ($^\circ$)
θ	Ángulo de doblado comprendido entre las alas de la chapa ($^\circ$)
R_i	Radio en la superficie más interior del arco antes de la recuperación (mm.)
R_f	Radio en la superficie más interior del arco después de la recuperación (mm.)
R_o	Radio exterior del arco (mm.)
R_n	Radio a la capa neutra o plano neutro, donde la deformación total de la capa en cuestión es cero. Radio de la capa con una longitud igual a su longitud inicial (mm.)
R_{m0}	Radio a la capa media inicial o Radio final del plano central original o inicial (mm.)
R_g	Radio a la capa frontera entre compresión y tracción (mm.)
R_m	Radio medio o a la capa media (mm.)
R_{min}	Radio de doblado mínimo (mm.)

c Factor de curvatura

L_0 Longitud del desarrollo inicial de la chapa o Longitud de chapa desplegada (mm.)

L_m Longitud de la capa media (mm.)

L_n Longitud de la capa neutra (mm.)

Parámetros del proceso de doblado

r_d Radio de matriz (mm.)

r_p Radio de punzón (mm.)

w_d Obertura o ancho de la matriz (mm.)

Z Desplazamiento o Penetración del punzón (mm.)

F Fuerza de doblado (N.)

k Factor geométrico de la matriz

K_r Factor de recuperación

$\Delta\beta$ Ángulo de recuperación ($^\circ$)

Redes neurales

x_i Entrada a la red neural

d_i Valor deseado o valor objetivo

y_k Salida de la red neural

h_j Neurona oculta

w_{ji} Peso desde la i -ésima neurona de la capa anterior a la neurona j -ésima de la capa actual

w_{j0} Bias de la neurona

N Número de patrones

a Precisión esperada del conjunto de datos

η Ratio de aprendizaje

α Momentum

μ Ratio del algoritmo Levenberg-Marquardt

$W(t)$ Vector o matriz de los pesos y biases actual, en el momento t

$W(t+1)$ Vector o matriz de los pesos y biases en el momento $t+1$

Los símbolos que se definen y se usan sólo localmente en el texto principal no se mencionan en esta lista.

Capítulo 1

Introducción

Si primero pudiéramos saber donde estamos, y hacia adónde tendemos, podríamos juzgar mejor qué hacer y cómo hacerlo.

Abraham Lincoln

Este capítulo contiene una descripción general que justifica la realización de esta tesis, los objetivos que se pretenden alcanzar. Dentro de esta descripción general también se proporciona un plan preliminar de la tesis al igual que un resumen de su contenido.

1.1 Descripción del dominio de aplicación

La tecnología de conformación por deformación es tan antigua como el hombre del período neolítico. Pero si nos acercamos más al presente, los procesos de conformación por deformación se caracterizan, generalmente, por ser procesos (Lange, 1997): de alta productividad, con bajos costes de producción por pieza, con bajo consumo de material y con cualidades de producto diseñadas especialmente para la función. La tecnología de deformación moderna emergió con énfasis en aspectos de precisión, control y seguridad de procesos. Y según Lange (1997) se caracteriza por los siguientes criterios u objetivos además de los mencionados anteriormente: *i)* producción de determinados componentes con tolerancias muy estrechas (tecnología de *net shape forming*), *ii)* producción de componentes de geometría compleja con una tolerancia cercana a la de la forma finalizada (tecnología de *near net shape forming*), *iii)* procesos de alta calidad controlados, tanto para la geometría como para la propiedades mecánicas de los productos y *iv)* la deliberada disminución del consumo de material y energía.

La tecnología por deformación posee un amplio abanico de procesos de chapa y de procesos de deformación en masa. Permiten conseguir piezas desde un gramo a una tonelada de masa con una gran variedad de aplicaciones en materiales desde aceros a metales no féreos.

Si dentro de los procesos de conformación por deformación nos centramos en los de conformación de chapa, podemos apreciar que en los últimos años este tipo de procesos han alcanzado una gran importancia en el mundo industrial. La chapa se utiliza

ampliamente como material base en productos industriales y de consumo a causa de su fácil maleabilidad para poder convertirla en formas complejas (Gao et al., 2000).

Los componentes de chapa se usan ampliamente en varias industrias, como en la aeroespacial, en la electrónica, en herramientas de máquinas, en refrigeración y aire acondicionado, etc. Estos componentes forman una parte importante de la actividad de fabricación porque además del punto de vista funcional o estructural para el que han sido diseñados, también desde el punto de vista estético tienen una gran importancia porque se usan como cerramientos para cubrir los productos, y por lo tanto son visibles al mundo exterior (Jagirdar et al., 2001). También cabe destacar el rol que juegan en el desarrollo del transporte (la aeronáutica, el ferrocarril, los vehículos de transporte por carretera y los barcos), ya que en todos estos medios de transporte su efectividad depende en gran parte de la reducción de su peso (Kopp, 1996).

Actualmente la industria de chapa está bajo gran presión, debido a la globalización del mercado, al corto ciclo de vida de los productos, la alta demanda de calidad y los cortos plazos de entrega. Para ser competitivo en este mercado, las empresas productoras de componentes de chapa deben obtener suficiente flexibilidad de producción para producir rápidamente varios productos de chapa con una calidad aceptable (Xie et al., 2001). Esta competencia en la producción industrial moderna fuerza a los fabricantes a acortar los tiempos de producción y de desarrollo de producción (Pepelnjak et al., 2001). Para poner un ejemplo de esta drástica reducción de los periodos de desarrollo, en el pasado, en la industria del sector del automóvil, se introducían 3 modelos nuevos cada 10 años; mientras que ahora, se introducen 10 modelos nuevos cada 3 años. Además, si se tiene en cuenta la tendencia, mencionada anteriormente, de reducción de peso (en el caso de los coches para reducir el consumo de combustible) este requisito fuerza a la industria automovilística a reconstruir los procedimientos de diseño y fabricación convencionales (Tekkaya, 2000).

Independientemente de la reducción de los tiempos de desarrollo y producción, está la exigencia de calidad se ha mantenido, incluso ha aumentado. Las tolerancias estrechas son un ejemplo de ello. Esto provoca que a menudo existan defectos y fallos en las piezas de chapa tales como: deformación no deseada, falta de precisión de los ángulos de doblado y de la geometría, adelgazamiento de las paredes, aplanamiento, arrugas y grietas, etc. (Jin et al., 2001).

Para conseguir los dos objetivos de reducción de costes y de aumento de calidad, la tendencia principal recogida por varios autores Kopp (1996), Lange (1997), Tekkaya (2000), Pepelnjak et al. (2001) se basa en la integración de diferentes tipos de tecnologías (de la información, asistidas por computador, de simulación, y optimización, de planificación, de conocimiento, etc.) en un sistema bien coordinado. Este sistema debe complementar un enfoque multidisciplinar, incluyendo la ciencia y tecnología de materiales, la tecnología de herramientas, la ingeniería de producción y el diseño y la planificación de proceso, entre otros. A su vez debe contemplar la asunción del pensamiento creativo y de la buena disposición a innovar.

1.1.1 Características generales de los procesos de chapa

Los procesos de deformación de chapa tienen la particularidad de que la experiencia tiene un papel muy importante tanto en el diseño como en la fabricación de producto. Lo que se traduce a la realización de bucles de prueba y error dentro de las fases de diseño y fabricación de los productos. Estos bucles contienen más o menos pasos según sea la mayor o menor experiencia sobre la geometría de la pieza que se quiere conseguir y el material que es utilizado.

La Tabla 1.1 resume las características generales que se consideran de los procesos de chapa.

Geometría de la pieza de trabajo:	Estructura plana $S/V \propto 1/t$, $t < 1$
Comportamiento material:	Anisotropía (planar) normal
Cinemática de deformación:	Desplazamientos (muy) grandes pero deformaciones moderadas. Inestabilidades (<i>necking</i> , arrugas)
Características de proceso:	En frío Fallo de la pieza de trabajo Recuperación crítica Tensiones residuales críticas

Tabla 1.1. Características de los procesos de chapa. Fuente: (Tekkaya, 2000)

Dentro de los números procesos de conformación en chapa, este trabajo se centra en el proceso de *doblado al aire*. En el proceso de doblado al aire la chapa no se prensa completamente contra la matriz. Presenta la ventaja de que se pueden doblar varios tipos de material y varios grosores con la misma combinación de herramientas (punzón y matriz). Se trata de un proceso muy flexible, pues se pueden producir varios ángulos con la misma combinación de herramienta y matriz ajustando el desplazamiento de esta herramienta-punzón. Por lo tanto el doblado al aire es también un proceso muy eficiente, porque por un lado es independiente del tipo de material que se quiere doblar y por otro el número de cambios de herramienta está delimitado por el ángulo que se quiere doblar. Finalmente, la fuerza de prensa que se requiere es menor comparada con el doblado a fondo. Por esta razón, se necesitan máquinas menos potentes. Eso significa que el doblado al aire ofrece mucha más flexibilidad comparado con el doblado en matriz convencional (o a fondo).

Las empresas reconociendo estas ventajas, cada vez más, se cambian al doblado al aire. Sin embargo el proceso de doblado al aire es difícil de describir y presenta algunas dificultades específicas en lo que respecta al control del proceso, a la geometría final obtenida y al cálculo del desarrollo plano para la pieza de partida. La ausencia de modelos del proceso adecuados para controlar dichos aspectos obstaculiza el uso industrial del doblado al aire. Por estas razones, en muchos casos las empresas incluso han abandonado el doblado al aire. La falta de investigación en este campo puede ser debida, según de Vin (1994), a que en el pasado, el doblado al aire incluso se llegó a considerar erróneamente un proceso sin complicación. Lo que amplifica la necesidad en incrementar el esfuerzo de investigación en el campo de doblado al aire.

En la actualidad, además de flexibilidad, eficiencia y efectividad, el mercado también exige que las piezas presenten una calidad alta y repetitiva para un mismo tipo de producto. La repetitividad de los productos es un requerimiento difícil de obtener en el proceso de doblado al aire porque la variación de las propiedades del material dentro de las láminas de chapa y las desviaciones en el grosor de la chapa, entre otros, son factores que tienen una influencia importante para este requerimiento.

Relacionado con la alta calidad, el aumento de una demanda con productos precisos también se convierte en un problema adicional. En el doblado al aire, la exigencia de estas demandas se traduce a que el ángulo de doblado obtenido debe estar situado dentro de un

rango muy estrecho de tolerancia. En este caso el comportamiento elástico de los materiales junto a variaciones del grosor de la chapa y de las propiedades del material durante la ejecución del proceso hace aparecer el fenómeno de la recuperación (*springback*). Una aproximación sencilla a la definición de recuperación es el cambio dimensional que se produce en la forma de la pieza procesada después de retirar la herramienta o punzón debido a la recuperación elástica del material. Esta recuperación angular causa desviaciones de la forma final deseada, provocando que la forma de la pieza después de la recuperación angular pueda no entrar dentro de tolerancia, dejando de ser apropiada para la aplicación a propósito de la cual fue diseñada.

1.2 Motivación de la tesis

La habilidad de predecir la geometría final de una pieza de chapa así como la recuperación es un requisito fundamental de cualquier simulación completa en los procesos de deformación de chapa. Al igual que es importante que los bucles de prueba y error característicos de estos procesos se puedan reducir por medio de herramientas de simulación. Tekkaya et al. (2000) recuerdan que los requerimientos industriales de la simulación numérica de los procesos de chapa (*sheet metal forming*) ya se conocen desde mediados de los 70, cuando según los autores, tales requisitos fueron expresados formidablemente por *el sueño de Budiansky (Harvard)*: “Imaginé una caja negra de cálculo que fuera increíblemente poderosa y que se pudiera alimentar de descripciones matemáticas de lo que el diseñador imaginó para una determinada forma de chapa metálica. Entonces, al pulsar un botón, que la computadora escupiera: la forma del molde, la configuración del desarrollo de la pieza necesitada, la orientación y configuración de los punzones. Y si no es posible su fabricación, que también nos lo diga”. Tekkaya et al. (2000) afirman que aunque no esté abiertamente reconocido en la vida real, el sueño de Budiansky sigue siendo lo que espera cualquier ingeniero de procesos de la simulación de procesos de deformación de chapa.

Con el ánimo de aportar un poco de luz a la caja negra de *Budiansky* para el proceso de doblado al aire, este trabajo tiene como finalidad analizar el proceso de doblado al aire de chapa, para predecir la recuperación angular y la geometría final de doblado, consecuentemente, el ángulo final de doblado y el radio final de curvatura.

Una realidad constatada es la intención de las empresas de utilizar de entre las tecnologías de desarrollo disponibles aquellas herramientas *CA-X* o de simulación que permitan considerar determinadas cuestiones relacionadas con la fabricabilidad u otros aspectos de la pieza final que se deseen obtener, en etapas tempranas del diseño. En realidad, las simulaciones pueden realizarse en cualquier etapa de desarrollo del producto. Los resultados obtenidos en ellas representan un gran beneficio, puesto que en los procesos de chapa la geometría de la pieza está íntimamente relacionada con el diseño y fabricación de las herramientas (matrices y punzones) que la procesarán. Al final el uso de una determinada herramienta se traduce o bien en reducción en el tiempo de desarrollo o bien en una disminución del número de pruebas y error que es necesario llevar a cabo durante la ejecución de la serie 0 o de un prototipo.

Un inconveniente o barrera de entrada de estos tipos de sistemas de ayuda, en algunos entornos industriales, es la necesidad de que la persona que utilice las herramientas de simulación *FEM* o *CA-X* tenga que ser experta en su uso, para poder realizar una correcta interpretación de los resultados así como para obtener la mejora que se busca mediante su uso. En función del tamaño de la industria puede no existir la figura de especialista en simulación, por lo que se crea la necesidad de que sea el especialista del proceso de

deformación de metal, que trabaja en el entorno industrial en cuestión, quien deba también manejarla.

Existen determinadas industrias en las que la figura del especialista en simulación está contemplada, y con un entorno adecuado de filosofía de trabajo, la visión del especialista de proceso no queda obviada. En este caso, las herramientas más potentes de simulación numérica al igual que herramientas *CA-X* integradas son muy adecuadas. En cambio, en otro tipo de industria, por ejemplo de un tamaño menor, no existe la figura del especialista en simulación. Simplemente existe el especialista en el proceso. En este caso él mismo debe de manejar una herramienta de simulación en mayor o menor medida sofisticada. Esto precisamente requiere que las herramientas de *CA-X* o de simulación añadan la característica de poder ser usada por personal no especialista. En una herramienta de este tipo su complejidad y precisión dependerá del tipo de producto y de la fase de desarrollo en que se utilice. En alguna de estas fases de diseño del proceso solo se requiere realizar simulaciones simplificadas. Esta idea se ha tenido en cuenta en el desarrollo de este trabajo.

1.3 Objetivo de la tesis

El objetivo último de la tesis es el desarrollo de un modelo de cálculo que asista a la predicción y determinación de la geometría final de una pieza, radio de curvatura y ángulo de doblado final, producida mediante un proceso de doblado al aire. Intrínsecamente relacionado con la determinación de la geometría final de una pieza doblada está relacionado el fenómeno de la recuperación. Por este motivo, también es objetivo del modelo desarrollado cuantificar el valor de la recuperación que soporta la pieza durante el proceso.

Bajo este propósito primordial de esta tesis, las tareas de estudio significativas que se analizarán lo largo de este estudio pueden señalarse como:

El estudio del proceso de doblado al aire de piezas metálicas. Es conveniente conocer con detalle las características del proceso de doblado al aire, así como las implicaciones que tiene sobre la geometría final de la pieza que se obtiene. Lo que significa una revisión teórica del proceso de doblado al aire, así como una revisión de los modelos analíticos de doblado al aire desarrollados en la literatura en las últimas décadas, para que de esta manera y si es posible, establecer qué modelo analítico para el proceso de doblado al aire es el más adecuado.

Este estudio minucioso del proceso de doblado al aire involucra dos cuestiones fundamentales características en los procesos de doblado. La primera cuestión trata de la relación entre el ángulo de doblado final y la curvatura de la pieza final, mientras que la segunda con el fenómeno de la recuperación angular.

El estudio del fenómeno de la recuperación angular. Como se ha declarado en el punto anterior, la recuperación es un fenómeno típico de los procesos de doblado, de gran importancia sobre la geometría final de la pieza. Es necesario conocer con detalle y basarse en las definiciones, formulaciones analíticas y observaciones experimentales existentes en la literatura para poder reconocer los parámetros importantes que intervienen en el valor de la recuperación angular durante el proceso para así poder considerarlo correctamente.

El estudio de metodologías y técnicas de análisis para la resolución del problema de fabricación objetivo de esta tesis. El problema de fabricación a resolver es determinar los valores de los parámetros que definen e intervienen en la forma de la pieza final, es decir radio de doblado final, recuperación y ángulo de doblado final, así como el parámetro principal ejecutor del proceso, el desplazamiento del punzón. Conocer los sistemas y métodos de

cálculo y decisión que sean efectivos es un paso ineludible para el desarrollo de esta tesis. Es conveniente por un lado, conocer y aplicar distintas técnicas de análisis (por ejemplo sistemas expertos, redes neurales o tratamiento de imágenes). Por otro, es necesario integrar estas técnicas con el conocimiento del proceso, la experiencia en el laboratorio y la formulación del comportamiento. Es importante ampliar los sistemas que puedan asistir a los ingenieros en la optimización del diseño de los procesos de fabricación de piezas de chapa.

En base al objetivo principal de esta tesis se pueden definir los objetivos parciales que se persiguen:

Definir y realizar una experimentación del proceso de doblado al aire. La experimentación requiere una definición clara de las variables a controlar, cuantificarlas mediante técnicas de medición conocidas o desarrolladas específicamente otras para este trabajo. Después de la experimentación en el laboratorio se debe realizar un análisis íntegro de los datos obtenidos e interpretarlos correctamente.

Desarrollar y validar un modelo de predicción. Las variables de salida del modelo de predicción deben de estar de acuerdo con el objetivo principal que se persigue en este trabajo.

Específicamente las características de las piezas metálicas sometidas a estudio representan dos comportamientos de material muy distintos (acero inoxidable y aluminio), de diferentes grosores de chapa (de 1 a 3 mm) y de ángulos de doblados pocos severos, lo que significa valores de ángulo de doblado interior comprendidos entre 90 y 160°.

1.4 Plan preliminar de desarrollo de la tesis

Una vez definido el objetivo de la tesis es importante delimitar qué métodos de conocimiento, investigación e interpretación se establecen inicialmente. Este plan preliminar de desarrollo de la tesis se especifica a continuación.

1. Identificación del problema. Realización de un análisis del ámbito de aplicación de la tesis para localizar qué problema se intentará resolver. El análisis se efectúa desde dos puntos de vista. El primero abarca el proceso de fabricación de doblado al aire en relación a qué geometría pieza final se consigue. Y el segundo, tiene el trasfondo de la planificación de procesos, para poder establecer qué parámetros de ejecución son importantes en la realización del proceso de doblado al aire.

2. Conceptualizar el problema. Si en la etapa anterior se identifica el problema a resolver, durante esta etapa se efectúa un análisis más detallado, para forjar los conceptos alrededor del problema que se va a definir. Para ello, debe adquirirse el conocimiento específico mediante:

- El análisis sistematizado de la definición actual del fenómeno de recuperación angular
- El análisis de los trabajos realizados anteriormente en investigaciones relacionadas con el tema de la tesis. Distinguiendo entre ellos los: *i)* trabajos de investigación analítica – investigación experimental realizados sobre el doblado al aire y el fenómeno de la recuperación angular; *ii)* trabajos de investigación experimental – investigación con métodos de simulación realizados sobre el fenómeno recuperación angular y del entorno del conformado por doblado de chapa.
- La determinación de las influencias y parámetros críticos que deben considerarse en el proceso de doblado al aire.

Los resultados, comparaciones y conclusiones extraídos durante esta etapa deben permitir formalizar, especificar y acotar el problema, de manera que se tengan claras las

hipótesis de partida, los parámetros y variables críticos para poder continuar en la siguiente fase.

3. Formalización del método resolutivo. La formalización del método resolutivo parte de la proposición efectuada al final del apartado anterior. Durante esta etapa se desarrolla el método resolutivo, y se da estructura a lo que será el procedimiento para resolver la cuestión propuesta y definida en el paso 2. Hallar el método resolutivo más adecuado para el ámbito de aplicación del trabajo y del problema formulado significa realizar un estudio de métodos de resolución. Seleccionar el más adecuado implica realizar estudios más profundos en algún área no específicamente relacionada con el ámbito de aplicación, sino más bien con herramientas y metodologías aplicadas a la resolución de problemas.

El método resolutivo que se lleva a cabo consiste en el:

- Diseño, elaboración y definición de un procedimiento experimental relacionado con el proceso de doblado al aire
- Elaboración de métodos de análisis de los resultados obtenidos en la experimentación anterior
- Diseño, elaboración y definición de una red neural para el cálculo de predicción de los parámetros principales bajo investigación.

El carácter únicamente matemático-informático de determinados métodos resolutivos que se emplearán en el desarrollo de este trabajo obligan a que posteriormente a la fase de predicción proporcionado por este trabajo el diseño del proceso se complementa con las fases de: *i)* implementación de un sistema prototipo, para reajustar los parámetros iniciales que se deciden y que deben permitir la evolución favorable hacia una mejor resolución y un refinamiento del sistema; *ii)* prueba del prototipo; *iii)* refinamiento del desarrollo de la técnica así como su validación; *iv)* implementación final y *v)* valoración de los resultados obtenidos.

1.5 Contenido de la tesis

La presentación de este trabajo se divide en dos partes. La primera parte abarca dos capítulos y se realiza una revisión teórica y un estado del arte del proceso de doblado al aire. Esta investigación sobre el proceso de doblado al aire lleva en sí misma el estudio de la relación ángulo-curvatura de la pieza final obtenida, así como la del fenómeno de recuperación que se produce durante la ejecución del proceso.

Más concretamente, en el Capítulo 2 se da una visión inicial teórica del proceso de doblado que se va precisando hacia el proceso de doblado al aire, así como de las definiciones iniciales y básicas del fenómeno de la recuperación. Del mismo modo se describe el entorno de fabricación de los procesos de deformación de piezas de chapa bajo la óptica de la ingeniería concurrente y de la planificación de procesos. Lo que da paso, a continuación, a la descripción de los conceptos básicos relacionados con la tecnología de doblado, para continuar profundizando, según se desarrolla el capítulo, en las características del proceso de doblado al aire y del fenómeno de recuperación que se produce bajo las condiciones del doblado al aire, estableciendo los conceptos de partida de lo que es el núcleo principal de este trabajo.

En el Capítulo 3 se presenta un estado del arte centrado en los modelos desarrollados para el doblado al aire así como los que se han desarrollado también para tratar el problema de la recuperación. De hecho en algunos casos es difícil separar los modelos para un caso o para otro, pues su estudio está íntimamente ligado y así es como se muestran. En este

capítulo se presenta un repaso por los tres enfoques típicos que comúnmente se han usado para tratar la recuperación: modelos analíticos, modelos experimentales y métodos numéricos, además de analizar también nuevos enfoques para cuantificar o tratar la recuperación.

La investigación presentada en estos dos capítulos anteriores, establecen las bases para realizar lo que forma la segunda parte de esta trabajo.

La segunda parte comprende la experimentación y su análisis de resultados, junto con el desarrollo del modelo de predicción de las variables ángulo de recuperación y radio de curvatura final que se exponen con detalle en los Capítulo 4 y Capítulo 5.

En el Capítulo 4 se detalla las diferentes experimentaciones ejecutadas en el desarrollo de este trabajo. En primer lugar se lleva a cabo una serie de experimentos para la caracterización de los materiales utilizados pues influyen en los fenómenos estudiados en este trabajo. En segundo lugar se detalla la experimentación del doblado al aire, el diseño y ejecución de tal experimentación, así como las técnicas de medición necesarias para obtener los valores objetivos del estudio. Es precisamente dentro de las técnicas de medición donde se presenta un novedoso análisis de imágenes digitales de los especímenes doblados para la obtención del valor del ángulo de doblado así como del radio de curvatura. Para finalizar este capítulo se elaboran y presentan los resultados de las experimentaciones realizadas.

En el Capítulo 5 se elabora un modelo de predicción basado en una red neural. A partir de los parámetros de influencia determinados en el capítulo anterior, se proponen diferentes arquitecturas de red neural para predecir los parámetros de salida: radio de doblado final, ángulo de doblado final y recuperación. El modelo de red neural intenta generalizar las relaciones (no cuantificadas o no conocidas de manera estricta) que existen entre los parámetros que se definirán como entradas pues se han identificado de mayor relevancia sobre las salidas a predecir. Después de un entrenamiento eficaz, las diferentes arquitecturas de red neural proporcionan predicciones correctas a nuevos valores de entrada.

En el último capítulo se presentan las conclusiones a las que se ha llegado con este trabajo y se sugieren posibles futuras líneas de investigación para completarlo. Los aspectos originales e innovadores de la tesis en relación con otros trabajos realizados en el proceso de doblado al aire se presentan también en este último capítulo. La principales ventajas que puede obtenerse del modelo de predicción propuesto en esta tesis es la facilidad de implementación de las redes neurales (núcleo del modelo de predicción definido) en un software. El carácter matemático de las redes permite una sencilla integración en un software que después de una buena validación podría convertirse en una herramienta de asistencia al diseño de la pieza final y del proceso de doblado.

1.6 Medios utilizados en la realización de la tesis

Los medios que se han usado durante la realización de la tesis se presentan agrupados en función de los objetivos parciales que se definieron.

a) Experimentación de tracción y del proceso doblado al aire:

- Máquina de ensayo de tracción universal MTS, modelo 661.22D-01 de Célula de Carga Uniaxial.
- Extensómetro axial de tipo clip, modelo MTS 634.25.
- Máquina de ensayo de tracción universal MTS, modelo MTS 858 Minibionix[®]
- Utillaje de doblado
- Transductor de desplazamiento axial.

b) Análisis de experimentos:

- Microsoft[®] Office EXCELL 2003

c) Tratamiento digital:

- Escáner Hewlett Packard 6100C/T formato A-4 para materiales opacos y transparentes 1200 ppp.
- Lector USB Sandisk de tarjetas de memoria
- Monitor CRT 19" DotPitch 0,24 (resol.1600x1200)
- Cámara Digital Nikon Coolpix 4500, 4 Megapíxels, Zoom Óptico 4x
- Sistema de soporte de macrofotografía Kaiser RS1 + KAISER RT1 para cámaras fotográficas convencionales o digitales.
- MATLAB[®]. Versión 7.0

d) Redes neurales y modelo de predicción:

- MATLAB[®]. Versión 7.0

El desarrollo de los programas se ha realizado en un ordenador personal con sistema operativo Windows XP.

Capítulo 2

Doblado y recuperación

Busca la simplicidad, y desconfía de ella.

Alfred North Whitehead

2.1 Introducción

En este capítulo se realiza una presentación del campo de aplicación en el que se engloba este trabajo. Se parte desde una perspectiva sobre tecnología de doblado general hasta particularizarla para el proceso de doblado al aire. Definiendo los conceptos iniciales y fundamentales de relacionados con el proceso de doblado al aire y proporcionando las nociones generales relacionadas con el fenómeno de la recuperación.

La tecnología de deformación no es una disciplina aislada, es sólo una fracción dentro de los diferentes grupos de procesos de producción existentes, y se puede considerar tan antigua como los primeros procesos de transformación que desarrolló el hombre ya en el período neolítico.

Los procesos de conformado por deformación (también conocidos como *forming*, *metal forming* o *metalworking* en inglés) producen la deformación plástica de un lingote o de una lámina de chapa entre unas matrices para obtener una configuración final de pieza. Los procesos de conformado por deformación tradicionalmente se dividen en procesos de deformación en masa (*bulk forming*) y procesos de deformación de chapa (*sheet forming* o *sheet metal forming*). Pertenecen a la primera clasificación, procesos de deformación en masa, los procesos de deformación en los que el material de partida es un lingote, una barra o un bloque (como por ejemplo en la extrusión, el forjado, el laminado y el trefilado). En ellos se aumenta considerablemente la relación superficie-volumen de la pieza conformada bajo la acción de una carga de compresión muy grande. Mientras que pertenecen al segundo grupo los procesos de deformación de chapa metálica. Es decir, cuando se le aplica una deformación plástica a una pieza de chapa mediante cargas de tracción o flexión. Puede así transformarse la chapa en una forma tridimensional. A menudo sin cambios significantes en el grosor de la chapa o en sus características de superficie.

Como se apuntaba al principio, se trata de una tecnología muy antigua. Sin embargo, si se sitúa el horizonte temporal más cerca de la actualidad y manteniendo como foco de atención los procesos de conformación por deformación, a mediados de los años 90 en el

estudio de (Kopp, 1996) ya se reconocen las principales tendencias de investigación en este ámbito, relacionadas con: la reducción de los tiempos de producción, la obtención de costes más bajos y de un consumo de energía menor y la disminución de desperdicio. Como es común en todo proceso de transformación, la competencia en la producción industrial actual fuerza a los fabricantes a acortar los tiempos de producción y de desarrollo. En el trabajo de (Pepelnjak et al., 2001) se reconoce que éste es un campo de estudio del que no se puede excluir a los procesos de conformación por deformación. Una de las técnicas utilizadas para la reducción de este tiempo de desarrollo de nuevos productos es la integración de las tecnologías asistidas por computador en el diseño, la planificación de proceso y la optimización de producto (Pepelnjak et al., 2001).

Teniendo como foco de estudio los procesos de deformación de chapa, se observa que el problema en las industrias de producción de chapa está relacionado con la exigencia del cliente en obtener piezas cada día más complejas y con tolerancias geométricas cada vez más ajustadas (o estrechas). Esto provoca que a menudo, en las piezas de chapa existan defectos y fallos tales como los que se recogen en el trabajo de (Jin et al., 2001), por ejemplo: la aparición de deformaciones no deseadas, la falta de precisión de los ángulos de doblado y de la geometría, el adelgazamiento de las paredes, el aplanamiento de las superficies curvadas, aparición de arrugas y grietas, etc. Todas estas anomalías están en estrecha relación con distintas características del proceso: el diseño de las estampas y los utillajes, las condiciones que definen del conjunto matriz-punzón, la máquina, la selección de proceso y los efectos del material. En resumen, las anomalías están relacionadas con un número muy elevado de parámetros propios de cada proceso de deformación de chapa.

2.1.1 Fabricación de componentes por conformado de chapa

En cuanto a la práctica industrial de los procesos de conformado de chapa es habitual reconocer la existencia de dos etapas características de estos tipos de proceso. Estas etapas son anteriores a la fase de producción propiamente dicha. A la primera etapa se la denomina etapa de estructuración, y a la segunda etapa de fabricación de la serie 0 o fase 0. Entre las principales tareas de la estructuración se reconoce la industrialización del proceso, donde se analiza y realiza el diseño de la matriz y el punzón para un determinado producto. En este momento, aún no se está en condiciones todavía de ponerse a producir, sino que se da paso a la segunda etapa o fase 0. En esta fase 0 se ajustan tanto parámetros del proceso (herramientas y utillajes) como parámetros de la propia pieza, la mayoría de las veces mediante metodologías de prueba y error. Lo que representa un inconveniente, la fase 0 contribuye a aumentar dos parámetros clave que rigen la producción, el tiempo y los costes (el de desperdicio por ejemplo).

Actualmente, existe una variedad extensa de procesos de fabricación que se aplican en la industria que trabaja con la chapa, ya que los componentes obtenidos a partir de este tipo de conformación admiten gran variedad tanto en tamaño, en forma como en complejidad. Antigamente, los procesos aplicados eran principalmente los procesos mecánicos tales como el punzonado, el cizallamiento, el recorte por punzonado (*nibbling*) y el doblado a fondo. Las condiciones existentes en cada proceso (las características de las máquinas, principalmente) imponían un tamaño de lote mayor y una variedad de producto menor que en la actualidad. La evolución del mercado ha llevado de la mano a la evolución de los equipos, siendo estos últimos ahora más flexibles, más eficientes y tecnológicamente mejor equipados. Por otro lado, el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación como el corte por láser, el corte por chorro de agua, etc., también han influido, pues estos procesos de fabricación también son adecuados para la fabricación de productos de chapa con formas complejas y de forma irregular. Asimismo conviene recordar que dentro de las operaciones

de conformado de chapa deben incluirse, además, operaciones de acabado como el desbarbado de aristas y el sesgado de chapa sobrante de etapas intermedias.

En concreto para el proceso de doblado de chapa, objeto de esta tesis, la industria de fabricación de chapa usa distintos procesos de doblado para producir dobleces rectos. Los cuatro procesos de doblado más importantes (como se pueden observar en la Figura 2.1) son: *i)* el doblado a fondo también conocido como doblado en molde convencional (doblado en V, *bottoming* o *coining*), *ii)* el doblado con dado deslizante (*flanging*), *iii)* el doblado con dado basculante, una variedad del anterior y *iv)* el doblado al aire, también conocido como doblado en tres puntos o doblado libre (*air bending* o *free bending*) (de Vin, 2000).

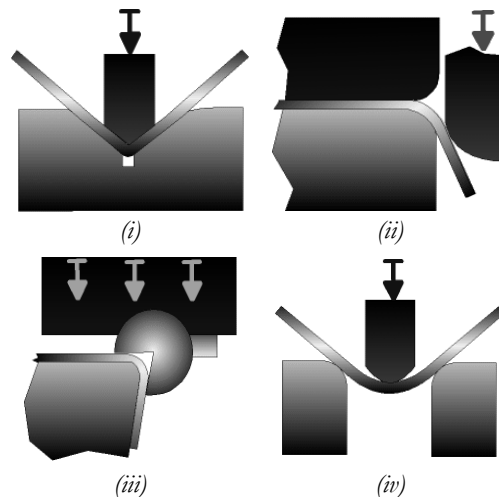


Figura 2.1 Procesos de doblado más importantes. Fuente: (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, 2004).

De los cuatro procesos tradicionales de doblado se observa que el doblado con dado deslizante y con dado basculante se aplican principalmente para producir rebordes sobre productos de tipo panel más largos, a diferencia del doblado al aire y a fondo de aplicación más general. Como proceso más actual, al igual que en el punzonado, la tecnología láser también se aplica para el doblado de chapas metálicas, como se refleja en el trabajo de (Vasile et al., 2000) donde se estudia el proceso doblado mediante el láser.

2.1.2 La ingeniería concurrente y los procesos de conformado de chapa

En el diseño y fabricación de producto de forma concurrente, el diseñador debe considerar toda la información y requerimientos posibles, incluso aquellos de procesos de desarrollo de producto de etapas posteriores e incorporar esas consideraciones en el diseño del producto. Se trata de respaldar el proceso de elaborar decisiones inteligentes en las primeras etapas del diseño. Según Xie et al. (2001), esta situación normalmente supone una gran presión sobre el equipo de diseño de producto, aunque sea poco realista, pues el éxito del desarrollo de producto necesita de las contribuciones y de la experiencia de casi la totalidad de la gente de una empresa.

a) Integración para los componentes de chapa

Frecuentemente, los productos de chapa se diseñan sin la consideración sistemática de los requerimientos de desarrollo de productos en etapas posteriores, tales como la planificación de proceso, la fabricabilidad, la planificación de la producción y la optimización de la fabricación. Además, las realimentaciones desde estos procesos de etapas posteriores, hasta el diseñador de producto sólo pueden hacerse después de que el

producto sea diseñado o incluso fabricado. A menudo, esta situación puede resultar en la repetición de tareas caras y que consumen mucho tiempo. Consecuentemente, afecta la calidad, el coste y el tiempo de entrega del producto (Xie et al., 2001).

En (Xie et al., 2001) se afirma que la integración es un concepto que en la actualidad recibe mucha atención. Una de las razones es la automatización tanto de la producción física como de las actividades de planificación precedentes, lo que es un resultado de la ejecución del equipamiento de fabricación como del hardware de los ordenadores. Un prerequisite para la automatización es que la información involucrada en la automatización de cualquier proceso debe ser identificable, formalizada y explícita para que pueda controlarse.

Así pues, con un correcto análisis de la información relacionada con la elaboración de un componente de chapa, se puede pensar en la elaboración de herramientas que permitan tener consideraciones tempranas sobre la planificación de procesos, fabricabilidad, optimización, etc. La afirmación anterior puede conseguirse por la aplicación de tecnologías de computador avanzadas, tecnología de ingeniería, tecnología de optimización de fabricación, tecnología de simulación por computador y tecnología de base de conocimiento (Xie et al., 2001).

Lange (1997) pensando en una aproximación integradora, define un modelo donde estructura el sistema de la tecnología de deformación del metal (ver Figura 2.2). En su modelo proporciona un enfoque integrado donde se reconocen un núcleo conectado con seis módulos-satélites dispuestos a su alrededor.

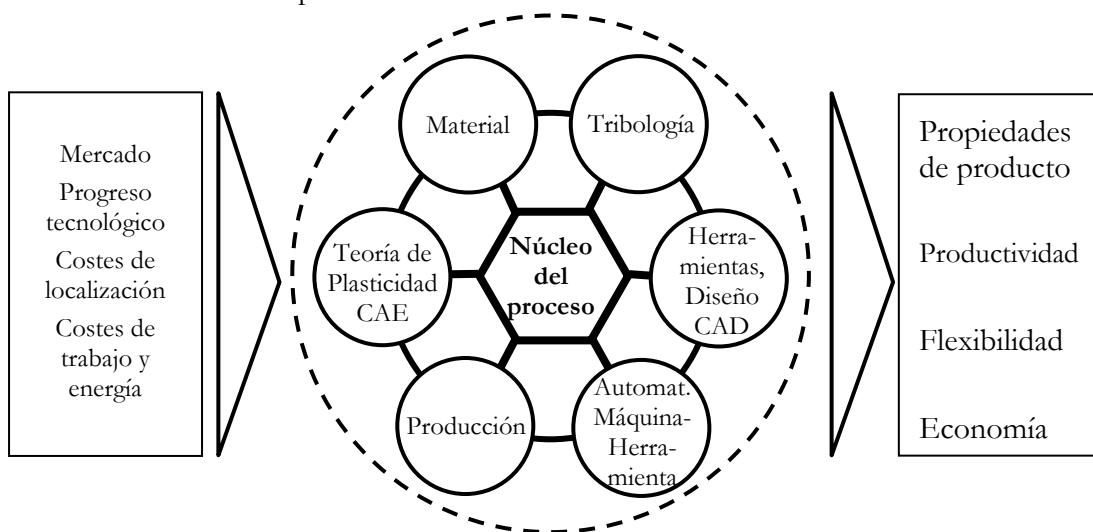


Figura 2.2 Modelo de estructura del sistema de la tecnología del conformado de metal (Lange, 1997).

El centro está marcado por el núcleo-esencia del proceso, que se define por la relación geométrica de la pieza de trabajo-herramienta y la cinemática del proceso estudiado. Los seis módulos dispuestos a su alrededor son:

- Fundamentos de la teoría de plasticidad incluyendo el análisis del proceso y el diseño, por ejemplo, por FEA.
- Tecnología de materiales.
- Tribología.
- Tecnología de herramienta.
- Automatización.
- La fábrica.

Todos los módulos están interconectados uno con los otros, en el mismo grado. Las relaciones entre ellos y con el núcleo del proceso pueden ser parcialmente formuladas matemáticamente o descritas por modelos de flujo de datos. Esta estructura, que tendrá que ser resuelta en detalles para cada uso individual, alienta al usuario a implicarse en el enfoque de integración necesario al problema de la conformación por deformación (*metal forming*). Todos estos aspectos deberán definirse correctamente y tenerse en cuenta desde el principio, por la ingeniería simultánea para desarrollar un proceso de producción económico y exitoso.

El sistema se guía por el progreso tecnológico general, entradas al sistema definido como el mercado y sus condiciones de situación (por ej. disponibilidad de mano de obra, costes de energía). Estos aspectos conjuntamente llevan al sistema a dedicar esfuerzos para aumentar la calidad, la flexibilidad y mejorar la economía, a destacar entre las salidas del sistema.

b) Planificación de procesos y los procesos de conformado de chapa

En las últimas décadas y dentro de este mismo entorno de ingeniería concurrente, la planificación de fabricación se ha vuelto una de las tareas clave en el ambiente de producción. Puede ser vista como el nexo de coordinación entre los ingenieros de diseño y los de fabricación. Los diseñadores expresan su intención referida a las especificaciones requeridas en términos de funcionabilidad y fiabilidad de una pieza de ingeniería. Los ingenieros de fabricación tienen que tomar las acciones correctas para materializar estas intenciones basándose en las restricciones adicionales impuestas desde el taller. El objetivo de la planificación de fabricación es coordinar estos dos tipos de actividades y restricciones (intenciones de diseño y acciones de fabricación) para que pueda crearse una unidad de producción efectiva (Ham et al., 1988), por lo tanto muchos factores de carácter técnico y no técnico tienen que tenerse en cuenta (T. C. Chang et al., 1985). El progreso hacia una planificación inteligente e integrada implicará la desaparición de las fronteras entre los tres tipos de planificación: la planificación de producción, de proceso y de operación (Ham et al., 1988).

Según T. C. Chang et al. (1985), teniendo en cuenta factores técnicos se pueden definir las funciones de cada tipo de planificación. Brevemente, la planificación de la producción (*scheduling*) se centra principalmente en la perspectiva global, tiene como objetivo dar respuesta a qué, cuándo, quién y dónde en un ambiente de producción, basándose en un tiempo adecuado de respuesta y en función de unos recursos disponibles. Tiene puntos importantes en común con las políticas estratégicas de empresa fuera del dominio técnico.

La finalidad de la planificación de procesos (macroplanificación según ElMaraghy (1993)) es seleccionar y definir, en detalle, el proceso que debe ser ejecutado a fin de transformar un material en bruto hasta llegar a una forma dada. El objetivo primario es definir procesos factibles. Coste y producción son objetivos secundarios, y los recursos disponibles actúan como restricciones. La secuenciación de operaciones forma parte, por lo tanto de la planificación de procesos, de manera que incluye la selección de: las máquinas (en función del proceso de conformado), los conjuntos de herramientas, los conjuntos de montajes, el número de operaciones de conformado y su secuencia.

La planificación de operaciones (microplanificación según ElMaraghy (1993)) se centra en un margen más estrecho que la planificación de procesos, estando más relacionada con las operaciones de fabricación y la definición de los parámetros de ejecución que con las piezas. El objetivo de este tipo de planificación es determinar los detalles de los parámetros que asegurarán la finalización sin problemas de las operaciones de fabricación planificadas. Una vez se planifica una operación para una pieza, se deben generar suficientes detalles de

carácter no ambiguo para que la pieza sea directamente fabricada en un sistema de producción específico.

Por consiguiente, para cualquiera de las tres planificaciones anteriores es válida la siguiente afirmación: cualquier planificación correcta y consistente requiere de dos factores importantes, por un lado del conocimiento del proceso de fabricación y por otro, de la experiencia que se tenga planificando y trabajando con un determinado proceso de fabricación.

En sus inicios, la planificación de procesos se vinculó principalmente a procesos de conformado por arranque de viruta y en la determinación de la mejor secuencia de operaciones para producir una pieza. Pero, hoy en día, la planificación de procesos abarca ya otros campos de aplicación. Dentro de los procesos de conformado de chapa constituyen dos buenas referencias las tesis desarrolladas en la Universidad de Twente por J. de Vries (1996), y Leo J. de Vin (1994). Ambos trabajos están relacionados con la planificación de procesos asistida por computador, en la integración de la planificación para piezas de chapa en lotes pequeños, el primer trabajo; y centrado en la elaboración de una secuencia de operaciones de piezas dobladas, el segundo.

2.1.3 Simulación y sistemas CAE para procesos de conformado de chapa

Varios autores (Kopp (1996), Lange (1997), Tekkaya (2000) y Pepelnjak et al. (2001)) reconocen que la simulación ha contribuido significativamente a mejorar la comprensión sobre los procesos de deformación de metal (en chapa y en masa), a acortar los procesos de diseño y los tiempos de desarrollo de las herramientas. En la actualidad, la práctica de las simulaciones de conformado por deformación se está llegando a convertir en una especie de experimentación virtual para sustituir los experimentos de prueba y error característicos de este tipo de procesos.

El profesor A. Erman Tekkaya (2000) en realiza un estado del arte de la simulación del conformado de chapa en el que se detalla una revisión histórica de la simulación numérica en el conformado de la chapa, así como una comparación entre la simulación para procesos de chapa y la simulación para procesos de deformación en masa, para acabar con una visión crítica sobre el estado actual de las herramientas de simulación y un intento de pronosticar futuras tendencias en este campo.

De este trabajo, pueden extraerse cuáles son los objetivos industriales de la simulación de los procesos de deformación. Resumiéndose en tres grupos principales:

1. *Reducción de tiempo*: revisión temprana de la productibilidad de las piezas de trabajo, reducción de los tiempos de desarrollo, reducción de los tiempos de prueba y respuesta rápida a los deseos de modificación.
2. *Reducción de costes*: productos más baratos, reducción de los costes de moldes y aumento de la fiabilidad.
3. *Aumento de la calidad del producto*: selección óptima del material de la pieza de trabajo, producción de piezas más complicadas, acumulación del saber-hacer para nuevos materiales, repetitividad del proceso y optimización por variantes.

Aparte de los objetivos y las ventajas que pueden conseguirse con el uso de la simulación, es importante hacer notar la amplia posibilidad de análisis que ofrecen diferentes herramientas, ya sean de simulación o algoritmos de optimización a diferentes niveles de comportamiento de material como recoge (Kopp, 1996) en la Tabla 2.1.

Nivel	Simulación	Optimización
Nivel 1, nivel macroscópico o integral	Flujo de material, Requerimiento de fuerza o trabajo	Diseño del plan de proceso, número óptimo de etapas de “forma”
Nivel 2, nivel mesoscópico o de mecánica continua	Deformaciones, Esfuerzos, Temperaturas locales	Distribución óptima de deformaciones y esfuerzos
Nivel 3, nivel microscópico o de física de los metales	Tamaño de grano, anisotropía, inicio del fallo, densidad de dislocación	Distribución de microestructura óptima

Tabla 2.1. Resumen comparativo del estado de la Simulación-Optimización con un enfoque de material multinivel (Kopp, 1996).

Simular cualquier fenómeno en un proceso de fabricación, en este caso en el de chapa, significa elaborar una representación del proceso por medio de un modelo físico o matemático que permita un análisis más sencillo, económico e inocuo que si se realizara sobre un modelo real. Las mayoría de las veces, esos modelos se convierten en los núcleos de determinados sistemas, mayoritariamente informáticos, que se pueden englobar bajo la denominación general de sistemas o herramientas *CAE* (*Computer Aided Engineering* o Ingeniería Asistida por Ordenador) que se utilizan para optimizar la fabricación y la productividad.

Los sistemas *CAE* en realidad se han ido desplegando hasta niveles aún más específicos, de manera que es habitual encontrar en la literatura el término *CA-X*, lo que se traduce por Asistencia por Computador sobre una determinada variable *X*, y por lo tanto *X* puede obtener diferentes valores, por ejemplo Mantenimiento, Montaje y Productibilidad entre otros. Otro ejemplo de sistema *CAE* (fuera de la denominación *CA-X*), de gran consideración y con gran implantación en el sector académico son los sistemas con formulación puramente matemática conocidos como sistemas *FEM* (*Finite Element Methods* o Métodos de Elementos Finitos) o *FEA* (*Finite Element Analysis* o Análisis de Elementos Finitos).

Los requerimientos que las herramientas de simulación deben cumplir, en correspondencia a los objetivos citados anteriormente son diversos y están relacionados con procesos y operaciones. Se espera que la herramienta de simulación sea capaz de modelar varios procesos y operaciones de deformación de chapa, una por una o incluso en combinaciones de operaciones. Los requisitos definidos en (Tekkaya, 2000) son:

1. *Entorno de usuario amigable.* Tema crítico para que la herramienta de simulación se aplique en la industria. La industria espera que el manejo del código sea simple, que no exista la necesidad de la figura extra del experto en la herramienta de simulación (en el caso de elementos finitos, por ejemplo). Además, la herramienta de simulación debe estar disponible allí donde sea necesaria, lo que se traduce como que pueda ser utilizada en la oficina de diseño no sólo en el departamento computacional de la empresa.
2. *Interfaz CAD-FEM-CAD.* El requerimiento ideal es que el modelo de las herramientas *CAD* (*Computer Aided Design* o Diseño Asistido por Ordenador) se pueda transferir fácilmente a un código *FEM* y que sólo las modificaciones geométricas ejecutadas durante el proceso de simulación de *FEM* puedan volver a transferirse al modelo *CAD* y desde allí al sistema *CAM* (*Computer Aided Manufacturing* o Fabricación Asistida por Ordenador).

3. *Eficiencia de simulación.* Dependiendo de la etapa del diseño y de la etapa de desarrollo de producto en la que se usa la herramienta de simulación no es deseable que se obtengan tiempos de computación o muy largos o muy diferentes entre sí.
4. *Salida de simulación.* El usuario quiere evaluar varios resultados numéricamente: distribución del grosor y de deformación en la chapa, rastros de determinados materiales como en los cordones de soldadura de piezas de partida confeccionadas, indicadores de fallo para arrugas, fractura, zonas de material suelto, datos post-fallo tal como número y amplitud de arrugas, forma óptima del desarrollo de partida, localización y posición de los cordones de estampado o embutido (*draw-beads*) y de los toques de parada (*draw-stops*), valor de recuperación (especialmente después de operaciones de matado de aristas y de doblado de dados deslizante), tensiones residuales en el producto final, rigidez o presión del pisador, condiciones de lubricación y cargas del punzón.
5. *Comportamiento del material.* La anisotropía inicial debida al proceso de laminación de la lámina es una característica típica del modelo de material requerido para la simulación del proceso de chapa. Recientemente, debido al aumento de precisión deseado, la anisotropía se tiene en cuenta en forma de modelos de endurecimiento cinemático.
6. *Precisión.* Generalmente el uso de las herramientas de simulación ha aumentado los requerimientos relacionados con la precisión. Especialmente se espera una elevada precisión para determinados fallos (mayor a un 20%) y para la recuperación angular.

En la actualidad, según Pepelnjak et al. (2001), la mayoría de las simulaciones que se realizan se centran en las siguientes cuestiones:

- Determinación de la geometría de la herramienta
- Determinación de la geometría final de la pieza y de las dimensiones de la pieza de partida.
- Determinación de la fuerzas de deformación y de soporte.
- Verificación de las operaciones de estampación (elección correcta de los pasos de deformación, problemas de desgarro y arrugas).
- Verificación de la geometría de producto (distribución del grosor, predicción de la recuperación y de las tensiones residuales)

Con la tecnología de producción convencional, una interacción temprana de alguno de los conceptos de productibilidad anteriores durante el diseño es muy difícil. Asimismo en la etapa de producción, desafortunadamente, no hay posibilidad de cambiar la geometría de una pieza, por lo que muchas veces parece lejano el poder conseguir el producto real óptimo. Pues bien, se ha demostrado que con el uso de la simulación se acortan los tiempos de desarrollo, se da una disminución en los costes y el producto final obtenido se acerca más al óptimo deseado. Por ejemplo, en muchos casos industriales se han podido omitir las variantes infructuosas del producto antes de que se produzcan las herramientas que permiten realizar prototipos o las herramientas para las series de la fase 0. Otro ejemplo cuantificado de las ventajas del uso de simulaciones (tipo *FEM*) en el ciclo de desarrollo del producto es la reducción del número de pruebas de prototipo requeridas (por ej. de 5 a 2) durante el precálculo del bruto de partida en el proceso de embutición.

Las herramientas de simulación, inicialmente, se utilizaron en un ambiente particularmente académico. La industria está interesada también en el uso de herramientas de simulación. Hay quien ((Pepelnjak et al., 2001)) incluso insinúa que los sistemas modernos para el desarrollo y la fabricación de nuevos productos, al estar fuertemente unidos a la demanda

de mercado, necesita una respuesta efectiva y rápida a esta necesidad, y por lo tanto la fase de concepto y de diseño de una pieza debe tener lugar en un ambiente *CA-X* virtual. En las últimas décadas, como se ha observado en los ejemplos anteriores, la simulación ha saltado del ámbito académico (donde se realizaron las primeras simulaciones de chapa) a su aplicación en el ámbito industrial (por fabricantes de matrices y diseñadores de proceso).

El salto de estas herramientas al sector industrial, implica considerar un nuevo perfil de usuario de aplicaciones de simulación. La herramienta ahora no sólo se utilizará por especialistas (de *FEM*, por ejemplo) sino que también por especialistas del proceso de conformado (en este estudio conformado de chapa) que necesita determinar y resolver las condiciones tecnológicas y mecánicas límite, bien sea de las herramientas, utillajes o piezas. Por este motivo, parece lógico pensar que se requerirán nuevas características en las herramientas de simulación e incluso desarrollar aplicaciones de simulación simplificadas para que se utilicen en fases conceptuales durante el diseño de producto.

En cuanto a los desarrollos futuros en el campo de la simulación de procesos de conformado de chapa, Tekkaya (2000) en su estado del arte indica concretamente el de las simulaciones de chapa mediante elementos finitos, que son: (i) Aumentar la precisión de análisis, (ii) aumentar las capacidades de análisis, (iii) desarrollar nuevas técnicas de visualización y (iv) mejorar la capacidad de optimización (durante el proceso de síntesis). Para los dos primeros puntos se requiere una mejora en el desarrollo y aplicación de nuevas ecuaciones constitutivas, criterios de fallo y modelos de fricción, pues tradicionalmente sólo se utilizan modelos de leyes de material con materiales formulados con métodos fenomenológicos, lo que no hace posible considerar cambios microestructurales especialmente durante procesos multietapa. Se reclaman simulaciones y algoritmos de optimización realistas y deben mejorarse también los cálculos de recuperación y tensiones residuales.

Además de estos desarrollos concretos, (Kopp, 1996), (Lange, 1997), (Tekkaya, 2000) y (Pepelnjak et al., 2001) coinciden en afirmar que existe un campo sinfín para la aplicación tecnológica sobre el estado actual de la investigación en simulación.

2.2 Tecnología de doblado

Una de las operaciones más comunes del trabajo de conformado del metal por deformación es el doblado. Esta operación no sólo se usa para producir piezas con rebordes, bucles y ondulaciones sino que también se usa para proporcionar rigidez a las piezas aumentando su momento de inercia (Kalpakjian, 1991).

El doblado, en sí mismo, sólo causa una deformación localizada si lo comparamos en oposición con los procesos de deformación en masa, como por ejemplo en una operación de forjado.

Según Beddoes (1999), conceptualmente el doblado de chapa es una operación sencilla que se ejecuta a menudo en una prensa. Normalmente los punzones y las matrices de la prensa tienen formas relativamente simples, pero con un diseño inteligente y múltiples operaciones incluso se pueden llegar a producir formas complejas.

Normalmente, con la operación de doblado de una chapa se persigue crear una superficie cilíndrica conectada a dos superficies planas. En la Figura 2.3 se presenta una geometría idealizada obtenida mediante un doblado.

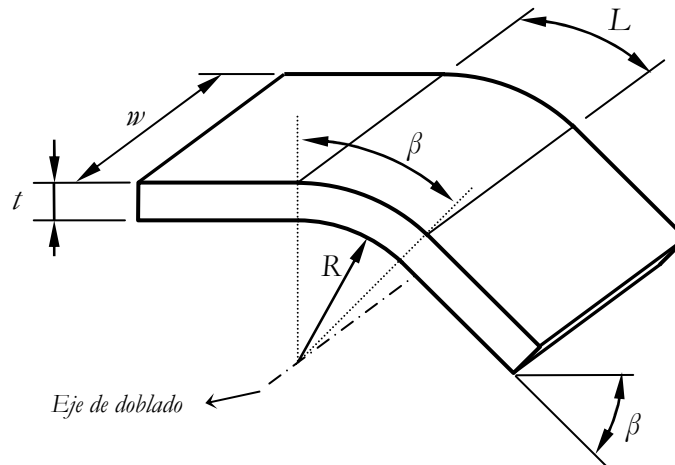


Figura 2.3. Representación de una chapa doblada ideal. Donde t es el grosor de la chapa, w el ancho de la chapa, L la longitud del arco doblado, R el radio de doblado (nótese que se ha definido el radio de doblado como el radio de doblado en la cara interior), y β es el ángulo de doblado final.

Sin embargo, la geometría real puede ser ligeramente distinta a la geometría ideal. Por ejemplo, como es mostrado en la Figura 2.4, la zona doblada puede tener una curvatura no constante, existir una pérdida de tangencia en las líneas de doblado u obtener diferentes ángulos de doblado en las caras exterior e interior.

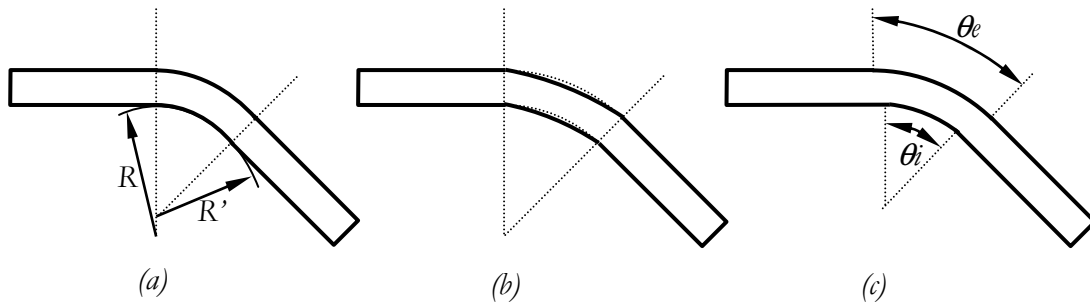


Figura 2.4. Representación algunos doblados no ideales: (a) curvatura no constante $R > R'$, (b) pérdida de tangencia en las líneas de doblado y (c) distinto ángulo de doblado en la cara exterior y interior.

Básicamente durante el doblado a la chapa se somete a un momento flector hasta que produce deformaciones plásticas en el metal. En una chapa sometida a flexión las caras más exteriores del material están en tracción y las más interiores en compresión. En la Figura 2.5 se puede observar la distribución de deformaciones y de tensiones a lo largo de una chapa sometida a flexión donde se ha producido plasticidad en las zonas más alejadas del plano medio.

Considerando un momento flector ideal, donde la línea neutra se sitúa en el plano medio de la chapa, la curvatura (k) que produce el doblado es igual al inverso del radio de la línea neutra

$$k = \frac{1}{\left(R + \frac{t}{2}\right)}, \quad (2.1)$$

donde R es el radio de doblado y t es el espesor de la chapa.

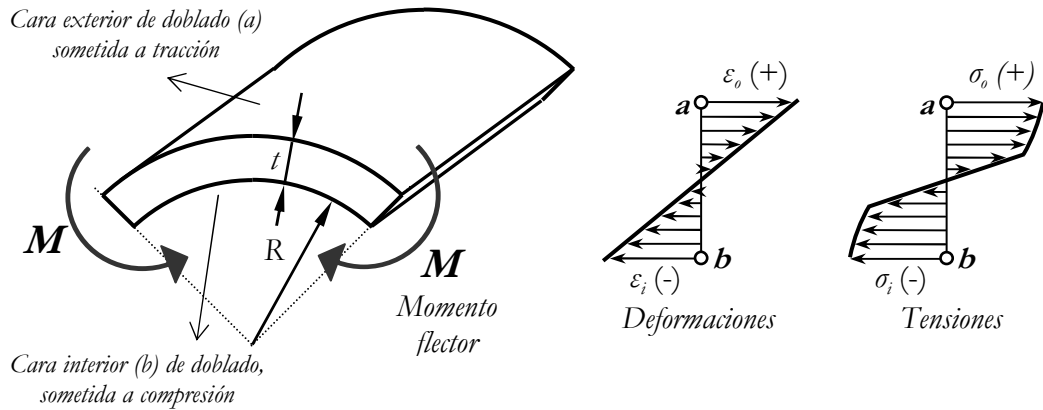


Figura 2.5. Situación de la cara exterior e interior de doblado según la dirección del momento. Distribución de deformaciones y tensiones a lo largo del grosor de la chapa, desde la cara exterior, *a*, hasta la cara interior *b*.

La deformación de un punto de la chapa es el producto de la curvatura por la distancia de este punto a la línea neutra. Luego, en una primera aproximación, se puede considerar que en el proceso de doblado las deformaciones que sufre la cara exterior (ϵ_o) y las que aparecen en la cara interior (ϵ_i) son iguales en magnitud y las proporciona la siguiente ecuación

$$\epsilon_o = \epsilon_i = \frac{1}{\left(\frac{2R}{t}\right) + 1} \quad (2.2)$$

La evidencia experimental indica que, aunque la ecuación se ajusta razonablemente bien para la cara más interior, los valores reales de ϵ_o son considerablemente mayores que los valores de ϵ_i . La razón de esta diferencia es el desplazamiento de la línea neutra hacia la superficie más interior debido a la propia curvatura que aparece en la chapa. Por esta misma razón las caras exteriores sufren una plastificación más amplia que las interiores. En consecuencia, la longitud de doblado es menor en la región más exterior que en la región más interior. La diferencia entre la deformación exterior e interior se hace más evidente cuando se producen doblados más agudos.

2.2.1 Doblado al aire y doblado a fondo

Teniendo en cuenta que el desarrollo de este trabajo gira alrededor de uno de los procesos de doblado tradicionales, el doblado al aire, es necesario definir de entre los procesos de doblado de chapa enunciados en la sección 2.1.1, los más significativos, que según Lange et al. (1985) son dos: el doblado al aire y el doblado en V o a fondo.

Existe además una estrecha relación entre ambos, pues el doblado al aire puede considerarse como el primer paso para obtener el doblado a fondo, como se describirá a continuación en una breve descripción de ambos procesos extraída de (Lange et al., 1985).

a) Doblado al aire

En el doblado al aire la función de la herramienta es meramente la de transmitir las fuerzas y los momentos a la pieza de trabajo. De hecho, en el doblado al aire prácticamente sólo se transmite un momento flector a la pieza, motivo por lo que se considera un doblado de momento puro.

Existen principalmente dos tipos de procesos de doblado al aire (Figura 2.6):

1. Doblado al aire en tres puntos, en el cuál la chapa se soporta entre dos apoyos en lados opuestos, un punzón la deforma posicionándose en la mitad del vano de la chapa.
2. Doblado al aire con dado deslizante, en el que una chapa sujeta a lo largo de una arista se dobla por un punzón que deforma la chapa a lo largo de la otra arista libre.

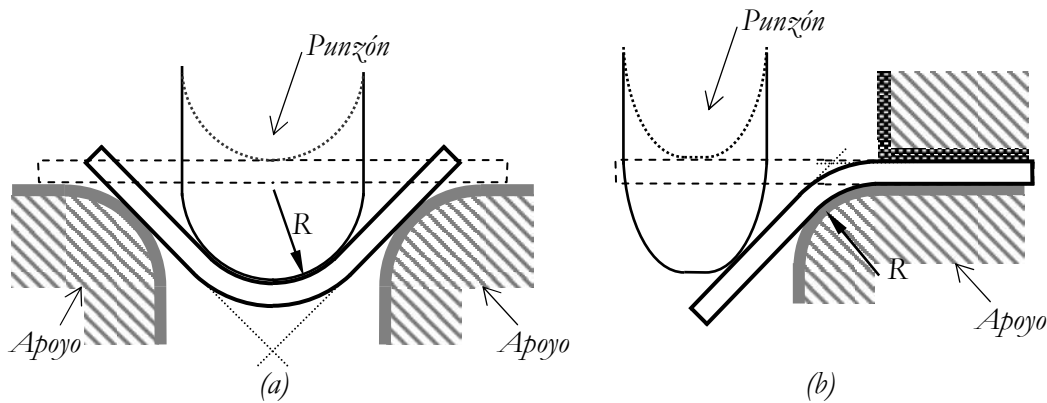


Figura 2.6. Esquema del (a) doblado al aire por tres puntos y (b) doblado al aire con dado deslizante.

El doblado al aire empieza en el momento en que el punzón establece contacto con la chapa, y se completa o cuando las alas de la pieza de trabajo son tangentes a las caras de la matriz o cuando el radio interno más pequeño de la pieza de trabajo se vuelve menor que el radio del punzón. En ambos casos la geometría de la herramienta afecta a la deformación posterior de la chapa. Al final del doblado al aire, la forma de la porción curvada de la chapa no está definida completamente. Pues, la chapa no se presiona completamente contra la matriz. La geometría de la herramienta imprime una pequeña información de forma, pues pueden producirse varios ángulos con la misma combinación de matriz y punzón sobre diferentes materiales y diferentes grosores, ajustando únicamente el desplazamiento del punzón. Este hecho convierte al doblado al aire en un proceso muy flexible y hace que se le considere también un proceso muy eficiente, pues la independencia del tipo de material y el ángulo a conseguir limita el número de cambios de herramienta. Finalmente, se requiere una fuerza de presión baja comparada con la del doblado a fondo. Por este motivo, las máquinas necesarias para este proceso son menos potentes.

En este tipo de doblado la forma final de la pieza de trabajo no es únicamente función de la geometría y de los componentes de la herramienta. También depende de la posición relativa de los componentes de la herramienta (punzón y apoyos) durante el proceso, de la curva característica del material de trabajo y del grosor de la chapa.

b) Doblado en V o a fondo

El doblado en matriz en V o a fondo implica el doblado de la chapa entre el punzón y la matriz hasta que la pieza de trabajo toma contacto con los lados de la matriz. Acuñar o tocar el fondo de la matriz, o sea, presionar la chapa plana contra los lados de la matriz, se produce como parte del mismo proceso. El proceso de doblado a fondo más importante es el doblado a fondo en forma de V, que a continuación se describe con más detalle, aunque también existen otros tipos de doblado a fondo, por ejemplo en forma de U.

El proceso de doblado en V o a fondo consta de dos etapas diferenciadas:

1. *Doblado al aire*: Doblado al aire en tres puntos tal como se ha descrito en el apartado anterior.

2. *Acuñación*: La acuñación tiene el propósito de quitar el efecto final que se produce en el doblado al aire, es decir, quitar la geometría no definida de la curvatura de la chapa forzándola a conformar la forma del sistema punzón-matriz. Después de completar el doblado al aire, la aplicación de la carga acaba en tres puntos y en dos caras de la matriz. En este momento, el ángulo de doblado exterior es el mismo que el de la matriz. Con el continuado movimiento vertical hacia abajo del punzón, los puntos de contacto chapa-matriz se mueven hacia la línea central de la matriz y la chapa tiende a cerrarse alrededor del punzón hasta que las alas establecen contacto con la matriz. La pieza de trabajo se sobredobla, y el ángulo de doblado externo sobrepasa el ángulo de la matriz. Mientras el punzón avanza más, la chapa se abre hacia arriba otra vez en las esquinas exteriores del punzón, y el ángulo de doblado se aproxima al ángulo de la matriz. También ocurre que el radio más interior de la curvatura de la chapa disminuye así como se va adaptando al punzón. El fenómeno descrito se aplica del mismo modo a operaciones que abarcan tanto radios de punzones pequeños como grandes.

El doblado en V o a fondo se ejecuta o en moldes cerrados, esto significa que el fondo de la matriz tiene un radio igual a la suma del radio del punzón más el espesor de la chapa; o en una matriz semicerrada, en la que el fondo de la matriz tiene un radio menor que el radio del punzón más el espesor de la chapa (típicamente la matriz tiene la forma de una V puntiaguda). Para el caso en que la curvatura interna de la pieza sea menor que la curvatura del punzón, no se podrá efectuar en matrices semicerradas, pues no se podrá causar la curvatura más interior de la chapa para que se amolde al punzón por acuñación.

En los procesos de doblado a fondo, el punzón presiona la chapa completamente contra la matriz. Como resultado, las características del doblado (ángulo y radio) están marcadas por la combinación matriz y punzón. Cada grosor de chapa, tipo de material y ángulo de doblado requieren una combinación diferente de punzón y matriz. Consecuentemente, se deben adquirir muchas herramientas. Este hecho provoca que el doblado a fondo sea económicamente adecuado sólo para lotes de gran tamaño.

2.2.2 Parámetros relacionados con el doblado

Las propiedades de las piezas dobladas que principalmente se consideran según Lange et al. (1985) son: las propiedades mecánicas, la calidad superficial, la precisión geométrica después del doblado, la recuperación y la deformación de arista.

En cuanto a los parámetros asociados al proceso, algunos autores ((Beddoes, 1999) y (Kalpakjian, 1991)) coinciden en considerar tres parámetros principales asociados al doblado pues estos parámetros relacionan propiedades mecánicas y cuestiones de precisión. Estos tres parámetros son: el radio de doblado mínimo, el ángulo de recuperación y la fuerza de doblado.

A continuación se muestra una amplia definición de estos tres parámetros y de dos parámetros más: la capacidad de doblado y la longitud de la chapa desplegada.

a) Radio de doblado mínimo y ratio R/t mínimo

Se llama radio de doblado mínimo al radio en el cual una grieta aparece en la superficie más exterior del doblado. El radio de doblado mínimo al que una pieza puede doblarse de manera segura se expresa habitualmente en función de su grosor, como por ejemplo $2t$, $3t$, $4t$, etc. El radio de doblado mínimo se determina tradicionalmente de manera experimental y está disponible como característica de la chapa en forma de tabla en varios manuales.

Durante el doblado el radio más exterior de la chapa está en tracción, mientras que el radio más interior está en compresión. El radio mínimo absoluto que puede formarse está limitado por la deformación real en el radio más exterior. Esta deformación no puede exceder la deformación de fractura de la chapa (Beddoes, 1999). Por ese motivo el fallo de la chapa ocurre cuando la deformación en la cara exterior alcanza la deformación de fractura ($\varepsilon_o = \varepsilon_f$). En la bibliografía básica existen relaciones semiempíricas que permiten determinar el radio de doblado mínimo, como las que se presenta a continuación.

Diferentes manuales de diseño de componentes de chapa proporcionan tablas que recogen rangos de radios mínimos de doblado recomendados para diferentes condiciones de materiales, que se han elaborado a partir de datos experimentales, tal como se indicaba al principio de este apartado. Puede observarse el carácter experimental de ello, en los datos de la Tabla 2.2, donde se identifica el material sencillamente por su condición de blando o duro.

Material	blando	duro
Aleaciones de Aluminio	0	$6t$
Cobre al berilio	0	$4t$
Latón, bajo plomo	0	$2t$
Magnesio	$5t$	$13t$
Aceros inoxidable austeníticos	$0.5t$	$6t$
Aceros bajo-carbono, baja aleación y alta resistencia-baja aleación (HSLA)	$0.5t$	$4t$
Titanio	$0.7t$	$3t$
Aleaciones de Titanio	$2.6t$	$4t$

Tabla 2.2. Radio Mínimo de doblado para diferentes materiales en función del espesor de la chapa a temperatura ambiente (Kalpakjian, 1991).

Dentro de esta línea se han llevado a cabo estudios para establecer una relación entre el ratio mínimo R/t y una propiedad mecánica del material dado. Uno de estos análisis se basa en las siguientes hipótesis (Kalpakjian, 1991):

1. La deformación real (ε_o) a la que aparece una grieta sobre el doblado de la fibra más exterior es igual a la deformación real de la fractura (ε_f) del material en un ensayo de tracción simple.
2. El material es homogéneo e isótropo.
3. La chapa se dobla en un estado de tensión plana, que sucede cuando la relación entre la longitud y el grosor (l/t) toma valores pequeños.

De la primera hipótesis,

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) = \ln\left(\frac{1}{1 - A_r}\right), \quad (2.3)$$

donde A_r es el cociente entre el área de reducción en el ensayo de tracción y el área transversal inicial de la probeta. Admitiendo una relación exponencial entre deformaciones se puede obtener la relación

$$\varepsilon_0 = \ln(1 + e_o) \quad (2.4)$$

Para el doblado de momento puro de una chapa en deformación plana, la deformación real de la fibra más exterior se iguala a la deformación de fractura real en tracción simple. Con ello la deformación máxima admisible del material puede relacionarse con el radio de doblado mínimo que admite la pieza doblada cuando se asuma que la fibra neutra coincide con la fibra media como

$$\varepsilon_f = \varepsilon_0 = \ln \left(\frac{R_{\min} + t}{R_{\min} + \frac{t}{2}} \right), \quad (2.5)$$

donde t es el grosor de la chapa y R_{\min} el radio de doblado mínimo.

Usando la relación entre reducción del área en el ensayo a tracción del material (2.3) y la deformación real en la fractura (2.5) se obtiene la siguiente expresión

$$R_{\min} = t \left(\frac{1}{2A_r} - 1 \right), \quad (2.6)$$

Donde se observa que el radio mínimo depende del grosor de la pieza t y de el área de reducción en el ensayo de tracción A_r . Según esta expresión el radio mínimo se aproxima a cero, lo que indica una capacidad de doblado completa o el material puede doblarse sobre si mismo, cuando la reducción del área a tracción es del 50%.

La principal hipótesis detrás de la ecuación (2.6) es que el eje neutro permanece en la mitad del grosor durante la operación de doblado, lo que sólo es justificable para materiales con una reducción de área en fallo mayor a un 20%. Por lo tanto, la relación anterior tiende a ser válida para reducciones de área menores al 20% ($A_r < 0,2$). Cuando la fibra neutra se desplaza desde el centro de la chapa la siguiente relación mejorada puede emplearse, para materiales dúctiles,

$$R_{\min} = t \frac{(1 - A_r)^2}{2A_r - A_r^2} - 1 \quad (2.7)$$

La relación entre el radio de doblado mínimo posible y la deformación en el radio exterior ($\varepsilon_{o,b}$) en una chapa a flexión se puede escribir como

$$R_{\min} = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{o,b}} - 1 \right) = c \cdot t, \quad (2.8)$$

donde se puede definir el parámetro c como un factor de curvatura admisible.

Como se puede observar estas ecuaciones establecen el radio mínimo como función del grosor de la chapa. Dada la íntima relación entre el radio de doblado mínimo y el espesor se puede redefinir este parámetro característico como la relación entre el radio mínimo de doblado y el espesor (R/t), al que llamaremos ratio R/t mínimo. La definición de este ratio está íntimamente relacionada con el radio de doblado mínimo y, por lo tanto, determina del mismo modo la capacidad de doblado de una pieza.

Por eso las expresiones anteriores se pueden rescribir como

$$\left(\frac{R}{t}\right)_{\min} = \frac{1}{2 \cdot A_r} - 1 \quad (2.9)$$

y para reducciones de área mayores al 20% como

$$\left(\frac{R}{t}\right)_{\min} = \frac{(1 - A_r)^2}{2A_r - A_r^2} - 1 \quad (2.10)$$

b) Recuperación

La recuperación es el movimiento que sufre una pieza doblada para recuperar su posición y forma original una vez se ha retirado la carga que ha producido la deformación. El fenómeno de la recuperación (se le conoce también como restitución o *springback*) es una de las dificultades que deben considerarse durante las operaciones de doblado especialmente. Aunque puede presentarse en otros procesos de deformación de chapa como es la embutición.

Este movimiento de recuperación es debido a que todos los materiales tienen un módulo de elasticidad finito. Consiguientemente, a la deformación plástica le sigue siempre una recuperación elástica una vez se retira la carga. Este restablecimiento o recuperación suele cuantificarse con dos variables, o bien con el ángulo de recuperación, o bien con un factor de recuperación.

Se considera estado final aquel en el que la carga se ha dejado de ejercer sobre la chapa, por lo tanto y según Kalpakjian (1991) el ángulo final de doblado (β_f), después de la recuperación, es menor que el inicial (β_i) y el radio final de doblado (R_f) es mayor que el radio de doblado en el estado de carga (R_i), lo que se traduce en imprecisiones dimensionales en la pieza final (Figura 2.7).

$$\beta_f < \beta_i ; R_f > R_i \quad (2.11)$$

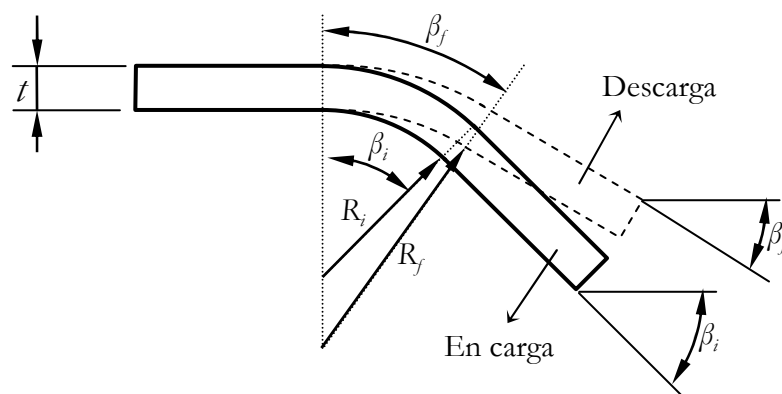


Figura 2.7. Recuperación o *Springback* durante el proceso de doblado. Fuente: (Kalpakjian, 1991)

Aunque se puede pretender eliminar la recuperación (hito imposible pues la descarga siempre provocará una mayor o menor recuperación), en la práctica, lo que se hace es compensarla usando varias técnicas. Las técnicas de compensación de la recuperación mayormente utilizadas ((Kalpakjian, 1991) y (Committee under ASM direction, 1988)) se describen en los tres primeros puntos. A continuación se ha añadido otras técnicas que permiten reducir la recuperación:

1. *Sobredoblar* la pieza en la matriz hasta un ángulo mayor que el deseado (aproximadamente el número de grados de recuperación) en la misma matriz en la

que se realiza el doblado. El sobredoblado puede conseguirse también mediante una técnica de doblado rotatorio. La matriz superior tiene un balancín cilíndrico (con ángulo de 90°) y está libre para rotar; mientras se dirige hacia abajo, la chapa se sujeta y dobla por el balancín sobre la matriz más baja (yunque de matriz). Un ángulo de relieve en la matriz más baja permite sobredoblar la chapa al final de la carrera, por lo tanto compensando la recuperación.

2. *Acuñar* la región doblada por sujeción, para que los esfuerzos de compresión queden altamente localizados entre la punta del punzón y la superficie de la matriz (asegurando una deformación plástica), usando, a veces, matrices diseñadas especialmente para ello. Esta técnica también se conoce como doblado a fondo. Si se realiza en una prensa mecánica necesita controlarse cuidadosamente pues este tipo de prensas pueden ejecutar fuerzas muy elevadas; si se realiza sobre matrices especiales se debe controlar un adelgazamiento del grosor excesivo que podría causar o el fallo de la pieza mientras se dobla o el fallo de la pieza en servicio.

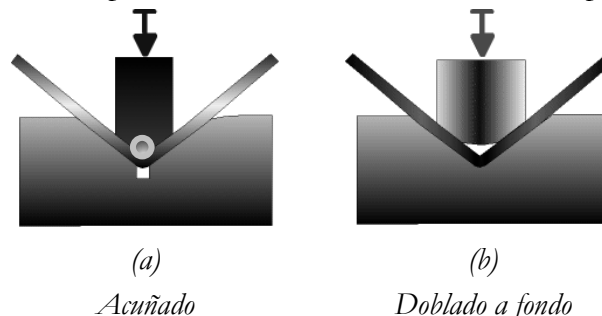


Figura 2.8 Compensación de la recuperación (a) Acuñado, donde se aplican unos esfuerzos de compresión en la zona doblada. (b) El proceso de doblado a fondo, donde se fija la posición final de la chapa de manera el espacio entre el punzón y la matriz es menor que el grosor de la chapa.

Fuente: (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, 2004)

3. *Doblado por estiramiento*, en la que la pieza se sujeta traccionada mientras se dobla. El momento de doblado requerido para deformar la chapa plásticamente se reducirá mientras la tracción combinada en la chapa aumenta, debido al doblado de las fibras más exteriores y de la tracción aplicada. Por lo tanto la recuperación, que es un resultado de las tensiones no uniformes debido al doblado, también disminuirá. Esta técnica se usa para limitar la recuperación en el conformado por estiramiento de los cuerpos de elevada profundidad en los automóviles.
4. *Regolpear (restriking)* la pieza en la matriz original o con utillajes especiales para reducir la recuperación hasta un nivel más bajo. Requiere una operación adicional pero puede llevar consigo poco o ningún equipamiento adicional, siendo una técnica igual de efectiva que el sobredoblado (Wang et al., 1993).
5. Como la recuperación disminuye mientras disminuye la tensión de fluencia – todos los demás parámetros siguen siendo los mismos – el *doblado debe ejecutarse a temperaturas elevadas* para reducir la recuperación.
6. Incluso a veces, la recuperación de un doblado puede usarse para compensar aquella que se produce en otro. Relacionado con este principio y mayormente usada para doblados en U, se define lo que se conoce como técnica *de doblado doble (doubled-bend technique)* ((Chou et al., 1999) y (Shu et al., 1996)) en la que el extremo se dobla dos veces en situaciones diferentes con un juego de matriz reducido (Wang et al., 1993).

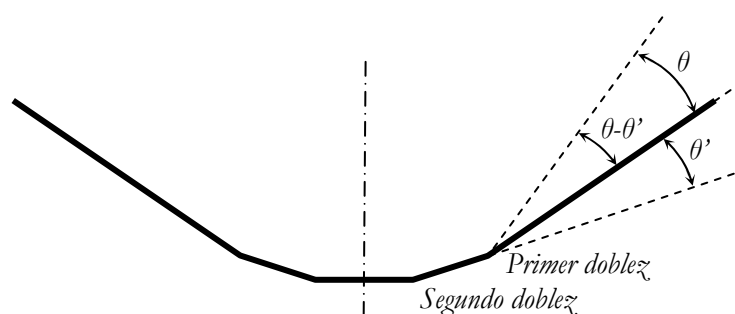


Figura 2.9 Técnica de doble doblado (*doubled-bend technique*)

Recuperación negativa

Bajo ciertas condiciones es posible que se produzca lo que se conoce como recuperación negativa o *springforward or negative springback*. En ausencia del calificativo siempre consideraremos la recuperación como positiva la definida anteriormente. La recuperación negativa ocurre cuando el ángulo final de doblado es mayor una vez se ha descargado la pieza. Este fenómeno generalmente se asocia al doblado a fondo en V ((Kalpakjian, 1991) y (Tekiner, 2004)) .

$$\beta_f > \beta_i ; R_i < R_f \quad (2.12)$$

El desarrollo de la recuperación negativa puede explicarse observando la secuencia de deformación en el proceso de doblado a fondo de un espécimen de alambre que recoge Kalpakjian (1991). La pieza se dobla al aire, que como ya se ha descrito forma parte del doblado a fondo. Si en este momento se quitara la carga, la pieza experimentaría una recuperación positiva. Una vez la pieza doblada empieza a estar entre el punzón y la matriz en situación de doblado a fondo, se definen dos fases: una fase inicial en la que el extremo de la pieza está tocando el punzón y otra fase final del doblado a fondo, en la que la pieza está doblada a fondo y se adapta completamente al espacio existente entre el punzón y la matriz. Entre estas dos etapas la pieza, de hecho, se está doblando en dirección opuesta a aquella que ha tenido lugar durante el doblado al aire.

Hay que notar la falta de conformidad entre el radio del punzón y el radio más interior de la pieza entre el momento final del doblado al aire o inicio de la fase inicial del doblado a fondo. En la fase final del doblado a fondo sin embargo, los radios son los mismos.

Tras la descarga, la pieza en la etapa final del doblado a fondo recuperará en su interior porque ha estado enderezándose desde la etapa inicial del doblado a fondo, en la punta del punzón y en los brazos de la pieza. Esta recuperación interior (negativa) puede ser mayor que la recuperación positiva a causa de las grandes deformaciones que el material ha experimentado en el área de doblado.

c) Fuerza de doblado

La fuerza de doblado es la carga que se ejerce sobre la pieza a doblar mediante el punzón, y se traduce en momento de doblado. Las fuerzas de doblado pueden estimarse asumiendo que el proceso es el doblado simple (flexión pura) de una viga rectangular de espesor y ancho constante. De manera que la fuerza de doblado es función tanto de la resistencia del material, como de las condiciones geométricas de la sección rectangular (la longitud de doblado y el grosor de la pieza) y de la obertura de la matriz. Excluyendo la fricción, la expresión general para la fuerza máxima de doblado F es:

$$F = k \frac{lt^2 S_{ut}}{w_d} \quad (2.13)$$

donde l es la longitud de doblado, t es el grosor de la chapa, w_d obertura de la matriz, S_{ut} es el esfuerzo de tracción último, y finalmente el valor k , un factor geométrico de la matriz. La ecuación (2.13) se ajusta bien a las situaciones en las que el radio del punzón y el grosor de la chapa son pequeños en comparación a la obertura de la matriz (Kalpakjian, 1991).

El factor k toma valores entre 1.2 y 1.33 para la matriz en forma V. Los valores de k para el doblado con dado deslizante y en matrices en U están entre 0.25 y 2 veces los valores de k para matriz en V, según Kalpakjian (1991). Otros estudios consideran un único valor de k para cada tipo de doblado (Beddoes, 1999), igual a 0.33 para el doblado en dado deslizante o un valor igual a 0.66 para doblado en matriz en U, que ambos están dentro del intervalo establecido por Kalpakjian (1991). El efecto de varios factores sobre la fuerza de doblado, como por ejemplo la fricción, puede incluirse en el factor k .

Durante el proceso de doblado, la fuerza de doblado varía en función del desplazamiento del punzón. Kalpakjian (1991) y de Vin (1994) describen que el desplazamiento aumenta desde cero hasta un valor máximo y debe decrecer cuando el doblado se ha completado. Mientras que en el doblado al aire o doblado libre, la fuerza de doblado no aumenta otra vez después de que empieza a decrecer (ver Figura 2.10). En el caso del doblado a fondo, la fuerza aumenta acusadamente mientras el punzón llega al fondo de la matriz. Tan pronto como la pieza de trabajo empieza a contactar con los lados de la matriz, la fuerza progresa sujeta a las restricciones impuestas por la matriz. Mientras los puntos de contacto entre la matriz y la chapa se mueven hacia el fondo de la matriz, el brazo de momento efectivo se reduce, lo que provoca que la fuerza crezca rápidamente.

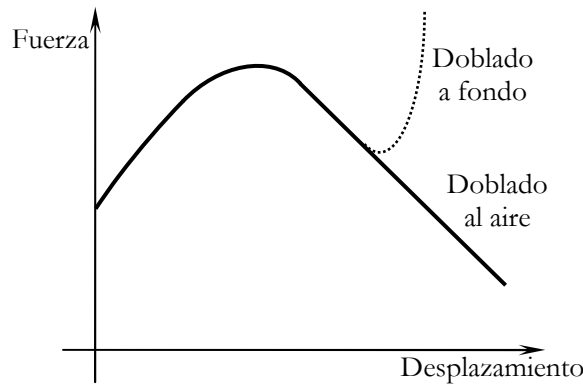


Figura 2.10. Ejemplo de un diagrama Fuerza de proceso – Desplazamiento de punzón para el doblado al aire y el doblado a fondo. Fuente:(de Vin, 1994)

Este crecimiento mientras la chapa se presiona contra el fondo de la matriz durante la acuñación, aumenta incluso en una proporción más pronunciada y se vuelve infinita. Para punzones con ratios radio de punzón-ancho de matriz suficientemente pequeños, se alcanza un pico en la fuerza de doblado al aire. Si el radio de punzón aumenta, y el pico de fuerza en el doblado al aire aumenta en magnitud y cambia a desplazamientos de punzón mayores, la fuerza máxima en la etapa de doblado al aire de un doblado en V o a fondo al final se pierde. La finalización del proceso de doblado al aire antes de que el pico de fuerza pueda alcanzarse causa el efecto anterior. La magnitud de la fuerza de doblado aplicada durante la acuñación depende de la precisión requerida de la pieza acabada (por ejemplo el radio y el ángulo).

d) Capacidad de doblado

Los parámetros anteriormente definidos, ayudan a hacerse una idea de la capacidad de doblado o *bendability* de una pieza. La capacidad de doblado de un amplio rango de materiales se relacionó con éxito con el porcentaje área de reducción, A_r , obtenido en un ensayo de tracción uniaxial (Lange et al., 1985). De ahí que los dos parámetros principales, radio de doblado mínimo y ratio R/t mínimo, que se utilizan para determinar esta capacidad de doblado sean función de la variable A_r . Si el valor de A_r aumenta, o bien por la aportación de calor o bien por la aplicación de presión hidrostática, la capacidad de doblado de un metal puede aumentarse. También se pueden emplear otras técnicas para aumentar el entorno de compresión en el doblado, tales como aplicar fuerzas de compresión en el plano de la chapa durante el doblado para minimizar las tensiones de tracción en las fibras más exteriores del área de doblado.

Para valores elevados de R/t , en chapas estrechas, longitud de doblado pequeña, se agrietan en las aristas. En cambio, en chapas más anchas se agrietan en el centro, donde la tensión biaxial que aparece es más alta.

La capacidad de doblado también depende de las condiciones de arista de la chapa que se está doblando. Las aristas irregulares son puntos de concentración de tensión y la capacidad de doblado disminuye cuando la irregularidad de la arista aumenta. Otro factor importante que facilita el agrietamiento de aristas es la cantidad y forma de las inclusiones en la chapa metálica. Las inclusiones en forma de columnas son más perjudiciales que las inclusiones en forma globular. Por ese motivo, la anisotropía de la chapa también es importante para la capacidad de doblado. También es significativo para la capacidad de doblado es la cantidad de trabajo en frío que las aristas pueden soportar durante el corte por cizalla (*shearing*). Además, la eliminación de las regiones trabajadas en frío, por desbarbado (*shaving*), mecanización o tratamiento térmico, mejoran enormemente la resistencia al agrietamiento de aristas durante el doblado.

e) Longitud de desarrollo inicial de la chapa o Longitud de chapa desplegada. Tolerancia o corrección de longitud de doblado

La longitud de chapa desplegada o longitud de desarrollo inicial de la chapa (L_0) es la longitud de partida (chapa plana) que debe cumplir la chapa para que después de su deformación, mediante el proceso de doblado, la pieza final cumpla las dimensiones de diseño especificadas. El punto crítico de la determinación de esta longitud se halla en el cálculo, en las zonas dobladas que sufren la deformación, de la longitud de la capa que no presenta ni deformación por tracción ni por compresión. La longitud por tanto de la línea neutra.

Al principio del proceso de doblado, existe una capa neutra en la mitad del grosor de la chapa (coincide la capa neutra (R_n) con la capa media inicial (R_{m0})). La situación cambia durante el proceso de doblado. Las capas sufren un desplazamiento mientras el proceso de doblado se ejecuta. Como resultado, las capas con deformaciones iguales a cero y las tensiones iguales a cero no coincidirán nunca más en una chapa doblada.

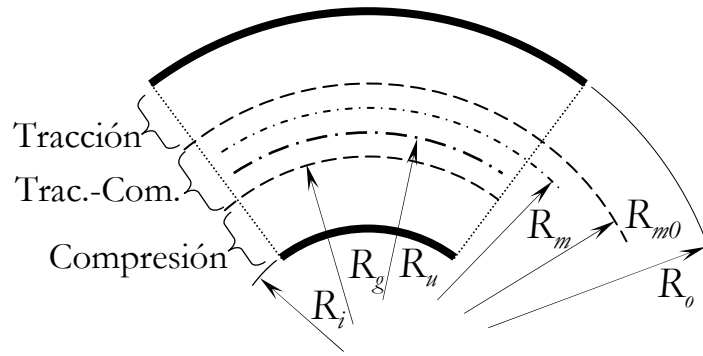


Figura 2.11. Radios característicos de una chapa doblada (de Vin, 1994) y (Dadras et al., 1982)

Para reflejar la situación anterior, algunas de los radios característicos de una chapa doblada se muestran en la Figura 2.11. El material entre el radio exterior (R_u) y la capa inicial media (R_{m0}) han sido sometidos a tracción durante el doblado. El material entre R_{m0} y R_g , primero, se ha comprimido y posteriormente se ha traccionado, de modo que el efecto Bauschinger puede aparecer en esta zona. La deformación total final de la capa indicada por R_u es igual a cero, se observa que se desplaza desde la situación inicial donde coincidía con R_{m0} y no está en la capa media con carga final (R_m). El material entre R_g y R_i se ha comprimido durante el proceso de doblado.

Suponiendo que el grosor de la chapa permanece constante, la longitud de una capa con deformación total igual a cero (por lo tanto, la longitud de la línea neutra en R_u) se puede calcular. La derivada relativa de la longitud, dL/L_m (L_m es la longitud de la capa media), aumenta mientras el ratio entre el radio de doblado y el grosor de la chapa, (R_m/t), disminuye. Sin embargo, el grosor de la chapa no se mantiene constante sino que disminuye cuando la chapa se endurece por deformación. Este efecto se vuelve más fuerte para aumentar el endurecimiento por deformación y disminuir el ratio R_m/t . Toda esta situación comporta que el cálculo de la longitud neutra y en consecuencia de la longitud desplegada de la chapa sea complicado.

Finalmente, para realizar un cálculo aproximado de esta longitud se asumen hipótesis. No existen modelos analíticos para calcularla en el caso de que los radio de doblado sean pequeños, donde tales hipótesis no se cumplen, como ocurre en los productos industriales. Así pues, su cálculo se basa en datos experimentales o en estándares como los que proporcionan los estándares ASM en (Committee under ASM direction, 1988) o DIN en (DIN, 1975). Ambos estándares hacen uso de unas ecuaciones con las que calcular un factor de corrección basado en datos experimentales.

El estándar ASM usa:

$$L_u = [t \cdot p + R_i] \cdot 0.01745 \cdot \beta \quad (2.14)$$

con

$$p = \frac{R_i}{t} \cdot 0.04 + 0.3 \quad \text{para } \frac{R_i}{t} < 1$$

$$p = \left[\frac{R_i}{t} - 1 \right] + 0.06 + 0.34 \quad \text{para } \frac{R_i}{t} \geq 1 \quad (2.15)$$

Donde β está en grados, R_i , t y L_u son los que se muestran en la Figura 2.12 (a).

Para el estándar DIN se usan las siguientes ecuaciones para el acero:

$$L_o = a + b + v, \quad v = \pi \cdot \left(\frac{180 - \alpha}{180} \right) \cdot \left(R_i + \frac{1}{2}t + k \right) - 2 \cdot (R_i + t) \quad (2.16)$$

$$k = 0.65 + 0.5 \cdot \log\left(\frac{R_i}{t}\right) \quad \text{notar que } R_u = R_i + \frac{k \cdot t}{2}$$

Con α en grados y a , b , R_i y t se muestran en la Figura 2.12 (b). L_o es la longitud total de la chapa desplegada.

Se propone que $R_i = R_m$ cuando el ratio R_i/t es grande. De acuerdo al estándar DIN esto sucede cuando el ratio R_i/t es mayor que 5 o más, mientras que de acuerdo al estándar ASM el ratio 3.67 es suficiente.

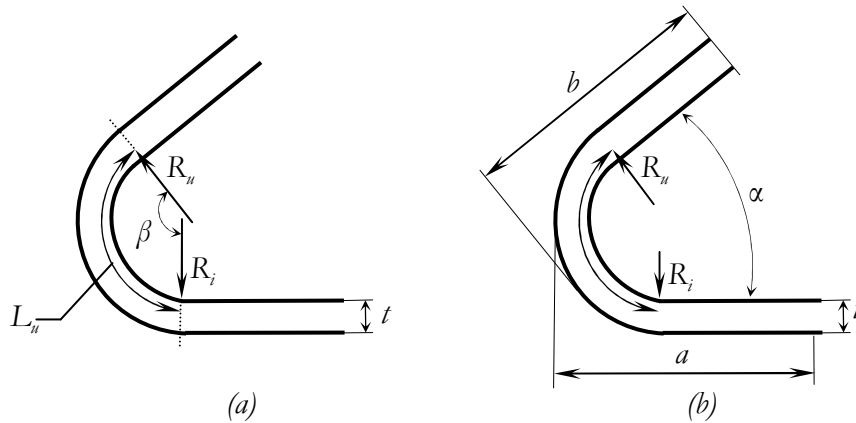


Figura 2.12. Longitud del arco en la capa neutra según el estándar: (a) ASM o (b) DIN.

Un método parecido al estándar DIN, permite calcular la longitud desplegada de la chapa, L_o , sumando a las partes rectas lo que se llama *bending allowance* o tolerancia o corrección de longitud de doblado, que para determinados ángulos y materiales se puede encontrar tabulada en diferentes manuales, por ejemplo en (Society of Manufacturing Engineers et al., 1976) y (Committee under ASM direction, 1988).

2.3 Doblado al aire

La característica principal del doblado al aire es que sólo una pequeña información de la forma final de la pieza doblada está incluida en la geometría del punzón y la matriz. De hecho las herramientas tienen como principal tarea la de transmitir la fuerza que proporciona la prensa. Algunas características de la herramienta que influyen significativamente son el radio punzón y la amplitud de obertura de la matriz. De hecho la principal tarea de la herramienta es transmitir la fuerza que le proporciona el carnero de la prensa no definir la geometría final. En el doblado al aire, tanto las características del material y como el desplazamiento del punzón determinan el ángulo del producto antes y después de recuperación así como su radio de curvatura. El desplazamiento del punzón se calcula como la distancia que recorre desde la posición donde el punzón toca a la chapa plana hasta que termina el proceso de doblado. De manera resumida las ventajas más importantes del doblado al aire son la variedad de ángulos que pueden obtenerse con un número mínimo de punzones y matrices, y el requerimiento de una capacidad (fuerza en la máquina) pequeña. Esto unido a un buen control de la geometría final obtenida y la compensación de la recuperación hacen del doblado al aire un proceso poco costoso y flexible.

A continuación se expondrá con más detalle las características del equipamiento necesario para realizar el proceso de doblado al aire.

2.3.1 Equipamiento para el doblado al aire

Las prensas (*press brakes*) son las máquinas herramienta utilizadas en operaciones de doblado a fondo y al aire. La estructura de las prensas de doblado es una deformación de la prensa habitual con el objetivo de poder doblar piezas de longitudes mayores.

Las exigencias de los clientes hacia la industria de la chapa causaron un aumento en el esfuerzo de desarrollo de este tipo de maquinaria que implicó una mejora en el rendimiento de este tipo de prensas. Por ello, los procesos de trabajo con prensa reciben mayor atención y son ampliamente usados por las industrias que trabajan el metal (Jagirdar et al., 2001), (Perduijn et al., 1995).

El herramental o herramientas de doblado que se montan en una prensa (ya sea manual o automática) constan de un punzón y una matriz, por ese motivo, muchas veces se hace referencia a ellas como conjunto o juego matriz-punzón.

Las matrices más comunes son las matrices que tienen más de una ranura en V (Figura 2.13 *a* y *b*), lo que provoca una falta de rigidez en las mismas. Esta falta de rigidez puede tener una influencia negativa en la precisión de la pieza doblado, ya que puede tener una influencia sobre la fuerza del proceso, y ésta sobre el desplazamiento del punzón. Por este motivo en la actualidad existe una tendencia a utilizar matrices con una única ranura en V (de Vin, 1994).

En lo que respecta a los punzones, normalmente tienen una sección simple, algunas veces con una parte cóncava para evitar colisiones. Existe una variedad extensa de punzones en el mercado. Se trata de los punzones llamados de “cuello de ganso” (Figura 2.13 *c* y *d*), son los menos comunes, y se suelen usar con propósitos especiales, particularmente para configuraciones de producto en forma de U. La mayoría de los fabricantes de prensas tienen sus propios adaptadores para los punzones de doblado al aire. Consecuentemente, raramente existe estandarización y las herramientas pueden montarse solamente en las mismas máquinas del fabricante o mediante el diseño de utillajes especiales para su montaje.

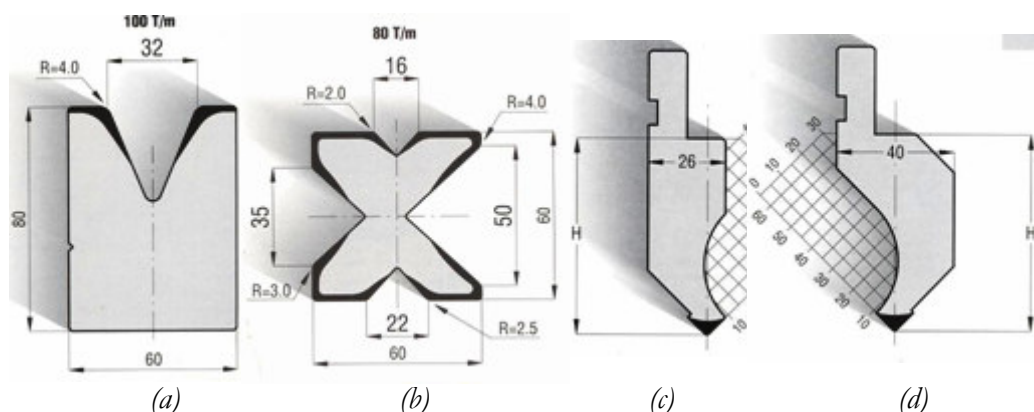


Figura 2.13 Secciones de matrices y de punzones de cuello de ganso. Fuente: Catálogo MECOS, Utillajes de plegadora

Actualmente en el mercado, existe una amplia disponibilidad de herramientas modulares para el doblado al aire. Lo que significa que los punzones y matrices que se suministran

pueden tener diferentes longitudes. Esta característica supone una ventaja cuando son necesarias longitudes de herramienta no disponibles directamente del catálogo, pues pueden obtenerse como una combinación de montaje, del mismo juego punzón-matriz, sobre la prensa. Cuando se requieren diferentes conjuntos punzón-matriz para doblar un componente, se pueden montar sobre la prensa en diferentes posiciones.

Las herramientas modernas ofrecen la ventaja de posicionamiento automático, lo que reduce significativamente los tiempos de cambio, ya que no es necesario retirar las herramientas de las posiciones laterales para el intercambio de herramientas en posiciones medias. Además, este tipo de configuración ofrece la posibilidad de automatizar el cambio de herramientas con la ayuda de robots.

En las prensas modernas controladas numéricamente es habitual tener una configuración donde dos pistones hidráulicos paralelos proporcionan el desplazamiento de la corredera (*ram*). La fuerza y la velocidad del pistón pueden ajustarse en función del tipo de material de la chapa y de su grosor para prevenir la distorsión del material. El control de posición del pistón es muy importante tanto en prensas de doblado manuales como en las automática, porque una pequeña desviación en el desplazamiento del pistón puede dar como resultado una desviación (*deflection*) grande, que aún es más visible en el caso de productos largos. Una característica importante de las prensas de control numérico es el control numérico del desplazamiento del punzón. Esta característica es muy importante de cara al uso de estas prensas para proceso de doblado al aire, donde el desplazamiento del punzón es el parámetro de ejecución del proceso, pues el ángulo antes de la recuperación no se determina por el ángulo de la matriz.

Las prensas modernas también tienen posicionadores de chapa (*finger stops*), que proporcionan un posicionamiento horizontal de los productos y que pueden estar controlados también por el control numérico (CN). Estos posicionadores pueden estar en una o dos direcciones horizontalmente, y algunas veces también en dirección vertical. En este sentido, el número de posibilidades para posicionar el material aumenta, con lo cual se puede potenciar el doblado al aire preciso.

2.3.2 Aspectos geométricos del doblado al aire

En el doblado al aire, como se ha comentado anteriormente, una chapa se dobla en una prensa mediante un punzón y una matriz. Sin embargo, el punzón no baja completamente, sino que baja usualmente hasta una posición precalculada del punzón (penetración del punzón). Esto permite producir dobleces que tienen ángulos diferentes con un único conjunto de herramientas.

Por lo tanto, los aspectos geométricos juegan un rol importante en el doblado al aire. Estos pueden analizarse desde dos puntos de vista: el del herramental y de la chapa.

Bajo el punto de vista del herramental, el impacto de éste sobre el proceso de doblado al aire es menor que en el doblado a fondo donde la geometría de las herramientas puede tener un efecto considerable. En general la geometría del herramental se establece por tres parámetros: el ancho de la matriz (w_d), el radio de la matriz (r_d) y el radio del punzón (r_p).

El ancho de la matriz (w_d) es un parámetro importante pues determina la longitud de la chapa que se usará para convertir la fuerza del punzón en momento de doblado. Por consiguiente, el ancho de matriz tiene una influencia extremadamente importante sobre el desplazamiento del punzón y sobre la corrección de longitud. Hecho que en (Mentink et al., 2003) permite plantear a los autores la duda sobre si el cálculo de la corrección de longitud realizada por el estándar ASM tiene en cuenta el parámetro del ancho de matriz.

Los valores de los parámetros que definen las herramientas de doblado son suministrados por los fabricantes de matrices y punzones. Su valor no es constante, pues son susceptibles de cambio debido a la deformación plástica y al desgaste que se produce en ellas debido a un uso extenso. El desgaste de las herramientas tiene una importancia considerable en los dos parámetros restante: el desgaste del radio de la matriz (r_d) tiene influencia sobre el radio el desplazamiento del punzón y en el cálculo de la corrección de longitud. El deterioro del radio del punzón (r_p) también puede cambiar a lo largo del tiempo. La influencia del radio del punzón sobre la penetración del punzón y sobre la corrección de longitud es mayor que la que proporciona el radio de la matriz (r_d). Aunque si se compara con la influencia del ancho de la matriz, incluso se puede despreciar.

Bajo el punto de vista de la chapa el parámetro geométrico más importante es su grosor (t), aunque también se considera la amplitud de la chapa (w).

2.3.3 Propiedades del material en el doblado al aire

Mientras que los parámetros geométricos anteriores pueden determinarse de una manera relativamente sencilla, la captura del comportamiento del material requiere el uso de un modelo de material. Pues es un aspecto importante en la comprensión del proceso de doblado.

a) Comportamiento modelado del material

Existen varios modelos para describir el comportamiento de material, pero a pesar de ello, algunos fenómenos son difíciles de modelar.

El modelado del comportamiento del material en la conformación de chapa se describe principalmente por su relación tensión-deformación. Una representación gráfica de esta relación se muestra en los siguientes diagramas esfuerzo-deformación de la Figura 2.14: (1) Rígido-ideal plástico, (2) Elástico-ideal plástico, (3) Elástico-endurecimiento por deformación lineal, (4) Endurecimiento por deformación, según Nadai, (5) Rígido - Endurecimiento por deformación, (6) Curva real material dúctil.

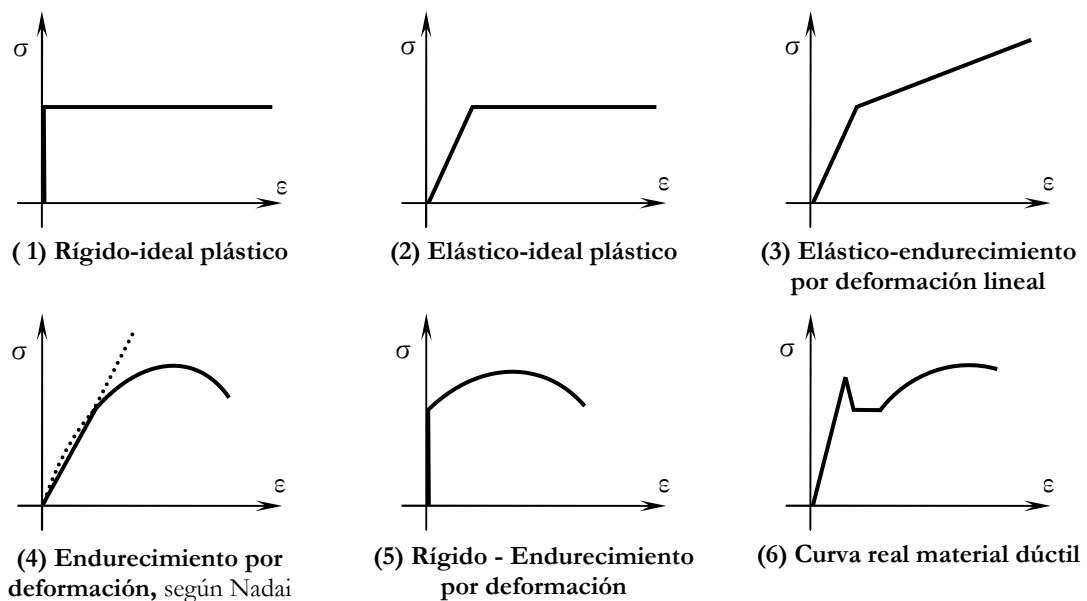


Figura 2.14. Diagramas esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$)

Estas relaciones tensión-deformación que se han presentado son las más comunes para describir el comportamiento material en modelos analíticos. Cada material se adapta a un

tipo de relación tensión-deformación mejor que a otro, aunque a veces se realicen simplificaciones de comportamiento, pues resulta más sencillo modelarlo analíticamente.

En los diagramas pueden distinguirse dos regiones: una región elástica y otra plástica.

En el diagrama (1) de esfuerzo-deformación se representa un material rígido-ideal plástico, no existe ni endurecimiento por deformación ni región elástica. Un modelo simple como el anterior puede usarse como una referencia para describir los efectos de una región elástica o de un endurecimiento de trabajo (*work hardening*). Un material sin endurecimiento por deformación, pero con una región elástica se representa en el diagrama (2). Este modelo por ejemplo puede usarse para estimaciones bastas de la recuperación.

En el caso de endurecimiento por deformación, el diagrama tensión-deformación puede suele representarse mediante las dos aproximaciones más comunes. La que considera un endurecimiento por deformación lineal, diagrama (3), o la que considera el endurecimiento por deformación potencial según Nadai, diagrama (4).

Algunos materiales muestran un área sin endurecimiento por deformación en el comienzo de su región plástica. Este efecto habitualmente se omite en los modelos analíticos. El comportamiento del material sin una región elástica pero con un endurecimiento por deformación, se ilustra en el diagrama (5). Tales relaciones esfuerzo-deformación pueden ser útiles en aplicaciones para las cuales los efectos elásticos son menos importantes, por ejemplo la predicción de las fuerzas de proceso.

b) Parámetros del material y su influencia en el doblado al aire

Como se ha comentado, es necesario adoptar un modelo material para caracterizar el comportamiento del material bajo estudio. Sería conveniente adoptar un único modelo material que cubriera la mayor parte de los materiales técnicos. Esta afirmación implicaría que los modelos que se basan en un comportamiento únicamente elástico o únicamente plástico, o en una combinación de comportamiento elástico lineal y plástico lineal no podrían considerarse. Pero en realidad acaban utilizándose, pues de determinadas circunstancias determinar los parámetros que los modelan se convierte en un trabajo más laborioso, y es posible aceptar determinadas simplificaciones.

A pesar de ello, se puede asumir un modelo general para el doblado al aire, que se ajusta al diagrama (4) de la Figura 2.14, donde podemos distinguir tres zonas (Figura 2.15): una zona elástica lineal, una región de transición elástico-plástica y finalmente otra con endurecimiento por deformación.

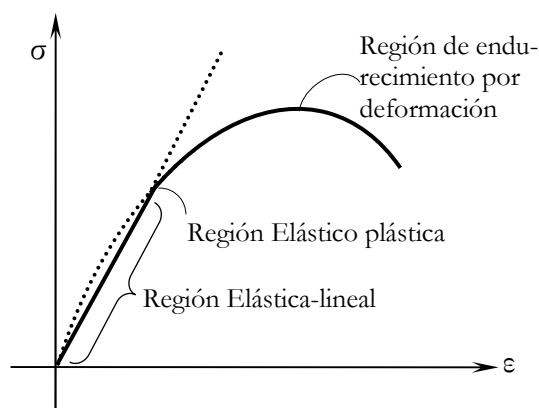


Figura 2.15. Comportamiento de material asumido para el doblado al aire

Se discutirá a continuación los parámetros principales del material en cada zona del diagrama anterior y su influencia sobre el proceso de doblado.

Zona Elástica lineal

Módulo de Elasticidad (E). En la etapa inicial del proceso de doblado, las fuerzas que se imponen mediante el punzón son demasiado pequeñas como para causar la deformación plástica de la chapa. Consecuentemente, no existiría deformación si el punzón se retirara durante esta etapa. La cantidad de deformación elástica que se produce cuando la fuerza del punzón es pequeña está relacionada con este parámetro del material.

Zona Elástico plástica

Esfuerzo de fluencia (S_y). La transición entre la deformación elástica y la deformación plástica se caracteriza en un punto de transición que está relacionado con el esfuerzo de fluencia del material. En las regiones donde los esfuerzos exceden el esfuerzo de fluencia, localizadas en la superficie de la chapa, la deformación plástica se produce primero, y el modelo material aplicable cambia de comportamiento, de elástico a plástico.

Zona con Endurecimiento por deformación

Parámetros Ludwik-Nadai. Los parámetros Ludwik-Nadai se utilizan para definir la relación tensión-deformación durante la deformación plástica del material. Estos parámetros los podemos encontrar en la relación Ludwik-Nadai (2.17) o en la ecuación de Swift (2.18) (a veces referida como Ludwik-Nadai ampliada).

$$\sigma = C\epsilon^n \quad (2.17)$$

$$\sigma_x = C(\epsilon_o + \epsilon_x)^n \quad (2.18)$$

Es costoso encontrar una expresión para ϵ_0 que sea suficientemente precisa para justificar su uso, por lo que en la práctica este término se omite (Mentink et al., 2003). La ecuación supone idéntico comportamiento para deformaciones positivas y negativas, lo que en realidad no es creíble. Sin embargo, como cuantificar la diferencia también es difícil, se supone simétrico respecto a la línea neutra.

Módulo de elasticidad en recuperación. Se trata de un módulo de elasticidad reducido. de Vin (1994), de Vin et al. (1996) y Mentink et al. (2003) recogen el hecho que el módulo de elasticidad (E) de un material se asume habitualmente como una constante (independientemente del hecho de que haya que modificarlo, por ejemplo en el caso de deformación plana). Sin embargo, puede decrecer substancialmente (sobre un 16%, según algunos experimentos en chapa de acero) bajo deformación plástica. Como resultado, la recuperación aumenta, como se puede observar en la Figura 2.16. Se le llama módulo de elasticidad en recuperación, pues está sujeto a la situación de descarga.

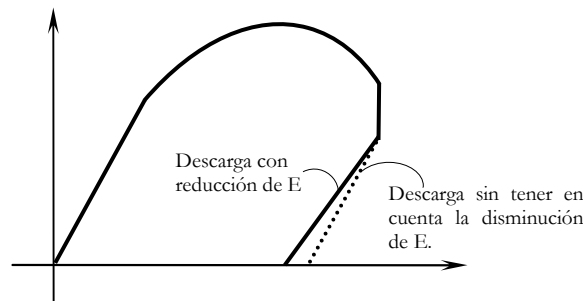


Figura 2.16. Efecto de la disminución del módulo elástico durante la descarga.

No obstante, los investigadores anteriores también indican que el tiempo requerido para que este efecto se produzca es muy grande, lo que no juega un papel determinante en los procesos de doblado en situaciones de producción.

Anisotropía. En un material, las propiedades pueden cambiar su valor dependiendo de la dirección en la que la propiedad sea determinada, a este fenómeno se le conoce como anisotropía. Durante la última operación de conformado de la chapa, normalmente el rolado en frío, se fuerza a los cristales de metal a una determinada predeformación. Debido a esto, el material muestra una orientación de cristales llamada textura de rolado. La orientación del cristal causa distintos resultados en el ensayo a tracción en distintas direcciones. Luego, está claro que los efectos de la anisotropía son mucho mayor en láminas de chapa conformadas en frío que aquellas tratadas térmicamente de material recristalizado, en las que todos los cristales tienen orientación aleatoria. La anisotropía se expresa por medio del ratio de deformación plástica Γ . Más importante en el doblado de chapa es el fenómeno en el que el ratio Γ puede diferir en diferentes direcciones: la llamada anisotropía planar. Como resultado, el comportamiento material depende de la orientación de la línea de doblado con respecto a la dirección de rolado de la chapa.

Efecto Bauschinger. No sólo la dirección de rolado en una chapa es importante en los experimentos a tracción, la dirección de la fuerza que se aplica sobre el espécimen de ensayo también juega un rol importante. En general, la curva de flujo depende del camino de deformación seguido. Este efecto, conocido como *Efecto Bauschinger* significa que el espécimen de ensayo no tiene el mismo comportamiento a compresión que a tracción. Este efecto está causado por la predeformación del material debido al rolado frío, pues los cristales se alargan en la dirección de rolado y deformaciones residuales permanecen en el material después del conformado. Lo que el *efecto Bauschinger* implica es que para una elongación posterior de un espécimen ya traccionado, se requiere una fuerza mayor que para la compresión del mismo espécimen.

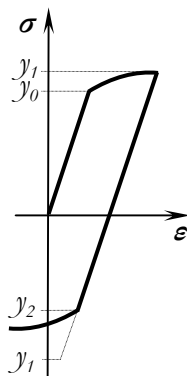


Figura 2.17. Efecto *Bauschinger* donde la fluencia en tracción y compresión no coinciden

Este fenómeno ocurre en el lado comprimido durante el doblado, ya que mientras una chapa se produzca mediante el rolado significa que ha sido traccionada con anterioridad durante esa operación. Este fenómeno puede diferir en importancia y no siempre tiene una influencia en los procesos de doblado. Sin embargo, puede que resulte difícil determinar los valores de material correctos de los parámetros relevantes que caractericen al *efecto Bauschinger*. Esta situación de omisión del *efecto Bauschinger* se aplica especialmente a ambientes de producción debido a la carencia de equipos de prueba y de tiempo.

Otros Parámetros

Fricción. Un aspecto importante del proceso de doblado, que no puede relacionarse con el mero comportamiento del material es la fricción. Durante el proceso, las fuerzas de fricción crece en dos localizaciones: el contacto entre la chapa y le punzón, y entre la chapa y la matriz. Desde un punto de vista cinemático, la primera fuerza de fricción es muy difícil de

probar. La fricción entre la chapa y la matriz a menudo se modela de acuerdo con la fuerza de fricción que proporciona la ley de Coulomb, en la que la fuerza de fricción es igual a la fuerza normal multiplicada por un coeficiente de fricción. Aunque el coeficiente de fricción no es un parámetro que se mantenga constante, se suele tomar una media como valor.

c) Consideraciones sobre el modelado de material

Uno de los mayores problemas en el cálculo de parámetros de proceso es que resulta difícil estimar los valores de los parámetros relevantes del material explicados en la sección anterior. El experimento más común para determinar los parámetros del material (obtención de la curva tensión-deformación) es el ensayo de tracción uniaxial. Este ensayo tiene dos inconvenientes: por un lado, la situación de deformación del ensayo difiere de la situación de deformación en la que sucede el conformado de la chapa (de Vin, 1994), por lo que no serían aplicables directamente sobre modelos de doblado (Mentink et al., 2003). Y por otro, el ratio de deformación que sucede en el doblado de una chapa es normalmente mayor que el ratio máximo en un ensayo de tracción uniaxial (diagrama (6) en la Figura 2.14). El ensayo de cortante de Miyauchi es una alternativa al ensayo a tracción pues permite unos ratios mayores de deformación, pero se usa menos comúnmente.

A pesar de definir modelos de material para describir el comportamiento del material durante el proceso, el uso de tales modelos incorpora dos tipos de problemas.

Por un lado, un modelo material es una representación idealizada del comportamiento real del material. Por lo tanto, por definición una aproximación puede ser más o menos precisa. Y dependiendo del tipo de material, diferentes modelos de material pueden aplicarse, lo que tiene como inconveniente que cada modelo tiene sus propios parámetros y serán diferentes entre ellos.

Por otro lado está la determinación de los valores de tales parámetros. En los ambientes de producción esto normalmente produce dificultades, pues a menudo el equipamiento con el que realizar los ensayos no está disponible. Consecuentemente, las entradas de los modelos de proceso para el proceso de doblado al aire, se tienen que basar en los valores proporcionados por los fabricantes de las chapas, o por los valores de estándares o de certificados de material. Sin embargo, estos valores nunca son exactos, pero representan unos rangos entre los cuales un determinado parámetro puede variar. Esto indudablemente representa una gran incertidumbre en los resultados obtenidos a partir del modelo del proceso que se haya decidido usar.

2.3.4 Parámetros del proceso y problemas de precisión relacionados

En la actualidad, la exigencia de una alta calidad y repetitibilidad del producto se han añadido a los requerimientos del mercado existentes, además de la flexibilidad, la eficiencia y la efectividad. Es precisamente la repetitibilidad del producto, el requerimiento más difícil de alcanzar en el caso de doblado al aire. Las variaciones en las propiedades mecánicas del material en el interior de la chapa, las desviaciones en los grosores y el conjunto matriz-punzón son los que tienen una influencia muy importante sobre la falta de precisión en la geometría final obtenida. Ya sea sobre el ángulo final de doblado como en las dimensiones finales de la pieza.

En la industria de fabricación de chapa en pequeños lotes, el doblado al aire es el proceso de fabricación más crítico debido a las desviaciones de producto originadas. Justamente estas desviaciones en las operaciones de doblado al aire son las principales causantes del rechazo de producto.

En el pasado, el doblado al aire se consideraba incorrectamente un proceso sin complicaciones (de Vin, 2000). De hecho, en (Lange et al., 1985) se afirma que el doblado al aire no tiene importancia comercial y su estudio está limitado a estudios experimentales. Sin embargo, estudios más recientes (Wang et al., 1993) indican que al principio de la década de los 90 en una industria tecnológicamente puntera como la industria aeroespacial, más del 90% de las piezas de chapa se realizaban mediante el doblado al aire.

En los procesos industriales de doblado, el fallo o ruptura durante el proceso sólo se encuentra en chapas de alta resistencia, menos dúctiles. El problema mayor reside en el control de la forma de la pieza doblada. El ángulo al que la chapa se dobla en la máquina, ya se ha comentado que se determina por la matriz y los ajustes que puedan hacerse a las herramientas. Pero todas las piezas presentan algo de recuperación después de la descarga y eso depende de la forma de la matriz, de la fricción y de la resistencia del material (Marciniak, 1992). Gardiner (1957) considera que en la mayoría de las operaciones de chapa no se requiere la corrección de la recuperación, pero que existe un ahorro de tiempo de desarrollo de herramientas en aquellos casos en los que la recuperación es grande y acumulativa.

Luego, para modelar el proceso o la operación de doblado es necesario conocer el proceso y que el mayor número de variables sean identificadas claramente (de Vin, 2000) y (Livatyali et al., 2001). En la siguiente Tabla 2.3 se recogen los que se consideran los parámetros más importantes del doblado al aire y sobre qué variables ejercen su influencia.

Parámetros importantes en el de doblado al aire	
Variable	Influencia sobre
Grosor de la chapa , t	directa sobre el ángulo de doblado(β), radio final de doblado (R)
Propiedades y comportamiento del material ($E, \nu, \sigma, \varepsilon$, etc.)	ángulo de doblado (β), radio final de doblado (R), longitud de doblado desplegada (L_d)
Radio de punzón (r_p)	ángulo de doblado (β), radio final de doblado (R)
Desplazamiento/ penetración del punzón (Z)	ángulo de doblado (β), radio final de doblado (R)

Tabla 2.3. Parámetros importantes en el proceso de doblado al aire

Como ya se ha comentado, un problema del doblado al aire es su sensibilidad inherente a variaciones en el grosor de la chapa y al comportamiento del material. Si se compara con la mecanización, las desviaciones de las dimensiones nominales de la pieza de partida durante el mecanizado pueden ser corregidas por ejemplo en el punto de comienzo programado para el primer corte de desbaste. Asimismo, las variaciones de las propiedades del material en mecanización por lo general sólo significan que no se usan los valores más económicos para los parámetros de corte. Pero en el doblado al aire esas variaciones pueden afectar directamente a la precisión del producto a través de errores en el ángulo de doblado o en el cálculo incorrecto de la tolerancia o *allowance* de doblado (para poder calcular la longitud de desarrollo inicial de la chapa) (de Vin, 2001).

En el doblado al aire, sólo una pequeña información de forma está incluida en la geometría de las herramientas, aún así otro parámetro importante sobre la pieza acabada es el radio de

doblado de la pieza final y su determinación. Ya que en el doblado al aire se puede tener un radio de doblado que es mayor al radio de punzón, o sea, el radio de doblado producido no es necesariamente igual al radio de la herramienta.

Otro factor importante en la tecnología de doblado al aire es el cálculo del desplazamiento del punzón, el cual determina el ángulo de doblado realizado, pues se debe recordar que el comportamiento típico de la chapa metálica es la recuperación después de retirar la fuerza que ejerce el punzón. El sobredoblado, por ejemplo, es la aplicación intencionada de un desplazamiento mayor del punzón para compensar esa recuperación. Para el proceso de doblado al aire, la matriz se diseña para que sea suficientemente profunda y permita el sobredoblado mediante el golpe de punzón pero no para que tenga lugar el doblado a fondo o el re-golpeo de la pieza (Wang et al., 1993).

Un último factor que cabe resaltar en la tecnología de doblado al aire es el cálculo de las longitudes del doblado desplegadas. La longitud de los dobleces en el estado inicial (chapa desplegada) no es igual que en el estado doblado, esto es resultado de la deformación plástica del material. En el cálculo de esta longitud es donde la tolerancia de doblado, anteriormente mencionada, debe considerarse.

2.3.5 Modelos de doblado y Control adaptativo

A principio de los años 90, el doblado al aire en prensa de componentes de chapa ganó popularidad en la industria como una alternativa al doblado a fondo. En reconocimiento a su potencial para el control numérico de doblado y de una necesidad reducida en los cambios de herramienta. Sin embargo a finales de los 90, ocurrió algo notable. Uno podría esperar que la mejora de modelos de procesos y una experiencia mayor en el proceso implicara un crecimiento popular de la implementación del proceso de doblado al aire. En cambio, algunas empresas volvieron al doblado a fondo, otras empezaron a utilizar reglas de selección de herramientas (que a menudo parecen combinar los inconvenientes del doblado a fondo y del doblado al aire) y otras pusieron sus esfuerzos económicos en el control adaptativo o *control in-process* (de Vin, 2001). Existen, claro, muchas empresas que aplican el doblado al aire con éxito (donde el factor experiencia es clave), pero las tendencias anteriormente mencionadas indican que parece haber un problema con el doblado al aire.

En muchos casos, el problema subyacente es el menosprecio de la complejidad del proceso de doblado al aire. Pues el doblado al aire puede parecer decepcionantemente simple. Se considera incorrectamente un proceso sin complicaciones. Por consiguiente, los conocimientos disponibles no se utilizan completamente, ya que la necesidad de hacerlo no se reconoce.

Todo lo expuesto permite afirmar que se necesita una mejor comprensión del proceso del doblado al aire. De manera que las líneas generales de investigación en la tecnología de doblado al aire no se dirigen hacia la mejora de la eficiencia del proceso de doblado al aire (tiempos y costes), como ocurre en el caso de los procesos por arranque de viruta. Esta situación, subraya la importancia de la investigación en la tecnología de doblado al aire (de Vries, 1996). Por este motivo, el progreso en el conocimiento del proceso de doblado al aire se plasma principalmente en dos tipos diferentes de investigaciones: los modelos de doblado y el control adaptativo.

a) Modelos de doblado

El primer enfoque hacia el uso del conocimiento de doblado en la práctica, se realiza a través de los modelos de proceso. Basándose en un análisis del proceso, se genera una relación entre un número de parámetros que caracterizan el proceso y una variable objetiva

o requerida, como por ejemplo: el desplazamiento del punzón requerido, el ángulo de doblado final, corrección de longitud o la curvatura final de la pieza.

Los modelos básicos sobre el doblado al aire (por ejemplo los modelos rígido-plásticos) se apoyan solamente sobre la geometría de la chapa y de las herramientas para calcular la penetración del punzón. Modelos más elaborados tienen en cuenta el comportamiento del material, como se verá con más detalle en el punto 3.2.4. Otro enfoque se basa en aplicar el análisis de elementos finitos al proceso de doblado (apartado 3.3), en este caso, se tiene en cuenta la geometría y el comportamiento del material.

Por norma general, se puede establecer que la pericia de los modelos probablemente es la de aumentar con el número de parámetros que se tienen en cuenta. Por ejemplo, un modelo que pueda manejar la anisotropía, la fricción y el efecto *Bauschinger* tiene ventaja comparado con otros modelos. Sin embargo, la calidad de los resultados de un modelo nunca puede exceder a la calidad de sus entradas. O en otras palabras, un modelo simple con entradas adecuadas es preferible a un modelo con más parámetros que no pueden determinarse de manera precisa.

b) Control adaptativo del proceso (*In-process Control*)

Para evitar el problema descrito en el apartado anterior, relacionado con la precisión de los datos de entrada a los modelos, se pueden tomar determinadas características del doblado durante el ciclo de conformado en planta. Un análisis detallado para ajustar estas variables de entrada (que son de naturaleza probabilística) y realizar los ajustes *on-line* se convierte en una tarea difícil, el tiempo real de la cual es muy superior al del propio ciclo de conformado. El análisis detallado pasa a ser un análisis basado en procedimientos prueba-error que se convierten en una pérdida de material de partida y de tiempo de máquina (Chandra, 1987).

Gracias a este procedimiento de tomar datos de las características del ciclo de doblado, los resultados de un modelo de doblado pueden ser corregidos durante el mismo ciclo de doblado. Este control adaptativo de prensa ha sido tema de investigación desde principio de los años 80, (Chandra, 1987), hasta la actualidad, (Hsu et al., 2002). Sin embargo, la investigación no ha dado resultados que puedan aplicarse en la industria, debido al hecho de que la mayoría de los métodos requiere el uso o de sensores vulnerables en el entorno industrial o su montaje significa obstáculos al uso normal de las prensas. Otros motivos de importancia para que no se obtuvieran los resultados esperados pueden ser el amplio procesamiento de datos o el modelado no cuidadoso e impreciso del proceso. El objetivo de este tipo de control (bajo la perspectiva de recuperación, por ejemplo) es producir el primer producto al ángulo correcto. En el ámbito de doblado también puede aplicarse a la predicción de la curvatura ((de Vin, 2000)).

Los métodos del control adaptativo pueden dividirse en dos grupos principales. El primer grupo consta de los métodos que se basan en la medición del ángulo, mientras que el otro grupo de métodos se basan en el análisis de la curva del proceso (datos fuerza-desplazamiento) o de datos *in-process*.

Control adaptativo basado en la medición del ángulo

Cuando el objetivo del control adaptativo es obtener ángulos de doblado precisos, parece obvio ensayar el control adaptativo basado en la medición del ángulo. Los métodos que usan la medición del ángulo o crean una relación ángulo-desplazamiento del punzón, de la que se puede extrapolar un desplazamiento del punzón corregido, o meramente ejecutan una versión automática del procedimiento de prueba y error (Mentink et al., 2003) y (Chandra, 1987).

En la práctica, la medición continua del ángulo no es una opción factible. Aunque técnicamente es posible, en un entorno industrial aumentaríamos los tiempos de procesado del doblado, imponiendo restricciones innecesarias sobre secuencias de doblado, y probablemente sólo sería posible para un rango limitado de productos. Por este motivo, estos métodos se basan normalmente en una medición al final del ciclo de doblado, después de que un nuevo valor para la penetración del punzón sea calculado. Primero, se calcula un valor seguro de la penetración del punzón y se baja el punzón a esa posición. El siguiente paso, es medir el ángulo resultado. Esto puede hacerse mecánicamente con una sonda, un disco graduado o sin contacto mediante una cámara o un sensor láser. Sin embargo, estos procedimientos proporcionan solamente el ángulo bajo condiciones de carga. Para que sea posible calcular la penetración del punzón, el ángulo de recuperación también tiene que calcularse. Por eso, a menudo se usa un ciclo de descarga parcial, pues una descarga completa no sería posible pues la chapa se liberaría de la prensa, quedando libre sobre la matriz. Una descarga parcial requiere una medición de la fuerza sobre una distancia de recorrido del punzón muy pequeña, de la que ya se sabe que no es siempre muy precisa. Por otro lado, desde que se estableció que las relaciones entre la supresión del punzón, el ángulo de recuperación y la reducción de la fuerza no son lineales, la extrapolación del valor obtenido se vuelve incluso aún más difícil.

Después de lo expuesto, es importante pues reconocer que el ángulo de doblado debe medirse después de la descarga a fin de obtener el ángulo de producto deseado. Y en consecuencia la recuperación no puede explicarse adecuadamente mediante este método de control adaptativo, lo que es una seria limitación de los métodos que sólo realizan medidas de ángulo.

Control adaptativo basado en el análisis de datos *in-process*

En realidad se recogen los datos fuerza y desplazamiento durante el ciclo de doblado, gracias a un sensor que se integra o en la prensa o en el adaptador de las herramientas o incluso en la misma herramienta. Esta relación puede compararse con la relación obtenida mediante un modelo de doblado, desde el cual los resultados de los modelos se corrigen.

A partir de los datos fuerza-desplazamiento hay quién determina las propiedades del material (Mentink et al., 2003) pues es imposible predecir directamente la recuperación a partir de ellos. O quién de la relación fuerza-desplazamiento y mediante unas fórmulas matemáticas obtiene la relación momento-curvatura (de Vin, 2000), que por ejemplo, es menos problemática para predecir la recuperación y permite construir las condiciones de carga sobre la chapa.

El uso de un método u otro a veces depende de si encaja o no con el objetivo perseguido. Para el caso de la recuperación, también parece una buena opción, realizar una combinación de los dos tipos de mediciones, lo que podría llevar a un control de prensa adaptativo funcional.

Últimas tendencias en el control adaptativo

Tradicionalmente la comparación que propone este tipo de control *in-process* se ha implementado a través de algoritmos, en principio para ser usados *on-line* (Chandra, 1987). Esto último añade una característica de rapidez de análisis al control, que se ha visto fuertemente apoyada por el espectacular progreso en el campo de la computación y de los ordenadores que sigue dándose. Los algoritmos (basados en modelos analíticos, o en la propia experimentación) y en consecuencia el control adaptativo, han dado cabida a otro tipo de estimaciones que proporcionan las técnicas de inteligencia artificial como los sistemas basados en el conocimiento, sistemas inteligentes híbridos o las redes neurales,

siendo estas últimas merecedoras de un apartado propio en este estudio, concretamente el apartado 3.4.

A pesar de las mejoras introducidas a lo largo de los años, por la modelación y el control del proceso de doblado al aire, el proceso ha seguido presentando algunos problemas. Entre ellos, la pequeña aplicabilidad de algunos de los modelos desarrollados o la aplicación del control adaptativo sin tener un conocimiento profundo sobre el proceso (de Vin, 2000), pues uno no es substitutivo del otro. Como alternativas a estos dos problemas, se tiende a utilizar modelos de doblado adecuados junto con el control adaptativo pues permiten prevenir errores irreversibles tales como el sobredoblado, evitar la interpretación errónea de datos y acelerar su procesamiento.

2.4 Recuperación o *Springback*

En el apartado 2.2.2 Parámetros relacionados con el doblado, ya se introdujo el término recuperación o *springback* como uno de los parámetros principales asociados al proceso de doblado y que es a la vez, uno de los factores fundamentales que afectan la calidad de un componente estampado. La recuperación se define como el movimiento que se produce en una pieza para intentar recuperar su posición original después de una operación de deformación, mayoritariamente una operación de doblado.

El doblado es una operación que se usa comúnmente en la fabricación de un número importante de piezas de chapa. Muchas operaciones de conformado por deformación implican el doblado - al aire, a fondo, etc. - de materiales ferrosos y no ferrosos, de chapas de diferentes grosores, de barras con cualquier tipo de sección y de alambres que se utilizan para dar forma a piezas que posteriormente se montarán. Luego, el que se produzca recuperación incontrolada en los dobleces provoca dimensiones inaceptables y problemas de montaje, afectando de manera adversa a la calidad del producto final.

Además el carácter no constante de la recuperación se añade a las dificultades para obtener productos de calidad constante.

Cuando se estudia el fenómeno de la recuperación se diferencian claramente dos estados, como es mostrado en la Figura 2.18.

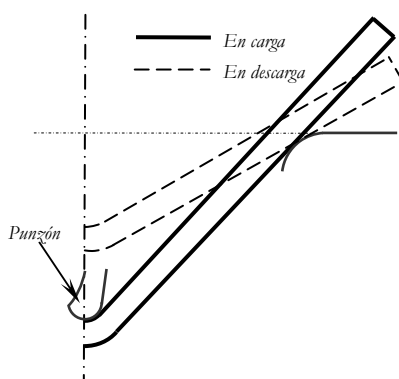


Figura 2.18. Definición de estados para el estudio de la recuperación

- *Estado inicial o en carga.* Durante esta etapa de conformado, el punzón está ejerciendo una fuerza de doblado sobre la chapa; en el caso del doblado al aire el valor de la penetración del punzón es el adecuado para que la chapa nunca llegue a tocar el fondo de la matriz completamente.
- *Estado final o de descarga.* Esta etapa empieza desde el momento en el que la carga, que está aplicada por una prensa, se deja de ejercer sobre la chapa. Es durante la

fase de descarga cuando una porción de la deformación se recupera causando un cambio en la forma de la pieza final.

Como ya se expuso en el apartado técnicas de compensación de la recuperación del apartado 2.2.2, para reducir la recuperación durante el proceso en carga, se tiene que aplicar una tracción, durante o después el proceso de doblado. En el conformado con prensas, la tracción se aplica durante el doblado, y eso reduce el momento de doblado y aumenta el nivel de deformación y la fluencia plástica. Pero entonces las condiciones del proceso ya no son las del doblado al aire. Además de la aplicación de la tracción para reducir la recuperación, se pueden aplicar fuerzas de compresión después del doblado a través de prensado de revestimiento (*pad pressing*), llevando a fondo o re-golpeando (*restriking*) la chapa en el fondo, en los lados o en las aristas para causar fluencia de compresión. Otra manera efectiva de reducir la recuperación es la aplicación de otra técnica de proceso, la conocida como “doble-doblado” en la que el extremo se dobla dos veces en situaciones diferentes con un juego de matriz reducido. Por lo que al final, sobredoblar el producto a un ángulo precalculado, para obtener el ángulo requerido después de la recuperación, parece ser la técnica más adecuada para compensar la recuperación en el doblado al aire.

Aunque existen estos métodos para salvar o compensar la recuperación, todavía es difícil para un diseñador definir procesos de deformación de chapa y que se elimine totalmente el problema de la recuperación, pues afecta tanto al diseño de la pieza/producto final, como al diseño de la matriz. Por este motivo se desarrollan estudios relacionados con la recuperación y el diseño de la pieza y la recuperación y el diseño de la matriz.

Consecuentemente, minimizar la recuperación es también uno de los problemas más molestos en el diseño de matrices y gran preocupación de los diseñadores de herramientas de deformación de chapa ((Shu et al., 1996), (Guo et al., 2002)) pues puede causar serios problemas en el montaje de piezas y puede llevar a caras modificaciones de las herramientas de deformación. Si la recuperación no se puede predecir exactamente, uno debe intentar repetidamente obtener parámetros de deformación adecuados para compensar la recuperación. Luego, predecir la recuperación es también importante cuando se diseña una matriz para un proceso de doblado (Shu et al., 1996).

2.4.1 Definiciones iniciales de recuperación

Como se observa en la Figura 2.19, el ángulo final de doblado (β_f) después de la recuperación es menor que el que tenía la chapa mientras estaba sometida al esfuerzo del punzón (β_i)

$$\beta_f < \beta_i \quad (2.19)$$

Por lo tanto, la curvatura disminuye durante la recuperación y consecuentemente el radio de doblado final (R_f) es mayor que el radio de doblado bajo carga (R_i).

$$R_f > R_i \quad (2.20)$$

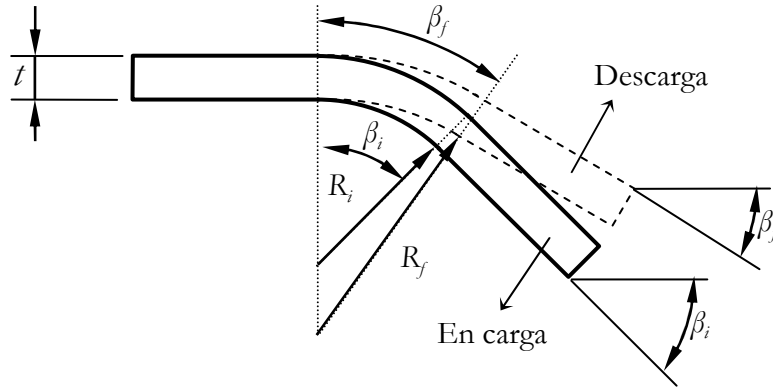


Figura 2.19. Recuperación o *Springback* durante el proceso de doblado. Fuente: (Kalpakjian, 1991)

Para hablar cuantitativamente de la recuperación, es conveniente la definición de una relación adimensional que permita medirla. Es habitual cuantificar ((Lange et al., 1985; Kalpakjian, 1991)) el factor de recuperación a través de relaciones entre los valores de ángulo de doblado en carga β_i y en descarga β_f , o bien mediante relaciones entre los valores del radio en carga R_i y final o en descarga R_f .

Como un posible parámetro para cuantificar la recuperación, se define el factor de recuperación K_r como coeficiente entre los ángulos de doblado:

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} \quad (2.21)$$

Un valor de K_r igual a la unidad indicará la ausencia de recuperación, mientras que un valor igual a cero indicará una recuperación elástica completa, como en el caso de un resorte donde solamente ha aparecido deformación elástica.

Otras aproximaciones cuantifican la recuperación como la diferencia angular entre los ángulos en el estado de carga y en el de descarga (Figura 2.20, donde θ es el ángulo de doblado interior, comprendido entre las alas de pieza doblada) teniendo como parámetro valorativo el ángulo de recuperación $\Delta\beta$ ó $\Delta\theta$, que se define como

$$\beta_i = \beta_f + \Delta\beta \quad \text{ó} \quad \theta_f = \theta_i + \Delta\theta, \text{ siendo } \Delta\beta = -\Delta\theta. \quad (2.22)$$

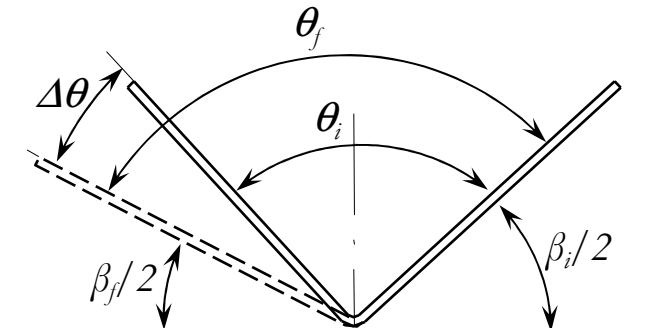


Figura 2.20. Variación del ángulo $\Delta\theta$ durante la recuperación de una chapa en V.

Relacionar el factor de recuperación y el ángulo de recuperación puede resultar fácil. Si el valor K_r se conoce, por ejemplo de forma experimental, el ángulo de recuperación se puede determinar por:

$$\Delta\beta = \left(\frac{1}{K_r} - 1 \right) \cdot \beta_f \quad (2.23)$$

$$\Delta\theta = (1 - K_r) \cdot \theta_f$$

Estas ecuaciones sólo pueden aplicarse en situación de doblado ideal, donde la curvatura se mantenga constante a lo largo de toda la longitud de doblado.

Otros autores hacen uso del coeficiente adimensional R_i/R_f . Aunque comúnmente R_i/R_f se le puede definir como “relación de recuperación” se le puede llamar de manera más adecuada “relación de conformidad”. Es el índice de cuánto la sección doblada se ajusta a la forma de la matriz, o a la forma en carga en el caso de doblado al aire, después de la descarga. Igual que el factor de recuperación K_r , la relación R_i/R_f tiene una cota superior igual a la unidad para la ausencia de la recuperación y una cota inferior de cero para el caso de recuperación elástica completa.

El factor de recuperación, K_r , se puede determinar en términos de los radios R_i y R_f . Considerando que la longitud del arco deformado es la misma antes y después de la carga la relación que se obtiene bajo condición de doblado ideal, como lo es un doblado de momento puro, es

$$\left(R_i + \frac{t}{2} \right) \cdot \beta_i = \left(R_f + \frac{t}{2} \right) \cdot \beta_f \quad (2.24)$$

A partir de la relación (2.24) se obtiene una expresión para K_r como

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} = \frac{\left(\frac{2R_i}{t} \right) + 1}{\left(\frac{2R_f}{t} \right) + 1} \quad (2.25)$$

En esta expresión se observa que el factor de recuperación depende solamente del ratio R/t . Definimos de nuevo la cantidad de recuperación elástica, pero esta vez incluyendo las propiedades del material que gobierna su comportamiento elástico (Kalpakjian, 1991). En este caso el factor de recuperación depende del nivel de tensión o esfuerzo de fluencia del material (S_Y) y del módulo de elasticidad del material (E). De este modo la recuperación elástica aumenta con el nivel de tensión y con la disminución del módulo elástico. Basándose en esta observación, una fórmula aproximada se desarrolla para estimar la recuperación es la siguiente:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{R_i S_Y}{Et} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i S_Y}{Et} \right) + 1 \quad (2.26)$$

Esta ecuación se ha convertido en una expresión simplificada de referencia para el cálculo de la recuperación y aparece en textos básicos de procesos de fabricación ((Kalpakjian, 1991), (Beddoes, 1999)). Fue desarrollada por primera vez por Gardiner (1957), quien hizo un análisis matemático simplificado y generalizado de la recuperación de los metales, considerando como hipótesis necesarias la conservación del grosor y de la longitud del arco.

Marciniak (1992) proporciona otra ecuación simplificada en función de las hipótesis de simplificación que escoge para obtener el valor de recuperación (en este caso, $\Delta\beta$) en la descarga de una chapa con comportamiento elástico-perfectamente plástico. Obtiene un ángulo de recuperación

$$\Delta\beta = -3\left(\frac{R}{t}\right)\left(\frac{S_Y}{E'}\right)\beta \quad (2.27)$$

donde $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ para cumplir con las condiciones de deformación plana y $R = R_i + \frac{t}{2}$.

A parte de estas sencillas expresiones para cuantificar de manera aproximada la recuperación, se han desarrollado de manera experimental tablas y gráficos que cuantifican la recuperación para determinados metales específicos que están disponibles en manuales y libros de referencia ((Committee under ASM direction, 1988) y (Lange et al., 1985)) o se realizan estudios experimentales para elaborarlas y que es posible encontrar en publicaciones como (Tekiner, 2004).

2.4.2 Variables de influencia sobre la recuperación

El efecto de influir sobre determinadas variables que aumentan la recuperación viene marcado, en una primera aproximación, por el ratio R/t y el ratio S_Y/E , tal como se ve reflejado en las fórmulas de Gardiner, ecuación (2.26), y de Marciniak, ecuación (2.27). De manera que se consideran como tendencias clásicas en el aumento de la recuperación las que son consecuencia de los ratios anteriores y más las que se enumeran a continuación ((Committee under ASM direction, 1988) y (de Vin, 1994)):

- La disminución del grosor de chapa (t)
- El aumento del esfuerzo de fluencia (S_Y)
- El aumento del radio de doblado (R)
- La disminución del módulo de elasticidad (E)
- El aumento del módulo tangente (pendiente de la curva esfuerzo/deformación real ($d\sigma_T/d\varepsilon$)) cuando se ha excedido el esfuerzo de fluencia (S_Y) (Committee under ASM direction, 1988)

La recuperación también se ve influenciada de manera muy importante por el factor geométrico que viene definido por el propio ángulo que se quiere alcanzar. Así que cuanto mayor sea el ángulo de doblado que pretenda alcanzarse, mayor será la recuperación.

Las tensiones residuales (que se describen en la siguiente sección), la cantidad de compresión en la zona de doblado y el método de doblado en función del material son factores que deberán tenerse en cuenta, pues también son factores que afectan a la recuperación (Committee under ASM direction, 1988).

Se considera que la fuerza del proceso tiene sólo una influencia menor sobre el ángulo de recuperación (Wang et al., 1993). La influencia de otros factores, tal como la fricción o el coeficiente de la ley de endurecimiento por deformación, entre otros, se evalúan en función de la conformidad de la verificación del modelo en el que se evalúan. Las observaciones generales de Wang et al. (1993) en cuanto a qué parámetros influyen la recuperación. Algunos de los cuáles coinciden con los enunciados anteriormente. Estos parámetros son:

- La recuperación aumenta con el esfuerzo o la resistencia de fluencia, el endurecimiento y la anisotropía, desde el momento en que estos valores son mayores, mayor es la resistencia a la fluencia plástica.

- La recuperación disminuye con el aumento del módulo elástico (E) porque la resistencia al doblado elástico aumenta con el módulo de elasticidad.
- El doblado de una chapa fina con un radio de doblado grande (R), o un radio de doblado relativo grande (R/t) mejora la recuperación
- El doblado de una chapa ancha bajo condiciones de deformación plana tiene una recuperación mayor que si el doblado fuera de una chapa estrecha bajo condiciones de tensión uniaxial para materiales isótropos

Mientras el control de la dispersión de la recuperación necesita radios de doblado pequeños, se prefieren radios de doblado más grandes en vista de las propiedades mecánicas de las piezas dobladas. Luego, es necesario el establecer compromisos entre estas variables (Lange et al., 1985), para obtener piezas de la precisión deseada.

2.4.3 Tensiones residuales y recuperación

Después de cualquier operación de conformado en frío una pieza adquiere en su interior unos esfuerzos residuales. Además, si tenemos en cuenta que la pieza de partida para una operación de doblado ha sido previamente conformada por rolado en frío, la magnitud de estas tensiones puede afectar significativamente el comportamiento del material en las operaciones posteriores de conformado.

Consecuentemente, después de un doblado plástico, la sección doblada contiene también unos esfuerzos residuales como resultado de la propia operación. De hecho, la recuperación está determinada por una compleja interacción de las tensiones elásticas internas residuales sujetas a las restricciones de la geometría de la pieza. A modo de ejemplo, la Figura 2.21 muestra tres posibles situaciones de carga y descarga en una sección de una chapa sometida a las principales situaciones de doblado.

La importancia de las tensiones residuales por si mismas como por su relación con la recuperación provoca que sea deseable tener un método cuantitativo de predicción de la distribución de esas tensiones así como lo es para la recuperación. En Queener et al. (1968) se pone de manifiesto que en la práctica, existen reglas (*rules of thumb*) de datos experimentales o empíricos que se usan normalmente para compensar la recuperación, pero que no existen para los esfuerzos residuales inducidos por la operación de doblado, que suelen ser ignorados.

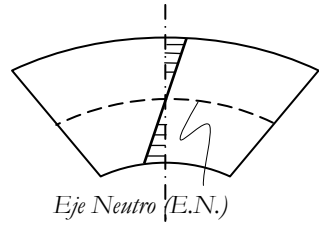
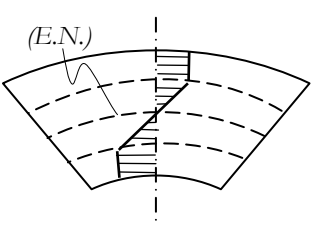
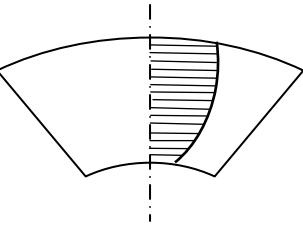
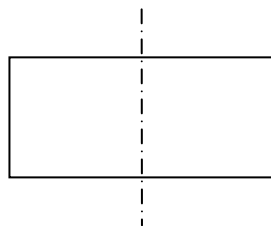
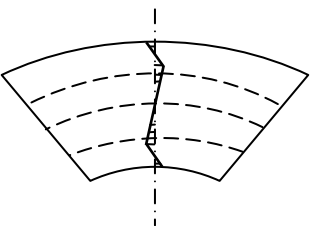
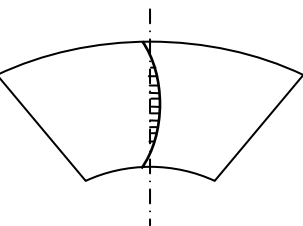
Doblado Elástico $(\sigma < \sigma_y \text{ en todas las capas})$	Doblado Simple elasto-plástico $(\sigma > \sigma_y \text{ en capas más exteriores})$	Doblado con estiramiento (Momento+Tracción)
	Doblado al aire	Doblado a fondo
Tensiones en carga:	Tensiones en carga:	Tensiones en carga:
		
<p>Todas las capas en régimen elástico ($\sigma < \sigma_y$).</p> <p>El momento de recuperación para una flexión dada es proporcional a E: $\sigma = E\varepsilon$</p>	<p>Las capas más exteriores en régimen plástico ($\sigma > \sigma_y$)</p> <p>En la zona plástica la tensión elástica continua aumentando pero a un ratio más pequeño que es proporcional al módulo tangente ($d\sigma_T/d\varepsilon$) en vez de módulo elástico</p>	<p>La viga entera está plásticamente deformada.</p>
Tensiones en descarga:	Tensiones en descarga:	Tensiones en descarga:
		
<p>Recuperación total al estado inicial. No se produce deformación.</p>	<p>Las tensiones elásticas guardadas se enderezan hasta que el momento de doblado combinado es cero.</p>	<p>Las tensiones elásticas internas se recuperan pero en una cantidad menor que en los otros dos casos(*).</p>
<p>(*) La recuperación disminuye si aumenta la tracción (estiramiento) con lo cual el gradiente de tensión a lo largo de la viga disminuye para deformaciones mayores. El esfuerzo de fluencia deja de ser un factor de recuperación una vez todas las regiones se deforman plásticamente en tracción.</p>		

Figura 2.21 Diagrama de fuerzas en el interior de la sección del material durante el proceso de doblado. Basado en (Committee under ASM direction, 1988)

2.4.4 Recuperación en diferentes tipos materiales

Después de la exposición de las diferentes variables que influyen en la recuperación es palpable la importancia de la influencia del material sobre este fenómeno. Para metales blandos, como por ejemplo una aleación aluminio 1100, la cantidad de recuperación es prácticamente insignificante (Committee under ASM direction, 1988). Sin embargo, para otras aleaciones de aluminio (por ejemplo la 2023) es importante. En general, los aceros de bajo contenido en carbono manifiestan más recuperación que las aleaciones de aluminio o cobre, y aún se espera obtener más recuperación en los aceros inoxidables (Committee under ASM direction, 1988).

De esta manera cuando se diseña una pieza doblada, se puede o bien caracterizar el material (mediante un ensayo a tracción) o bien tener en cuenta las referencias anteriores. Si se opta por esta última opción, es útil consultar manuales (*handbooks*) específicos donde se recogen

tablas en las que se listan, en función del material y de características del tipo ratio de doblado mínimo y/o grosor, valores de recuperación (en grados) o tolerancias de doblado que deben tenerse en cuenta. La existencia de estas tablas supone una referencia pero es reducida en cuanto a ángulos de doblados y materiales. Por lo que al final, los diseñadores de piezas dobladas recurren a la experiencia que tengan ellos mismos sobre el proceso, o a la experiencia y conocimiento existente acumulados en la empresa. Cuestión esta última de importancia e investigación en el campo de la ingeniería del conocimiento, pues muchas veces este conocimiento sobre el proceso no está disponible fácilmente en una empresa.

A continuación se reproducen las tablas para la valoración de la recuperación en los dos materiales de trabajo de esta tesis. Las tablas se han extraído de uno de los manuales de ASM, (Committee under ASM direction, 1988), específico para el forjado y el conformado por deformación.

a) Recuperación de los aceros inoxidables

La recuperación en los aceros inoxidables es función de la resistencia del material, del radio y ángulo de doblado y del grosor de la plancha de partida o *stock*. La Tabla 2.4 muestra la relación entre el radio de doblado y la recuperación para tres aceros inoxidables austeníticos. Los aceros ferríticos usualmente exhiben menos recuperación que los austeníticos porque el ratio de endurecimiento por deformación de los ferríticos es menor.

Como una guía práctica, la cantidad de recuperación es normalmente proporcional a:

$$\frac{S_Y + S_{UT}}{2} \quad (2.28)$$

La recuperación puede controlarse reduciendo el radio del punzón, acuñando la línea de doblado (si la forma del molde es tal que llevarlo a fondo sea factible) y sobredoblándolo. Para sobredoblarlo a veces es necesario solamente hacer más pequeño el ángulo del punzón que el ángulo deseado final de la pieza de trabajo.

Acero y templado (temper)	Recuperación para el radio de doblado de:		
	1t	6t	20t
302 y 304	2°	4°	15°
301, medio-endurecido (half-hard)	4°	13°	43°

Tabla 2.4. Recuperación de tres aceros inoxidables austeníticos doblando a 90° a varios radios (Committee under ASM direction, 1988).

b) Recuperación del Aluminio

La recuperación en el aluminio, según se recoge en el capítulo de deformación de las aleaciones del aluminio del manual por (Committee under ASM direction, 1988), depende de la tensión de fluencia del material, del grosor del material y del radio de doblado. En este manual, existe una tabla en la que se proporciona las tolerancias en grados que deben tenerse en cuenta para doblados rectos, o sea de 90°, en tres tipos de chapas de aleaciones de aluminio (de alta resistencia 2024-O y 7075-O y 2024-T3). El valor de esta tolerancia en grados es el número de grados que debe sobredoblarse la chapa, aumenta con el aumento del valor de la resistencia a fluencia y el radio de doblado, y varía inversamente en función del grosor. En esta sección se propone estimar de manera proporcional la tolerancia para ángulos de doblado de valor mayor y distinto a 90°, en función de los valores de la tabla

descrita. Para valores menores a 90°, la recuperación debe ser mayor a no ser que el radio de doblado disminuya.

Grosor (mm) 2024-O y 7075-O	Radio de doblado (mm)							
	2.4	3.2	4.8	6.4	7.9	9.5	11.1	12.7
0.51	2	4	5 1/2	7 1/2	8 1/2	9	9 1/2	12
0.64	2 3/4	3 3/4	5 1/2	6 1/2	8	8 1/4	8 3/4	10 3/4
0.81	2 1/4	3	4 3/4	6	6 3/4	7	7 1/2	9 1/2
1.02	2	3	4	5	6	6 1/4	6 3/4	8 3/4
1.29	2	2 1/2	3 1/2	4	5	5 1/4	5 3/4	7 1/2
1.63	1 1/2	2	2 3/4	3 3/4	4 1/2	5	5 1/2	6 3/4
2.06	1	1 1/2	3	2 1/2	3 1/4	3 1/2	4	4 3/4
2.39			1 3/4	2 1/2	3	3 1/4	3 3/4	4 1/2
3.18			1 1/2	2	2 1/4	2 3/4	3	3 3/4

Tabla 2.5 Tolerancias de recuperación para doblados de 90° en chapas de aluminio 2024-O y 7075-O (Committee under ASM direction, 1988).

Grosor (mm) 2024-T	Radio de doblado (mm)							
	2.4	3.2	4.8	6.4	7.9	9.5	11.1	12.7
0.51	10	12	15 1/2	19	22 1/2	24	27	33 1/2
0.64	8 3/4	10 1/2	14	16 3/4	17 3/4	21	23	28 1/2
0.81	7 3/4	8 3/4	12	14 1/2	16 3/4	17 3/4	19 1/4	24
1.02	7 1/4	8 1/4	10 3/4	12 3/4	14 1/2	15 1/4	17	20 1/2
1.29			9	10 1/2	12 1/4	13	14 1/2	16 3/4
1.63			8	9 3/4	11 1/4	12	12 3/4	15
2.06					9 1/2	10 1/2	11 1/4	13
2.39					8 3/4	9 3/4	10 1/2	12

Tabla 2.6 Tolerancias de recuperación para doblados de 90° en chapas de aluminio 2024-T3 (Committee under ASM direction, 1988).

Capítulo 3

Modelado del doblado al aire y de la recuperación

*La función intelectual de las dificultades es la de conducir a hombres
y mujeres a pensar.*

John Dewey

3.1 Introducción

En este capítulo en primer lugar se presenta una revisión de los principales trabajos sobre el estudio del doblado y la recuperación realizados a través de aproximaciones fenomenológicas y analíticas. Estos enfoques tienen ciertas limitaciones. Por ejemplo, Nilsson et al. (1997) establece que las descripciones analíticas para acotar la recuperación no son lo suficientemente generales para contener las influencias del material y de la geometría debido a las simplificaciones e hipótesis que tienen que hacerse. Por lo tanto, las aproximaciones en los modelos analíticos pueden usarse en algunos casos, pero nunca como forma general. Las simplificaciones más comunes, según Math et al. (2002), se basan en: una relación esfuerzo-deformación simplificada, en una curva de doblado que se aproxima a un arco (el lado más interior a menudo se presupone igual al radio de punzón) y en la hipótesis de que no se produce un adelgazamiento de la chapa. La relación constitutiva (o relación esfuerzo-deformación) no suele tener en cuenta, por ejemplo, el efecto *Bauschinger* o la fricción, entre otros aspectos. Se busca un enfoque de la mecánica continua que no sea suficiente complejo para permitir obtener una solución exacta.

Bajo otro contexto, sucede que la predicción por medio de enfoques analíticos es bastante restringida a causa de la limitación de la modelación matemática de los procesos y de los métodos de resolución. La principal causa de esta limitación, según Cho et al. (2003), resulta del problema de la no linealidad.

Afortunadamente las técnicas de simulación numérica, tal como el método de los elementos finitos, han relajado la limitación matemática de los modelos analíticos. El estudio de la geometría final de doblado, la predicción de la recuperación elástica y el diseño sistemático de herramientas están en pleno desarrollo y crecimiento gracias a los métodos de resolución numéricos. Dentro de este capítulo también se enumeran las

tendencias actuales observadas en las investigaciones recientes de aplicación del análisis de los elementos finitos al estudio de la predicción de la recuperación y geometría final en los procesos de doblado de chapa. También se hace referencia a los trabajos donde la aplicación de los algoritmos de redes neurales permite el control de la recuperación en el doblado.

En este capítulo además se describe brevemente la aparición del fenómeno de la recuperación en otros procesos de deformación. Finalmente se realiza un resumen de los aspectos principales enunciados durante esta primera parte de este estudio y que establecen el marco en el que se desarrolla la segunda parte de este trabajo.

3.2 Modelos analíticos y formulaciones para el doblado al aire

Antes de ilustrar los modelos analíticos del doblado al aire y de la recuperación en este apartado se han analizado previamente qué hipótesis han sido las más utilizadas en las diferentes aproximaciones estudiadas. Una vez conocidas las hipótesis más comunes se ilustran las formulaciones precursoras del estudio de la recuperación y a continuación las dos aproximaciones principales bajo las que se desarrollan los modelos de doblado que se explicarán posteriormente.

3.2.1 Hipótesis básicas en la mecánica del proceso de doblado

Para poder tratar el proceso de doblado al aire y el complejo fenómeno de la recuperación con una formulación analítica previamente es necesario realizar determinadas idealizaciones e hipótesis de simplificación. Aunque el pensamiento básico detrás de los procesos implicados en todos estos análisis es similar los detalles de las deducciones, la forma general y la utilidad práctica de los resultados finales son altamente dependientes de la naturaleza de las hipótesis tomadas.

Si nos centramos en el proceso del doblado al aire se observa que los principios de deformación han sido estudiados durante muchos años. Trabajos recientes como el de (Wang et al., 1993) y (de Vin, 1994), reconocen el trabajo de (Ludwik, 1903) como la investigación que basándose en la teoría de las vigas elásticas estableció la primera teoría para la aplicación ingenieril del doblado plástico de materiales sin endurecimiento por deformación.

Las hipótesis hechas por él y más tarde adoptadas por otros investigadores son las siguientes:

1. El grosor y el ancho son uniformes en toda la chapa y permanecen constantes durante el proceso de doblado. La chapa se dobla por un momento puro, por lo tanto la línea de doblado es un arco circular. El radio de doblado generalmente se supone uniforme por toda la zona de doblado.
2. La chapa tiene una relación ancho - grosor grande. Por lo tanto, los efectos de borde en las deformaciones de las aristas son insignificantes y puede considerarse un estado de deformación plana.
3. El material es homogéneo e isótropo y no contiene deformaciones residuales anteriores al doblado.
4. Secciones planas normales a la superficie de la chapa y paralelas al eje de doblado permanecen planas durante el doblado.
5. La chapa consiste en muchas capas finas que se tratan independientemente. Se omiten las tensiones perpendiculares a la superficie de la chapa y la influencia de

tensiones paralelas al eje de doblado, es decir, se ignora el esfuerzo transversal (normal a la chapa) y su distribución a lo largo de la chapa.

6. Las curvas de tensión-deformación de una pieza de trabajo en las regiones de tracción y compresión son simétricas respecto al origen.
7. La supresión del momento de doblado después del doblado es equivalente a la respuesta elástica obtenida por la superposición de un momento con igual magnitud pero de signo opuesto.
8. La capa neutra coincide con el plano medio del grosor de la chapa.

Estas hipótesis tienen consideraciones que se han ido desarrollando a través de otros estudios. Algunas de ellas se resumen y quedan recogidas en la Tabla 3.1.

Hipótesis	Consideraciones
1 Uniformidad del grosor (t)	(Wang et al., 1993) Esta afirmación es razonablemente verdadera para la mayoría de las operaciones de doblado. Aunque, vía experimentación se acota un adelgazamiento de un 5% para $R/t \geq 1$ y vía un análisis de elementos finitos se acota un adelgazamiento de un 5% para $R/t \leq 2$, lo que correspondería a un nivel de deformación de doblado de un 20%.
2 Relación ancho grosor $w > > t$	(Queener et al., 1968);(de Vin, 1994) (Wang et al., 1993) trata chapas con $(w/t) > 8$
5 Omisión de tensiones perpendiculares	(Yuen, 1996) (Queener et al., 1968);(Wang et al., 1993) Normalmente la consideran sólo válida para $(R/t) \geq 4$ a 5. Si $R/t \leq 5$, el esfuerzo transversal puede ser importante y la teoría de doblado elemental que ignora este esfuerzo es en mayor medida errónea mientras el ratio de doblado se reduce.
8 Eje neutro en la mitad del grosor	(Lange et al., 1985);(Kalpakjian, 1991) Que el eje neutro permanezca en la mitad del grosor durante la operación de doblado, sólo es justificable para materiales con una reducción de área en fallo menor de 0.2. Por lo que para materiales dúctiles se debería considerar una alternativa, para el radio mínimo de doblado y el movimiento del eje neutro.
Otras consideraciones	(Wang et al., 1993) La interacción entre el momento de doblado y el cortante no es importante, (menos que una reducción del 10% en el momento para una fuerza de cortante igual a la mitad del cortante en el caso de fluencia plástica completa)

Tabla 3.1. Consideraciones para las hipótesis del proceso doblado

Además, en (Tan et al., 1992) y (Wang et al., 1993) se reconoce la aportación de (Hill, 1950). Hill, en 1950, basándose en las hipótesis anteriores de Ludwick (1903) propuso una teoría simple para el doblado de deformación plana. Dicha investigación fue ampliamente aprobada, pues a partir de ese momento se generó el desarrollo de propuestas de doblado: para materiales idealmente plásticos, para materiales rígido-plásticos con endurecimiento por deformación lineal, estudios sobre la influencia de la fuerza cortante en el doblado plástico de una viga rectangular en voladizo cargada en el centro, otras que consideraban el esfuerzo transversal, o una carga transversal y fricción en los apoyos de la matriz, etc. Lo

que puede resumirse como que se desarrollaron diferentes propuestas alrededor de la naturaleza del comportamiento tensión-deformación del material, de consideraciones geométricas del proceso y su interrelación.

De hecho, las hipótesis de Ludwik (1903) y Hill (1950) todavía se reconocen en estudios mucho más recientes, como es el caso de Perduijn et al. (1995) donde en cada modelo se especifican unas hipótesis adicionales a las comunes que se describen a continuación. Por lo tanto, todos los modelos y análisis que desarrollan Perduijn et al. (1995) se basan en las siguientes hipótesis comunes y reconocibles:

- El material es homogéneo e isótropo
- Ocurre doblado puro. Lo que significa que las secciones continúan permaneciendo planas
- La deformación ocurre en la dirección del grosor lo que es cierto en una chapa que es amplia en relación con su grosor.
- Se añade en este estudio que el material fluye de acuerdo con el criterio de fluencia de Von-Miseses $\sigma = \sigma_f$, se considera σ como la tensión efectiva y σ_f la tensión de fluencia obtenida en el ensayo a tracción; y además, se asume deformación por endurecimiento exponencial de acuerdo con la expresión de Ludwik-Nadai extendida, $\sigma_f = C(\varepsilon_o + \varepsilon_x)^n$.

3.2.2 Trabajos precursores en la formulación de la recuperación

En este apartado se repasa los primeros enfoques relacionados con la cuantificación del fenómeno de la recuperación. El trabajo pionero en este ámbito es el trabajo publicado por (Gardiner, 1957), y como tal es reconocido por muchos autores hasta la actualidad: (Queener et al., 1968), (Wang et al., 1993), (de Vin, 1994), (Yuen, 1996), (Narasimhan et al., 1999), (Samuel, 2000), (Gau et al., 2001), (K. P. Li et al., 2002) y (Tekiner, 2004).

Gardiner (1957) usando las hipótesis recogidas en el apartado 3.2.1 y considerando una chapa con un comportamiento de material elástico-perfectamente plástico obtuvo la siguiente ecuación muy conocida, expresada en esta ocasión como aparece en (Yuen, 1996):

$$\frac{R}{R'} = \begin{cases} 0 & f_R > \frac{1}{2} \\ 4 \cdot f_R^3 - 3 \cdot f_R + 1 & f_R \leq \frac{1}{2} \end{cases} \quad \text{donde} \quad f_R = \left(\frac{R}{t} \right) \left(\frac{S_y}{E} \right), \quad (3.1)$$

Con esta expresión o la misma expresada en (2.26), Gardiner (1957) quiere elaborar un factor de corrección de la recuperación en el doblado que pueda enunciarse con las propiedades físicas básicas para casi todos los materiales metálicos y con los grosores de las piezas a doblar. Este factor además debe poderse incorporar a los cálculos de las herramientas de doblado. Se deseaba una relación matemática entre el radio de curvatura antes y después de la recuperación.

El trabajo en particular de Gardiner (1957) trata con la corrección necesaria de la recuperación en arcos circulares, aplicado en la curvatura de un ala de avión. Cada uno de los arcos que conforman el ala se corregía, mediante un factor de recuperación. Con un nuevo radio de curvatura se definía una nueva forma para esos arcos corregidos que se convertía en la forma de las herramientas que ejercerían la deformación. Se realizaron unas pruebas iniciales para un determinado material y un rango de grosores en particular. Debido a la buena correlación existente entre la teoría y las pruebas, este proyecto resultó

un gran avance porque después se extendió a otros materiales y a otros grosores mostrando una sorprendente buena correlación. Los trabajos anteriores a Gardiner (1957) con respecto a la recuperación tenían aplicación en pocos materiales.

Gardiner (1957) considera que la chapa está retenida entre la matriz y el punzón., con las siguientes hipótesis:

- que el eje neutro, donde no existe tracción ni compresión durante el doblado, está en la mitad de la chapa
- que el diagrama tensión-deformación consistente mayoritariamente en dos líneas rectas una porción elástica y la otra plástica (comportamiento elástico-perfectamente plástico)
- que la deformación en una capa es proporcional a su distancia desde el eje neutro

Al usar un diagrama tensión-deformación simplificado, propuesto en la segunda hipótesis, dos defectos de importancia en las consideraciones iniciales se ponen de manifiesto:

- Los materiales reales no se comportan en ninguna zona del diagrama de forma perfectamente elástica, lo que significa que las capas deformadas nunca retorna a su estado original perfectamente.
- La curva tensión-deformación en la deformación más allá de la fluencia no es plana, más bien aumenta lentamente con el aumento de la deformación, es decir existe endurecimiento plástico.

Gardiner (1957) proporciona, además, otra fórmula simplificada para la recuperación aprovechando el hecho que en su modelo, no existe endurecimiento y la recuperación es elástica. Trata, la recuperación como resultado solamente del cambio elástico en la curvatura debido a un momento opuesto e igual. Esto se puede expresar como

$$\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} = \frac{12M}{Et^3} \quad (3.2)$$

Para aplicar la ecuación (3.2) es sólo necesario obtener el momento de doblado (M) que aparece en la sección mientras la chapa está en carga en la matriz. En esta expresión se considera una amplitud de chapa unitaria, por ese motivo no aparece la variable w , como aparecerá en otras ecuaciones de apartados posteriores.

Esta investigación también extiende la teoría presentada, para el doblado de tubos y de barras. Sin embargo en estos casos los efectos de arista juegan un rol más importante que en la chapa, causando mayores imprecisiones. En este campo no se realizó verificación experimental.

Como ya se ha comentado en secciones previas, después de un doblado plástico, la sección doblada contiene unos esfuerzos residuales como resultado de la operación. Es deseable tener un método cuantitativo de predicción de la distribución de esas tensiones así como de su magnitud, pues puede afectar significativamente la carga a la que puede aplicarse la pieza en servicio antes de que la fluencia ocurra y la pieza sea susceptible de fallar a fatiga. También la relajación posterior de estos esfuerzos residuales puede causar cambios dimensionales.

En el trabajo de (Queener et al., 1968) (reconocido entre otros por (Yuen, 1996), (Inamdar, Date, y Desai, 2000), (Gau et al., 2001) y (K. P. Li et al., 2002)) se deduce otra expresión analítica (3.6) para la recuperación y la distribución de esfuerzos residuales después de la deformación. Esta expresión es función de: (i) el grosor de la chapa, (ii) el radio de la matriz, y (iii) las características de tensión-deformación del material. Esta teoría es comparada con los experimentos realizados para una variedad de materiales.

Queener y de Angelis (1968) establecen en su estudio que los investigadores realizan dos importantes hipótesis de trabajo. La primera de ellas hace referencia a la naturaleza del comportamiento tensión-deformación del material. La segunda, hace referencia al tipo de pieza considerada, es decir, si la pieza considerada es una viga estrecha (por lo tanto sometida a un estado de tensión uniaxial) o una chapa ancha (sometida a un estado de deformación plana). De hecho esta segunda hipótesis ya fue indicada en (Crandall, 1957), concluyendo que el doblado de chapa se ajusta más al doblado de una plancha que al de una viga, por lo tanto se tiene que realizar una corrección del módulo elástico del material a partir del coeficiente de Poisson (ν) para tratar el proceso de doblado con la rigidez de una plancha y no con la de una viga. Por esta razón las fórmulas presentadas por Gardiner (1957) se convierten, según la observación de Crandall (1957) en:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{R_i S_y}{Et} (1 - \nu^2) \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i S_y}{Et} (1 - \nu^2) \right) + 1 \quad (3.3)$$

y en

$$\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} = \frac{12M}{Et^3} (1 - \nu^2) \quad (3.4)$$

Volviendo al estudio de Queener y de Angelis (1968), en él se recoge el testigo dejado por Crandall (1957), pues considera importante la hipótesis que se toma con respecto a la geometría de la pieza, de viga estrecha en vez de una plancha o chapa ancha, ya que considera que puede alterar significativamente la magnitud de los resultados que se predicen en el doblado de chapa, pues significa ignorar los esfuerzos transversales presentes durante la deformación.

En relación con el material -la otra hipótesis importante- Queener y de Angelis (1968) opinan que el considerar un comportamiento de deformación sin endurecimiento, no es una descripción apta del comportamiento tensión-deformación de muchos de los materiales de ingeniería. Por lo tanto, en un esfuerzo de obtener resultados más precisos para la predicción del comportamiento de la recuperación y de la distribución de esfuerzos después del formado, y después de lo expuesto en el trabajo de Queener y de Angelis (1968), la sección doblada considerada es la de una plancha con un material de comportamiento elástico-plástico con endurecimiento. Estos investigadores consideraron una ecuación constitutiva más general, conocida por algunos autores como la ley de la potencia,

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon & \sigma \leq S_y \\ H \cdot \varepsilon^m & S_y < \sigma \end{cases}, \text{ donde } S_y = H \cdot \left(\frac{H}{E} \right)^{m/m-1} \quad (3.5)$$

siendo σ y ε la tensión y la deformación real respectivamente y H y m parámetros del material que definen en límite de fluencia y la ley de endurecimiento.

La relación de recuperación que se obtiene es la siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{R}{R'} = 1 - \left(\frac{2R}{t} \right)^{1-m} \left\{ \frac{3H(1-\nu^2)}{(3/4)^{(m+1)/2} (m+2)E} \right\} + \\ + \left\{ \left(\frac{2R}{t} \right) \left(\frac{H}{E} \right)^{1/(1-m)} \right\}^3 \times \left\{ \frac{3(1-\nu^2)^{m+3}}{(3/4)^{(m+1)/2} (m+2)(1-\nu+\nu^2)^{(m+2)/2}} - \frac{(1-\nu^2)^3}{(1-\nu+\nu^2)^{3/2}} \right\} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Esta fórmula semiempírica es necesariamente aproximada y no es completa o rigurosa dentro del marco de referencia matemático de la teoría de plasticidad debido a las hipótesis asumidas (Yuen, 1996). Sin embargo, ya se hizo un esfuerzo en elegir juiciosamente las hipótesis para que el resultado final fuera lo más preciso posible y aún suficientemente simple para tener utilidad práctica sobre un rango amplio de condiciones de recuperación.

Para la mayoría de los materiales de ingeniería, si el ratio R/t no es grande -es decir menor que 30-, la magnitud del último término en la ecuación anterior es tan pequeña que la expresión puede simplificarse a:

$$\frac{R}{R'} \approx 1 - \left(\frac{2R}{t} \right)^{1-m} \left[\frac{3H(1-\nu^2)}{(3/4)^{(m+1)/2} (m+2)E} \right] \quad (3.7)$$

Esta simplificación es equivalente a asumir que la expresión de la ley de potencia es una representación adecuada del comportamiento esfuerzo-deformación del material en una simple prueba de tracción para todos los esfuerzos. En cambio, en la ecuación (3.6) se asume que la expresión de la ley de la potencia es válida solamente sobre un esfuerzo determinado y que el comportamiento es elástico para esfuerzos más pequeños.

Autores Trabajos	Comportamiento del material	Característica de la pieza		Verificación Experimental	Materiales experimentados
		Viga estrecha	Chapa ancha		
anteriores a Gardiner	No definido	SI	-	-	
Gardiner (1957)	Elástico- perfectamente plástico	SI	SI	SI	Titanio, aleac. Aluminio, acero bajo, aleac. alta temperatura, acero inoxidable
	Perfectamente plástico	SI	-	-	
	Elástico con endurecimiento lineal	SI	-	-	
posteriores a Gardiner	Perfectamente plástico	-	SI	-	
	Elástico- perfectamente plástico	-	SI	-	
Queener y De Angelis (1968)	Elástico-plástica con endurecimiento	-	SI	SI	Acero, cobre, berilio, magnesio, aluminio

Tabla 3.2. Evolución de los estudios en recuperación y esfuerzos residuales

Desde Gardiner (1957) a Queener y de Angelis (1968) se han realizado otros análisis sin embargo estos trabajos han recibido muy poca verificación experimental y poco reconocimiento posterior. Respecto a la recuperación, sólo Gardiner (1957) ha contrastado la teoría con los experimentos empleando una variedad de materiales bajo unas determinadas condiciones produciendo un rango amplio de grados de recuperación. Respecto a los esfuerzos residuales, ninguno de los modelos para la distribución de

esfuerzos residuales sobre una sección transversal después de la deformación se comprobó experimentalmente hasta Queener y de Angelis (1968). En la Tabla 3.2. se presenta de forma resumida el tratamiento del comportamiento del material y la consideración o no de chapa ancha de los primeros trabajos realizados en el estudio del doblado de chapa.

3.2.3 Aproximaciones fundamentales para los modelos de doblado al aire

Así pues se establece que el proceso de doblado al aire es un proceso de deformación plana y las hipótesis básicas que este maneja se han descrito en el apartado anterior. Estas hipótesis constituyen la base de los modelos de doblado que se tratan en esta sección.

Además, se pueden reconocer dos tendencias principales a la hora de estudiar los modelos desarrollados para el doblado. Estas tendencias están en función de las aproximaciones geométricas de la pieza doblada final que se considere. Alrededor de ambas aproximaciones los investigadores han desarrollado sus modelos de doblado.

La primera aproximación, la más sencilla, se la conoce como aproximación geométrica o de material rígido-plástico. La segunda, considera el comportamiento de la chapa en tres distintas regiones, por lo que los modelos se llaman modelos de “tres secciones”.

a) Aproximación geométrica o de material rígido-plástico ideal

Un modelo simple para el doblado al aire es el modelo geométrico o rígido-plástico ideal. En este modelo, como su propio nombre indica, se asume un comportamiento material rígido plástico y la geometría de la chapa doblada se describe como una sección circular y dos secciones rectas. Este modelo se usa a menudo como referencia para describir el efecto de la recuperación y otros fenómenos sobre la geometría de la chapa.

La geometría de la chapa para el modelo rígido-plástico se muestra en la Figura 3.1. Entre los parámetros que definen la geometría de la herramienta se tienen: en lo que respecta al punzón, el radio del punzón R_p , en lo que refiere a la matriz, el radio de la matriz R_d y el ancho de la matriz w_d (distancia entre centros de los radios de apoyo). En cuanto al proceso, está la penetración del punzón, Z , y el ángulo de doblado β .

Pueden considerarse también otros parámetros, como el ancho de matriz efectivo (w_{efect}) que aparece en algunos diagramas de doblado (de Vin, 1994). Aunque en realidad el parámetro que es más apropiado definir, es la longitud S , llamado por algunos investigadores brazo de doblado. El parámetro S refleja la longitud entre las secciones o puntos de contacto entre la chapa y la herramienta, y en la aproximación geométrica se considera un brazo de doblado recto.

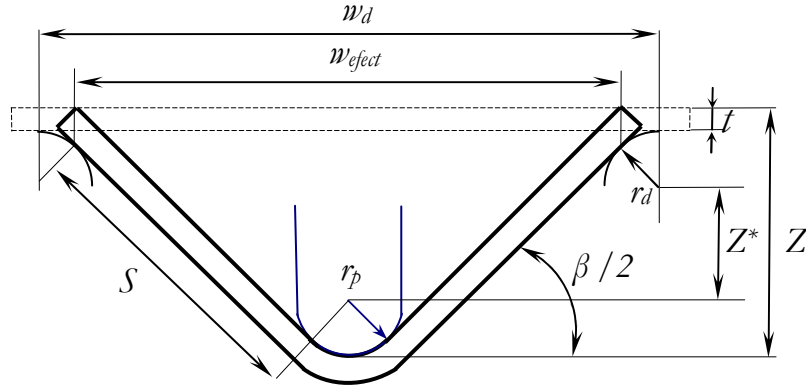


Figura 3.1 Geometría de la chapa de acuerdo con el modelo rígido plástico. Basado en: (de Vin, 1994) y (de Vin et al., 1996)

Considerar estos parámetros en la geometría de la chapa doblada facilita la definición de ecuaciones simples que relacionan la geometría de la herramienta (w_d , R_d y R_p), el grosor de la chapa (t), la penetración del punzón (Z) y el ángulo de doblado (β). No se debe olvidar que este modelo considera la posición de la línea neutra en la mitad del grosor de la chapa. Por lo que se definen las siguientes ecuaciones que relacionan los parámetros anteriores:

$$Z = \frac{w_d}{2} \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) - \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \cdot (R_d + R_p + t) \quad (3.8)$$

$$S = \frac{1}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \cdot \left[\frac{w_d}{2} - (R_d + R_p + t) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \quad (3.9)$$

$$\beta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{Z^*}{w_d/2}\right) + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{R_d + R_p + t}{L^*}\right) \quad (3.10)$$

donde,

$$Z^* = Z - R_d - R_p - t \quad (3.11)$$

y

$$L^* = \frac{Z^*}{\sin\left(\arctan\left(2 \cdot Z^* / w_d\right)\right)} \quad (3.12)$$

De acuerdo a este modelo rígido-plástico, la geometría de la chapa después de la descarga corresponde a dos secciones rectas y una sección circular.

Pero la chapa real difiere de la geometría de la aproximación rígido-plástica o del modelo circular-recto (mostrada en la Figura 3.1). Este fenómeno se debe a la deformación elástica

y a la presencia de una sección en la que el radio varía, los puntos de contacto y por lo tanto las secciones de contacto (bajo carga) entre la chapa y las herramientas se desplazan. La sección en la que el radio varía es la causante de que la geometría de la chapa después de la recuperación, difiera de la geometría inicial idealizada (un arco circular y dos secciones rectas). Estos efectos influyen en el valor del desplazamiento del punzón para un ángulo dado de producto, a la vez que también afectan de manera significativa a la longitud desplegada de la chapa de partida.

A pesar del inconveniente que presenta este modelo, el modelo geométrico se utiliza a menudo para calcular la penetración del punzón en el primer paso de doblado cuando se emplean o el control adaptativo o un método de prueba y error. Se utiliza como valor inicial o de partida antes de llegar a la penetración de punzón adecuada para conseguir el ángulo de doblado preciso.

b) Modelos de tres secciones

Existen otros modelos en los que la geometría de la chapa doblada difiere de la del modelo anterior, en el que se diferencia dos zonas: el arco circular y dos tramos rectos. Estos nuevos modelos consideran que en la geometría de la chapa se producen tres tipos de deformación y en consecuencia dividen la chapa en tres zonas diferentes, motivo por el cual a estos modelos se les llama modelos de “tres secciones”.

En estos modelos, sobre una chapa doblada y bajo condiciones de carga, se pueden definir tres tipos de zonas deformadas: (i) una zona de envoltura alrededor del punzón (*wrap around zone*) o zona *a*, esta zona resigue la forma del punzón y es la que se deforma plásticamente, (ii) zona de deformación elástico-plástica o zona *b*, de curvatura no constante debido a los diferentes momentos de doblado en las diferentes secciones, y (iii) zona *c* o secciones en las que la deformación es elástica y por ese motivo esa zona permanece recta después de la descarga. Para chapas de materiales monolíticos, la sección del material de la chapa que sobresale fuera del apoyo, sobre la matriz (zona *d*), permanece recta. Un ejemplo de la geometría descrita por estos modelos se puede observar en la Figura 3.2.

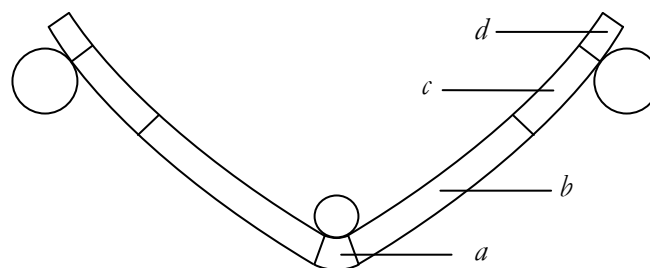


Figura 3.2 Geometría de la chapa de acuerdo con un modelo de “tres secciones”. Las tres regiones que influyen en el doblado son *a*, *b* y *c* Fuente: (de Vin et al., 1996) y (de Vin et al., 2000).

Los modelos de tres secciones, aquellos en los que una de las secciones es de curvatura no constante, se describieron inicialmente por (Stelson et al., 1982; Stelson, 1986) y por (Wang et al., 1993). La consideración del parámetro, longitud del arco de doblado, se tiene en cuenta en muchos análisis de doblado desde el momento en que son introducidos los modelos de tres secciones. El hecho de que se le denomine arco (aunque se ha apreciado que en algunos casos se considera una recta) se debe a que la consideración del arco puede basarse en dos hipótesis de arco circular, dando por lo tanto dos opciones: la primera, arco circular de radio infinito, y por lo tanto segmento recto; y la segunda, arco circular de radio finito único. Wang et al. (1993) postulan las siguientes críticas para ambas consideraciones. En la primera hipótesis, el considerar un segmento recto, tiene dos implicaciones: (i) se

sobrestima el desplazamiento del punzón pero al mismo tiempo (ii) se subestima la propia longitud del arco de doblado y la recuperación correspondiente.

Mientras que las implicaciones de la segunda hipótesis, arco circular con radio finito único, también son dos: (i) se sobrestima la longitud del arco de doblado y la recuperación, pero a la vez (ii) se subestima el desplazamiento del punzón.

Por este motivo después de la aproximación de los modelos de tres secciones, donde (Stelson et al., 1982; Stelson, 1986) y por (Wang et al., 1993) se decantan por un arco de doblado de radio finito único, se han desarrollado modelos con nuevas aproximaciones, como el de (de Vin et al., 1996) que considera un arco de doblado de radio finito no constante o la aproximación de (Anokye-Siribor et al., 2000) con una aproximación parabólica.

3.2.4 Modelos de relevancia en relación con el doblado al aire y la recuperación

Las aproximaciones fundamentales al doblado al aire descritas en el apartado anterior significan un punto de partida para muchas investigaciones. Como también se comentó, el modelo geométrico suele utilizarse como paso previo para el control adaptativo, para procedimientos de prueba y error, o como referencia respecto a la cuál se comparan los resultados obtenidos con nuevos modelos. A continuación se describen los modelos más importantes y más recientes desarrollados bajo la aproximación anterior de arco de doblado con radio finito único (los modelos de (Stelson et al., 1982; Stelson, 1986), de (Wang et al., 1993) y (Thanki et al., 2001)), así como nuevas aproximaciones ((de Vin et al., 1996), (Anokye-Siribor et al., 2000) y (Singh et al., 2004)) y modelos desarrollados bajo otros enfoques (Tan et al., 1992), relacionados todos ellos con la recuperación en el doblado al aire y que se presentan a continuación en orden cronológico.

a) Modelo de Stelson y Gossard (1982)

El modelo de Stelson et al. (1982) intenta determinar la posición final correcta del punzón para obtener el ángulo de descarga deseado.

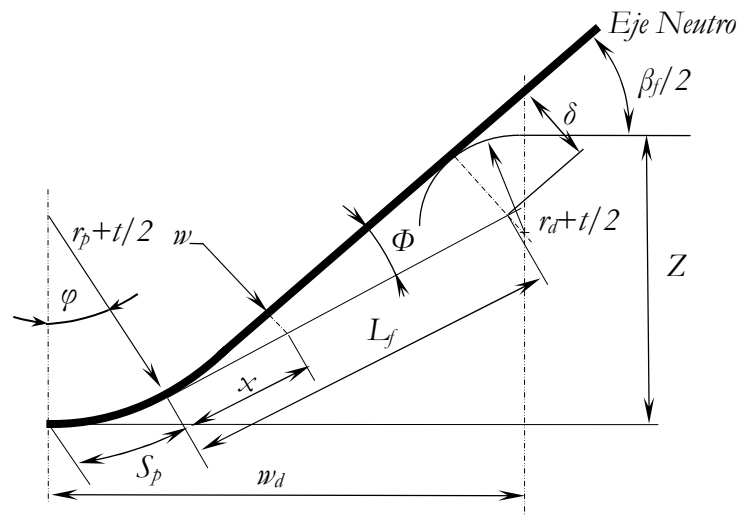


Figura 3.3 Geometría de la chapa de acuerdo con el modelo de Stelson y Gossard

Con ese objetivo diseña, construye y valida un controlador para una prensa, del que se obtienen parámetros de fuerza y desplazamiento que se usan en un modelo de material elástico-plástico para calcular el desplazamiento del punzón.

La geometría de la pieza que considera es la que aparece en la Figura 3.3. En ella se considera el ángulo de flanco ($\beta_f/2$), hasta ahora ángulo de doblado, compuesto por dos componentes: el ángulo de la chapa en la sección libre (Φ) y el ángulo de la chapa envuelta alrededor del punzón (ϕ) de forma que

$$\frac{\beta_f}{2} = \Phi + \phi \quad (3.13)$$

De entre los parámetros geométricos definidos en este modelo debe mencionarse la proyección de la sección libre o longitud del arco (para una posición dada x , o en la sección final L_f), la deflexión lateral de la sección libre en el punto de contacto chapa matriz (δ) y la penetración del punzón (Z).

Stelson y Gossard (1982) describen una técnica de identificación general para encontrar la ley constitutiva del material a partir de la curva fuerza-desplazamiento, combinada con un modelo de proceso de prensa con el objetivo de crear un controlador adaptativo.

Para predecir el desplazamiento correcto del punzón, el que lleva al ángulo de descarga deseado, el modelo también divide la recuperación en función de las dos componentes del ángulo de flanco, la recuperación en la porción de chapa del punzón y la recuperación en la sección libre de la chapa. Se considera un comportamiento de material elástico plástico y se conoce el diagrama fuerza-desplazamiento del punzón. A partir de todos estos datos, se estiman determinados parámetros que se convertirán en las entradas del algoritmo iterativo desarrollado por Stelson y Gossard (1982) para calcular la penetración del punzón.

b) Modelo de Stelson (1986)

En este modelo se construye un modelo híbrido de controlador de prensa entre dos enfoques, por un lado el enfoque de la retroalimentación (procedimiento automatizado del proceso de prueba y error manual) y por otro, el enfoque que proporciona el modelo matemático (que requiere de la geometría de la chapa y de las herramientas así como de la relación esfuerzo-deformación del material para calcular esta posición del punzón).

La diferencia principal del modelo de proceso de prensa de Stelson (1986) con respecto al modelo de Stelson et al. (1982) reside en el modelo de comportamiento de material que se asume. En este nuevo modelo se considera un comportamiento de material con endurecimiento por deformación, bajo la misma geometría de referencia para la chapa doblada, mostrada en la Figura 3.3.

c) Modelo de Tan et al. (1992)

Existen modelos cuyo enfoque incluyen intrínsecamente, en su propio planteamiento, la compensación de la recuperación. De hecho, algunos de los modelos que se muestran en esta sección tienen ese objetivo, por ejemplo el modelo de Tan et al. (1992), y el de Wang et al. (1993). Eso significa que se desarrollan modelos donde se ajusta la penetración del punzón, para que con ese valor se esté utilizando la técnica del sobredoblado y de esa manera se corrija y compense la recuperación.

Tan et al. (1992) desarrollan un modelo semiempírico bajo el marco anterior. El modelo combina el trabajo mediante un método analítico y un trabajo experimental (mediante los conocidos ensayos de prueba y error) para establecer una relación entre la profundidad del punzón y los correspondientes ángulos de descarga. Este modelo intentará predecir la penetración del punzón (bajo las condiciones anteriormente mencionadas de sobredoblado) para unos ángulos deseados. El proceso estudiado es el de doblado al aire, donde se controla el desplazamiento de punzón usando una prensa gobernada por CNC. En el estudio de Tan et al. (1992) empiezan a cobrar importancia los parámetros de

proceso en comparación con los parámetros del material según se contrasta mediante los experimentos, cuestión que se desarrollará posteriormente, como se verá en modelos de Wang et al. (1993) e Inamdar et al. (2002). Por ello se usan combinaciones diferentes de juegos matriz-punzón para investigar el efecto de la geometría del proceso sobre la recuperación.

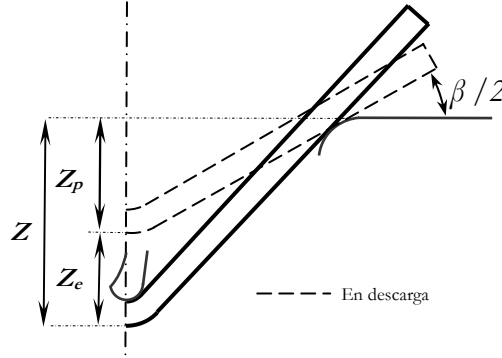


Figura 3.4 Consideraciones geométricas en el modelo de Tan et al. (1992)

Así pues el modelo de Tan et al. (1992) divide la profundidad de inserción en dos sumandos (ver Figura 3.4). El primero causa el ángulo permanente de doblado (Z_p) en situación de descarga, y el segundo (Z_e) permite sobredoblar la chapa (situación en carga) y por la tanto es el que compensa la recuperación elástica.

$$Z = Z_p + Z_e \quad (3.14)$$

Se considera que la geometría de la pieza doblada es la de una sección curvada alrededor del punzón (que no suele ser igual a la de su radio de punzón) junto con secciones rectas. En base a ella, para cuantificar Z_p se tiene en cuenta la geometría de la chapa en situación de descarga

$$Z_p = \left(R_d + \frac{t}{2} \right) (1 - \cos \beta) + \left[\left(w_d - \frac{D}{2} \right) - \left(R_d + \frac{t}{2} \right) \sin \beta \right] \tan \beta + \frac{D}{2} \tan \frac{\beta}{2} \quad (3.15)$$

Donde D se convierte en un valor afectado por un parámetro experimental, k , que indica como la curvatura se envuelve alrededor del punzón.

$$D = 2k \left(R_p + \frac{t}{2} \right) \sin \beta \quad (3.16)$$

En lo que respecta a Z_e se cuantifica como función lineal del ángulo de doblado, de manera experimental (cálculo de B_e y k_e mediante regresión lineal) en función del material y el proceso y después de tres pruebas de doblado:

$$Z_e = B_e + k_e \beta \quad (3.17)$$

d) Modelo de Wang et al. (1993)

El trabajo de Wang et al. (1993) es una trabajo clave en la investigación del doblado al aire. Wang et al. (1993) adoptan el modelo de tres secciones, introducido por (Stelson et al., 1982), y ahonda en su desarrollo de tal manera que se ha convertido en otro trabajo de referencia para los trabajos más recientes de investigación en recuperación ((de Vin et al., 2000), (Inamdar, Date, y Desai, 2000), (Gau et al., 2001), (X. Li et al., 2002), (Livatyali et al., 2001), (Carden et al., 2002), (Livatyali et al., 2002), (Livatyali et al., 2003), (Mentink et al., 2003)). Así pues, Wang et al. (1993) son los primeros en presentar una teoría completa para

el doblado de chapa y elaboran un modelo detallado de proceso de doblado al aire en prensa. El modelo incluye el desplazamiento de punzón necesario para sobredoblar y compensar la recuperación, la predicción de la recuperación y del ángulo de doblado bajo carga, y tiene en cuenta las influencias de las propiedades del material, del grosor de la chapa y la geometría de la matriz y del punzón en la deformación de doblado.

Consideran al igual que Gardiner (1957) y Queener y de Angelis (1968), que la recuperación elástica después de la descarga causa la redistribución de los esfuerzos y el fenómeno de la recuperación, en el que radio de la curvatura, R_s , de cualquier fibra en el doblado aumenta a R_f después de que el momento de doblado se retire. Si se asume que el momento de descarga tiene la misma magnitud pero signo opuesto al momento de doblado aplicado, entonces el cambio en la curvatura debido a la recuperación es:

$$\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} = \frac{M}{E'I} = \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{w \cdot t^3 \cdot E} \cdot (M_e + M_p) \quad (3.18)$$

O en términos de ángulo de recuperación:

$$\Delta\beta_s = \beta_{carga} - \beta_f = \Delta S \left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} \right) = \frac{M}{E'I} dS \quad (3.19)$$

Se puede observar que la ecuación (3.18) es en realidad casi la misma fórmula de Gardiner (1957), ecuación (3.2), pero Wang et al. (1993) son los primeros en expresar que el momento total de doblado se sostiene gracias a dos contribuciones, la del momento parcialmente elástico, M_e , y la del momento parcialmente plástico, M_p . Si se sustituye las ecuaciones correspondientes de M_e y M_p en las relaciones anteriores se observa que la recuperación es función de las propiedades del material, del grosor de la chapa, del radio de doblado, de los estados de tensión-deformación y del parámetro longitud del arco de doblado, que se definirá más adelante.

El estudio de (Wang et al., 1993) se basa en la distribución del momento y de la curvatura a lo largo de una chapa doblada al aire, sobre la que definen tres zonas y modos de deformación. Para ello definen un sistema coordenado para el doblado al aire, Figura 3.5, donde es importante resaltar el parámetro S , longitud del arco de doblado o brazo de doblado, en función del cual describirán la distribución de momento y curvatura. S es la distancia desde la sección en el punto A (último punto de contacto de la punta del punzón sobre la chapa, $S_A=0$) y la sección de interés. La longitud de arco máxima, es la longitud entre el punto anterior A y el punto de contacto entre chapa y matriz, S_l , correspondiente a β_l . El valor del arco de doblado, S , va aumentando durante la operación de doblado al aire, mientras que disminuye en otro tipo de operaciones de doblado, tal como el doblado en V o a fondo.

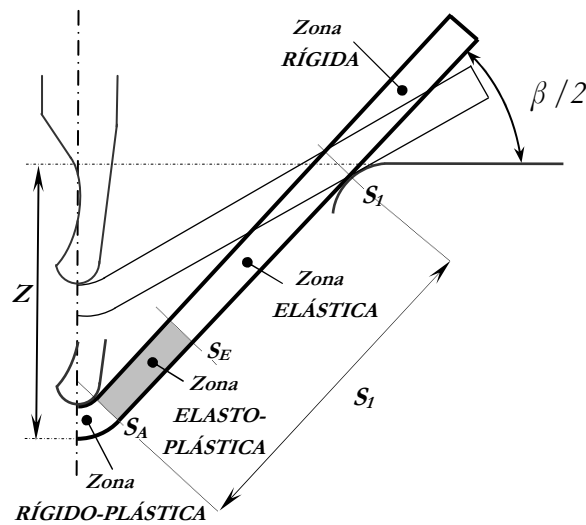


Figura 3.5 Sistema coordenado para el doblado al aire. Zonas y modos de deformación.

El estudio mantiene la hipótesis básica en el doblado al aire: (i) el cambio del grosor de la chapa durante el doblado es despreciable, sin embargo añade (ii) el momento de doblado es linealmente distribuido desde su máximo valor bajo la punta del punzón hasta cero en los hombros de la matriz y (iii) existen tres modos de deformación en la amplitud de la chapa. De acuerdo a esta última hipótesis, se especifica una distribución de momento de doblado en tres zonas o regiones como se muestra en la Tabla 3.3.

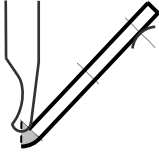
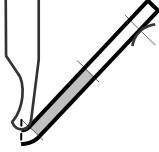
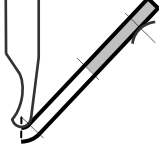
<i>Zona</i>	<i>Región</i>	<i>Modo de deformación</i>	<i>Distribución de momento</i>
	R. de contacto del punzón	Doblado completamente plástico	$M = M_A$
	R. elastoplástica	Doblado elastoplástico	$M(S) = M_A \cdot \frac{S_1 - S}{S} = M_{ep} \quad 0 < S \leq S_E$
	R. elástica	Doblado completamente elástico	$M(S) = M_E \cdot \frac{S_1 - S}{S_1 - S_E} \quad S_E < S \leq S_1$

Tabla 3.3. Distribución de momentos de doblado en las zonas de deformación. M_A , M_{ep} , M_E

A partir de la distribución de momento de doblado, el modelo de Wang et al. (1993) permite definir la distribución de curvatura en función de la anterior distribución de momento y por lo tanto en función también de la longitud del arco de doblado, Figura 3.6. Determinar la longitud de S_1 y dentro de ella, determinar o localizar S_E , se convierte en un paso crítico en el modelo. Pues en la zona delimitada por S_E , región elastoplástica, es difícil

distinguir que contribución de momento es plástico y cuál elástico, pues esta última participará en la recuperación total de la chapa.

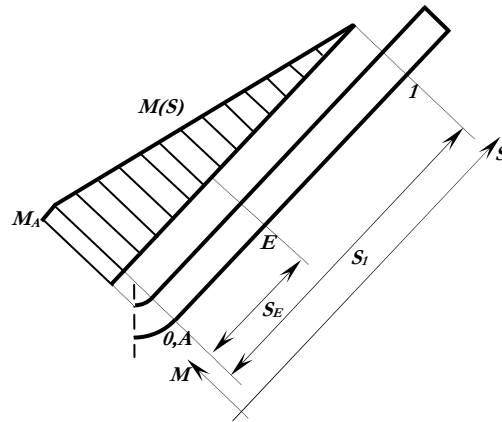


Figura 3.6 Distribución del momento de doblado en función de la longitud de arco, S .

Como se introducía en el párrafo anterior, en cuanto a la recuperación, una vez definida la curvatura se define una recuperación en cada sección. El ángulo de recuperación total es la suma de los ángulos de recuperación en secciones individuales a lo largo del arco de doblado. Por lo que la recuperación total será la suma de los ángulos de recuperación en cada sección (tanto en la zona elastoplástica y elástica):

$$\Delta\beta = \int_0^{S_I} \delta\beta_s \quad (3.20)$$

La ecuación anterior (3.20) es función de M_A y S_I y la variable β_s representa el ángulo de recuperación.

Cuanto más largo sea el brazo de doblado, mayor será la recuperación total. Por lo que, la precisión del cálculo de la recuperación dependerá de la precisión en calcular los valores de S_I y S_E , que como ya se había comentado antes, son difíciles de calcular ya que varían durante el proceso de doblado al aire. El modelo de material considerado es el de endurecimiento por deformación no lineal bajo condiciones de deformación plana.

En base a lo explicado, y a modo de recapitulación, en la estrategia de Wang et al. (1993) para modelar el doblado al aire se distinguen cuatro pasos importantes:

1. Establecer la distribución de momento y curvatura a lo largo del arco doblado entre el punzón y la matriz
2. Determinar los ángulos de rotación a lo largo del arco doblado
3. Calcular el ángulo de doblado bajo carga y la recuperación
4. Definir el golpe de punzón necesario para compensar la recuperación mediante sobredoblado

Se observa que este modelo analiza en detalle el doblado al aire. Los investigadores incluso extienden las formulaciones, en menor profundidad, al proceso de doblado en matriz de dado deslizante y en matriz en U para comprobar su validez en procesos de carácter diferente al doblado al aire.

e) Modelo de Vin et al. (1996)

Dentro de los modelos de tres secciones, se encuentran los modelos de aproximación *wrap-around*, término acuñado por de Vin (2000) para definir su propio modelo de proceso desarrollado para el doblado al aire en (de Vin, 1994) y (de Vin et al., 1996).

El término de “modelo *wrap-around*” se usa en (de Vin, 2000) para definir los modelos en los que se calcula la geometría de la chapa a partir de los momentos de doblado locales, y en los que la información del radio del punzón es un punto de partida. Se supone un comportamiento de envoltura alrededor del punzón que permite calcular el momento de doblado bajo el punzón y las fuerzas de reacción para un desplazamiento de punzón dado.

A partir de aquí, los momentos locales de doblado y las curvaturas locales se pueden calcular. Aunque determinar la zona de envoltura requiere algunas iteraciones de cálculo. Estos modelos proporcionan una determinación más realista de la geometría de la chapa y por lo tanto del desplazamiento del punzón, que los modelos más simples. La zona deformada en estos modelos es mayor que la que se esperaría sólo debajo del radio del punzón. Lo que puede aportar información más útil al diseño y ayuda a evitar problemas de montaje.

Aunque los modelos *wrap-around* ofrecen una descripción mejor del proceso de doblado que los modelos más simples (el geométrico, por ejemplo), la suposición de un envolvimiento alrededor del punzón sigue siendo una limitación, pues en muchas ocasiones éste no se produce durante el doblado. La ausencia de la llamada zona *a* depende del comportamiento del material, del ángulo de doblado y de la geometría de la herramienta.

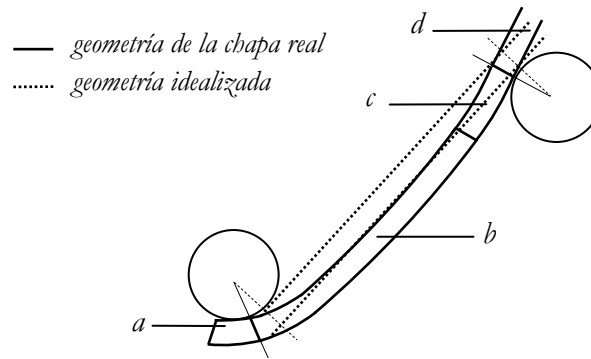


Figura 3.7 Geometría de la chapa en el modelo de tres secciones de (de Vin et al., 1996)

La geometría de partida para de Vin (1996) y su modelo *wrap-around* se ajusta a la geometría del modelo de tres secciones pero con una particularidad no contemplada por Wang et al. (1993) y los modelos de tres secciones, la zona *b* o zona elasto-plástica se considera una zona de radio variable como puede observarse en la Figura 3.7. Por ese motivo, distingue claramente las regiones elásticas, elasto-plásticas y plásticas; establece unas relaciones y desarrolla unos algoritmos para poder calcular los radios de doblados locales en la región *b* de radio variante.

Relación entre el momento de doblado local y el radio de doblado local

Como ya se había visto en el modelo anterior, el momento de doblado puede dividirse en dos contribuciones: una elástica (M_{el}) y otra elasto-plástica (M_{pl}), según:

$$M = M_{el} + M_{pl} \quad (3.21)$$

Calculadas de la siguiente manera,

$$M_{el} = 2 \cdot \int_0^{y_{ep}} E' \cdot \epsilon_x \cdot y \cdot dy$$

$$M_{pl} = 2 \cdot \int_{y_{ep}}^{t/2} C'' \cdot (\epsilon_x + \epsilon_0)^n \cdot y \cdot dy \quad (3.22)$$

En (de Vin et al., 1996) se realizan las siguientes consideraciones: para la contribución elástica, si se considera que ε_x es igual a y/R_m y ε_{ep} igual a $(E'/C')^{1/n-1}$ y para la zona elastoplástica se considera que $(\varepsilon_x + \varepsilon_0)$ de la ecuación anterior puede describirse como $(y/R_m + \varepsilon_0) = V$ y $dy = R_m dV$ para operar los cambios correspondientes a las nuevas variables y obtener las siguientes expresiones

$$M_{el} = \frac{2}{3} \cdot E' \cdot R_m^2 \cdot \varepsilon_{ep}^3 = \frac{2}{3} \cdot E' \cdot R_m^2 \cdot \left(\frac{E'}{C'} \right)^{\frac{3}{n-1}} \quad (3.23)$$

$$M_{pl} = 2 \cdot C' \cdot R_m^2 \left[\frac{1}{n+2} (V_{\max}^{n+2} - V_{\min}^{n+2}) - \frac{\varepsilon_0}{n+1} (V_{\max}^{n+1} - V_{\min}^{n+1}) \right]$$

donde, $V_{\max} = \frac{y_{ep}}{R_m} + \varepsilon_0$ y $V_{\min} = \frac{s}{2R_m} + \varepsilon_0$.

Usando la última ecuación de (3.23), contribución plástica, se pueden determinar las curvaturas locales de la chapa bajo condiciones de carga. Mediante ambas ecuaciones de (3.23), se puede obtener una representación gráfica, Figura 3.8, de la relación entre la curvatura y el momento de doblado. En la gráfica se puede observar como se distribuye el momento total (M) en función del momento elástico (M_{el}), importante en radios de curvatura elevados, y del momento plástico (M_{pl}), significativo en radios pequeños.

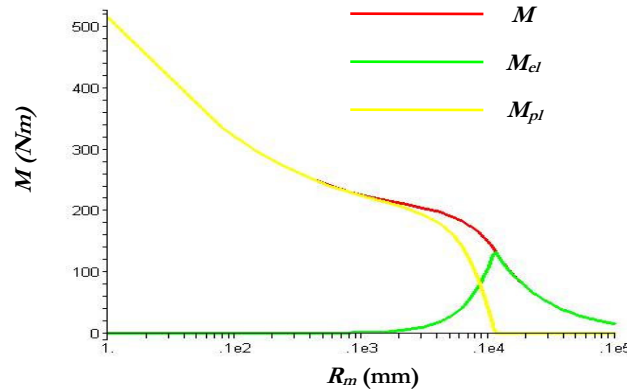


Figura 3.8 Relación curvatura-momento de doblado. Datos de partida para la gráfica: Material, acero ($E=2.1 \cdot 10^5$ MPa, $\nu=0.218$, $K=570.2$ MPa y $n=0.218$, $\varepsilon_0=0.008$), $t=2$ mm., Utillaje, $R_p=0.8$ mm., $R_d=0.5$ mm., $w_d=16$ mm

A pesar de establecer las ecuaciones anteriores para el momento elástico y para el momento elastoplástico, la ecuación de momento total (3.21) no puede describirse de manera que se pueda obtener explícitamente la curvatura en función del momento. Para ello, de Vin (1994) desarrolla un algoritmo numérico de procedimiento incremental iterativo para encontrar qué radio de doblado (siempre en la sección *b*) corresponde al del momento de doblado local. Esto le permite calcular la geometría bajo condiciones de carga. Utiliza otro algoritmo iterativo parecido para construir la geometría de la chapa después de la recuperación y así cuantificar el ángulo de doblado final.

f) Modelo de Anoyke-Siribor y Singh (2000)

El trabajo de Anokye-Siribor et al. (2000) desarrolla un modelo analítico de doblado en el que se realiza una identificación material *in-process*. En la creación de este modelo analítico, introduce un nuevo concepto teórico, considerar la geometría de chapa después de la deformación en una zona parabólica y dos zonas rectas tal como se muestra la Figura 3.6.

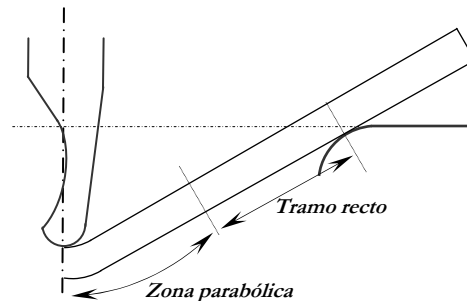


Figura 3.9 Geometría de la chapa bajo la aproximación parabólico-recta de (Anokye-Siribor et al., 2000)

A partir de esta aproximación geométrica desarrolla las ecuaciones correspondientes para encontrar el ángulo de doblado en carga, así como el desplazamiento del punzón, sin llegar a formular la recuperación, que aunque se tiene en cuenta no es objetivo de su trabajo.

g) Modelo de Thanki et al. (2001)

El objetivo del modelo presentado por Thanki et al. (2001) es el de encontrar la posición correcta de retorno del punzón, de manera que el ángulo $\beta/2$ en descarga sea el ángulo deseado. Teniendo en cuenta las propiedades del material, de la chapa, la geometría del conjunto matriz-punzón y la recuperación.

Utiliza las definiciones de Stelson et al. (1982) en cuanto a ángulo, ecuación (3.13). Y define dos tipos de recuperación: la recuperación de la porción de chapa bajo el punzón, y otra recuperación, la de la porción libre de la chapa. En cada caso define la relación curvatura-momento asociada y define dos algoritmos iterativos diferentes (con zona de *wrap-around* el primero, sin ella en el segundo, y por lo tanto $\varphi=0$) para establecer el valor del desplazamiento del punzón.

h) Resumen

Numerosos estudios fundamentales a través de los años se han dirigido hacia el intento de obtener una comprensión básica del comportamiento del doblado al aire y de la recuperación. Estas actividades de investigación se han extendido desde la elasticidad a la plasticidad, desde el doblado de pequeñas a grandes curvaturas, desde el doblado puro al doblado con tracción (este último no considerado en esta recapitulación de modelos). A pesar de que se ha progresado mucho en lograr modelos de doblado de chapa mejorados, sigue siendo cierto que existe la necesidad de seguir investigando en las teorías existentes. Como resultado de la revisión de la literatura efectuada en su trabajo, Wang et al. (1993) indicaron que en las formulaciones del doblado se deberían incorporar las siguientes características, relacionadas respectivamente con el material, la geometría y el proceso. Las características relacionadas con el material: el endurecimiento por deformación real y la anisotropía normal y plana de la chapa, para considerar los efectos de la orientación del doblado sobre la capacidad de doblado (*bendability*) y la recuperación.

Con la geometría de deformación tienen que considerarse la distribución de deformación no lineal o real a lo largo del grosor de la chapa, el movimiento del eje neutro y la longitud de doblado desarrollada.

Con el proceso: la geometría de la herramienta y sus dimensiones (es decir la obertura de la matriz y los radios de matriz y del punzón) y la fricción de la matriz debería reflejarse en el modelado del proceso.

Después de este repaso cronológico a los modelos desarrollados durante los últimos 20 años y las indicaciones anteriores (Wang et al., 1993) para investigaciones futuras, se puede observar que los investigadores han encabezado estudios similares bajo varios contextos. Según Yuen (1996), muchos de estos estudios no se han apartado de los enfoques básicos adoptados por los investigadores como Gardiner (1957), Queener et al. (1968) o Wang et al. (1993). El motivo es que cuanto más complicadas son las relaciones constitutivas o qué distribución de momento de doblado se considere, la formulación resultante requiere entonces de soluciones numéricas. Por ese motivo a continuación se hace un breve repaso sobre la relación entre el doblado al aire y la recuperación con el método de elementos finitos.

3.3 Doblado al aire y método de elementos finitos

Como se ha comentado en la introducción de este capítulo las técnicas de simulación numérica, como el método de los elementos finitos, permiten considerar con mayor precisión y rigurosidad el proceso de doblado que las aproximaciones resolubles por métodos analíticos. A pesar de que los elementos finitos no son el objetivo principal de esta tesis, la relación de estos métodos con el modelado del doblado y con la predicción de la recuperación, es muy importante. Los resultados de las simulaciones se utilizan en muchos estudios como experimentación propiamente dicha o como complemento de ella. Por este motivo en esta sección se debatirán las relaciones e implicaciones entre el doblado al aire y recuperación con la simulación numérica por elemento finitos.

Como se ha expuesto, el proceso de doblado y el estudio de la recuperación es un problema complejo de resolución difícil. Se trata de un problema definido en el espacio ya que es un proceso de deformación fuera del plano de la chapa. También, se caracteriza por ser un problema, que aunque se puede formular en pequeñas deformaciones precisa de una formulación en grandes desplazamientos; por lo tanto, se trata de un problema con no linealidades geométricas. Además, debe considerarse el comportamiento no lineal del propio material en su comportamiento elasto-plástico.

Asimismo, el trabajo con métodos numéricos permite introducir más factores (simplificados en otros tipos de enfoques) y más variables del comportamiento del material y de la geometría que en la formulación analítica. Con el análisis numérico se pueden tener en cuenta, entre otros, factores tales como la forma de la línea de doblado y el desplazamiento de la capa neutra (Math et al., 2002), cambios en las condiciones de contacto y de fricción durante el proceso de conformado, variación de la distribución de la temperatura en la pieza durante el proceso y su influencia en el comportamiento elasto-plástico no lineal del material.

Esta situación y la idoneidad del tratamiento numérico para acometer problemas complicados permite que todavía existan esfuerzos de investigación de intensidad remarcable que se centran en el fomento del análisis de elementos finitos de los procesos de chapa (Cho et al., 2003).

3.3.1 Revisión histórica sobre la evolución de los procesos de chapa y su análisis por elementos finitos

Después de los sesenta, los métodos de análisis de elementos finitos han ido progresando rápidamente según se han ido desarrollando y aumentando la capacidad de cálculo de los ordenadores. A beneficio de ello, han avanzado de manera muy activa investigaciones para estimar el comportamiento mecánico del proceso de deformación de chapa. Actualmente la aplicación de esos estudios se está expandiendo al campo práctico de la producción y se han usado muchos métodos numéricos para el análisis de los procesos de deformación de chapa (Jung, 2002).

Durante la década de mediados de los ochenta a mediados de los noventa hubo un gran avance en el uso de las simulaciones de elementos finitos para los procesos de deformación de chapa. Estos avances, según Taylor et al. (1995) en su mayor parte, pueden atribuirse a dos factores: el primero, el aumento exponencial de la velocidad de las computadoras disponible para el análisis y el segundo, la madurez del software de elementos finitos disponibles para el análisis.

Por lo que se puede afirmar que el método de los elementos finitos es el que se usa generalmente en la actualidad, a causa de la amplia aplicación comparada con otros métodos y el análisis preciso que efectúa Jung (2002). Representa una herramienta de predicción de procesos de deformación, que se usa ampliamente, de hecho, muchos ingenieros consideran los códigos de simulación de método de elementos finitos una herramienta esencial e indispensable para su trabajo (Kawka et al., 1998). Por su parte, las empresas y los institutos que trabajan con los códigos para las simulaciones numéricas están desarrollando también los sistemas para la optimización automatizada de los procesos de deformación (Gantar et al., 2002).

De esta manera, la deformación de chapa está cambiando, gradualmente, de ser un proceso de artesanía o de oficio, a ser un proceso basado en la ingeniería (Forcellese et al., 1998). Se estudian todos los temas importantes relacionados con la deformación de chapa como la determinación de la forma del producto óptima así como de la geometría inicial de partida óptima, la predicción de la fractura, la predicción del grosor de chapa final, la predicción de las arrugas, la predicción de las cargas que actúan sobre las superficies de la herramienta activa, la predicción de la recuperación y los esfuerzos residuales en el producto (Gantar et al., 2002). El análisis de elementos finitos se perfila como la técnica más popular para simular el comportamiento del material y de las herramientas durante el ciclo completo de una operación de deformación de metal.

Un ejemplo de la implantación de los elementos finitos es el mostrado por Gantar et al. (2002) en la industria de la automoción. En esta industria a menudo se requieren los resultados de las simulaciones numéricas que han realizado con anterioridad las compañías de fabricación de las herramientas. Cuando la empresa de fabricación de la herramienta usa las simulaciones numéricas, existe un diálogo mejor con el diseñador del producto final. Es más fácil discutir los cambios de diseños del producto para conseguir una mejor capacidad de formado (*formability*). Los clientes son conscientes de los beneficios del uso de las simulaciones numéricas y prefieren empresas de fabricación de herramientas que ya hayan implantado simulaciones numéricas en sus ciclos de desarrollo. Porque es posible introducir cambios en las primeras etapas del diseño sobre el proceso de producción y el diseño de la herramienta, manteniendo los costes bajos e incluso minimizando los retrasos en las entregas.

3.3.2 Aplicación de los *FEA* en la predicción de la recuperación

Como ya se introdujo en apartados anteriores, la recuperación no se produce únicamente en el doblado al aire, sino que es de importancia en el doblado a fondo, así como en embuticiones poco profundas (estampaciones) y en embuticiones profundas. En estos otros procesos, tener en cuenta el fenómeno de la recuperación se traduce en el correcto diseño y construcción de las matrices para producir la geometría final de la pieza con la precisión deseada. La fase de construcción y puesta a punto de este tipo de matrices se caracteriza fuertemente por ser un proceso de prueba y error.

Bajo esta situación, la aplicación de los *FEA* en la predicción de la recuperación es útil, menos costosa y permite simular más rápidamente el proceso sobre el ordenador antes del desarrollo experimental y de que las pruebas de las matrices se lleven a cabo. De este modo, las mejoras en las condiciones de proceso y del diseño de la matriz se hacen en una etapa de ingeniería, antes de que las matrices se fabriquen y se invierta en aparatos de producción caros, convirtiéndolo en una experimentación costosa. Se trata de encontrar una manera efectiva de predecir los parámetros de deformación óptimos y por lo tanto reducir el tiempo y el dinero que se invierte con los métodos de prueba y error -en este caso- de las técnicas de diseño de doblado. Precisamente, la aplicación de los *FEM* a los procesos de deformación metálica se traduce en el uso de una herramienta poderosa para un diseño económico y para reducir esos procesos de prueba y error tan costosos.

En particular en el proceso de doblado, se considera que la distribución de grandes deformaciones elastoplásticas en toda la chapa metálica es compleja. Por eso en el caso de la simulación de la recuperación, una integración numérica adecuada es un requerimiento para evaluar correctamente el perfil de tensión en la chapa metálica bajo la condición de doblado. Un enfoque numérico con el método de elementos finitos es el más apropiado como herramienta potente para dar una solución práctica. Sin embargo, la calidad de la predicción elastoplástica depende de la formulación de los elementos finitos, del grado de discretización empleado, de la ley constitutiva usada, etc. Todos estos aspectos pueden producir en el cálculo un error importante. Un trabajo interesante en este campo es el realizado en (Nilsson et al., 1997) para predecir la recuperación en el doblado libre en una matriz en V. Se estudiaron 8 materiales diferentes de diferente grosor. El proceso se simuló con el código Nike2d® y los resultados de las simulaciones comparadas con experimentos, presentaron una buena correlación.

A pesar de todo, se reconoce que la recuperación es un fenómeno suficientemente complicado y que es duro simularlo de manera precisa. Recientes trabajos ilustran la evolución del estado del arte de la predicción de la recuperación mediante elementos finitos ((X. Li et al., 2002) y (K. P. Li et al., 2002)).

La existencia de más de un fenómeno relacionado con la precisión de la geometría final obtenido en un proceso de deformación, y en este caso el doblado, convierte en tema crucial de investigación, según Cho et al. (2003), el diseñar herramientas de doblado que aseguren la precisión dimensional de los productos. Además del fenómeno de la recuperación, otro fenómeno consecuencia de la descarga es el curvado de la pared doblada (*sidewall curl*). Este efecto no se ha definido con anterioridad pues es sobretodo muy importante en el doblado en U.

Por eso, el diseño de la herramienta, para un material de chapa específico y una dimensión de producto, debería basarse en la predicción de la cantidad de la recuperación elástica. No obstante, como ya se ha ido señalando a lo largo del trabajo, la determinación de los parámetros de proceso se hacía tradicionalmente de acuerdo a un procedimiento de prueba

y error, invocando el saber hacer empírico del diseñador o realizando experimentos caros y que consumen mucho tiempo (Cho et al., 2003).

A pesar de que los procesos de doblado de chapa, tales como el doblado en V, el doblado en U, el agrafado (*hemming*) y el bordonado, parecen ser procesos de deformación simples (ya se ha ido detallando la falsedad de tal afirmación), la obtención de una simulación numérica precisa del proceso de doblado completo tampoco es una tarea fácil.

a) Tipos de simulación de recuperación

Según Guo et al. (2002), a menudo se usan tres tipos de simulación de recuperación:

1. El primer método recupera toda la información (forma de la chapa, deformaciones, tensiones, geometría y posición de la herramienta, etc.) al final de cada etapa de deformación y simula el problema físico real. La herramienta se retira progresivamente, las tensiones residuales se relajan para obtener la geometría de la chapa, por ejemplo el trabajo de (Papeleux et al., 2002).
2. El segundo método consiste en una simulación similar pero sin considerar las herramientas reales. Las acciones de las herramientas se sustituyen por algunas fuerzas externas equivalente para evitar el tratamiento del contacto.
3. En el tercer método, las fuerzas internas se liberan mediante una resolución no lineal sin considerar ninguna fuerza externa. Un método muy simple llamado “Simulación de recuperación en un paso” con el propósito de usar un único cálculo elástico lineal.

b) Parámetros que influyen en la simulación numérica de la recuperación

Para poder diseñar apropiadamente las herramientas para compensar la cantidad de recuperación es necesario tener una información precisa sobre la recuperación en las aplicaciones industriales. Aunque el análisis de elementos finitos tiene éxito simulando operaciones industriales de deformación de chapa complejas, la precisión y la fiabilidad de la aplicación de esta técnica en la recuperación no ha sido ampliamente demostrada. Varios parámetros físicos, así como numéricos, influyen este fenómeno y su predicción numérica (Papeleux et al., 2002). En cuanto a los parámetros físicos, ya se han ido presentando a lo largo del trabajo, incluyen: las propiedades del material, las leyes de endurecimiento, el coeficiente de fricción, la fuerza del pisador y el procedimiento posible de descarga (Papeleux et al., 2002). Referente a los parámetros numéricos a los que el análisis de elementos finitos de la recuperación muestra determinada sensibilidad se encuentran: el número de puntos de integración a través del grosor, el tipo de elemento, el tamaño de la malla, el ángulo de contacto por elemento sobre el hombro de la matriz, los efectos de la inercia y el algoritmo de contacto, entre otros. En el estudio de (Math et al., 2002), se ha probado que la calidad de la malla es un factor esencial en la ejecución con éxito de un análisis *FEM*. El número, tamaño y forma de los elementos son de importancia para la precisión de la solución. Y el número de nodos especialmente influye en la simulación de las fuerzas de fricción. En el estudio de (Kawka et al., 1998) se discute sobre la importancia de seleccionar el tipo de elemento más adecuado entre el tipo cáscara (*shell element*) o el elemento sólido, más idóneo para la simulación. Esta es una preocupación de carácter general, ya que realizar esa selección se tiene que hacer en cualquier tipo de proceso, y puede dirigirse a todos los usuarios de códigos *FEM*. Dentro del tipo de elementos finitos que se usan en la simulación, los elementos basados en desplazamientos de bajo orden, debido a su simplicidad y robustez, continúan siendo populares en la solución de problemas prácticos (Bui et al., 2004). A su vez, el uso de elementos finitos convencionales de bajo orden, sin el tratamiento apropiado, puede ser responsable de

predicciones de baja calidad a causa del fenómeno numérico de bloqueo volumétrico o de cortante (*volumetric locking or shear locking*). En algunos estudios, como el de (Bui et al., 2004), se utilizan otro tipo de elementos con una formulación mejorada y se adopta una técnica de deformación mejorada (*EAS, Enhanced Assumed Strain*) que se aprovecha para eliminar el bloqueo o *locking*.

Luego, según Papeleux et al. (2002), la amplia variedad de parámetros que deben tenerse en cuenta hace muy costosa la simulación de la recuperación.

c) Técnicas o Algoritmos de resolución

El tipo de técnica o de algoritmo de resolución que utilizan los métodos de elementos finitos permite dividirlos en dos grupos. El primer grupo se basa en códigos que utilizan simulaciones implícitas, y el segundo, en códigos que utilizan simulaciones explícitas.

Los códigos de elementos finitos implícito-estático convergen a través de muchas iteraciones con un gran intervalo de tiempo en cada paso/etapa. Este método ha sido uno de los más usados porque puede obtener comparativamente resultados más precisos.

El segundo grupo, los códigos explícito-dinámico convergen ajustando una ecuación de balance dinámica con intervalos de tiempos pequeños en cada etapa (Jung, 2002), pero sin la necesidad de realizar un cálculo iterativo en cada una de ellas. Este tipo de formulaciones se pueden aplicar para resolver problemas transitorios dinámicos, como por ejemplo el impacto de un objeto o una explosión. Asimismo, son también muy eficientes para problemas casi-estáticos (no típicamente dinámicos) con altas no linealidades que involucran cambios en las condiciones de contacto, como lo son las simulaciones en conformado de chapa.

Las técnicas de modelado numéricas en diferentes análisis usan procedimientos de elementos finitos implícitos y explícitos, como ya se ha comentado, o también puede usarse una combinación de ambas. A veces es necesario evaluar la efectividad y cómo de idóneos son tales procedimientos (Taylor et al., 1995).

Acerca de los algoritmos de resolución aplicados a la simulación de la recuperación, algunos investigadores usan el algoritmo explícito. Estos algoritmos tienen varias ventajas clave sobre algoritmos implícitos estáticos para los problemas de deformación de chapa. Primero, no existe una resolución de ecuación no lineal. Consecuentemente, el coste de cálculo de una solución no crece cuadráticamente con el tamaño del problema, pues el principal problema con la simulación de la recuperación es la cantidad de tiempo requerido para obtener una solución en estado estacionado, más allá del transitorio. En general, el coste de cálculo de una solución se escala linealmente con el tamaño del problema en el procedimiento explícito dinámico. Segundo, los grandes desplazamientos, las restricciones de contacto tridimensional y el deslizamiento con fricción son relativamente más fáciles de implementar en un procedimiento explícito que en uno de implícito. El mayor inconveniente de utilizar los procedimientos explícitos dinámicos para el análisis de la recuperación es que se trata de un procedimiento dinámico usado para solucionar un problema casi-estático. Por ello, generalmente requiere que sea introducido en el análisis una escala temporal artificial para conseguir una solución de coste computacional aceptable.

Por ello parece ser más eficiente usar algoritmos implícitos estáticos, pues estos han jugado un rol principal en el análisis de la recuperación, y existen autores que defienden que la predicción de la recuperación encaja más con este tipo de algoritmos estáticos. Para un análisis más detallado sobre ambos enfoques, en (Taylor et al., 1995) se realiza un estudio en profundidad, donde diferentes autores discuten las técnicas implícitas *versus* las explícitas en técnicas de elementos finitos.

Otros autores aprovechan las ventajas que aportan ambos códigos. Dado que la recuperación es un problema principalmente elástico con desplazamientos moderados, que involucra pérdida de contacto e incluye no-linealidades no muy acusadas, se puede resolver el problema de una forma más rápida con una formulación implícita en elementos finitos. Por lo tanto, es por este motivo que muchos autores realizan su aproximación a la recuperación haciendo un análisis explícito del problema de conformado de la chapa (se extraen las cargas muy cuidadosamente, introduciendo un amortiguamiento artificial para obtener la solución en un tiempo razonable) y posteriormente se traslada la solución a un problema implícito para analizar la recuperación elástica.

3.3.3 Consideraciones a la simulación de la recuperación mediante *FEA*

Se pueden establecer tres tipos de dificultades relacionadas con la predicción de la recuperación mediante *FEA*:

1. Una de las dificultades de los *FEA* es enfrentarse a una descripción correcta constitutiva del material deformado. En particular, los materiales son sensibles al ratio de deformación y a la temperatura, los materiales bajo endurecimiento por deformación no isótropa y aquellos propensos al efecto Bauschinger pueden padecer cambios. Por este motivo hay que tener precaución cuando se usan modelos de determinados materiales, pues algunos se encuentran bajo investigación y algunas veces disponibles en paquetes *FEA* comerciales.
2. Otro problema básico de los *FEA* son los fenómenos de contacto. Esto incumbe la detección de las condiciones de contacto y la descripción física de la fricción. Las leyes de fricción que son las más adecuadas para la deformación del metal en frío no se representan muy bien en los paquetes *FEA* (Huang y Leu, 1995b). Dudas respecto a los valores de los parámetros de fricción siempre acompañan a la simulación de este fenómeno. Las geometrías de una chapa doblada dependen de su historia de estado de deformación, y se ven afectadas fuertemente por la historia del proceso de contacto entre la herramienta y la chapa. Es importante describir correctamente las condiciones de contacto en cualquier instante durante el proceso de doblado.
3. La tercera causa de preocupación cuando se usa un *FEA* es el tiempo requerido para los cálculos. El material, las no-linealidades geométricas y las condiciones de contorno implicadas en este tipo de análisis requieren muchas iteraciones con lo que se aumenta el tiempo de cálculo dramáticamente. Hay muchos sistemas capaces de una optimización automatizada para los procesos de deformación, pero a veces se corre el riesgo de que consuman mucho tiempo. Pues los tiempos de cálculo de simulaciones numéricas complejas de procesos de producción industrial son altos. Se traduce en una necesidad para estos sistemas, mejorar el tiempo de cálculo para las aplicaciones industriales prácticas (Pourboghrat et al., 2000). Al mismo tiempo de necesitar un gran número de iteraciones para determinar el establecimiento óptimo de los parámetros de entrada muchas veces el análisis no converge fácilmente a la solución deseada. El análisis de elementos finitos con modelos 2D se puede usar para predecir de manera precisa: la recuperación, la capacidad de doblado y las cargas de la herramienta, pero el análisis puede llevar varias horas, y el pre- y post-procesado incluso pueden consumir más tiempo. La predicción para los esfuerzos residuales, la recuperación y los defectos de superficie aún no se encuentran en un nivel satisfactorio. Otros autores que trabajan con las simulaciones numéricas informan de los mismos problemas a pesar de cuál sea el software que se use.

Está claro que un procedimiento de compensación de recuperación basado totalmente en *FEA* puede llevar a muchos problemas con los que sólo puede enfrentarse un usuario adecuado y calificado. Por lo que a veces, lo que es necesario es realizar de una manera simple, rápida y fiable una simulación de la desviación de la herramienta y de la recuperación del componente. Este es el fundamento de la propuesta de un enfoque alternativo basado en combinar modelos físicos con *FEA*.

En el desarrollo de optimizaciones automáticas, los criterios de predicción para algunos problemas (especialmente las arrugas, el pandeo y los defectos de superficie) durante la deformación todavía no son fiables (Gantar et al., 2002). Para obtener resultados prácticos de esas simulaciones de ordenador y probar su relativa precisión, hay que realizar estudios con los que validar los resultados experimentales (Math et al., 2002).

Varios métodos analíticos se han propuesto para predecir el cambio en el radio de curvatura y el ángulo debido a la recuperación para condiciones de deformación planas y formas axisimétricas. Estos métodos son aproximados y asocian a la fuente de recuperación una distribución de deformación y de momento de doblado no uniforme después de la descarga. El método de elementos finitos (*FEM*) se usa ampliamente para predecir la recuperación en la investigación y en la industria. Actualmente la investigación se centra en implementar modelos con endurecimiento en formulaciones de elementos finitos para predecir de manera precisa el comportamiento del material durante la descarga. La mayoría de los paquetes *FEM* usan leyes de endurecimientos cinemáticas e isotrópicas para simular el comportamiento de descarga. Sin embargo, ninguno de ellos predice de forma precisa el comportamiento del material durante la descarga de un proceso de carga cíclica.

De todo lo expuesto en esta sección se desprende que la simulación del proceso de doblado mediante *FEA* sigue siendo un tema en reinvestigación por parte de muchos investigadores, ya sea en la simulación de la recuperación y precisión en el doblado (tema que nos ocupa), o abarcando de una forma más general los procesos de doblado al aire o de cualquier otro tipo.

3.4 Recuperación y redes neurales

Recapitulando lo expuesto hasta el momento en torno a los procesos de doblado y el fenómeno de la recuperación, se han desarrollado modelos analíticos (expuestos en el punto 3.2) para controlar y adaptar las condiciones de operación de los procesos, y para representar correctamente las variaciones del material. Lo que en un sistema de doblado al aire se traduce en tener como objetivo el poder conseguir piezas con tolerancias estrechas y en consecuencia controlar la recuperación elástica. También se ha descrito, que en la elaboración de los modelos analíticos se tienen que asumir hipótesis de simplificación y aunque se han ido desarrollando métodos para mejorar la calidad de los datos de entrada en los modelos y en los sistemas de predicción (ver 2.3.5b), Control adaptativo del proceso (*In-process Control*) se siguen omitiendo factores que afectan a la recuperación. Un enfoque alternativo y prometedor de control en los procesos o en los sistemas de predicción son los sistemas basados en redes neurales artificiales o *artificial neural networks* (*ANNs*).

Las redes neurales artificiales se han estudiado durante muchos años con la esperanza de poder conseguir representaciones parecidas a las humanas para la resolución de problemas que generalmente están mal definidos y que requieren un gran procesado. El cerebro humano efectúa ese procedimiento mediante millones de neuronas trabajando conjuntamente. De una manera parecida la red neural o *ANN* se compone de muchos elementos computacionales, que operan en paralelo conectados por nexos de pesos

variables, que se van adecuando durante el proceso de aprendizaje. Aunque los desarrollos de modelos matemáticos detrás de las *ANN* existen desde los años sesenta, no ha sido hasta la década de los noventa cuando se han empezado a desarrollar en aplicaciones de fabricación.

Un paso fundamental en la utilización de las redes neurales es el conseguir los datos necesarios de entrada y de salida para la etapa de entrenamiento. La obtención de estos datos puede realizarse mediante modelos de proceso (técnicas *FEA* descritas en la sección anterior) o mediante experimentación real del proceso, en este caso de doblado. Si se obtienen mediante el primer método se elimina una experimentación posiblemente costosa, mientras que si se obtienen mediante experimentación manteniendo las mismas condiciones, la información extraída es más precisa.

En los últimos años muchos grupos de investigación han estudiado el uso de las redes artificiales para controlar los procesos de deformación de chapa metálica. La deformación metálica es un candidato ideal para el control por medio de red neural debido a los efectos no lineales y a las interacciones de los parámetros de los procesos. Un ejemplo de proceso de deformación metálica que se han beneficiado del control o predicción de la recuperación mediante redes neurales en un proceso diferente al doblado, se puede encontrar en el estudio de (Cho et al., 2003) donde se usó una red neural para predecir la fuerza en el rolado en frío. Otro ejemplo de aplicación fuera del ámbito de la chapa, pero manteniéndonos en el campo de deformación es el estudio realizado por Kim et al. (2000) en el que mediante el uso de una red neural se reduce el número de simulaciones necesarias de elementos finitos para diseñar la geometría de un molde para una polea circular, así como la geometría de la pieza. La adaptación con éxito, de la red anterior también les permite determinar la dimensión inicial del *billet* o barra de partida para un producto con nervios axisimétricos.

Ejemplos de aplicaciones, en donde se usa una red neural para controlar o predecir la recuperación, pero en procesos distintos al doblado al aire en matriz en V, son los de Dunston et al. (1996) en un proceso de deformación de barras en frío, Vasile et al. (2000) en un proceso de doblado no convencional y los de Cao et al. (2000) y Viswanathan et al. (2003) en un proceso de doblado en U.

Dunston et al. (1996) usan un modelo de red neural para automatizar el control de la recuperación de barras reforzadas de acero dobladas en frío (llamadas *rebars*). La red neural que utilizada tiene 20 neuronas en la capa de entrada (15 para los valores de carga que corresponden al conjunto de los ángulos doblados de 0 a 14°, y las 5 neuronas restantes a: el tamaño de barra reforzada o *rebar*, el ángulo de doblado, el módulo elástico, el momento de fluencia estimado y un nodo de bias); y una única neurona de salida, el ángulo de recuperación. (Vasile et al., 2000) estudian la aplicación del método de propagación hacia atrás (*backpropagation algorithm*) en una red neural para predecir el ángulo de doblado en un proceso donde no se usan un juego de herramientas matriz-punzón convencionales, pues se trata del proceso de doblado en V por láser, donde la pieza se deforma por la aplicación del rayo láser sobre ella. Las neuronas de entradas son cinco parámetros del proceso del doblado por láser: potencia del rayo láser, la velocidad de escaneado, el diámetro del rayo láser, el grosor de la chapa y el número de escaneos; y la red tiene una única salida, el ángulo de doblado.

Cao et al. (2000) desarrollan una metodología para controlar la recuperación de una pieza en U (*channel forming process*) de aluminio, mientras se produce una deformación máxima aceptable en el material a través de una combinación en la que se aplica una fuerza escalonadamente al pisador (*binder*) y ésta se controla por medio de una red neural. La red

neural determina la fuerza del pisador de arriba y el tanto por ciento que tiene que desplazarse el punzón, para que se vaya produciendo el efecto de ejercer una fuerza escalonada. En este trabajo se identifica como parámetro clave la curva fuerza-desplazamiento del punzón, que representa variaciones en las propiedades del material, en el grosor de la chapa y en el coeficiente de fricción. Por ese motivo, los cuatro coeficientes de la curva de ajuste polinómica de la curva fuerza-desplazamiento del punzón real (obtenida *in-process*) constituyen el patrón de entrada para su red neural. Las salidas de la red son dos, pues para ejercer una fuerza de punzón escalonada, se necesitan determinar lo que se consideran dos valores críticos, la magnitud de la fuerza del pisador de arriba y el tanto por ciento del desplazamiento total del punzón. En el trabajo de (Cao et al., 2000) la red neural se entrenaba e implementaba usando resultados de simulaciones numéricas, sin embargo era necesario una implementación física de la metodología para verificarlos. Viswanathan et al. (2003) con el objetivo anterior, presentan resultados reales y aplican físicamente la misma metodología de (Cao et al., 2000), pero esta vez el material de la pieza cuya recuperación se controla no es aluminio sino acero. Viswanathan et al. (2003) parten de resultados de simulaciones numéricas para ayudarse en la determinación del conjunto experimental y en los parámetros de proceso de la experimentación, como la penetración de punzón y el ancho de la chapa a ser doblada.

También es posible encontrar estudios en los que las redes neurales se aplican a controlar o predecir la recuperación en un proceso de doblado al aire. Los primeros trabajos alrededor del control de la recuperación mediante ANN en el doblado al aire en matriz en V se realizaron a principios de las década de los noventa. Inicialmente tenían en cuenta pocos parámetros del material y a menudo su medida se realizaba *off-line*. Poco a poco según fue evolucionando el control, se fueron incluyendo más parámetros del material calculados *in-process*.

Los trabajos destacados y más recientes en este ámbito se exponen a continuación. Antes de ello, cabe destacar como antecedente en este campo, el estudio de (Yang et al., 1996) sobre el desarrollo de un sistema de control en el proceso de doblado usando, en vez de ANN, un modelo de inferencia *fuzzy* como proceso de aprendizaje que actúa sobre una base de datos del proceso de doblado.

El siguiente trabajo de importancia en este campo es el de (Forcellese y Gabrielli et al., 1998), donde se desarrolla un sistema de control basado en ANN para el proceso de doblado en punzón en V (doblado al aire) y también en punzón en U. Tienen en cuenta el comportamiento de deformación del material a partir de mediciones *in-process* de la fuerza de doblado versus el desplazamiento del punzón, caracterizando las propiedades del material en función de la geometría del proceso. El patrón de entrada utilizado por Forcellese et al. (1998) se compone de siete entradas: el ángulo de doblado después de la descarga, el grosor de la chapa. Los cinco parámetros restantes, que describen el comportamiento mecánico del material, se deducen a través de un modelo y usando mediciones *in-process*, como ya se ha comentado, de la fuerza de doblado versus el desplazamiento del punzón. El patrón de salida es único, el desplazamiento del punzón. El estudio se realizó sobre aleaciones de aluminio (AA 5754) de tres grosores diferentes (2, 3 y 4 mm) proporcionados por diferentes proveedores, que se doblaron para obtener una base de datos para el entrenamiento. Se desarrollaron tres redes neurales, una para cada grosor, y se entrenaron con 30 y 60 patrones (entrada/salida) respectivamente, pues la investigación se centró alrededor del efecto del tamaño del conjunto de datos de entrenamiento sobre los resultados de predicción proporcionados por la red neural.

En (Inamdar, Date, y Desai, 2000) y (Inamdar, Date, y Narasimhan et al., 2000) se desarrolla una herramienta para controlar la recuperación mediante una ANN que se ha

entrenado con datos experimentales y con predicciones de modelos analíticos, para efectuar así un control en tiempo real. La red utiliza el algoritmo de propagación hacia atrás, y su arquitectura es la siguiente: cinco neuronas de entrada y dos nodos de salida. Las entradas consideradas son el ángulo de doblado, relación radio del punzón/grosor, relación ancho de matriz/radio de matriz, relación esfuerzo de fluencia/módulo elástico y el exponente de endurecimiento por deformación. Y los nodos de salida, el desplazamiento del punzón y el ángulo de recuperación. El estudio experimental se llevó a cabo sobre cinco materiales: aluminio puro, una aleación de aluminio, acero de alta resistencia, acero y acero de embutición. La confrontación de los resultados obtenidos mediante su herramienta con los valores experimentales, con predicciones de valores basados en *FEA*, así como con los valores de un modelo no-*FEA* proporcionó una buena correlación.

3.5 Recuperación en otros procesos de deformación

La recuperación no es sólo una causa de error en el doblado al aire, sino que también se produce en el doblado en dado deslizante y en el doblado a fondo. Ni tampoco es un factor exclusivo de los procesos de doblado, aunque es donde tiene más importancia, ya que también aparece en los procesos de curvado doble y de embutición.

Por otro lado cuando se estudia la recuperación en otros procesos se suele hacer junto a otros fenómenos que aparecen durante la deformación de la pieza. Por ejemplo, es el caso del curvado o rizado de la pared lateral (*sidenall curl*) o la aparición de desgarros (*tearing*) después de la deformación en el doblado en U o el efecto ala de gaviota (*gull wing*) que se puede producir doblando laminados.

La recuperación en un proceso de doblado en dado deslizante es una de las causas más importantes de fallo pues puede introducir una distorsión de superficie y una forma inesperada fuera de tolerancia. El proceso de doblado con dado deslizante sería el más próximo al doblado al aire. La investigación más reciente sobre la predicción y eliminación de la recuperación en este proceso la ha llevado a cabo (Livatyali et al., 2001) y (X. Li et al., 2002); en estos dos estudios se presenta un método de diseño asistido por ordenador para el proceso de doblado en dado deslizante usando método de elementos finitos, y validando las predicciones con algunos experimentos de laboratorio. A parte también se da un estudio detallado por medio de investigaciones experimentales de la influencia de las variables del proceso sobre la recuperación es el proceso de dado deslizante. En un trabajo posterior, Livatyali et al. (2003) establecen una analogía establecida entre el doblado al aire y otros procesos de doblado (en dado deslizante, en U y en V) usando el mismo método de (Wang et al., 1993) y (Samuel, 2000) para el análisis de la recuperación en estos procesos, pero constatan que para el doblado en dado deslizante esta hipótesis proporciona resultados que no son precisos (se subestima el ángulo de recuperación). Por este motivo, Livatyali et al. (2003) extienden con más detalle y particularizan para el doblado con dado deslizante el algoritmo consistente de predicción de (Wang et al., 1993) para la predicción de la recuperación y para la predicción de las cargas.

Los estudios de la recuperación en procesos de doblado en U van intrínsecamente unidos al fenómeno de rizado de la pared lateral, en ese sentido cabe destacar los estudios de (Pourboghrat et al., 1995) sobre la predicción de la recuperación o el de (Samuel, 2000) en materiales anisótropos. Los trabajos desarrollados por (Huang y Leu, 1995a), (Chou et al., 1999), (Pourboghrat et al., 2000), (Papeleux et al., 2002), (Santos et al., 2002) y (Cho et al., 2003) alrededor de la reducción de la recuperación del doblado en U mediante elementos finitos. Por otro lado, están los estudios que en el doblado en U se basan en ejercer una fuerza de pisador variable para reducir la recuperación, (K. P. Li et al., 2002). O el trabajo

para estudiar las características de la recuperación de dos tiras metálicas unidas mediante soldadura, dobladas en U, realizado por (S. H. Chang et al., 2002).

En los procesos de doblado con tracción (*stretch-bending*), se le añade la complicación de la secuencia de descarga, es decir, si la tracción se libera antes que el momento de doblado o viceversa, o simultáneamente (la secuencia precisa se gobierna normalmente por el proceso de deformación). En este campo, destacamos los estudios que se comentan a continuación: El-Domiaty et al. (1998) realizan un estudio del proceso *stretch-bending* en barras se secciones en U. Carden et al. (2002) realizan un estudio experimental en el que doblan tiras de chapa mediante el ensayo de embutición-doblado (*draw-bending test*), y miden los ángulos de doblado y sus curvaturas para establecer un modelo analítico para la recuperación. O el de Corona (2004) en el que se realiza el estudio del proceso de *stretch-bending* en extrusiones de aluminio.

También es posible encontrar estudios relacionados con la recuperación de materiales compuestos, el trabajo de Yuen (1996) es un buen ejemplo de ello. O en otro tipo de procesos de deformación, como el trabajo de Palaniswamy et al. (2004) sobre la recuperación en procesos de flexoconformado (*flexforming*, donde el punzón se sustituye por un diafragma de goma flexible gobernada por una unidad hidráulica). O el de la simulación mediante el método de elementos finitos de un proceso de deformación multietapa (*multi-step sheet metal forming processes*) donde la dificultad de simular la recuperación influye entre las diferentes etapas de deformación (Kawka et al., 1998).

3.6 Establecimiento del problema

Este apartado pretende destacar los puntos clave sobre los que se ha establecido la problemática a resolver en esta tesis. Se quiere enfatizar determinados aspectos que se han ido exponiendo en estos dos capítulos iniciales que conforman la primera parte de la tesis.

El proceso de doblado al aire puede considerarse un proceso flexible. Es decir, permite con muy poca variación obtener un rango de piezas dobladas extenso. Por lo tanto, se obtienen con una misma configuración de la herramienta distintos ángulos de doblado, como distintas curvaturas o radios de curvatura.

Cuando se estudia el proceso de doblado al aire puede cometerse el error de juzgarlo como un proceso de fácil comprensión y sin complicación. Esta afirmación no se ajusta a la realidad. Durante la obtención de una pieza mediante este proceso aparecen problemas de precisión, debido a la importancia de una gran cantidad de parámetros que abarcan desde el comportamiento del material a la configuración del montaje escogido, pasando por el fenómeno de la recuperación, hasta conseguir la pieza doblada con la geometría deseada precisa.

Por el conjunto de razones descritas en los apartados anteriores tradicionalmente se ha intentado plasmar el conocimiento sobre este proceso mediante la elaboración de tablas. Éstas, por ejemplo, proporcionan tolerancias de doblado para predecir o compensar la recuperación, y gráficos que permiten mostrar parámetros sobre la recuperación que pueden encontrarse en la literatura. Aunque a menudo estas tablas proporcionan datos únicamente para doblados de ángulos de 90°, a veces con indicaciones para poder generalizarlo a otros ángulos y muchas veces sin ellas. Además de que la existencia de estos tipos de gráficas y tablas es poco abundante.

Para superar el conocimiento sobre el proceso de doblado al aire, basado únicamente en la experiencia, el modelado analítico del proceso de doblado ha captado un enorme interés. Aún así, las carencias que presentan estos modelos han obligado a recurrir a procesos de

simulación numérica como medio de predicción de la geometría final de la pieza o de decisión de la configuración del herramental de doblado.

Por consiguiente, tanto el ángulo de doblado como el fenómeno de la recuperación han recabado mucha atención en las investigaciones sobre el proceso de doblado. En cambio, se detecta un interés menor en cuanto a la obtención de la información del radio de doblado final y de la curvatura de la pieza doblada. Un parámetro muy importante para predecir en la fase de diseño la geometría de la pieza. Por un lado es comprensible, pues muchos estudios asumen la hipótesis de que mediante el doblado aparece una geometría formada por un arco circular más dos tramos rectos, en este caso el ángulo y la curvatura van completamente ligados. Sin embargo, esta hipótesis no es, ni mucho menos, generalizable en todos los procesos de doblado. Sobre todo no es aplicable en procesos de doblado poco severo.

La originalidad en el estudio que se presenta en los capítulos siguientes es que no se presupone la hipótesis de la aproximación geométrica. Por lo cual se ha realizado un seguimiento paralelo entre la recuperación y el ángulo de doblado final y la curvatura obtenida.

Capítulo 4

Experimentación y análisis de resultados

La teoría es asesinada tarde o temprano por la experiencia

Albert Einstein

4.1 Introducción

En este capítulo se describe y se presenta la experimentación realizada en este trabajo sobre el proceso de doblado al aire de chapas. El objetivo último de realizar los ensayos es obtener casos que permitan relacionar el desplazamiento del punzón, parámetro de ejecución perfectamente controlable durante el proceso de doblado, con el ángulo final y la curvatura en la zona de doblado. Es decir, con la geometría final obtenida. Estas relaciones serán los datos de validación de los modelos analíticos y la entrada para el modelo de predicción.

Ha sido necesario definir e implementar una metodología concreta de ensayos dado que recopilar datos experimentales directamente de la práctica industrial a menudo es problemático y no del todo fiable. Por un lado, las condiciones industriales no suelen ser lo suficientemente estables. De hecho, muchas veces las prácticas industriales no recogen todos los datos necesarios para verificar la modelación mecánica como, por ejemplo, fuerzas de doblado, esfuerzos y deformaciones. Por otro lado, las propiedades del material no suelen conocerse de manera precisa. En consecuencia es preciso llevar a cabo una experimentación en laboratorio y obtener mediciones de datos mediante programas informáticos, tal y como se explica en esta sección, lo que permite realizar fielmente la recogida y tratamiento de datos.

El plan de experimentación consiste en obtener piezas dobladas mediante un proceso de doblado al aire poco severo. Los ángulos intentados o ensayados están comprendidos en un rango de ángulo de doblado (β) entre 22° y 90° , equivalente a un ángulo de doblado comprendido entre alas (θ) desde 158° hasta 90° .

Se ha requerido diseñar y construir un utillaje especial para los ensayos. El utillaje se ha montado y calibrado en una máquina universal debidamente instrumentada tal y como se describe en el apartado 4.3. Los aspectos geométricos para el proceso de doblado al aire en este estudio son datos de partida y por lo tanto conocidos, pues pueden obtenerse

mediante mediciones sencillas. Durante el proceso de ejecución del doblado se han realizado mediciones del posicionamiento del punzón, de la fuerza de punzonado y del ángulo de doblado en carga. En cuanto al desgaste de las herramientas, no será considerado, pues no se llega al umbral necesario de uso como para tenerlo en cuenta. Posteriormente se han realizado diversas medidas del ángulo de doblado final y de la curvatura utilizando distintas técnicas, entre ellas un novedoso análisis de imágenes digitales de los especímenes doblados que se presenta en el apartado 4.4.

Al final del capítulo y en el Apéndice A se presentan los resultados obtenidos y su análisis.

Paralelamente se ha necesitado caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales doblados para parametrizar los modelos analíticos del material tal como se presenta a continuación en el apartado 4.2.

4.2 Caracterización del material

Mientras que, por ejemplo, parámetros geométricos como el grosor de la chapa puede asegurarse mediante mediciones sencillas, las propiedades del material son difíciles de determinar y en la mayoría de los casos los fabricantes de láminas de chapa no las proporcionan con la precisión adecuada. Como ya se ha visto en los capítulos precedentes, en muchos estudios se muestra la influencia de las propiedades del material en el proceso de doblado y, en consecuencia, sobre la respuesta de un modelo de doblado acertado. Características del material como el módulo de elasticidad y los parámetros de endurecimiento de Ludwik-Nadai son importantes ejemplos de ello.

Para capturar el comportamiento del material es necesario utilizar un modelo material. Por un lado, el modelo es una representación ideal del comportamiento real del material. Sin embargo, al ser una aproximación puede ser más o menos precisa. Por otro lado, dependiendo del tipo de material, se podrían aplicar diferentes modelos de material y por lo tanto existirían diferentes parámetros a determinar.

Hay que recordar que estos modelos describen relaciones tensión-deformación obtenidas en un ensayo a tracción uniaxial (ver apartado 2.3.3), por lo que no son directa o estrictamente aplicables a los modelos de doblado. Por todos estos motivos, en el trabajo de (Mentink et al., 2003) han propuesto un interesante método de doblado para determinar las propiedades del material directamente en una prensa de ensayos. Con este método se pretende utilizar el diagrama fuerza-desplazamiento del punzón que se obtiene durante el doblado de la chapa. Junto con el conocimiento básico del proceso de doblado al aire es posible deducir las propiedades del material directamente relacionadas con el doblado. A pesar de la existencia del método de (Mentink et al., 2003) este no se encuentra suficiente documentado ni desarrollado para poder llevarlo a la práctica. También existen otros tipos de procedimientos más específicos para caracterizar el material en forma de chapa, aunque requieren montajes específicos que se pueden encontrar descritos en (Banabic, 2000).

En conclusión, se ha decidido caracterizar el material mediante el procedimiento clásico de un ensayo a tracción uniaxial sobre una probeta adecuada para la determinación del comportamiento del material en una chapa metálica, como se describe más adelante. El ensayo a tracción uniaxial es uno de los ensayos intrínsecos o ensayos que miden las propiedades características básicas de los materiales que pueden relacionarse con la capacidad de formado de la chapa. Según el Committee under ASM direction (1997) es el ensayo usado más comúnmente. Según Banabic (2000) es uno de los métodos aplicados con más frecuencia para determinar la respuesta del material e incluso se usa más a menudo que otras pruebas sobre chapas finas porque la evaluación de las curvas por métodos de mínimos cuadrados se ha estandarizado.

En consecuencia, se ha realizado el ensayo a tracción para determinar las curvas características, tensión-deformación, de los dos materiales que han sido utilizados durante la experimentación de doblado. El material ensayado será aluminio comercial y acero inoxidable. De ambos materiales y para cada grosor ensayado en el doblado se han obtenido las curvas de carga-elongación y a partir de ellas se efectuarán los cálculos necesarios que permitan caracterizar el módulo de elasticidad (E), el esfuerzo de fluencia (S_y) y los parámetros de endurecimiento por deformación (K y n).

4.2.1 Montaje experimental

El montaje experimental necesario para realizar el ensayo a tracción consiste propiamente en el uso de una máquina de ensayos de tracción universal MTS, con célula de Carga Axial modelo 661.22D-01, cuyas características aparecen en la Tabla 4.1, con la colocación de unas garras adecuadas a los grosores ensayados. El espesor de las chapas era tan fino que forzó el uso de unas garras que pudieran asir entre ellas grosores de 1 mm y esta máquina de ensayos disponía de ellas.

Capacidad de Fuerza	250 KN
No-Linealidad	0.15%
Histéresis	0.15%
Salida	2.0 mV/V
Altura	203.00 mm

Tabla 4.1. Características de máquina de ensayos de tracción universal MTS, Célula de Carga Axial modelo 661.22D-01

Como se verá, el ensayo a doblado no se realizó en la misma máquina, pues el grosor de las probetas de tracción obligó a que la experimentación se llevara a cabo en dos máquinas diferentes.

4.2.2 Descripción del espécimen /probeta

El espécimen para el test de tracción de chapa usado es el definido según el ASTM E 8 en (ASTM, 1999), como es mostrado en la Figura 4.1. Contrariamente a los especímenes de forma de barra cilíndrica, las probetas de ensayo de un test de tracción de chapa fina (hasta 3 mm, como es el caso de este estudio) tienen sección rectangular. Sus lados son paralelos en la zona central donde se colocará el extensómetro. Las dimensiones de la zona central son usualmente 50.8 mm. de largo y 12.7 mm. de ancho.

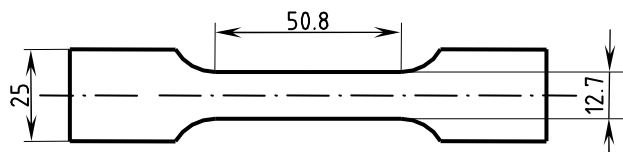


Figura 4.1 Especimen para ensayo a tracción de chapa (medidas en mm)

Los especímenes se han cortado de las mismas chapas con las que se han realizado los experimentos de doblado, y se han cortado mediante láser para obtener la forma y precisión deseada y así minimizar las pequeñas rebabas de las aristas, de manera que sean planas y libres de irregularidades. También se comprueba la superficie de la probeta, de

manera que no existan ralladuras o cualquier otro daño que pudiera causar un aumento del esfuerzo en algún punto y una ruptura temprana del espécimen.

4.2.3 Descripción de experimento

El ensayo a tracción debe realizarse y controlarse cuidadosamente. Antes de iniciar el experimento se alinean las mordazas de la máquina. A continuación, el espécimen se coloca entre las garras, volviendo a controlar su correcta alineación. Una vez agarrado por cada extremo el espécimen se estira a una velocidad constante de 2 mm/min en la máquina a tracción hasta que se fractura.

La carga aplicada se mide por medio de la célula de carga de la propia máquina y la extensión por medio de un extensómetro axial de tipo clip (modelo MTS 634.25), como el de la Figura 4.2.



Figura 4.2 Extensómetro axial tipo clip en posición de trabajo. Fuente: MTS.

Al visualizar el ensayo a tracción, se puede observar como la carga aumenta hasta un valor máximo y después disminuye antes de que se produzca la fractura. Esta disminución se debe a la localización de la deformación, lo que causa una reducción en la sección. Esta reducción tiene un efecto mayor que el aumento contrario en el esfuerzo de flujo debido al endurecimiento por deformación.

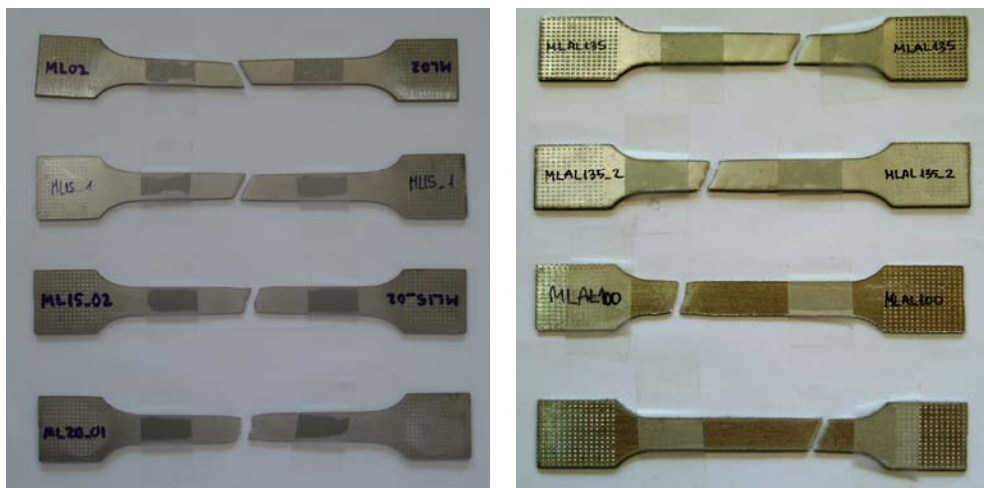


Figura 4.3 Probetas una vez han sido sometidas al ensayo de tracción. Izquierda, probetas de acero inoxidable. Derecha, probetas de aluminio

Con los datos obtenidos se pueden determinar las curvas esfuerzo-deformación.

4.2.4 Análisis de resultados

Los datos adquiridos durante el ensayo se convierten a valores de esfuerzo de ingeniería (σ_E) y deformación de ingeniería (ϵ), y posteriormente a esfuerzo real (σ_T) y deformación

real (ε). El procedimiento usado para la elaboración de una curva esfuerzo-deformación ingenieril se describe en (Kalpakjian, 2003). Se toma la curva de carga-deformación y se divide la carga entre el área transversal original (A_0), recordemos que en el ensayo la lectura de deformación nos la proporciona directamente el extensómetro. La curva resultante es una curva que tiene la misma forma que la curva de carga-elongación.

A partir de los esfuerzos ingenieriles se determinan las siguientes propiedades del material (Figura 4.4 a y b):

- Esfuerzo máximo o Esfuerzo de tracción último (S_{UT}): Esfuerzo ingenieril máximo observado en el test.
- Elongación uniforme (e_v): Deformación ingenieril en el punto de esfuerzo ingenieril máximo.
- Elongación total (e_T): Elongación en el punto de fractura.
- Módulo de elasticidad (E): Pendiente inicial de la curva esfuerzo-deformación en la zona elástica. Para el cálculo del módulo de elasticidad se considera como zona elástica, una zona siempre inferior al 0.5% la elongación. Para el acero inoxidable y el aluminio el rango establecido como región elástica está entre el 0.01% y el 0.1% la elongación. En el rango establecido se realiza una regresión lineal por mínimos cuadrados, cuya pendiente es el módulo de Young buscado.
- Esfuerzo de fluencia (S_Y): Esfuerzo en el que la curva esfuerzo-deformación se desvía de la pendiente elástica una cantidad determinada. En la determinación de este punto de fluencia suele existir discusiones, tantas como métodos estándar se han definido (pueden consultarse en Banabic et al. (2000)) Si el metal no muestra un punto de fluencia agudo, el método de *offset* es el método más aplicado, y el que se aplica en este trabajo. Según Banabic et al. el procedimiento de *offset* requiere dibujar el diagrama esfuerzo-deformación de los datos obtenidos. Sobre el diagrama se marca una lineal paralela a la pendiente elástica, pero desplazada en el eje de abscisas el valor de *offset* especificado. Suele ser un valor habitual escoger un valor del 0.2% ((Committee under ASM direction, 1997; Banabic, 2000)), sin embargo es un valor arbitrario por lo tanto, debe especificarse después de la variable que se identifica como esfuerzo de fluencia. Por este motivo, en este estudio el esfuerzo de fluencia se expresa como $S_{Y0.2}$ pues se calcula con un *offset* de valor 0.2%.

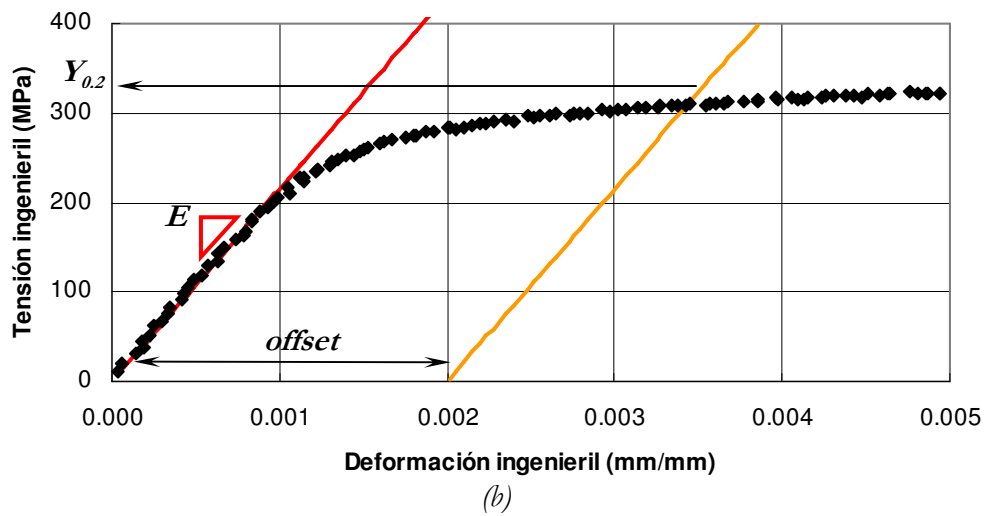
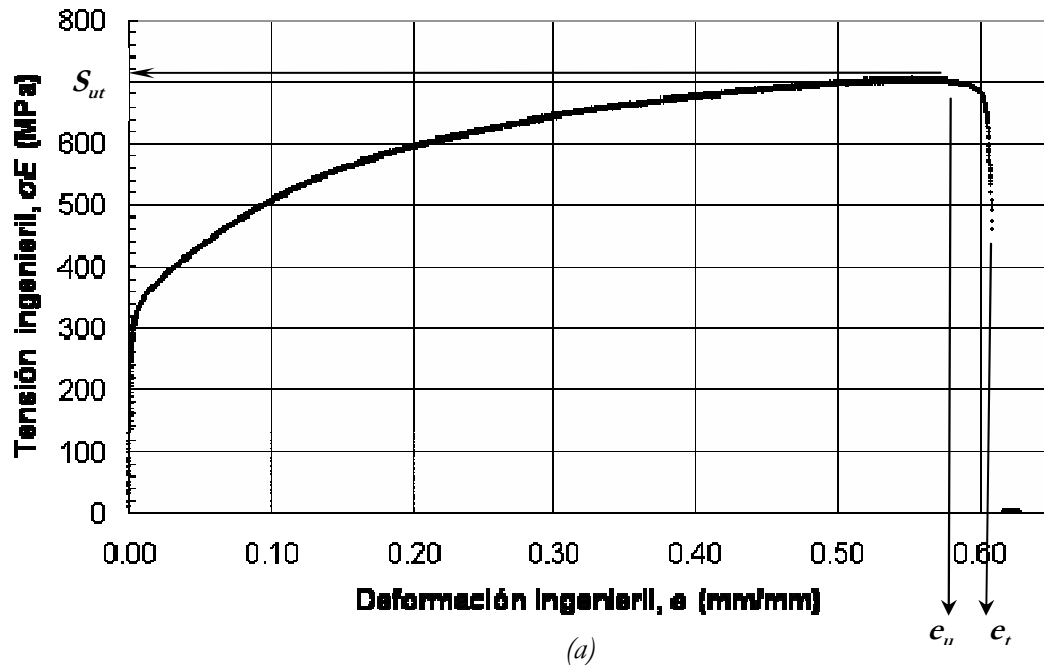


Figura 4.4 (a) Curva esfuerzo-deformación ingenieril, acero inoxidable $t=1\text{mm}$, determinación de UTS, e_u , e_r (b) Ampliación de la zona elástica; determinación del Módulo de elasticidad, E , (rojo) y del Esfuerzo de fluencia, $Y_{0.2}$, aplicación del método *offset* con valor de 0.2% (amarillo).

A partir del esfuerzo y deformación ingenieril se consigue determinar el valor del esfuerzo y deformación reales, mediante las siguientes relaciones (Figura 4.5):

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (4.1)$$

$$\sigma_T = \sigma_E \cdot \ln(1 + e) \quad (4.2)$$

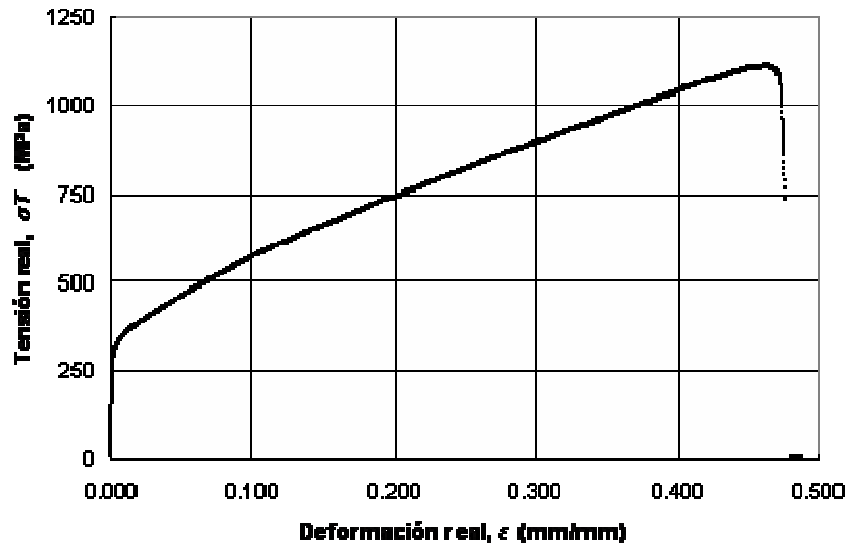


Figura 4.5 Curva esfuerzo-deformación real, acero inoxidable $t=1\text{mm}$

El modelo asumido para representar las curvas esfuerzo-deformación reales se expresa mediante la ecuación:

$$\sigma_T = K \cdot \epsilon^n \quad (4.3)$$

donde K se conoce como el coeficiente de resistencia (o coeficiente de endurecimiento por deformación) y n como el exponente de endurecimiento por deformación (o endurecimiento por trabajo).

A partir de los esfuerzos reales se determinan los parámetros relacionados con la ley de endurecimiento por deformación de la ecuación (4.3). El rango comprendido entre las elongaciones de valor igual al 5% para el acero inoxidable y el 0.5% para el aluminio y el valor de ϵ_u se considera la zona que presenta deformación plástica, y es en esta zona donde se determinan los valores de K y n . Se traza una gráfica *log-log* entre estos dos valores que definen la zona plástica. El diagrama obtenido es aproximadamente una línea recta, sobre la que se puede efectuar una regresión lineal sobre la que se puede identificar la siguiente relación (Figura 4.6):

$$\log \sigma_T = \log K + n \cdot \log \epsilon \quad (4.4)$$

En este momento, se está en condiciones de acabar de caracterizar el material con los parámetros:

- Exponente de deformación por endurecimiento(n): Valor de la pendiente del gráfico del logaritmo del esfuerzo real versus el logaritmo de la deformación real en la región de la elongación uniforme.
- Constante de deformación por endurecimiento (K): Valor del término independiente en la ecuación (4.4), correctamente despejado.

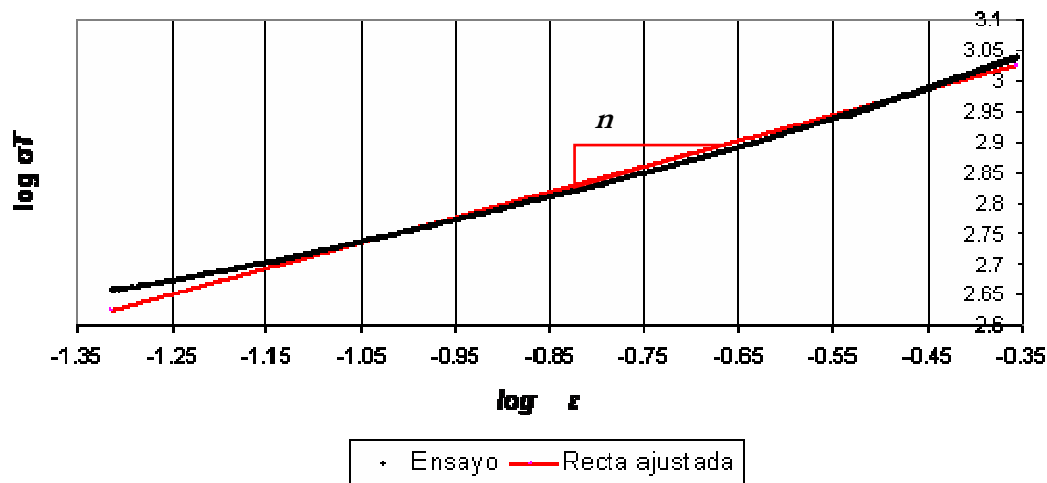


Figura 4.6 (a) Curva esfuerzo-deformación real, acero inoxidable $t=1\text{mm}$, con ambos ejes en escala logarítmica

4.2.5 Resultados obtenidos

El procedimiento anterior se repite para cada material y para cada uno de los grosores con los que se doblaron las chapas, y de los que se extrajeron las probetas para ser sometidas al ensayo a tracción. Las condiciones experimentales se recuerdan en la Tabla 4.2.

<i>Material</i>	<i>Grosor Especímenes(mm)</i>	<i>Velocidad ensayo (mm/min)</i>
Acero Inoxidable	1, 1.5, 2 y 3	2
Aluminio	1 y 1.35	2

Tabla 4.2. Condiciones experimentales de los ensayos a tracción

Los resultados obtenidos en la caracterización se resumen en las siguientes tablas, la Tabla 4.3 para el acero inoxidable y en la Tabla 4.4 para el aluminio:

<i>t (mm)</i>	<i>E (GPa)</i>	<i>S_{y0.2} (MPa)</i>	<i>K (MPa)</i>	<i>n</i>	<i>S_{UT} (MPa)</i>	<i>e_a (%)</i>	<i>e_t (%)</i>
1	215.412	311.624	1490.512	0.419	705.312	55.25	60.92
1.5	224.392	292.531	1423.451	0.428	659.584	54.16	61.99
2	214.236	292.729	1551.672	0.435	718.260	50.56	56.20
3	203.189	326.931	1303.994	0.300	687.873	51.23	58.53

Tabla 4.3. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables ensayados

t (mm)	E (GPa)	$S_{Y0.2}$ (MPa)	K (MPa)	n	S_{UT} (MPa)	e_u (%)	e_t (%)
<i>Test A</i>	47.755	92.412	124.032	0.050	102.451	3.95	9.53
1 <i>Test B</i>	48.821	92.564	120.881	0.046	101.677	5.04	11.16
Promedio	48.288	92.488	122.457	0.048	102.064	4.5	10.35
<i>Test C</i>	38.774	81.919	112.969	0.052	92.733	5.00	15.87
1.35 <i>Test D</i> (*)	46.050	83.371	112.479	0.047	93.831	7.26	16.39
Promedio	46.412	82.645	112.724	0.050	93.282	6.13	16.13

(*) velocidad = 5mm/min

Tabla 4.4. Propiedades mecánicas de los aluminios ensayados

4.3 Experimentación de doblado al aire

Como ya se ha comentado, el recopilar datos de los sectores industriales conlleva su complicación y puede implicar una pérdida de precisión. Por este motivo es necesario transportar las condiciones del proceso de doblado al aire en prensas a una máquina de laboratorio.

La máquina de laboratorio, que cumple la condición anterior para poder realizar la experimentación de doblado, o sea transmitir un momento de doblado puro a una chapa, es una máquina universal de tracción instrumentada mediante la inclusión de un utillaje de matriz-punzón adecuado. De esta manera la máquina de tracción universal puede trabajar de manera similar a la de una prensa, de la que se controla de forma precisa el desplazamiento del punzón, así como la carga ejercida para poder conseguir una chapa quebrada mediante un doblado al aire. De esta manera se han podido obtener registros muy precisos de la evolución durante el proceso de la fuerza ejercida del desplazamiento del punzón. La máquina universal de tracción utilizada en este estudio pertenece al laboratorio del grupo AMADE de la Universitat de Girona que ha permitido su uso.

Así pues para poder realizar los ensayos de doblado se ha tenido que construir un utillaje de doblado que se coloca en la máquina del laboratorio. El montaje permite efectuar cambios en la configuración del experimento fácilmente, tanto para cambiar las características de la matriz como para cambiar las del punzón.

En cuanto a la elección del material utilizado en la experimentación se basa en dos consideraciones. La primera, el material debe usarse en productos industriales de chapa metálica. La segunda, que el rango de las propiedades de los materiales debía ser amplio para obtener una visión amplia de las influencias del material en el proceso de doblado al aire. La elección final se basa en el ensayo de dos materiales: el acero inoxidable por su alto coeficiente de endurecimiento y el aluminio, que por el contrario, tiene un coeficiente de endurecimiento muy bajo. A causa del poco endurecimiento por deformación, el aluminio se comporta casi como un material rígido-plástico ideal.

4.3.1 Descripción del espécimen /probeta

Los especímenes de experimentación tienen las dimensiones mínimas para poder permitir el uso del utillaje para llevar a cabo el doblado. De manera que la fuerza ejercida por el pistón de la máquina de tracción universal sea suficiente para lograr el doblado de la pieza.

La condición básica para determinar la longitud del espécimen es que se debe permitir que durante el proceso de doblado, parte del propio espécimen se mantenga fuera de los márgenes de la matriz, para asegurar la medición del ángulo en carga mediante el utillaje de la Figura 4.14.

Como valor de longitud se ha escogido es de 130 mm. En lo que respecta al ancho, se escoge un valor de 50 mm para todos los especímenes en función del material y sus características y de los diferentes grosores, ya que el doblado y la recuperación no depende del ancho de la chapa doblada.

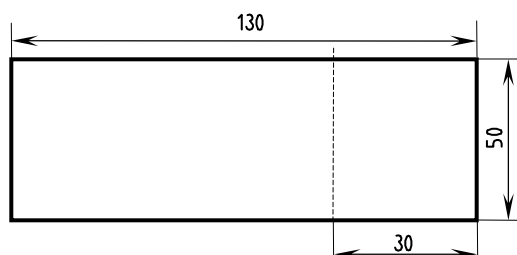


Figura 4.7 Esquema del espécimen de doblado

En lo que respecta a la línea de doblado, sobre la que se apoyará el punzón para ejecutar el doblado, se marcará entre 30-40 mm de uno de los lados del espécimen. El utillaje de medición utilizado obliga la definición de esta probeta, que una vez doblada no será simétrica. Esta característica no representa ninguna repercusión sobre el ángulo de doblado ni sobre el estudio que se persigue en este trabajo.

Otro de los aspectos principales a tener en cuenta en la obtención de los especímenes, es que deberán cortarse de manera que la dimensión de longitud coincida con la dirección de laminado o rolado del material.

4.3.2 Montaje experimental

El montaje experimental para conseguir el proceso de doblado al aire que se presenta consiste en una máquina de tracción universal en la que se acopla un utillaje de doblado similar al de una plegadora. Mientras las plegadoras industriales disponen de herramientas de longitudes superiores a un metro, el utillaje de doblado de este trabajo es de pequeñas dimensiones. Pero suficientes para realizar los doblados y su posterior análisis según el propósito de este estudio. El hecho de querer obtener la medición del ángulo en carga requiere diseñar la manera de obtener esta medición. Por lo tanto un sensor como el que se describirá más adelante, forma parte también de este montaje experimental de doblado. A continuación se describen las tres partes fundamentales que lo componen.

a) Máquina de ensayos de tracción universal

La máquina de ensayos de tracción universal utilizada es una máquina de ensayos de tracción universal MTS (*Material Testing System*). Se trata del modelo MTS 858 Minibionix[®] mostrado en la Figura 4.8. Este modelo es compacto y permite realizar ensayos con fuerzas medias y bajas, como las que se han aplicado durante la ejecución del experimento. La máquina permite obtener diagramas tensión-deformación gracias a un preciso sistema de adquisición de datos que permite trabajar a diferentes rangos en función de las necesidades de la experimentación. La máquina está conectada a un control por ordenador para ayudar al usuario a definir los parámetros del modo de operación del proceso. La capacidad de presión experimental de la máquina se ha colocado a 25 KN (la célula de

carga), y como parámetro de proceso fijo, la velocidad de desplazamiento del punzón a 10 mm./min.

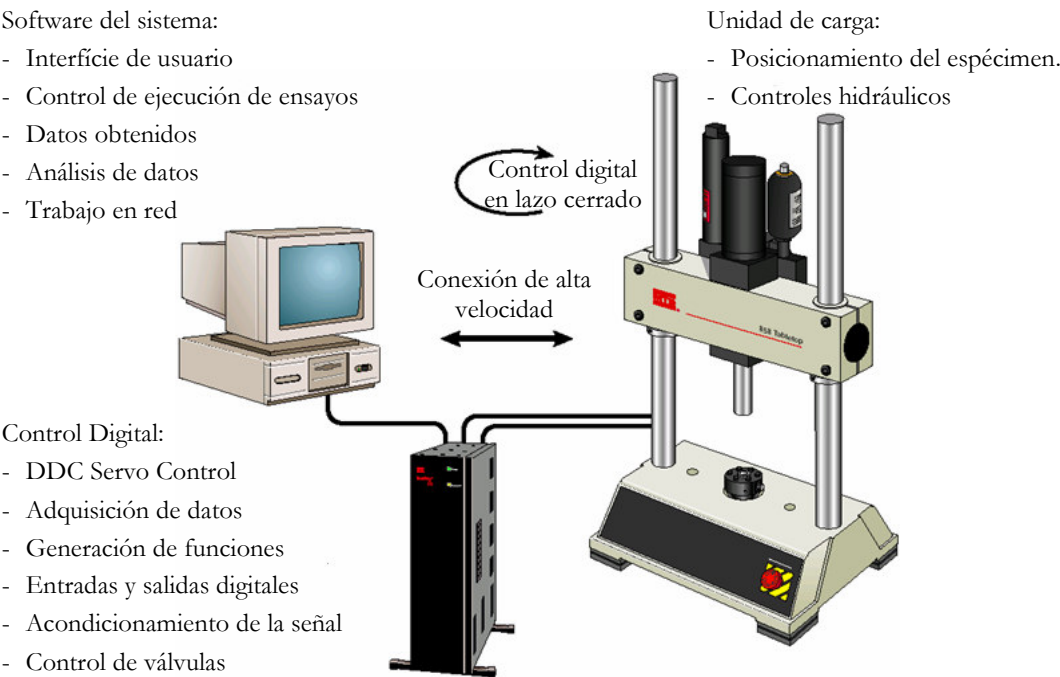


Figura 4.8 Máquina de tracción universal MTS 858 Minibionix® utilizada en la experimentación de doblado. Fuente: <http://www.mts.com>

	Capacidad de fuerza estática (a 21 MPa)	25 kN
	Desplazamiento del pistón	100 mm.
	Espacio entre columnas	460 mm.
	Espacio de experimentación:	
	Espacio libre máximo	978 mm.
	Espacio máximo de trabajo	789.2 mm.
	Dimensiones:	
	Ancho de la base	625 mm.
	Profundidad de la base	527 mm.
	Altura máxima de la máquina	1378 mm.
	Díámetro del pistón actuador	45mm
	Rigidez Axial:	275x10 ⁶
	Marco de carga	N/m
	Díámetro de las columnas	76.2 mm.
	Fijación del travesaño	manual
	Peso	192.8 Kg.

Tabla 4.5. Características principales de la máquina de tracción MTS 858 Minibionix® utilizada. Fuente: <http://www.mts.com>

b) Utillaje de doblado

Para llevar a cabo los diversos experimentos de doblado al aire en la máquina de tracción universal, se ha diseñado un utillaje como el que se describe a continuación, teniendo en cuenta las características dimensionales de la máquina anterior que se recogen en la siguiente Tabla 4.5.

El parámetro crítico para poder diseñar el utillaje es la separación entre columnas de la máquina de ensayos. Esta distancia (460 mm.) marcará las dimensiones del utillaje que debe fabricarse para llevar a cabo el experimento de doblado al aire. Aunque podrían llegar a considerarse unas dimensiones mayores, montándolo en el eje perpendicular al que determinan las columnas de la máquina, el diseño y posterior fabricación del utillaje se ha hecho en función de esta distancia entre columnas, pues por un lado permite facilidades en su montaje sobre la máquina, y la amplitud del conjunto es la suficiente para el propósito del experimento.

El utillaje pretende representar en la medida de lo posible una prensa de doblado que encaje dentro de la distancia entre columnas de la máquina MTS. Por este motivo, el diseño (Figura 4.9) consta de las tres partes típicas presentes en una plegadora: el conjunto porta-punzón, el conjunto porta-matriz y un sistema guía.

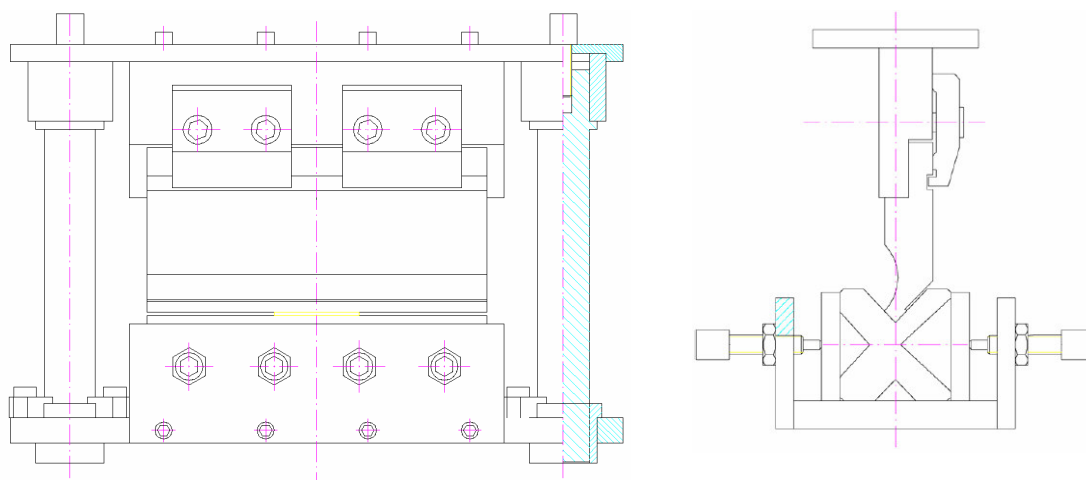


Figura 4.9 Esquema de diseño del conjunto utillaje

En la construcción de cada una de estas partes del utillaje se han usado herramientas de doblado industriales. Para los elementos del conjunto porta-punzón son: un punzón tipo 11.145 de MECOS y bridas de sujeción del punzón 50.693 de MECOS, como se puede observar en la Figura 4.10.

Para el conjunto porta-matriz (Figura 4.11 (a)), los elementos usados son: una matriz 20.207 de MECOS, y finalmente, para el sistema guía (Figura 4.11 (b)): dos columnas guía 10 5100 de UNCETA, dos casquillos guía 10 444 de UNCETA y varias uñas de retención 10 5150 B de UNCETA.

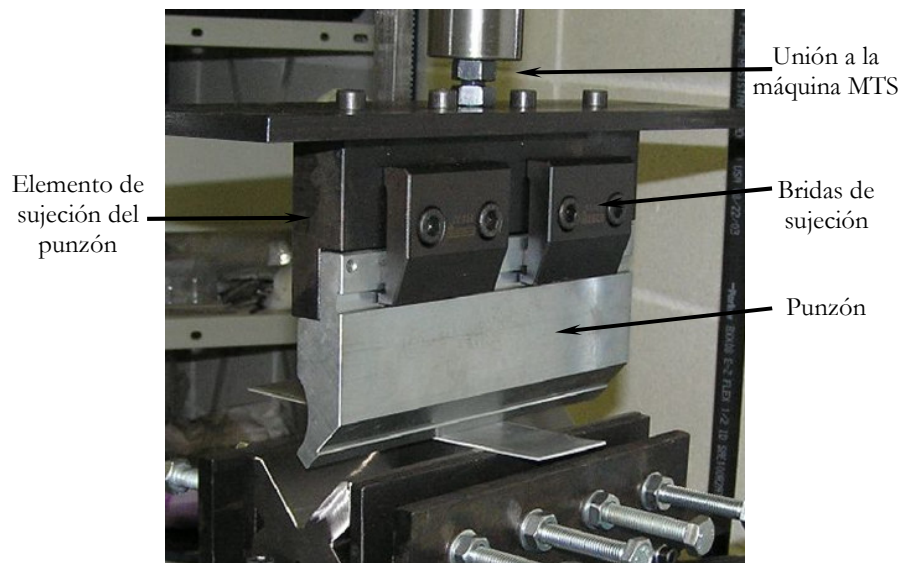


Figura 4.10 Construcción real del conjunto porta-punzón

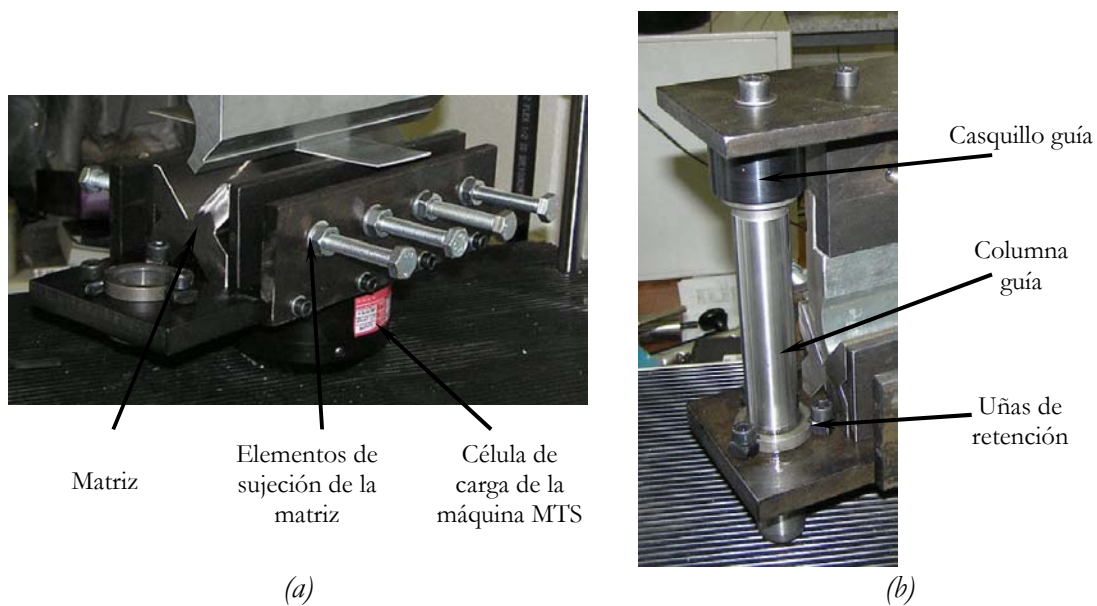


Figura 4.11 (a) Construcción real del conjunto porta-matriz (b) Sistema guía

c) Utillaje de medida del ángulo en carga

Este utillaje es el último elemento que se ha diseñado para la realización de experimentos. El objetivo del mismo es el determinar el valor de la recuperación requiere la obtención del valor del ángulo de doblado durante la aplicación de la carga sobre la chapa. Por ese motivo ha sido necesario adquirir o diseñar un utillaje de medición que cumpliera dicho objetivo.

La primera alternativa considerada para llevar a cabo las medidas del ángulo de doblado en carga fue adquirir un sistema comercial de uso industrial que permitiera realizar estas medidas. Un sistema de medición láser comercial (Copra® LaserCheck) cumplía estas características, pero su elevado coste de compra e instalación (14 335 €, según la oferta de la empresa DataM Engineering GMBH) llevó a considerar otras opciones.

La segunda alternativa considerada fue la propuesta por Inamdar et al. (2002) usando bloques patrón. Este método requiere un montaje, el esquema del cuál se puede observar en la siguiente Figura 4.12.

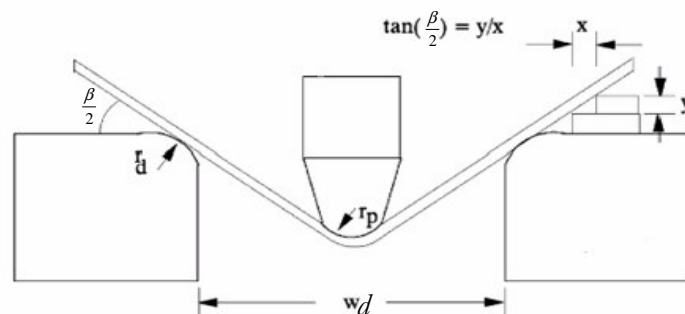


Figura 4.12 Método de medición del ángulo en carga de (Inamdar et al., 2002)

Aunque a primera vista parece un montaje sencillo, la consecución de la distancia x en comparación con la distancia y es complicada. Además el proceso de medición se convierte en un proceso lento, que ralentizaría la ejecución total de cada experimento. Estos dos motivos han sido causa de que este método haya sido también descartado.

Como tercera opción se ha diseñado y construido una tercera alternativa (Figura 4.13). Esta alternativa aplica un *encoder* a la realización de medidas angulares. Se ha utilizado un encoder digital incremental porque tienen una resolución mejor que los absolutos (la del escogido es igual 0.072° o $4' 19.2''$ ya que divide una vuelta entera en 5000 partes) y porque mediante una tarjeta de adquisición de datos es posible registrar su lectura directamente al mismo ordenador que gobierna la máquina MTS.

Al eje móvil del encoder ha sido necesario añadirle un palpador, que realizará el contacto con la chapa y que previa puesta a cero, realizará la lectura del ángulo doblado (Figura 4.13 (a) y (b)). Pues en el interior del encoder existe un sistema electrónico que da una lectura de la distancia angular de lo que ha girado ese eje respecto al cero. El conjunto encoder-palpador se ha montado sobre un sistema guía que a la vez sirve de accionamiento y de desplazamiento del propio sistema (columna-cremallera, como puede verse en las vistas de las imágenes en la Figura 4.13 (c) y (d)). Aunque se había exigido que la posición del conjunto encoder-palpador no interfiriera con la chapa doblada como requerimiento de diseño de este sistema, la construcción y las primeras pruebas de puesta a punto de este sistema de medición han permitido observar que el sistema estorbaba en chapas con doblados más cerrados.

Este problema ha llevado a eliminar el utillaje de medición con encoder y a desarrollar la cuarta y definitiva alternativa de utillaje para la medición del ángulo en carga. Se ha utilizado un transductor de desplazamiento lineal de punta esférica. Mediante una brida se ha añadido un transductor de desplazamiento lineal a un lateral del conjunto porta-punzón del utillaje de doblado, ver Figura 4.14 (a) y (b). El transductor se apoya en un punto de la superficie interna de una de las alas de doblado. Las lecturas del desplazamiento vertical del transductor (hasta 100 mm.) pueden ser registradas directamente por el mismo ordenador de la máquina MTS, al mismo tiempo que se ejecuta el experimento de doblado. Conociendo la distancia a la que se encuentra el transductor y a través de relaciones geométricas básicas se puede conocer el ángulo en carga del cual se quiere conocer el valor.

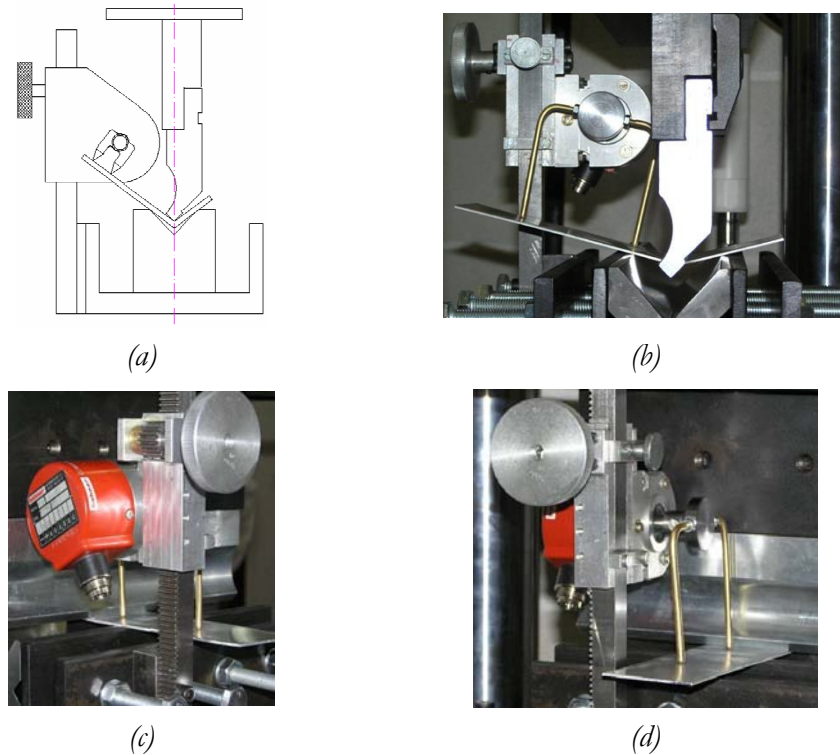


Figura 4.13 Utillaje de medición con encoder (a) Diseño del utillaje (b) Construcción del utillaje de medición (c) y (d) Vistas del utillaje, sistema guía- desplazamiento y contacto.

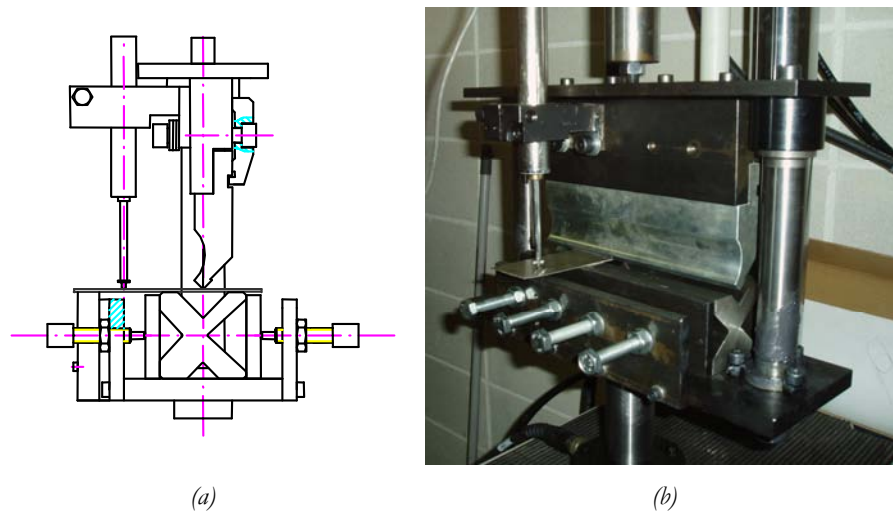


Figura 4.14 Utillaje de medición del ángulo en carga definitivo (a) Diseño del montaje final con chapa plana (b) Montaje real llevado a cabo sobre chapa doblada en carga

d) Montaje y ajuste del utillaje

Es preciso el montaje y puesta a punto del utillaje de doblado sobre la máquina de tracción universal MTS. Las operaciones del montaje deben seguir los siguientes pasos: montaje del conjunto porta-punzón sobre el pistón de la máquina, montaje del conjunto porta-matriz sobre el sensor de fuerza y finalmente ajustar la posición del sistema guía.

Este último paso es el más delicado, pues el desplazamiento hacia abajo del pistón debe permitir el buen posicionamiento de las columnas dentro de los casquillos guía de la base del conjunto porta-matriz, sin que provoque una fuerza o un momento que lastime la célula de carga de la máquina de ensayo MTS. Este último paso es esencial ya que la ejecución del doblado de las chapas requiere el ascenso y descenso del punzón reiterativamente para cada doblado, por lo que se debe asegurar que la fricción entre las columnas (convenientemente lubricadas) y los casquillos guía sea la mínima admisible, y que no se traduzca en un momento flector indeseado sobre la célula de carga. Para ello se realiza un desplazamiento del punzón en vacío (sin chapa por doblar), para detectar y minimizar la existencia de fricción en el sistema guía. Durante este descenso en vacío, la célula de carga de la máquina deberá marcar un valor de carga de cero Newton.

Relacionado también con el hecho de evitar el efecto indeseado de transmisión de fuerzas sobre el sensor de la máquina, se exige una operación de alineación inicial entre las herramientas punzón-matriz una vez el utillaje está montado entre las columnas de la máquina, como puede observarse en la Figura 4.15 (a).

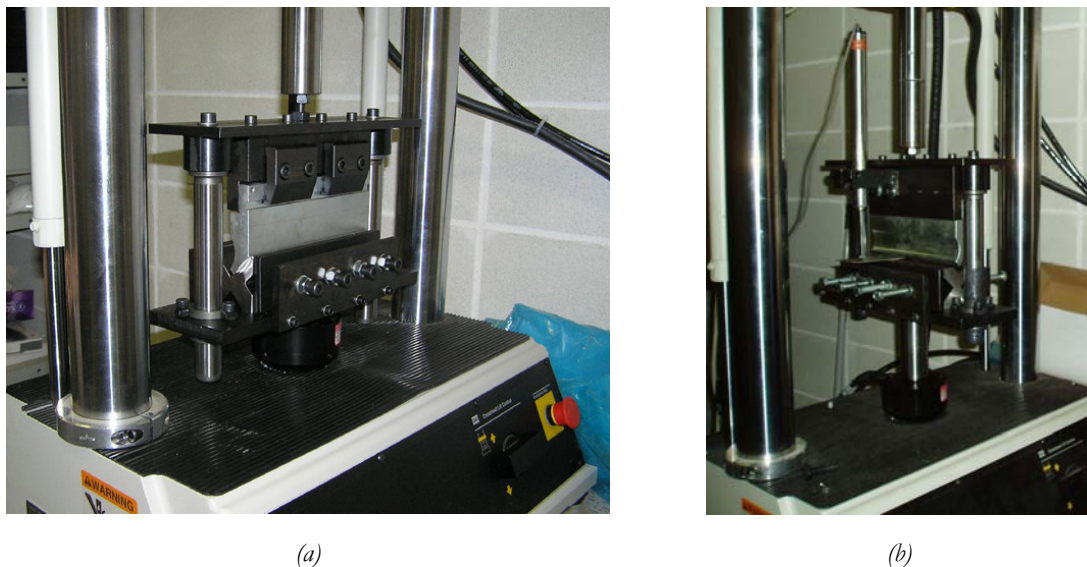


Figura 4.15 Montaje del utillaje sobre la máquina MTS (a) Alineación y puesta a punto en vacío (b) Montaje del utillaje de doblado y de medición del ángulo en carga

Una vez realizada toda esta operación de puesta a punto del utillaje, se está en condiciones de realizar los diferentes doblados de la chapa.

4.3.3 Ejecución del experimento de doblado al aire

La chapa a ensayar se sitúa sobre la matriz abierta, inicialmente no está sujeta, sino que está libre para que pueda pivotar entre los tres puntos en los que se apoyará (dos puntos de contacto chapa-matriz, y un punto de contacto matriz-punzón) y mediante los que se ejecuta el doblado al aire. Antes de empezar a ejercer la carga, se verifica que la línea de doblado de la chapa plana quede alineada con el punzón. A partir de este momento aumenta el desplazamiento del punzón, se ejerce la carga y la chapa va adquiriendo *on-process* el valor del desplazamiento, la fuerza ejercida y el ángulo resultado de doblado final (Figura 4.16).



Figura 4.16 (a) y (b) Diferentes perspectivas de una chapa doblada y medición del ángulo en carga

Las condiciones del herramental bajo las que se puede doblar las chapas son las siguientes: dos radios de matriz, r_d (2 y 0.5 mm), cuatro amplitudes de matriz, w_d (50, 35, 22 y 16 mm) y un radio de punzón, r_p (0.8 mm).

<i>Materiales</i>	<i>Especímenes (mm)</i>	<i>r_p (mm)</i>	<i>w_d, (ángulo de matriz) (mm)</i>		<i>r_d (mm)</i>
Acero Inoxidable	130 x 50 x 1	0.8	50, 35 (85°)	22, 16 (88°)	2, 0.5
	130 x 50 x 1.5		50, 35 (85°)	22, 16 (88°)	2, 0.5
	130 x 50 x 2		50, 35 (85°)	22, 16 (88°)	2, 0.5
	130 x 50 x 3		50, 35 (85°)		2
Aluminio	130 x 50 x 1	0.8	50, 35 (85°)	22, 16 (88°)	2, 0.5
	130 x 50 x 1.35		50, 35 (85°)	22, 16 (88°)	2, 0.5

Tabla 4.6. Condiciones experimentales de los ensayos de doblado

Teniendo como punto de partida las condiciones experimentales de la Tabla 4.6., se define el principal parámetro de ejecución, la penetración del punzón (Z). Se han decidido diferentes valores de penetración de punzón, teniendo en cuenta que ninguno de ellos sobrepasará el valor máximo definido como $Z_{máx}$ para evitar que la operación se convierta en un doblado a fondo. Este valor de penetración máximo ($Z_{máx}$) se puede obtener mediante simples cálculos trigonométricos pues se conoce la amplitud y el ángulo de matriz en V.

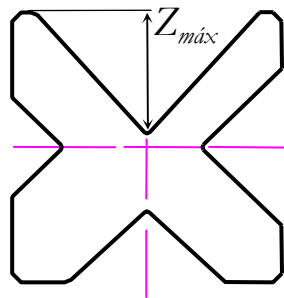


Figura 4.17 Limitación de la matriz para que el proceso sea un doblado al aire.

Una vez se han fijado los diferentes valores de Z , mediante la ecuación (3.10) del modelo rígido-plástico (consultar la sección 3.2.3a), se calcula a qué valores de ángulo de doblado objetivo corresponde. De este modo, se tienen relacionados el ángulo de doblado objetivo y el valor consigna de desplazamiento de punzón que se asignará a la máquina que ejecutará el desplazamiento vertical del pistón-porta-punzón, produciendo la chapa doblada.

A partir de las condiciones experimentales que se reflejan en la Tabla 4.6 junto con los diferentes valores de penetración de punzón asignados se han generado un total de 103 experimentos para el acero inoxidable y 54 para el aluminio.

Como ya se ha expuesto anteriormente (Figura 4.17), una de las limitaciones conocidas a priori la proporciona cada ancho de matriz. Pues existe una profundidad de punzón a partir de la cuál el proceso se convierte de un proceso de doblado al aire a un doblado a fondo. En cuanto a las limitaciones halladas durante la ejecución del experimento, una sucede para los aceros inoxidables y la otra con los aluminios.

La limitación relacionada con el acero inoxidable ocurre durante el doblado de las chapas de grosor mayor (3 mm) y las amplitudes de matriz más estrechas (22 y 16 mm), tal y como queda recogido en la Tabla 4.6. La causa es que la fuerza necesaria para realizar el doblado sobrepasa el valor máximo de la célula de carga al que está limitada la máquina MTS de ensayo.

En cuanto a la limitación relacionada con el aluminio, está relacionada con la fuerza, pero esta vez, con la fuerza que ejerce el transductor sobre la chapa durante el doblado. Los grosores de aluminio ensayados son delgados, por lo que a partir de determinados desplazamientos profundos del punzón ofrecen menor resistencia y en consecuencia el ala larga no resulta recta. El motivo es que el ala larga de la chapa doblada se ha arqueado entre dos puntos de apoyo: el punto de contacto transductor-chapa y el punto de contacto matriz-chapa, como se puede observar en el esquema de la Figura 4.18(a). Un ejemplo de este suceso es la probeta de la imagen en la Figura 4.18(b).

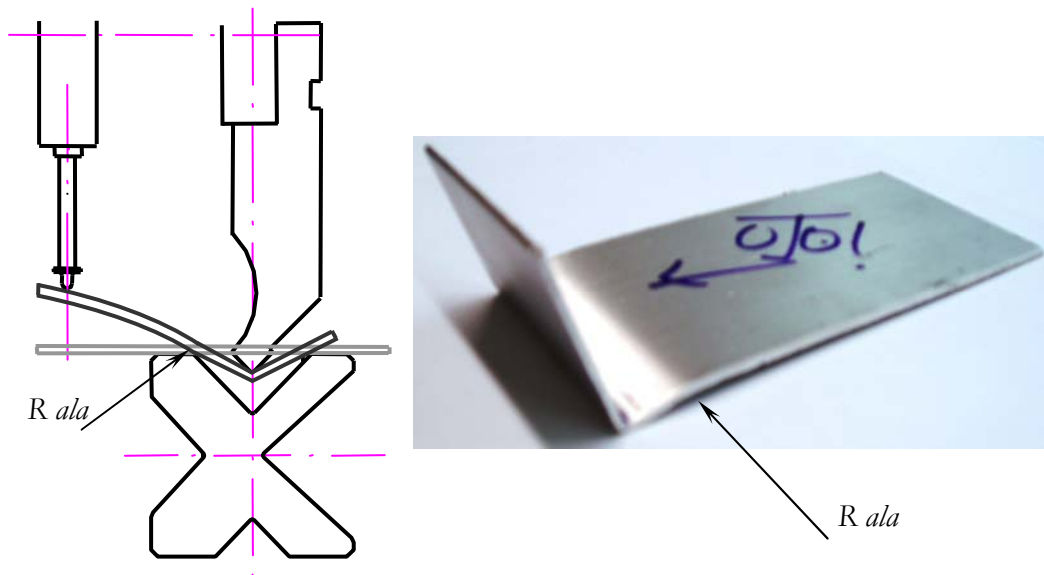


Figura 4.18 (a) Esquema del arco que aparece en las chapas de aluminio. (b) Probeta resultado con arco

Durante la ejecución de cada experimento de doblado y para cada pieza final se deben registrar y realizar una serie de mediciones.

a) Mediciones durante el proceso de carga

Durante el proceso de doblado se registrarán tres tipos de valores que pertenecerán a las tres mediciones realizadas durante el proceso de carga:

Medición de la Fuerza, (F). Al realizar el experimento en la máquina MTS, el sistema de adquisición de datos registra la evolución de la carga según se desplaza el punzón. La obtención de tales datos se realiza a través de la célula de carga situada en la unidad de carga de la máquina.

Medición del desplazamiento del punzón, (Z). Esta medición se puede obtener con la adecuada precisión, pues el control de este tipo de máquina permite medir de manera precisa el desplazamiento vertical, imitando la misma situación que se daría en una prensa gobernada por control numérico. El valor del desplazamiento del punzón es el valor consigna que se le ha introducido a la máquina para ejecutar el doblado al aire.

Medición del desplazamiento del transductor vertical, (T), (para el ángulo en carga). El registro de esta medición es continuo mientras se ejecuta la operación de doblado, por lo que también se obtiene su evolución. El valor de interés para el posterior cálculo del ángulo de doblado en carga es el que proporciona el transductor al alcanzar la penetración de punzón consigna para un ensayo, o sea, cuando se finaliza el experimento.

De cada una de las chapas dobladas, por lo tanto de cada experimento, se obtiene el registro de la evolución carga o fuerza versus desplazamiento o penetración del punzón (ver Figura 4.19), así como la evolución del valor que proporciona el transductor vertical (ver Figura 4.20), que parte de un valor de cero (posición de chapa plana) y hasta el que nos interesará, su valor máximo, T .

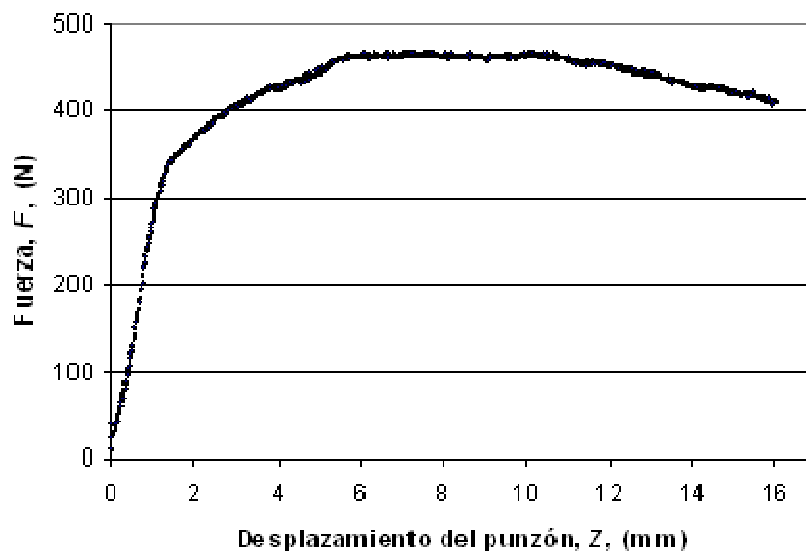


Figura 4.19 Registro de la curva de evolución fuerza-desplazamiento ejercida por el punzón sobre la probeta de acero inoxidable de grosor 1 mm. Condiciones de utillaje m_d 50 mm. hasta una profundidad Z de 16mm. (Especimen: spk16_t1w50_ai).

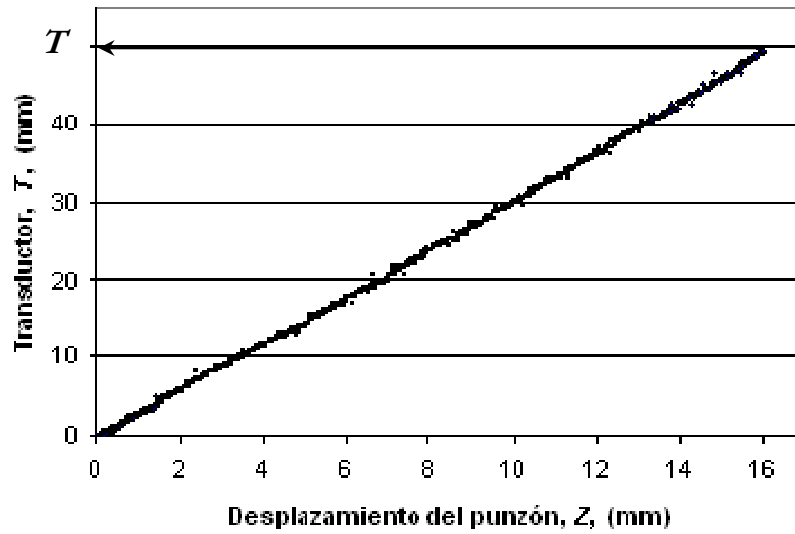


Figura 4.20 Registro del transductor para el espécimen de acero inoxidable de grosor 1 mm. Condiciones de utillaje w_d 50 mm. hasta una profundidad Z de 16mm. (Especimen: spk16_t1w50_ai).

b) Mediciones posteriores al doblado

Después de la ejecución de cada doblado se realizará medición del ángulo de doblado final.

Medición del ángulo de doblado final, en descarga (β_f). Para realizar esta medición se usará un goniómetro universal cuya aproximación es de 1/12 de grado o 5 minutos, equivalente a una precisión de 1/24 de grado o 2.5 minutos. Se procederá a su medición, situando la chapa doblada sobre una superficie plana y ajustando las reglas del transportador al perfil de la lámina doblada obtenida. Se realiza la lectura y se anota, para que pase a formar parte junto al resto de mediciones del archivo informático con el que se realizará el análisis de resultados.

c) Análisis posteriores al doblado

Gracias al valor T que proporciona el transductor vertical se puede calcular el valor del ángulo en carga (β_c), lo que a su vez nos permitirá determinar la recuperación del valor del ángulo de recuperación ($\Delta\beta$).

Así pues, según se puede observar en la Figura 4.21, además de la lectura que proporciona el transductor para el cálculo del ángulo de doblado bajo condiciones de carga es necesario conocer el valor de la variable X_T , que indica el posicionamiento del transductor respecto al eje vertical del conjunto porta-punzón. El valor de la distancia X_T en el utillaje construido y con el que se han realizado los cálculos es de 67.35 mm. La expresión geométrica para obtener el ángulo de doblado en carga (β_c) resulta en:

$$\beta_c = 2 \cdot a \tan\left(\frac{T + Z}{X_T}\right) \quad (4.5)$$

Conocer el ángulo en carga permite cuantificar la recuperación, como la diferencia entre este ángulo en carga (β_c) y el ángulo final de doblado (β_f) obtenido con el goniómetro:

$$\Delta\beta = \beta_c - \beta_f \quad (4.6)$$

También es posible calcular otro valor de recuperación, el factor de recuperación expresado como:

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} \quad (4.7)$$

Otro valor interesante que puede calcularse es la diferencia que existe entre el ángulo objetivo (β), proporcionado por el modelo geométrico, y el ángulo final de doblado obtenido, medido con el goniómetro (β_f). Este valor se definirá mediante el parámetro *Error*.

$$Error = \beta - \beta_f \quad (4.8)$$

En el Apéndice B se puede consultar los informes obtenidos para cada conjunto de ensayos de doblado.

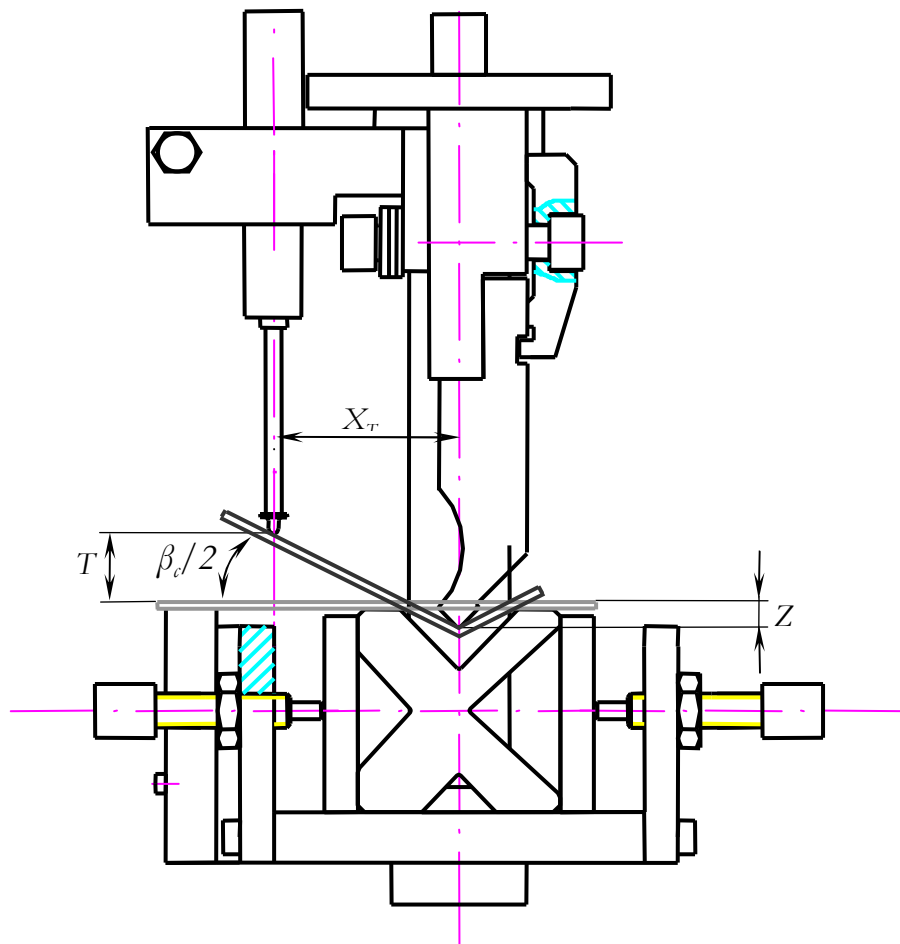


Figura 4.21 Esquema de las mediciones realizadas para la obtención del ángulo en carga

4.4 Técnica de análisis de las imágenes digitales

La realización y análisis de imágenes digitales de los especímenes doblados se ve motivada por la necesidad de medir el radio de curvatura en el punto de contacto punzón-chapa. Las mediciones de este parámetro usando galgas de radios, no eran de la precisión deseada, pues por un lado, en muchos casos el contacto entre la galga y el radio doblado no era

completo, y por otro esta medición supondría la asunción del modelo rígido-plástico en la chapa, es decir un radio único y dos tramos rectos.

Así pues el análisis de las imágenes digitales de chapas dobladas tiene como objetivo el realizar las mediciones geométricas, tanto el ángulo de doblado como el radio y curvatura en la zona doblada. Esto permitirá una posterior comprobación del modelo de doblado que más se ajusta a la zona deformada.

Inicialmente se pensó en la macrofotografía como técnica para digitalizar los especímenes doblados usando la cámara digital Nikon Coolpix 4500 del Serveis Tècnics de Recerca de la Universitat de Girona, pero fue descartada por varios motivos. Los principales: la dificultad de extraer la profundidad de la pieza de la propia fotografía para conseguir el perfil de medición; la obtención de motas de polvo u otras irregularidades ampliadas y la introducción de errores por este motivo; la dificultad para adecuar una buena luminosidad en el momento de fotografiar los especímenes doblados de manera que las sombras obtenidas no modifiquen el perfil de medición, y como consecuencia por los motivos anteriores, el trabajo de tratamiento de adecuación de la imagen requerido para obtener el perfil de medición correcto antes de convertir la imagen en una imagen binaria (imagen en blanco y negro) sobre el que realizar la medición.

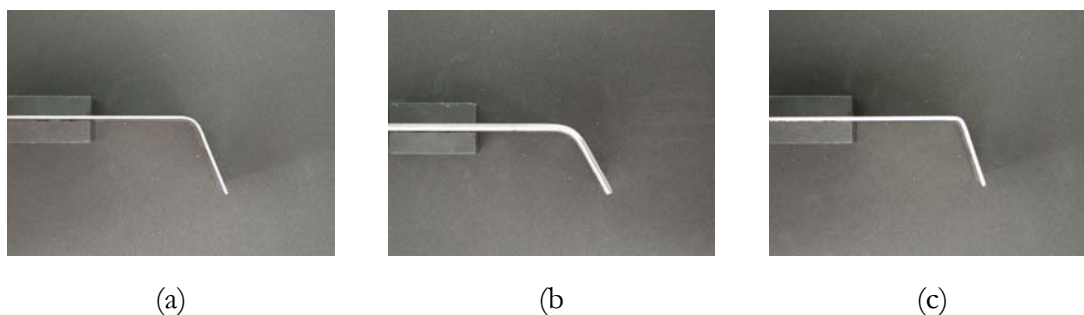


Figura 4.22 Imágenes digitales de especímenes doblados de diferente grosor y material, obtenidas mediante macrofotografía. En todos los casos, la pieza se mantiene verticalmente entre dos imanes. (a) acero inoxidable, grosor 1 mm., (b) acero inoxidable, grosor 3 mm. y (c) aluminio, grosor 1 mm.

Finalmente la obtención de las imágenes digitales de los especímenes doblados se ha realizado mediante el escáner Hewlett Packard 6100C/T del Serveis Tècnics de Recerca de la Universitat de Girona. Se exploran diferentes posibilidades cada una con dos resoluciones, mostradas en la Figura 4.23: (a.1 y a.2) Dibujo en blanco y negro con 300 y 600 píxeles de resolución respectivamente, (b.1 y b.2) Dibujo en blanco y negro con nitidez con 300 y 600 píxeles de resolución respectivamente, (c.1 y c.2) Dibujo en color con 300 y 600 píxeles de resolución respectivamente, (d.1 y d.2) Medias tintas en blanco y negro con 300 y 600 píxeles de resolución respectivamente, (e.1 y e.2) Fotografía en blanco y negro con 300 y 600 píxeles de resolución respectivamente, (f.1 y f.2) Fotografía en blanco y negro a 300 píxeles, con nitidez normal y 'extradensa' respectivamente, (g.1 y g.2) Fotografía en blanco y negro a 300 píxeles, con nitidez normal y 'extradensa' respectivamente, (h.1 y h.2) Fotografía en color con 300 y 600 píxeles de resolución respectivamente.

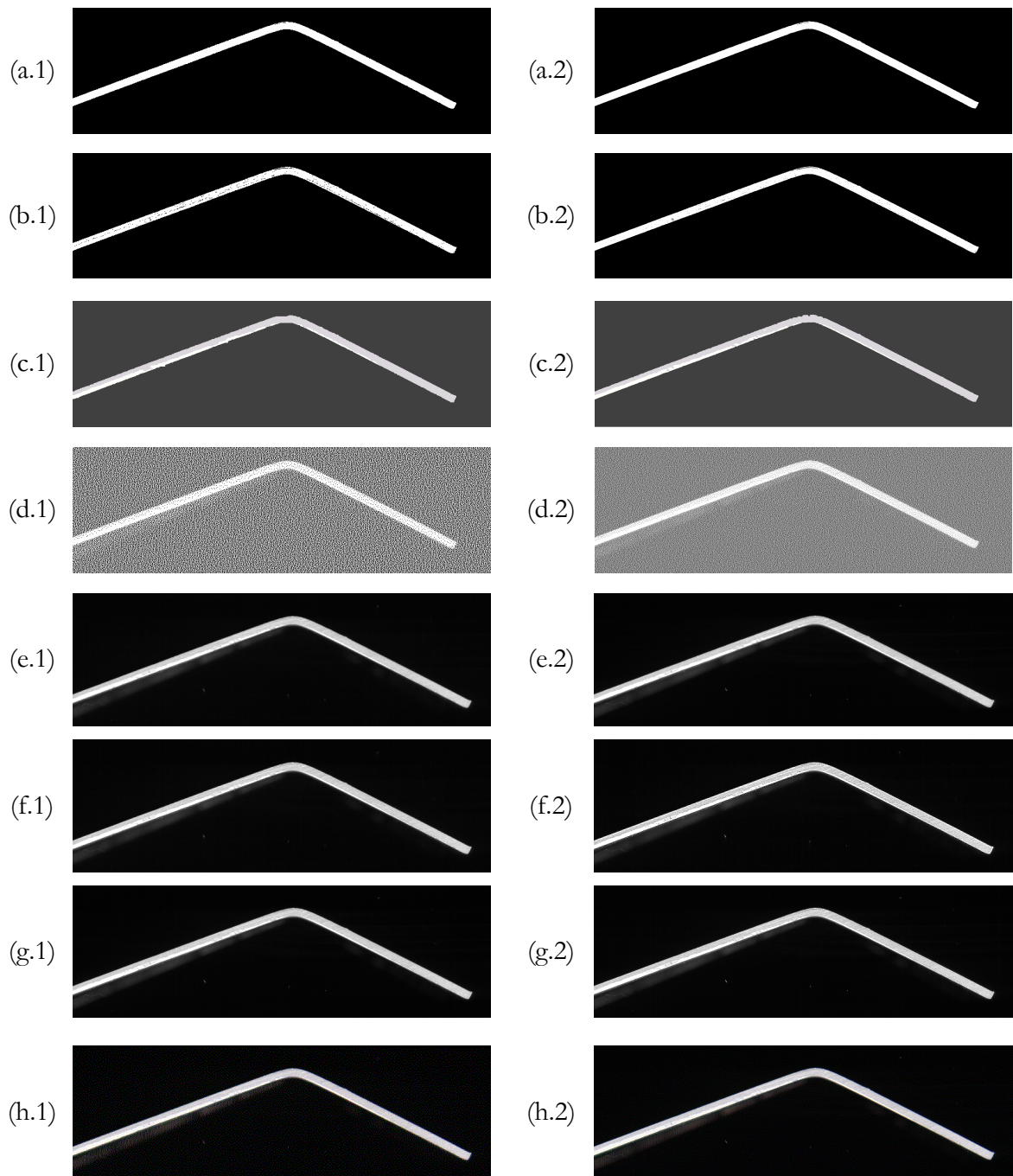


Figura 4.23 Imágenes digitales de la zona de curvatura, de especímenes doblados, obtenidas mediante escáner. Resolución: derecha, con 300 píxeles izquierda con 600 píxeles

Después de las diferentes pruebas, se decide por un lado, aumentar la resolución a la que se realizarán las imágenes para obtener una definición del perfil mejorada, por lo que finalmente se realizarán a 1200 píxeles. Y por otro lado, se escoge como tipo de impresión el escaneado de las chapas en modo de Dibujo Blanco y Negro Detallado, evitando de esta manera reflejos que pueden apreciarse de las figuras (e) a la (h) y se obtiene así directamente una imagen binaria o imagen que contiene sólo píxeles en blanco y negro, por lo que no requerirá un tratamiento posterior para conseguir la binarización de la imagen.

Para obtener las imágenes escaneadas de los especímenes doblados, se debe apoyar la pieza verticalmente sobre el vidrio del escáner.

4.4.1 Preparación del espécimen

Los especímenes doblados con anterioridad necesitan ser preparados antes de ser escaneados. Se elige uno de los dos perfiles de la pieza, el que se apoyará sobre el escáner, y se realiza una operación de acabado mediante una pulidora orbital o mediante pulido manual con tela esmeril de densidad adecuada (A400 o A600) en función de los materiales de las chapas dobladas. Esta operación de acabado se realiza con dos fines: por un lado, asegurar el apoyo plano entre la chapa doblada y el vidrio del escáner, y por otro asegurar que tal contacto no dañará la superficie del escáner, pues se elimina cualquier resto de rebaba.

A pesar de esta operación de acabado, ha sido necesario realizar una operación añadida. El motivo se puede observar en la Figura 4.24, la poca uniformidad en el pulido hace que sean visibles las huellas que deja la tela de esmeril y el escáner tiene suficiente luminosidad para reflejarlas

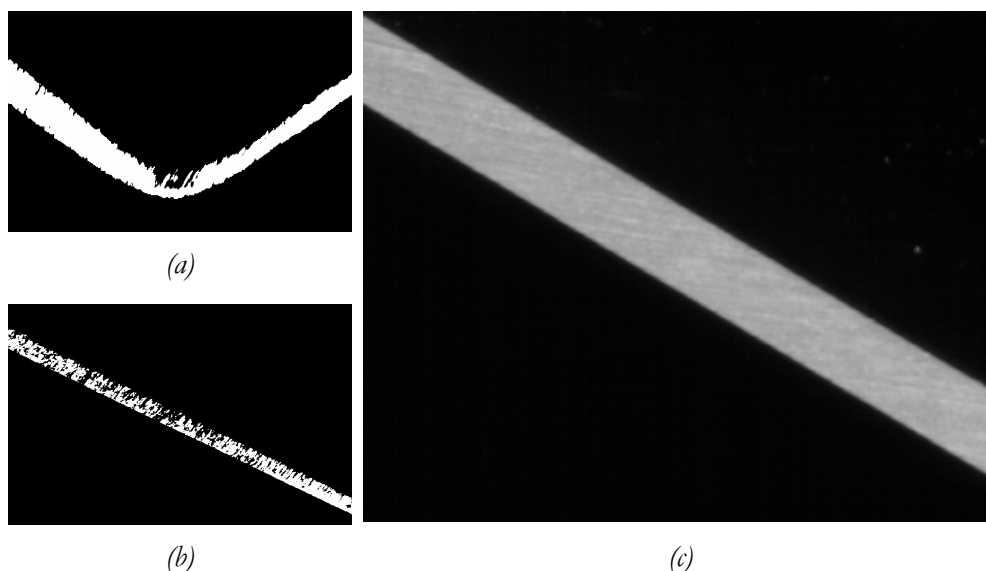


Figura 4.24 (a) y (b) ejemplos de imágenes en formato Dibujo blanco y negro, de 1200 píxeles de resolución, donde se observan las huellas de esmerilado o poca uniformidad en el pulido. (c) Fotografía en blanco y negro de 1200 píxeles de resolución, donde también se pueden apreciar las huellas del pulido

Estas pruebas iniciales con algunos especímenes doblados reflejaron dos problemas, el primero: que un mal pulido implicaba un mal contacto entre pieza y escáner, al no conseguir la planitud deseada a lo largo del perfil. Y en consecuencia se obtenía un perfil erróneo pues no se obtiene un grosor constante a lo largo del perfil (Figura 4.24 (a)) Los pulidos posteriores se realizaron con el esmero adecuado para asegurar la correcta planitud de la superficie de apoyo.

El segundo problema está relacionado con las huellas que deja el pulido sobre el perfil y que el escáner aún puede captar. Una imagen de este tipo imposibilitaría el posterior tratamiento de las imágenes, pues interesa obtener un perfil nítido, con una frontera clara entre el perfil de la pieza blanco y el fondo negro, que permitirá calcular el ángulo y la curvatura del espécimen doblado. La primera solución al problema del rallado apuntaba a realizar un pulido adicional de acabado con todas las probetas.

Esta operación adicional de pulido era costosa en tiempo por lo que se ha planteado y se ha probado con éxito un proceso alternativo. La alternativa ha consistido en emblanquecer o pintar de color blanco mate el perfil de la chapa doblada. Se realizaron pruebas con distintas técnicas. En primer lugar, se probó aplicar tiza al perfil antes de la obtención de la imagen. El principal inconveniente de esta solución fue la aportación de polvo a la superficie de trabajo del escáner y el consiguiente efecto inicuo en la imagen digital. En segundo lugar se intentó usar pintura. Tanto las pinturas plásticas aplicadas con rodillo de espuma, las pinturas con aerosol o incluso pintando con correctores de escritura tipo “typex” resultaban inapropiadas pues añadían un recubrimiento con un grosor excesivo que modificaban la definición real del perfil. Finalmente, se ha optado por el uso de rotuladores marcadores cuya característica principal es que pueden aplicarse sobre metales dejando un recubrimiento muy fino. Se han usado rotuladores modelo “uni POSCA” de Mitsubishi Pencil Co. de trazo medio o extra, en función del grosor del perfil a pintar. Estos rotuladores se utilizan popularmente para hacer graffiti’s.

Una vez se tienen los especímenes preparados según lo que se ha explicado en el apartado anterior (Figura 4.25) y las condiciones de escaneado definidas, es decir, captación de las imágenes con formato “Dibujo en blanco y negro detallado” y con una resolución de 1200 píxeles, se digitalizan todos los especímenes para que puedan ser analizados.



Figura 4.25 Perfil superior pintado con el rotulador marcador de color blanco. Perfil inferior sin pintar, únicamente pulido.

4.4.2 Análisis de la Imágenes Digitales. Medición de la curvatura.

Sobre las imágenes digitales de este estudio se ha realizado una medición de la curvatura de la zona doblada y del ángulo de doblado final.

Las imágenes captadas, como ya se ha comentado, son imágenes binarias. El objetivo de trabajar con este tipo de imagen, según (Russ, 1995), es separar características del fondo de la imagen, porque así pueden realizarse operaciones de medición, de unión o de recuento.

La medición del ángulo y el radio de doblado se ejecutan a través de la obtención de la frontera del perfil, o sea la línea frontera entre la zona blanca representativa del perfil y el fondo negro de la imagen. Para obtener esta línea frontera y realizar las mediciones en la

imagen se ha desarrollado un programa que permite el análisis de las imágenes digitales de los especímenes doblados utilizando funciones del módulo de Procesamiento de Imágenes de MATLAB®.

El programa que se ha definido consta principalmente de tres etapas: la primera en la que se realiza un tratamiento de la imagen para corregir imperfecciones que pueda contener; una segunda etapa a la que se ha llamado pre-análisis de la imagen, donde se localizan los perfiles frontera que definirán las zonas rectas y de curvatura; y finalmente una tercera etapa donde se realiza la medición del ángulo de doblado de la chapa, el radio en el punto de contacto pieza-punzón y se caracteriza la zona de curvatura mediante el ajuste de curvas polinómicas.

a) Tratamiento de la imagen binaria

En MATLAB® una imagen binaria se representa como una matriz de valores lógicos formada por ceros y unos, que habitualmente identifican respectivamente al negro y al blanco.

En algunas de las imágenes capturadas, pocas en número, se observan dos tipos de imperfecciones, como es mostrado en la Figura 4.26. Las primeras, las que están contenidas dentro del perfil, zonas oscuras dentro del perfil blanco, posiblemente causadas por alguna ralladura una vez pintadas. Y las segundas, zonas blancas en el fondo negro de la imagen, que suelen ser causadas por motas de polvo que ha perdurado, aunque se haya limpiado cuidadosamente la superficie de apoyo.

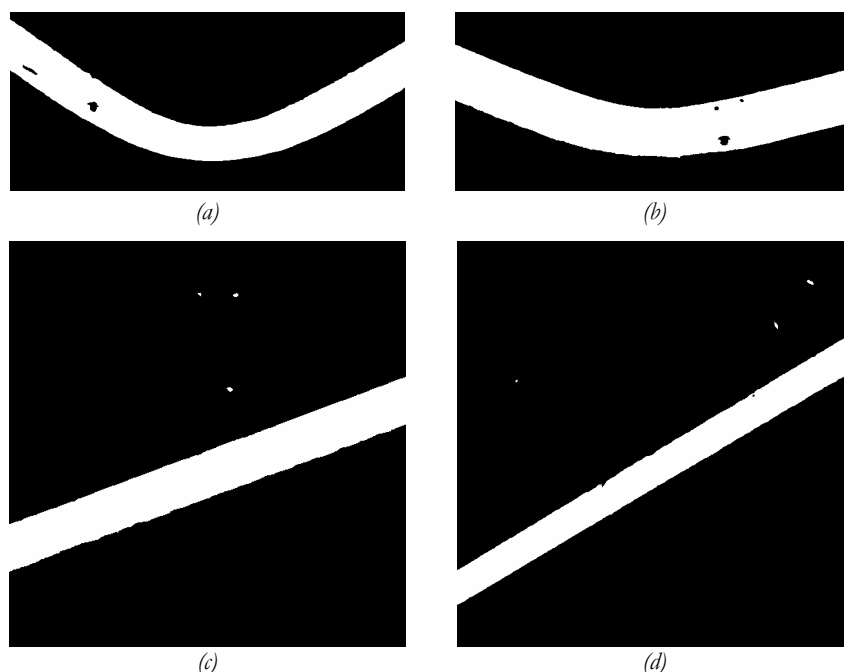


Figura 4.26 (a) y (b) Ejemplo de imperfecciones contenidas en el perfil, (c) y (d) Ejemplo de imperfecciones externas al perfil

Aunque la mayoría de las imágenes no presentan imperfecciones, se ha llevado a cabo dentro del programa la corrección automática de las imperfecciones que se han definido en segundo lugar, zonas blancas sobre el fondo negro (Figura 4.26 (c) y (d)). Estas imperfecciones externas al perfil, deben corregirse, pues son las que pueden introducir

errores en la localización de las fronteras del perfil tal y como puede observarse en la Figura 4.27. La obtención de estas fronteras se explica en el siguiente apartado.

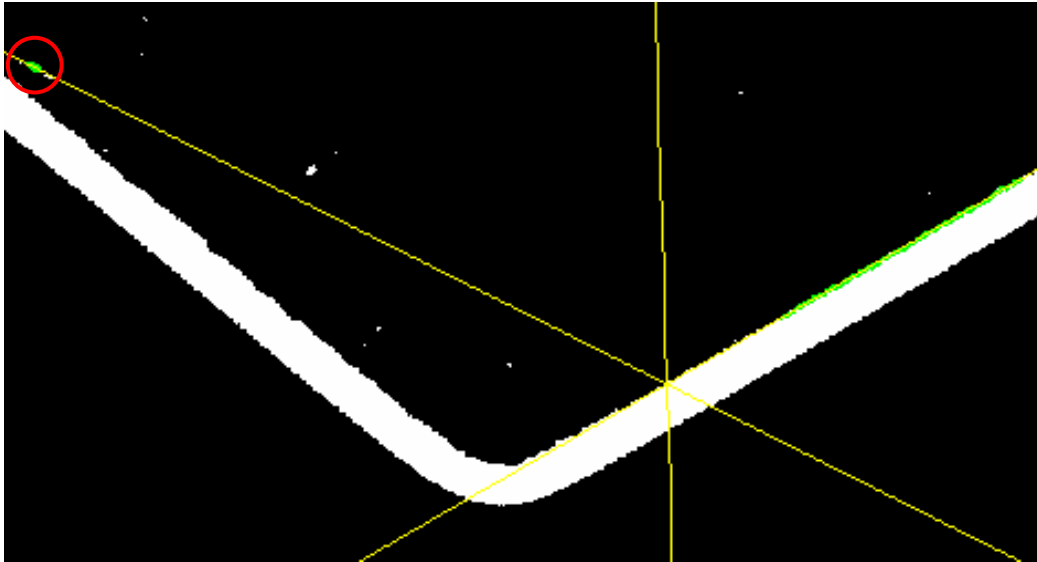


Figura 4.27 Error en la localización de la frontera (en verde) en la zona de las alas. El programa encuentra antes la mota de polvo blanca, círculo rojo en la figura, que el perfil de interés.

Las imágenes binarias tratan con píxeles individuales (ceros y unos) que conforman la imagen. Para el propósito que se persigue de corrección de estas imágenes, ha sido necesario que los píxeles se identifiquen formando parte de un conjunto conectado, al que se le llama objeto. En el caso que nos ocupa el objeto principal es el perfil, y el resto de objetos deben convertirse en fondo de la imagen. Para realizar esta operación de limpieza del fondo de la imagen los diferentes objetos que aparecen en la imagen se han identificado y etiquetado. La eliminación de todos aquellos objetos que no sean el objeto principal (habitualmente el mayor y con etiqueta de objeto igual a 1) se realiza mediante una operación de reconstrucción morfológica de relleno por inundación. Esta operación consiste en cambiar los píxeles conectados blancos formando un mismo objeto, es decir los causados por motas de polvo, a píxeles de color negro representativo del fondo de la imagen.

b) Pre-análisis de la imagen

En esta etapa del programa, la imagen está libre de imperfecciones y en condiciones de iniciar la localización de las fronteras interiores entre el contorno y el fondo de la imagen. Se considera una etapa de pre-análisis porque durante esta etapa no se realiza ninguna medición. En esta etapa se coloca la imagen en la posición adecuada para empezar a realizar las mediciones perseguidas. Esta posición se define de manera que las zonas rectas queden al mismo ángulo, es decir, que la bisectriz imaginaria del ángulo de doblado permanezca vertical, y que la zona curvada quede en posición cóncava ocupando la zona central de la imagen (Figura 4.28).

Para el pre-análisis de las imágenes se diferenciarán siempre dos zonas: la curvada y la de las zonas rectas, pues en cada zona se ejecutarán mediciones diferentes. La localización de la zona curvada nos permitirá caracterizar la curvatura, mientras que la localización de las dos fronteras en cada tramo recto, nos permitirá medir con precisión el ángulo de doblado final.

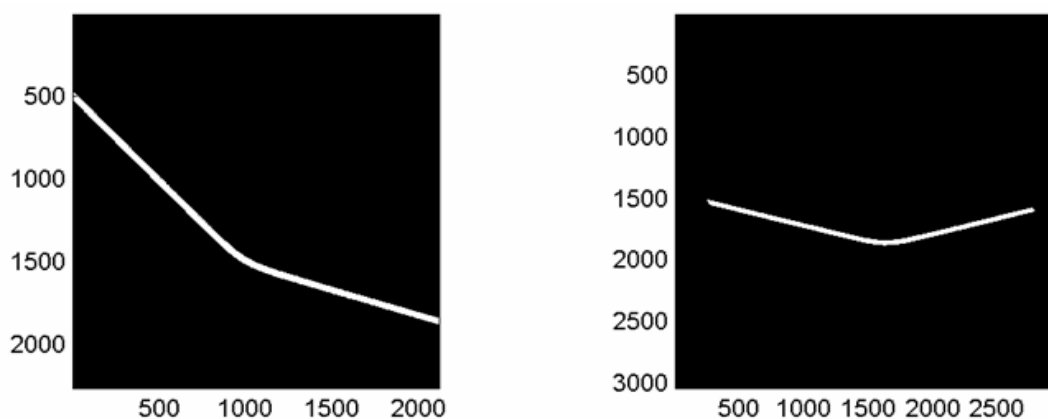


Figura 4.28 Imagen derecha, lectura de la imagen de partida en píxeles; Imagen izquierda, rotación de la imagen de partida. (t1w35_5.png).

El programa empieza localizando las fronteras interiores en las zonas rectas de la chapa doblada. En cada tramo recto y a partir de un píxel de partida (cada una de las esquinas superiores de la imagen para cada tramo) se busca el primer píxel diferente de cero. Usando como punto de partida la localización de este píxel se consigue trazar la frontera del perfil. La definición de estas fronteras en los tramos rectos se realiza mediante un algoritmo iterativo de avance sobre el tramo recto, se explora un número de píxeles predefinidos siguiendo una orientación cardinal, hasta detectar el inicio de la zona de curvatura. Esta frontera se podrá observar sobre la misma imagen marcada en color verde.

Una vez definidas cada una de las trazas en las alas, se ajusta sobre ellas una recta mediante regresión lineal por mínimos cuadrados. A partir de las ecuaciones de estas rectas se puede calcular el ángulo entre ellas y la orientación de la bisectriz que forman ambas rectas. La determinación del ángulo que forma la bisectriz con el eje vertical de la imagen permite realizar una operación de rotación de la imagen para que la bisectriz coincida con el eje vertical. El proceso descrito en este apartado se ve reflejado en la Figura 4.29.

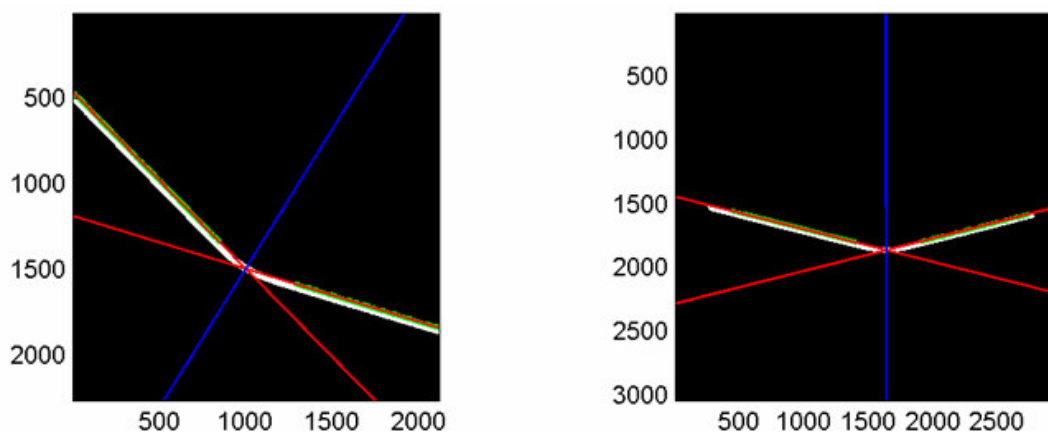


Figura 4.29 Imagen derecha, localización de las trazas (verde), ajuste de las rectas (rojo) y cálculo de la bisectriz (azul). Imagen izquierda, localización de las trazas, ajuste de las rectas y cálculo de la bisectriz, en vertical, en la imagen rotada. (t1w35_5.png)

c) Mediciones geométricas

Una vez se obtiene la imagen girada en la posición de cálculo se realiza primero la medición del ángulo final de doblado y a continuación la caracterización de la curvatura de la zona doblada.

La manera de cuantificar el ángulo final de doblado sobre la imagen girada se consigue calculando el ángulo existente entre las rectas ajustadas sobre las trazas (θ), pues obteniendo este, es fácil obtener su complementario (β). El hecho de haber calculado en la etapa anterior las trazas hasta el inicio de la zona curvada garantiza una mayor precisión en el cálculo del ángulo final de doblado, pues la regresión lineal tiene más puntos, lo que mejora su definición.

La caracterización de la curvatura de la zona doblada exige un proceso iterativo para la localización de las trazas en la zona curva, un proceso similar al descrito en la etapa anterior. El punto de partida para empezar a determinar las trazas en esta zona es la abscisa del punto de intersección entre las rectas ajustadas anteriormente, pues esta abscisa corresponde al centro de la zona curvada. Desde la posición superior en la imagen de esta coordenada se explora verticalmente la imagen, buscando el primer píxel diferente de cero, que será el punto central y de inicio de la traza en la zona curvada.

Al partir del centro de la zona doblada, exige iniciar la obtención de dos trazas: una, en dirección a la derecha de la imagen y otra, en dirección izquierda. Al igual que en las trazas rectas, se realiza un algoritmo iterativo que mejora la precisión de la definición de las trazas en la zona doblada. Eso se traduce en asegurar que las trazas curvas se aproximan al máximo a la zona recta. Este requerimiento trasladado al algoritmo significa que la traza en la zona curva va creciendo hasta que se acerca a las rectas que se han ajustado sobre las trazas lineales (en rojo en la Figura 4.29) lo que se ha considerado una distancia mínima (3 píxeles). Una vez realizada esta operación a derecha e izquierda del centro de la imagen, se unen ambas trazas convirtiéndolas en una traza única en la banda doblada.

Una vez se obtiene esta traza frontera en la banda doblada, se está en condiciones de caracterizar su curvatura. Para ello es posible realizar un ajuste por regresión de mínimos cuadrados con infinitud de funciones. Dependiendo de la función de ajuste escogida se definen diferentes tipos de curvatura que pueden relacionarse con la definición de la geometría de la pieza final según diferentes modelos de doblado al aire. Por ejemplo, con un ajuste mediante la función de la circunferencia se obtiene un radio de curvatura constante al igual que utilizando el modelo rígido-plástico. En cambio utilizando funciones simétricas de curvatura no constante como la parábola se puede relacionar, por ejemplo, con el modelo de Anoyke-Siribor (2000). Con funciones polinómicas de exponente superior y par pueden englobarse el resto de modelos, donde la curvatura no se considera constante; ejemplos de este último caso son los modelos de Stelson (1982), Wang (1993) o de Vin (1996) explicados en la sección 3.2.4. El hecho de contemplar inicialmente todas estas alternativas ha permitido observar el error que se comete en cada uno de los distintos ajustes.

La Figura 4.30 representa la imagen escaneada de una chapa doblada, y sobre la misma imagen se han ajustado las diferentes opciones de curvas polinómicas. Como se puede observar en la ampliación de la Figura 4.30 las curvas polinómicas de grado superior son las que se ajustan mejor a la traza frontera experimental. Por este motivo el círculo, quedará descartado, y la caracterización de la curvatura se ha analizado con las funciones polinómicas de grado 2, 4 y 6.

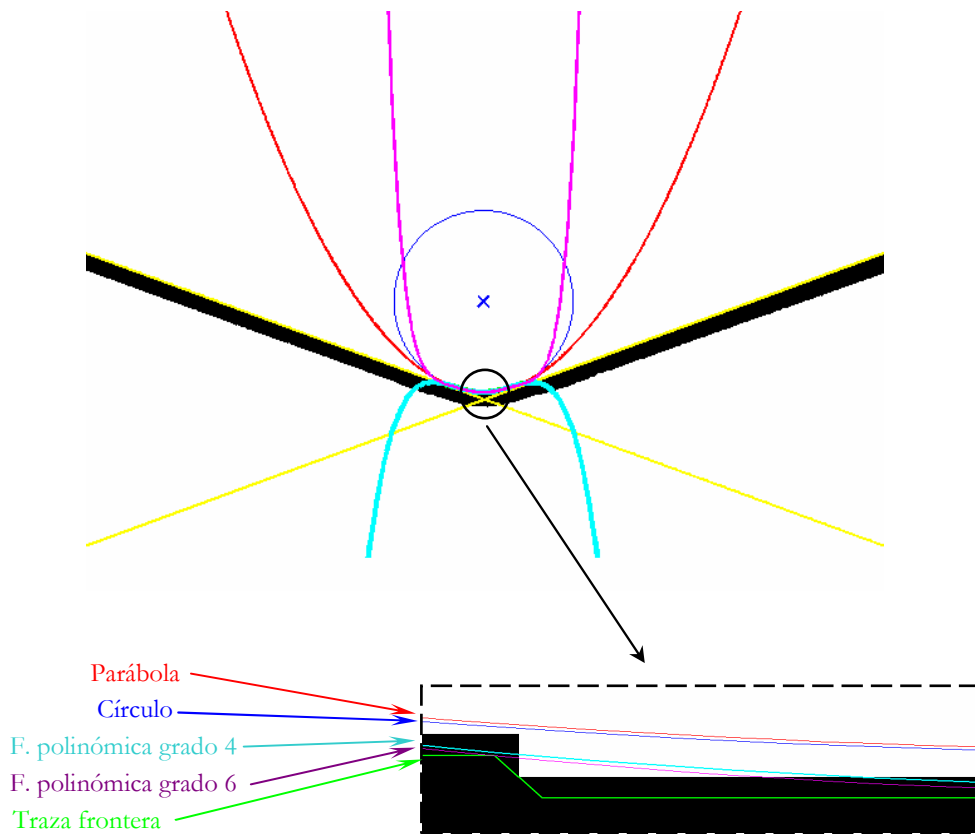


Figura 4.30 Ajuste de las diferentes curvas polinómicas sobre la imagen de uno de los especímenes doblados. Ampliación de la zona curvada (Especímen: at1w35_6.png).

La observación de la calidad del ajuste sobre las trazas fronteras se puede valorar mejor en la Figura 4.31. En la que se representa las trazas y las funciones polinómicas expresadas en milímetros (cada punto X, Y es un punto de la traza).

Otra forma de apreciar la calidad del ajuste de estas funciones polinómicas y la traza frontera es mediante el cálculo de la diferencia entre las funciones ajustadas y la traza frontera, a lo que se ha llamado error en píxel:

$$error_píxel = y_{traza} - f(y)_{ajuste} \quad (4.9)$$

La representación de los valores del error en píxel, para las curvas anteriores (exceptuando el círculo) queda plasmada en la Figura 4.32. En ella se aprecia, como la parábola tiene más puntos fuera del intervalo ± 1 píxel, en la zona que corresponde al centro de la chapa doblada; mientras que las funciones polinómicas de grado 4 y 6, en la zona central permanecen dentro de este intervalo de ± 1 píxel, siendo la de grado 6 la que presenta menor error.

El hecho de haber definido este error en píxel según la ecuación (4.9) implica que el valor del error en píxel tiene signo, lo que permite observar en qué zonas de la imagen la función polinómica está por encima de la traza (error en píxel negativo, como es el caso de la zona central de doblado) y en qué zonas la función polinómica se encuentra por debajo de la traza (error en píxel positivo).

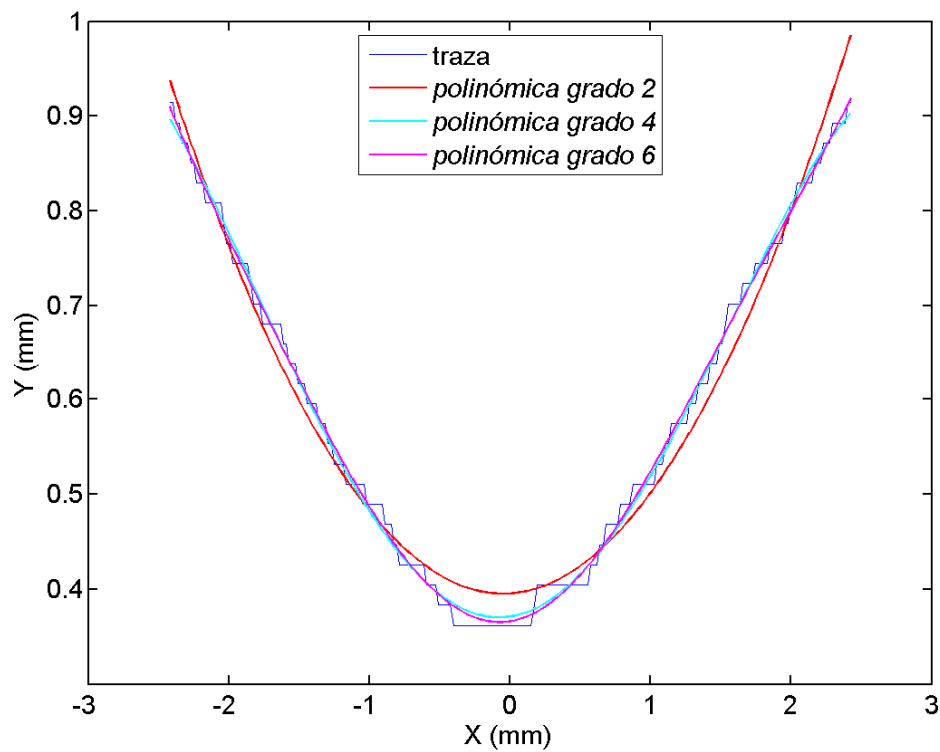


Figura 4.31 Trazas y funciones polinómicas ajustadas en la zona curvada (Especimen: at1w35_6.png), funciones no simétricas.

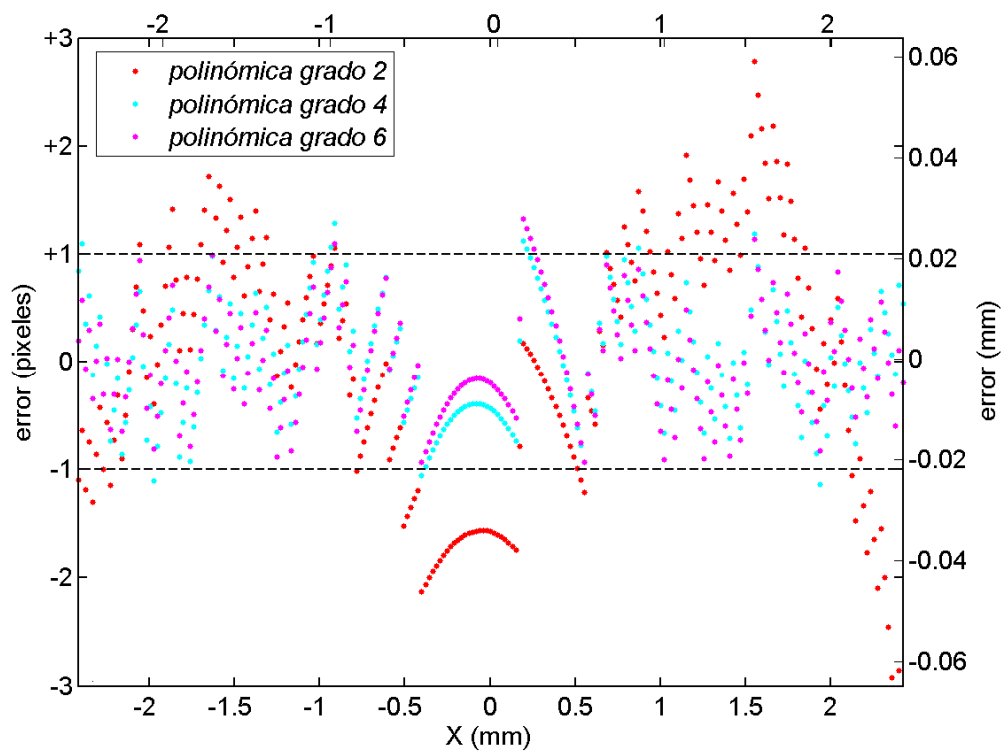


Figura 4.32 Error en píxeles entre las funciones y la traza frontera (Especimen: at1w35_6.png), funciones no simétricas.

Escala de la imagen. Calibración.

Hasta este momento la unidad utilizada en la representación de las imágenes es el píxel. No obstante es necesario tener una escala que permita convertir los resultados en milímetros. Para ello ha sido necesario realizar una operación de calibración consistente en escanear una porción de papel milimetrado, en las mismas condiciones en las que se han escaneado los especímenes doblados.

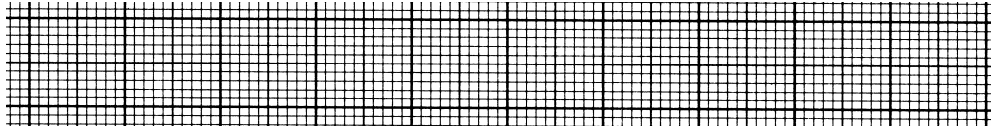


Figura 4.33 Imagen de papel milimetrado usada para realizar la escala de medición

Se trata de una operación en la que se escoge la posición de dos píxeles en la imagen de la Figura 4.33, cuya distancia en milímetros también es conocida por el simple hecho de utilizar el papel milimetrado. De manera que la escala de medición resulta de realizar la operación:

$$Escala_imagen = \frac{|posic._{pixel_derecha} - posic._{pixel_izquierda}|}{distancia_real(mm)} = \left[\frac{píxel}{mm} \right] \quad (4.10)$$

Medición del radio de curvatura

Llegado a este punto, se está en condiciones de determinar el valor del radio de curvatura en el punto de contacto punzón-chapa. Para realizar esta medición se parte de la caracterización de las curvaturas anteriores mediante las funciones polinómicas de grado 4 y 6, cuyos coeficientes y términos independientes, se expresan según recoge la ecuación (4.11).

$$\begin{aligned} F.grado_2 &= a_2 + b_2 \cdot x + c_2 \cdot x^2 \\ F.grado4 &= a_4 + b_4 \cdot x + c_4 \cdot x^2 + d_4 \cdot x^3 + e_4 \cdot x^4 \\ F.grado_6 &= a_6 + b_6 \cdot x + c_6 \cdot x^2 + d_6 \cdot x^3 + e_6 \cdot x^4 + f_6 \cdot x^5 + g_6 \cdot x^6 \end{aligned} \quad (4.11)$$

El algoritmo desarrollado permite obtener los ajustes polinómicos anteriores, expresados en la ecuación (4.11), o se puede forzar que las funciones ajustadas contengan únicamente los exponentes pares, expresadas según (4.12), para obligar su simetría.

$$\begin{aligned} Función_grado2 &= a_2 + b_2 \cdot x^2 \\ Función_grado4 &= a_4 + b_4 \cdot x^2 + c_4 \cdot x^4 \\ Función_grado6 &= a_6 + b_6 \cdot x^2 + c_6 \cdot x^4 + d_6 \cdot x^6 \end{aligned} \quad (4.12)$$

El algoritmo se ejecutará por defecto con las ecuaciones expresadas según (4.12), con la posibilidad de ejecutarlas en la forma (4.11), pues la función es correcta y proporciona menos coeficientes polinómicos, por lo que son funciones más manejables. Principalmente se ha optado por esta alternativa, pensando en la aplicación posterior de los datos obtenidos para el aprendizaje de una red neural, pues el número de coeficientes es menor.

Los resultados obtenidos con las funciones simétricas en cuanto a la calidad del ajuste y el error pueden apreciarse en las siguientes Figuras, 4.34 y 4.35.

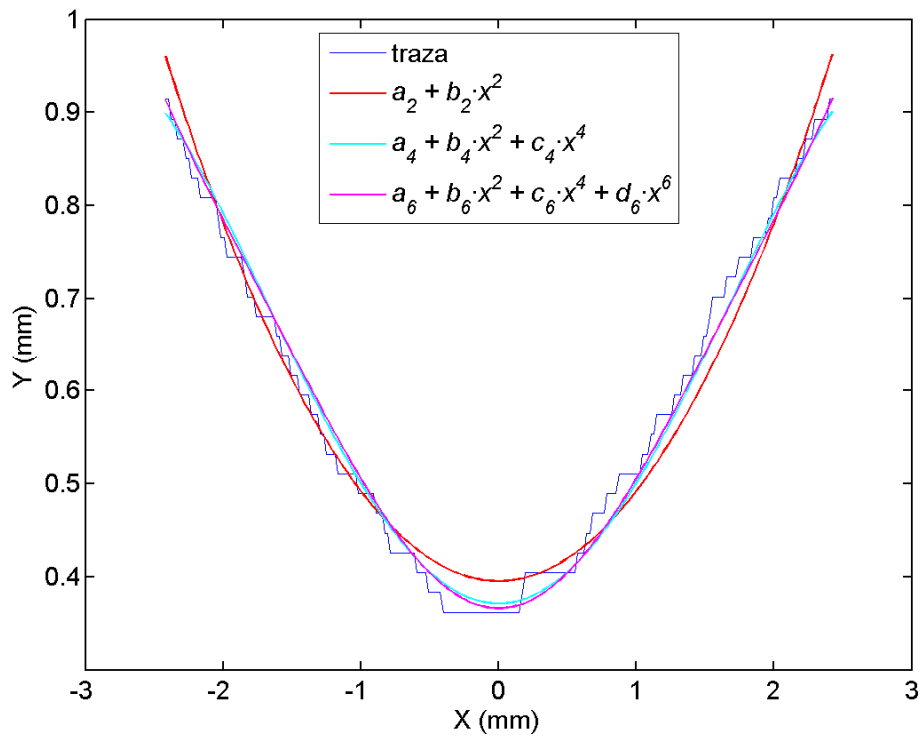


Figura 4.34 Trazas y funciones polinómicas ajustadas en la zona curvada (Especimen: at1w35_6.png), funciones simétricas.

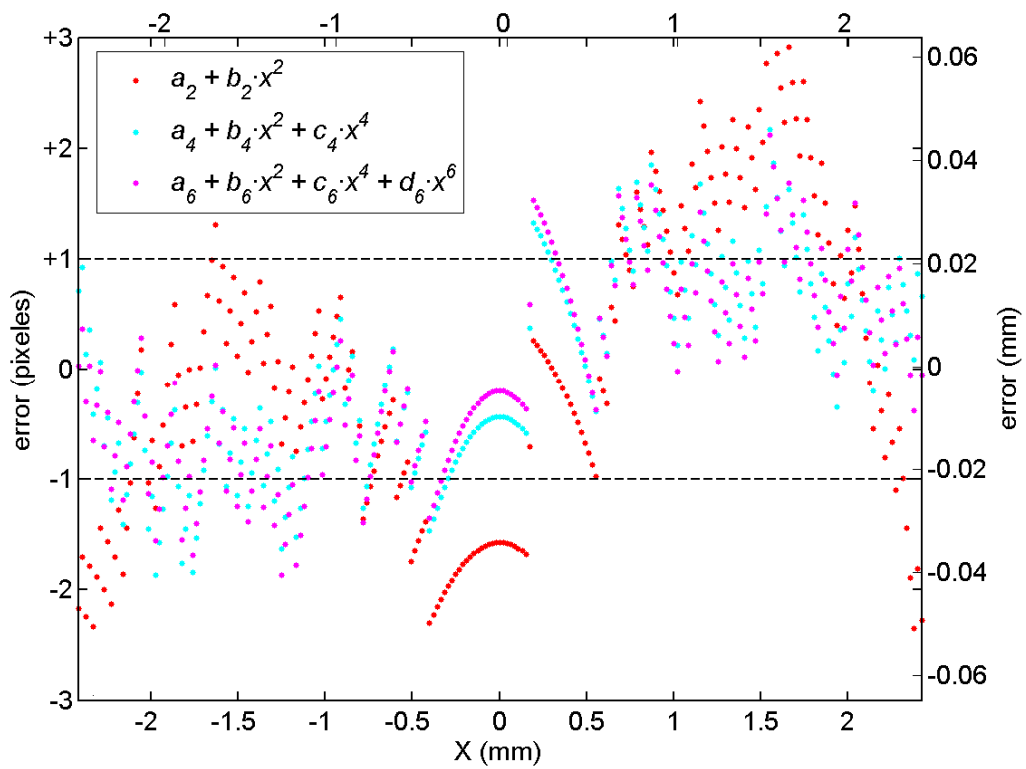


Figura 4.35 Error en píxeles entre las funciones y la traza frontera (Especimen: at1w35_6.png), funciones simétricas.

El hecho de tener la curvatura expresada en forma de función ($y = f(x)$) permite recurrir a la geometría diferencial, según (Weisstein, 2005b), que permite expresar el radio de curvatura como:

$$R = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{\left| \frac{d^2y}{dx^2} \right|} \quad (4.13)$$

La inclusión de las funciones polinómicas anteriores en la ecuación (4.13) permite obtener la evolución del radio en la zona doblada. La representación gráfica resultante presenta la siguiente forma:

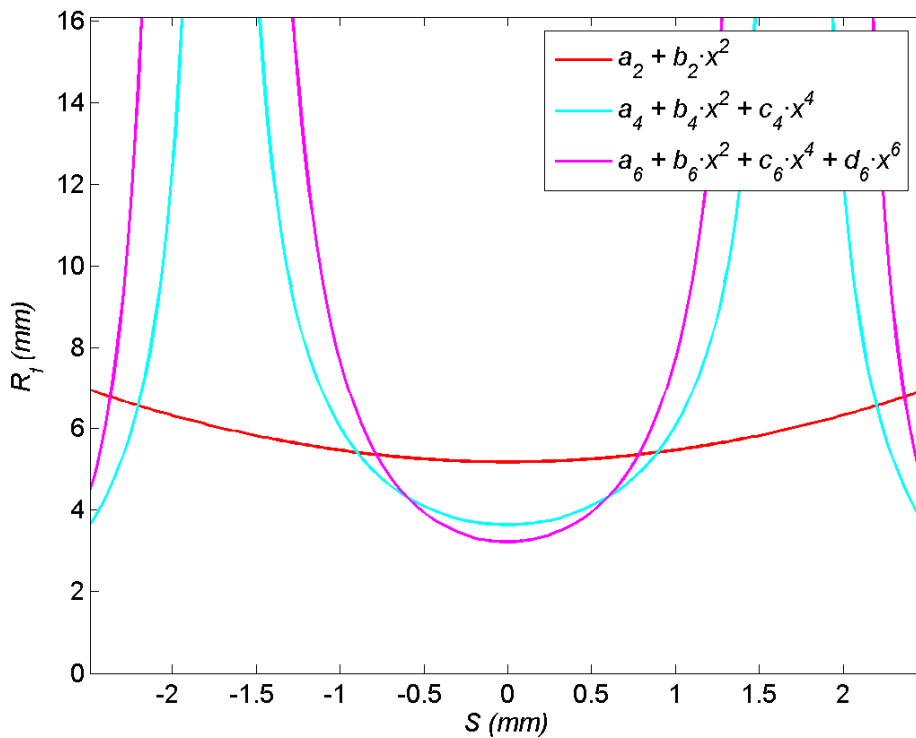


Figura 4.36 Evolución del radio de curvatura (Especimen: at1w35_6.png).

Para realizar la medición en el punto concreto de contacto punzón-chapa se recurre al punto que ha sido hallado previamente en el centro de la zona doblada como inicio para determinar las trazas en la zona doblada (abscisa 0 en la Figura 4.36). En este punto se evalúa la función evolución del radio en la zona doblada según la ecuación (4.13); el resultado obtenido en el caso que sirve de ejemplo (at1w35_6.png) es de:

$$R_{\text{punzón-chapa}} (\text{f. grado 4 simétrica}) = 3.47035122 \text{ mm}$$

$$R_{\text{punzón-chapa}} (\text{f. grado 6 simétrica}) = 3.15063904 \text{ mm}$$

El hecho de obtener una expresión que represente la evolución de los radios permite también obtener la evolución de la curvatura mediante la relación:

$$K = \frac{1}{R} \quad (4.14)$$

Cuya representación gráfica es:

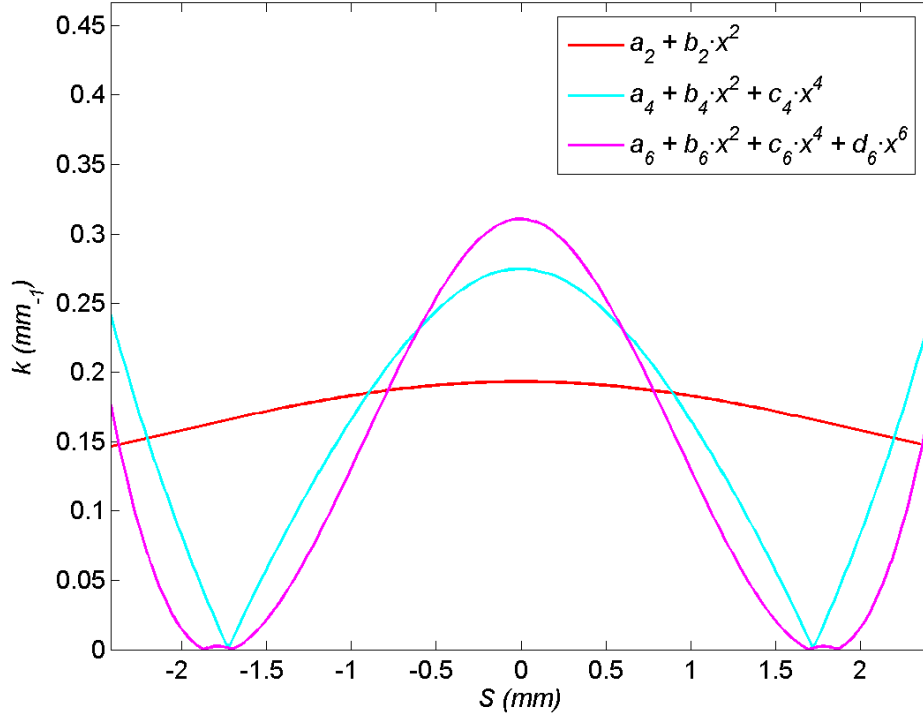


Figura 4.37 Evolución de la curvatura (Especimen: at1w35_6.png).

La geometría diferencial (Weisstein, 2005a), permite relacionar la longitud de arco con la curva expresada como función, mediante la siguiente expresión:

$$S = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + 1} dx \quad (4.15)$$

El cálculo de la longitud de arco se realiza en la mitad de la zona doblada, pues anteriormente ya se ha exigido la simetría en las curvas. Lo que significa que el algoritmo desarrollado evalúa la longitud de arco entre a igual a 0 (centro de la imagen) y b igual a la posición última de la abscisa de la traza curvada, así como queda representado en la Figura 4.36 y la Figura 4.37.

A modo de recapitulación, en la Figura 4.38, se representa el resumen o esquema seguido por el programa de análisis de las imágenes digitales de las chapas dobladas, que se ha descrito durante todo esta sección.

En el Apéndice C se pueden consultar los resultados completos del análisis de las imágenes digitales.

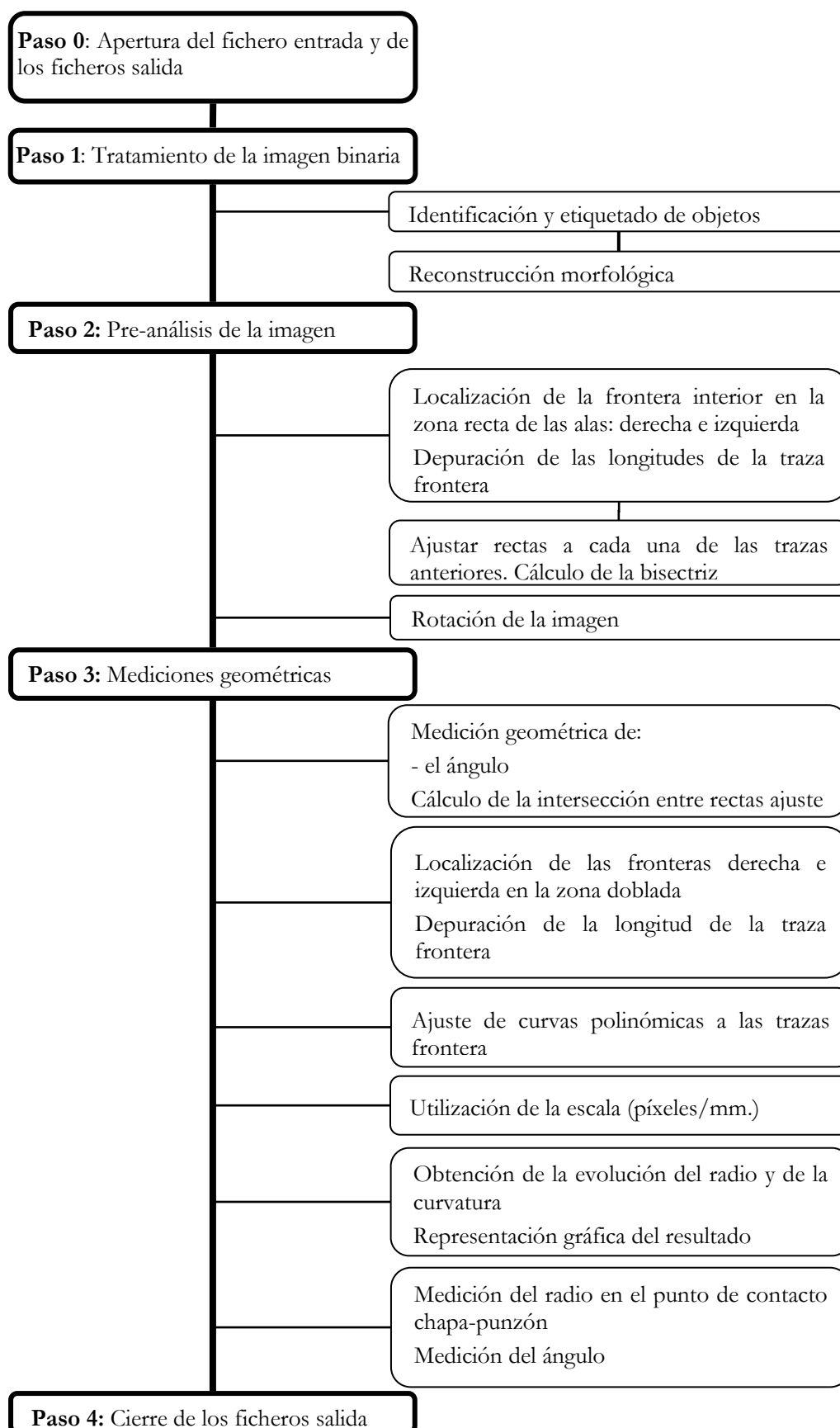


Figura 4.38 Esquema del algoritmo del tratamiento de imágenes digitales

4.5 Análisis y Resultados obtenidos

Se han realizado 103 experimentos para el acero inoxidable y 54 para el aluminio. Estos experimentos agrupados alrededor de la variable ancho de matriz, w_b , representan 22 grupos de pruebas en los que se organiza el almacenamiento de datos.

Para cada grupo de datos ensayados, a modo de ejemplo se presenta en la Tabla 4.7 resultados para el caso amplitud de matriz, w_b 50 mm., de chapa de acero inoxidable de grosor 1 mm., se obtienen los valores de entrada: ángulo objetivo (β), que se quiere conseguir en la chapa doblada, en función del valor de desplazamiento del punzón, (Z), consigna que se dará a la máquina. El ángulo objetivo de doblado se calcula según el modelo rígido-plástico (consultar las ecuaciones del apartado 3.2.3a)).

Durante el ensayo se registran las mediciones en carga y las mediciones sobre la pieza final resultante, es decir, se obtiene el fichero (se nombra igual que la probeta ensayada) donde quedan grabados los datos que conforman la evolución fuerza-desplazamiento del punzón y los valores proporcionados por el transductor. A continuación, una vez conseguido el doblado se realiza la medición con el goniómetro (β_f).

VALORES de ENTRADA						MEDICIONES DEL ENSAYO			
<i>Probeta. Fichero- evolución de la carga.</i>	β objetivo *				Z (mm)	CARGA	PIEZA FINAL		
	β	°	'	"		T transductor (mm)	β_f Goniómetro		
							°	'	β_f
spk4_t1w50_ai	18.402	18	24	6.63	4	11.260	13	5	13.083
spk5_t1w50_ai	22.962	22	57	41.77	5	14.701	19	30	19.500
spk6_t1w50_ai	27.476	27	28	33.61	6	17.516	24	5	24.083
spk7_t1w50_ai	31.931	31	55	53.34	7	20.331	27	45	27.750
spk8_t1w50_ai	36.315	36	18	55.64	8	23.459	33	5	33.083
spk9_t1w50_ai	40.616	40	36	59.32	9	25.961	37	40	37.667
spk10_t1w50_ai	44.824	44	49	27.86	10	30.341	42	10	42.167
spk11_t1w50_ai	48.930	48	55	49.78	11	33.781	46	35	46.583
spk12_t1w50_ai	52.927	52	55	38.79	12	35.658	51	25	51.417
spk13_t1w50_ai	56.809	56	48	33.82	13	39.412	55	0	55.000
spk14_t1w50_ai	60.572	60	34	18.82	14	42.852	58	30	58.500
spk15_t1w50_ai	64.212	64	12	42.59	15	45.980	62	20	62.333
spk16_t1w50_ai	67.727	67	43	38.34	16	49.108	66	5	66.083

Tabla 4.7 Valores de entrada y mediciones del ensayo de condiciones experimentales w_b 50 mm., de chapa de acero inoxidable de grosor 1 mm

En consecuencia, a las mediciones presentadas en la Tabla 4.7, la Tabla 4.8 presenta los correspondientes valores resultados en cuanto a ángulo en carga y recuperación:

Probeta	β_c	RECUPERACIÓN	
		$\beta_c - \beta_f$	$Kr = \beta_f / \beta_c$
spk4_t1w50_ai	25.533	12.449	0.512
spk5_t1w50_ai	32.610	13.110	0.598
spk6_t1w50_ai	38.494	14.411	0.626
spk7_t1w50_ai	44.175	16.425	0.628
spk8_t1w50_ai	50.074	16.991	0.661
spk9_t1w50_ai	54.867	17.200	0.687
spk10_t1w50_ai	61.841	19.674	0.682
spk11_t1w50_ai	67.240	20.657	0.693
spk12_t1w50_ai	70.568	19.151	0.729
spk13_t1w50_ai	75.780	20.780	0.726
spk14_t1w50_ai	80.337	21.837	0.728
spk15_t1w50_ai	84.317	21.983	0.739
spk16_t1w50_ai	88.061	21.977	0.750

Tabla 4.8 Valores experimentales obtenidos del ángulo en carga y de la recuperación (expresada como $(\beta_c - \beta_f)$ y como Kr) para el ensayo de condiciones experimentales m_d 50 mm., de chapa de acero inoxidable de grosor 1 mm

Estos mismos valores en forma de representación gráfica pueden ser observados en los diagramas siguientes.

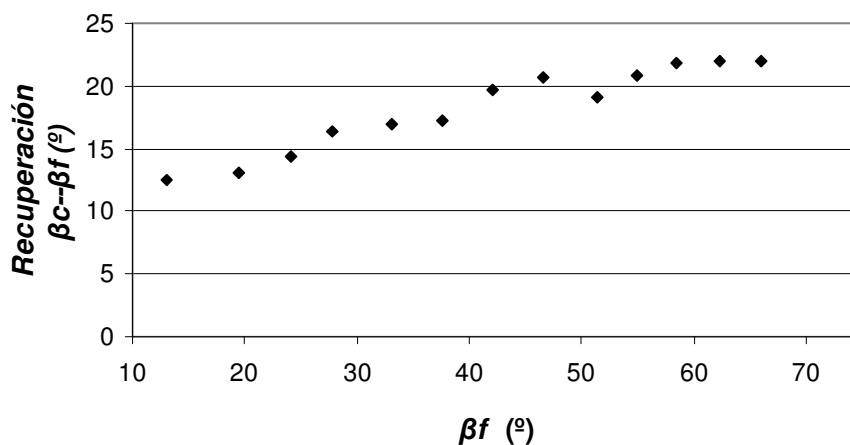


Figura 4.39 Valores experimentales de la recuperación expresada como $(\beta_c - \beta_f)$ para el ensayo de condiciones experimentales m_d 50 mm., de chapa de acero inoxidable de grosor 1 mm

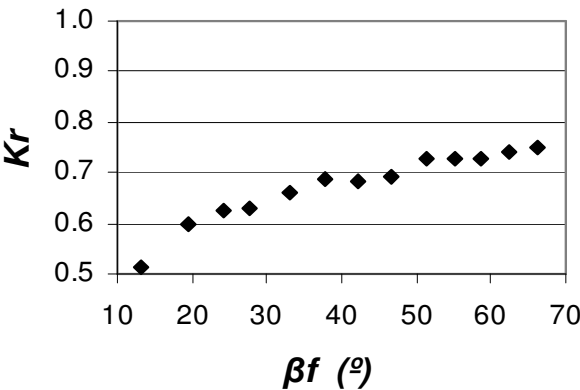


Figura 4.40 Valores experimentales de la recuperación expresada como Kr para el ensayo de condiciones experimentales w_d 50 mm., de chapa de acero inoxidable de grosor 1 mm

El error cometido respecto a los valores de entrada u objetivo, es decir respecto al modelo rígido-plástico, se calculan en la Tabla 4.9 y se representan en la Figura 4.41:

Probeta	ERROR																													
	β - βf																													
spk4_t1w50_ai	5.319	<table><caption>Data for Figure 4.41</caption><tr><th>βf (°)</th><th>Error, β-βf (°)</th></tr><tr><td>15</td><td>5.3</td></tr><tr><td>20</td><td>3.4</td></tr><tr><td>25</td><td>3.3</td></tr><tr><td>28</td><td>4.1</td></tr><tr><td>35</td><td>3.2</td></tr><tr><td>38</td><td>2.9</td></tr><tr><td>42</td><td>2.6</td></tr><tr><td>45</td><td>2.3</td></tr><tr><td>52</td><td>1.5</td></tr><tr><td>55</td><td>1.8</td></tr><tr><td>58</td><td>2.0</td></tr><tr><td>62</td><td>1.8</td></tr><tr><td>65</td><td>1.6</td></tr></table>	βf (°)	Error, β - βf (°)	15	5.3	20	3.4	25	3.3	28	4.1	35	3.2	38	2.9	42	2.6	45	2.3	52	1.5	55	1.8	58	2.0	62	1.8	65	1.6
βf (°)	Error, β - βf (°)																													
15	5.3																													
20	3.4																													
25	3.3																													
28	4.1																													
35	3.2																													
38	2.9																													
42	2.6																													
45	2.3																													
52	1.5																													
55	1.8																													
58	2.0																													
62	1.8																													
65	1.6																													
spk5_t1w50_ai	3.462																													
spk6_t1w50_ai	3.393																													
spk7_t1w50_ai	4.181																													
spk8_t1w50_ai	3.232																													
spk9_t1w50_ai	2.950																													
spk10_t1w50_ai	2.658																													
spk11_t1w50_ai	2.347																													
spk12_t1w50_ai	1.511																													
spk13_t1w50_ai	1.809																													
spk14_t1w50_ai	2.072																													
spk15_t1w50_ai	1.878																													
spk16_t1w50_ai	11.000																													

Figura 4.41 Error respecto al modelo rígido-plástico para el ensayo de condiciones experimentales w_d 50 mm., de chapa de acero inoxidable de grosor 1 mm

Tabla 4.9 Valores experimentales de Error para el ensayo de condiciones experimentales w_d 50 mm., de chapa de acero inoxidable de grosor 1 mm

En cuanto al tratamiento de las imágenes, los resultados conseguidos de la geometría final expresados como ángulo interior (comprendido entre las alas recta de la chapa quebrada)

de doblado final (θ_f) y radio final de doblado (R_f) se recogen en la siguiente Tabla 4.10 para un ensayo de aluminio.

<i>Probeta</i>	θ_f	R_f	$\beta_f_{imagen=180-\theta_f}$
spk6_t1w35_al	140.234	3.151	39.774
spk7_t1w35_al	133.541	4.071	46.301
spk8_t1w35_al	128.888	1.983	51.016
spk9_t1w35_al	123.108	2.768	56.846
spk10_t1w35_al	117.133	2.340	62.771
spk11_t1w35_al	112.105	1.986	67.675
spk115_t1w35_al	109.374	1.528	70.561
spk12_t1w35_al	102.441	1.870	77.325

Tabla 4.10 Valores β_f y R_f logrados a partir del tratamiento de imágenes. Ensayo de condiciones experimentales w_d 35 mm., de chapa de aluminio de grosor 1 mm

Los otros resultados que se obtienen con el tratamiento de imágenes son los coeficientes de la función evolución de la curvatura de las regresiones polinómicas, tal y como recoge, por ejemplo, la Tabla 4.11.

	$F.\text{grado}_6 = a_6 + b_6 \cdot x + c_6 \cdot x^2 + d_6 \cdot x^3 + e_6 \cdot x^4 + f_6 \cdot x^5 + g_6 \cdot x^6$						
Probeta	g_6	f_6	e_6	d_6	c_6	b_6	a_6
spk6_t1w35_al	-1.6E-03	-6.5E-04	2.0E-02	7.2E-03	-1.6E-01	-2.7E-02	-3.7E-01
spk7_t1w35_al	-7.7E-05	-5.6E-05	4.3E-03	1.8E-03	-1.2E-01	-2.7E-03	-5.9E-01
spk8_t1w35_al	-1.3E-01	2.5E-02	1.9E-01	-5.6E-03	-2.5E-01	-1.1E-02	-5.1E-01
spk9_t1w35_al	-4.5E-04	9.7E-04	1.0E-02	-4.5E-03	-1.8E-01	-1.4E-02	-5.6E-01
spk10_t1w35_al	2.4E-03	1.3E-02	-1.7E-04	-6.5E-02	-2.1E-01	6.2E-02	-6.4E-01
spk11_t1w35_al	-8.7E-04	-6.1E-04	1.9E-02	2.8E-03	-2.5E-01	3.2E-02	-6.8E-01
spk115_t1w35_al	-2.0E-03	-2.9E-04	3.5E-02	3.2E-03	-3.3E-01	1.2E-02	-6.5E-01
spk12_t1w35_al	-5.7E-04	1.0E-03	1.7E-02	-2.1E-02	-2.8E-01	1.4E-01	-9.2E-01

Tabla 4.11 Curvatura de la zona doblada, expresada como función polinómica de grado 6: coeficientes y términos independientes

El resto de los resultados, 103 experimentos para el acero inoxidable y 54 para el aluminio, presentados con el formato aquí mostrado, pueden consultarse en el Apéndice B y C.

Este conjunto de datos se ha analizado y se han obtenido unas conclusiones cualitativas que se presentan en los siguientes apartados. Esta misma información es utilizada en el Capítulo 5 para el entrenamiento y validación de las redes neurales diseñadas para predecir la geometría de doblado y la recuperación.

4.6 Discusión de los resultados

En este apartado se presentan una discusión de resultados y las conclusiones extraídas de la totalidad de experimentos sobre chapas de acero inoxidable y el aluminio. Se ha analizado la repetitibilidad de la experimentación, el error de las predicciones, evoluciones del ángulo de doblado y del radio de doblado final, la recuperación y finalmente la influencia del material.

4.6.1 Repetitibilidad de los resultados obtenidos

Antes de empezar la experimentación, se han repetido dos series de experimentos, los correspondientes a las condiciones de ensayo: probetas de acero inoxidable, con obertura de matriz, w_b de 22 mm. y grosores de 1 y 1.5 mm.. Lo que ha permitido apreciar la buena repetitibilidad de los doblados, y por lo tanto en la buena ejecución del montaje efectuado. Una vez comprobada una repetitibilidad aceptable se ha decidido no aplicar las mismas condiciones de experimentación más de una vez para los 154 experimentos efectuados.

En las Tabla 4.12 y Tabla 4.13 se presentan los valores obtenidos para las chapas dobladas de grosor 1 mm. y 1.5 mm. respectivamente, donde β es el ángulo objetivo calculado según el modelo rígido-plástico, $\beta f1$ el ángulo de doblado final obtenido en la primera repetición del experimento, $\beta f2$ el ángulo de doblado final obtenido en la segunda repetición del experimento, a continuación se calcula el βf promedio y la diferencia entre $\beta f1$ y $\beta f2$ expresado en grados y en grados, minutos y segundos.

Z (mm)	β (°)	$\beta f1$ (°)	$\beta f2$ (°)	βf promedio (°)	$\beta f2 - \beta f1$ (°)	°	'	"
4.0	41.421	41.08	41.58	41.33	0.500	0	30	0
5.0	51.014	51.83	52.75	52.29	0.917	0	55	0
6.0	60.043	62.00	62.75	62.38	0.750	0	45	0
7.0	68.443	71.50	71.75	71.63	0.250	0	15	0
8.0	76.182	79.33	80.75	80.04	1.4167	1	25	0

Tabla 4.12 Repetitibilidad del experimento de doblado con: w_d 22 mm. y grosor de 1 mm.

Z (mm)	β (°)	$\beta f1$ (°)	$\beta f2$ (°)	βf promedio (°)	$\beta f2 - \beta f1$ (°)	°	'	"
4.0	41.767	38.33	42.25	40.29	3.9167	3	55	0
5.0	51.528	52.83	52.67	52.75	-0.1667	0	-10	0
6.0	60.735	63.75	64.00	63.88	0.2500	0	15	0
7.0	69.309	72.50	74.25	73.38	1.7500	1	45	0
7.5	73.345	78.83	78.75	78.79	-0.0833	0	-5	0

Tabla 4.13 Repetitibilidad del experimento de doblado con: w_d 22 mm. y grosor de 1.5 mm.

En las representaciones gráficas de las Figuras 4.42 y 4.43 puede observarse que la diferencia entre ambos valores es mínima. En el segundo diagrama existe un dato con

mayor desviación, pero a pesar de ello los resultados para los demás ángulos presentan una muy buena repetitibilidad.

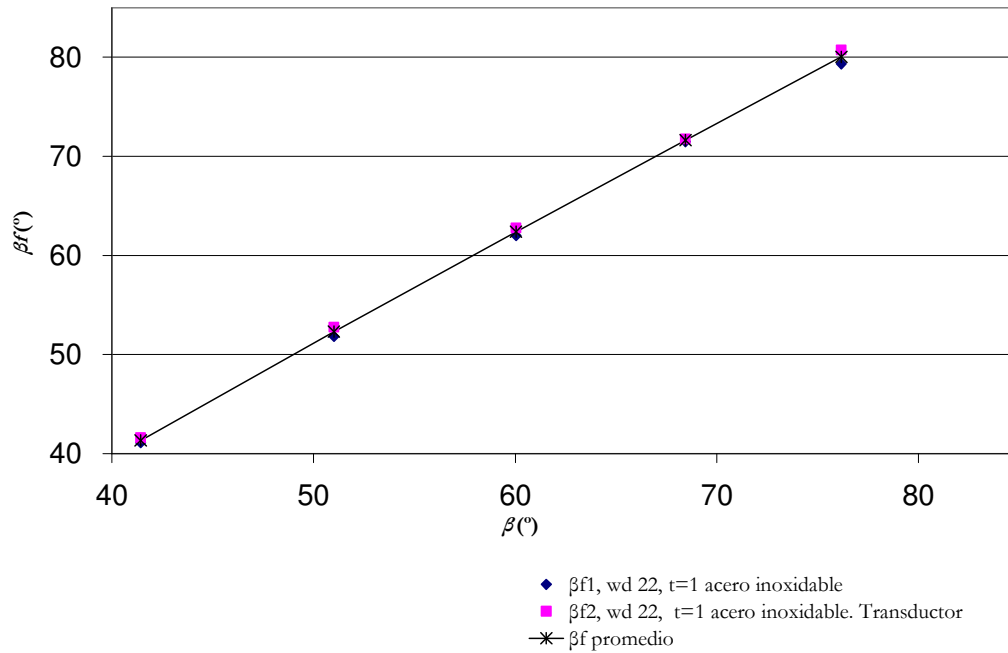


Figura 4.42 Gráfico de la repetitibilidad del experimento de doblado de condiciones w_d 22 mm. y grosor de 1 mm.

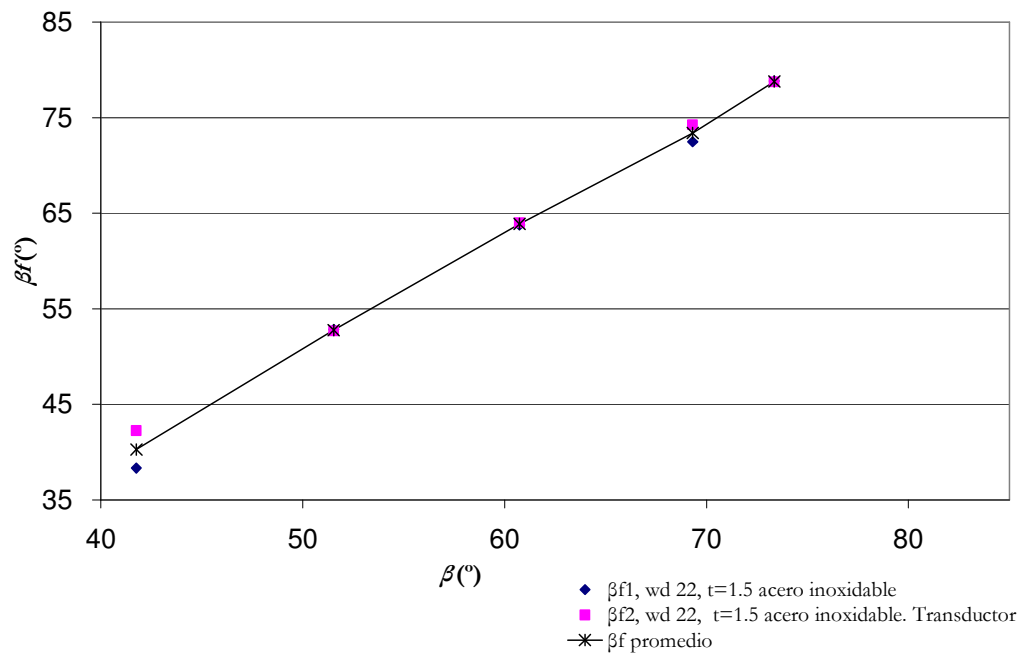


Figura 4.43 Gráfico de la repetitibilidad del experimento de doblado de condiciones w_d 22 mm. y grosor de 1.5 mm.

4.6.2 Error respecto al modelo rígido plástico

Los esquemas de la Figura 4.44 representan las dos posibles situaciones que se pueden presentar durante el proceso de doblado al aire, y en consecuencia las dos relaciones que se han definido en apartados anteriores como *Error* y *Recuperación*. En los dos esquemas de la Figura 4.44, el valor de la recuperación es siempre positivo, mientras que en la Figura 4.44 a) el valor para el parámetro *Error* es positivo y en la Figura 4.44 b) el valor del parámetro *Error* es negativo.

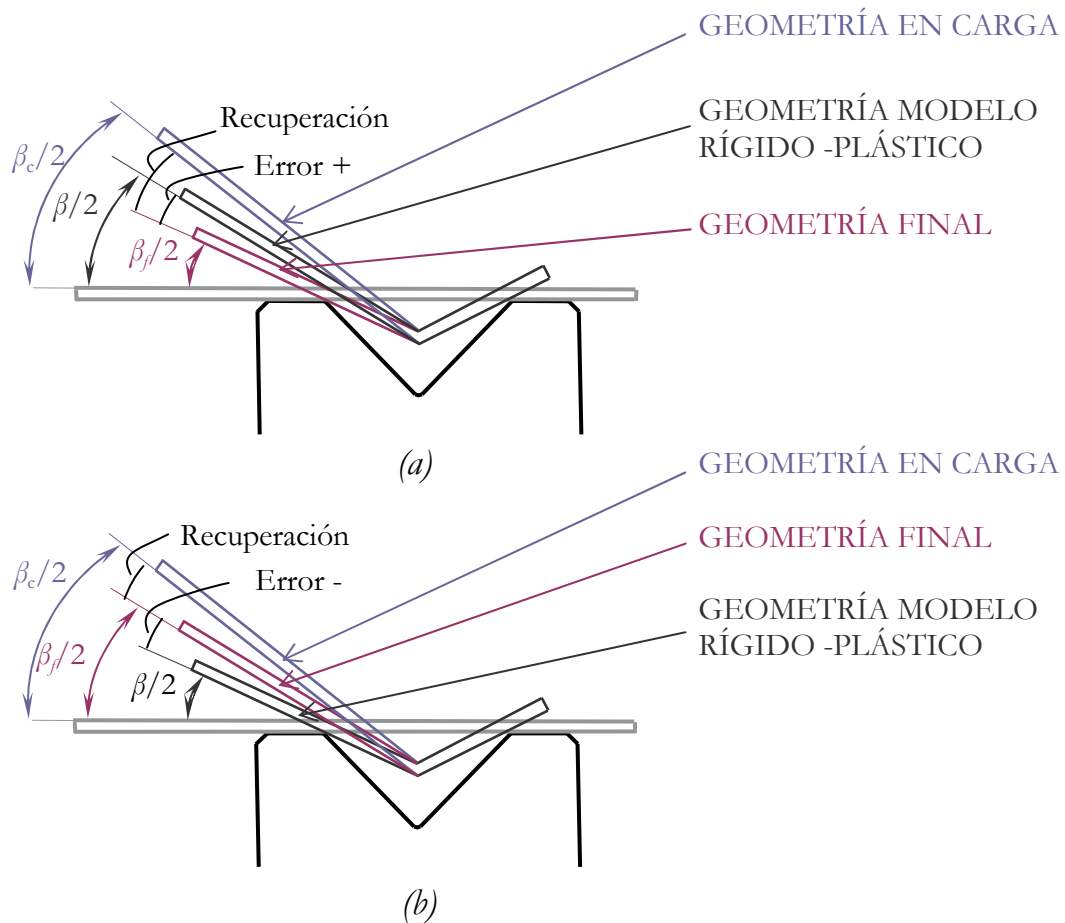


Figura 4.44 Representación conjunta de los ángulos de doblado final (β_f), en carga (β_c) y del modelo rígido-plástico (β).

El parámetro denominado como *Error* representa el valor de la diferencia entre el valor del ángulo de doblado obtenido mediante los cálculos trigonométricos del modelo rígido-plástico y el ángulo real obtenido o ángulo de doblado final. Tal y como se ha definido, este parámetro tiene signo.

El motivo de tener que realizar esta definición es por una analogía a la definición de error del ángulo realizada por Stelson (1982). El trabajo de Stelson (1982) se basa en el desarrollo de un modelo que controla la posición de la penetración del punzón mediante un sistema de control en lazo cerrado de la corredera de la prensa. Por un lado, en su trabajo el margen de error es más estrecho (lo que es de esperar debido al sistema de control desarrollado). Por otro lado, el hecho de que en su trabajo el error tenga signo positivo implica un sobredoblado de la chapa, que en su trabajo se agrega directamente sobre la

disminución de la recuperación. Por analogía a la definición de Stelson (1982) el valor de error del estudio desarrollado en esta tesis también tiene signo, pero las implicaciones sobre el sobredoblado y en consecuencia sobre la recuperación no son directamente las mismas, dado que no se ejerce ningún tipo de control adicional sobre la máquina de ensayo.

De esta manera, las dos situaciones reflejadas anteriormente (error positivo y negativo) ocurren tanto para el acero inoxidable como para el aluminio. En el caso de los aceros inoxidables el conjunto de los valores del error están comprendidos en un intervalo de valores de $\pm 5.5^\circ$ (ver Figura 4.45). En el caso del aluminio, el valor del error de los ángulos ensayados estrictamente pertenece al intervalo $(-4^\circ, 2^\circ)$, ver Figura 4.46. Se puede incluso considerar que para las probetas de aluminio ensayadas, la mayoría de los errores están comprendidos entre los valores de $\pm 2^\circ$. El intervalo total para el aluminio es menor en comparación con el del acero inoxidable. Lo que es un resultado que podía esperarse debido al comportamiento del material, ya que el aluminio tiene un comportamiento que puede considerarse rígido-plástico.

Al fin y al cabo, el valor de este parámetro definido es el error que se comete respecto al valor del ángulo que proporciona modelo rígido plástico. Lo que nos permite afirmar que el modelo proporciona un valor de ángulo de doblado que requiere un valor de tolerancia considerable en referencia al valor de ángulo de doblado final obtenido, como se ha podido contemplar con la experimentación.

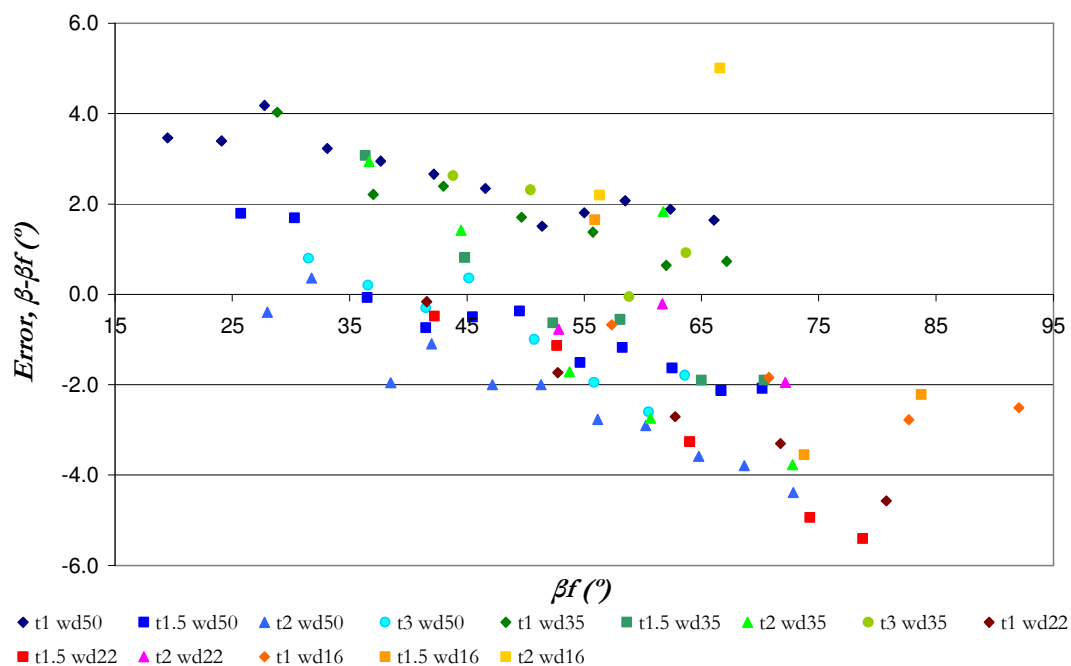


Figura 4.45 Valores de *Error* para el acero inoxidable

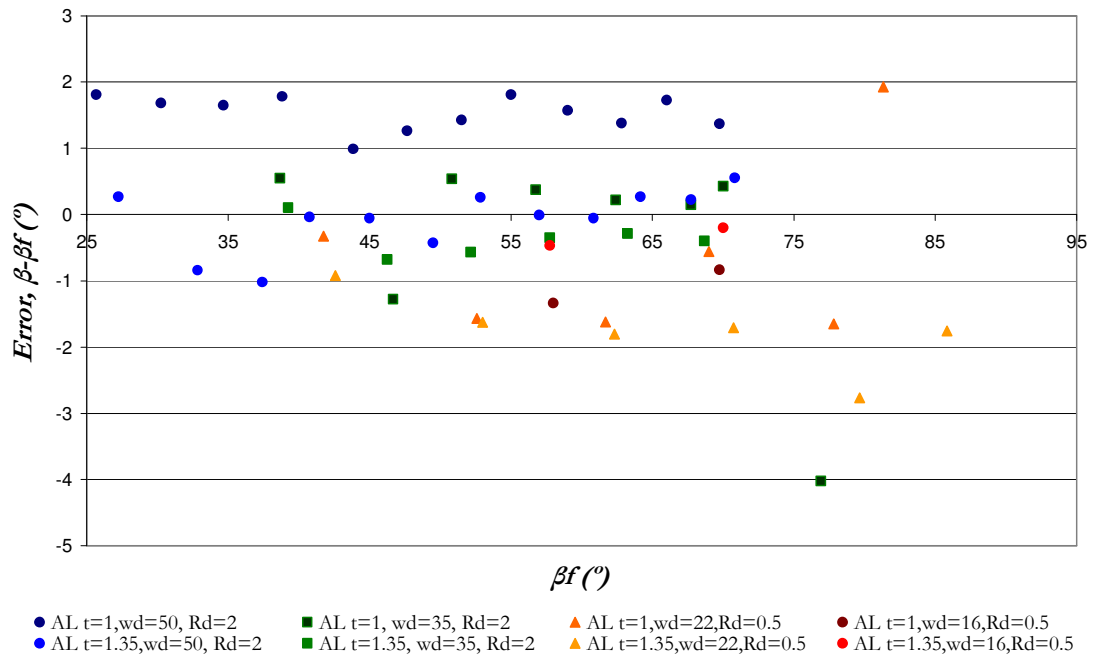


Figura 4.46 Valores de Error para el aluminio

4.6.3 Ángulo de doblado final y Radio de doblado final

El ángulo de doblado final puede obtenerse, como se ha descrito en secciones anteriores, mediante la lectura del goniómetro (se obtiene directamente β_f) o mediante el procedimiento de digitalización en una imagen y posterior paso por el algoritmo programado en MATLAB®. El procedimiento de análisis digital obtiene el ángulo comprendido entre las alas rectas de la chapa doblada, es decir, θ_f . Pero su paso a β_{f_imagen} es sencillo pues se trata de ángulos complementarios. La desviación entre ambos resultados (el de la lectura del goniómetro y el de la lectura digital) en la mayoría de casos es mínima. Para demostrarlo se muestra la Tabla 4.14 donde se han calculado la diferencia entre ambos.

Imágenes	Goniómetro	Diferencia			
β_{f_imagen}	β_f	$\beta_{f_imagen} - \beta_f$	°	'	"
39.774	38.667	1.107	1	6	26.160
46.301	46.667	-0.365	0	-22	4.910
51.016	50.833	0.183	0	11	-2.340
56.846	56.750	0.096	0	6	-14.210
62.771	62.417	0.355	0	21	16.650
67.675	67.750	-0.075	0	-5	28.940
70.561	70.000	0.561	1	34	-20.010
77.325	76.917	0.409	0	25	-29.280

Tabla 4.14 Diferencia entre el ángulo de doblado final obtenido mediante el procesamiento de la imagen digital y el obtenido con el goniómetro.

También, se ha graficado el ángulo final del análisis de imagen digital versus ángulo final obtenido con el goniómetro, Figura 4.47 y Figura 4.48. Para apreciar el buen resultado se grafica también la línea $\beta_f\text{-imagen} = \beta_f$, sobre la cuál deben recaer la mayoría de casos.

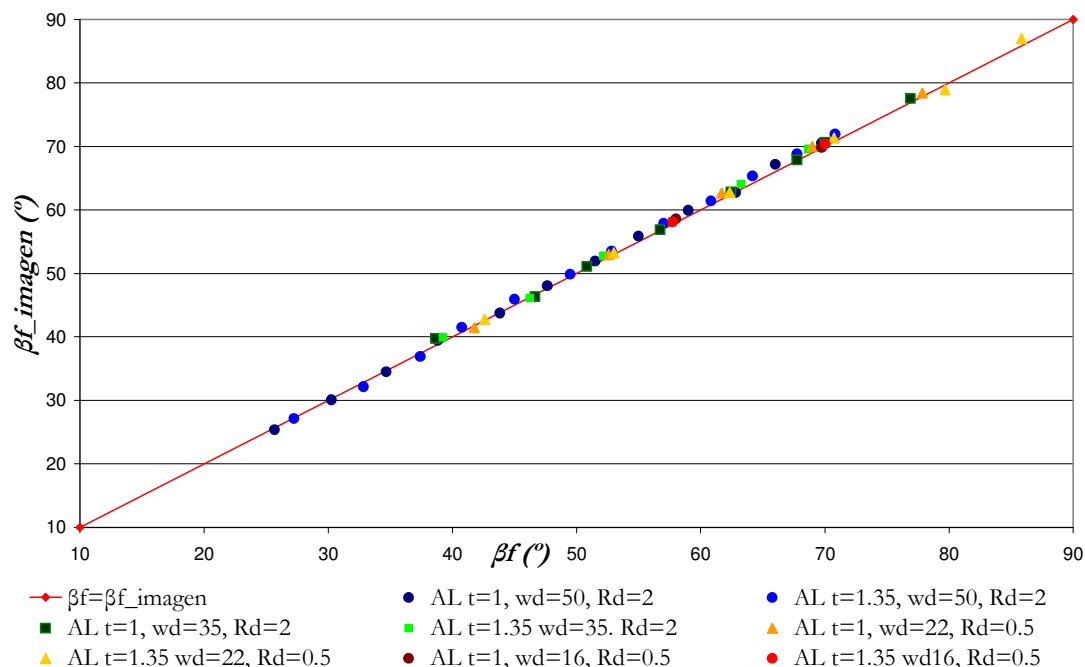


Figura 4.47 Representación de la diferencia entre el ángulo de doblado final obtenido mediante el procesamiento de la imagen digital y el obtenido con el goniómetro, para el aluminio

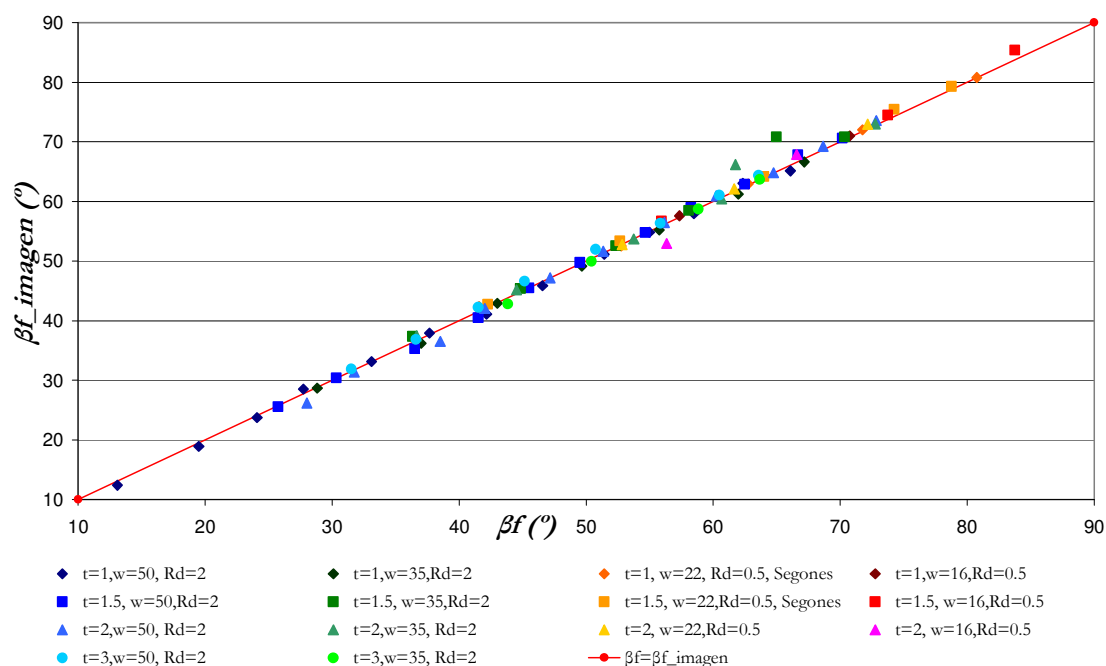


Figura 4.48 Representación de la diferencia entre el ángulo de doblado final obtenido mediante el procesamiento de la imagen digital y el obtenido con el goniómetro, para el acero inoxidable

El análisis digital ha permitido encontrar el radio final además del ángulo final de doblado. Por este motivo también se ha podido obtener la representación gráfica de la relación ángulo final de doblado-radio final de doblado. Las figuras Figura 4.49 y Figura 4.50 muestran la relación decreciente que existe entre ellos. Como era de esperar existe una relación entre estos parámetros: cuanto mayor sea el ángulo de doblado final menor es el radio final de doblado, obteniendo de esta forma doblados más severos.

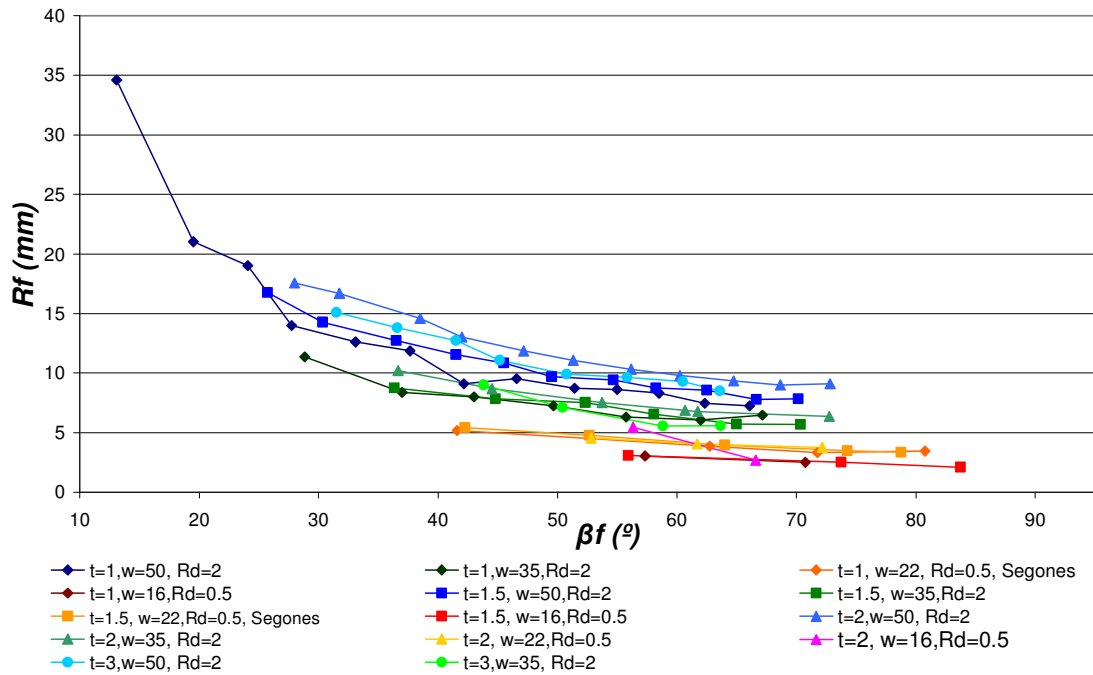


Figura 4.49 Radio de doblado final versus ángulo de doblado final, acero inoxidable

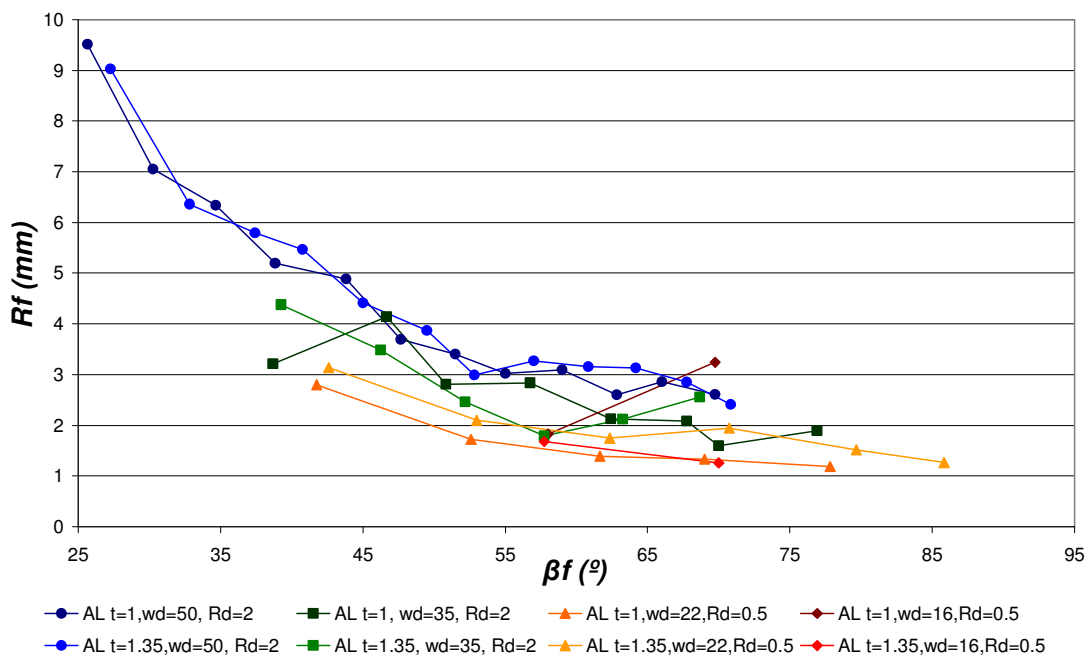


Figura 4.50 Radio de doblado final versus ángulo de doblado final, aluminio

En la Figura 4.51 se representan ambos materiales conjuntamente, en la que se aprecia que el comportamiento es diferente aunque la tendencia es la misma. Observando este diagrama también se aprecia que la relación es acusadamente no-lineal.

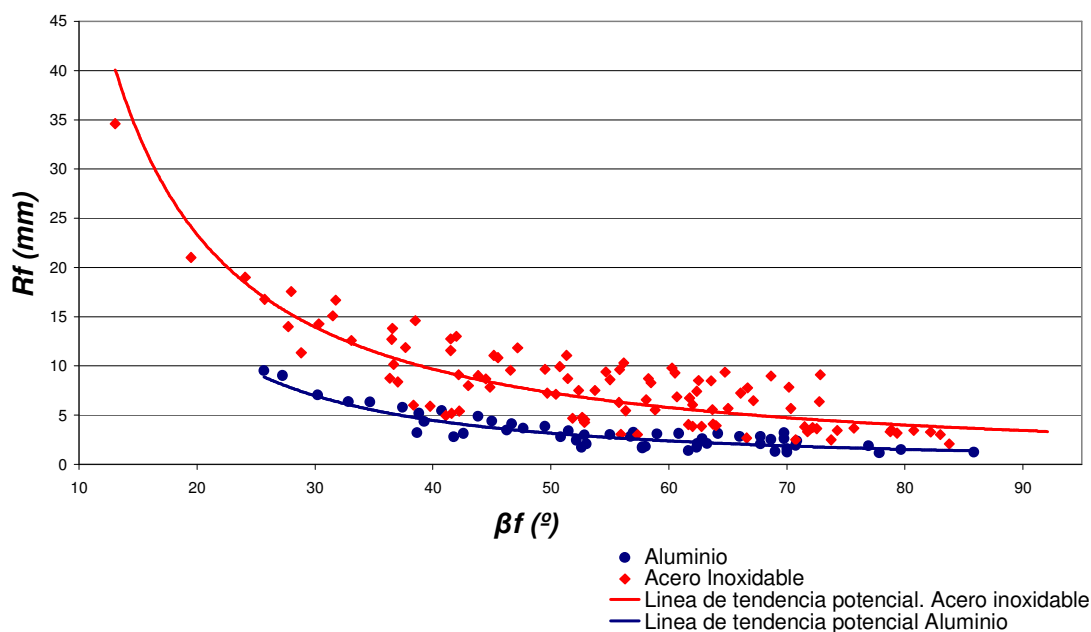


Figura 4.51 Radio de doblado final versus ángulo de doblado final, ambos materiales

4.6.4 Recuperación

Como se ha constatado en todo el trabajo la recuperación es el principal parámetro a analizar para mejorar la precisión del doblado al aire. Es por esa razón que su análisis es el más detallado.

La recuperación puede expresarse como la diferencia entre el ángulo en carga y final (como $\beta_c - \beta_f$) donde valores elevados de esta diferencia representa recuperación importante. También puede expresarse como el cociente de ambos ángulos (K_r), donde la cota máxima 1 representa la ausencia de recuperación, cuando el ángulo de doblado de carga igual al ángulo de doblado final. En consecuencia el aumento de la recuperación discurre en sentido descendente, es decir, hacia el valores de $K_r = 0$. Por este motivo, las mismas series de datos aparecen representadas en sentido inverso al que se presentan cuando la recuperación se formula como $\beta_c - \beta_f$.

La recuperación angular para el doblado al aire, como lo son los casos presentados en la Figura 4.44, tiene siempre un valor positivo. Es decir, en este proceso de conformado el valor del ángulo en carga es siempre mayor que el valor del ángulo de doblado final. Un valor negativo implicaría por tanto una recuperación negativa, y lo que significa que no se ha realizado un doblado al aire sino que ha empezado el doblado a fondo de la chapa ensayada. En prácticamente todos los ensayos realizados ha aparecido recuperación positiva. Aún así la recuperación negativa ha sucedido en las chapas de aluminio con las condiciones experimentales de obertura de matriz, w_ϕ , más estrecha, la de 16 mm. En estos pocos casos ha aparecido recuperación negativa ya que los resultados no corresponden a un proceso de doblado al aire puro. Por lo tanto, se han separado estos resultados de los demás, en la Figura 4.52 se observan los resultados para este caso.

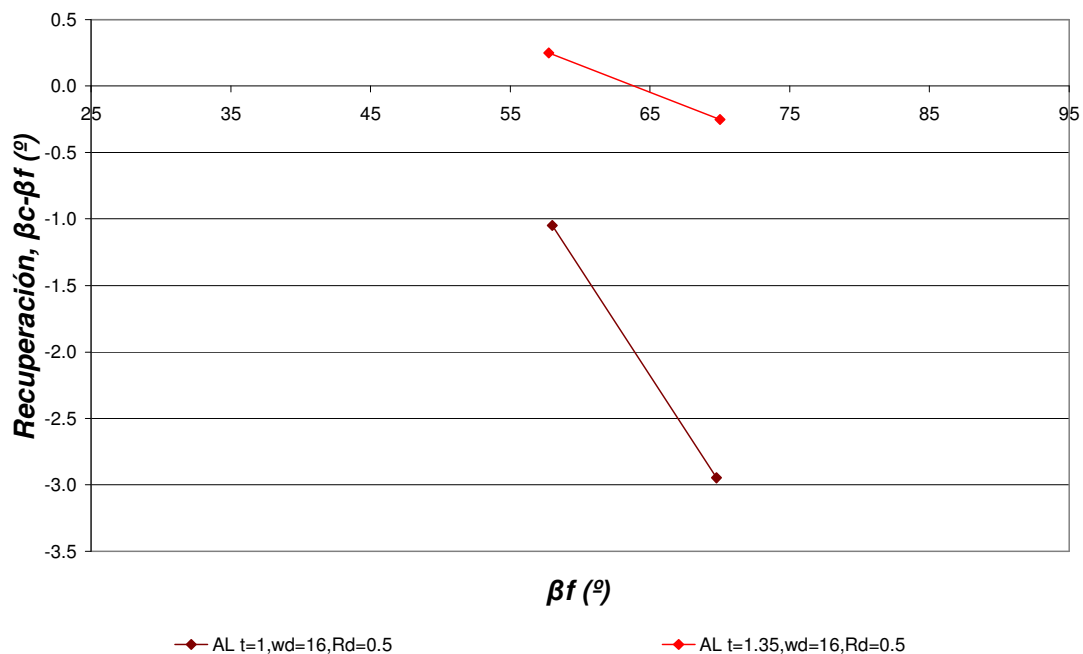


Figura 4.52 Recuperación negativa, Al grosor 1 y 1.5 mm en abertura de matriz, w_d , de 22 mm

La experimentación llevada a cabo en este trabajo ha permitido constatar las influencias básicas sobre la recuperación de determinados parámetros. Estos parámetros pueden agruparse alrededor de los siguientes grupos:

- Geometría de la pieza. Se ha relacionado la recuperación con el propio ángulo de doblado (β), con el grosor de la chapa (t), y con el valor de la relación entre el radio final y el grosor (R_f/t).
- Geometría del utillaje de doblado. El parámetro geométrico más influyente en la recuperación es la abertura de la matriz (w_d).
- Parámetros adimensionales. Se ha analizado su relación con parámetros adimensionales que relacionan los dos grupos anteriores: con la relación entre la abertura de la matriz y el grosor (w_d/t) y la relación entre el radio en la matriz y el grosor (r_d/t).
- Características del material. Las características del material que se han tenido en cuenta son el esfuerzo de fluencia (S_Y) y el módulo elástico (E), así como el ratio entre ellos (S_Y/E).

A continuación se describe brevemente los resultados obtenidos para analizar las influencias de cada uno de estos parámetros.

a) Influencia del ángulo de doblado, β

La recuperación depende fuertemente del ángulo de doblado (β) que se quiere conseguir. Es bien sabido que cuanto mayor es el ángulo de doblado que se quiere conseguir, mayor es el momento de doblado necesario y por este motivo aumenta la recuperación.

La tendencia se aprecia en la experimentación realizada sobre las chapas de ambos materiales, tanto si la recuperación se expresa como diferencia entre el ángulo de doblado en carga y final o como el cociente entre el ángulo doblado final entre el de carga. Aún así esta tendencia es mucho más evidente para doblados con una abertura de la matriz mayor.

Las Figuras 4.53 y 4.54 muestran la recuperación como diferencia entre el ángulo de doblado en carga y final para el acero inoxidable y el aluminio respectivamente. Las Figuras 4.55 y 4.56 muestran la recuperación como el cociente entre el ángulo doblado final y en carga (K_r) también, respectivamente, para el acero inoxidable y el aluminio.

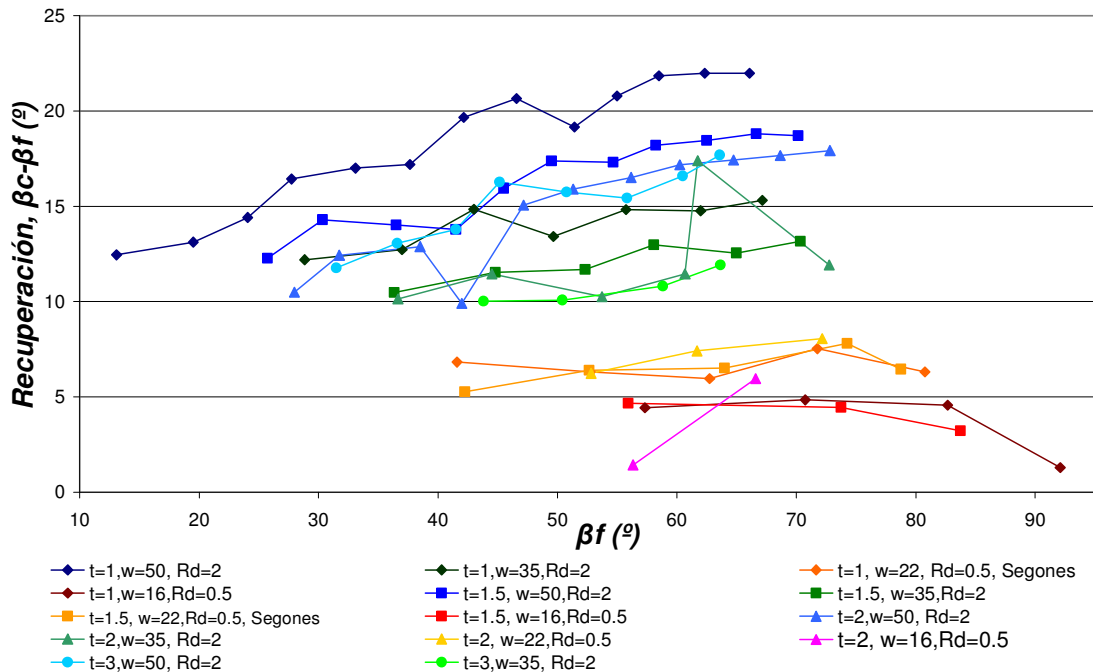


Figura 4.53 Influencia del ángulo de doblado sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del acero inoxidable

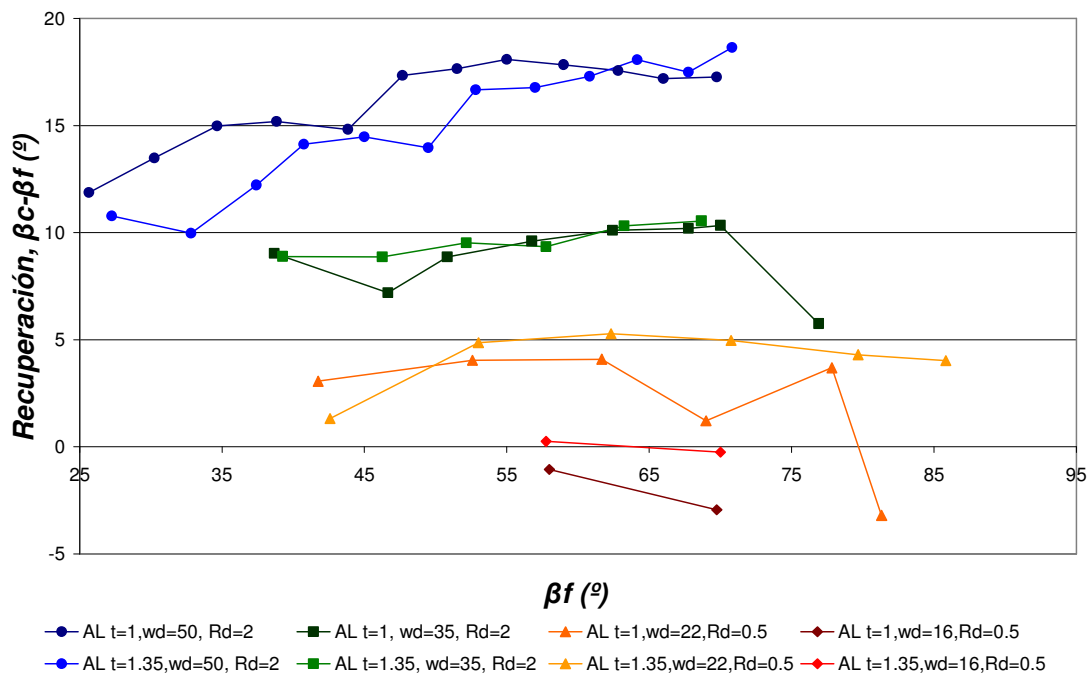


Figura 4.54 Influencia del ángulo de doblado sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del aluminio

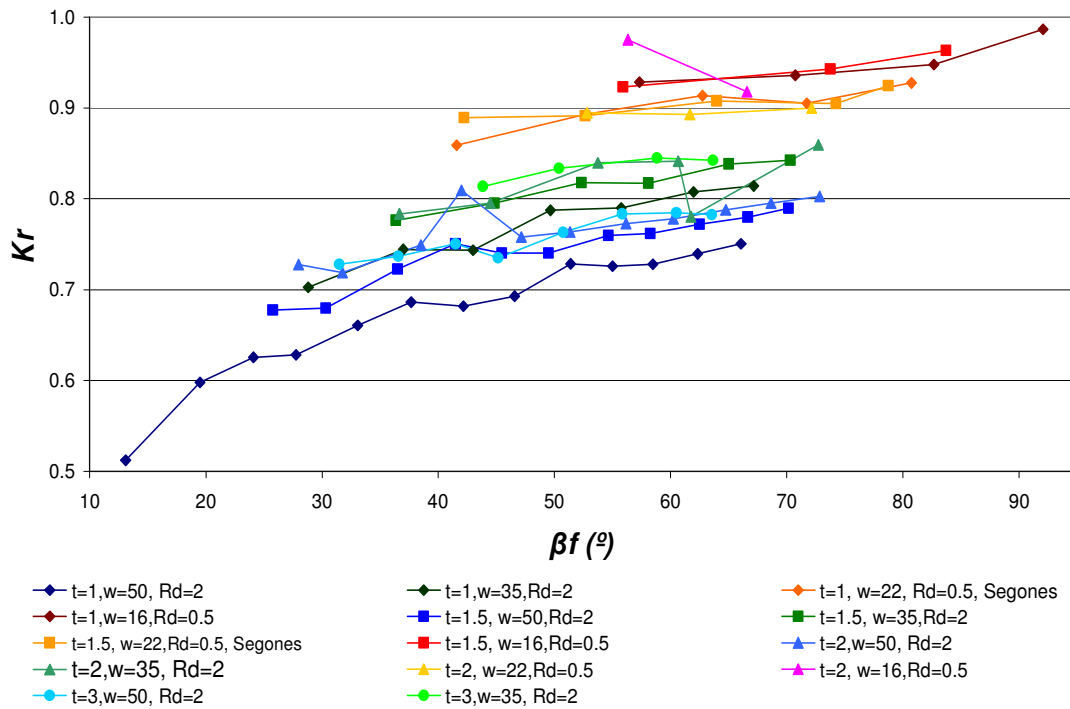


Figura 4.55 Influencia del ángulo de doblado sobre la recuperación (expresada como K_r) en la experimentación del acero inoxidable

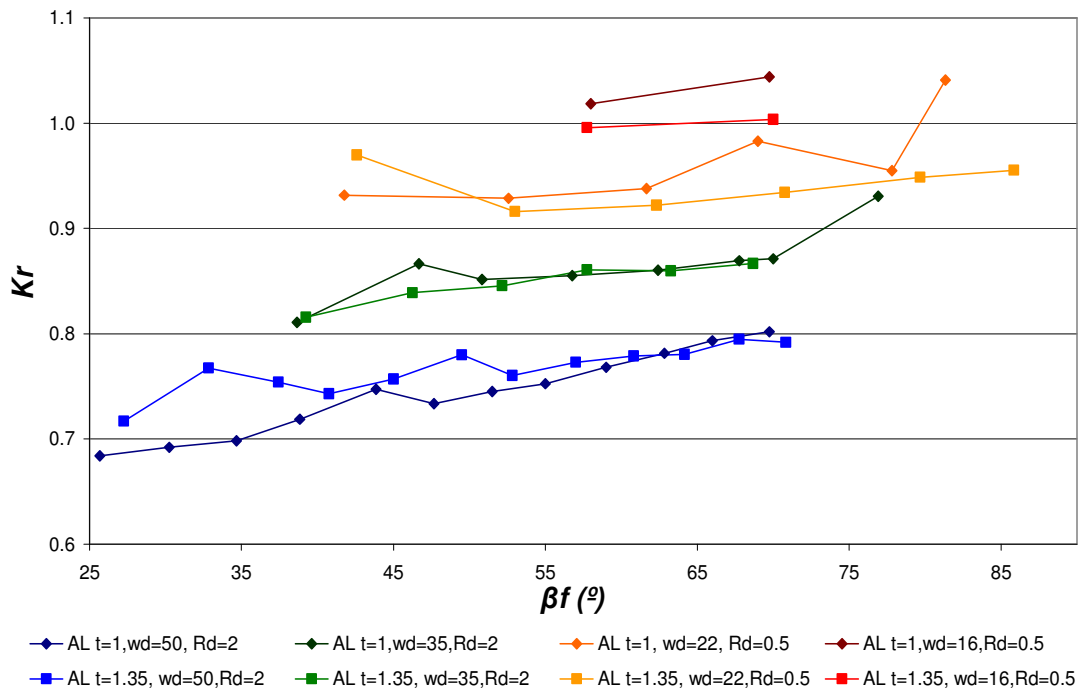


Figura 4.56 Influencia del ángulo de doblado sobre la recuperación (expresada como K_r) en la experimentación del aluminio

b) Influencia del grosor de la chapa doblada, t

Se han realizado con acero inoxidable, el doblado de distintas piezas, cambiando sólo el grosor de la chapa. Se observa claramente que a medida que disminuye el grosor de las chapas dobladas aumenta la recuperación experimentada.

Esto puede explicarse por el hecho de que el doblado en chapas de pequeño grosor los desplazamientos y giros de las secciones de la chapa por efectos elásticos son más importantes que en chapas más gruesas.

La Figura 4.57 permite observar la influencia del grosor de una chapa doblada en las mismas condiciones de experimentación. Se trata del caso del acero inoxidable (w_d 50 mm y r_d 2mm) de grosores 3, 2, 1.5 y 1 mm.

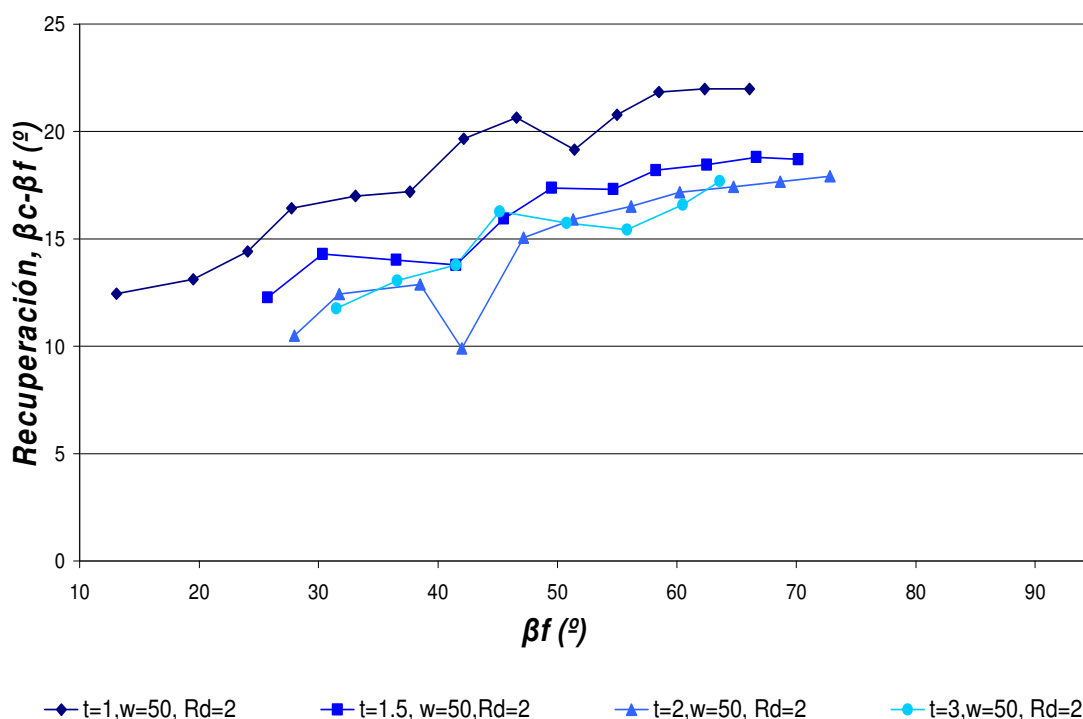


Figura 4.57 Influencia del grosor de la chapa sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del acero inoxidable

c) Influencia de ratio R_f/t

La influencia del ratio R_f/t comúnmente reconocida sobre la recuperación se puede observar a continuación. Las Figuras 4.58 y 4.59 muestran la recuperación como diferencia entre el ángulo de doblado en carga y final para el acero inoxidable y el aluminio respectivamente. Las Figuras 4.60 y 4.61 muestran la recuperación como el cociente entre el ángulo doblado final y en carga (K_r) también, respectivamente, para el acero inoxidable y el aluminio.

Analizando los diagramas se puede observar que para valores pequeños de relación R_f/t , cuando este parámetro aumenta la recuperación también. En cambio, puede observarse también que para valores elevados de R_f/t el valor de la recuperación deja de aumentar y se estabiliza. Esto se puede observar con mayor claridad en las Figuras 4.60 y 4.61.

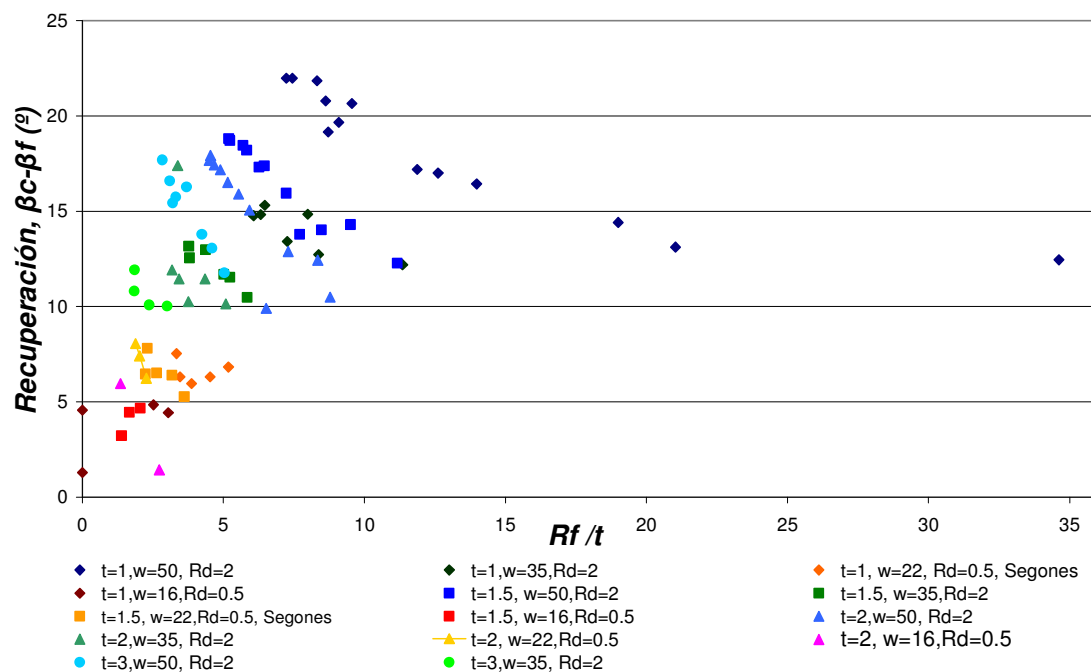


Figura 4.58 Influencia del ratio R_f/t sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del acero inoxidable

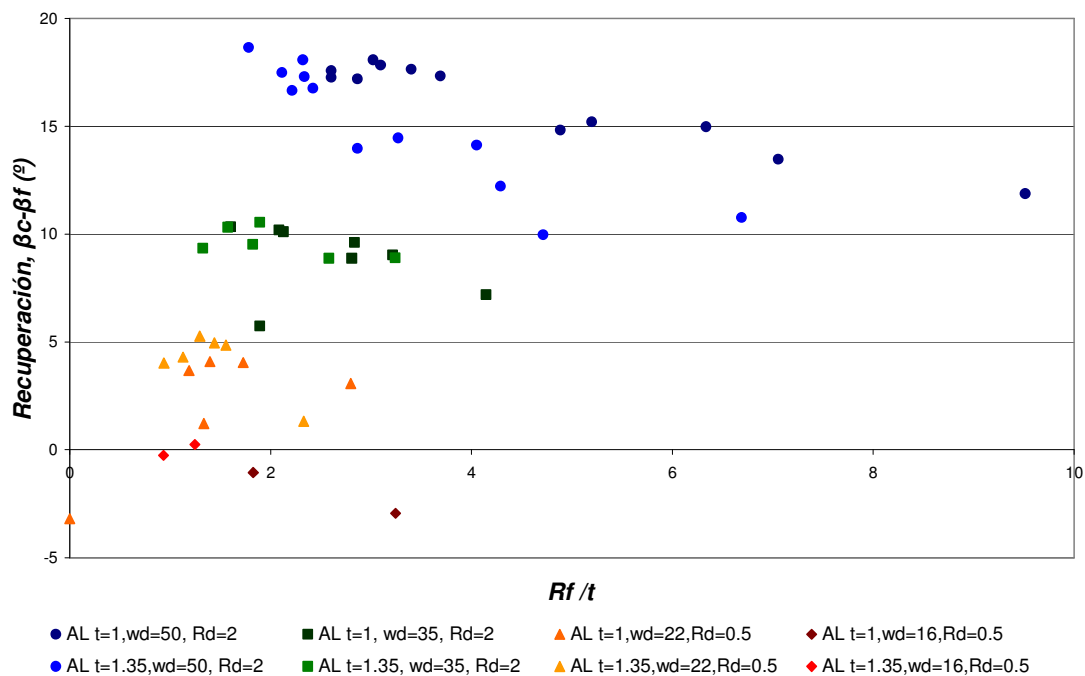


Figura 4.59 Influencia del ratio R_f/t sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del aluminio

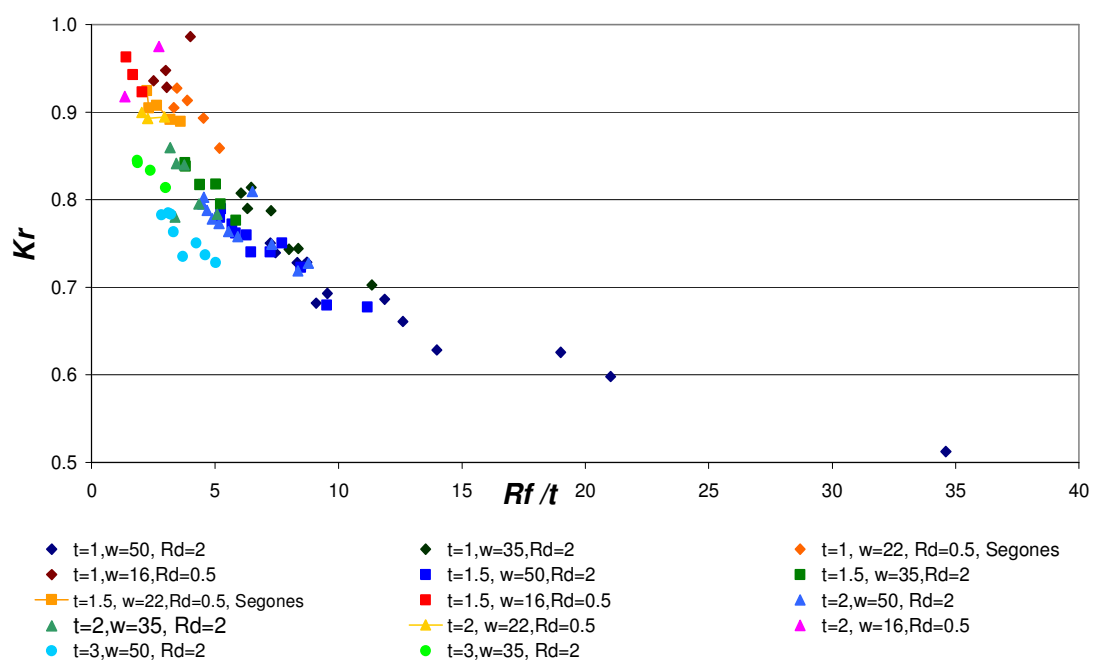


Figura 4.60 Influencia del ratio R_f/t sobre la recuperación (expresada como K_r) en la experimentación del acero inoxidable

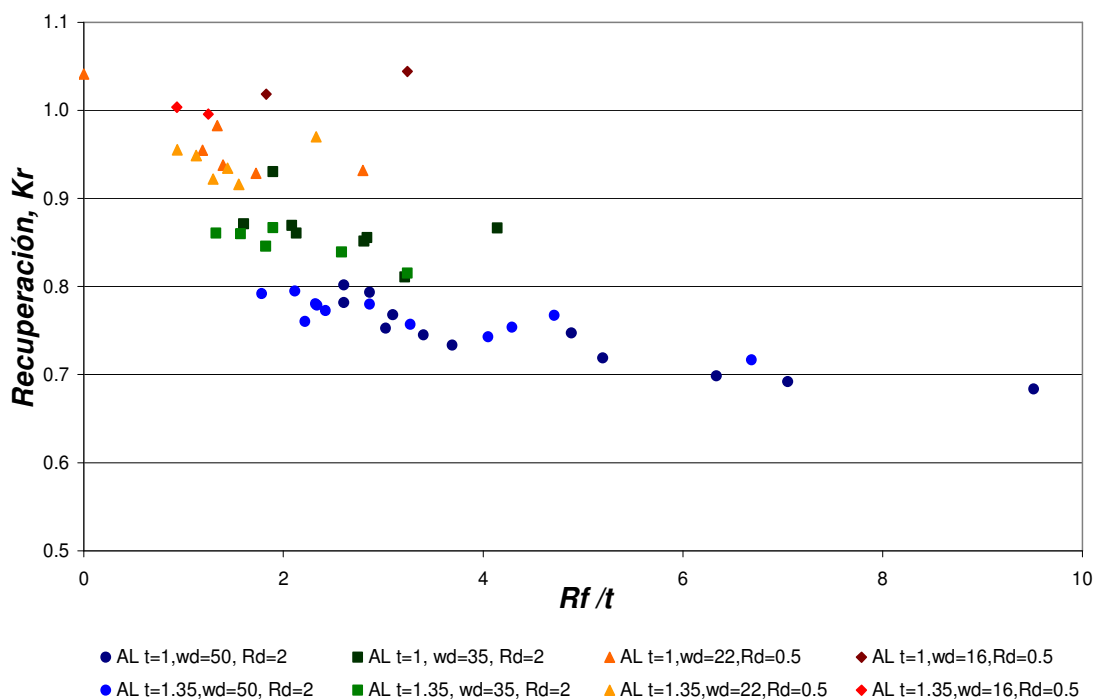


Figura 4.61 Influencia del ratio R_f/t sobre la recuperación (expresada como K_r) en la experimentación del aluminio

En la Figura 4.62 se muestran estos mismos resultados separando los ensayos de doblado de acero inoxidable de los ensayos en aluminio expresando la recuperación con el valor de K_r . Los resultados de uno y otro material presentan unas tendencias semejantes.

La recuperación es mayor en las piezas de aluminio para idénticos valores de (R_f/t)

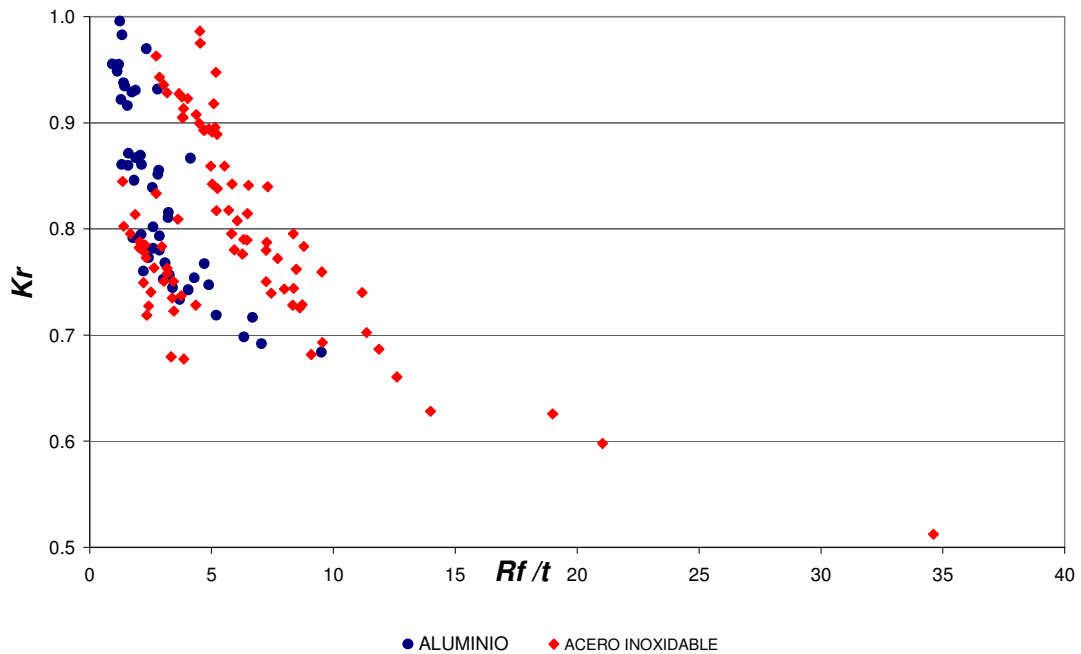


Figura 4.62 Influencia del ratio R_f/t sobre la recuperación (expresada como K_r) en la experimentación ambos materiales representados en el mismo gráfico.

d) Influencia de la obertura de la matriz, w_d

El análisis de la influencia de la obertura de la matriz, sin cambiar ningún otro parámetro puede observarse en las Figura 4.63 y 4.64 observando la posición en el diagrama de cada una de las series.

El aumento del valor de obertura de la matriz (w_d) aumenta claramente el valor de la recuperación.

Esta misma influencia se ve reflejada con más claridad en la Figura 4.64 donde la recuperación está expresada como K_r , donde la cota máxima 1 representa la ausencia de recuperación discurre en sentido descendente sobre el eje de coordenadas.

Esta tendencia puede explicarse por el hecho de que los desplazamientos y rotaciones elásticas de las secciones son más importantes cuando mayor es la distancia entre los apoyos de la chapa con las herramientas de doblado. Esta distancia está directamente relacionada con el valor de obertura de la matriz.

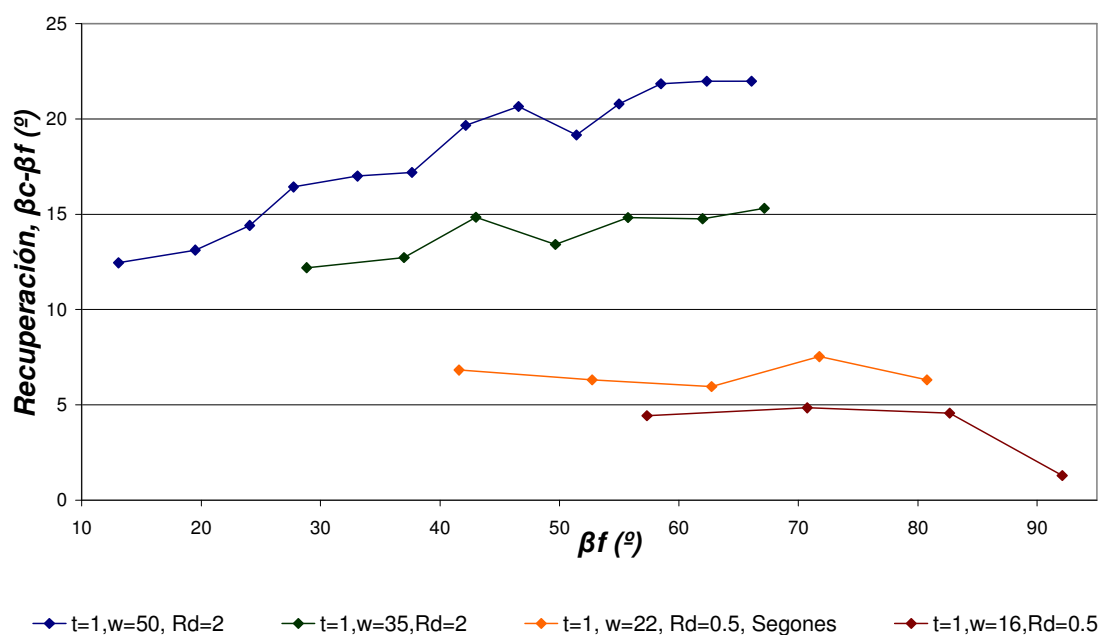


Figura 4.63 Influencia de la obertura de la matriz, w_d , sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del acero inoxidable de grosor 1mm.

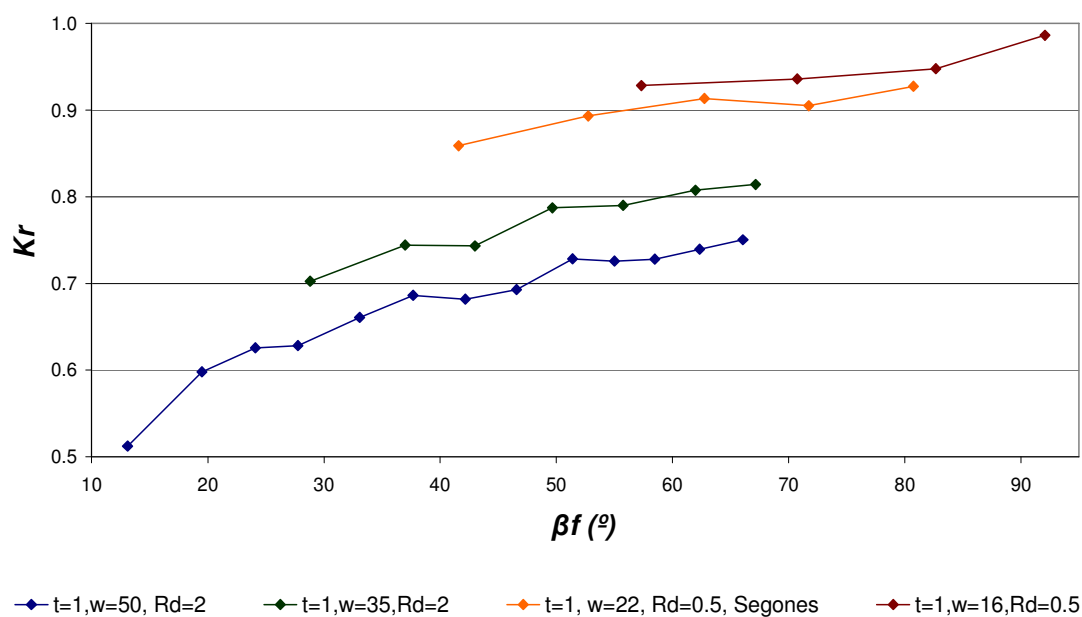


Figura 4.64 Influencia de la obertura de la matriz, w_d , sobre la recuperación (expresada como k_r) en la experimentación del acero inoxidable de grosor 1mm.

e) Influencia del ratio w_d/t

En cuanto al parámetro w_d/t y su influencia sobre la recuperación se puede apreciar en la Figura 4.65 para el acero inoxidable, y en la Figura 4.66 para el aluminio. En cuyas representaciones se puede observar la tendencia de crecimiento de la recuperación

claramente. Cuanto mayor es la relación w_d/t , mayor es la recuperación. Esta tendencia es la misma que en el apartado anterior y puede explicarse mediante idéntico razonamiento.

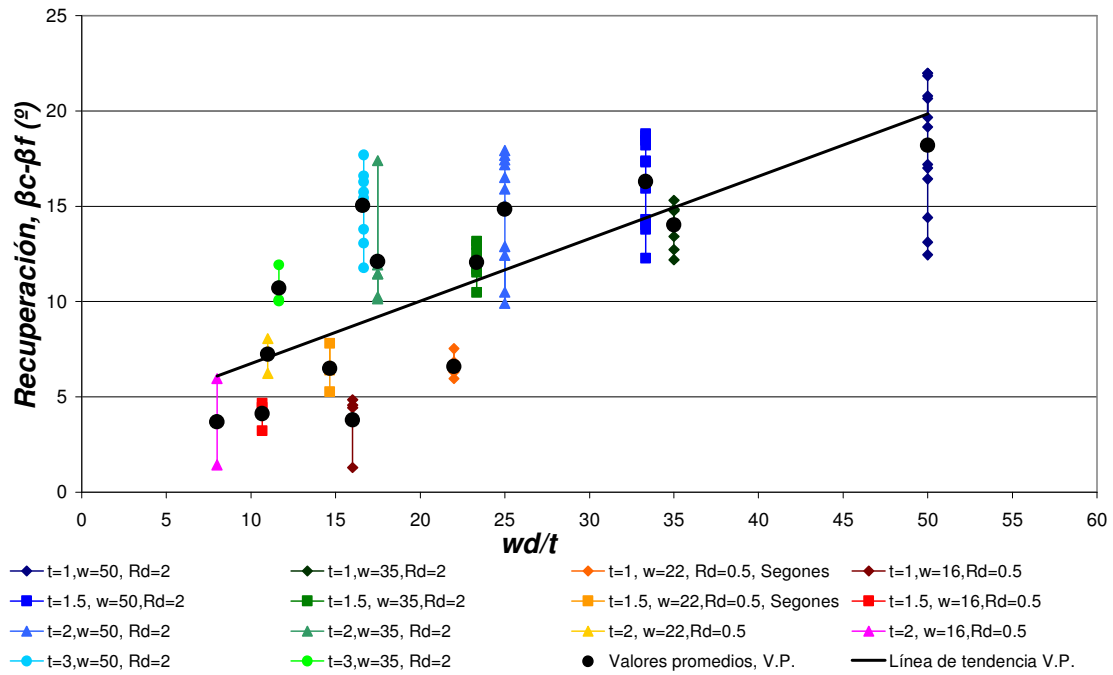


Figura 4.65 Influencia de la parámetro w_d/t sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del acero inoxidable

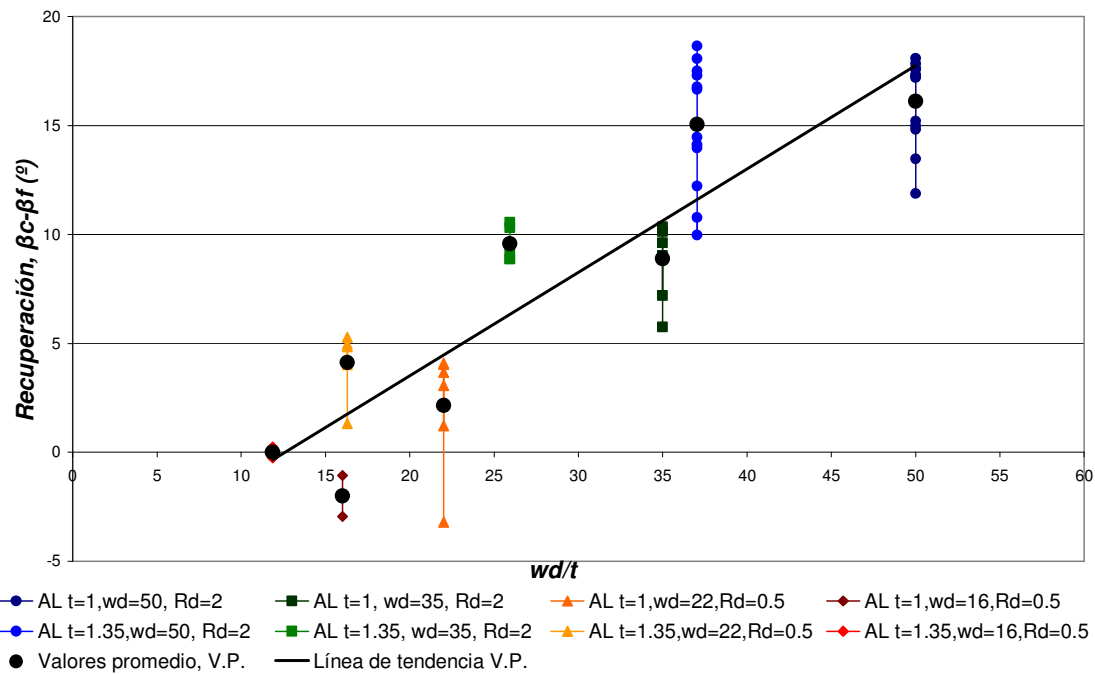


Figura 4.66 Influencia de la parámetro w_d/t sobre la recuperación (expresada como K_r) en la experimentación del aluminio

f) Influencia del radio de la matriz mediante el ratio r_d/t

La influencia del parámetro r_d/t también presenta una tendencia positiva de aumento, cuanto mayor es el valor de r_d/t mayor es el valor de la recuperación. Esta relación vuelve a ser válida para los dos materiales estudiados (Figura 4.67 y Figura 4.68).

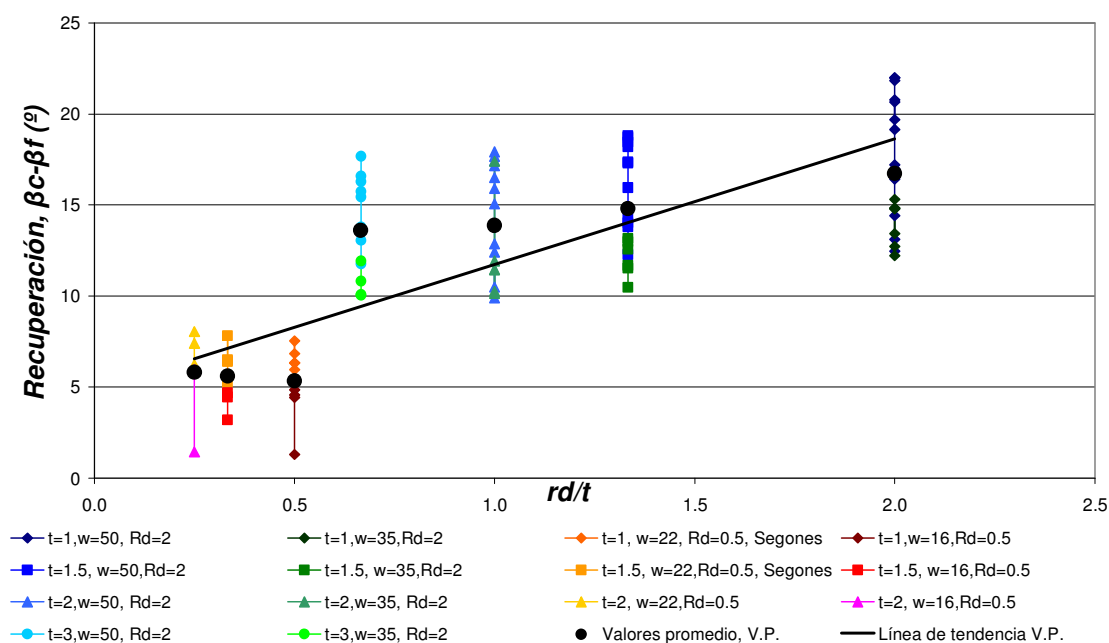


Figura 4.67 Influencia de la parámetro r_d/t sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del acero inoxidable

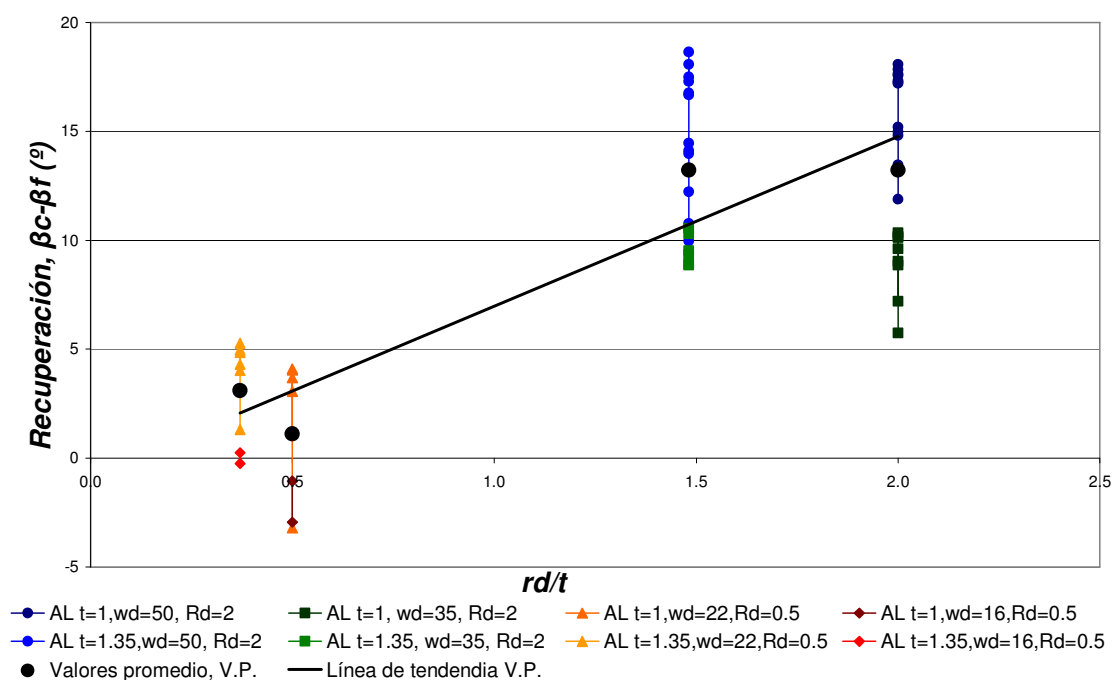


Figura 4.68 Influencia de la parámetro r_d/t sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del aluminio

A pesar de presentar la tendencia esperada, la tendencia de este parámetro en la experimentación realizada está correlacionada a la variable w_d , pues la matriz del utillaje usada están relacionados. Los anchos de matriz w_d de 50 y 35 mm con el radio de matriz r_d 2 mm; y los anchos de matriz w_d de 22 y 16 mm con el radio de matriz r_d 0.5 mm.

g) Influencia de las características del material

Las características del material dependen fuertemente de los parámetros esfuerzo de fluencia (S_y) y módulo de elasticidad (E) o de la relación entre ambos (S_y/E). En el caso de los dos materiales ensayados, en lo que respecta a los que tienen el mismo grosor (1 mm), el módulo de elasticidad del acero inoxidable es de 4.46 veces superior al del aluminio; y en cuanto al esfuerzo de fluencia es 3.37 veces el superior al del aluminio. En cuanto a la relación S_y/E , como se puede observar en la Tabla 4.15 la diferencia entre los valores obtenidos no es tan importante

	t (mm)	E (GPa)	$Y_{0.2}$ (MPa)	K (MPa)	n	S_y/E
<i>Acero Inoxidable</i>	1	215.4	311.6	1490.5	0.419	0.00145
<i>Aluminio</i>	1	48.8	92.6	120.9	0.046	0.00192

Tabla 4.15. Propiedades mecánicas del acero inoxidable y aluminio de grosor 1 mm.

A pesar que en varias publicaciones de referencia se recoge que la disminución del módulo de elasticidad tiene una implicación sobre el aumento de la recuperación. En la experimentación llevada a cabo con los dos materiales y con las mismas condiciones se constata otro resultado, el acero inoxidable presenta mayor recuperación que el aluminio, Figura 4.69 y Figura 4.70 respectivamente. Por lo que parece sensato afirmar para los dos materiales experimentados, que la influencia directa del módulo de elasticidad no es importante.

Sin embargo la influencia del esfuerzo de fluencia encaja con la tendencia esperada. Cuanto mayor es el valor del esfuerzo de fluencia, mayor es el valor de la recuperación.

El resultado obtenido encaja con el comportamiento de material esperado gracias a la caracterización realizada con el ensayo a tracción. Se puede observar que el aluminio ensayado presenta poco endurecimiento por deformación, lo que significa que su comportamiento podría llegar a considerarse un comportamiento rígido-plástico, y en consecuencia la ausencia de recuperación o valores menores de recuperación en comparación al acero inoxidable no debe causar sorpresa.

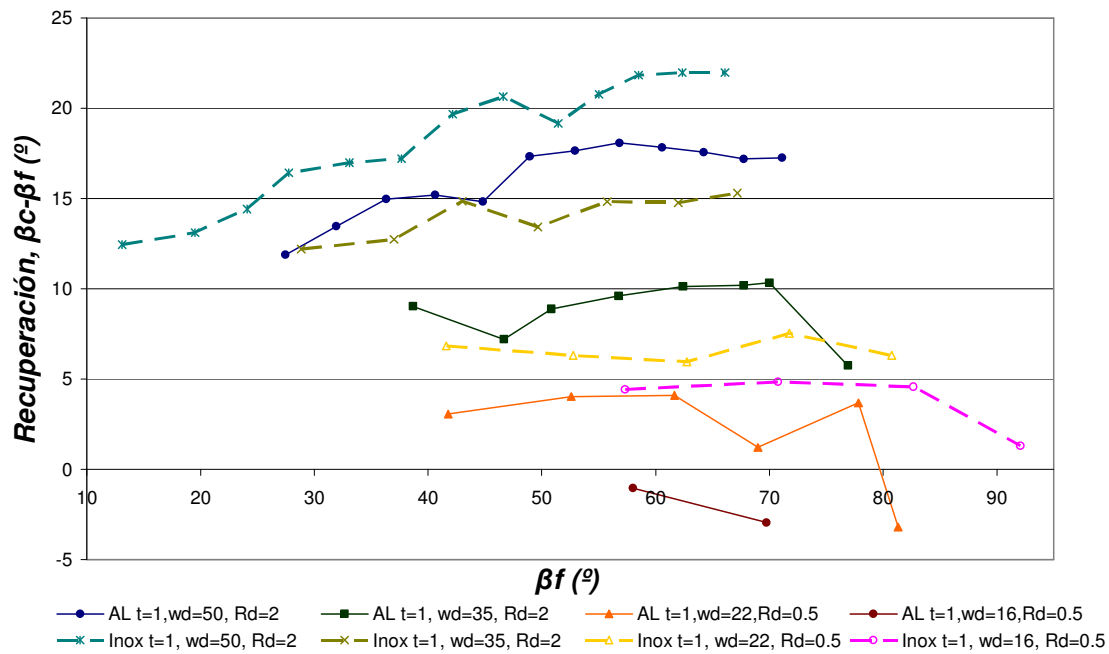


Figura 4.69 Valores de recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) para el acero inoxidable y el aluminio, ambos de grosor 1 mm. y con las mismas condiciones experimentales

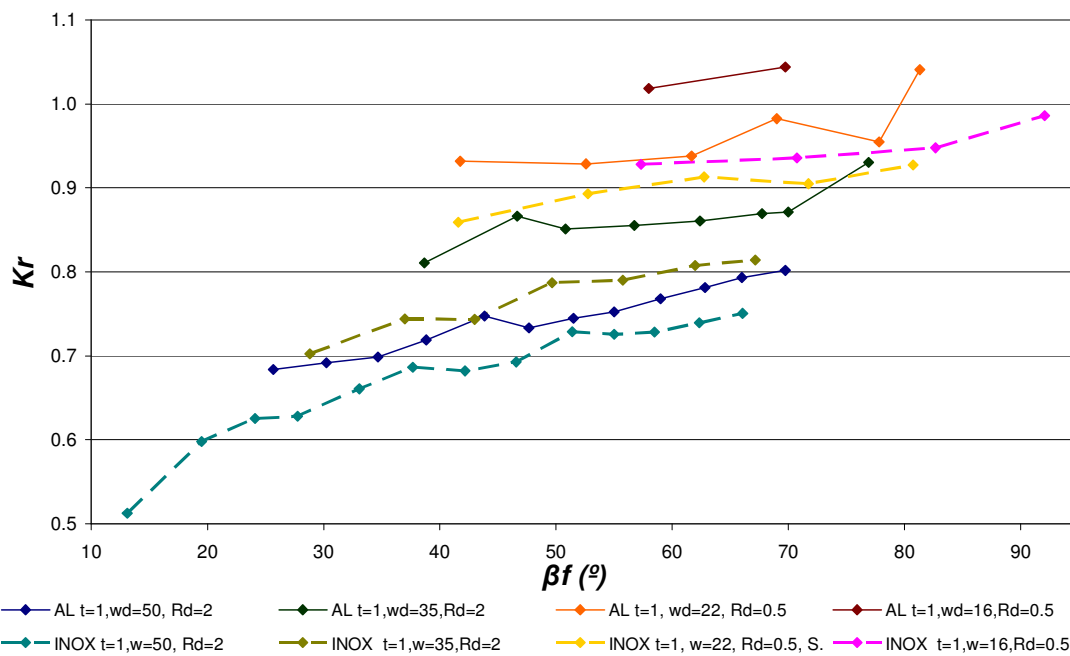


Figura 4.70 Valores de recuperación (expresada como K_r) para el acero inoxidable y el aluminio, ambos de grosor 1 mm. y con las mismas condiciones experimentales

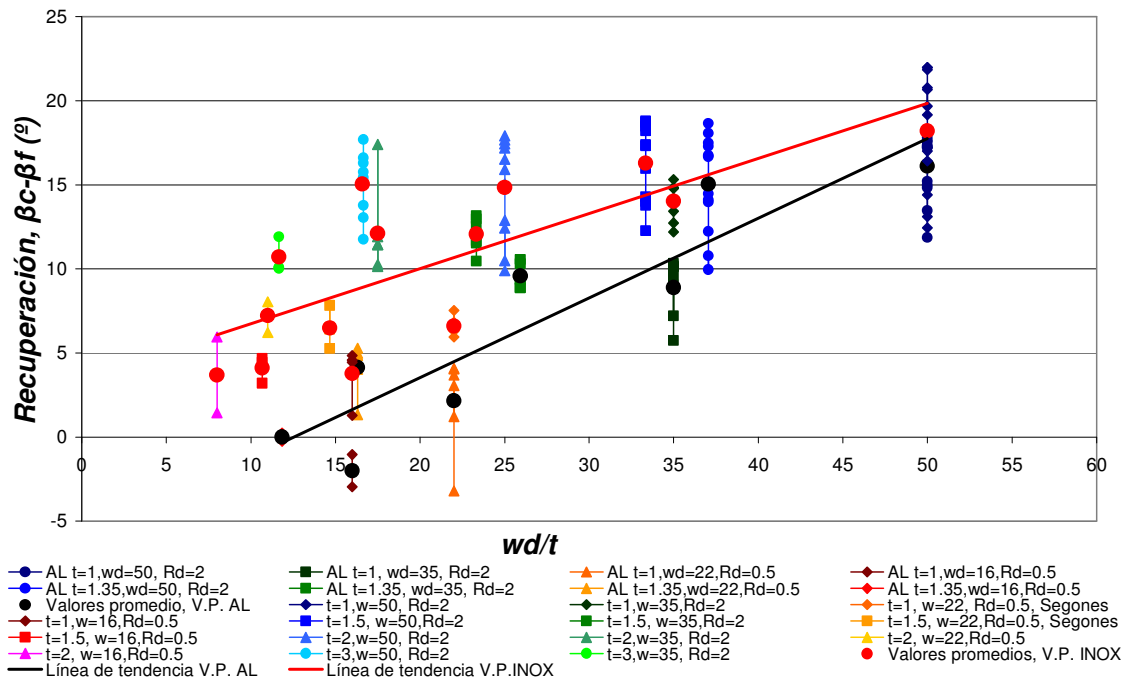


Figura 4.71 Tendencias y comparación de la influencia de un mismo parámetro (wd/t) sobre los dos materiales ensayados: acero inoxidable (línea de tendencia en rojo) y el aluminio (línea de tendencia en negro).

En cuanto al parámetro S_y/E y su influencia sobre la recuperación se puede observar en el Figura 4.72. En ella se puede advertir que en ambos materiales, la experimentación presenta una amplia dispersión, además de un comportamiento independiente que no permite afirmar una tipo de tendencia o relación directa sobre la recuperación.

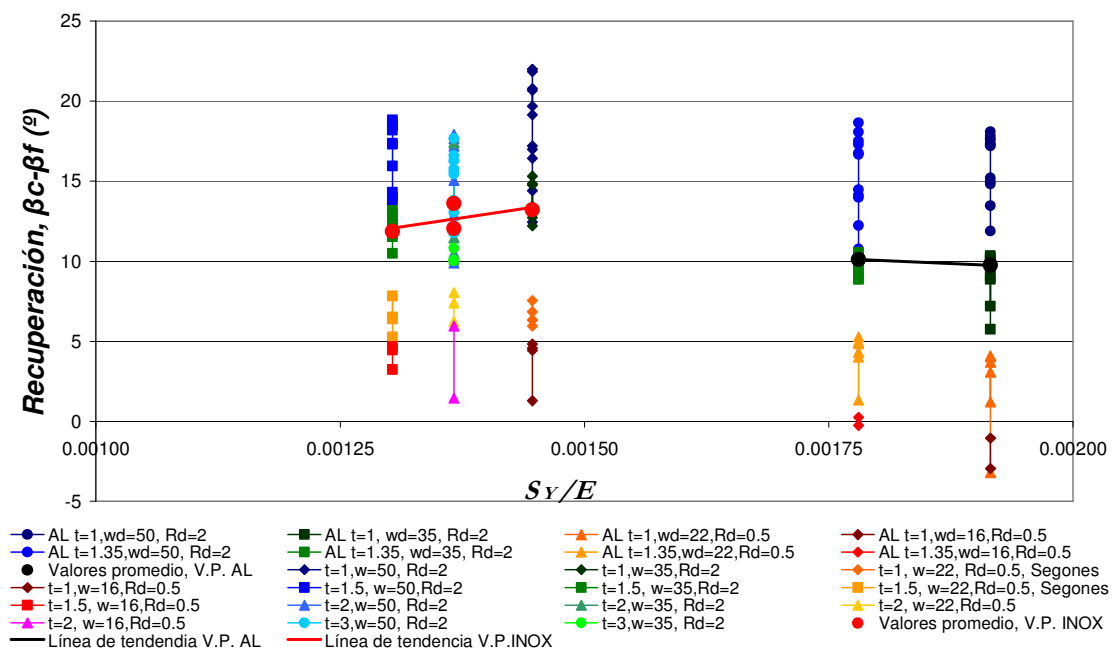


Figura 4.72 Influencia de la parámetro S_y/E sobre la recuperación (expresada como $\beta_c - \beta_f$) en la experimentación del acero inoxidable y el aluminio

4.6.5 Síntesis de la discusión

Después de la discusión en detalle de los resultados del análisis de experimentos se resume a continuación las tendencias e influencias que han observado.

- El análisis de la repetitibilidad efectuado sobre los experimentos de doblado muestra una correlación muy alta que se extiende al resto de experimentos.
- Para conseguir la pieza doblada o pieza objetivo se parte de los cálculos que proporciona el modelo rígido plástico. Se ha definido el error como la diferencia entre el valor del ángulo de doblado obtenido mediante los cálculos trigonométricos del modelo rígido-plástico y el ángulo real obtenido o ángulo de doblado final ($\beta - \beta_f$). En el caso del acero inoxidable, el error está comprendido en un intervalo de valores de $\pm 5.5^\circ$ mientras que para las probetas de aluminio ensayadas, el error está comprendido en un intervalo de valores de $\pm 2^\circ$.
- La desviación entre el ángulo de doblado medido usando el goniómetro y el usado con la técnica digital es mínima.
- Se confirma la relación esperada entre el ángulo y el radio final de doblado. Cuanto mayor es el ángulo menor es el radio final de doblado, obteniéndose en estos casos doblados más severos.

A causa de la complejidad del fenómeno de la recuperación, debido a las múltiples variables que le afectan, se prefiere presentar las tendencias extraídas durante la experimentación separándolas de las anteriores. Seguidamente se procede a enumerarlas:

- Cuanto mayor es el ángulo de doblado (β) que se quiere conseguir, mayor es el momento de doblado necesario y por este motivo aumenta la recuperación.
- Se observa claramente que a medida que disminuye el grosor de las chapas dobladas aumenta la recuperación experimentada.
- Analizando los diagramas se puede observar que para valores pequeños de relación R_f/t , cuando este parámetro aumenta la recuperación también. En cambio, puede observarse también que para valores elevados de R_f/t el valor de la recuperación deja de aumentar y se estabiliza.
- El aumento del valor de obertura de la matriz (w_d) aumenta claramente el valor de la recuperación, pues los desplazamientos y rotaciones elásticas de las secciones son más importantes cuando mayor es la distancia entre los apoyos de la chapa con las herramientas de doblado.
- Cuanto mayor es la relación w_d/t , mayor es la recuperación. Esta tendencia es la misma que en el apartado anterior y puede explicarse mediante idéntico razonamiento. La tendencia observada para la relación entre el radio en la matriz y el grosor, r_d/t , es la misma w_d/t , pues debido a las características de la matriz utilizada en esta experimentación las variables w_d i r_d están correlacionados.
- Respecto al módulo elástico (E) se ha constatado un comportamiento diferente a las publicaciones de referencia. En la experimentación el acero inoxidable presenta mayor recuperación que el aluminio. Sin embargo la influencia del esfuerzo de fluencia encaja con la tendencia esperada. Cuanto mayor es el valor del esfuerzo de fluencia, mayor es el valor de la recuperación. En cuanto al parámetro que relaciona ambas variables S_y/E la experimentación presenta una amplia dispersión, además de un comportamiento independiente que no permite afirmar una tipo de tendencia o relación directa sobre la recuperación.

Capítulo 5

Modelo de predicción de la geometría final y de la recuperación

*Cuanto más numerosas son las cosas que quedan por aprender,
menos tiempo queda para hacerlo.*

Marcel Prevost

5.1 Introducción

En este capítulo se presenta el modelo de predicción desarrollado para determinar la geometría final de una chapa doblada, así como la recuperación que ha experimentado durante el proceso de deformación y su relación con el parámetro ejecutor del proceso, la penetración del punzón, objetivo de esta tesis.

Como ya se ha expuesto en los capítulos anteriores, a pesar de que se han realizado muchos esfuerzos para desarrollar modelos analíticos que describan adecuadamente el proceso de doblado al aire, así como también se han realizado esfuerzos considerables en la mejora en las simulaciones de tipo *FEM*, en la mayoría de los casos el diseño del proceso de doblado de chapa depende fuertemente de la experiencia del diseñador, de los valores experimentales en registros que pueda llegar a tener la propia industria que se dedique al doblado (en el mejor de los casos) o de los datos obtenidos de publicaciones referenciadas o en manuales.

Esta adquisición de experiencia requiere la acumulación de datos durante un largo periodo de tiempo. De hecho la respuesta a muchos problemas que en el proceso de diseño real no se pueden obtener en la literatura o manuales. Por lo tanto, dado las limitaciones del análisis analítico el desarrollo de técnicas basadas en el ordenador que asistan al diseño se torna un requisito para la tarea de identificar la forma futura de la chapa doblada.

La complejidad de las técnicas que pueden desarrollarse puede abarcar un amplio abanico de posiciones, desde una simulación numérica sofisticada utilizando herramientas basadas en *FEM* (ver sección 3.3) hasta una predicción de un sistema que use el ordenador para el cálculo pero de precisión menor que la anterior. Esta gamma de sistemas aplicados al

proceso de doblado fundamentalmente tienen la función de disminuir el número de pruebas y error, técnica típica en la deformación de chapa. De manera que una técnica o herramienta sofisticada puede reducir significativamente el número de tentativas para obtener la pieza final deseada. En cambio, las técnicas más sencillas o de complejidad media también pueden reducir el número de tentativas pero con un rango de aproximación inferior al anterior.

Sin embargo, las técnicas precisas, debido a su sofisticación, comportan algunos inconvenientes. En primer lugar que se precisa de personal con muy alta especialización para su uso y en segundo lugar que requiere fuertes inversiones de tiempo cada vez que se quieran aplicar a un caso particular. De hecho, muchas veces estas herramientas de cálculo requieren el realizar varias tentativas “numéricas” hasta que se encuentra la solución al problema.

La técnica desarrollada en esta tesis se enmarca en el desarrollo de una herramienta de diseño del proceso de doblado al aire basada en el ordenador de dificultad media. Es decir que su usuario no precise una elevada preparación ni una inversión de tiempo importante. Esta herramienta ha de permitir una primera aproximación a la solución del problema del doblado al aire y de recuperación elástica. De alguna forma pretende sustituir, en parte, la necesidad de tener una amplia experiencia en el proceso de conformación. Esta experiencia nos daría una primera solución de partida para realizar diferentes tentativas (numéricas o experimentales) de prueba y error. La técnica desarrollada aquí también pretende proporcionar de una forma rápida y fiable una primera solución al problema.

Para cumplir con este requerimiento se ha implementado una herramienta basada en las redes neurales artificiales, dado que su aplicación sobre sistemas de fabricación, y más específicamente sobre la recuperación (ver la sección 3.4) ha ganado importancia entre los investigadores. Observando los resultados obtenidos de la experimentación en el Capítulo 4 se pueden obtener relaciones entre los parámetros de forma cualitativa. El uso de una red neural permite cuantificar estas relaciones con el objetivo de predecir la solución a un problema parametrizado previamente a partir de la experiencia que proporciona conocer la solución de un importante número de casos. Como se ha dicho, el objetivo de la herramienta es reducir el número de tentativas en la obtención de una pieza doblada. Según Viswanathan et al. (2003), se ha demostrado que la aplicación de redes neurales reduce el número de tanteos necesarios en las simulaciones por elementos finitos para diseñar el proceso de conformado, en ese caso, la definición de los parámetros que lo definen.

Por lo tanto, las redes neurales ofrecen un método alternativo para modelar y controlar procesos de fabricación complejos, como ha quedado demostrado que es el proceso de doblado al aire. Aunque esta técnica se ha aplicado mayoritariamente al control del proceso de doblado en este trabajo se aplica para la predicción de la forma final de una pieza doblada al aire, alternativa para la que las redes neurales son igualmente aplicables.

5.2 Red neural artificial

Como su propio nombre indica, las redes neurales artificiales (*Artificial Neural Networks, ANN*) son modelos matemático-informáticos de los procesos y mecanismos que constituyen el sistema nervioso biológico. Vasile et al. (2000) definen que un sistema está controlado cuando, con la experiencia del pasado, se puede predecir cómo se puede esperar que este sistema varíe en el futuro, al menos dentro de unos límites.

Las redes neurales son modelos matemáticos formados por varias neuronas dispuestas en diferentes capas (una de entrada, una o varias capas ocultas y una de salida) interconectadas por una red compleja, Figura 5.1. Las redes solucionan un problema por medio de

aprendizaje más que por una programación específica basada en reglas definidas. En una red neural alimentada hacia delante (*feed forward ANN*), una determinada entrada se transmite a cada nodo o neurona de entrada que, después de procesarla, pasa los resultados a las siguientes neuronas que pertenecen a la(s) capa(s) oculta(s). Las neuronas de la capa oculta procesan tales señales y pasan sus resultados a las neuronas de la capa de salida. Estas últimas neuronas, las de la capa de salida, después de procesar estas entradas finalmente generan una salida de la red. Como puede observarse en la Figura 5.1., no existen conexiones entre las neuronas que pertenecen a la misma capa.

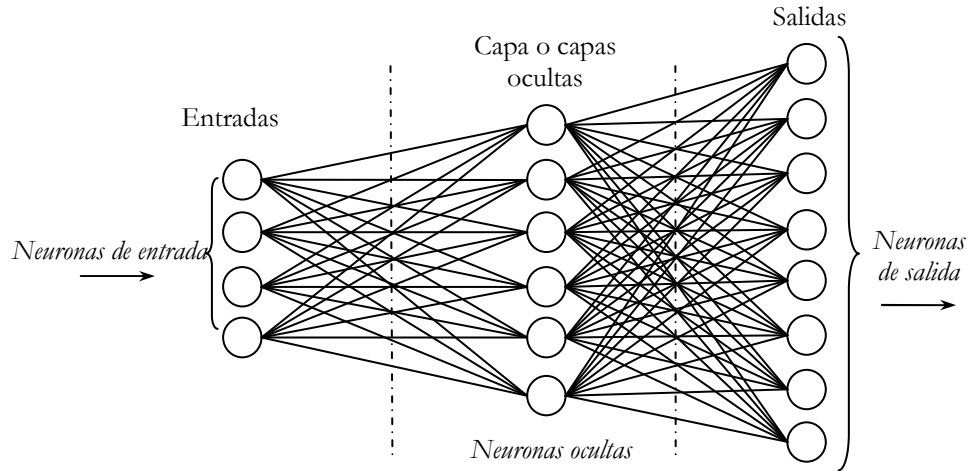


Figura 5.1 Esquema genérico de una red neural, con una única capa oculta representada, dependerá del diseño de la red que pueda tener más de una capa oculta.

Las neuronas son los bloques básicos de la red que operan en paralelo conectadas por uniones (*links*) de pesos variables (W). Estos pesos se calculan por un método iterativo durante el proceso de entrenamiento, cuando la red se alimenta con una gran cantidad de datos. Los datos de entrenamientos se constituyen por parejas de entrada (x) y de salida (d), al que se les llama valores deseados u objetivo) que representan un patrón a ser modelado.

La Figura 5.2 muestra los caminos de conexión hacia y_k desde una neurona de la capa de entrada x_i .

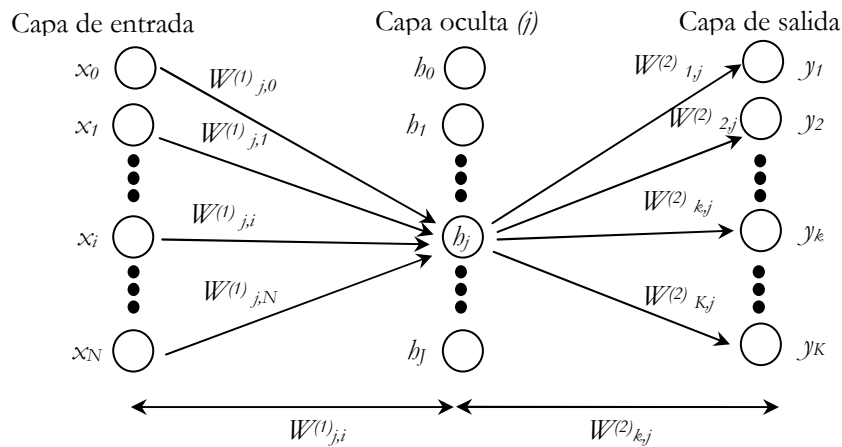


Figura 5.2 Estructura de red neural. Esquema de conexiones.

En una red totalmente conectada, cada neurona recibe entradas de todos los elementos de las capas anteriores. Cada camino de conexión tiene un peso asociado. La entrada total de

la neurona de la capa oculta j , U_j , es la suma del peso multiplicado por la entrada de cada valor de entrada, x_i , para cada camino de conexión.

$$U_j = W_{j,0} + \sum_{i=1}^N W_{j,i} \times x_i \quad (5.1)$$

donde N es el número de entradas y $W_{j,0}$ es el bias de la neurona, que es simplemente otro peso en la red. El bias permite a la neurona tener un grado extra de libertad para permitir el ajuste de la relación entrada-salida que debe aprender precisamente durante el entrenamiento.

La salida de la capa oculta de la neurona, V_j , se expresa como:

$$V_j = f(U_j) \quad (5.2)$$

donde f es la función de activación.

Para modelar una función de salida continua, la función de activación para las neuronas de la capa oculta suele ser una función de activación sigmoideal o cualquier función continua, creciente monotónicamente y acotada. Sin embargo para las neuronas de la capa de salida, una función de activación lineal con una pendiente de 1 es suficiente y facilita los cálculos. Con estas dos funciones de activación, una salida dada, y_k , basada en la entrada anterior, x_p , y con los pesos de conexión, resulta en:

$$y_k = \sum_{j=1}^J \left\{ W_{k,0} + W_{k,j} \cdot f \left(W_{j,0} + \sum_{i=1}^N W_{j,i} \cdot x_i \right) \right\} \quad (5.3)$$

donde J es el número total de neuronas ocultas.

Como ya se estableció anteriormente, las redes neurales deben entrenarse antes de que les sea posible generalizar, lo que significa que deben extraer la relación correcta entre un número finito de parejas de entrada (x)-salida deseada (d). Cuando la red neural está diseñada, un número de ejemplos de parejas entrada-salida de entrenamiento, Q , se dan a la red y los pesos de los caminos de conexión se ajustan. El objetivo de este aprendizaje es conseguir las salidas, y_k , que se han calculado usando los pesos de la red neural, de manera que sean lo más cercanos posibles a los patrones deseados de salida, d_k , para los ejemplos de entrenamiento. Una medida de lo bien que la red neural consigue este objetivo es el Error de Cuadrados Medio (*Mean Squared Error, MSE*).

El error se ha definido de la manera más simple y común, como diferencia entre la salida, y_k , y el valor deseado d_k .

$$e_k = d_k(q) - y_k(q) \quad (5.4)$$

De manera, que la función MSE se expresa como:

$$MSE = \frac{1}{Q \times K} \times \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K [d_k(q) - y_k(q)]^2 \quad (5.5)$$

donde K es el número total de salidas.

El método más común de ajuste de los pesos de los caminos de conexión es a través del algoritmo de propagación hacia atrás (*backpropagation algorithm*). Se trata de una generalización del algoritmo de mínimos cuadrados que modifica los pesos de la red para minimizar el error cuadrado medio entre la salida deseada y el valor real de la red. La

propagación hacia atrás utiliza un aprendizaje supervisado en el que la red se entrena usando datos en los que se conocen las entradas, x_k , así como las salidas deseadas, d_k .

Antes de que el entrenamiento comience se asigna el valor de los pesos de manera pseudo aleatoria. Entonces los ejemplos de entrenamiento se presentan a la red neural uno a uno. Primero, un patrón-vector de entrada, \mathbf{X}_q , se alimenta hacia adelante a través de la red utilizando los pesos asociados a cada conexión para obtener el patrón-vector de salida, \mathbf{Y}_q . A partir del vector de salidas deseadas del ejemplo de entrenamiento, \mathbf{D}_q , se calculan los errores según (5.4) y (5.5).

A continuación es necesario descubrir los nuevos valores de \mathbf{W} , el vector o matriz formada por todos los pesos de la red que minimicen el valor de MSE expresado en (5.5). Una manera de minimizar este error se basa en el método de gradiente descendente. De acuerdo con este algoritmo, la dirección de cambio de los pesos de \mathbf{W} debería ser en la misma dirección que $-\partial E / \partial W_j$.

Si examinamos el cambio de peso para un único peso, particularizado sobre una red de dos capas (una oculta y una de salida) se calcula el valor de $-\partial E / \partial W_{k,j}^{(2)}$ para cada conexión desde la capa oculta a la capa de salida. Similarmente se calcula $-\partial E / \partial W_{j,i}^{(1)}$ para cada conexión desde la capa de entrada a la capa oculta. Los pesos entonces se cambian usando los valores obtenidos; este método también se conoce como regla delta generalizada (Hand et al., 2003) y (Viswanathan et al., 2003).

$$\Delta W = W^{t+1} - W^t \quad (5.6)$$

En resumen, las dos ecuaciones siguientes describen la proporcionalidad de los cambios de pesos sugeridos a las derivadas del error.

$$\Delta W_{k,j}^{(2)} \propto -\frac{\partial E}{\partial W_{k,j}^{(2)}} \quad (5.7)$$

$$\Delta W_{j,i}^{(1)} \propto -\frac{\partial E}{\partial W_{j,i}^{(1)}} \quad (5.8)$$

Otra manera de explicar este procedimiento de actualización de los pesos entre capas, es decir que los efectos de los errores para cada neurona se barren hacia atrás a través de la propia red. Este proceso se repite para todos los ejemplos de entrenamiento y para un número específico de iteraciones. El número de iteraciones se refiere al número de veces que este procedimiento de ajuste se repite sobre todos los ejemplos de entrenamiento.

Una vez se considera la red entrenada, con una cota de error admisible que se habrá declarado como error objetivo, los pesos de la red se congelan, se almacenan y se utilizan para calcular los valores de salida para nuevas muestras de entrada.

Según Swingler (1996) el ciclo de vida de un proyecto de red neural típico tiene dos etapas principales. La primera la etapa de planificación del proyecto y la segunda el ciclo de desarrollo de la red. A continuación se exponen estas dos etapas caracterizadas para el modelo de red desarrollado en este trabajo.

5.3 Planificación de la red neural

Dentro de esta etapa de planificación de la red neural, se definen la tarea del proyecto de red, la viabilidad del estudio que debe llevarse a cabo y la especificación de las entradas y salidas, así como la adquisición de datos.

5.3.1 Definición de la tarea

En esta etapa final del trabajo desarrollado en esta tesis se pretende construir un modelo de red neural para predecir la geometría final de una pieza doblada, el valor de la recuperación que experimenta durante el proceso de doblado y la penetración del punzón para conseguir una pieza doblada. Se construirá un modelo que esté entrenado con un número pequeño de experimentos sin embargo que sea capaz de ser generalizado para muchos más. Para ello se espera conseguir el modelo más robusto y general que sea posible. Muchas de las decisiones que se discuten a continuación se han tomado teniendo en cuenta este objetivo específico.

5.3.2 Viabilidad del estudio

Como ya se ha verificado durante la experimentación, la forma final de la pieza (ángulo de doblado final y radio de doblado final) se ve afectada por las características geométricas de las herramientas que ejecutan el doblado y las características de la propia chapa doblada, tanto geométricamente (ángulo objetivo y grosor) como por las características del material de la chapa. La influencia de todos estos parámetros es de importancia no solamente sobre la geometría final de la pieza doblada sino que también influyen en el fenómeno de la recuperación. A su vez, como ya se ha expuesto, el fenómeno de la recuperación en el proceso de doblado al aire repercute también sobre la forma final de la pieza doblada, por lo que se convierte también en una variable cuyo valor es de vital importancia.

Las tentativas analíticas desarrolladas para modelar el proceso de doblado al aire o el fenómeno de la recuperación mediante las relaciones que existen entre las variables de importancia (ver sección 3.2.4) permiten comprobar que las relaciones entre estas variables son en realidad de carácter no lineal con múltiples interacciones. La existencia de conocimiento que regula estas relaciones no es la deseada, por lo que predecir y controlar la forma de una pieza doblada y su recuperación requieren métodos de control de implementación dificultosa. En cuanto a la alternativa que ofrece el uso de métodos de simulación numérica tiene como inconveniente el hecho de requerir usuarios expertos.

El carácter no lineal de las relaciones entre las variables de influencia en el doblado al aire y en la recuperación que se ha introducido en el párrafo anterior es reconocido por los investigadores (Forcellese y Gabrielli et al., 1998) y (Inamdar, Date, y Narasimhan et al., 2000). Esta característica hace que la técnica de red neural que se propone para predecir la forma final de una pieza doblada al aire encaje perfectamente con el propósito de la tesis. Ofreciendo la ventaja de ser una técnica robusta, rápida en cuanto a tiempo de computación y de generalización adecuada.

5.3.3 Especificación de entradas y salidas

Aunque hasta que no se realice la etapa de creación y entrenamiento de la red no se declararán las variables definitivas que compondrán el modelo final, es conveniente declarar por adelantado las variables que serán utilizadas como predictores y las variables que se quieren predecir.

Los parámetros de entrada que influyen de manera importante sobre la geometría final de la chapa y sobre la recuperación se han expuesto en el Capítulo 4. Entre ellos, los parámetros que se utilizaran como entradas para el modelo de red neural son:

1. β_p , Ángulo de doblado final.
2. t , grosor de la chapa
3. w_ϕ ancho de matriz

4. r_ϕ radio de matriz
5. S_y , esfuerzo de fluencia
6. E , módulo de Young
7. n , coeficiente de endurecimiento por deformación

Se ha decidido ignorar la consideración de otros parámetros como entrada a la red, por considerar que su influencia es menor. Esta decisión se ha efectuado a partir del estudio de la experimentación efectuada y descrita en el Capítulo 4. Este ha sido, por ejemplo el caso de excluir el parámetro S_y/E de las datos de entrada para el modelo desarrollado en este trabajo, aunque si se considera en (Inamdar, Date, y Narasimhan et al., 2000). También se han ignorado parámetros a partir de lo expuesto en literatura relacionada con las redes neurales y el proceso de doblado, (Forcellese y Gabrielli et al., 1998), (Inamdar, Date, y Narasimhan et al., 2000), (Inamdar, Date, y Desai, 2000) e (Inamdar et al., 2002). Por ejemplo, parámetros que en la literatura quedan rechazados por (Inamdar, Date, y Narasimhan et al., 2000) y también por este estudio son la fricción, la anisotropía normal y la planar.

En lo que se refiere a las variables que la red intentará predecir o salidas se definen como:

1. R_f , Radio de doblado final
2. $\Delta\beta = \beta_c - \beta_f$, Recuperación
3. Z , desplazamiento de punzón

La elección de los parámetros se justifica a continuación. Ya se ha comentado que se pretende predecir la geometría final de una pieza doblada. Los parámetros principales que caracterizan la geometría final de la pieza son el ángulo de doblado final y el radio final. Se ha elegido el primero como entrada, pudiéndose interpretar como el ángulo objetivo que pretende obtenerse en un doblado al aire, mientras se ha preferido predecir y por lo tanto tratar como salida el radio de doblado final, por un motivo primordial: no existen muchos estudios que determinen el radio final de una chapa doblada al aire, en cambio si que los hay que determinan el ángulo de doblado final.

La forma final de una chapa doblada también depende en gran parte de la cantidad de recuperación que se experimenta, por este motivo, se ha escogido la variable de recuperación expresada como diferencia del ángulo en carga y el ángulo final de doblado.

Y finalmente, se elige la penetración del punzón como última salida de la red neural, pues como se ha descrito en los capítulos anteriores es el principal parámetro ejecutor del proceso de doblado al aire. Y además su cálculo mediante el modelo rígido-plástico es un valor de partida que se debe ir refinando después de varios ensayos de prueba y error, por lo que parece interesante también que sea la tercera salida del modelo de predicción.

La justificación más detallada de que la información requerida para predecir las salidas está contenida dentro de las entradas definidas puede encontrarse también en el estado del arte desarrollado a lo largo del Capítulo 2 y del Capítulo 3 de la primera parte de este trabajo.

5.3.4 Adquisición de datos

La adquisición física de los datos según las entradas y salidas definidas en el apartado anterior, se pueden encontrar detallada en los apartados 4.2, 4.3 y 4.4 pues se trata de los valores obtenidos durante la experimentación. Por lo que queda constatada, la viabilidad final de la obtención de los datos entrada y salida.

La cantidad y tipo de datos que deben adquirirse está relacionado con el tamaño de la red neural y con la capacidad de generalizar que tendrá tal red. Estas características se detallarán

en la siguiente sección, y se empezará a notar el hecho característico cuando se construye un modelo de red neural: deben establecerse sacrificios entre adquirir más datos y alterar la arquitectura de la red y el procedimiento de entrenamiento. De los métodos que se utilicen dependerán la disponibilidad y el coste de adquirir los datos, las restricciones de tiempo sobre el entrenamiento de la red, la capacidad de generalización y la simplicidad de la red para cada aplicación particular.

5.4 Ciclo de desarrollo de la red

El ciclo de desarrollo de la red comprende las siguientes etapas, que se describirán a continuación: (i) diseño de red, (ii) pre-procesamiento y post-procesamiento de los datos, (iii) entrenamiento de la red, (iv) análisis del error post-entrenamiento y finalmente (v) implementación de red. En la Figura 5.3 se representa resumidamente este ciclo de desarrollo, en el que se aprecia el procedimiento iterativo de la etapa diseño y entrenamiento de redes hasta que se encuentra la red definitiva que se convertirá en el motor del modelo de predicción a implementar.

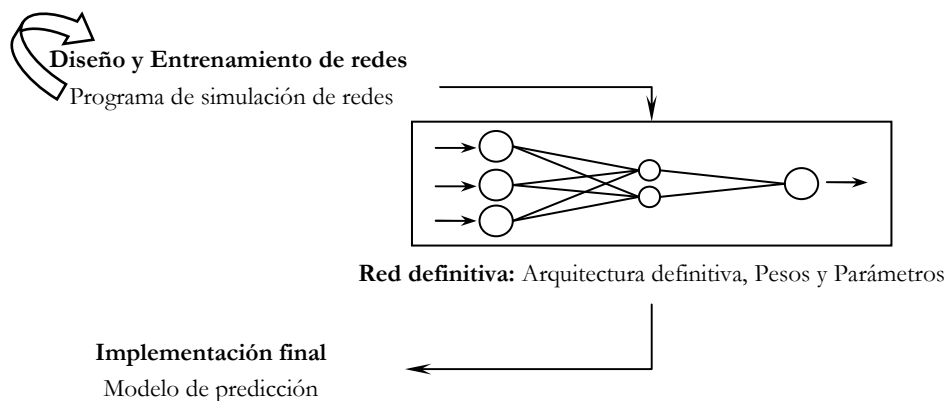


Figura 5.3 Ciclo de desarrollo de una red neural

Como ya se introdujo en el apartado 5.2, la red neural definida en este trabajo se basa en un modelo perceptron multicapa (*multi layer perceptron*, *MLP*). La diferencia entre un sistema *MLP* con un perceptron o perceptron lineal reside en el hecho de que un perceptron no tiene capa oculta, consta únicamente de una capa de entrada y otra de salida (Widrow et al., 1990). Los perceptrones son capaces de modelar únicamente funciones lineales y consecuentemente raramente se mencionan.

Para Swingler (1996) un *MLP* se compone de un conjunto de unidades entrada cuya función es tomar valores de entrada desde el exterior, de un conjunto de unidades salida que informan de la respuesta final y de un conjunto de unidades ocultas de procesado que unen las entradas con las salidas. La función de las unidades ocultas es la de extraer características útiles de los datos de entrada que son, en turno, utilizados para predecir el valor de las unidades de salida. Un *MLP* es sólo un ejemplo de red neural, aunque es la red más popular y muchos de los conceptos que se aplican sobre ella se aplican a otro tipo de redes neurales. A menudo los términos de red neural y *MLP* se usan aparentemente de forma intercambiable aunque conviene recordar la existencia de esta distinción.

5.4.1 Diseño de red

Usualmente, una red neural de dos capas (una capa de entrada, otra oculta y otra de salida) es suficiente para modelar cualquier función continua para un nivel de precisión deseado si

está provista del número de nodos ocultos suficiente. Esta característica de la red con la arquitectura anteriormente descrita se la conoce como la propiedad de universalidad (Hand et al., 2003) y se aplica en la aproximación de funciones. Su demostración matemática puede hallarse en (Mehrotra et al., 1997) y sobre ella se basan los trabajos de referencia (Inamdar, Date, y Narasimhan et al., 2000) y de (Viswanathan et al., 2003).

Este tipo de arquitectura es la escogida para el desarrollo del modelo, pues el modelo desarrollado en este trabajo pretende realizar una aproximación de una función continua cuyas variables son las entradas y salidas definidas en una sección anterior, para predecir así su nuevo valor.

a) Cálculo del número de nodos en la capa oculta y número de patrones de entrenamiento

En la literatura, varios investigadores sugieren fórmulas para calcular los límites del tamaño de la capa oculta. Estos límites varían enormemente entre las diferentes técnicas. Cada fórmula no es más que una ayuda a la estimación, un límite que debe ser considerado. Por lo que una cantidad determinada de la técnica prueba y error no puede evitarse en esta etapa.

Existen varias restricciones conflictivas sobre el número de pesos que una red requiere. Con pocos nodos, la red puede no tener la potencia suficiente para la tarea de aprendizaje. Con un número de nodos o conexiones excesivas el cálculo es costoso y se corre el riesgo de que la red pueda memorizar las muestras de entrenamiento. A este fenómeno se le llama sobreentrenamiento. Una red sobre-entrenada tiende a ejecutar pobremente la entrada de nuevas muestras y se considera que no ha aprendido correctamente. El aprendizaje neural se considera exitoso sólo si el sistema puede ejecutarse bien sobre nuevos datos que no han formado parte del entrenamiento. En otras palabras, la red está obligada a tener la capacidad de generalizar, no de memorizar los datos con los que se entrena.

En este trabajo, para calcular el número de nodos ocultos iniciales se utiliza una regla (*rule of thumb*) utilizada como criterio para determinar el número de patrones de entrenamiento para un determinado nivel de precisión (Swingler, 1996), (Mehrotra et al., 1997) e (Inamdar, Date, y Narasimhan et al., 2000),

$$N > \frac{|W|}{(1-a)} \quad (5.9)$$

donde N representa el número de patrones (deseado), $|W|$ el número de pesos que deben entrenarse y a la precisión esperada del conjunto de datos. La precisión que se requerirá en el modelo desarrollado en este trabajo es del 90%.

Por lo tanto, mediante esta expresión (5.9) fijando un nivel de precisión y conociendo el número de patrones de entrenamiento disponibles (número de experimentos) es posible determinar el número de neuronas ocultas. Por lo tanto, esta relación muestra el sacrificio que debe realizarse entre una correcta generalización y la precisión que se quiere conseguir.

Adicionalmente, Swingler (1996) recoge las siguientes recomendaciones y reglas heurísticas para la determinación de neuronas en la capa oculta:

- Es conveniente comprimir los datos (técnica de *fun-in*). La capa oculta debería contener menos neuronas que la capa de entrada.
- Si se quiere usar más pesos que los que el conjunto de datos puede llenar, se debe establecer un error de aprendizaje mayor para mantener la capacidad de generalización.

- Nunca se escoge un número de neuronas ocultas (h) mayor que dos veces el número de entradas (i).
- Se pueden cargar como máximo N patrones de i elementos en $i \cdot \log_2 N$ unidades ocultas. Nunca usar más. Si se quiere obtener una buena generalización, usar considerablemente menos patrones.
- Asegurar al menos, que se tiene $1/\epsilon$ veces, donde ϵ es el error, tantos ejemplos de entrenamiento como pesos en la red desarrollada.
- Recordar que grandes redes requieren tiempos de entrenamiento más largos.

b) Generalización y precisión

Algunos investigadores, como recoge Swingler (1996), sugieren que el número de neuronas ocultas es menos importante de lo que generalmente se cree y que se pueden conseguir buenas ejecuciones con una red aproximadamente correcta aplicando otras técnicas. Eso establece que la complejidad del modelo se determina en cada etapa del proyecto y que es un error asumir que la correcta elección del número de neuronas ocultas garantiza un modelo adecuado.

La generalización es la característica que asegura el correcto aprendizaje de la red. Es decir, que se produce un error pequeño sobre los ejemplos que no se han utilizado durante el entrenamiento (Prechelt, 1998). Esta comprobación permite asegurar que la red no está únicamente memorizando o aprendiendo los patrones de entrenamiento porque resultará en un modelo de red de ejecución pobre. Como se ha comentado anteriormente a este fenómeno se le conoce como sobreentrenamiento de la red (*overtraining* u *overfitting*).

Una red con muchos nodos es capaz de memorizar el conjunto de entrenamiento y puede no generalizar bien. Por este motivo se prefieren redes pequeñas sobre las redes grandes (Swingler, 1996), (Hand et al., 2003) y (Mehrotra et al., 1997). El sobreentrenamiento puede reducirse usando redes con un número pequeño de parámetros (nodos ocultos y pesos). Contrariamente una red con muy pocas neuronas pueden provocar la situación contraria infraentrenamiento (*underfitting*).

Una técnica simple para asegurar un nivel de generalización aceptable es probar periódicamente la red sobre un conjunto de datos de validación y parar el entrenamiento cuando este error empiece a crecer. Este método presenta el problema de aumentar el tiempo de entrenamiento y la cantidad de datos requeridos para una solución. Los criterios de parada que se usan en el diseño al igual que la determinación de la composición del conjunto de entrenamiento de la red diseñada en este trabajo se explicarán más adelante en la sección dedicada al entrenamiento de la red.

c) Funciones de activación

Las funciones de activación de una unidad suman las entradas afectadas por los pesos desde todas las unidades de conexión y las achata dentro de un rango determinado. Las funciones sigmoideas, llamadas así por su forma de S, como la logarítmica (\log) y la tangente hiperbólica (\tanh) y la función lineal son las funciones más habituales que se usan como funciones de activación

En el modelo diseñado, como ya se ha indicado al inicio de esta sección, se compone de una única capa oculta y otra de salida, la capa oculta utiliza debe utilizar una función sigmoideal. La función de activación escogida es la de \tanh que cubre el rango de ± 1 lo que ofrece una ventaja si se normaliza el conjunto de entrenamiento para que tenga la media en 0 y una desviación estándar de 1. Esa normalización claramente es sólo posible si la función de activación puede tener valores negativos. Otra ventaja de este tipo de función de activación es que una función axisimétrica tiende a un aprendizaje más rápido (en términos

de menos presentación de patrones requeridos) que una función no simétrica como es la función *log*. En lo que se refiere a la función de activación de la capa de salida se utiliza una función lineal.

5.4.2 Pre-procesamiento y Post-procesamiento de los datos

Antes de realizar el entrenamiento de la red pueden realizarse sobre los datos de entrada y sobre los valores objetivos o deseados una serie de pasos de pre-procesamiento que mejorarán la eficiencia del entrenamiento.

Este pre-procesamiento consiste en escalar las entradas (\mathbf{X}) y los valores deseados (\mathbf{D}) para que caigan siempre dentro de un rango específico. En este caso, el pre-procesamiento efectuado para escalar los valores de (\mathbf{X}) y (\mathbf{D}) es la normalización de la media y de la desviación estándar del conjunto de entrenamiento. La normalización significa que los nuevos valores escalados tendrán una media de valor 0 y una desviación estándar de valor 1 para las nuevas entradas (\mathbf{X}_n) y para los nuevos valores deseados (\mathbf{D}_n).

Así pues los valores iniciales media y desviación de las entradas y de los valores deseados, pasan a formar parte también de la red que se entrenará junto con los valores de los pesos y de los biases, pues una vez la red esté entrenada será necesario transformar las futuras entradas que sean aplicadas a la red, así como las futuras salidas del modelo.

Este pre-procesamiento de datos obliga a que siempre que se utilice la red con nuevas entradas, los datos deberán ser preprocesados con los valores de media y desviación que fueron calculados durante la etapa de entrenamiento.

Además en algunas ocasiones, sobretodo si la dimensión del vector de entrada es demasiado grande, puede ser que algunas de las componentes de los vectores estén altamente correlacionadas, y en consecuencia sean redundantes. En una situación de este tipo es útil reducir la dimensión del vector de entrada. Por este motivo realizar un análisis de componentes principales es un procedimiento efectivo que efectúa la operación anteriormente descrita.

Esta técnica tiene tres efectos, (i) ortogonaliza los componentes de los vectores entrada, con lo cual no están correlacionados unos con los otros; (ii) ordena los componentes ortogonalizados (o componentes principales) por lo que los que presentan mayor variación se presentan primero; y (iii) elimina aquellos componentes que contribuyen lo mínimo a la variación del conjunto de datos.

Es condición indispensable para poder aplicar el análisis de componentes principales es realizar una normalización de los datos de entrada como la que se ha descrito previamente. En este trabajo se ha fijado una cota del 1% de manera que los componentes que contribuyan menos que el 1% a la variación total en el conjunto de datos se eliminen. Con este procedimiento se obtiene un nuevo vector de entrada (\mathbf{X}_{n2}) y una matriz de transformación que contiene los componentes principales. Una vez la red esté entrenada esta matriz deberá usarse para transformar cualquier entrada futura que sea aplicada a la red. Al igual que en el pre-procesamiento anterior, esta matriz pasará a formar parte de la red, junto a los pesos y los biases.

5.4.3 Entrenamiento de red

El caso que nos ocupa se abordará bajo una estrategia de aprendizaje supervisada, lo que significa que para todos los patrones de entrada se conocen los valores de los salidas objetivo o respuestas deseadas. En este tipo de aprendizaje la respuesta de la red a cada patrón de entrada se compara directamente con la respuesta deseada conocida y se produce una retroalimentación a la red para que corrija los posibles errores.

Por lo tanto, una red puede entrenarse una vez ésta se ha diseñado y una vez se hayan recogido y procesado los datos de entrenamiento. Entrenar la red neural significa encontrar los valores de los pesos de manera que la red neural proporciona la función deseada. El objetivo del aprendizaje es el de obtener salidas que son calculadas con los pesos de la red, de forma que sean lo más cercanas posibles a los patrones de salida deseados.

El despliegue correcto de la tecnología de las redes neurales requiere tiempo y experiencia. Winston (1992) llega a afirmar que el entrenamiento de una red neural es un arte, que los expertos en redes neurales son artistas y no meros usuarios de manuales de referencia.

Además, es necesario construir y entrenar varias redes con los mismos datos antes de establecer que se ha encontrado la solución satisfactoria. La mejor guía para nuestras elecciones será el procedimiento de prueba y error, apoyado, si es posible, en la referencia de elecciones en las que en problemas similares hayan dado un buen resultado (Winston, 1992).

El entrenamiento de varias redes se ha llevado a cabo diseñando un algoritmo que usa funciones y rutinas del módulo de Redes Neurales de MATLAB®. Antes de presentar el esquema del algoritmo de entrenamiento, se detallan a continuación una serie de particularidades de esta fase, que se incluirán en el algoritmo de programación en MATLAB®.

a) Estilos de entrenamiento

El acto de presentar un conjunto de entrenamiento entero a la red una vez se conoce como época. Existen dos estilos de presentar los datos a la red, o sea, de entrenarlos según la frecuencia con la se actualizan los pesos:

1. En el aprendizaje en modo por patrones (*pattern-mode*), requiere que los pesos se actualicen después de la presentación de cada patrón.
2. El aprendizaje en modo por época (*batch-mode*), los pesos se actualizan después de que todas las muestras se hayan presentado a la red. Se guardan el total de los errores producidos por cada salida en una época. Una vez la época se completa, se calcula un único error medio y la red se actualiza una vez de acuerdo a ese error medio.

Los dos métodos se usan ampliamente y cada uno de ellos presenta sus ventajas e inconvenientes (Mehrotra et al., 1997). Escoger entre ambos modos no es fácil (Swingler, 1996), por eso a la hora de escoger entre ambos estilos pueden tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El modo *batch* requiere menos actualizaciones de pesos y consecuentemente es más rápido. Proporciona una medición más precisa de los cambios de pesos requeridos. Debe tenerse en cuenta que el modo *batch* se refiere únicamente a los ajuste de los pesos, los errores deben propagarse hacia atrás para cada patrón.
- Utilizando el modo *batch* es más probable, comparado con el modo *pattern*, quedarse atrapado en un mínimo local en el espacio de error.

El modo de entrenamiento escogido en este trabajo es el del aprendizaje por épocas (*batch-mode*), pues como se verá más adelante este modo de aprendizaje permite entrenar la red con un abanico más amplio de algoritmos de entrenamiento.

b) Algoritmo de propagación hacia atrás

El término de propagación hacia atrás se refiere, como se ha explicado brevemente en el apartado 5.2, al proceso por el cual las derivadas del error de la red, con respecto a los pesos y los biases, se pueden calcular. Este proceso puede usarse con diferentes algoritmos

de entrenamiento, en función de los cuáles se establecen unos requerimientos de cálculo y almacenaje, no habiendo ningún algoritmo que sea el apropiado para todas las situaciones. Por este motivo, a continuación se hará un breve resumen de los algoritmos usados en el desarrollo del modelo neural que encajan con el problema que se pretende resolver en esta tesis.

Algoritmo de propagación hacia atrás o de gradiente descendiente

El algoritmo de propagación hacia atrás es el algoritmo que implemente la estrategia de aprendizaje de gradiente descendente explicada brevemente en la sección 5.2. Consta de dos pasos, en los que se da:

1. Una propagación hacia delante del patrón de entrada desde la capa de entrada hasta la de salida.
2. Una propagación del error hacia atrás del vector del error desde la capa de salida hacia la de entrada.

Como ya se vio en la sección 5.2. la actualización del peso era proporcional a la derivada del error, así pues,

$$\Delta w_{k,j}^q = -\eta \frac{\partial E^q}{\partial w_{k,j}} \quad (5.10)$$

donde η es un número positivo pequeño que se llama ratio de aprendizaje.

La aplicación del algoritmo exige que las funciones de activación que conforman la red sean derivables, como son las que se han escogido. Gracias a esta condición y mediante transformaciones que pueden encontrarse en (Mehrotra et al., 1997) y (Hand et al., 2003), el cambio de peso de la ecuación (5.10) puede describirse como:

$$\Delta w_{k,j} = -\eta \cdot \partial_k \cdot x_j \quad (5.11)$$

La inicialización de los pesos es el punto de partida para iniciar este algoritmo. Se supone que el algoritmo de aprendizaje de propagación hacia atrás debe converger hacia una configuración de pesos óptima que representa la localización de un mínimo absoluto en la superficie de error. Es muy importante que la inicialización de los valores de los pesos sea aleatoria. La configuración inicial de pesos determina sobre que mínimo local o global el algoritmo de aprendizaje convergerá. Por ese motivo el establecimiento preliminar de los valores de los pesos juega un rol importante. Es necesaria esta inicialización aleatoria de valores pequeños para evitar anticipadamente un mínimo local o que se quede estancado en un mínimo local cercano al punto inicial. A causa de esta dependencia del estado de la red final sobre la configuración inicial de los pesos, es una práctica común practicar el entrenamiento de una misma red varias veces utilizando diferentes inicializaciones de pesos. La que tenga el error menor sobre el conjunto de entrenamiento es la que pasa ser la red elegida.

Algoritmo de propagación hacia atrás con *momentum*

Para evitar el problema del mínimo local y hacer el procedimiento de aprendizaje más efectivo se han desarrollado nuevas técnicas de aprendizaje. La primera realiza una pequeña modificación al algoritmo descrito, se trata del algoritmo de propagación hacia atrás con *momentum*.

Este algoritmo introduce el parámetro llamado *momentum* (al que llamaremos α) al cálculo de la actualización de pesos. La regla de actualización de pesos de (5.11) se convierte en

$$\Delta w_{k,j}(t+1) = -\eta \cdot \partial_k \cdot x_j + \alpha \cdot \Delta w_{k,j}(t) \quad (5.12)$$

De esta manera el cambio de peso efectivo es una media del cambio sugerido por el gradiente actual y el cambio del peso usado en el paso precedente. El *momentum* permite a la red responder no sólo al gradiente local, sino que también a las tendencias en la superficie del error.

Los valores del coeficiente de *momentum* (α entre 0 y 1) se pueden obtener también por prueba y error, como en el caso del ratio de aprendizaje (η). Escoger correctamente el valor de α puede reducir significativamente el número de iteraciones para que converja la red.

Valores altos de η producirán un aprendizaje más rápido pero aumentando el riesgo de salirse de la solución y de oscilación del sistema. Valores bajos de η evitan los problemas anteriores pero retrasan el proceso. En cuanto a α , valores bajos reducen el riesgo del estancamiento en un mínimo local pero aumenta el riesgo de salirse de la solución como ocurre para los valores altos de η . Existen recomendaciones para ir ajustando los valores de estos dos parámetros recogidas en (Swingler, 1996).

c) Otros algoritmos de entrenamiento

Los dos algoritmos descritos hasta ahora (de gradiente descendiente y de gradiente descendiente con *momentum*) son muchas veces demasiado lentos para problemas prácticos. Existen técnicas más potentes con rendimientos altos que pueden llegar a converger de diez a cien veces más rápido que los dos algoritmos anteriores. Estos nuevos algoritmos operan por épocas, en modo *batch*.

Los algoritmos más rápidos se dividen en dos categorías. La primera utiliza técnicas heurísticas que fueron desarrolladas desde un análisis del rendimiento del algoritmo descendiente con más pendiente estándar, como el algoritmo de propagación hacia atrás de ratio de aprendizaje variable. La segunda utiliza técnicas de optimización numérica estándar, como por ejemplo la técnica de gradiente conjugado y la casi-Newton. Para un estudio más detallado de estas técnicas se puede consultar (Mehrotra et al., 1997) y (Hand et al., 2003).

Los algoritmos más eficientes son los basados en el método de Newton. El paso básico de estos algoritmos es:

$$\mathbf{W}(t+1) = \mathbf{W}(t) - \mathbf{A}^T(t) \cdot \mathbf{g}(t) \quad (5.13)$$

donde $\mathbf{A}(t)$ es la matriz Hessiana (de segundas derivadas) de los valores actuales de los pesos y biases, y $\mathbf{g}(t)$ es el gradiente actual (expresado en las ecuaciones (5.11) y (5.12) como el producto de la entrada por la derivada). Precisamente, el cálculo de esta matriz Hessiana en redes neurales hacia delante es complicado, por lo que hay unos algoritmos que no requieren el cálculo completo de esta matriz Hessiana y por lo tanto se les llama de enfoque casi-Newton.

Algoritmo de Levenberg-Marquardt

El algoritmo de Levenberg-Marquardt es uno de los métodos de enfoque casi-Newton. Este se diseñó para no tener que calcular la matriz Hessiana, pues realiza una aproximación a través de la matriz Jacobiana, que es mucho más fácil de calcular usando una técnica de propagación hacia atrás,

$$\mathbf{W}(t+1) = \mathbf{W}(t) - [\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (5.14)$$

Donde \mathbf{J} es la matriz Jacobiana que contiene las primeras derivadas de los errores de la red con respecto a los pesos y los biases y \mathbf{e} es un vector de errores de la red. El parámetro μ es un escalar. Si su valor es cero, la ecuación (5.14) se convierte en el método de Newton,

usando una matriz Hessiana aproximada. Si por el contrario su valor es grande, se convierte en el algoritmo de gradiente descendiente de paso pequeño.

El objetivo del algoritmo es moverse hacia el método de Newton lo más deprisa posible, pues es el que se acerca al error mínimo de manera más precisa y rápida. Por lo tanto, μ disminuye después de cada paso del entrenamiento exitoso, es decir después de la reducción de la función objetivo. En cambio, aumenta sólo cuando un paso provisional aumentaría la función objetivo. De esta manera, la función objetivo siempre se reducirá a cada iteración del algoritmo.

Se recomienda el uso de este algoritmo para problemas de aproximación de funciones en redes que contengan hasta un centenar de pesos, o sea para redes de tamaño medio o pequeño, pues se obtiene la convergencia más rápida. Lo que representa una ventaja si se requiere un entrenamiento preciso. En muchos casos es capaz de obtener el *MSE* más bajo que cualquier otro algoritmo probado.

Hay que tener en cuenta que los cálculos que realiza requieren una elevada capacidad de memoria cuando se ha implementado en un ordenador, aun así existen modificaciones sobre el algoritmo para poder trabajar con una reducción de la capacidad de memoria necesaria, sacrificando el tiempo de ejecución, pues este aumenta.

d) Conjunto de validación y Técnica de parada temprana

La construcción del conjunto de entrenamiento representa un punto clave de la propiedad de generalización de una red (Hand et al., 2003). Sobre todo para evitar el problema del sobreentrenamiento, un aspecto comentado con anterioridad.

La Figura 5.4 representa la evolución típica del error del conjunto de entrenamiento y del error en un conjunto de validación a lo largo del tiempo de entrenamiento. La red parece mejorar indefinidamente, el error del entrenamiento disminuye siempre. En cambio, en algún punto temporal del entrenamiento (marcado con t^* en la Figura 5.4) la red empieza a sobrentrenarse a causa de las características de datos falsos y engañosos que siempre forman parte del grupo de datos de entrenamiento. Por lo tanto, lo que ocurre es que a partir de cierto momento la red realmente empieza a empeorar. Esto se puede comprobar observando cuando el error de los datos no vistos por la red en el proceso de entrenamiento, o los llamados datos de validación, empieza a aumentar ((Prechelt, 1998) y (Hand et al., 2003)).

Este punto óptimo de entrenamiento se localiza habitualmente en las últimas etapas del entrenamiento. A partir de él se puede es conveniente el procedimiento de aprendizaje una vez se ha observado el error de validación menor. En ese momento se puede afirmar que la red está proporcionando la mejor ejecución que puede. Este procedimiento se conoce como técnica de parada temprana (o *early stopping*).

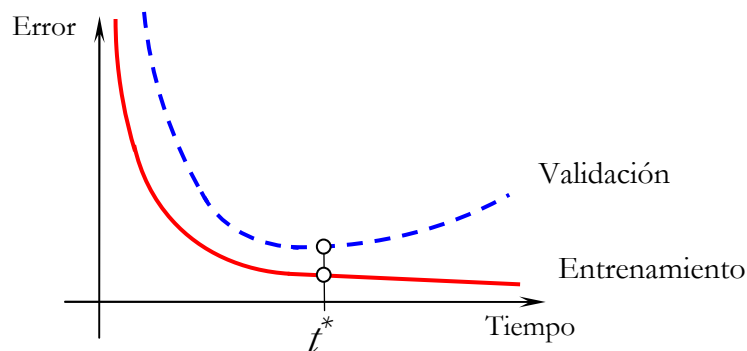


Figura 5.4 Curvas de error de generalización y entrenamiento (Mehrotra et al., 1997), (Prechelt, 1998), (Hand et al., 2003).

Esta técnica es una de las técnicas más usadas porque es simple de entender e implantar. Según Prechelt (1998), se ha observado en muchos casos de que es el mejor método comparado con otros métodos de regularización. Se trata de emplear un pequeño conjunto de datos independientes, llamado conjunto de validación, junto con el conjunto de entrenamiento. No es práctico utilizar esta técnica cuando la cantidad de datos es demasiado pequeña pues la construcción del conjunto de validación reduce el de entrenamiento. Esta reducción es causada por el requerimiento de esta técnica que el conjunto de validación no se utilice para ser entrenado (Hand et al., 2003).

Así pues, los patrones de partida se deben separar en dos grupos, el conjunto de entrenamiento y el conjunto de validación. La proporción no está estipulada, una proporción habitual es de utilizar el doble de datos para el entrenamiento que para la validación. Swingler (1996) recomienda que el conjunto de validación independiente sea como mínimo de un tamaño no inferior al 20% del conjunto de entrenamiento.

Una variación del método anterior (Ripley, 1996), también muy utilizado, es el separar el conjunto de datos disponibles en tres grupos: (i) el de entrenamiento, (ii) el de validación y (iii) el de prueba. El conjunto de entrenamiento se aplica a la red para entrenarla y realizar la adaptación de pesos y biases. El conjunto de validación se utiliza para refinar la construcción de la red neural, por ejemplo para aplicar la técnica de parada temprana. El tercer conjunto de datos, el de prueba, se utiliza para determinar el rendimiento de la red mediante un cálculo del error. Swingler (1996) indica que estrictamente se debería recoger otro conjunto de prueba, que la red no haya visto, por si se realizan más cambios a la red. Pues como se dijo el único propósito del conjunto de prueba es proporcionar una medición de la fiabilidad de la red.

Como se ha visto al inicio de este apartado, el error del conjunto de validación se suele monitorizar junto con el del entrenamiento, y en el momento que aumenta el error del primero se para el entrenamiento y se guardan los pesos y los biases que proporcionan el error de validación mínimo. En cuanto al error del conjunto de prueba, es habitual encontrarlo monitorizado junto con los otros dos, pero es importante remarcar que no se utiliza durante el entrenamiento, sino que se usa para comparar diferentes modelos e identificar así el mejor modelo de red neural. Si durante la monitorización, el error del conjunto alcanza un mínimo en un número de iteraciones significativamente diferente que el error de validación, el suceso descrito puede indicar una división pobre del conjunto de datos.

5.4.4 Análisis del error post-entrenamiento

El rendimiento de la red entrenada puede medirse hasta cierto punto por los errores de los conjuntos de entrenamiento, validación y de prueba, pero a menudo es útil investigar la respuesta de la red más detalladamente. Una de las opciones es ejecutar un análisis de regresión entre la respuesta de la red y los correspondientes objetivos. La regresión proporciona tres parámetros, los dos primeros m y b , corresponden a la pendiente y a la intersección en el eje Y de la mejor regresión lineal que relaciona los patrones deseados (patrones objetivos) con las salidas de la red. Si tuviéramos un ajuste perfecto (salidas exactamente iguales a los valores deseados) el valor de m debería ser 1 y el de b debería ser 0. La tercera variable el coeficiente de correlación (*valor- R*) entre las salidas y los patrones deseados es una medida del nivel de corrección que la variación en la salida es explicada por los patrones objetivos. Si *valor- R* es igual a 1, es cuando se tiene la correlación perfecta, un valor cercano a 1, por lo tanto, indica un buen ajuste.

5.4.5 Esquema del algoritmo de entrenamiento

A modo de resumen se presenta a continuación el esquema del algoritmo de entrenamiento, ver Figura 5.5. En el esquema se recoge los pasos más importantes que se ejecutan durante el entrenamiento y de los que se han dado detalles durante los apartados anteriores.

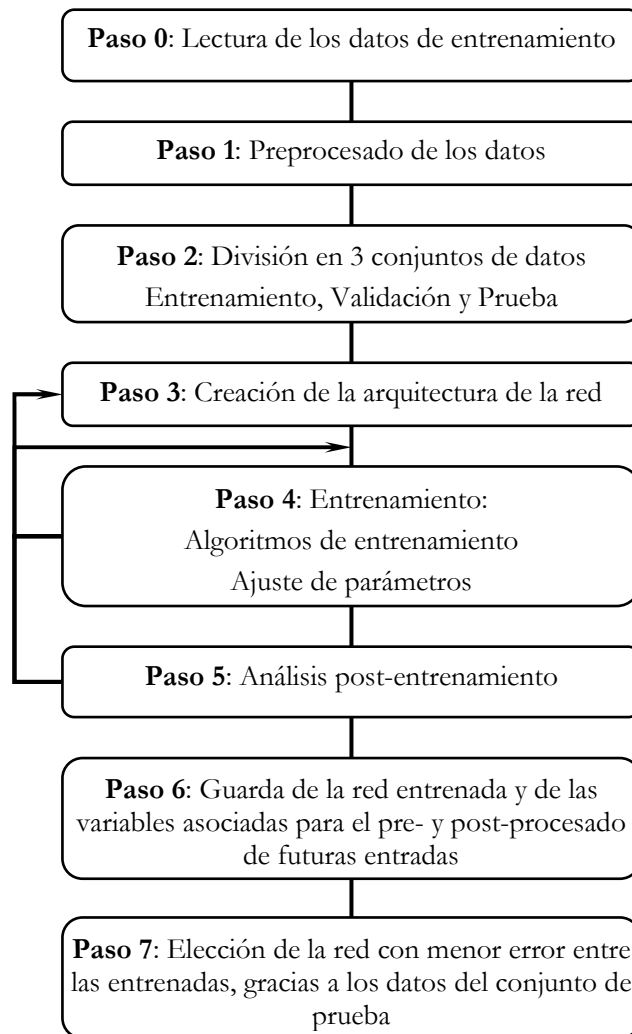


Figura 5.5 Esquema del algoritmo de entrenamiento.

El desarrollo de las redes neurales se ha implementado por medio de las rutinas que ofrece MATLAB® en su módulo específico para Redes Neuronales. Esta implementación es proporcionada en soporte informático acompañando la tesis.

5.5 Presentación de resultados de entrenamiento

A continuación se presentarán los diferentes resultados obtenidos en la etapa de entrenamiento. Se han entrenado, con el mismo conjunto de datos, varias redes con diferentes algoritmos de entrenamiento mientras se encuentra la solución satisfactoria

5.5.1 Condiciones iniciales

Para llevar a cabo el entrenamiento se ha establecido la siguiente estrategia. En primera instancia, para conservar la red simple y factible, se ha decidido realizar inicialmente dos redes neurales independientes asociadas a cada material ensayado. Por este motivo, los parámetros que caracterizan el material no se tienen en cuenta, pues representarán una entrada constante a la red, que no aportaría información al sistema. La arquitectura de red resultante es una $4 - h - 3$ (4 neuronas de entrada, un número h por determinar de neuronas ocultas y 3 neuronas de salida).

La tercera red que se ha diseñado integra los dos materiales que se han ensayado, por ellos se añaden a los parámetros de entrada anteriores, los parámetros que caracterizan al material convirtiéndola en una red de arquitectura $7 - h - 3$.

Para poder definir la arquitectura final de partida, es necesario determinar el número de neuronas ocultas, que se ha representado anteriormente mediante la variable h . Se ha estableciendo un nivel de precisión del 90 % y determinado el número de neuronas de entrada y salida. Para poder cuantificar las neuronas ocultas mediante la ecuación (5.9) es necesario conocer los patrones de entrenamiento disponibles, Tabla 5.1. Debe tenerse en cuenta que se efectúa una división de los datos disponibles en tres conjuntos: el de entrenamiento, el de validación y el de prueba (recordando que este último no interviene en el entrenamiento).

Material	Patrones de entrenamiento disponibles	Conjunto de entrenamiento (50%)	Conjunto de validación (25%)	Conjunto de prueba (25%)
Aluminio	50 (3)	25	13	12
Acero inoxidable	82 (5)	41	21	20
Aluminio y Acero inoxidable	132 (8)	66	33	33

Tabla 5.1 Patrones de entrenamiento disponibles. Entre paréntesis los valores no presentados a las redes, guardados como entradas para la validación del modelo de predicción

Así pues, la arquitectura resultante es $4-1-3$ para la arquitectura que no incluya los parámetros del material, como la de la Figura 5.6.

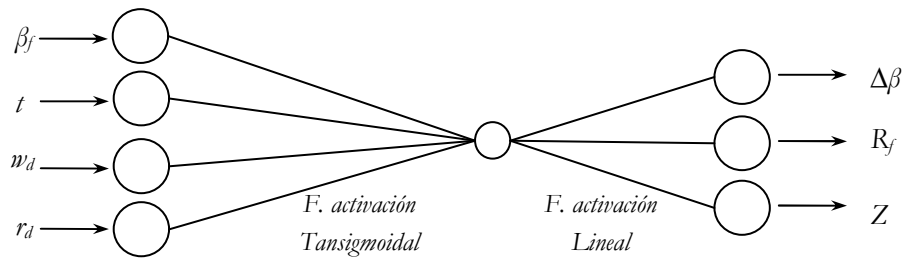


Figura 5.6 Arquitectura 4-1-3 de red neuronal, entrenada para el aluminio y el acero inoxidable independientemente

Y una arquitectura 7-1-3 para la que contempla los dos materiales.

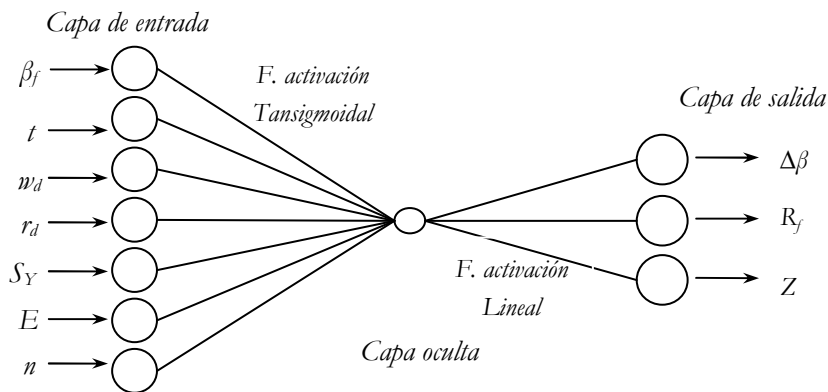


Figura 5.7 Arquitectura 7-1-3 de red neuronal, entrenada para el aluminio y el acero inoxidable independientemente

5.5.2 Algoritmos de entrenamiento

Con las diferentes arquitecturas de red definidas se dispone de todos los elementos para iniciar el entrenamiento.

El proceso de entrenamiento implementado en MATLAB® requiere definir un número de parámetros comunes a todos los algoritmos que están relacionados con las paradas de entrenamiento, situación en la que algoritmo deja de presentar patrones de entrada a la red. Estos parámetros y las condiciones de parada con las que están relacionados son:

- Número de Épocas: Máximo número de épocas a entrenar. Si el número de iteraciones o ciclos supera este valor máximo, el entrenamiento se parará. Para las redes entrenadas se considerará un número máximo de 10^5 épocas.
- Objetivo de ejecución: Error mínimo a conseguir, cuando la función es menor a ese objetivo el entrenamiento se detiene.
- Gradiente mínimo: valor mínimo del gradiente. Si se obtiene un valor menor al aquí definido el entrenamiento se suspende. El gradiente mínimo considerado será de $1 \cdot 10^{-10}$
- Tiempo en segundos: este valor se ha considerado infinito para las redes entrenadas. En caso de ponerle un valor límite, cuando el tiempo de entrenamiento es mayor a este parámetro la red deja de entrenarse.

a) Arquitectura 4-1-3 para el aluminio y 4-1-3 para el acero inoxidable

En este apartado se exponen las descripciones y los resultados obtenidos del entrenamiento de las redes con la misma arquitectura para el aluminio y para el acero inoxidable. Para cada

una de ellas se han utilizando dos algoritmos diferentes: el algoritmo de gradiente descendiente con *momentum* y el algoritmo Levenberg –Marquardt, Tabla 5.2.

La Tabla 5.2. presenta los detalles de arquitectura y los parámetros de entrenamiento establecidos para cada red. Estos parámetros, que se han definido a lo largo de las secciones anteriores, se han agrupado en tres conjuntos. El primero está relacionado con los parámetros que se establecen para llevar a cabo el entrenamiento y son característicos de cada algoritmo: el ratio de aprendizaje (η) y el *momentum* (α) para el algoritmo de gradiente hacia atrás con *momentum* y el parámetro μ para el de Levenberg–Marquardt. Dentro de este conjunto de parámetros se incluye el objetivo de ejecución que se ha definido.

El segundo conjunto está formado por los valores resultado de la fase de entrenamiento en sí misma: el motivo por el cuál el entrenamiento cesa, número de ciclos de entrenamiento o iteraciones que se han realizado hasta la parada, en el caso de no superar el número de épocas. Y finalmente dentro de este conjunto el valor del error final alcanzado por la red (*MSE*).

Para acabar, en el tercer grupo, se presentan los valores de la variable *valor-R* (correlación entre los valores de salida y los valores objetivos o deseados), que se obtiene para cada variable de salida como resultado del análisis post-entrenamiento.

Algoritmo		Gradiente descendiente con momentum		Levenberg -Marquardt	
Material		Aluminio	Acero Inoxidable	Aluminio	Acero Inoxidable
Arquitectura		4-1-3	4-1-3	4-1-3	4-1-3
Error		18%	11%	18%	11%
Parámetros Entrenam.	η	0.1	0.1	-	-
	α	0.8	0.8	-	-
	μ	-	-	1	1
	Obj.ejecución	0.1	0.1	0.1	0.1
Motivo parada		P. de validación	P. de validación	P. de validación	P. de validación
Entrenam.	Nº iteraciones	233	15722	19	121
MSE		0.428	0.374	0.404	0.368
Análisis	Valor–R ($\Delta\beta$)	0.925	0.937	0.931	0.943
Post-Entrenam.	Valor–R (R_f)	0.577	0.571	0.432	0.546
	Valor–R (Z)	0.7	0.842	0.824	0.862

Tabla 5.2 Comparativa entre los valores de los parámetros de entrenamiento, de los resultados y del análisis post-entrenamiento de los algoritmos de entrenamiento utilizados

Además de los valores recogidos en la tabla anterior, también se han guardado los ficheros de los pesos y biases, junto con las variables del pre- y post-procesamiento de los datos necesarias para implementar el modelo de predicción.

La Tabla 5.2 permite constatar la rapidez del algoritmo Levenberg–Marquardt en frente al de gradiente descendiente con *momentum*, basta con comparar el número de iteraciones a las que ambos algoritmos se han detenido. De igual forma se puede apreciar esta rapidez en las

Figura 5.8 y Figura 5.9, donde se representa el error de cada conjunto de datos utilizados en el entrenamiento en función del número de iteraciones ejecutadas.

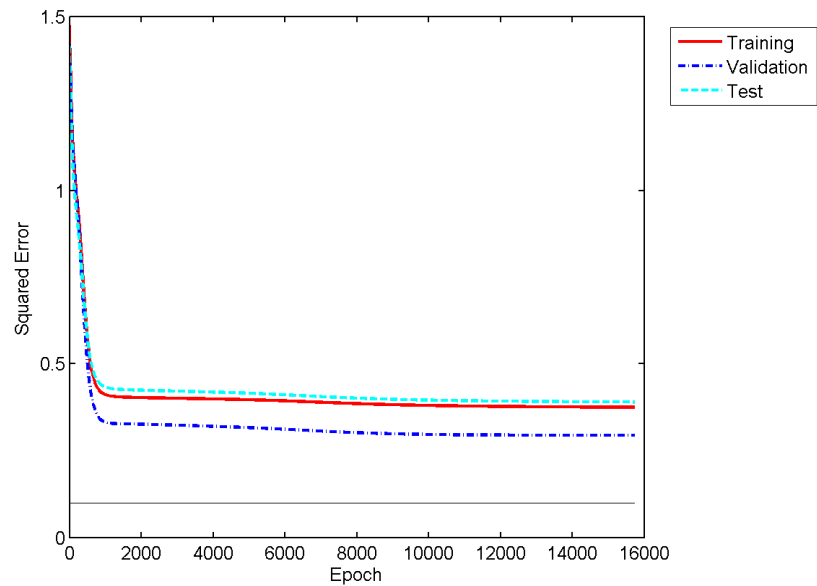


Figura 5.8 Evolución del error para cada conjunto de datos (entrenamiento, validación y prueba) en función de las épocas entrenadas. Algoritmo de gradiente descendiente con *momentum*

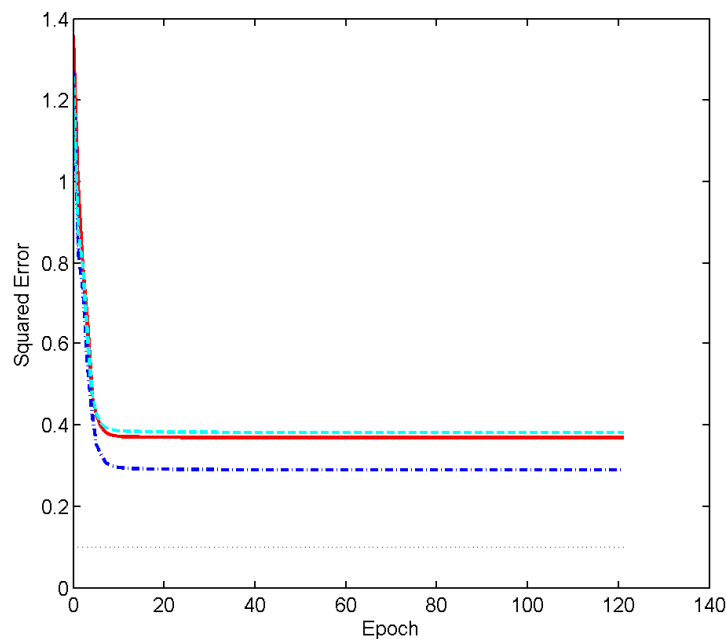


Figura 5.9 Evolución del error para cada conjunto de datos (entrenamiento, validación y prueba) en función de las épocas entrenadas. Algoritmo Levenberg–Marquardt

Los resultados son razonables pues el error del conjunto de prueba y del de validación tiene características similares y no parece que haya ocurrido un sobreentrenamiento importante.

En todos los casos, el entrenamiento como se recoge en la Tabla 5.2, se ha detenido como resultado de la aplicación de la técnica de parada temprana o parada por validación, tal y

como aparece reflejado en la tabla. A partir de este momento se está en condiciones de realizar el análisis post entrenamiento para observar la respuesta de la red. Al tener tres salidas, se realizan tres regresiones lineales de las que se obtiene los valores de los parámetros m y b (pendiente e intersección en el eje vertical de la mejor regresión lineal), además del *valor-R*. La variable *valor-R* aparece en la Tabla 5.2 (R en las siguientes figuras). Y las variables m y b aparecen como cabecera de las representaciones gráficas que se obtienen (Figura 5.10 y Figura 5.11).

Los resultados gráficos del análisis post-entrenamiento de la red entrenada con el algoritmo de gradiente descendente con *momentum* para el aluminio aparecen en la Figura 5.10 y Figura 5.11. La Figura 5.10 muestra que para la salida de recuperación, $\Delta\beta$, la red sigue razonablemente bien los valores deseados, pues su *valor-R* es de 0.925.

Las dos salidas restantes, radio final de doblado y penetración de punzón, Figura 5.11 (a) y (b) respectivamente, no están bien modeladas, como se puede apreciar en las propias gráficas y en el *valor-R* de la Tabla 5.2.

Los resultados gráficos en los que se basan algunos de los parámetros de la Tabla 5.2 se presentan a continuación. En ellos se repite el mal comportamiento del modelado de las variables R_f y Z , en especial el radio de doblado final.

Los resultados gráficos (de la Figura 5.12 a la Figura 5.17) también permiten notar que el tipo de material es independiente sobre el algoritmo de convergencia aplicado. Además, a pesar de que con el resto de algoritmos parece que los resultados obtenidos para la penetración del punzón, Z , mejoran, se mantiene que el modelado sigue siendo pobre, pues es inferior al 0.9. Por lo que se ha creído necesario probar otras arquitecturas.

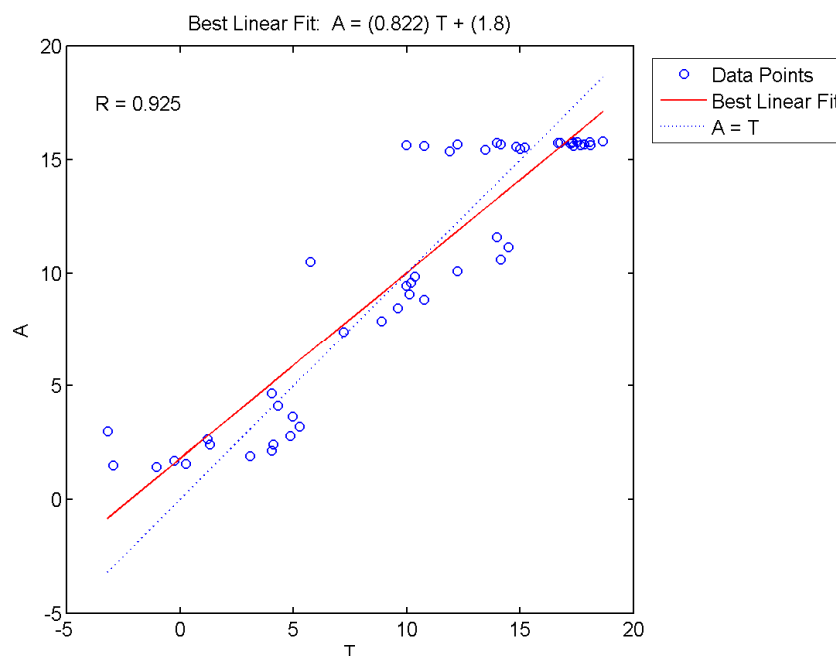


Figura 5.10 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Material, Aluminio
Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, gradiente descendente con *momentum*. T , valor deseado. A , valor de salida de la red

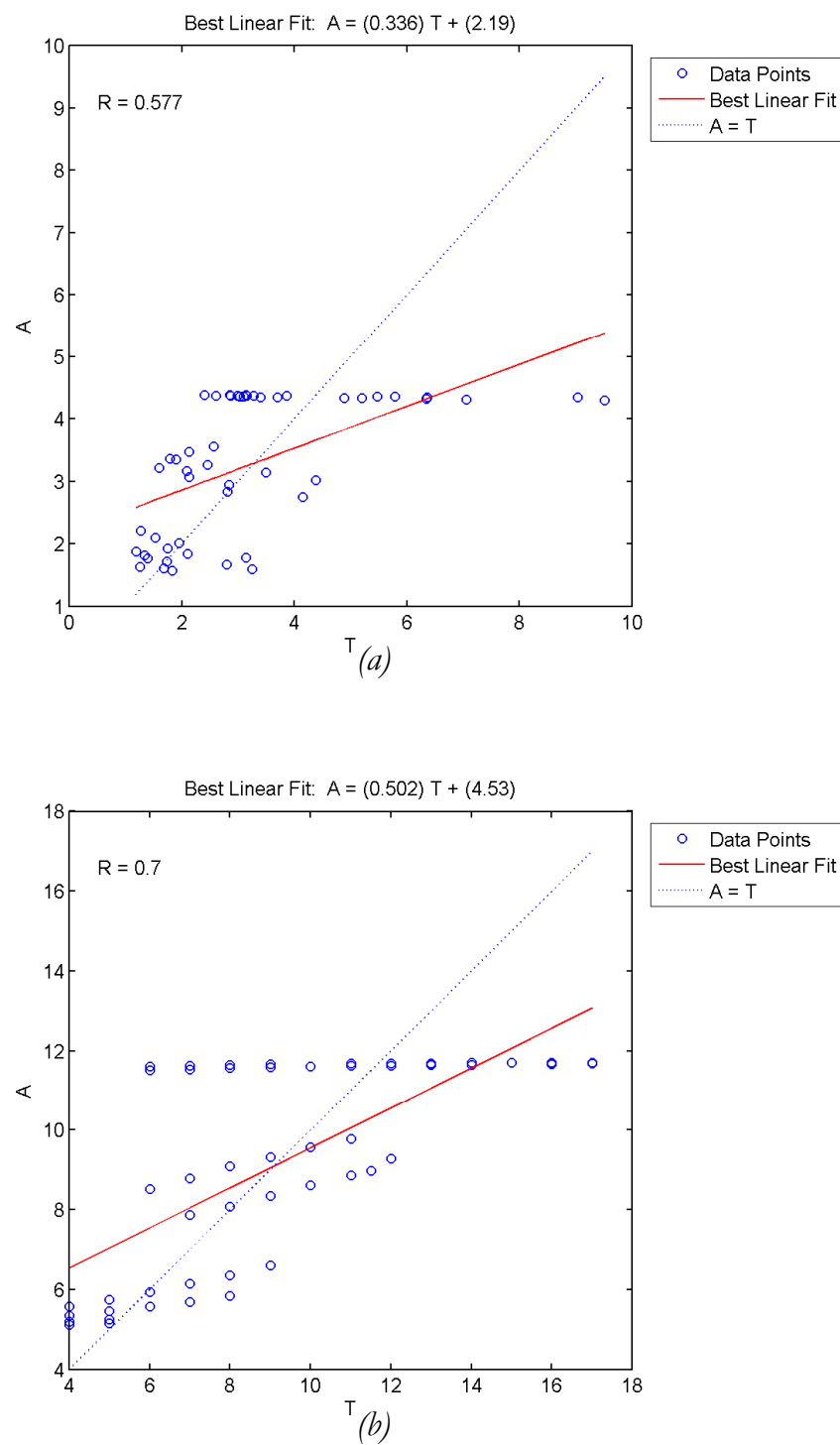


Figura 5.11 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable (a) R_f y (b) Z . Material, Aluminio Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, gradiente descendente con *momentum*

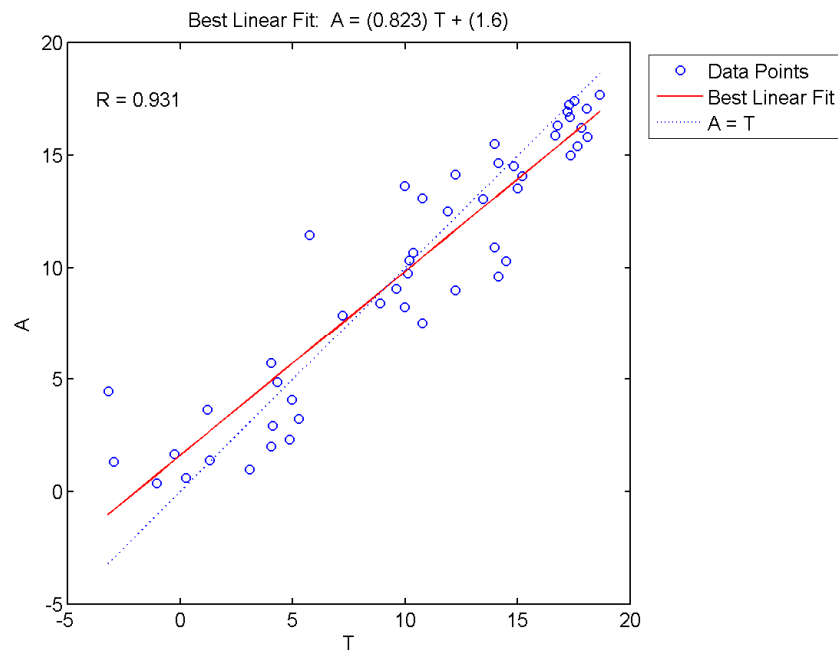


Figura 5.12 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Material, Aluminio. Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

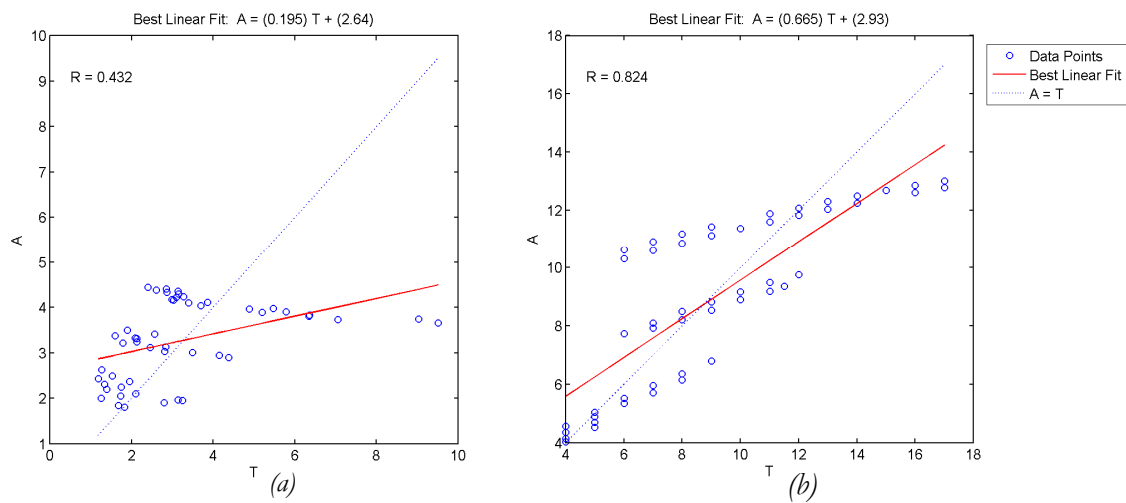


Figura 5.13 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable (a) R_f y (b) Z . Material, Aluminio. Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

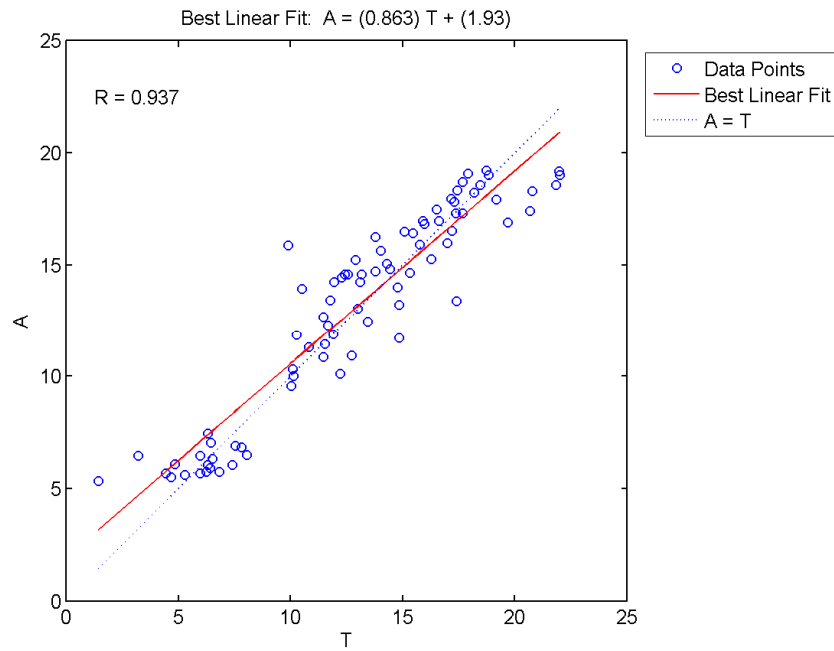


Figura 5.14 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Material, Acero Inoxidable. Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, gradiente descendente con *momentum*

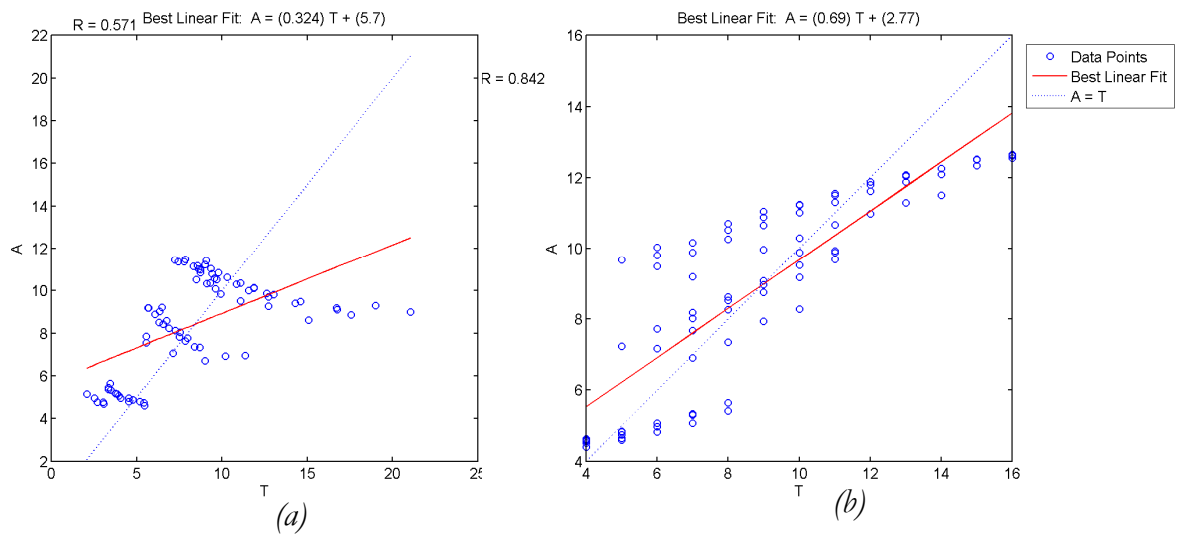


Figura 5.15 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable (a) R_f y (b) Z . Material, Acero Inoxidable. Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, gradiente descendente con *momentum*

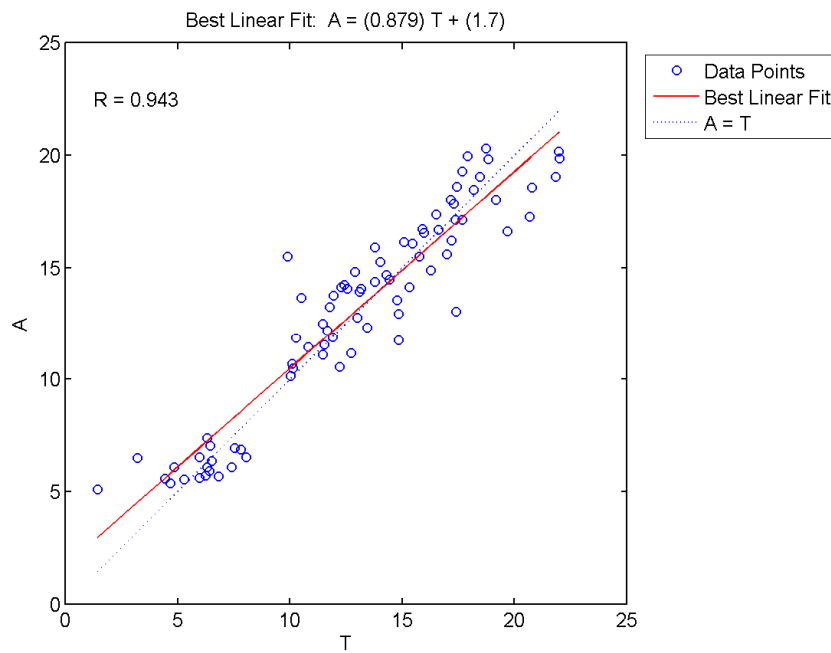


Figura 5.16 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Material, Acero Inoxidable. Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

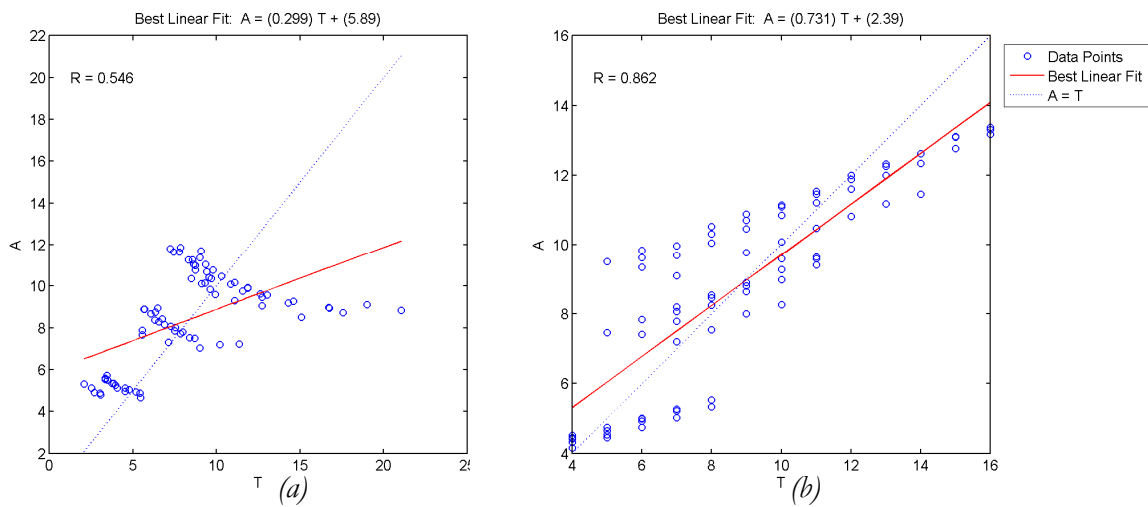


Figura 5.17 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable (a) R_f y (b) Z . Material, Acero Inoxidable. Arquitectura, 4-1-3. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

b) Arquitectura 7-1-3

Esta arquitectura añade las entradas de las características de cada material, entrenándola con la totalidad de patrones, conservando las mismas salidas, Figura 5.18, tal y como se establecía en el apartado 5.5.1.

A partir de los resultados obtenidos con las arquitecturas anteriores, debido a la rápida convergencia y el valor de error MSE conseguido en las redes entrenadas por el algoritmo Levenberg–Marquardt, se decide entrenar la red aquí únicamente con este algoritmo.

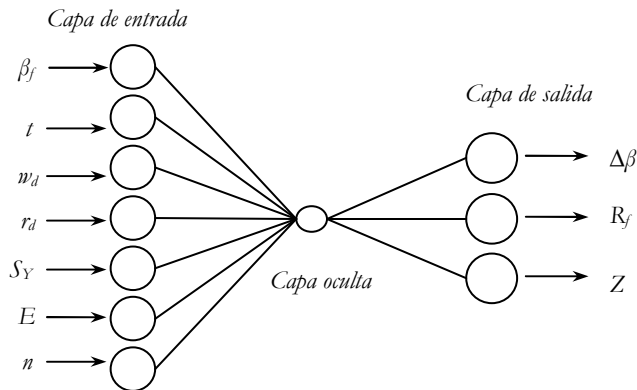


Figura 5.18 Arquitectura de red neuronal 7-1-3 para el acero inoxidable y el aluminio

En este caso, la red gana precisión pues el número de patrones disponibles es mayor. Los resultados obtenidos mejoran también, pues se disminuye el valor de error MSE aunque continúa por encima del valor del objetivo de ejecución, como recoge la Tabla 5.3.

Algoritmo	Levenberg -Marquardt	
Material	Aluminio y Acero Inoxidable	
Arquitectura	7-1-3	
Error	7%	
Parámetros	μ	1
Entrenam.	Obj.ejecución	0.1
	Motivo parada	P. de validación
Entrenam.	Nº iteraciones	58
	MSE	0.403
Análisis	Valor-R ($\Delta\beta$)	0.927
Post-Entrenam.	Valor-R (R_f)	0.537
	Valor-R (Z)	0.825

Tabla 5.3 Valores de los parámetros de entrenamiento, de los resultados y del análisis post-entrenamiento de la arquitectura 7-1-3

El análisis post-entrenamiento continúa demostrando que la red entrena bien el ángulo de recuperación ($\Delta\beta$), sigue sin modelar bien el radio final de doblado (R_f) y en menor medida la penetración del punzón (Z), Figura 5.20.

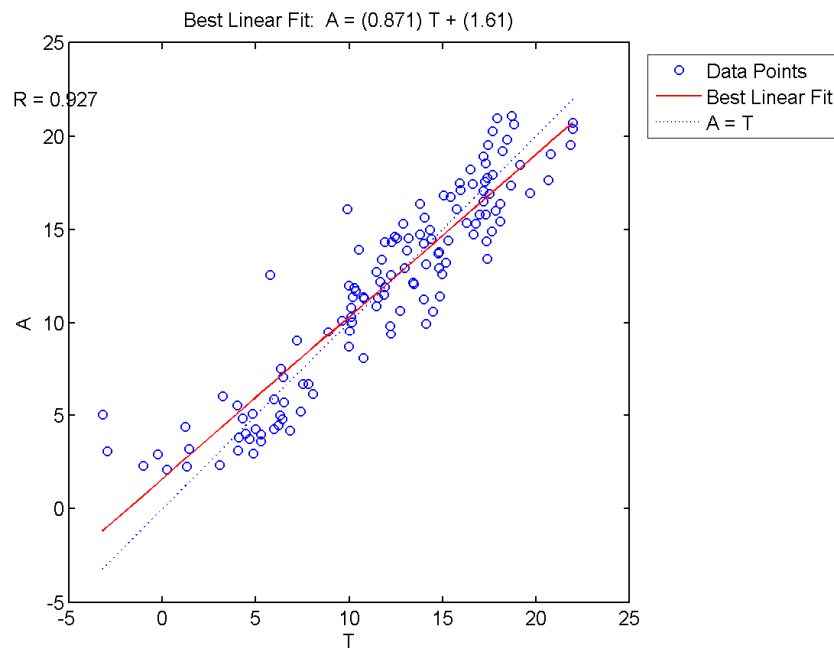


Figura 5.19 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Materiales, Acero Inoxidable y Aluminio. Arquitectura, 7-1-3. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

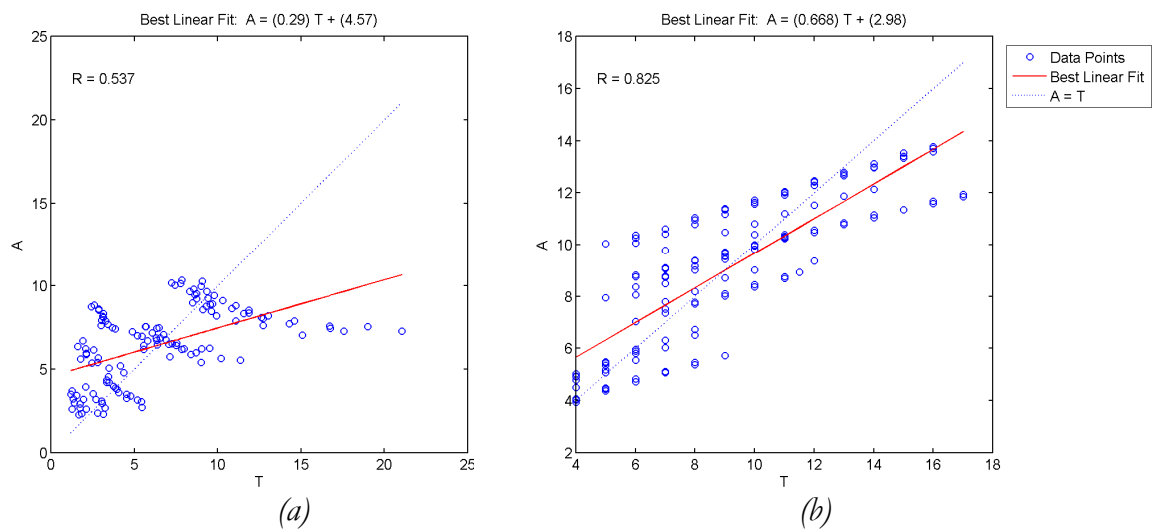


Figura 5.20 Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable (a) R_f y (b) Z . Materiales, Acero Inoxidable y Aluminio. Arquitectura, 7-1-3. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

El mal comportamiento de modelado de las dos variables (radio final de doblado y penetración de punzón) ha llevado a redefinir la arquitectura de red neural que inicialmente se había propuesto.

5.5.3 Red neural adoptada

El cambio consiste en separar cada variable, de manera que cada variable sea modelada por una red neural independiente, lo que se traduce a pasar de una configuración 7-1-3 a tres configuraciones 7-1-1, Figura 5.21.

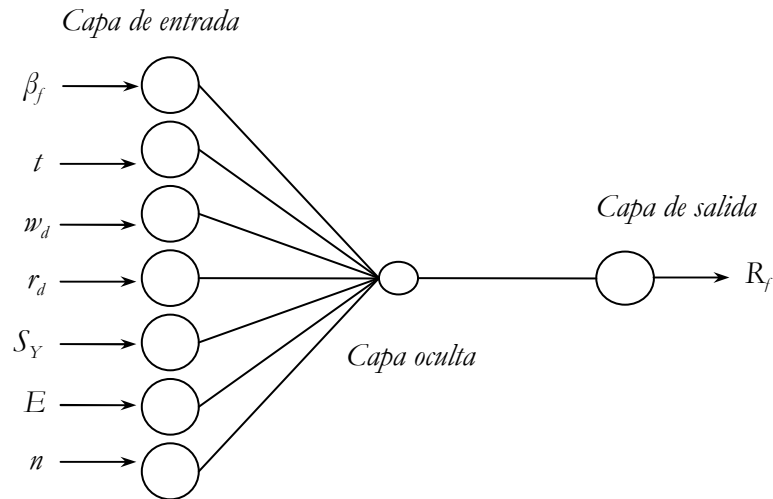


Figura 5.21 Red de arquitectura 7-1-1, caracterizada para la salida de radio final de doblado

Antes de entrenar esta nueva configuración de red, se sigue la misma estrategia que se había definido con anterioridad. Se probarán tres redes más sencillas (4-1-1) sin introducir las características del material, lo que se traduce, esta vez, en entrenar seis redes diferentes, tres para cada material en función de la salida escogida.

Al igual que en la última configuración obtenida, la 7-1-3, esta vez las redes se entrenan directamente con el algoritmo Levenberg–Marquardt.

a) Redes previas de arquitectura 4-1-1 en función de cada material ensayado

Algoritmo	Levenberg -Marquardt			Levenberg -Marquardt		
Material	Acero Inoxidable			Aluminio		
Arquitectura	4-1-1			4-1-1		
Error	8%			13%		
μ	0.01			0.01		
Obj. ejecución	0.1			0.1		
Neurona Salida	$\Delta\beta$	R_f	Z	$\Delta\beta$	R_f	Z
Motivo parada	Objetivo	Objetivo	Objetivo	Objetivo	Objetivo	Validación
Nº iteraciones	15	24	5	8	10	5
MSE	0.096	0.083	0.047	0.099	0.094	0.019
Valor -R	0.945	0.964	0.982	0.937	0.944	0.991

Tabla 5.4 Comparativa entre las arquitecturas 4-1-1, en función del material y de las salidas.

Como se observa, los resultados obtenidos con la alternativa de separación de las neuronas de salida son mucho mejor en ambos casos, tanto para el acero inoxidable como para el

aluminio. Basta con consultar la Tabla 5.4 en la que a modo de resumen se presentan los resultados obtenidos.

Los resultados gráficos del análisis post-entrenamiento (de la Figura 5.22 a la Figura 5.28) permiten observar a simple vista, la mejora del cambio de tendencia para la variable radio de doblado final (R_f) y la mejora también en el caso de la penetración se punzón (Z). La red para la salida (R_f), con estas nuevas condiciones es capaz de seguir razonablemente mejor los valores deseados que en las arquitecturas 4-1-3 y 7-1-3.

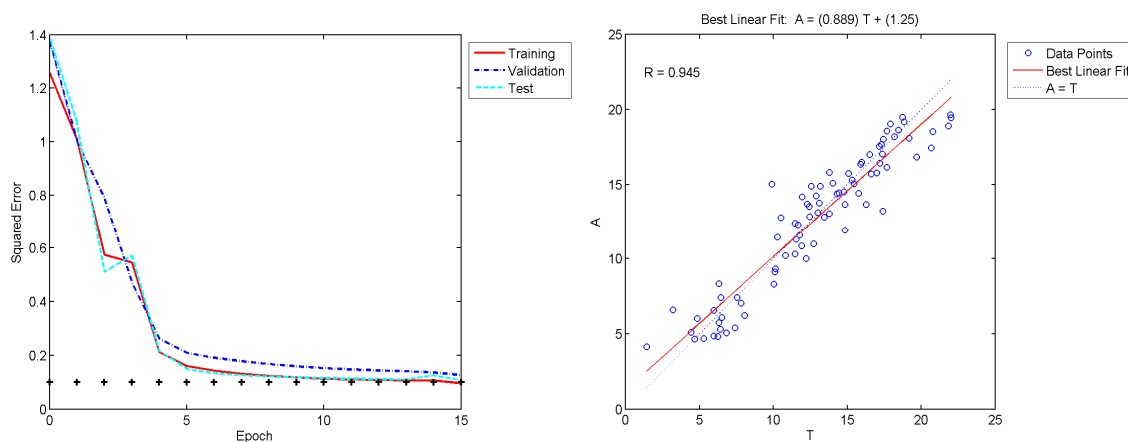


Figura 5.22 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Material, Acero Inoxidable. Arquitectura, 4-1-1. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

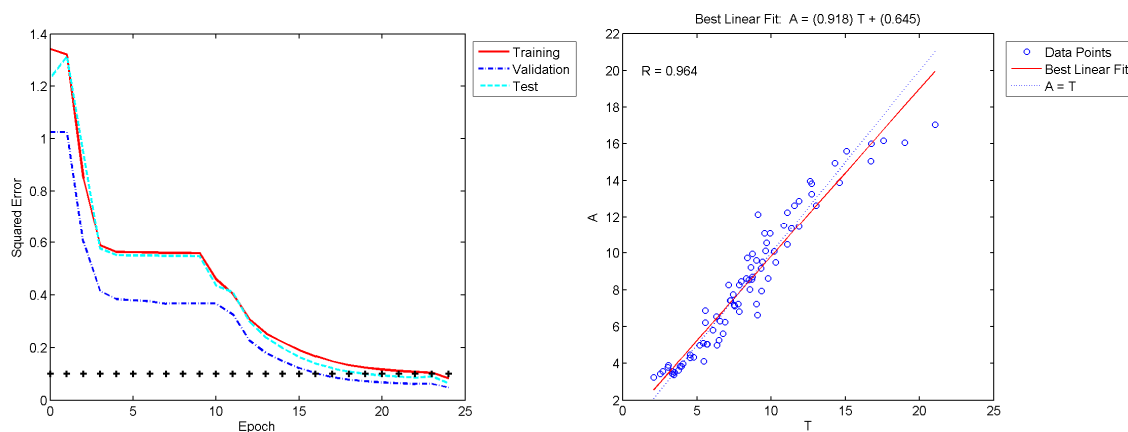


Figura 5.23 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable R_f . Material, Acero Inoxidable. Arquitectura, 4-1-1. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

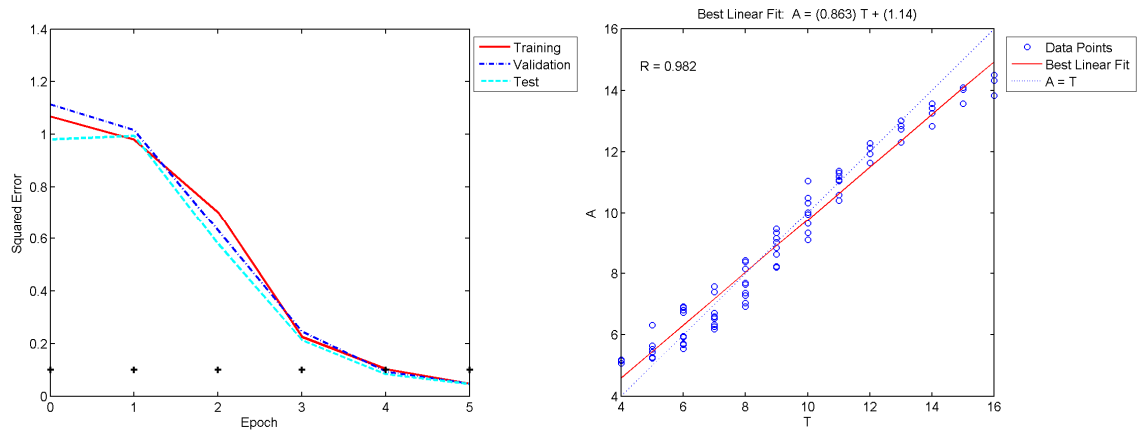


Figura 5.24 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable Z . Material, Acero Inoxidable. Arquitectura, 4-1-1. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

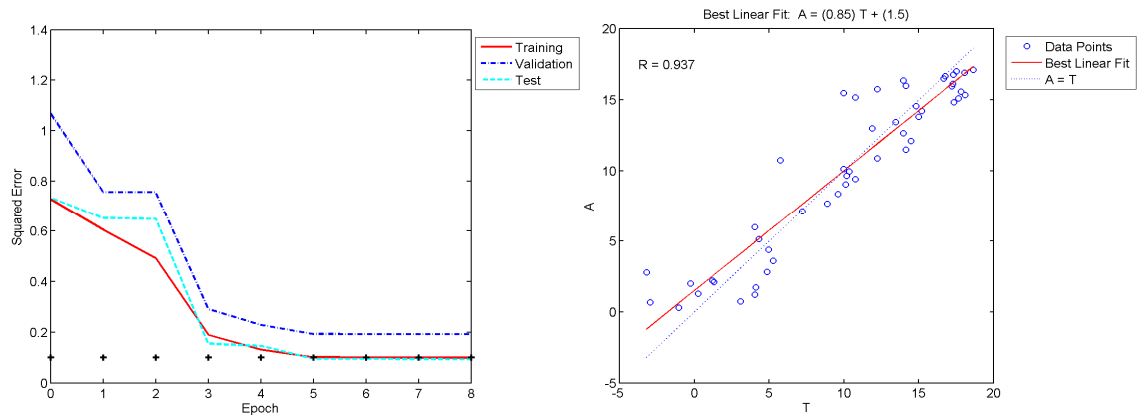


Figura 5.25 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Material, Aluminio. Arquitectura, 4-1-1. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

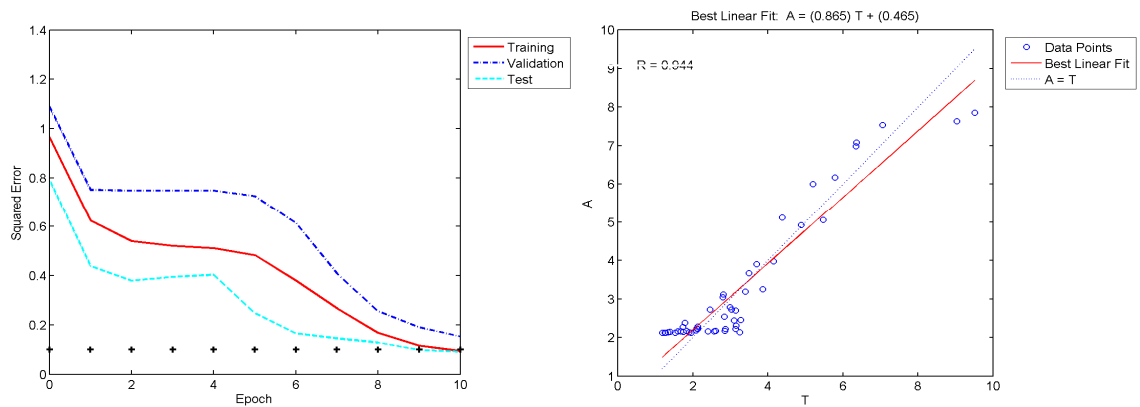


Figura 5.26 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable R_f . Material, Aluminio. Arquitectura, 4-1-1. Algoritmo, Levenberg–Marquardt

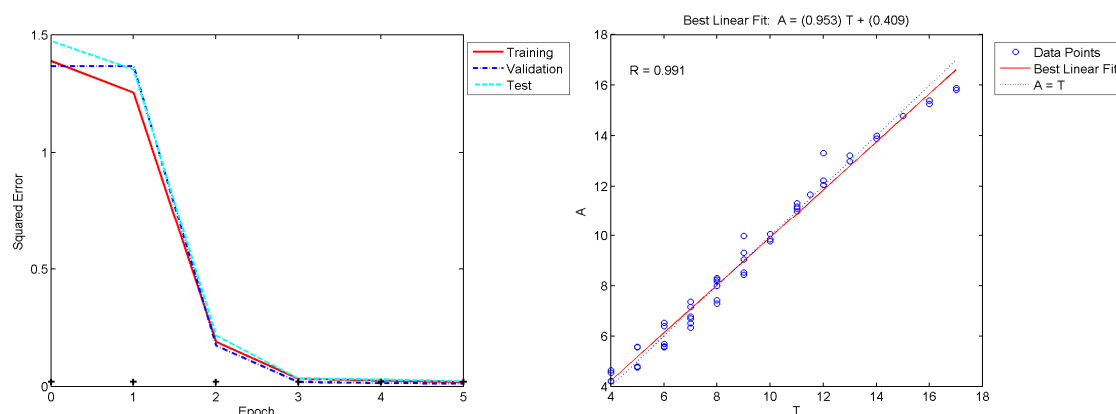


Figura 5.27 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable Z . Material, Aluminio. Arquitectura, 4-1-1. Algoritmo, Levenberg-Marquardt

b) Redes entrenadas, arquitecturas 7-1-1

La estructura de lo que se ha considerado la red entrenada definitiva corresponde a tres estructuras como la que se presenta en la Figura 5.28.

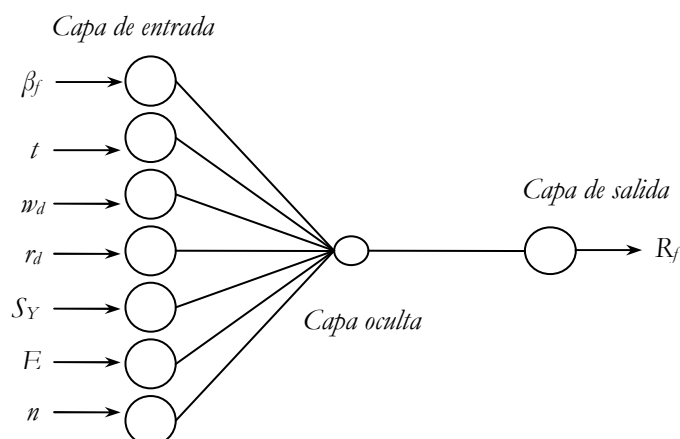


Figura 5.28 Red de arquitectura 7-1-1, caracterizada para la salida de radio final de doblado

Después de haber entrenado las diferentes redes, se está en condiciones de elegir la que mejor ha aprendido. Se elige la red que después de varias iteraciones ha presentado el valor de MSE menor. Guardando para cada una de ellas, como ya se ha comentado, la configuración de pesos y biases, más los datos necesarios para el pre- y post-procesado necesario para las futuras nuevas entradas.

El análisis post-entrenamiento resultante se expone en la Tabla 5.5. Con esta configuración se ha disminuido el objetivo de ejecución, en dos de los casos ese objetivo ha sido alcanzado completamente. Mientras para la recuperación se obtiene una parada temprana de validación.

En cuanto a los resultados gráficos obtenidos, seguidamente se presentan (de la Figura 5.29 a la Figura 5.31) la evolución del error MSE de los tres conjuntos de datos y el resultado de la regresión obtenida en el análisis post-entrenamiento en cada una de las redes en función de cada variable.

Algoritmo	Levenberg -Marquardt		
Material	Acero Inoxidable y Aluminio		
Arquitectura	7-1-1		
Error	5%		
μ	1		
Obj. ejecución	0.05		
Neurona Salida	$\Delta\beta$	R_f	Z
Motivo parada	P. de validación	Alcanzado objetivo de ejecución	Alcanzado objetivo de ejecución
Nº iteraciones	89	12	5
MSE	0.135	0.049	0.023
Valor -R	0.933	0.978	0.988

Tabla 5.5 Parámetros de entrenamiento y resultados de la arquitectura 7-1-1 para cada salida

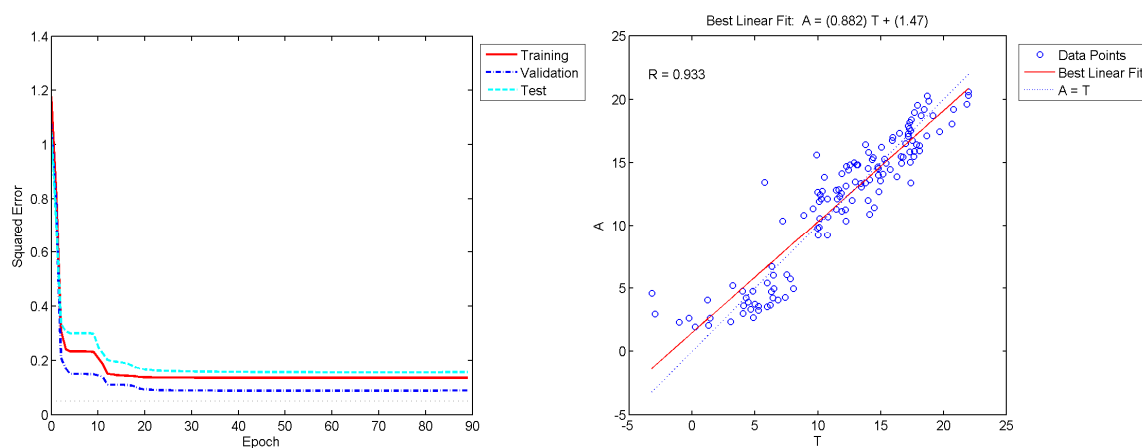


Figura 5.29 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable $\Delta\beta$. Materiales, Acero inoxidable y Aluminio. Arquitectura, 7-1-1. Algoritmo, Levenberg-Marquardt.

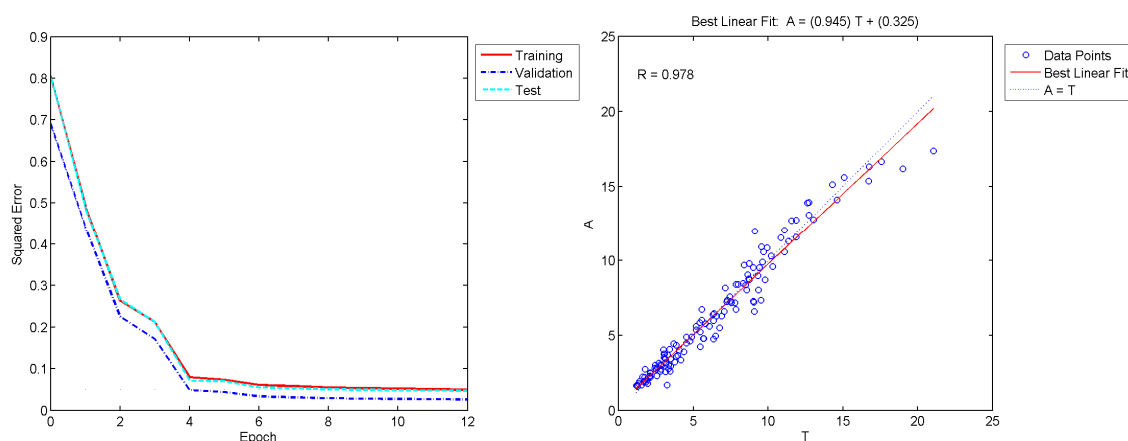


Figura 5.30 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable R_f . Materiales, Acero inoxidable y Aluminio. Arquitectura, 7-1-1. Algoritmo, Levenberg–Marquardt.

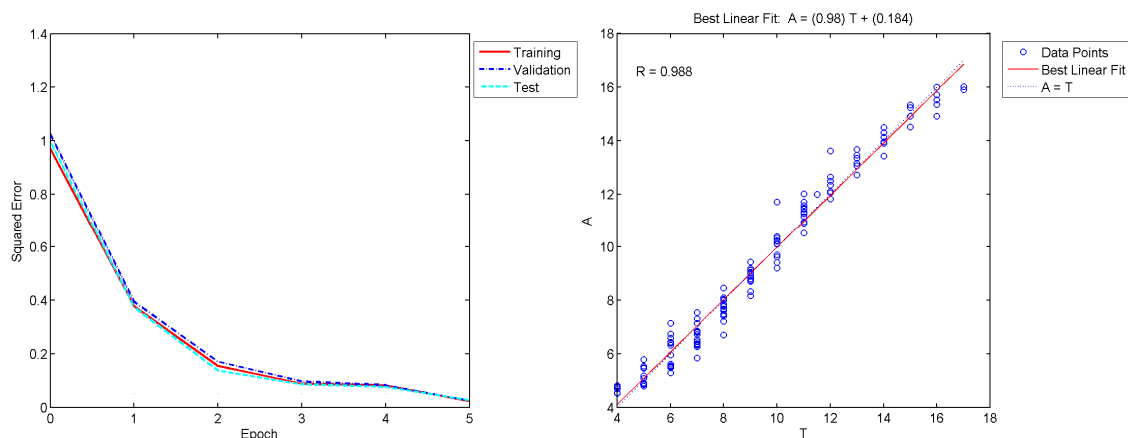


Figura 5.31 Izquierda: Evolución del error MSE . Derecha: Resultado del análisis post-entrenamiento de la variable Z . Materiales, Acero inoxidable y Aluminio. Arquitectura, 7-1-1. Algoritmo, Levenberg–Marquardt.

5.6 Presentación de resultados de los modelos

Las últimas redes presentadas (arquitectura 7-1-1 para ambos materiales) al estar ya entrenadas formaran parte de los que será el modelo de predicción. Este modelo debe encarar las predicciones de las variables objetivo, es decir, recuperación, radio final de doblado y penetración de punzón.

Para cada red, se han guardado los pesos y biases que la caracterizarán, además de aquellos valores necesarios para pre- y post-procesar los nuevos datos. Con todo ello, se construye un algoritmo, según la Figura 5.32, para cada variable, de manera que se está en condiciones de entrar parámetros que la red no ha visto nunca y realizar así una validación de las predicciones que la red efectúa.

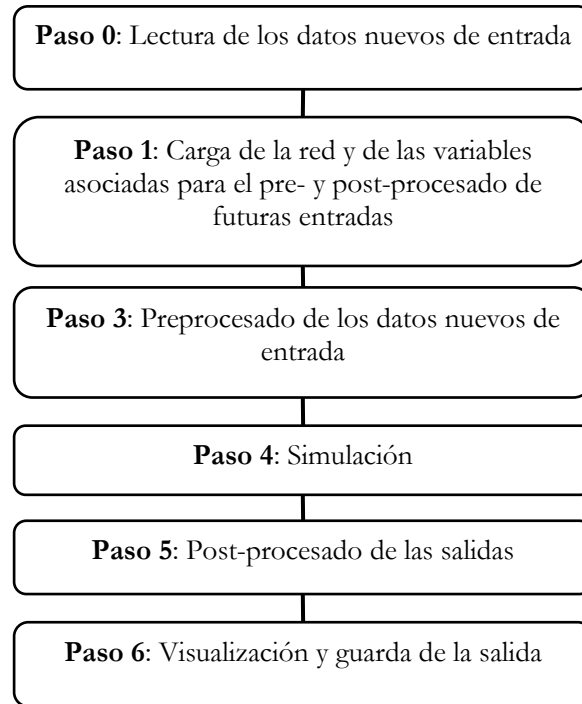


Figura 5.32 Esquema del modelo de predicción

Las entradas correspondientes a los datos de validación se pueden ver en la siguiente Tabla 5.6. Recordemos que en la Tabla 5.1 se especificaba unos valores entre paréntesis que correspondían al número de patrones que se guardaban para la validación. El número indicado para el acero inoxidable era de 5 patrones, y el del aluminio 3, como puede observarse en la siguiente Tabla 5.6.

Material	Espécimen	βf_imagen	t	wd	rd	E (GPa)	$Y_{0.2}$ (MPa)	n
Acero Inoxidable	spk7_t1w50_ai	28.500	1.0	50.0	2.0	215.412	311.624	0.419
	spk8_t3w50_ai	36.857	3.0	50.0	2.0	203.189	326.931	0.3
	spk6_t15w35_ai	37.347	1.5	35.0	2.0	224.392	292.531	0.428
	spk4_t2w22_ai	38.305	2.0	22.0	0.5	214.236	292.729	0.435
	spk5_t15w16_ai	74.423	1.5	16.0	0.5	224.392	292.531	0.428
Aluminio	spk15_t1w50_al	62.728	1.00	50.0	2.0	47.755	92.412	0.05
	spk10_t135w50_al	45.904	1.35	50.0	2.0	46.05	83.371	0.047
	spk6_t1w35_al	39.720	1.00	35.0	2.0	47.755	92.412	0.05

Tabla 5.6 Entradas de validación para las redes neurales escogidas como modelos de predicción

Como se presenta a continuación, se puede comprobar que los resultados de la validación pueden considerarse cercanos a los valores reales, por lo que se confirma la idoneidad de las redes escogidas para montar el núcleo del modelo de predicción que es objetivo de esta parte del trabajo.

5.6.1 Predicción de la recuperación

Las salidas de predicción operadas por el modelo se observan en la Tabla 5.7. Obsérvese que la primera columna son los valores reales de experimentación. En esta fase de prueba los valores de predicción se comparan con valores reales obtenidos en ensayos de doblado. También se han presentado los valores de la validación de las redes de arquitectura 4-1-1, aunque, se insiste que únicamente se implementa como núcleo del modelo es la 7-1-1.

Material	Experimentación $\beta_c - \beta_f (^\circ)$	Modelo de red neural. Predicción $\beta_c - \beta_f (^\circ)$		
		7_1_1	4_1_1	4_1_1
Acero Inoxidable	16.425	16.1548	-	15.1270
	13.053	13.6494	-	12.2755
	10.468	11.5911	-	10.2238
	4.632	2.6481	-	4.1394
	4.451	4.6045	-	5.7392
Aluminio	17.566	16.2861	15.7445	-
	14.462	14.2062	16.1924	-
	9.029	9.2772	6.3636	-

Tabla 5.7 Tabla comparativa entre los resultados experimentales y las predicciones de red neural con diferentes arquitecturas para la recuperación

Se considera que la calidad de la predicción es buena, pues se acerca a los valores reales. También se puede observar gráficamente que los resultados están cerca de la línea que marca la igualdad entre los resultados reales y la red neural, Figura 5.33.

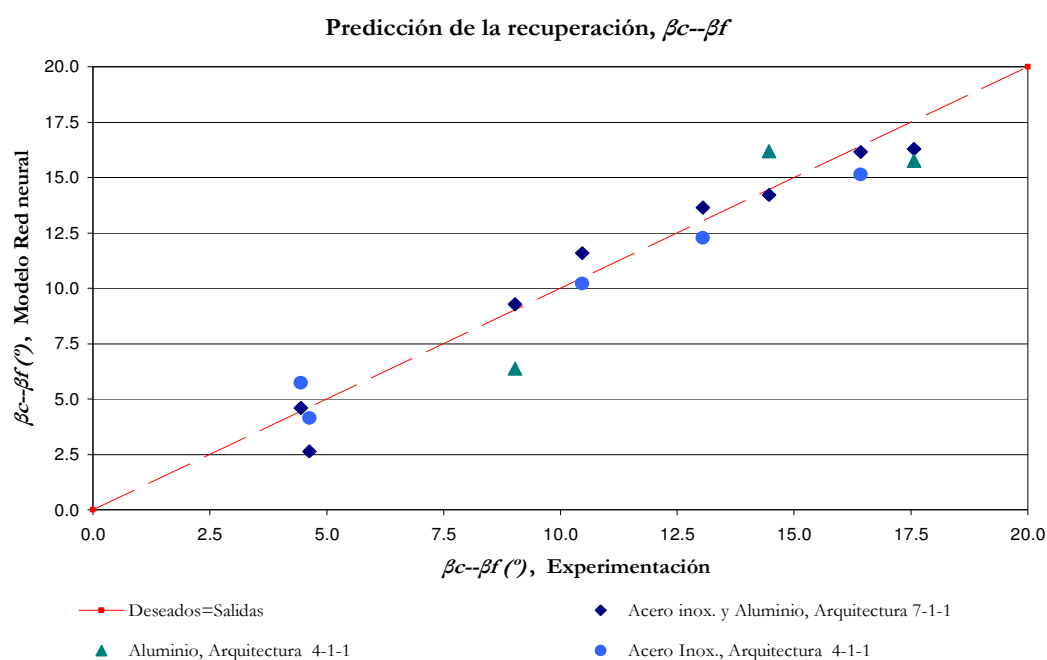


Figura 5.33 Gráfico de los resultados experimentales y las predicciones de red neural con diferentes arquitecturas para la recuperación

5.6.2 Predicción del radio final de doblado

A continuación se presentan en el mismo formato que para la recuperación, los resultados de validación para las predicciones del radio final de doblado, en la Tabla 5.8 y a continuación en la Figura 5.33.

En este caso se observa un ajuste menor que en el caso de la recuperación.

Material	Experimentación $R_f(\text{mm})$	Modelo de red neural. Predicción $R_f(\text{mm})$		
		7_1_1	4_1_1	4_1_1
Acero Inoxidable	13.983	15.0194	-	15.0246
	13.804	14.3727	-	14.4905
	8.768	9.9539	-	9.8046
	5.907	6.7437	-	5.6461
	2.505	2.7060	-	3.4023
Aluminio	2.605	3.2875	2.3243	-
	4.415	4.7507	3.9857	-
	3.215	3.8262	5.5969	-

Tabla 5.8 Tabla comparativa entre los resultados experimentales y las predicciones de red neural con diferentes arquitecturas para el radio final de doblado

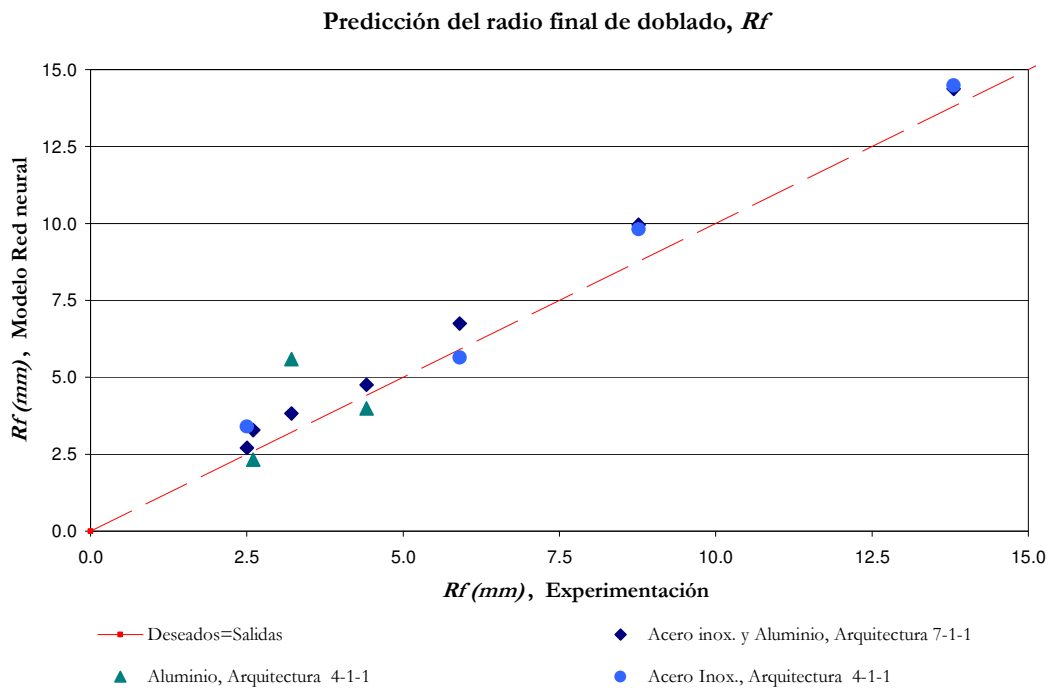


Figura 5.34 Gráfico de los resultados experimentales y las predicciones de red neural con diferentes arquitecturas para el radio final de doblado

5.6.3 Predicción de la penetración del punzón

A continuación se presentan los resultados de validación para las predicciones de la penetración del punzón, siguiendo el mismo esquema que para las dos variables anteriores, en la Tabla 5.9 y a continuación en la Figura 5.34.

Se observa un buen ajuste entre el modelo y los resultados experimentales utilizados como prueba del modelo.

Material	Experimentación Z (mm)	Modelo de red neural. Predicción Z (mm)		
		7_1_1	4_1_1	4_1_1
Acero Inoxidable	7.000	6.9830	-	7.4300
	8.000	7.6704	-	8.1753
	6.000	5.6366	-	5.9715
	4.000	4.4122	-	5.0101
	5.000	5.7618	-	5.7942
Aluminio	15.000	14.5440	14.4549	-
	10.000	10.4822	10.3666	-
	6.000	6.0026	5.6329	-

Tabla 5.9 Tabla comparativa entre los resultados experimentales y las predicciones de red neural con diferentes arquitecturas para la penetración del punzón

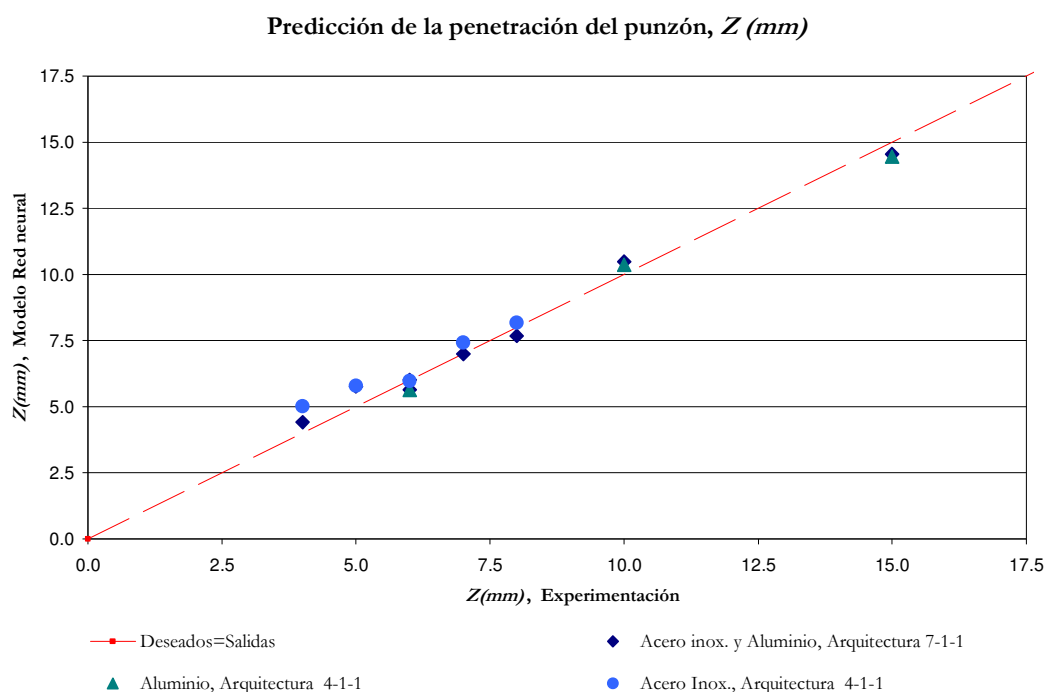


Figura 5.35 Gráfico de los resultados experimentales y las predicciones de red neural con diferentes arquitecturas para la penetración del punzón

5.7 Modelo de predicción

El modelo de predicción del proceso de conformado del doblado al aire está basado en las redes neurales elegidas en el paso 7 del algoritmo de la Figura 5.5 y validadas y probadas en el apartado 5.6.

Mediante las estructuras anteriores se construye el modelo total de predicción para el doblado al aire, cuyo esquema general aparece en la siguiente Figura 5.36. Este modelo permite a través de unos valores de entrada conocidos por el usuario hacer una rápida predicción de cual va ser el radio mínimo final de la pieza, el valor de recuperación del ángulo de doblado y el desplazamiento que debe darse al punzón para conseguir la geometría de la pieza deseada.

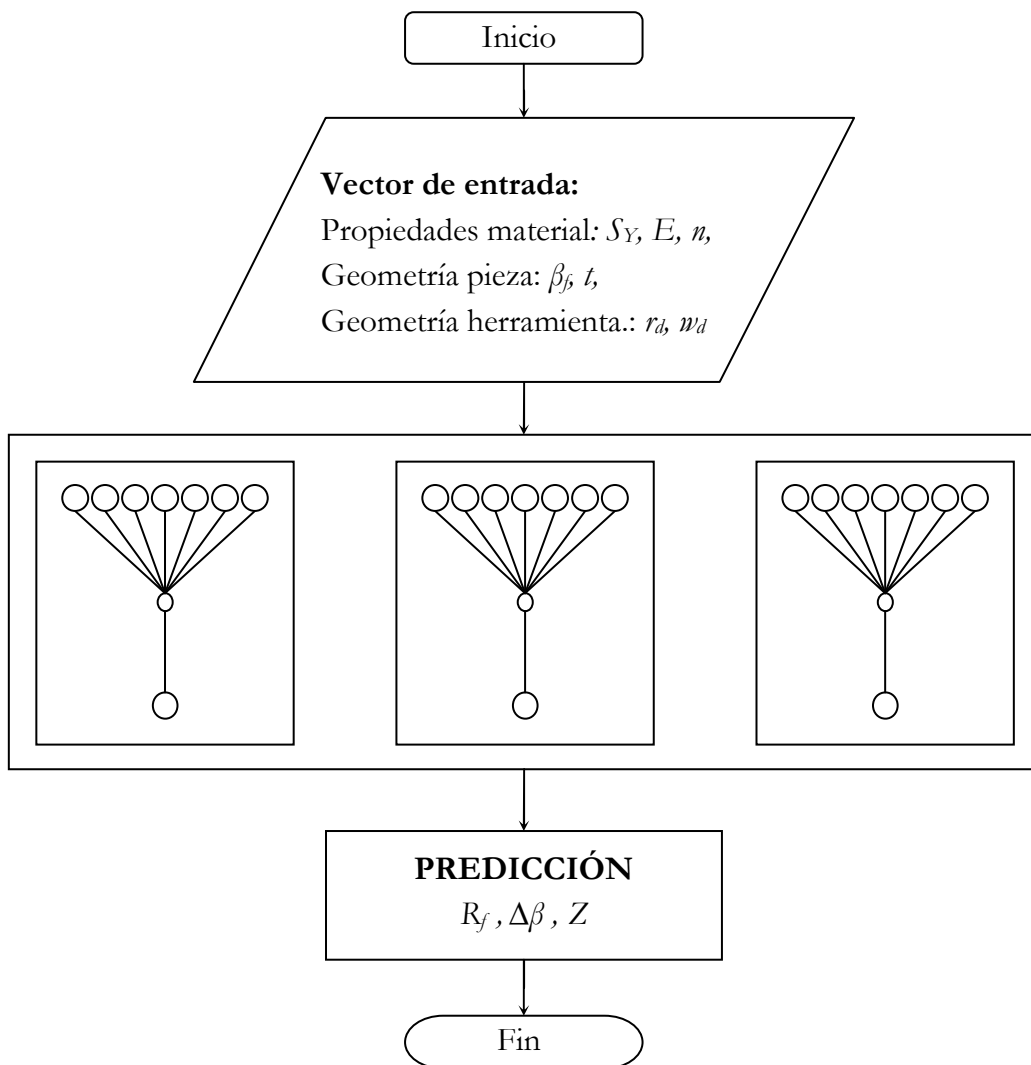


Figura 5.36 Esquema del modelo de predicción desarrollado en este trabajo.

El esquema de la implementación final, repite el que se ha presentado para la validación y que se presenta a continuación la Figura 5.37, pues la validación equivale al funcionamiento normal de una red neural una vez entrenada. El modelo a través de una correcta interfaz de usuario proporciona la predicción de los parámetros del proceso de

conformado del doblado al aire. Esta implementación también se ha desarrollado utilizando MATLAB®.

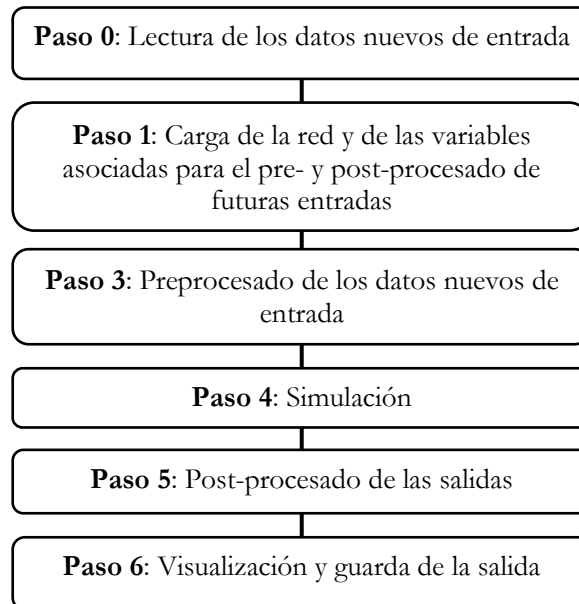


Figura 5.37 Esquema del modelo de predicción

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos Futuros

La vida es el arte de sacar conclusiones suficientes a partir de datos insuficientes

Samuel Butler

6.1 Introducción

La obtención tradicional de los valores que representan la geometría final de una pieza doblada al aire así como el del parámetro ejecutor del proceso (la penetración del punzón) suele realizarse mediante procedimientos de prueba y error. Este proceso de tanteo depende de la experiencia y del conocimiento concreto que se tenga del proceso de fabricación. Esta metodología generalmente es costosa y consume mucho tiempo.

En esta tesis se fijó como objetivo final desarrollar una herramienta que asistiera a la predicción de la forma final de una pieza doblada al aire y de la cantidad de recuperación que esta pieza experimenta. El modelo de predicción desarrollado pretende sustituir la necesidad de tener una amplia experiencia en el proceso de conformación. Sin llegar a ser un sistema complejo y de gran precisión, el modelo permite obtener una primera solución de una forma rápida y fiable. Esta primera aproximación permite definir los parámetros de partida del proceso de doblado al aire para realizar a continuación diferentes tentativas (numéricas o experimentales) de prueba y error hasta llegar a la solución final del problema. Por lo tanto, la herramienta *CAE* presentada aquí, basada en evidencias obtenidas directamente de la experimentación, permite reducir el tiempo y el coste del desarrollo de procesos del doblado al aire de chapa.

La predicción de la forma final de la pieza doblada se ha caracterizado mediante la recuperación del ángulo de doblado, el valor del radio final en la zona de doblado y la obtención del parámetro ejecutor, la penetración del punzón. Mediante un estudio pormenorizado del proceso de doblado y de la recuperación, se han escogido siete parámetros de partida relacionados con el comportamiento del material, la geometría de la herramienta y con la geometría de la pieza a obtener. Estos parámetros ejercen de

predictores para poder cuantificar mediante el modelo de cálculo los valores de las variables que se quieren predecir, es decir, la recuperación, el radio final de doblado y la penetración del punzón.

El modelo de cálculo desarrollado se convierte en el núcleo de lo que en el apartado 1.2 Motivación de la tesis se llamó “la caja negra” de *Budiansky* adaptada a la problemática relacionada con la determinación de la geometría de una pieza doblada al aire. Las conclusiones extraídas durante el proceso de elaboración del modelo de predicción se describen a continuación en este capítulo.

6.2 Conclusiones

Los contenidos expuestos a lo largo de este trabajo permiten afirmar que las tareas de estudio definidas para conseguir el objetivo planteado se han cumplido. La justificación de ello se expone a continuación.

Se ha realizado una revisión detallada del funcionamiento del proceso de doblado al aire y una revisión histórica de los modelos desarrollados para este proceso hasta la actualidad. También se ha realizado una revisión exhaustiva de las definiciones y de los modelos del fenómeno de la recuperación. Comprobando que la definición de la recuperación y la creación de modelos que la cuantifiquen está estrechamente ligada al modelado del proceso de doblado que se está estudiando, en este caso, el de doblado al aire. Esta relación es tan estrecha que se comprueba que no existen fronteras claras entre los modelos que describen el proceso de doblado al aire y el fenómeno de la recuperación, pues muchas veces este último se incluye en el modelo del propio proceso de doblado. En ambos casos, el estudio en detalle de los modelos ha permitido probarlos y confrontarlos entre ellos, observando que los modelos analíticos desarrollados no cumplen con las expectativas de precisión requerida o con la facilidad de uso esperada si tienen que ser utilizadas por ingenieros de diseño o de proceso para la fabricación de una pieza doblada al aire.

En el transcurso del trabajo se ha definido un conjunto de ensayos con el objetivo de caracterizar el proceso del doblado al aire y disponer de datos lo más parecidos posibles a los del proceso industrial. Para la realización de esta fase experimental se ha requerido el diseño del herramental, su adaptación a la máquina de ensayos y la obtención de los datos experimentales. Se ha optado por la experimentación en vez de simulaciones por el carácter fehaciente que la experimentación comporta.

El análisis de los resultados experimentales ha llevado al desarrollo de una técnica de análisis de imágenes digitales de zonas dobladas novedosa en este campo de aplicación, que permite cuantificar de forma automatizada el ángulo final de doblado, el radio final de doblado en el punto de contacto punzón-matriz, así como la ecuación de curvatura no constante que se ajusta a la zona deformada. El uso de esta técnica parece adecuado por la presencia actualmente masiva que tiene la digitalización de piezas en cualquier ámbito y puede adaptarse fácilmente a otros usos.

A partir de este análisis teórico y experimental del doblado al aire se ha desarrollado un modelo de predicción basado en red neural que permite predecir con una precisión elevada tres parámetros básicos relacionados con la obtención de la pieza final: el radio final de doblado, la recuperación de la chapa y la penetración del punzón para la ejecución del proceso.

Desde un punto de vista particular, pasamos a establecer las aportaciones y las conclusiones relacionadas con dos de los aspectos claves desarrollados en esta tesis: la experimentación y el modelo de predicción.

La realización de la experimentación tiene como objetivo obtener piezas dobladas al aire. De ellas se debe obtener los valores de los parámetros que durante el estudio en detalle del proceso se han definido como importantes para posteriores análisis y desarrollo del modelo. La adquisición de determinados parámetros, concretamente el ángulo en carga, obligó a diseñar un método nuevo que permitiera obtener su valor. Este método novedoso fue el resultado de valorar diferentes alternativas y consiste en el uso de un transductor de desplazamiento vertical y de una relación trigonométrica que no había sido usado en estudios anteriores relacionados con el ángulo de doblado en carga.

En cuanto a los materiales utilizados para la obtención de piezas dobladas durante la experimentación se puede observar que con el aluminio se pueden obtener radios finales de doblado inferiores para las mismas condiciones de partida de ángulo de doblado y unas determinadas condiciones de herramental. El hecho de haber trabajado con dos materiales de comportamiento elástico tan diferente ha permitido comprobar diferencias notables durante la ejecución del proceso de doblado así como en la obtención de la geometría final de la pieza. Este comportamiento coincide con la literatura relacionada en este campo de aplicación.

En el análisis de las piezas dobladas o más concretamente en el análisis de su geometría aparece la otra técnica desarrollada en el transcurso de este trabajo. Esta técnica se utiliza para realizar la medición del radio final de doblado y de su curvatura, además del ángulo de doblado final. La técnica consiste en captar digitalmente el perfil doblado de la pieza, para que sobre ella se puedan realizar las mediciones de las variables anteriores mediante el ajuste de curvas polinómicas que definirán su curvatura. Esta técnica ha permitido reafirmar que el modelo rígido-plástico es una aproximación muy sencilla de la geometría final de la pieza doblada, y además, que los modelos que enfocan la definición de la zona doblada como una zona de curvatura no constante son los que más se ajustan a la realidad.

Una vez efectuadas las mediciones sobre las piezas dobladas y realizado el análisis de las diferentes relaciones entre las variables críticas del proceso de doblado al aire y las variables de la recuperación, previamente definidas durante la revisión del estado del arte, se pueden presentar las principales aportaciones obtenidas de la experimentación efectuada en este estudio:

- La primera está relacionada con la consecución de nuevos diagramas que relacionan y cuantifican la recuperación para el proceso de doblado al aire para ángulos entre 22° y 90° . Alguno de estos, por ejemplo el diagrama que relaciona la recuperación versus ángulo de doblado final, es una relación ya estudiada en otros trabajos. Este tipo de diagramas habitualmente se encuentran para procesos de doblado a fondo más que para procesos de doblado al aire. Se detecta que todavía se cita habitualmente, incluso en la literatura más reciente, un único diagrama obtenido hace más de 35 años. En cambio, otros diagramas, como el que relaciona la recuperación versus el radio final de doblado al aire, presentan un análisis novedoso que no se ha encontrado en otros trabajos precedentes. Por otro lado, es habitual encontrar únicamente tablas para ángulos únicamente de 90° extensibles a otros ángulos mediante interpolación, por lo que la obtención real de ángulos de doblado diferente a 90° se considera un logro importante.
- La segunda aportación está relacionada con la constatación de la mayoría de las influencias teóricas que existen sobre la recuperación. No obstante, algunas de las relaciones documentadas en otros estudios, las relacionadas con los parámetros de caracterización del material para los dos materiales ensayados en este trabajo (el acero inoxidable y el aluminio), no coinciden con las evidencias experimentales

obtenidas en este trabajo. Significa por lo tanto, que determinadas generalizaciones sobre la recuperación, principalmente si están relacionadas con el comportamiento del material, deben ser revisadas o estar comprobadas mediante la experimentación.

En lo que se refiere al modelo de predicción desarrollado y desde el punto de vista de la arquitectura de la red neural definida, se destaca la introducción de la variable radio final de doblado (R_f) como salida de predicción del modelo. Como ya se ha comentado, la cuantificación y predicción de esta variable es tratada por un número menor de investigadores si se compara con los estudios y modelos de predicción y control desarrollados para la predicción del valor de la recuperación así como el de la penetración del punzón, que son las otras dos variables de salida que componen el modelo de predicción. Si en un modelo de predicción basado en red neural son importantes las salidas, también lo son las entradas. Las variables de entrada se escogen de entre los parámetros estudiados mediante el análisis de la experimentación realizada en esta tesis y consultando la literatura de referencia que está centrada en la predicción mediante red neural en un proceso de doblado al aire. Estas variables son comunes para el modelo de predicción que está formado por tres arquitecturas 7-1-1, particularizadas para cada salida definida como objetivo de predicción. Los errores obtenidos durante las etapas de entrenamiento y de validación (con datos no vistos anteriormente por las redes definitivas) para cada una de las tres redes que lo conforman, permiten afirmar que el modelo desarrollado generaliza correctamente la realidad del proceso de doblado al aire y que por lo tanto las salidas obtenidas tienen un nivel de precisión aceptable.

Desde el punto de vista de la función que debe desempeñar el modelo de predicción presentado en este trabajo ha de recordarse que se trata de una primera aproximación durante el diseño de la pieza de doblado y del proceso de doblado. El modelo puede ser utilizado como paso previo a una simulación con elementos finitos, pues permite reducir el número de iteraciones antes de encontrar la solución definitiva o como paso previo a la elaboración de un prototipo. En ambos casos esta técnica de predicción permite disminuir el tiempo dedicado a los ensayos de prueba y error.

En resumen, los aspectos originales e innovadores de la tesis en relación con otros trabajos realizados en el proceso de doblado al aire se contemplan en los siguientes puntos:

- Un método de medición nuevo para cuantificar el valor del ángulo de doblado en carga en el proceso de doblado al aire.
- Un método de medición novedoso e innovador para cuantificar el valor del radio de doblado final mediante la adquisición de imágenes digitales.
- Definición de la zona de curvatura de una chapa doblada mediante el ajuste de una función polinómica al perfil doblado.
- Un modelo de predicción basado en red neural de la variable de radio final de doblado, además de la predicción del valor de la recuperación y del valor de la penetración del punzón.

Por todo lo expuesto hasta este momento, se puede afirmar que habiendo evaluado los modelos teóricos del proceso de doblado al aire y habiendo efectuado un análisis en detalle de la experimentación de proceso de doblado al aire, se ha definido y diseñado una herramienta de predicción. Una ventaja que puede obtenerse del modelo de predicción propuesto en esta tesis es la facilidad de implementación de las redes neurales (núcleo del modelo de predicción definido) en un software. El carácter matemático de las redes permite una sencilla integración en un software que después de una buena validación podría convertirse en una herramienta de asistencia al diseño de la pieza final y del proceso de doblado.

6.3 Trabajos futuros

Para finalizar el trabajo, una vez se han valorado y expuesto todas las aportaciones, se presentan un conjunto de propuestas para establecer futuros enfoques o trabajos. Se han diferenciado entre acciones relacionadas directamente sobre el trabajo desarrollado y las líneas de investigación que pueden engendrarse a partir de la tesis realizada.

En cuanto a las acciones que recaen sobre los resultados obtenidos se consideran:

1. La implementación del conjunto de las tres redes neurales en un único modelo de predicción mediante una interficie de usuario adecuada. Esto debe permitir introducir la información y acceder al resultado de la predicción de una manera rápida y sencilla. De manera que el resultado sea un programa de ejecución sencilla y buena monitorización desde cualquier tipo ordenador sin necesidad que su usuario necesite una formación específica.
2. La ampliación de la experimentación en los materiales ensayados para mejorar la precisión del modelo de predicción. Existe una relación muy importante entre el número de patrones disponibles para realizar el entrenamiento de la red neural y la precisión que se obtiene en el modelo basado en ella.
3. La ampliación del rango de materiales utilizado para poder ampliar la herramienta de predicción. En consecuencia, realizar también la experimentación previa, necesaria para ello. Aunque el programa inicial de ensayos se ha realizado con dos materiales con un comportamiento bastante distinto es importante ampliar el estudio y la base experimental utilizando materiales diferentes para llegar a relacionar sus parámetros característicos con el proceso de doblado.
4. El estudio en mayor detalle de las funciones polinómicas relacionadas con la zona curvada de la pieza doblada al aire. En el actual trabajo solo se ha tratado el radio mínimo obtenido a partir de estas funciones polinómicas. Ampliando su análisis se podrá predecir mejor la evolución de la curvatura en la geometría final de la pieza.
5. La comprobación de las ventajas en disminución de tiempo y coste que aporta el modelo de predicción en la práctica industrial real, ya sea usándolo como paso previo a una simulación *FEM*, ya sea para la elaboración de un prototipo o para la definición de la geometría de la pieza en una fase de diseño.

Las líneas de investigación derivadas y propuestas a partir de este trabajo son:

1. Extensión del estudio realizado a otros procesos de doblado donde la recuperación también es importante como son el doblado a fondo o doblado con dado deslizante, y la embutición.
2. Realizar un estudio y modelo de predicción para otros problemas en la fabricación de piezas dobladas como es por ejemplo el cálculo de la longitud inicial de la chapa desplegada y la recuperación negativa para otros procesos de doblado. Un modelo de predicción para el proceso de embutición debería de tener en cuenta también la aparición de arrugas o desgarros.
3. Ampliar y mejorar la relación entre la herramienta de predicción creada y su interacción durante la planificación de procesos de doblado al aire.
4. Elaborar un modelo de doblado al aire coherente, sencillo y preciso que permita también definir cuantificar el fenómeno de la recuperación. Habiendo estudiado los modelos de doblado al aire realizados hasta ahora se constata que muchos de ellos no son generalizables para ciertas configuraciones de doblado, como los experimentos de doblado poco severo realizados en este trabajo.

Capítulo 7

Referencias

El hombre silencioso no presta testimonio contra si mismo

Aldous Huxley

- Anokye-Siribor, K., & Singh, U. P. (2000). A new analytical model for pressbrake forming using in-process identification of material characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1-3), 103-112.
- ASTM. (1999). *ASTM E 8 M-99: Standard test methods for tension testing of metallic materials (metric)*ASTM.
- Banabic, D. et al. (2000). *Formability of metallic materials : Plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Berlin; New York: Springer.
- Beddoes, J. (1999). *Principles of metal manufacturing processes*. London: Arnold.
- Bui, Q. V., Papeleux, L., & Ponthot, J. P. (2004). Numerical simulation of springback using enhanced assumed strain elements. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, Pages 314-318.
- Cao, J., Kinsey, B. L., & Solla, S. A. (2000). Consistent and minimal springback using a stepped binder force trajectory and neural network control. *Journal of Engineering Materials and Technology. Transactions of the ASME*, 122(January), 113-118.
- Carden, W. D., Geng, L. M., Matlock, D. K., & Wagoner, R. H. (2002). Measurement of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(1), 79-101.
- Chandra, A. (1987). Real-time identification and control of springback in sheet metal. *Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME*, 109, 265-273.
- Chang, T. C., & Wysk, R. A. (1985). *An introduction to computer - aided process planning systems*. New Jersey: Prentice Hall.

- Chang, S. H., Shin, J. M., Heo, Y. M., & Seo, D. G. (2002). Springback characteristics of the tailor-welded strips in U-bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 14-19.
- Cho, J. R., Moon, S. J., Moon, Y. H., & Kang, S. S. (2003). Finite element investigation on spring-back characteristics in sheet metal U-bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(1), 109-116.
- Chou, I., & Hung, C. (1999). Finite element analysis and optimization on springback reduction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(3), 517-536.
- Committee under ASM direction. (1997). *Metals handbook-ASM handbook: Materials selection and design*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- Committee under ASM direction. (1988). *Metals handbook-ASM handbook: Forming and forging*. (9th ed.). Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- Corona, E. (2004). A simple analysis for bend-stretch forming of aluminum extrusions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(3), 433-448.
- Crandall, S. (1957). Discussion of Gardiner's paper. *Transactions of the ASME*, 79(1), 7-8.
- Dadras, P., & Majlessi, S. A. (1982). Plastic bending of work hardening materials. *Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME*, 104, 224-230.
- de Vin, L. J. (2001). Expecting the unexpected, a must for accurate brakeforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(1-2), 244-248.
- de Vin, L. J. (2000). Curvature prediction in air bending of metal sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1-3), 257-261.
- de Vin, L. J. (1994). Computer aided process planning for the bending of sheet metal components. (Doctoral dissertation, Universiteit Twente).
- de Vin, L. J., de Vries, J., & Streppel, T. (2000). Process planning for small batch manufacturing of sheet metal parts. *International Journal of Production Research*, 38(1), 4273-4283.
- de Vin, L. J., Streppel, A. H., Singh, U. P., & Kals, H. J. J. (1996). A process model for air bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 57(1-2), 48-54.
- de Vries, J. (1996). Integrated process planning for small batch manufacturing of sheet metal components. (Doctoral dissertation, University of Twente).
- DIN. (1975). In DIN (Ed.), *DIN 6935, kaltbiegen von flacherzeugnissen aus stahl. biegehalbmesser - kleinste schenkellänge - zulässige abweichungen der winkelstellungen - berechnung der gestreckten längen*. (Ed ed.). Alemania: Ed. Retrieved 1975, from 0
- Dunston, P. S., Ranjithan, S. R., & Bernold, L. E. (1996). Neural network model for the automated control of springback in rebars. *Expert, IEEE, [See also IEEE Intelligent Systems]*, 11(4), 45-49.

- El-Domiaty, A. A., & Elsharkawy, A. A. (1998). Stretch-bending analysis of U-section beams. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(1-2), 75-95.
- ElMaraghy, H. A. (1993). Evolution and future perspectives of CAPP. (keynote paper). *Annals of CIRP*, 42(2), 739-751.
- Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing. (2004). Retrieved December 15, 2004 from <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/html/stamping.html>
- Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F., & Micari, F. (1998). The evaluation of springback in 3D stamping and coining processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 108-112.
- Forcellese, A., Gabrielli, F., & Ruffini, R. (1998). Effect of the training set size on springback control by neural network in an air bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 493-500.
- Gantar, G., Pepelnjak, T., & Kuzman, K. (2002). Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 54-59.
- Gao, J. X., Tang, Y. S., & Sharma, R. (2000). A feature model editor and process planning system for sheet metal products. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1-3), 88-95.
- Gardiner, F. J. (1957). The springback of metals. *Transactions of the ASME*, 79(1), 1-9.
- Gau, J., & Kinzel, G. L. (2001). A new model for springback prediction in which the baushinger effect is considered. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(8), 1813-1832.
- Guo, Y. Q., Gati, W., Naceur, H., & Batoz, J. L. (2002). An efficient DKT rotation free shell element for springback simulation in sheet metal forming. *Computers & Structures*, 80(27-30), 2299-2312.
- Ham, I., & Lu, S. C. Y. (1988). Computer aided process planning: The present and the future. *Annals of the CIRP*, 37(2), 591-601.
- Hand, D. J., & Berthold, M. (2003). *Intelligent data analysis : An introduction* (2nd rev. and extend ed.). Berlin ; New York: Springer.
- Hill, R. (1950). *The mathematical theory of plasticity*. London: Oxford University Press.
- Hsu, C. -, Ulsoy, A. G., & Demeri, M. Y. (2002). Development of process control in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 127(3), 361-368.
- Huang, Y., & Leu, D. (1995a). An elasto-plastic finite element analysis of sheet metal U-bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 48(1-4), 151-157.
- Huang, Y., & Leu, D. (1995b). Finite element analysis of contact problems for a sheet metal bending process. *Computers & Structures*, 57(1), 15-27.

- Inamdar, M. V., Date, P. P., & Desai, U. B. (2000). Studies on the prediction of springback in air vee bending of metallic sheets using an artificial neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 108(1), 45-54.
- Inamdar, M. V., Date, P. P., Narasimhan, K., Maiti, S. K., & Singh, U. P. (2000). Development of an artificial neural network to predict springback in air vee bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 376-381.
- Inamdar, M. V., Date, P. P., & Sabnis, S. V. (2002). On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(3), 459-463.
- Jagirdar, R., Jain, V. K., & Batra, J. L. (2001). Characterization and identification of forming features for 3-D sheet metal components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(9), 1295-1322.
- Jin, Z., Luo, S., & Daniel Fang, X. (2001). KBS-aided design of tube bending processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14(5), 599-606.
- Jung, D. W. (2002). Static-explicit finite element method and its application to drawbead process with spring-back. *Journal of Materials Processing Technology*, 128(1-3), 292-301.
- Kalpakjian, S. (2003). *Manufacturing processes for engineering materials* (4th ed.) Prentice Hall.
- Kalpakjian, S. (1991). *Manufacturing processes for engineering materials* (2nd ed.). Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Kawka, M., Kakita, T., & Makinouchi, A. (1998). Simulation of multi-step sheet metal forming processes by a static explicit FEM code. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 54-59.
- Kim, D. J., & Kim, B. M. (2000). Application of neural network and FEM for metal forming processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(6), 911-925.
- Kopp, R. (1996). Some current development trends in metal-forming technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 60(1-4), 1-9.
- Lange, K. (1997). Modern metal forming technology for industrial production. *Journal of Materials Processing Technology*, 71(1), 2-13.
- Lange, K., co, & Pöhlandt, K. (1985). *Handbook of metal forming*. New York: McGraw-Hill.
- Li, K. P., Carden, W. P., & Wagoner, R. H. (2002). Simulation of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(1), 103-122.
- Li, X., Yang, Y., Wang, Y., Bao, J., & Li, S. (2002). Effect of the material-hardening mode on the springback simulation accuracy of V-free bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(2), 209-211.

- Livatyali, H., & Altan, T. (2001). Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods: Part 1. experimental investigations. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(1-2), 262-268.
- Livatyali, H., Kinzel, G. L., & Altan, T. (2003). Computer aided die design of straight flanging using approximate numerical analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(2), 532-543.
- Livatyali, H., Wu, H. C., & Altan, T. (2002). Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer-aided design methods: Part 2: FEM predictions and tool design. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), 348-354.
- Ludwik, P. (1903). Technologische studie über blechbiegung. *Sonderabdruck Aus Den Technischen Blättern*, , 133-159.
- Marciniak, Z. (1992). *The mechanics of sheet metal forming*. London: Edward Arnold.
- Math, M., & Grizelj, B. (2002). Finite element approach in the plate bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 778-784.
- Mehrotra, K., Mohan, C. K., & Ranka, S. (1997). *Elements of artificial neural networks*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Mentink, R. J., Lutters, D., Streppel, A. H., & Kals, H. J. J. (2003). Determining material properties of sheet metal on a press brake. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(1), 143-154.
- Narasimhan, N., & Lovell, M. (1999). Predicting springback in sheet metal forming: An explicit to implicit sequential solution procedure. *Finite Elements in Analysis and Design*, 33(1), 29-42.
- Nilsson, A., Melin, L., & Magnusson, C. (1997). Finite-element simulation of V-die bending: A comparison with experimental results. *Journal of Materials Processing Technology*, 65(1-3), 52-58.
- Palaniswamy, H., Ngaile, G., & Altan, T. (2004). Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1), 28-34.
- Papeleux, L., & Ponthot, J. P. (2002). Finite element simulation of springback in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 785-791.
- Pepelnjak, T., Gantar, G., & Kuzman, K. (2001). Numerical simulations in optimisation of product and forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 115(1), 122-126.
- Perduijn, A. B., & Hoogenboom, S. M. (1995). The pure bending of sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 51(1-4), 274-295.
- Pourboghrat, F., & Chu, E. (1995). Springback in plane strain stretch/draw sheet forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 37(3), 327-341.

- Pourboghrat, F., Karabin, M. E., Becker, R. C., & Chung, K. (2000). A hybrid membrane/shell method for calculating springback of anisotropic sheet metals undergoing axisymmetric loading. *International Journal of Plasticity*, 16(6), 677-700.
- Prechelt, L. (1998). Automatic early stopping using cross validation: Quantifying the criteria. *Neural Networks*, 11(4), 761-767.
- Queener, C. A., & De Angelis, R. J. (1968). Elastic springback and residual stresses in sheet metal formed by bending. *Transactions of the ASME*, 61(6), 757-768.
- Ripley, B. D. (1996). *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
- Russ, J. C. (1995). *The image processing handbook* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Samuel, M. (2000). Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(3), 382-393.
- Santos, A. D., Ferreira Duarte, J., Reis, A., Barata da Rocha, A., Menezes, L., & Oliveira, M. et al. (2002). Towards standard benchmarks and reference data for validation and improvement of numerical simulation in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 798-805.
- Shu, J., & Hung, C. (1996). Finite element analysis and optimization of springback reduction: The "double-bend" technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(4), 423-434.
- Singh, U. P., Maiti, S. K., Date, P. P., & Narasimhan, K. (2004). Numerical simulation of the influence of air bending tool geometry on product quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(3), 269-275.
- Society of Manufacturing Engineers, Dallas, D. B., & American Society of Tool and Manufacturing Engineers. (1976). *Tool and manufacturing engineers handbook : A reference work for manufacturing engineers* (3d ed.). New York: McGraw-Hill.
- Stelson, K. A. (1986). An adaptative pressbrake control for strain-hardening materials. *Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME*, 108, 127-132.
- Stelson, K. A., & Gossard, D. C. (1982). An adaptative pressbrake control using an elastic-plastic material model. *Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME*, 104, 389-393.
- Swingler, K. (1996). *Applying neural networks : A practical guide*. London: Academic Press.
- Tan, Z., Persson, B., & Magnusson, C. (1992). An empiric model for controlling springback in V-die bending of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 34(1-4), 449-455.
- Taylor, L., Cao, J., Karafillis, A. P., & Boyce, M. C. (1995). Numerical simulations of sheet-metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 50(1-4), 168-179.

- Tekiner, Z. (2004). An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 109-117.
- Tekkaya, A. E. (2000). State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1), 14-22.
- Thanki, S. J., Raval, H. K., & Dave, A. K. (2001). Prediction of the punch reversal position under V-plate bending using real material (power-law) behavior*1. *Journal of Materials Processing Technology*, 114(3), 227-232.
- Vasile, D., Vasile, D., Thamodharan, M., & Wolf, A. (2000). The use of neural network in metal industry. *Industry applications conference, 2000. conference record of the 2000 IEEE*, 2, 1104-1108.
- Viswanathan, V., Kinsey, B., & Cao, J. (2003). Experimental implementation of neural network springback control for sheet metal forming. *Journal of Engineering Materials and Technology. Transactions of the ASME*, 125(April), 141-147.
- Wang, C., Kinzel, G., & Altan, T. (1993). Mathematical modeling of plane-strain bending of sheet and plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 39(3-4), 279-304.
- Weisstein, E. W. (2005a). *Arc length. from MathWorld--A wolfram web resource.*
<http://mathworld.wolfram.com/ArcLength.html>. Retrieved 06/28, 2005 from
- Weisstein, E. W. (2005b). *Radius of curvature. from MathWorld--A wolfram web resource.*
<http://mathworld.wolfram.com/RadiusofCurvature.html>. Retrieved 06/27, 2005 from
- Widrow, B., & Lehr, M. A. (1990). 30 years of adaptive neural networks: Perceptron, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, 78(9), 1415-1442.
- Winston, P. H. (1992). *Artificial intelligence* (3rd ed.). Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- Xie, S. Q., Tu, P. L., Aitchison, D., Dunlop, R., & Zhou, Z. D. (2001). A WWW-based integrated product development platform for sheet metal parts intelligent concurrent design and manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, 39(17), 3829-3852.
- Yang, M., Manabe, K., & Nishimura, H. (1996). Development of real-time process control system for precision and flexible V-bending with an on-line database. *Journal of Materials Processing Technology*, 60(1-4), 249-254.
- Yuen, W. Y. D. (1996). A generalised solution for the prediction of springback in laminated strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 61(3), 254-264.