



## TESIS DOCTORAL

ENGATILLADO MEDIANTE CONFORMADO ELECTROMAGNÉTICO



PEDRO JOSE JIMBERT LACHA // Arrasate-Mondragón, 2009







GOI ESKOLA  
POLITEKNIKOA

ESCUELA  
POLITÉCNICA  
SUPERIOR

**TESIS**

Tesis dirigida a la obtención del título de  
Doctor por Mondragon Unibertsitatea

**TITULO**

**Engatillado por Conformado Electromagnético**

por

**Pello JIMBERT**

**Directores de tesis**

**Iñaki HURTADO HURTADO**

**María Angeles GUTIERREZ GARCIA**

**Marzo 2009**







## **AGRADECIMIENTOS/ESKERRAK**





## AGRADECIMIENTOS / ESKERRAK

En primer lugar quiero agradecer a las personas que me han guiado a lo largo de estos años de tesis desde Labein, a Marian Gutierrez por su apoyo y ayuda en los últimos años de la tesis y a Beatriz Gonzalez por sus ideas e imaginación a la hora de desarrollar nuevas aplicaciones para el conformado electromagnético. Sin olvidarme de la parte que me ha dirigido desde MU, Carlos Garcia y sobre todo Iñaki Hurtado por sus sabios consejos y apoyo en todo momento.

I would also like to thank Professor Glenn S. Daehn for taking me in his group at The Ohio State University and helping me with his knowledge and friendliness. I wanna extend this acknowledgement to the other people in the group Scott, Yuan, Anupam, Geoff, Eduardo, Kristen and Kinga.

Quiero agradecer su ayuda y compañerismo a la actual unidad de automoción de Labein-Tecnalia: Borja Rodriguez y Mikel Pradera por ayudarme con los experimentos en el laboratorio, Iñaki Perez y Amaia Arroyo por ayudarme con la simulación, Angela Mangas, Natxo Zarazua, Iñigo Aranguren, Maite Santos, Leire Vadillo, Ana Alday, Maria Luisa Gorostiza, Sonia Varela, Juan San José y sobre todo a Iñaki Eguia (ese Pixa!) por ser un gran compañero, ayudarme a lo largo de todos estos años y responder a mis preguntas con paciencia y buen humor, eskerrikasko! También quiero agradecer a otros antiguos miembros de la unidad: Edurne Iriondo, Iñaki Fernandez, Joseba Villate, Txelu Avendaño, Iñaki Montoya y Aitor Legorburu.

Eskerrak eman nahi dizkiot MU-ko Ibai Ulacia-ri simulazioarekin laguntzeagatik eta Nagore Otegi-ri perfilometroko neurketak egiten erakusteagatik.

Agradecer a la Fundación de Centros Tecnológicos “Iñaki Goenaga” por concederme la beca para realizar esta tesis y al CIC MARGune por su inestimable ayuda al prestarnos la cámara de alta velocidad. A Elena Silveira e Israel Garuz de Inasmet por hacerme las micros y siempre estar dispuestos a echarme una mano.

Thanks to Roger Anderson from Svensk Verktygsteknik of Sweden for allowing me the usage of their EMF hemming tooling and to David Lloyd from The Novelis Global Technology Center in Canada for running some bending tests with my material.

A las empresas del entorno Ingemat (Hermann Toja y Luis Angel Rodriguez) y Gestamp (Iñaki Alapont) por acercarme la realidad industrial y responder siempre a mis preguntas.

A las demás personas de Labein que he tenido la suerte de conocer Arantxa, Alberto, Gonzalo, Lander, Borja, Iñaki, Maria, Jaime, Zuriñe, Iñigo, Maribel, Ramón, Lorena, Elixabete y a tod@s l@s demás muchas gracias.

A Paulina por estar a mi lado y transmitirme su energía y apoyo en la fase final de la tesis.

Y para terminar agradecer muy especialmente a mi familia. Quiero dedicar esta tesis a mis padres por dárme todo y apoyarme en todas mis decisiones y a mi hermana Silvia por ser como es.

Eskerrikasko danoi!

Muchas gracias a tod@s!



## **INDICE**



**INDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>18</b>
1.1	Introducción.....	18
1.2	Justificación de la tesis .....	19
1.3	Objetivos de la tesis .....	22
1.4	Organización de la tesis.....	23
1.5	Originalidad y carácter innovador de la tesis:.....	24
<b>2</b>	<b>INTRODUCCION AL ENGATILLADO .....</b>	<b>28</b>
2.1	Conceptos básicos.....	28
2.2	Engatillado mecánico convencional:.....	30
2.3	Engatillado por roldana o “Roll hemming” .....	31
2.4	Estado del arte .....	31
2.5	Conclusiones del estudio:.....	34
<b>3</b>	<b>CONFORMADO ELECTROMAGNETICO (EMF) .....</b>	<b>38</b>
3.1	Descripción del proceso.....	39
3.1.1	Efecto “Skin” .....	40
3.1.2	Máquinas de EMF.....	41
3.1.3	Ventajas del EMF .....	43
3.2	Aplicaciones .....	45
3.2.1	EMF de piezas cilíndricas.....	45
3.2.2	Conformado de chapa .....	47
3.2.3	EMF en prensa .....	48
3.2.4	Soldadura:.....	51
3.2.5	Compactación de polvos: .....	51
3.2.6	Desarrollo de nuevas aplicaciones para el EMF .....	53
3.2.7	Desarrollo de nuevas bobinas para el EMF .....	54
3.2.8	EMF para materiales menos conductores que el aluminio .....	55
3.3	Engatillado por EMF .....	56
<b>4</b>	<b>CONCEPTOS BASICOS .....</b>	<b>60</b>
4.1	Diseño de bobinas para EMF .....	61
4.1.1	Bobinas de engatillado por EMF:.....	62
4.2	Definición de variables, defectos y parámetros del engatillado.....	63
4.2.1	Diferentes zonas de una unión engatillada: .....	64
4.2.2	Defectos tipo en una unión engatillada .....	64
4.2.3	Definición de buena calidad de una unión engatillada: .....	71
<b>5</b>	<b>ESTUDIO PRELIMINAR.....</b>	<b>78</b>
5.1	Determinación de las variables de proceso para el engatillado por EMF .....	79
5.1.1	Elección de las variables de proceso .....	79
5.1.2	Plan de ensayos preliminar .....	83
5.1.3	Estudio del solapamiento.....	84
5.1.4	Estudio de la energía.....	88
5.1.5	Estudio de la altura de la pestaña .....	89
5.1.6	Estudio del radio de doblado .....	94

5.2	Nuevo defecto propio del engatillado por EMF .....	99
5.2.1	Definición de una geometría modelo .....	100
5.3	Conclusiones de los ensayos preliminares.....	101
<b>6</b>	<b>ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DESARROLLO DEL PROCESO .....</b>	<b>106</b>
6.1	Diseño del plan experimental.....	107
6.2	Análisis del doblado .....	114
6.2.1	Doblado por EMF .....	114
6.2.2	Influencia del doblado por EMF en el engatillado por EMF .....	130
6.2.3	Doblado por EMF Vs Doblado mecánico .....	134
6.2.4	Conclusiones .....	141
6.3	Influencia del solapamiento .....	142
6.3.1	En la aparición de grietas .....	146
6.3.2	En el enrollamiento .....	148
6.3.3	En la energía necesaria para obtener la geometría modelo: .....	148
6.3.4	En la zona deformada.....	149
6.3.5	En el combado .....	150
6.3.6	Conclusiones .....	151
6.4	Influencia de la geometría de la pieza: .....	156
6.4.1	En el combado: .....	159
6.4.2	En el enrollamiento .....	161
6.4.3	En la zona deformada.....	162
6.4.4	En las arrugas.....	164
6.4.5	En la aparición de grietas .....	165
6.4.6	Conclusiones .....	165
6.5	Influencia de la altura de la pestaña .....	166
6.5.1	En la aparición de grietas .....	166
6.5.2	En la zona deformada.....	167
6.5.3	En el combado .....	168
6.5.4	En las arrugas.....	169
6.5.5	En el enrollamiento .....	171
6.5.6	Conclusiones .....	171
6.6	Influencia del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior: .....	173
6.6.1	En el enrollamiento .....	174
6.6.2	En la zona deformada.....	174
6.6.3	En la aparición de grietas .....	176
6.6.4	En el combado .....	177
6.6.5	Conclusiones .....	178
6.7	Estudio comparativo engatillado Mecánico Vs EMF.....	179
6.7.1	Engatillado mecánico.....	179
6.7.2	Engatillado por EMF .....	181
6.7.3	Comparación de resultados.....	182
6.7.4	Conclusiones .....	187
<b>7</b>	<b>SIMULACION.....</b>	<b>190</b>
7.1	Estado del arte de la simulación del EMF y del engatillado .....	191
7.1.1	Simulación numérica del proceso de EMF .....	191
7.1.2	Simulación numérica del proceso de engatillado .....	196
7.2	Simulación del doblado y engatillado por EMF.....	207
7.2.1	Estrategia de simulación utilizada .....	207
7.2.2	Elementos placa y simulación 3D (Maxwell-Pam-Stamp).....	211
7.2.3	Elementos sólidos y simulación 2D (Maxwell-Abaqus).....	216
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>224</b>

---

<b>9</b>	<b>CONTRIBUCION CIENTIFICA .....</b>	<b>230</b>
<b>10</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>234</b>





**SUMMARY / RESUMEN / LABURPENA**



## SUMMARY

This thesis develops a new application for the Electromagnetic Forming (EMF) technology: the auto-body and white panels hemming operation for aluminium alloys. It is a completely new application for this high speed forming technology so the main variables governing this new hemming process had to be identified. After the identification, a more exhaustive experimental plan was designed to evaluate the possibilities of the EMF technology for hemming applications and the experiments were carried out. Quality parameters like crack appearance or conventional hemming quality defects were selected and analyzed to evaluate the input variables.

The main goal of this study is to provide an alternative hemming process for the automotive industry. Due to the required precision and quality on the hemming process and the complexity of the parts, most of the bending, flanging and hemming dies are designed based on experience and on lengthy and costly die tests. Besides, cracking problems arise when hemming light alloys like aluminum. The EMF is a high speed forming technology providing especially good results when used for aluminum alloys. So this study aims to develop and characterize a new and more agile hemming solution that saves time as well as money without damaging the quality of the hem joint, especially when using aluminum alloys.

The study can be divided in three parts. The first part is devoted to define and analyze the apparently main input variables of this process. After the first experiments two conclusions come up. The first one establishes the possibility to obtain quality hemmed parts using the EMF technology. The second one is the identification of the main variables. The less influent ones are ruled out. The basic concepts for designing EMF hemming coils were established.

The second part is the experimental one. After identifying the main variables of the EMF hemming process, an experimental plan was designed and carried out to develop this new hemming technology. The results were analyzed. Material changes associated to the deformation process were analyzed to finish with this second part. The quality obtained with the conventional hemming processes was matched adjusting the input EMF hemming variables. This quality was established analyzing the process output parameters. This result takes on a higher relevance if we consider that the process time has been reduced and the pre-hemming operation eliminated. A hemmability increase was observed for the alloy used in this thesis. The samples hemmed using the EMF technology have less damage compared to the mechanically hemmed ones for the same final geometry. The inertial effects of the EMF produce a larger distribution of the total deformation around the hemming union instead of concentrating it on the edge.

On the third part a new finite element simulation was developed and validated. There is no commercial software simulating the EMF process. The solution reached consists on using an un-coupled simulation method to transfer the electromagnetic pressure from the electromagnetic software to the mechanical software to obtain the deformations. This methodology has been and agile solution for the simulation of the EMF bending and hemming processes giving satisfactory results when comparing with the experimental samples.

## RESUMEN

Esta tesis desarrolla una nueva aplicación para la tecnología del Conformado Electromagnético (EMF): el engatillado de piezas de piel exterior de carrocería para aleaciones de aluminio. Al tratarse de una aplicación novedosa para la tecnología del EMF no existe ningún estudio anterior a éste. Ello implica una primera identificación de las variables que gobiernan este nuevo proceso de engatillado. Una vez identificadas esas variables, se realizó un plan experimental más exhaustivo que permitió evaluar las posibilidades de la tecnología del EMF para el engatillado. Los parámetros de salida que se han seleccionado y analizado son aspectos de calidad exigidos por la industria como aparición de grietas y defectos propios del engatillado. Al tratarse de un proceso orientado principalmente a piezas exteriores de automoción la calidad exigida es muy elevada.

La problemática que se aborda es la de proporcionar a la industria automovilística en particular y a la del transporte en general, un proceso alternativo a los actuales métodos convencionales de engatillado mecánico. Estos procesos actuales, además de necesitar largos tiempos de puesta a punto, dan problemas de agrietamiento a la hora de engatillar aleaciones ligeras como el aluminio. El EMF es una tecnología de deformación a alta velocidad que funciona especialmente bien con las aleaciones de aluminio. El objetivo final de este estudio es el de desarrollar y caracterizar un proceso de engatillado más ágil, que reduzca los problemas que tienen las aleaciones de aluminio para ser engatilladas, sin perjudicar la calidad final del producto.

Se han distinguido tres fases principales en el desarrollo. La primera fase consta de un estudio preliminar en el que se han definido y posteriormente analizado las posibles variables de entrada del nuevo proceso. De esta primera fase se extraen dos conclusiones. Por un lado se establece la posibilidad de obtener piezas engatilladas por EMF de calidad aceptable. Por otro lado se ha realizado una selección de las variables de menor y mayor influencia en los parámetros de salida del engatillado por EMF y se han establecido las bases para el diseño de bobinas eficientes.

Una vez seleccionadas las variables de entrada más influyentes se ha diseñado un plan experimental para conocer y poder desarrollar esta nueva tecnología de engatillado. Posteriormente se han realizado los experimentos y se han analizado los resultados obtenidos. Para completar esta segunda fase se han comparado los cambios sufridos por el material tanto en la microestructura como en las propiedades mecánicas al ser engatillado por las distintas tecnologías. Se han conseguido engatillar por EMF uniones con los mismos parámetros de calidad final que las obtenidas por los métodos convencionales de engatillado ajustando las variables de entrada. Dicha calidad se ha establecido mediante el análisis de los parámetros de salida. Este hecho cobra mayor importancia si se tiene en cuenta que se ha eliminado la operación de pre-engatillado y reducido el tiempo de proceso. Se ha observado un aumento en la engatillabilidad de la aleación de aluminio estudiada al utilizar el EMF. Teniendo la misma geometría antes y después del engatillado con ambas tecnologías, las muestras engatilladas por EMF presentan un daño menor que las engatilladas mecánicamente. Esto se debe a los efectos inerciales que se producen en el EMF que hacen que la deformación no se concentre en el extremo de la unión sino que se distribuya en una zona mayor.

La tercera fase se ha dedicado al desarrollo y validación de una herramienta de simulación. Al no disponer de ningún programa comercial capaz de simular el proceso del EMF, se ha desarrollado un método de simulación desacoplado entre dos programas. El primero calcula las presiones generadas en la parte electromagnética y un segundo la deformación sufrida en la parte mecánica. Dicha metodología ha resultado ser una solución ágil para la simulación tanto del doblado como del engatillado por EMF que además da resultados próximos a los obtenidos experimentalmente.

## LABURPENA

Tesi honetan Konformatu Elektromagnetikorako (EMF) aplikazio berri bat garatzen da: automozio karrozeriako kanpoko piezen kazoztadura (“engatillado”) aluminiozko aleazioentzat. Garapen hau guztiz berria izanik, ez dago aurretik egindako ikerketarik. Ondorioz prozesu berri honen bariabileak zeintzuk diren ezagutzeko lehen azterketa bat egin da. Bariabile nagusiak aukeratu ondoren plan experimentala gauzatu zen EMF-ak kazozteko dituen gaitasunak aztertzeko. Aukeratutako eta ondorioz aztertutako irteerako parametroak kalitatearekin zerikusia dute. Kazoztadura, automoziozko kanpo piezei bereziki aplikatutako prozesua denez, exijitutako kalitatea oso altua da.

Lan honetan gaur egun automozio industriak dituen kazoztatze prozesu mekanikoentzat alternatiba bat bilatzen da. Prozesu mekaniko hauek “puesta a punto”-rako denbora asko behar dute eta gainera arazoak dituzte aluminioa bezelako pisu gutxiko aleazioak kazozteko orduan. EMFa aluminioarekin bereziki ondo funtzionatzen duen abiadura handiko deformazio prozesu bat da. Ikerketa honen helburu nagusia kazozteko prozesu berri eta azkar bat garatu eta karakterizatzea da. Hau dena aluminiozko piezekin sortzen diren arazoak murriztuz eta beti pieza tipo honi eskatzen zaien kalitate maila mantenduz.

Garapen prozesu honen barruan hiru fase nagusi bereiztu dira. Lehenengoan EMFrako aplikazio berri honetan parte hartzen duten bariabile desberdinak aztertu dira. Lehenengo fase honetatik bi ondorio atera dira. Lehenengoa EMF teknologiaren balioetasuna ezartzea izan da aluminiozko piezak kazoztatze. Bigarrena influentzia gehien duten bariabileak aukeratzea eta influentzia gutxienekoak baztertzea izan da.

Bukaerako kalitate parametroetan influentzia gehien duten bariabile horiekin plan experimentala diseinatu da eta bukaeran ondorioak atera dira. Bigarren fasearekin amaitzeko, teknologiaren ondorioz materialeak jasandako aldaketak bai propietate mekanikoetan zein mikroestruturan aztertu dira.

Aztertutako EMF bariabileak ondo ajustatuz, prozesu mekanikoekin lorturiko kalitate bereko kazoztadurak lortu dira EMF-z. Kalitate hori prozesu irteerako parámetroak neurtuz ezarri da. Lorpen honek garrantzia handiagoa dauka pre-kazoztadurako operaziorik gabe gauzatu dela kontutan hartzen bada, prozesu denbora murriztuz. Erabilitako aluminiozko aleazioan kazoztadura ahalmenaren haundiagotze bat nabarmendu da EMF teknologia erabiltzerakoan. Bukaerako geometria berbererako, EMF-z kazoztutako piezak min estruktural gutxiago dute mekanikoki kazoztutakoak baino. Fenomeno hau EMF teknologian agertzen diren efektu inertzialen ondorio bat da. Efektu hauek deformazioaren distribuzio desberdin bat egiten dute prozesu mekanikoak baino zona haundiago batetan.

Hirugarrenengo fasean elementu finitoko simulazio metodo berri bat garatu eta balioztatu da. Gaur egun ez dago software komertzialik EMFa simulatzeko kapazitatea duenik. Ondorioz bi softwarekin desakoplaturiko simulazio metodo bat garatu da. Batak parte elektromagnetikoan sorturiko presioak kalkulatu eta bigarrenak parte mekanikoan sorturiko deformazioa. Garatutako simulaziozko

prozedura hau soluzio azkar eta efiziente bat suertatu da EMF-ren bidezko bai tolestaketa zein kokaztadura prozesuak simulatzeko, lorturiko erantzunak experimentu fisikoetatik oso gertu egonik.





## **CAPITULO 1 - INTRODUCCION**



## 1 INTRODUCCION

### 1.1 Introducción

El engatillado es a menudo la última operación dentro de la cadena de estampación de piezas exteriores de carrocería del automóvil. Se trata de un proceso de conformado que principalmente persigue dos objetivos. Por una parte se pretende mejorar el acabado final de la pieza cortada en prensa (obteniendo unos bordes sin rebabas y con mejor aspecto visual) dándole a su vez mayor rigidez estructural y por otra parte se pretende también unir dos piezas mecánicamente.

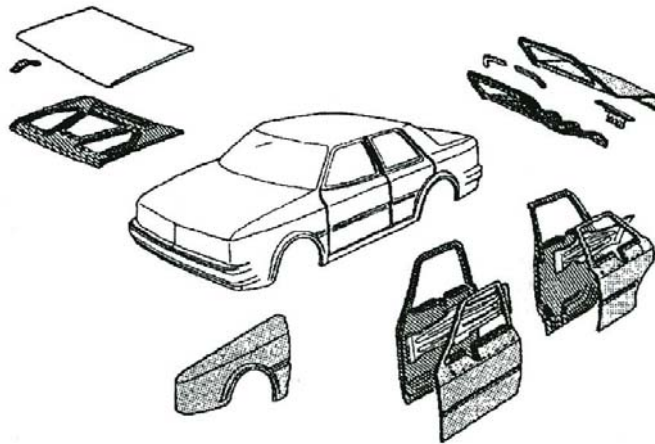


Figura 1.1: Diferentes piezas engatilladas en un automóvil [LIV98]

Durante años se ha considerado como una operación de ensamblado. Sin embargo en la actualidad se considera una operación de deformación que tiene una importancia crucial en la calidad final del producto ya que el engatillado es una de las operaciones finales en este tipo de piezas.

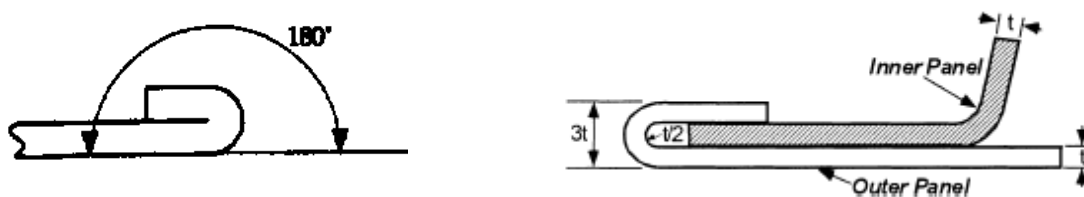


Figura 1.2: Engatillado para mejorar el aspecto de la pieza y la rigidez estructural [MUD96] (izquierda) y engatillado utilizado para unir dos piezas [MUD96] (derecha)

El engatillado se define como el proceso de plegado de una pestaña o chapa anteriormente doblada, hasta un ángulo de 180 grados o superior. Aunque puede utilizarse para plegar la pestaña sobre la misma chapa (figura 1.2, izquierda), en automoción se pliega sobre otra pieza interior consiguiéndose la unión mecánica entre ambas (figura 1.2, derecha).

Actualmente en la industria existen básicamente dos métodos de engatillado mecánico: el engatillado mecánico convencional (figura 1.3) y el engatillado por roldada (figura 1.4).

El proceso de engatillado mecánico convencional consta de tres etapas: doblado o pestañado, pre-engatillado y engatillado (figura 1.3) y se realiza en prensa o en estaciones de engatillado accionadas por cilindros.

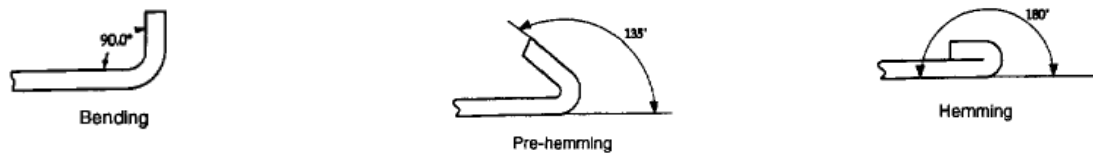


Figura 1.3: Distintas etapas del proceso de engatillado mecánico convencional [MUD96]

El engatillado por roldana lo realiza un robot en el cual se coloca una herramienta en forma de roldana. El robot presiona la roldana contra la pestaña mientras se va desplazando por todo el contorno de la pieza. Esta operación se repite varias veces hasta conseguir el engatillado completo en toda la pieza (figura 1.4).

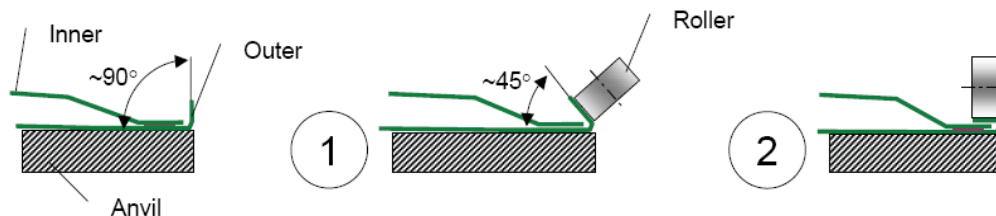


Figura 1.4: Sección de un engatillado mecánico por roldana realizado en 2 pasadas partiendo desde los 90 grados de doblado.

Se presenta en esta tesis un nuevo método de engatillado basado en la utilización de impulsos electromagnéticos para conseguir tanto el doblado como el engatillado de la pestaña.

## 1.2 Justificación de la tesis

Al tratarse de un proceso de conformado sobre pieza exterior de automóvil, la calidad exigida a este tipo de piezas, tanto de aspecto como de acabado son muy elevadas. Es por esto que la **puesta a punto** de este tipo de **estaciones de engatillado tiene un altísimo coste horario** ya que está basada en la experiencia de los operarios y en largas horas de pruebas.

Por todos es sabido la importancia que ha tomado la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para la industria automovilística debido a regulaciones legislativas impuestas por los distintos gobiernos de todo el mundo. Una de las maneras más directas de reducir dichas emisiones es reduciendo el peso del automóvil. Para ello existen varias vías. Una de ellas es la utilización de nuevos materiales como los aceros de alto límite elástico o la utilización de aleaciones ligeras.

Sin embargo las aleaciones ligeras, como **las aleaciones de aluminio, no resultan sencillas de engatillar debido a su baja conformabilidad.**

Así como en los aceros los defectos más comunes son las arrugas o hendiduras, al engatillar aleaciones de aluminio se producen grietas en el borde exterior de la unión. Esta diferencia en los defectos o modos de fallo que existe entre aceros y aluminios es atribuida a que las aleaciones de aluminio son más susceptibles a la concentración de tensiones durante el proceso de engatillado [LIN06].

Debido a este problema de aparición de grietas se utiliza el llamado “rope hemming” (figura 1.5) al engatillar piezas de aleaciones de aluminio. El “rope hemming” consiste en aumentar el radio de la unión engatillada para evitar que el material se deforme demasiado. Sin embargo este tipo de engatillado **aumenta un defecto visual llamado GAP aparente entre piezas engatilladas** tal y como se puede observar en la figura 1.5.

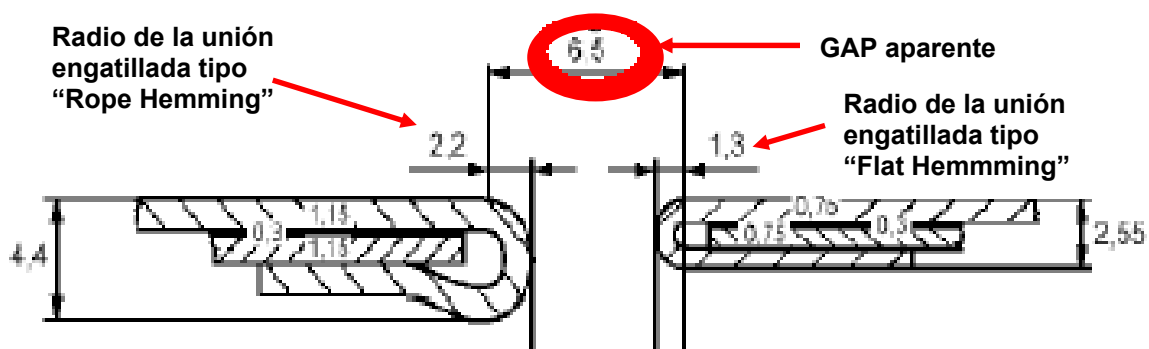


Figura 1.5: Distintos tipos de uniones engatilladas. Unión tipo “rope hemming” utilizada con aleaciones de baja formabilidad (izquierda) y tipo “flat hemming” utilizada con aleaciones de acero (derecha).

En la figura 1.5 se observa como el valor del radio de la unión engatillada tiene una influencia directa en el parámetro del GAP aparente.

Con el engatillado por roldana (figura 2.6) es posible reducir el radio de la unión engatillada. Se genera un estado tensional con una componente en el eje de doblado (figura 2.8). Ello favorece una menor elongación del grano en la zona deformada y con ello un retraso en la aparición de bandas de cizalladura y de roturas en comparación con el estado tensional de deformación plana que se genera con el método de engatillado convencional (figura 2.8) [CAR05]. Sin embargo, además de ser una tecnología todavía en periodo de estudio y que necesita mucho trabajo para la programación del robot, **el tiempo de proceso del engatillado por roldana es muy elevado** pudiendo llegar a los 5 minutos para una pieza grande si se dispone de un solo robot.

### Por que engatillado por EMF?

De la literatura referente a la deformación de chapa se desprende que al trabajar a velocidades de deformación por encima de los 50m/s se obtiene un **aumento en los niveles de deformación** para algunas aleaciones [VOH98], [EZR73], [WIL64], [DAE99], [TAM96], [BAL94].

En el caso de la operación de engatillado, la deformación que se produce, aunque severa, es muy local. Por lo tanto, se pretende **aprovechar ese aumento en la deformación que da el conformado a alta velocidad para evitar la concentración de tensiones que se crea en el extremo de la unión. De esta manera se pretende reducir el riesgo de agrietamiento** que presentan las aleaciones de aluminio al ser engatilladas por los métodos convencionales. Con ello se conseguirá reducir el parámetro del GAP aparente entre piezas engatilladas aumentando así su calidad final.

Tal y como se ha expuesto al comienzo de este capítulo, el engatillado es un proceso de deformación que lleva más de una operación. En el caso del convencional se realiza una operación de pre-engatillado y otra de engatillado final y en el caso del engatillado por roldana la herramienta debe pasar varias veces por la misma zona hasta conseguir el engatillado final aplicando una deformación progresiva.

Sin embargo **utilizando el EMF se puede pasar en una sola operación de la pestaña doblada a 90 grados al engatillado final**. Esto supondría un ahorro en utilidades y en tiempo de proceso.

Teniendo en cuenta que la deformación utilizando el EMF es del orden de milisegundos, **el tiempo de proceso se reduciría al mínimo**.

Se han enumerado las mejoras que traerá la aplicación del EMF al proceso del engatillado. Además de las mejoras debidas a las características de la tecnología del EMF, existen diversos **aspectos** a tener en cuenta **que hacen del engatillado de piezas de aluminio un proceso idóneo para el EMF**.

- El aluminio es el material idóneo para deformar por EMF debido a su alta conductividad eléctrica lo que mejora la eficiencia del proceso. Además, el aluminio es el material que más problemas presenta para ser engatillado por los métodos convencionales tal y como se ha expuesto con anterioridad.
- La geometría de la pestaña a deformar para realizar el engatillado se presta muy bien para ser conformada por EMF por las siguientes razones:
  - La geometría continua de la pestaña en todo el perímetro de la pieza hace que el diseño de la bobina sea sencillo, eficiente y robusto (capítulo 4.1).
  - La deformación necesaria es pequeña y localizada lo que hace controlable el movimiento y la deformación a alta velocidad de la pestaña.

### 1.3 Objetivos de la tesis

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar el proceso de engatillado por EMF y establecer su validez como proceso alternativo al engatillado convencional para piezas de chapa de aleaciones de aluminio. Este objetivo principal puede desglosarse en diversos **objetivos científicos** que nos llevarán a su consecución:

- **Identificar las variables de entrada del proceso de engatillado por EMF y una vez identificadas analizar su influencia en los parámetros de salida.** Estos parámetros de salida son **tanto dimensionales como de calidad.**
- **Establecer modos de deformación y cambios en las propiedades mecánicas y microestructurales de las piezas engatilladas por EMF.**
- **Establecer límites de engatillabilidad por EMF** en función del daño generado en el material. Se establecerán nuevos límites para las variables geométricas de entrada generados por el proceso del EMF.
- A partir del estudio de las variables del proceso **determinar los parámetros necesarios para la optimización de las bobinas de EMF para el engatillado.** Tal y como se ha comentado con anterioridad la bobina es el elemento clave del proceso del EMF para obtener la deformación necesaria. Se diseñarán las líneas a seguir para la fabricación de bobinas eficientes para el engatillado por EMF.
- **Implementación de las variables optimizadas experimentalmente en un método de simulación** del proceso de engatillado por EMF.

Ello permitirá la consecución de los siguientes **objetivos tecnológicos**:

- **Dar el primer paso para establecer la viabilidad del proceso de engatillado utilizando la tecnología del EMF.**
- **Reducir el tiempo de puesta a punto de las estaciones de engatillado.** El proceso de puesta a punto de las estaciones de engatillado mecánico en las plantas de fabricación resulta una tarea complicada. Es un proceso de prueba y error que cuesta tiempo y recursos. Esta tesis pretende establecer las líneas de diseño de este nuevo proceso de engatillado por EMF que una vez esté totalmente desarrollado reducirá la ardua tarea de puesta a punto de estas estaciones.
- **Simplificar el proceso eliminando la etapa de pre-engatillado existente en el engatillado mecánico convencional.** Esto supone una reducción del tiempo de proceso pero también una reducción en el costo de las instalaciones y de los utillajes.
- **Reducir el tiempo de proceso.** Al tratarse de un proceso de conformado a alta velocidad la operación de engatillado se realiza en milésimas de segundo, reduciendo el tiempo de proceso actual al mínimo.

- **Mejorar los aspectos de calidad de las uniones engatilladas con aleaciones de aluminio aprovechando las características del proceso del EMF a alta velocidad.** Se pretende reducir el radio final de la unión engatillada (figura 4.4) haciendo posible obtener uniones engatilladas planas o “flat hemming” (figura 1.5) donde ahora en necesario hacer uniones modificadas tipo “rope hemming” (figura 1.5). Este tipo de unión “rope hemming” se diseñó para poder engatillar las aleaciones de aluminio utilizadas en carrocería de automoción debido a su baja conformabilidad.

#### **1.4 Organización de la tesis**

La tesis está estructurada en 5 grandes bloques. El primero de introducción, estado del arte y objetivos de la tesis servirá para conocer el proceso de engatillado y la tecnología del EMF además de justificar y enumerar los objetivos de esta investigación.

El segundo bloque consta de un estudio preliminar. Al no existir ninguna referencia en la literatura sobre engatillado por EMF, se vio la necesidad de realizar un primer estudio experimental sobre la misma. En este estudio preliminar se establecerán las variables más influyentes y las menos influyentes en el proceso de engatillado por EMF.

Una vez fijadas las variables a estudiar se realizará el tercer bloque, el estudio experimental. En este apartado se realizarán la mayor parte de los experimentos físicos y se analizará la influencia de las distintas variables ensayadas en los parámetros de salida.

A continuación se presentará un cuarto bloque sobre simulación por elementos finitos del proceso. Una vez obtenidas uniones engatilladas por EMF optimizadas, se diseñará un método de simulación que se validará con los ensayos experimentales realizados en el bloque anterior. Con ello se pretende establecer una metodología de simulación de probada validez para ayudar al desarrollo y al diseño de proceso de futuras piezas engatilladas por EMF.

Para finalizar se realizó un quinto y último bloque en el que se recogen las conclusiones más relevantes de esta tesis y se proponen las líneas futuras a seguir.

A continuación se detalla un poco más cada uno de los apartados citados:

##### **Introducción, estado del arte y objetivos:**

La primera parte de esta tesis hace una introducción al proceso del engatillado para continuar con un estado del arte del mismo y de la tecnología del EMF. Ello permitirá conocer los requisitos necesarios de las piezas engatilladas. Servirá a su vez para analizar las aptitudes que presenta a priori la tecnología del EMF para el engatillado.



**Estudio preliminar:**

El objetivo del estudio preliminar es determinar cuales son las variables de mayor influencia en el engatillado por EMF y en que rangos deben ser estudiadas. Debido al carácter novedoso de este estudio y a los estrictos requerimientos de calidad exigidos a las piezas engatilladas, se hace necesario un primer estudio sobre las variables de entrada del proceso. Este estudio preliminar servirá para poder seleccionar las variables más influyentes en los parámetros de salida y descartar las menos influyentes.

**Estudio experimental:**

Una vez elegidas las variables de mayor influencia y los rangos en los que deben ser estudiadas en el estudio preliminar, se realiza el estudio experimental. En él se analizan en profundidad las variables seleccionadas a la vez que se introducen variables nuevas. Para finalizar se extraen las conclusiones sobre la influencia de cada una de las variables de entrada en los diferentes parámetros de salida medidos.

**Simulación:**

La simulación es una herramienta de gran valor porque nos permite conocer la evolución de la deformación durante el proceso. Además, una vez validada, reduce los tiempos de prueba y puesta a punto del proceso.

En este apartado se desarrollará un modelo de simulación de acoplamiento débil que se validará con los resultados del estudio experimental. El método desacoplado trata de calcular las presiones electromagnéticas generadas con un programa y transferirlas a otro para que haga el cálculo mecánico de las deformaciones.

**Conclusiones y líneas futuras:**

Las conclusiones más relevantes de esta tesis se recogen a la vez que se presentan nuevas líneas de investigación futuras.

**1.5 Originalidad y carácter innovador de la tesis:**

El estudio que se plantea dentro de esta tesis abre una nueva puerta dentro de los procesos de engatillado para piel exterior de automoción. Se trata de utilizar la tecnología del EMF para su aplicación al engatillado. Al tratarse de una aplicación nueva para esta tecnología existen diversos **aspectos completamente originales a este estudio:**

**Elección y análisis de las variables de entrada de esta nueva aplicación del EMF.**

**Desarrollo de un método de simulación de engatillado por EMF validado con los experimentos físicos.** Para este estudio se ha desarrollado un método desacoplado entre dos programas de elementos finitos para poder transferir las presiones electromagnéticas generadas en el cálculo electromagnético a la parte mecánica y así calcular las deformaciones producidas.

**Análisis comparativo del engatillado por EMF con los métodos mecánicos convencionales para analizar la aplicabilidad de esta nueva tecnología.** Se han analizado muestras engatilladas por EMF y por métodos convencionales para analizar la influencia de la tecnología del EMF en las propiedades mecánicas y la microestructura del material.

## **CAPITULO 2 – INTRODUCCION AL ENGATILLADO**

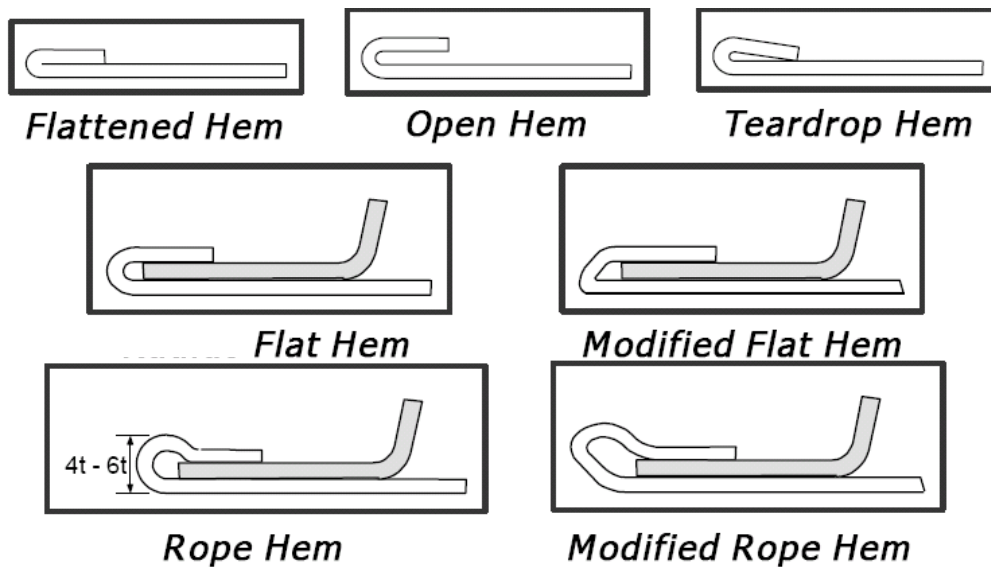


## 2 INTRODUCCION AL ENGATILLADO

### 2.1 Conceptos básicos

La primera parte del estado del arte está dedicada a describir conceptos básicos sobre el engatillado. Aquí se explican los distintos tipos de engatillado, los defectos más comunes y los procesos de engatillado convencionales existentes en la actualidad.

*Distintos tipos de uniones engatilladas*



*Figura 2.1: Distintos tipos de uniones engatilladas [ALT99].*

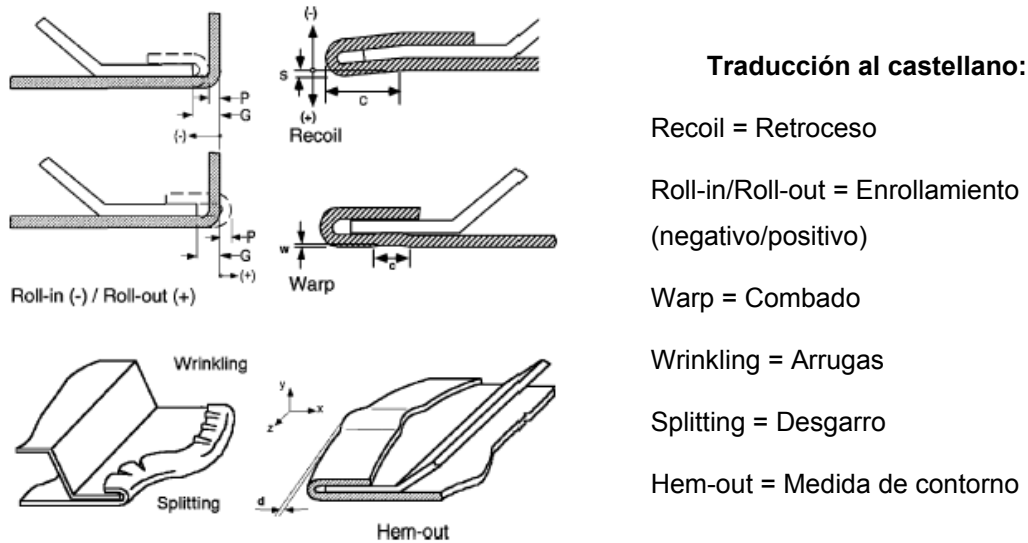
Los tres tipos de engatillado que aparecen en la parte superior de la figura 2.1 se utilizan con fines estéticos o para dar rigidez estructural a la pieza mientras que los cuatro de abajo se utilizan para unir dos piezas mecánicamente.

El “Rope Hem” se utiliza cuando el material de la pieza no es lo suficientemente dúctil como para soportar una deformación tipo “Flat Hem”. Por eso el “Rope Hem” es el tipo de unión comúnmente utilizado con las aleaciones de aluminio. Esto mismo sucede con la unión “Teardrop Hem” que se utiliza en lugar de la unión “Flattened Hem” por los mismos motivos. Al introducir una segunda pieza sobre la que realizar el engatillado cambia la configuración. Aumenta el radio de doblado lo que hace que la deformación se reparta en una zona mayor y no sea tan severa.

El “Modified Flat Hem” es una variación del “Flat Hem” pero con un radio de engatillado menor. Al reducir dicho radio se consigue un mejor aspecto final y una mayor calidad desde el punto de vista cliente ya que se consigue reducir el GAP aparente (figura 1.5). Al utilizar una matriz para realizar la forma del “Modified flat hem” se evita el posible roll-out o enrollamiento positivo que puede aparecer al realizar el engatillado.

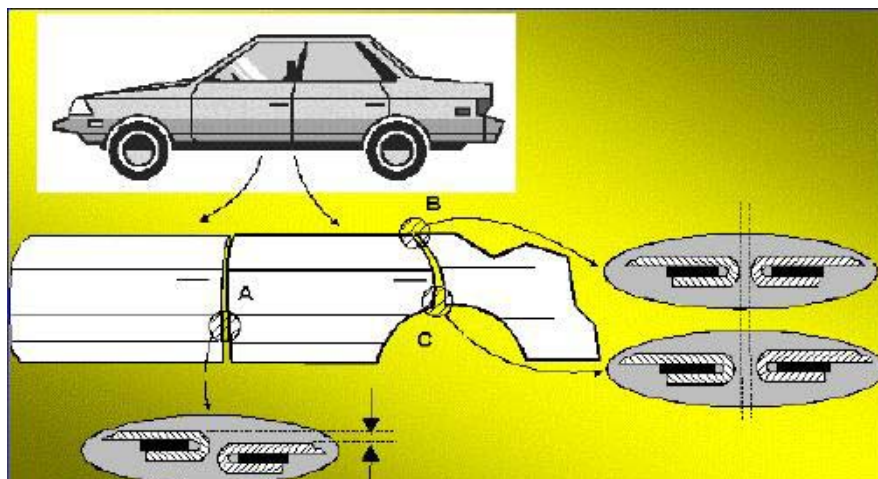
*Defectos del engatillado convencional*

Los defectos más comunes de las piezas engatilladas por métodos convencionales aparecen resumidos en la figura 2.2.



*Figura 2.2: Defectos en el engatillado mecánico [MUD97]. En esta tesis nos referiremos con el término utilizado en castellano. La traducción correspondiente está situada a la derecha de la imagen.*

Como se observa en la figura 2.3 el enrollamiento tiene que estar controlado en las distintas zonas de la pieza a engatillar para que no haya diferencia en la separación entre paneles como sucede entre las zonas B y C de esa figura.



*Figura 2.3: Influencia de los defectos de engatillado en la calidad final para el caso de una puerta de automoción [ALT99].*

Actualmente existen diversos métodos mecánicos para conseguir uniones engatilladas. En la figura 2.4 se presenta una clasificación de estos métodos según Livatyali [LIV98].

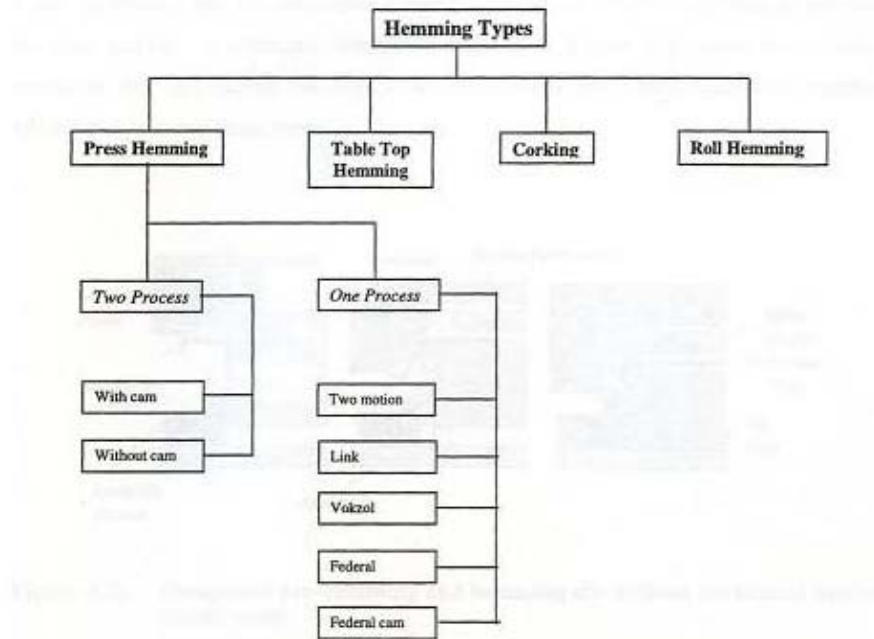


Figura 2.4: Clasificación de métodos mecánicos de engatillado según Livatyali [LIV98].

## 2.2 Engatillado mecánico convencional:

Cuando se habla de engatillado mecánico convencional se refiere al “Press hemming” o engatillado en prensa y al “Table Top Hemming” o engatillado en mesa con carros desplazables (figura 2.5).

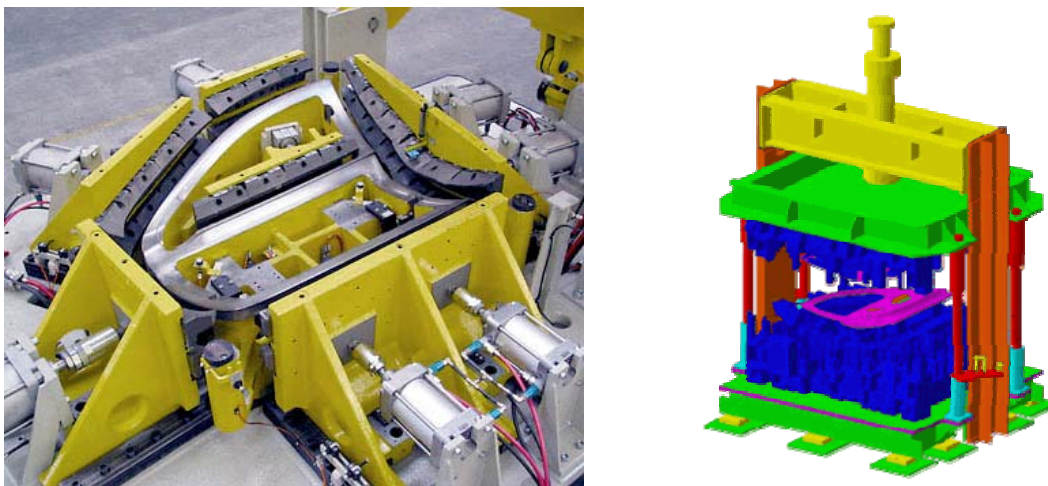


Figura 2.5: Mesa con carros desplazables (izquierda) y prensa (derecha) para engatillar

Ambos métodos engatillan la pestaña doblada a 90° ejerciendo una fuerza con unos útiles diseñados especialmente para cada pieza. Son necesarios dos juegos diferentes de útiles para realizar el engatillado, uno para la operación de pre-engatillado y otro para el engatillado final. Mientras que en

el engatillado en prensa la fuerza la ejerce una prensa cilíndrica, en el engatillado en mesa con carros desplazables esa fuerza la ejercen distintos cilindros colocados en el perímetro de la pieza.

### 2.3 Engatillado por roldana o “Roll hemming”

El engatillado por roldana se realiza con una roldana que actúa como útil aplicando una fuerza sobre la pestaña a engatillar. El conjunto pieza exterior-refuerzo interior se desplaza relativamente con respecto a la roldana mientras esta va aplicando una presión sobre la pestaña mediante cilindros hasta completar el engatillado completo. Generalmente son necesarias tres pasadas para conseguir un engatillado completo. En los últimos años se han desarrollado robots gobernados por programas CNC que realizan la deformación.

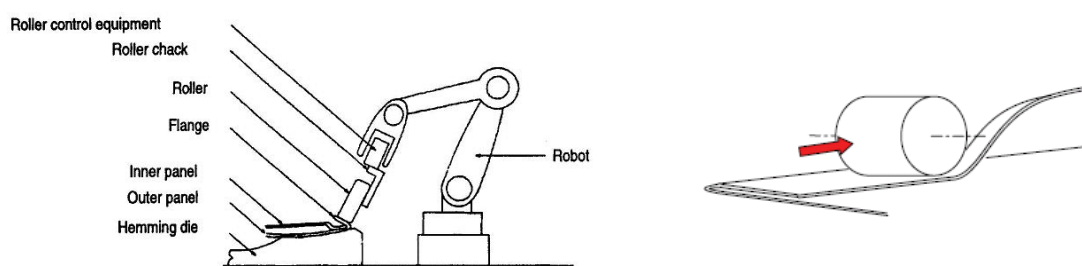


Figura 2.6: Robot de engatillado por roldana trabajando (izquierda) y esquema de la deformación que se produce durante el proceso (derecha).

### 2.4 Estado del arte

El engatillado es un proceso complejo que exige una gran precisión y calidad de acabado, por lo que la puesta a punto de las estaciones de engatillado se ha basado siempre en la experiencia y en largas y costosas puestas a punto del utillaje y de la maquinaria. Debido a este trabajo realizado a pie de máquina durante años por técnicos expertos, una gran parte de los estudios sobre engatillado mecánico no han sido publicados ya que la mayoría de ellos pertenecen a compañías privadas.

A pesar de ello existen diversos estudios sobre el engatillado mecánico convencional y más recientemente sobre el engatillado por roldana. La mayoría de estos estudios se centran en predecir el enrollamiento (figura 2.2) que sufren las piezas en función de las variables de entrada del proceso y en calcular los esfuerzos que se generan en las diversas etapas del proceso.

Los últimos estudios sobre engatillado se centran en desarrollar nuevos métodos de simulación que puedan predecir la geometría final de la pieza y así poder reducir el tiempo de puesta a punto de las estaciones de engatillado. Esta parte del estudio bibliográfico sobre simulación se realizará al comienzo del capítulo 7 dedicado a la simulación del engatillado por EMF.

A continuación se resume lo encontrado en el estudio bibliográfico realizado sobre el engatillado mecánico convencional.



Un estudio exhaustivo del engatillado mecánico ha sido realizado por el profesor Altan de The Ohio State University a través del centro de investigación adjunto a esta Universidad, ERC/NSM. En su amplio estudio cuentan con varias tesis publicadas y números artículos y ponencias en congresos. Dicho estudio analiza desde el caso más sencillo de engatillado lineal pasando por casos más complejos de engatillado curvo hasta piezas industriales, habiendo realizado también estudios sobre la simulación de dicho proceso mediante métodos de elementos finitos.

Comenzaron la investigación del engatillado con un análisis de la literatura y con la caracterización del proceso. Analizaron los parámetros fundamentales del mismo así como los defectos más comunes, pasando por un estudio de las fuerzas generadas en el mismo. Llegaron a diseñar y fabricar el equipamiento necesario para realizar experimentos físicos y de simulación en su laboratorio del ERC/NSM en Ohio [MUD97].

Partiendo de la geometría recta más simple se analizan la influencia de las variables de entrada del proceso (altura de pestaña, radio de pre-engatillado, ángulo de pre-engatillado o material) en los parámetros de salida y en la calidad final (recuperación elástica, enrollamiento, combado,...). Estos resultados se comparando posteriormente con modelos de simulación en 2D y 3D utilizando para ello la herramienta informática DEFORM [LIV98]. Existe un estudio que analiza la influencia del radio de doblado en el combado [LIV00]. Según dicho estudio, el radio de doblado tiene escasa o ninguna influencia en el combado final de la pieza.

También se estudiaron dichos parámetros de salida utilizando una geometría plana curva e introduciendo el radio de dicha curva como variable de entrada [LAR99].

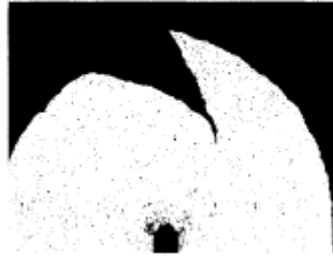
Además del estudio realizado por el NSM/OSU existen estudios desarrollados por empresas del sector del automóvil o por sus respectivos centros de desarrollo. Sin embargo al tratarse de investigaciones privadas no existe acceso a muchas de ellas.

#### *Estudios realizados para el engatillado de aleaciones de aluminio*

En 2006 G. Lin presenta su tesis doctoral en la universidad de Michigan sobre un estudio del engatillado de aluminio en colaboración con GM [LIN06]. Dicho estudio trata de evaluar los límites de doblado/engatillado para las distintas aleaciones de aluminio utilizadas por la industria de automoción. Para ello utiliza como criterio de rotura la tensión superficial máxima equivalente y posteriormente la aproxima al resultado de un ensayo de tracción convencional. Concluye que un aumento del radio de doblado disminuye las deformaciones superficiales generadas en la cara exterior y por lo tanto se reduce el riesgo de que se produzcan grietas. Estos resultados obtenidos son implementados en un programa de elementos finitos para validar los experimentos físicos con una valoración satisfactoria como método para predecir el inicio de fallo. Finalmente desarrolla un algoritmo para detectar grietas en la zona del radio de la unión engatillada mediante visión artificial.

La operación de engatillado implica el doblado a 180 grados de un radio pequeño (de 1 a 3 veces el espesor de la chapa) y una gran cantidad de deformaciones localizadas lo que representa un desafío dependiendo del material que se desee engatillar. Los aceros comúnmente utilizados en estampación

de piel exterior en automoción poseen una gran ductilidad, sin embargo el aluminio es más difícil de engatillar que el acero debido a que se producen grietas en el extremo de la unión engatillada. Este fenómeno se conoce como “edge cracking” (figura 2.7). Esta diferencia es atribuida a que el aluminio es más susceptible a la concentración de tensiones durante el proceso de engatillado [LIV04a] y [LIN06].



*Figura 2.7: Grieta tipo “edge cracking” producida al tratar de engatillar una aleación de aluminio [LIN06]*

Debido a este problema de aparición de grietas se utiliza el llamado ‘rope hemming’ (figura 2.1) para engatillar piezas de aluminio. Sin embargo este tipo de engatillado da un defecto visual ya que el GAP aparente entre piezas engatilladas aumenta (figura 1.5).

Además de los defectos que comúnmente se producen al engatillar mecánicamente (figura 2.2) existen otros parámetros útiles para poder cuantificar la calidad del engatillado como son el radio de la unión engatillada o el espesor total de la unión engatillada.

La calidad de la unión engatillada aumenta reduciendo estos dos parámetros ya que los dos influyen negativamente en la distancia o GAP aparente entre piezas engatilladas (figura 1.5). Además al utilizar aluminio en lugar de acero el espesor de la pieza ha de ser mayor para proporcionar la misma rigidez estructural al conjunto por lo que los parámetros geométricos de entrada son ya más desfavorables para obtener una calidad de unión comparable a la del acero.

Se han realizado diferentes estudios para solucionar el problema que presentan los aluminios a la hora de ser engatillados con el mismo tipo de unión que los aceros.

El engatillado por roldada mejora la calidad de la unión engatillada con respecto al proceso convencional, pudiéndose obtener calidades más parecidas a las del acero [MUD96], [CAR05] en uniones tipo “flat hemming”. En el proceso de engatillado por roldana se genera un estado tensional con una componente en el eje de doblado (figura 2.8). Ello favorece una menor elongación del grano en la zona deformada y un retraso en la aparición de bandas de cizalladura y de roturas en comparación con el estado tensional de deformación plana que se genera con el método convencional (figura 2.8).

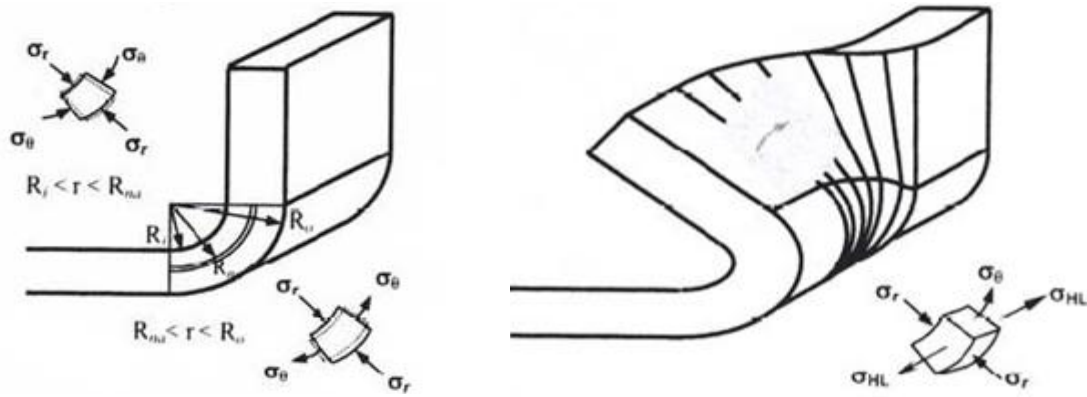


Figura 2.8: Distintos modos de deformación que se producen en el engatillado mecánico convencional (izquierda) y en el engatillado por roldana (derecha) [CAR05].

Existen varios estudios que han conseguido engatillar aleaciones de aluminio por métodos convencionales sin utilizar el modo “rope hemming”.

El primero de estos estudios lo consigue realizando un tratamiento térmico intermedio después del doblado de la pestaña a 90 grados para reducir la acritud del material [KRA03], [ESP07]. Sin embargo esto conlleva una etapa extra de tratamiento térmico entre el doblado y el engatillado en la cadena o proceso de ensamblado.

Otra alternativa al método convencional para engatillar aleaciones de aluminio es la de hacer una redistribución de las deformaciones plásticas en un área mayor de la pieza en la operación de doblado. De esta forma se consigue acumular una mayor cantidad de material en la zona a deformar durante el engatillado que además esta en compresión, permitiendo al material un alargamiento posterior mayor. De esta manera se consiguen uniones engatilladas en aleaciones de aluminio tipo “flat hemming” [GOL05].

Los trabajos sobre engatillado que se están realizando en los últimos años estudian las diversas estrategias de simulación del proceso. Esa parte de la bibliografía se presentará al comienzo del capítulo 7 sobre la simulación del proceso.

## 2.5 Conclusiones del estudio:

La bibliografía existente sobre engatillado convencional es escasa en lo que a estudios físicos se refiere. Al tratarse de un proceso que requiere de mucha puesta a punto, el conocimiento se ha ido generando en las empresas y se ha quedado en ellas.

Sin embargo existen más trabajos sobre la simulación por elementos finitos del engatillado que estudios físicos. Esta parte del estado del arte sobre la simulación del engatillado se analizará al comienzo del capítulo 7 sobre simulación.

De lo analizado sobre estudios físicos se pueden extraer varias conclusiones.

La primera y más relevante es que las aleaciones de aluminio utilizadas para piezas de piel exterior en automoción son difíciles de engatillar en una unión tipo “flat hemming” (figura 2.1). Esto es debido a su baja conformabilidad y a que el aluminio es muy susceptible a la concentración de tensiones durante el proceso de engatillado lo que produce el agrietamiento de la unión.

Para evitar este agrietamiento se han desarrollado varias soluciones pero todas ellas presentan deficiencias.

Se ha aumentado el radio de doblado utilizando una unión tipo “rope hemming” (figura 2.1) pero perjudica a la calidad de la unión ya que aumenta el GAP aparente (figura 1.5).

Se ha calentado la zona localmente aumentando su ductilidad y consiguiendo uniones planas o “flat hemming” con aleaciones de aluminio pero es necesario introducir la etapa de calentamiento intermedia.

El mismo resultado se ha conseguido haciendo una redistribución de la deformación en la etapa de doblado previa al engatillado pero presenta el inconveniente de realizar otra operación adicional de conformado.

En esta tesis se pretende aprovechar las características de la deformación a alta velocidad que tiene el EMF para conseguir uniones planas tipo “flat hemming” con aleaciones de aluminio de automoción.

## **CAPITULO 3 – CONFORMADO ELECTROMAGNETICO (EMF)**



### 3 CONFORMADO ELECTROMAGNETICO (EMF)

La técnica del Conformado Electromagnético, o Electro Magnetic Forming (EMF) radica en almacenar una energía en forma eléctrica para posteriormente realizar una descarga en un corto periodo de tiempo (20-150  $\mu$ s) a través de una bobina. La pieza de chapa a conformar (tubular o plana) se coloca a pocos milímetros (1-4mm) de la bobina que al recibir la corriente de descarga genera unas corrientes inducidas en ella. Al tratarse de dos corrientes de direcciones opuestas y variables en el tiempo, se generan entre ellas unas fuerzas de repulsión magnética que hacen que la pieza a conformar se deforme.

El EMF es un proceso de transformación de chapa enmarcado dentro de los denominados métodos de alta velocidad. Con el termino "alta velocidad" se hace referencia a la velocidad de deformación que toma la pieza durante su proceso de conformado. Mientras que las velocidades de deformación en los procesos tradicionales de conformado mecánico o de prensa oscilan entre los 0,1 y 1 m/s para estos procesos puede oscilar entre 50 y 350 m/s dependiendo del tipo de deformación.

El EMF, a pesar de ser una técnica conocida ya desde 1930 y empleada desde los años 60, es ahora, con el desarrollo de nuevos equipos y nuevos materiales cuando se le está dando un nuevo impulso.

Las principales ventajas de esta tecnología con respecto a los procesos convencionales de estampación son:

- Aumento del límite de deformación del material debido a la alta velocidad de deformación
- Reducción de la recuperación elástica
- Reducción del coste del utillaje
- Mejora en la reproducción final de la huella o matriz
- Alta repetibilidad
- Reducción del tiempo de proceso

A pesar de aportar grandes ventajas también presenta una serie de desventajas:

- No resulta muy apropiada para grandes deformaciones
- Limitado ciclo de vida de las bobinas
- Apropia sólo para materiales que conducen bien la electricidad

Los puntos que se estudiarán en el presente estado del arte son: la descripción del proceso y sus variables, estudio del equipo y de los útiles utilizados y las distintas aplicaciones de la tecnología. Los estudios realizados sobre la simulación numérica del engatillado se analizarán al comienzo del capítulo 7 sobre simulación.

### 3.1 Descripción del proceso

La figura que se muestra a continuación constituye un diagrama esquemático del proceso.

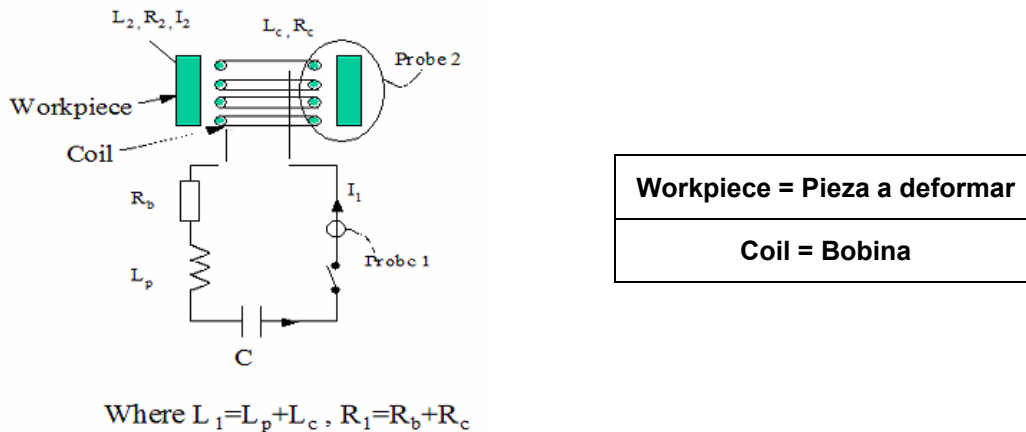


Figura 3.1: Ilustración esquemática de una operación de Conformado Electromagnético (EMF) [DAE03a].

El proceso esta gobernado por las clásicas ecuaciones acopladas:

$$\frac{d}{dt}(L_1I_1 + MI_2) + R_1I_1 + \frac{Q_1}{C_1} = 0$$

$$\frac{d}{dt}(L_2I_2 + MI_1) + R_2I_2 = 0$$

Figura 3.2: Ecuaciones acopladas para el circuito primario y el secundario [DAE03a].

Donde  $L_1$ ,  $R_1$  y  $C_1$  son la inductancia, resistencia eléctrica y capacitancia del sistema formado por el banco de capacitares y la bobina.  $L_2$  y  $R_2$  son la inductancia y resistencia eléctrica de la pieza.  $M$  es la inductancia mutua entre la bobina y la pieza.  $Q_1$  es la carga almacenada en el banco de capacitares.  $I_1$  e  $I_2$  son las corrientes que circulan por la bobina y por la pieza.  $R_b$  y  $R_c$  son las resistencias eléctricas del banco de capacitores y de la bobina.  $L_c$  es la inductancia de la bobina y  $L_p$  es la inductancia parasita del banco de capacitares.

Muchos aspectos están acoplados entre si y varían con el movimiento o deformación de la pieza por lo que resulta complicado realizar cálculos complejos ya que ese movimiento complica la resolución analítica del problema [GRO46], [JAB78], [GOU89], [ALH74], [MOO84].

Sin embargo se puede realizar un análisis simplificado del proceso del EMF. La fuerza electromagnética por unidad de longitud que actúa entre la bobina y la pieza puede calcularse mediante la siguiente aproximación:



$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

Figura 3.3: Fuerza electromagnética por unidad de longitud que actúa entre la bobina y la pieza [ALH74]

Donde  $d$  es la distancia entre la pieza y la bobina y  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del aire. Las presiones requeridas para deformar la pieza pueden ser fácilmente obtenidas ajustando la energía almacenada en el banco de capacitores.

### 3.1.1 Efecto "Skin"

Un campo magnético penetra en un cuerpo una distancia  $\delta$  antes de apantallarse hasta un 1/e de su valor inicial. Esta distancia se conoce como "Skin depth" y se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}$$

Figura 3.4: Profundidad que penetra un campo magnético en un cuerpo (Efecto "Skin") [OLI02].

Donde  $\sigma$  = conductividad eléctrica,  $\omega$  = frecuencia de resonancia y  $\mu_0$  = permeabilidad del espacio libre (constante.). Para el caso del conformado electromagnético lo interesante es conseguir apantallar el campo en la menor distancia posible, es decir, que el valor de  $\delta$  sea lo menor posible. De esta manera todo el campo electromagnético es absorbido por la superficie de la pieza a conformar y es transformado en presión electromagnética. Para obtener el menor "Skin depth" y con ello un mayor rendimiento del proceso del EMF es necesario trabajar con materiales que tengan buena conductividad eléctrica y conseguir frecuencias de resonancia elevadas en la bobina.

Esta corriente de descarga que recorre la bobina puede describirse con la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d^2 I(t)}{dt^2} + 2\xi\omega \frac{dI(t)}{dt} + \omega^2 I(t) = 0$$

$$\xi = \frac{1}{2} R_a \sqrt{\frac{C}{L_a}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_a C}} = 2\pi f$$

Figura 3.5: Ecuación de la corriente de descarga que recorre la bobina electromagnética [WAG60].

Donde  $I$  = corriente en Amperios,  $t$  = tiempo en segundos,  $R$  = resistencia eléctrica en Ohmios,  $C$  = capacitancia en Faradios y  $f$  = frecuencia en Hercios.

$$R_a = R_{coil} + R_{power\ supply}$$

y

$$L_a = L_{coil} + L_{power\ supply}$$

donde  $L$  = inductancia en Henrios.

Por lo tanto, para aumentar el rendimiento del proceso aumentando la frecuencia de resonancia ( $\omega$ ) conviene trabajar con sistemas con baja capacitancia ( $C$ ) y baja inductancia ( $L$ ).

### 3.1.2 Máquinas de EMF

Básicamente se componen de una serie de condensadores que almacenan una cantidad de energía eléctrica que posteriormente es descargada a través de los ignitrones [TUR61].

La cantidad de energía almacenada en el banco de capacitores es de entre 5 y 200Kj, utilizando para ello grandes voltajes (entre 3000 y 30000 voltios). El banco es descargado a través de un circuito de baja inductancia hasta el actuador o bobina.

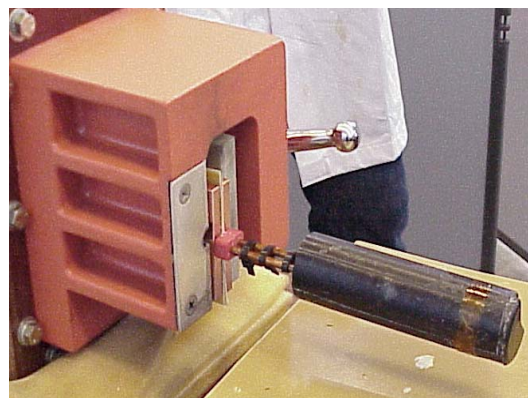


Figura 3.6: Banco de capacitores en los laboratorios de LBEIN-Tecnalia (izquierda) y conexiones del banco a la bobina (en la imagen bobina para expansión de tubo) (derecha)

Debido a las cantidades de energía descargadas instantáneamente se desarrollan grandes corrientes eléctricas en la bobina. El circuito eléctrico equivalente del sistema puede esquematizarse como un RLC. Por esta razón la corriente de descarga posee una forma sinusoidal amortiguada como se puede ver en la figura 3.7.

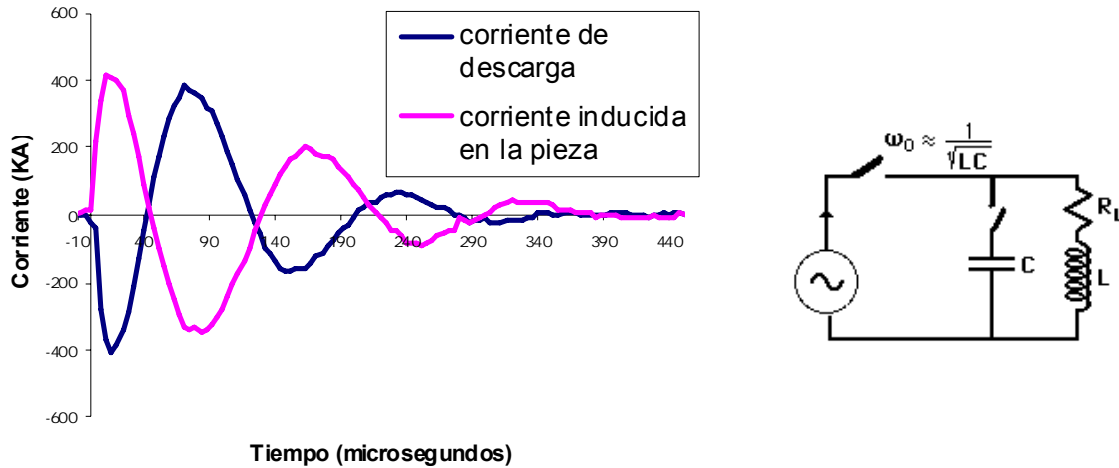


Figura 3.7: Medición de las corrientes circulantes por la bobina ( $I_1$ ) y por la pieza ( $I_2$ ) (izquierda) y circuito eléctrico equivalente (derecha).

Las corrientes pico obtenibles pueden ser de entre 10.000 y 1.000.000 de amperios y el tiempo de transición entre el valor mínimo y máximo es del orden de decenas de microsegundo. Esta corriente crea a su vez un fuerte pulso magnético transitorio en el entorno de la bobina. La pieza metálica colocada en los alrededores de la bobina esta sometida a la acción del campo magnético, y como constata la ley de Faraday, se crea una diferencia de potencial que lleva a que se desarrollen corrientes parásitas de gran intensidad en la pieza en modo análogo a como el circuito primario de un transformador las provoca en el secundario. De acuerdo a la ley de Lenz estas corrientes circularán en sentido opuesto a las corrientes que lo crearon. Estas corrientes parásitas crean a su vez un campo magnético de gran intensidad. Los campos producidos son opuestos lo que genera una repulsión entre el actuador o bobina y la pieza metálica tal y como se esquematiza en la figura 3.8.

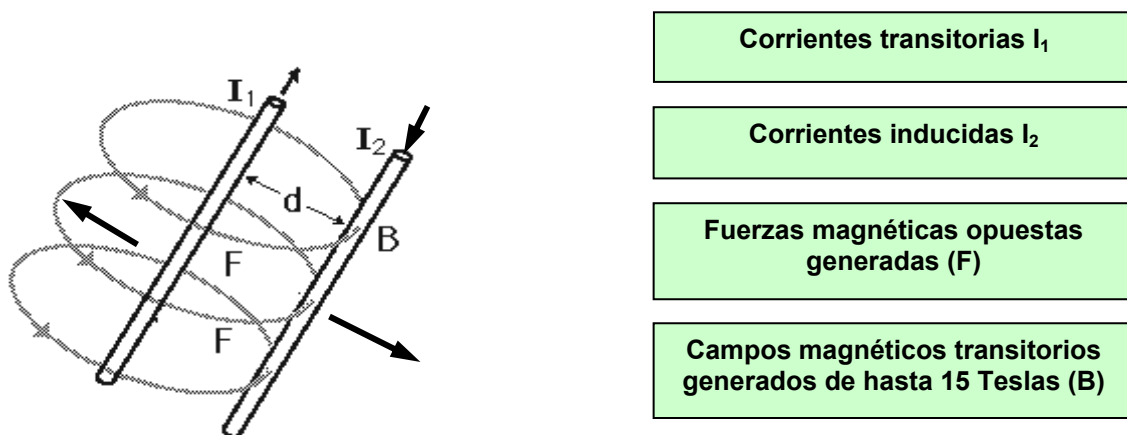


Figura 3.8: Interacción entre conductores.

La presión de origen magnético en la pieza es lo suficientemente grande como para que se produzca la deformación plástica de la misma. La acción de repulsión hace que se ejerza una presión

localizada y acelere la pieza en una fracción de tiempo mínima pudiéndose llegar a alcanzar velocidades superiores a los 300m/s.

Las ventajas derivadas del uso de esta técnica son análogas a las de cualquier técnica de alta velocidad, llámese conformado electrohidráulico ó conformado por explosivos.

La característica fundamental es que a la pieza se le da una gran velocidad en muy corto espacio de tiempo, estando la distribución de velocidad determinada por la distribución de presión que se consiga mediante los actuadores (bobinas) pertinentes.

Desarrollar un sistema resonante de alta frecuencia es clave para el éxito de la operación. Si la frecuencia de oscilación eléctrica es baja no se inducirán corrientes parásitas de elevado valor por lo que la fuerza de repulsión generada será muy baja. La frecuencia de resonancia esta directamente relacionada con los parámetros RLC del sistema, favoreciendo una baja capacitancia e inductancia el proceso.

La conductividad del material es un parámetro clave. Materiales de conductividad limitada demandan mayores frecuencias de oscilación para un conformado óptimo. Es por eso que materiales como el aluminio y el cobre presentan ventajas para ser conformados por EMF que determinados aceros no poseen.

### 3.1.3 *Ventajas del EMF*

Los métodos de conformado a altas velocidades están volviendo a cobrar importancia debido al aumento del uso de aleaciones de aluminio por la industria automovilística en aras de reducir el peso del vehiculo y con ello el consumo de combustible. La principal razón del aumento en el interés por los métodos de conformado a altas velocidades son sus ventajas con respecto a los métodos tradicionales. Estas ventajas se enumeran a continuación:

#### *Aumento de la formabilidad*

Las deformaciones obtenidas mediante EMF no están limitadas por el diagrama de deformación convencional o FLD. Se trata de velocidades de deformación de 100 a 1000 veces mayores que las obtenidas con los métodos convencionales quasi estáticos. Es sabido que al trabajar a velocidades de deformación por encima de los 50m/s se obtiene un aumento significativo en los niveles de deformación de ciertas aleaciones [VOH98], [EZR73], [WIL64], [DAE99], [TAM96], [BAL94a].

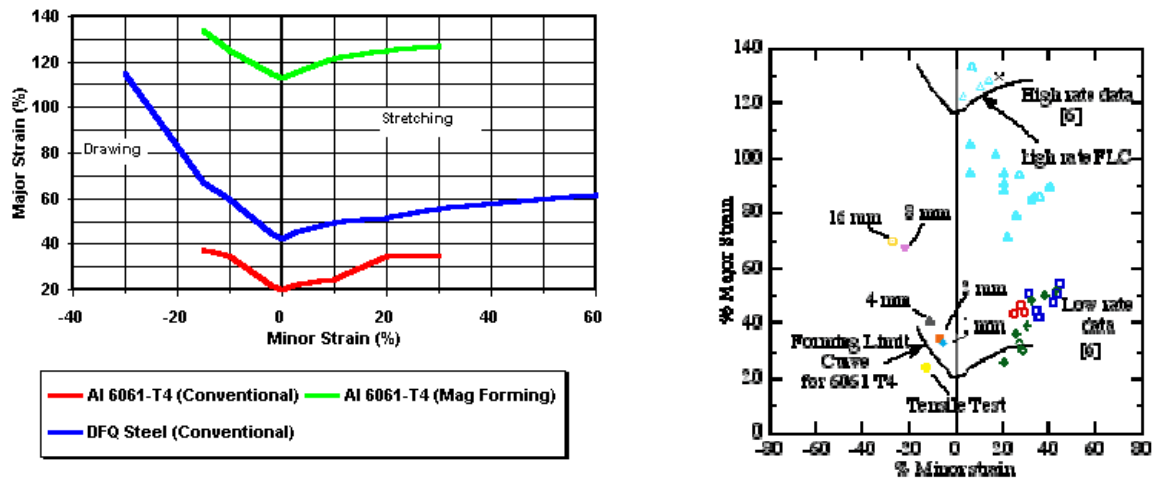


Figura 3.9: FLD comparativo para una misma aleación de aluminio 6061-T4 obtenido convencionalmente y mediante EMF. (Izquierda [MAG06] y derecha [TAM96]).

Existen varios factores claves en el aumento de la formabilidad al utilizar EMF:

A) Efectos inerciales estabilizadores durante la estricción.

Varios autores han constatado que la rotura en un ensayo de tracción se retrasa cuando aparecen fuerzas inerciales importantes [HU96], [FRE85], [FYF80], [REG86], [NEE92], [FOL88]. Las razones para este aumento en la ductilidad del material no han sido completamente explicadas, aunque existen varias teorías que apuntan a efectos inerciales como principal causa [DAE03b]. Estos efectos inerciales pueden reducir la carga que existe en una zona de estricción creciente. De esa manera se generan nuevos puntos de estricción en la muestra aumentando su deformación total.

B) Efectos interactivos entre herramienta /chapa (o “inertial ironing”):

Otras fuentes sin embargo lo atribuyen a las altas presiones generadas durante el impacto de la chapa contra el troquel o matriz [IMB04], [IMB05].

Estas presiones han sido medidas por varios autores y van desde valores de entorno al límite de fluencia del material para el caso de la expansión de tubo contra troquel [GOL99] hasta 3 veces el límite de fluencia del material para el caso de una chapa [FEN98]. Las presiones generadas durante el impacto de la pieza contra el troquel hacen que la aparición de “microvoids”, primer factor indicativo de que se va a producir una fractura dúctil, se retrase. Este retraso hace que el límite de deformabilidad del material aumente.

### Mejoras debidas al impacto

Además de contribuir al aumento del límite de formabilidad de los diferentes materiales, las altas presiones generadas durante el impacto entre la chapa y la herramienta/troquel presentan más ventajas también desde el punto de vista de proceso:

- Posibilidad de acuñado sobre grandes superficies
- Gran calidad de acuñado y micro acuñado (figura 3.10)
- Reducción de la recuperación elástica
- Mejora del acabado superficial
- Aumento del límite de conformabilidad

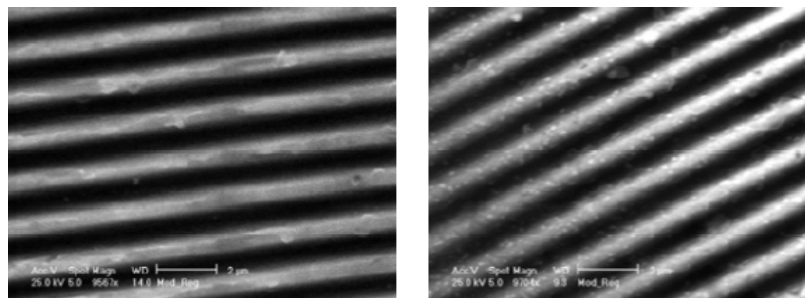


Figura 3.10: Imágenes SEM comparando la superficie original holográfica del troquel (izquierda) con la pieza acuñada mediante EMF (derecha) [KAM06].

## 3.2 Aplicaciones

A continuación se presentan las aplicaciones más comunes así como las más novedosas de la tecnología del EMF.

### 3.2.1 EMF de piezas cilíndricas

Es la aplicación del proceso más industrializada de todas debido a varias razones:

- La geometría de la pieza hace que las corrientes inducidas y los campos magnéticos generados sean homogéneos en todo el perímetro de la pieza igual que la deformación obtenida.
- La geometría cilíndrica de la pieza a deformar hace que las fuerzas magnéticas generadas en los actuadores o bobinas sean fácilmente absorbidas por el propio actuador electromagnético aumentando la vida útil del mismo. Además la fabricación de bobinas industriales robustas para las aplicaciones de EMF en piezas cilíndricas resulta bastante sencilla.

- La deformación necesaria para dichas aplicaciones es relativamente pequeña (no mas de 5-10mm) por lo que el desplazamiento del material es controlable.
- Las uniones entre piezas cilíndricas que se obtienen por EMF son de una calidad superior a las obtenidas mecánicamente en cuanto a estanqueidad y a fatiga. [BAR06]

En la figura 3.11 se muestran varias imágenes de piezas producidas en serie por EMF.



Figura 3.11: Piezas fabricadas por deformación cilíndrica mediante EMF [MAG06].

La figura 3.12 muestra varios ejemplos de las posibilidades que ofrece el EMF de tubo.

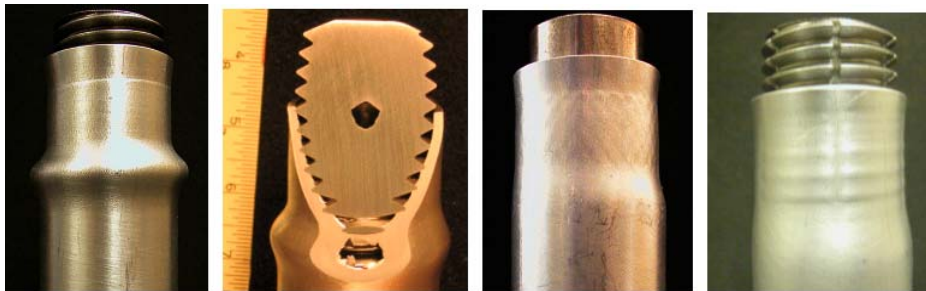


Figura 3.12: Distintos ejemplos de marcado de superficies con distintos mandrinos mediante EMF de tubo [EGU04].

Ventajas que presenta con respecto al conformado cilíndrico en prensa [MAG06].

- Conformado radial. Tanto en compresión como en expansión las fuerzas magnéticas circulares generadas hacen que el proceso sea idóneo para mantener la geometría circular.
- Permite obtener formas en tubos de aluminio que son imposibles de obtener mediante conformado en prensa.
- Reducción o eliminación de la recuperación elástica
- Reducción del coste en utillajes. El campo magnético actúa como punzón con lo que solo es necesario fabricar el macho interior
- Tamaño reducido, fácil instalación y posibilidad de desplazamiento del equipo
- Con respecto al hidroforming la principal ventaja es la reducción del tiempo de proceso

### 3.2.2 Conformado de chapa

La deformación de chapa plana no está tan desarrollada como la tubular. Esto es debido a varios factores:

- Los procesos convencionales mecánicos de deformación funcionan muy bien para el caso de los aceros por lo que no se ha visto la necesidad por parte de la industria de desarrollar nuevas tecnologías de conformado.
- Por otra parte el diseño y fabricación de las bobinas se complica mucho al tratar de generar los campos magnéticos necesarios para conseguir la deformación deseada en cada zona de la pieza.
- Si se desean fabricar piezas con una altura de embutición importante las deformaciones que se generan son difíciles de controlar ya que la chapa no es empujada por el útil sino que se desplaza libre después de recibir el impulso magnético.

Las bobinas más comúnmente utilizadas a la hora de conformar electromagnéticamente chapa plana son las denominadas multiespira (figura 3.13).

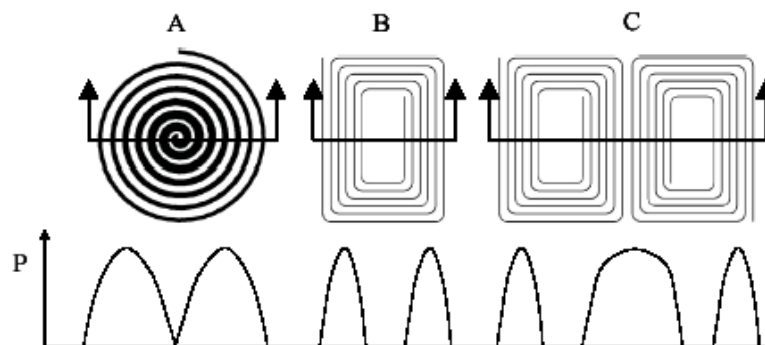


Figura 3.13: Diferentes tipos de bobina multiespira con su correspondiente distribución heterogénea de presiones a lo largo de las secciones A, B y C indicadas [OLI02].

Esta forma espiral plana se debe a la facilidad que ello representa para su fabricación. Se pueden fabricar a partir de dos métodos. Arrollando un conductor en espiral separando cada espira por un material aislante eléctrico o bien cortando la forma deseada de un planchón del material del que se desee fabricar la bobina por láser, chorro de agua, electroerosión o algún otro método. Estas bobinas tienen el inconveniente de que el campo de presiones generado sobre la pieza no es uniforme, por lo que la deformación que sufre la pieza tampoco lo es [KAM05], [JIM06], [OLI02] como se puede observar en la parte inferior de la figura 3.13.

Una solución a esta distribución no uniforme de las corrientes para chapa plana ha sido solucionada por el Prof. G. Daehn de la universidad de The Ohio State University [KAM05]. Con un diseño diferente de bobina se consiguen unas corrientes uniformes sobre la pieza. La idea es utilizar un canal exterior junto con la chapa a deformar para cerrar las corrientes. Se trata de utilizar la misma idea que en la expansión de tubo con un bobinado interior y una pieza exterior. Sin embargo solo un



lateral se deforma (la chapa plana), los otros tres lados son rígidos (“U-Channel”) y no se deforman aunque cierran el circuito de corrientes inducidas sobre la chapa (figura 3.14).

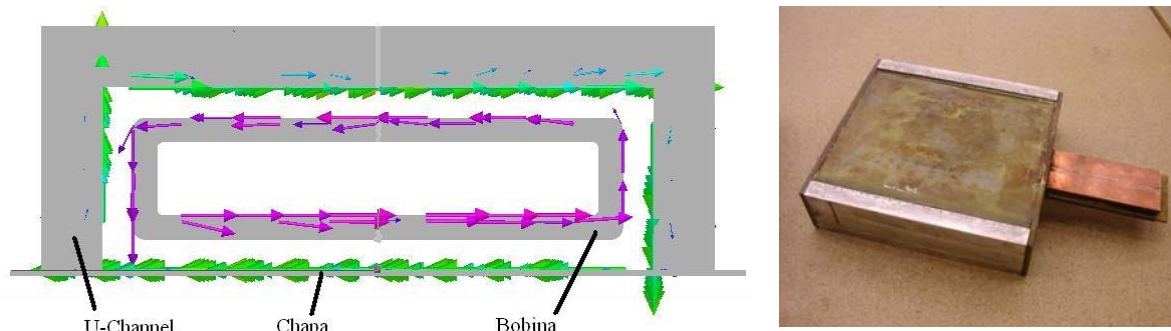


Figura 3.14: Circulación de la corriente primaria por la bobina y la secundaria por el canal exterior y la chapa (izquierda). Bobina de presión uniforme (derecha) [JIM06].

Con este diseño se consiguen corrientes uniformes en la chapa (figura 3.15).

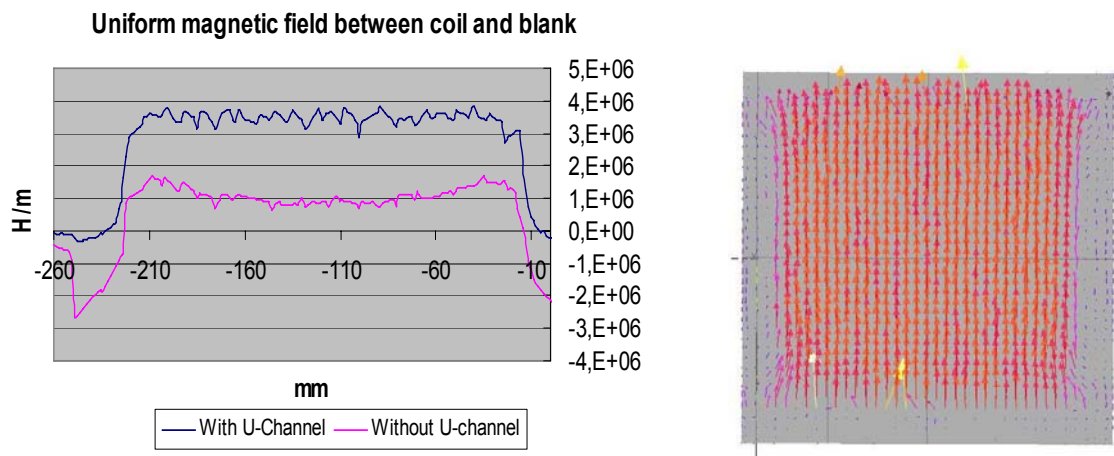


Figura 3.15: Gráfica de la distribución del campo magnético generado entre la bobina y la chapa con y sin “U-channel” (izquierda) y distribución de corrientes inducidas en la chapa (derecha) utilizando una bobina de presión uniforme [JIM06].

El principal inconveniente de esta bobina es la necesidad de un buen contacto entre la pieza y el canal exterior para que se produzca el paso de las corrientes inducidas (principalmente aplicando presión) y su elevado coste de fabricación.

### 3.2.3 EMF en prensa

El conformado en prensa del aluminio presenta problemas en comparación con el acero. Estos problemas vienen derivados de la baja capacidad de conformado que poseen las aleaciones de

aluminio [VOH98], [HOS93], [DUN02]. Sin embargo el EMF puede ser una solución para aumentar esa escasa capacidad de deformación.

Se trata de un método híbrido en el que se combinan el conformado en prensa con el EMF. Tal y como se señala en el apartado anterior, el conformado de chapa plana resulta complicado mediante EMF. Una solución para poder aprovechar las ventajas del EMF y obtener mayores deformaciones en ciertas zonas de las piezas estampadas es combinando ambas tecnologías. De esta manera se pueden obtener piezas que necesitarían varias estaciones para ser conformadas en una misma estación.

**La obtención de grandes alturas de embutición en una sola estación** (mayores que las obtenidas en prensa). Es la técnica denominada “Bump Forming”. Una bobina de conformado electromagnético es embebida en el propio útil o huella que realiza la embutición. A medida que este avanza se le van dando una serie de impulsos electromagnéticos. La combinación de ambas técnicas de deformación hace que se consigan mayores alturas de embutición (figura 3.16) [DAE02].

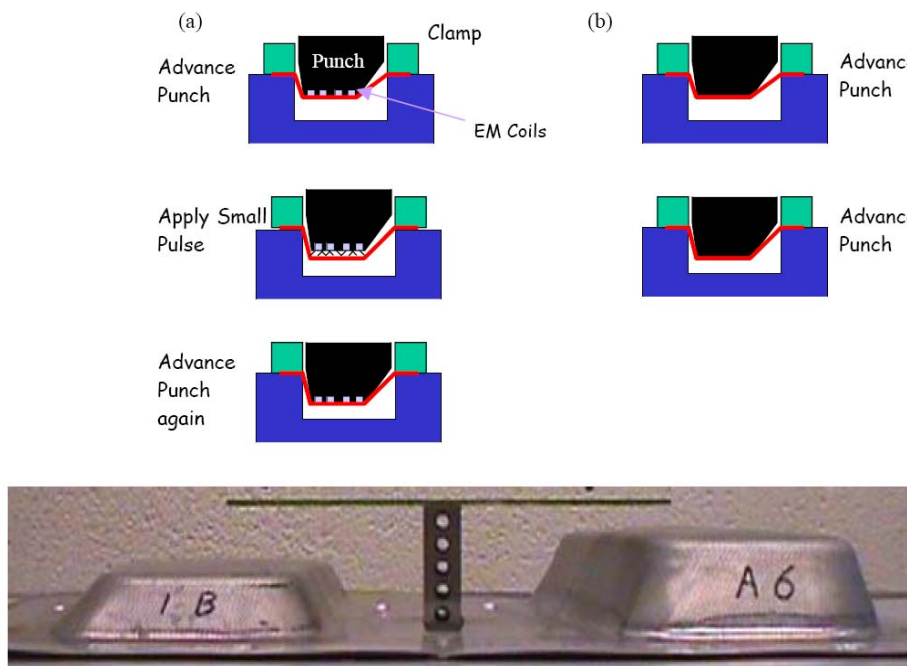


Figura 3.16: Proceso híbrido “Bump Forming” (arriba izquierda) versus proceso convencional en prensa (arriba derecha) y piezas obtenidas mediante proceso convencional en prensa (abajo izquierda) y pieza obtenida mediante proceso híbrido EMF-Prensa (abajo derecha) [SHA06]

**La obtención de zonas locales con grandes deformaciones en piezas grandes.** Para ello se embebe una bobina electromagnética dentro del troquel en las zonas donde se desea obtener una deformación extra (figura 3.17). Una vez estampada la pieza y con la matriz cerrada se le aplica un impulso electromagnético a esas zonas en las que se requieren mayores deformaciones.

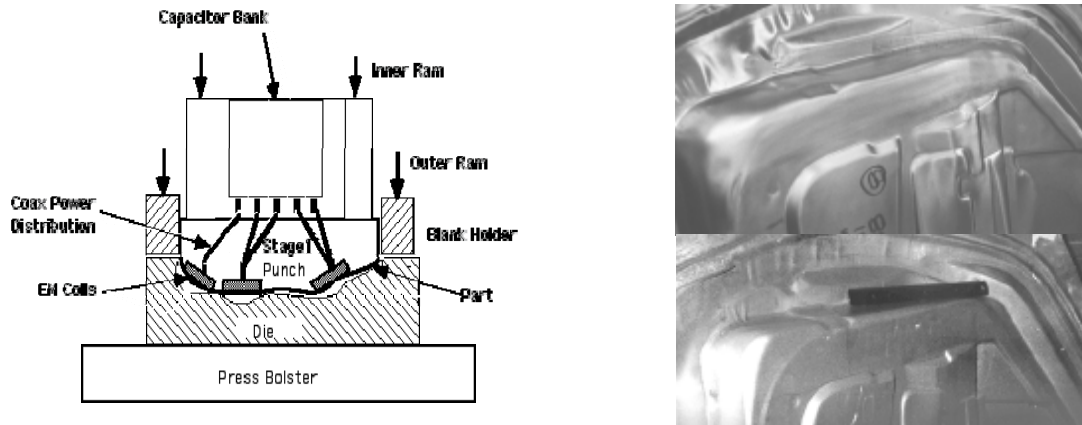


Figura 3.17: Esquema de un troquel híbrido con 3 actuadores electromagnéticos para conformar zonas complicadas de la pieza (izquierda) y pieza original en acero (derecha arriba) posteriormente fabricada en aluminio utilizando el concepto de proceso híbrido de EMF-Prensa en una zona localizada (derecha abajo) [DAE02].

De esta manera se gana tiempo en la puesta a punto de los troqueles evitando las zonas más difíciles a conformar. Asimismo se reduce el tonelaje de prensa necesario para el conformado de estas piezas.

En la tesis desarrollada por J. Shang [SHA06].se desarrollan nuevas aplicaciones de esta tecnología híbrida combinando el conformado en prensa con el EMF. Una de las aplicaciones que se estudia es **la utilización de una bobina electromagnética como pisador variable en el tiempo**. Mediante sucesivas descargas sobre el pisador electromagnético se consigue aumentar la altura de embutición de la pieza modelo (figura 3.18).

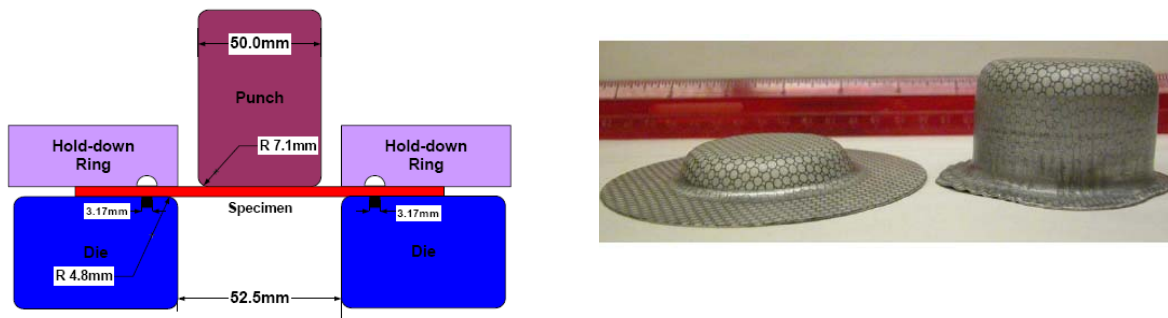
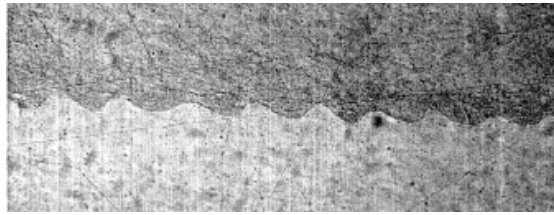


Figura 3.18: Proceso en prensa con pisador electromagnético (izquierda) y comparación de piezas obtenidas mediante proceso en prensa convencional (pieza de la izquierda en la foto de la derecha) y misma pieza obtenida con un pisador electromagnético (pieza de la derecha en la foto de la derecha). [SHA06]

### 3.2.4 Soldadura:

El EMF se utiliza sobre todo para soldar materiales disimilares [AIZ07] como acero-aluminio [KOR08] o aluminio-cobre [ZHA08]. Estos materiales son muy difíciles de soldar entre si debido a sus diferentes temperaturas de fusión, baja o ninguna solubilidad entre ellos a temperatura ambiente, formación de intermetálicos ( $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{FeAl}_3$ ), etc. Además existen otras diferencias en cuanto a sus propiedades térmicas como son el coeficiente de expansión, la conductividad térmica o el calor específico.

Con el EMF se consiguen uniones en frío entre materiales disimilares sin zona afectada térmicamente (figura 3.19).



*Figura 3.19: Esta micrografía 200x muestra una soldadura cobre-acero realizada por EMF por IAP Research en 1992. Las olas indican una unión fuerte.[MAG06]*

Las uniones obtenidas tienen mayor resistencia mecánica que el más débil de los materiales utilizados [AIZ07].

Ventajas con respecto a los métodos de soldadura tradicionales:

- La unión obtenida es de alta resistencia
- Se pueden unir materiales disimilares
- No es necesario material de aporte para las uniones
- Es un proceso a temperatura ambiente por lo que no existe ZAT (zona afectada térmicamente)
- La alta repetibilidad de este proceso reduce el número de inspecciones o test destructivos
- El proceso de soldadura tarda menos de un milisegundo

### 3.2.5 Compactación de polvos:

El polvo metálico se introduce en un tubo conductor eléctrico (cobre, aluminio o acero). El tubo cargado se coloca dentro de una bobina de compresión de tubo. Se le aplica entonces la descarga eléctrica a través de la bobina y las fuerzas cinéticas generadas en el tubo comprimen el polvo metálico hasta una forma casi de pieza final de gran densidad [MAG06].

Cualquier material que se pueda meter dentro de un tubo puede ser prensado electromagnéticamente:

- Polvos: metálicos, cerámicos, composites, nano polvos,...
- Cables, filamentos, fibras, tubos de menor diámetro.
- Una pieza de pulvimetalurgia para ser acuñada, recomprimida o para darle forma.

Un parámetro fundamental en el proceso de la pulvimetalurgia es la densidad final obtenida. Con este proceso de compactado mediante EMF se obtienen densidades mayores a las obtenidas mediante compactado en prensa (figura 3.20).

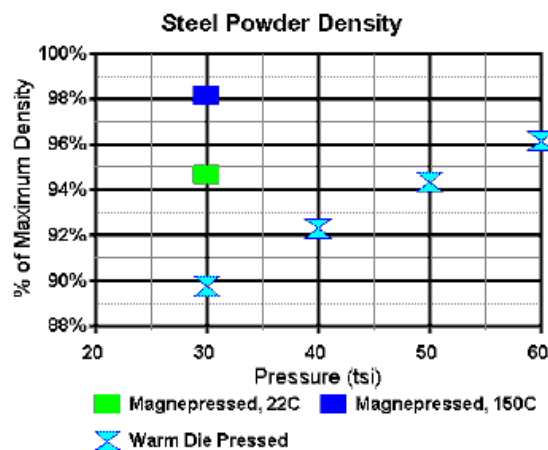


Figura 3.20: Grafica comparativa de las densidades que se consiguen con compactado en prensa con matriz caliente y con EMF a 22°C y a 150°C [MAG06].

El prensado magnético aplica una presión dinámica, no estática como la aplicada en el compactado en prensa. Por lo que el valor de 30 tsi que aparece en la grafica no es significativo. Lo importante es que la densidad final obtenida con el prensado por EMF es mayor. El polvo es prensado por la energía cinética que toma el tubo. Por lo que el limite máximo de presión esta en función de la resistencia que se le de al mandrino contra el que se comprima el polvo o la resistencia mecánica de la bobina.

Ventajas con respecto al compactado de polvos tradicional en prensa:

- Mayor densidad
- Mayor flexibilidad
- Menor inversión de capital
- Posibilidad de obtener piezas con un gran ratio longitud/diámetro

3.2.6 Desarrollo de nuevas aplicaciones para el EMF

Eliminación de la recuperación elástica (springback)/calibrado

Un impulso electromagnético es utilizado para corregir la recuperación elástica en una segunda operación de calibrado y así meter la pieza en tolerancias (figura 3.21) [VOH98], [IRI06a], [IRI05], [IRI06b], [IRI06c].

Se puede utilizar para corregir dos tipos de recuperación elástica, corregir el ángulo final deseado o corregir la forma global. Es una aplicación interesante hoy en día ya que se puede utilizar con los aceros de alto límite elástico recientemente desarrollados que dan mayores recuperaciones elásticas que los aceros convencionales. Al tratarse de pequeñas deformaciones es posible utilizar aceros, incluso de alto límite elástico, aunque su aptitud para ser conformados mediante EMF no sea la más apropiada.

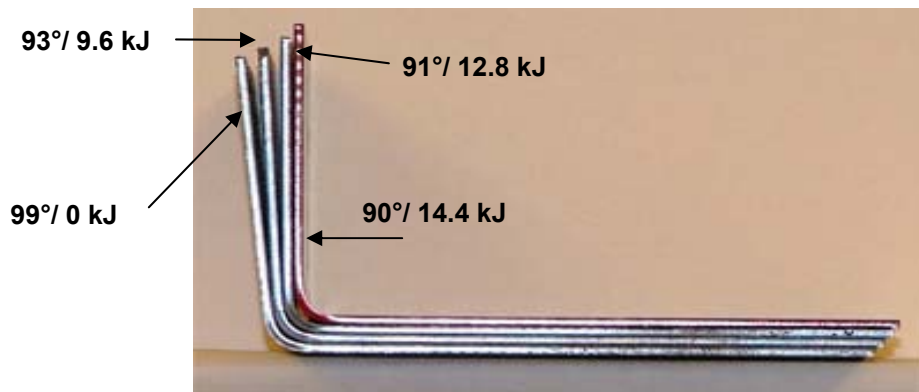
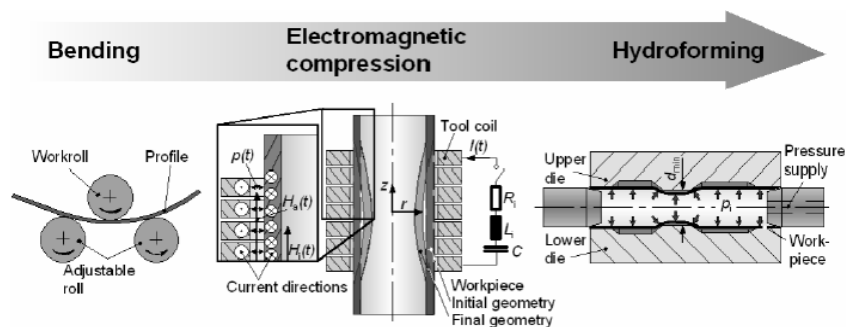


Figura 3.21: Cambio del ángulo final por EMF a distintas energías de descarga para un DP600 de 1,95mm de espesor [IRI06a]

EMF + Hidroforming

Otro proceso híbrido que se está desarrollando es el EMF combinado con el Hidroforming. Aunque por el momento no se ha podido combinar en una misma estación. El estudio al que se hace referencia utiliza una primera operación de compresión mediante EMF y posteriormente otra estación de hidroconformado (figura 3.22) [PSY06]. Se presenta como una tecnología a desarrollar en un futuro.



*Figura 3.22: Combinación de proceso EMF con hidroforming y demostrador industrial [PSY06]*

### 3.2.7 Desarrollo de nuevas bobinas para el EMF

A la hora de diseñar el proceso para la fabricación de una pieza mediante la técnica del conformado electromagnético, la parte más importante del proceso es el diseño y fabricación de la bobina electromagnética necesaria para cada caso. Es necesario predecir la forma, distribución y concentración de las corrientes inducidas en la parte que se desea conformar para así conseguir la cantidad de presión electromagnética necesaria en cada punto de la pieza. De esta manera se conseguirá la forma final deseada.

#### *Materiales*

Los materiales más comúnmente utilizados son el cobre y el bronce. Estos materiales poseen una alta conductividad eléctrica lo que disminuye la inductancia y resistencia equivalente del circuito primario aumentando la frecuencia de resonancia de la descarga y con ello la eficiencia del proceso.

Sin embargo es necesario aumentar excesivamente la sección de las bobinas para darles rigidez estructural y que puedan así soportar las fuerzas generadas en su interior. Dependiendo de la geometría de la pieza eso no es siempre posible. Es por ello que se están utilizando nuevas aleaciones que dan una mayor resistencia mecánica a la bobina sin perjudicar excesivamente la conductividad eléctrica como el latón [KAM05] o el cobre-berilio.



*Figura 3.23: Bobina uniforme (figura 3.14) de latón [KAM05]*

#### *Bobinas con apertura*

Uno de los problemas con las bobinas de compresión de tubo utilizadas en la operación de crimpado o unión mecánica cilíndrica es la imposibilidad de realizar uniones en conjuntos de geometrías complejas. Estas bobinas son anillos multiespirales concéntricos, por lo que la unión tiene que estar en un extremo del conjunto para poder introducirlo en la bobina y posteriormente electroconformarlo.

Por lo que una de las posibilidades que existe es hacer bobinas que se puedan abrir para poder introducir todo el conjunto (figura 3.24) [GOL06].

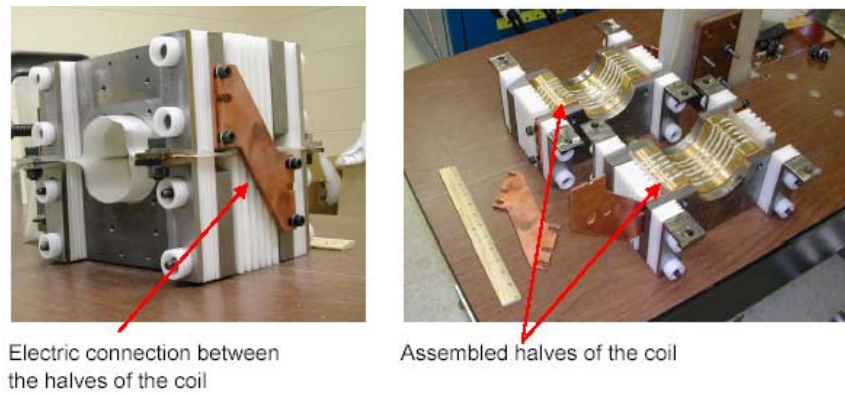


Figura 3.24: Bobina de compresión cilíndrica que se puede abrir para introducir una pieza compleja [GOL06]

### 3.2.8 EMF para materiales menos conductores que el aluminio

El EMF funciona con materiales que son buenos conductores eléctricos como el aluminio o el cobre. Sin embargo también se han llevado a cabo estudios conformando piezas de otros materiales menos conductores.

#### Acero

Por su amplia utilización y bajo coste el acero es el material que mas interesa conformar mediante esta nueva tecnología. Sin embargo, además de tener una peor conductividad eléctrica, su límite elástico es mayor que el del aluminio por lo que su conformado mediante EMF resulta complicado. Existen dos soluciones, aumentar la energía de descarga o utilizar un “driver” o pieza intermedia de un material conductor sobre el que se inducen las corrientes y empuja la pieza superior de acero (figura 3.25) [MAL05].

En este estudio se analizó la deformación obtenida para varios aceros utilizando el EMF. Los experimentos se llevaron a cabo lanzando una chapa de acero contra varios punzones de diferentes geometrías para obtener distintos estados de deformación utilizando la ayuda de un “driver” o pieza intermedia de cobre.

La formabilidad de los aceros utilizados aumento ostensiblemente con respecto a los datos obtenidos mediante ensayos cuasi-estáticos. Este aumento es más dramático para los aceros con baja conformabilidad que para los aceros que poseen una conformabilidad mayor.

Este aumento es atribuible a la alta velocidad de deformación utilizada y a las altas presiones generadas al impactar contra el troquel.



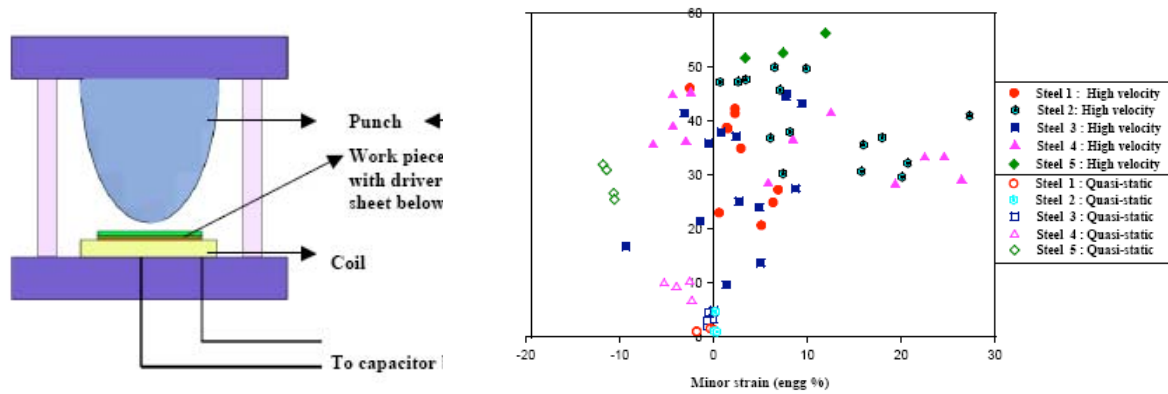


Figura 3.25: Set-up experimental con el driver colocado entre la pieza a deformar (“work piece”) y la bobina (“coil”) (izquierda). Comparación de alargamientos obtenidos en ensayos quasi-estáticos y en ensayos realizados con EMF para distintos aceros [MAL05]

### Magnesio

También se ha probado experimentalmente el aumento del límite de deformación del magnesio al conformarlo por EMF (figura 3.26) [ULA06].

El magnesio tiene muy baja conformabilidad en frío debido a la estructura atómica HCP que presenta. Al aumentar su temperatura hasta los 260°C su estructura cambia a BCC aumentando considerablemente su formabilidad. Sin embargo en los ensayos realizados a temperatura ambiente por EMF también se observa un aumento de su límite de rotura.

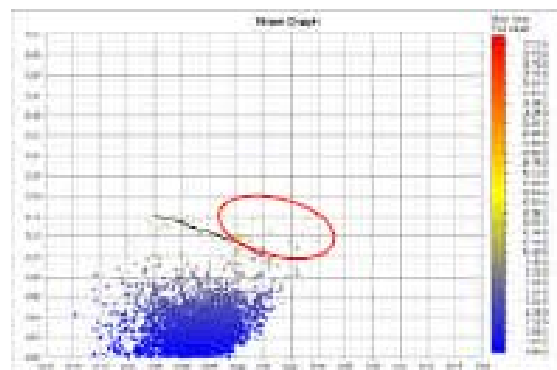


Figura 3.26: Mapa de deformaciones para la aleación de magnesio AZ31B obtenida por EMF con los puntos fuera del FLD convencional señalados en rojo [ULA06]

### 3.3 Engatillado por EMF

No existe ningún estudio científico a día de hoy publicado sobre engatillado mediante EMF. Existen varias patentes al respecto y un proyecto de investigación en curso entre la Universidad de Ohio State y el centro tecnológico sueco de Svensk Verktygsteknik. Aprovechando la estancia realizada en

la universidad de Ohio State durante la realización de esta tesis pude utilizar el equipamiento fabricado dentro de este proyecto para hacer algunos experimentos cuyos resultados aparecen reflejados más adelante.

En lo referente a las patentes sobre engatillado por EMF decir que en ellas se desarrollan diferentes procesos de engatillado para la industria del automóvil. Una de ellas realiza todas las operaciones del proceso de engatillado (doblado, pre-engatillado y engatillado) con EMF en diferentes etapas [BRA05]. La otra de las patentes a las que se hace referencia realiza incluso la operación del corte de la pieza inicial [HER05] (figura 3.27). Sin embargo en estas patentes el nivel descriptivo del equipamiento necesario es escaso. Solo se ha patentado la idea de engatillar con el EMF y no se comenta nada sobre aspectos fundamentales como la forma de la bobina o los ajustes que va a tener la propia bobina para conseguir el engatillado de piezas reales.

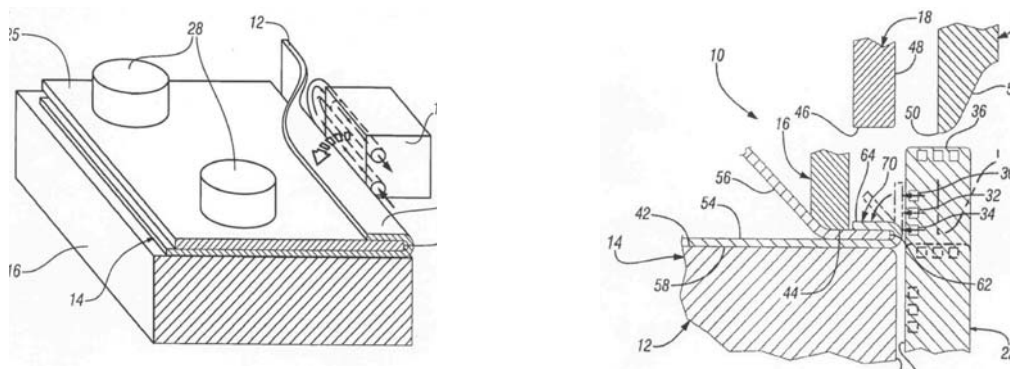


Figura 3.27: Patentes sobre engatillado electromagnético desarrolladas por GM [BRA05] (izquierda) y [HER05] (derecha)

Existe una tercera patente desarrollada por Chrysler que se limita a darle un último golpe después de la operación final de engatillado para conseguir la unión mecánica entre ambas piezas (figura 2.28) [MCC05].

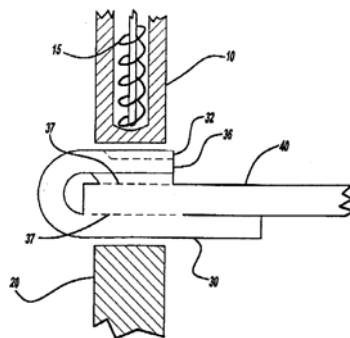


Figura 3.28: Máquina patentada para engatillar mediante EMF desarrollada por Chrysler [MCC05]

Estas patentes aun estando registradas tienen muy poco nivel de detalle técnico por lo que no son un impedimento a la hora de desarrollar esta tesis.

## **CAPITULO 4 – CONCEPTOS BASICOS**



## 4 CONCEPTOS BASICOS

Este capítulo tiene como objetivo el aclarar ciertos conceptos relacionados con el engatillado y con el EMF necesarios para una correcta comprensión de esta tesis.

El capítulo consta de una primera parte de conceptos básicos para el diseño de bobinas de EMF. En este apartado se dan las pautas a seguir a la hora de diseñar una bobina de EMF para posteriormente explicar su aplicación concreta al caso del engatillado.

En el siguiente apartado se definen las variables geométricas que aparecen en el engatillado así como los parámetros (de calidad y geométricos) de salida. Esos parámetros se utilizarán para medir la validez de la tecnología del EMF para el engatillado. Conviene tener claro esos conceptos ya que se hará referencia a ellos a lo largo de todo el documento.

#### 4.1 Diseño de bobinas para EMF

La bobina es el elemento fundamental a tener en cuenta a la hora de diseñar cualquier proceso de fabricación por EMF. Es el equivalente al troquel en el proceso de estampación convencional. Un buen diseño del mismo es fundamental para conseguir la pieza o la deformación deseada.

El EMF presenta sus propias limitaciones que son únicas debido a los fenómenos físicos que participan en el proceso y a las altas velocidades de deformación que se generan en la pieza.

A la hora de diseñar cualquier bobina para el conformado electromagnético hay que tener en cuenta varios aspectos claves para su correcto funcionamiento:

1.- El fenómeno de inducción de corrientes parásitas en la pieza y la generación de campos electromagnéticos que se repelen es muy local en el espacio. Esto se debe a que la descarga eléctrica a través de la bobina sigue un régimen transitorio de varios microsegundos de duración. Por eso **la distancia entre la bobina y la pieza a deformar por EMF ha de ser del orden de varios milímetros (menos de 5) para que el proceso sea eficiente.**

2.- El recorrido que sigue el conductor de la bobina es la zona en la que se inducen las corrientes sobre la pieza. Es en esa zona donde se genera el campo de presiones electromagnético (figura 4.1). Por lo tanto **el impulso electromagnético se aplica en la zona inmediatamente enfrentada al conductor de la bobina.**

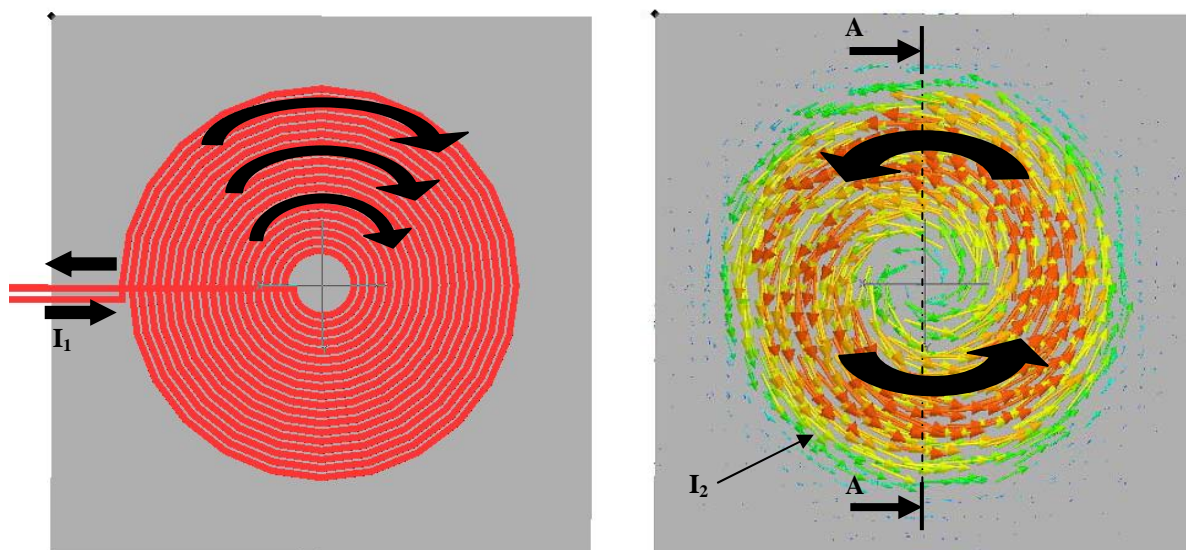


Figura 4.1: Corriente de descarga ( $I_1$ ) que recorre una bobina de 19 vueltas (izquierda) y corrientes inducidas en la chapa ( $I_2$ ) de dirección opuesta a las primeras (derecha) [JIM06].

Si graficamos la presión magnética generada en la sección AA de la bobina (figura 4.1) obtenemos la forma de la presión magnética generada en la superficie de la chapa (figura 4.2). El campo magnético tiene mayor intensidad donde está enfrentado con la bobina, mientras que en el centro es cero ya que no hay conductor eléctrico de la bobina en esa zona.

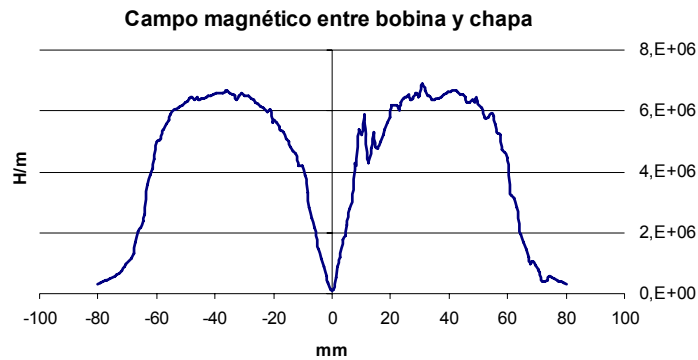


Figura 4.2: Campo magnético generado entre la bobina de la figura 4.1 y la chapa [JIM06].

3.- El circuito que crean las corrientes inducidas en la pieza a deformar es importante. **La bobina debe ser diseñada de tal manera que las corrientes inducidas sobre la pieza sigan un circuito con el mismo recorrido que el de la corriente que recorre la bobina.** De esta manera se obtiene un rendimiento eficiente de la bobina. En la figura 4.1 se puede observar como la corriente  $I_1$  que circula por la bobina crea una corriente inducida  $I_2$  que recorre la chapa siguiendo el camino que le marca la bobina y formando un circuito cerrado.

4.- La bobina debe soportar las fuerzas generadas durante la deformación. Cuando hablamos de descarga o disparo electromagnético hay que pensar en unos campos magnéticos del orden de 15 Teslas, que generan unas fuerzas electromagnéticas de gran intensidad aplicadas durante un corto espacio de tiempo. Lo que puede ser aproximado a un golpe o impulso. Al igual que pasa cuando se da un golpe, la fuerza descargada en el golpe es también recibida por el golpeador en forma de fuerza de reacción. Si lo asemejamos al símil del golpe que da un martillo, cuando el martillo hace una fuerza para introducir un clavo, esa misma fuerza es absorbida por el martillo que tiene que estar diseñado y fabricado para soportar esas reacciones. En el caso del EMF es la bobina la que debe soportar toda la fuerza de reacción generada durante la descarga del banco de condensadores. Por lo tanto, **las bobinas para EMF deben tener una rigidez estructural para poder soportar un número de disparos aceptable sin deformarse.**

#### 4.1.1 Bobinas de engatillado por EMF:

Después de presentar los requerimientos de diseño y fabricación más importantes que deben cumplir las bobinas de EMF en general, vamos a analizar el caso del engatillado para ver como cumplir todos los requerimientos arriba explicados.

La geometría de pestaña más común en piezas de automoción es la pestaña continua, es decir, una pestaña que sigue todo el perímetro de la pieza exterior. **La pestaña continua se presta muy bien para ser deformada mediante EMF. Con una bobina monovuelta e introduciendo la pieza en su**

interior se consiguen unas corrientes inducidas en la pestaña de tal manera que cierran perfectamente y generan unas presiones magnéticas radiales que deforman la pestaña engatillando la pieza (figura 4.3).

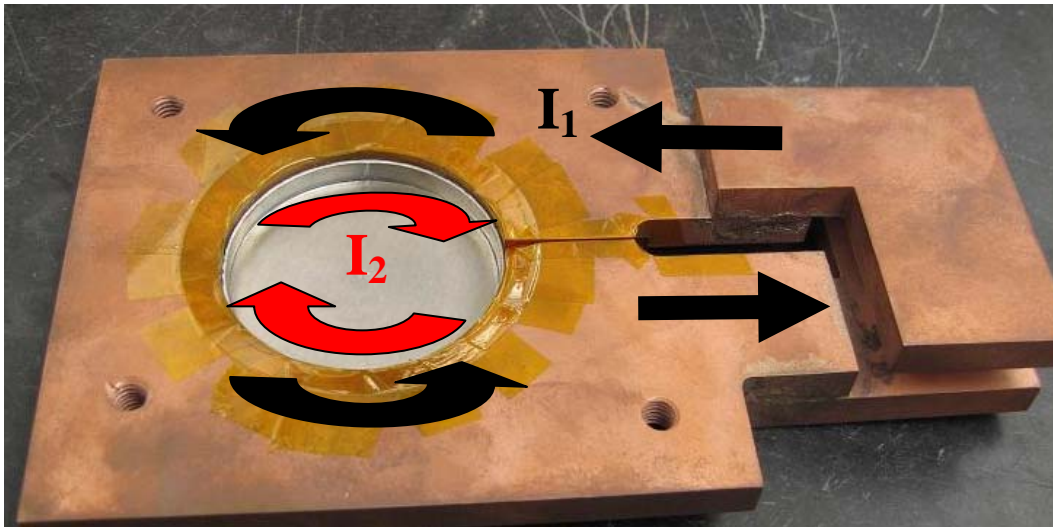


Figura 4.3: Bobina diseñada para engatillar una geometría cilíndrica con las corrientes de descarga  $I_1$  en negro y las corrientes inducidas sobre la pieza  $I_2$  en rojo.

Tal y como se aprecia en la figura 4.3, las corrientes inducidas en la pieza ( $I_2$ ) cierran su circuito sobre la propia pieza siguiendo todo el perímetro de la pestaña.

**La distancia entre la pestaña** (que es la zona donde queremos aplicar la presión) **y la bobina es fácil mantenerla por debajo de 1 milímetro lo que aumenta el rendimiento del proceso.**

**Las bobinas para engatillado por EMF son sencillas de fabricar y pueden ser fabricadas tan robustas como se quiera.** Basta con aumentar el espesor de la chapa de cobre con el que se va a fabricar la bobina.

#### 4.2 Definición de variables, defectos y parámetros del engatillado

El siguiente apartado consta de 3 partes. En la primera parte se definen las diferentes zonas geométricas de una unión engatillada. En la segunda parte se definen los defectos que pueden aparecer en una unión engatillada y que por lo tanto han de tenerse en cuenta para el desarrollo de la tecnología del engatillado por EMF en esta tesis. Finalmente se define lo que se considera una unión engatillada de calidad buena y que es por lo tanto el objetivo de este trabajo.



#### 4.2.1 Diferentes zonas de una unión engatillada:

En la figura 4.4 se explica cuales son los términos empleados para nombrar cada una de las zonas de la pieza antes de engatillar.

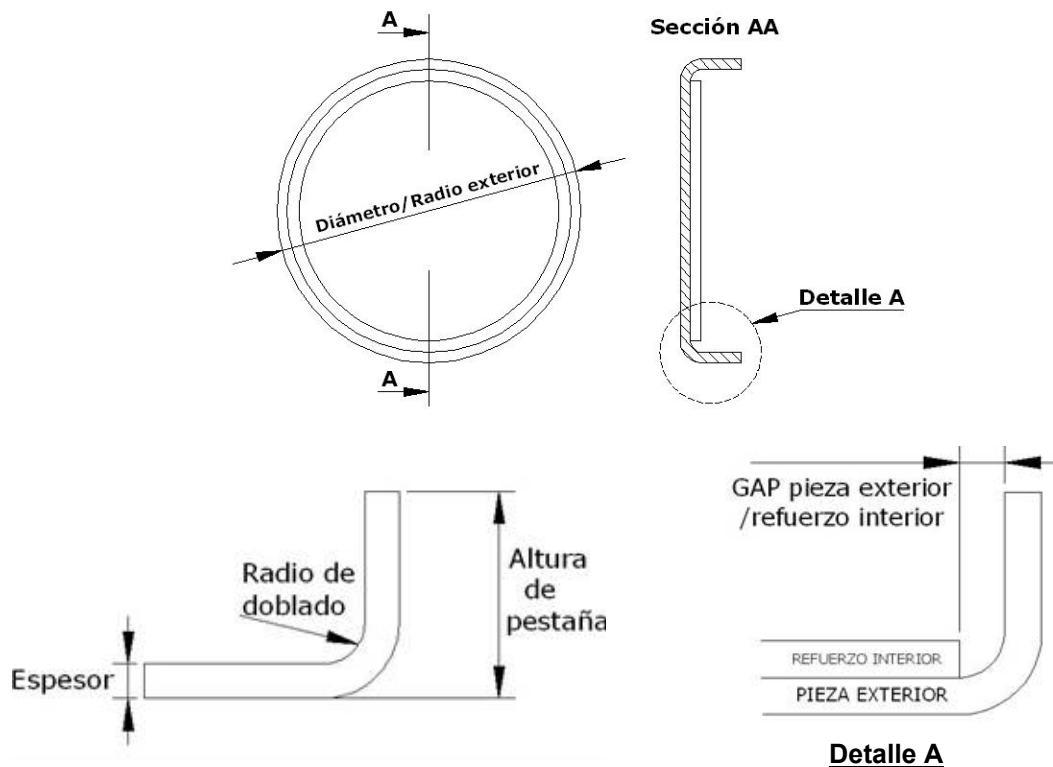


Figura 4.4: Definición de la variable de entrada diámetro o radio exterior (arriba) Esquema de las diferentes partes de la pieza exterior antes de engatillar (abajo a la izquierda) y pieza exterior con el refuerzo interior en posición para ser engatillados (abajo a la derecha) extraídas del detalle A.

De las diferentes variables geométricas presentadas en las imágenes de arriba figura 4.4 algunas serán objeto de estudio y las definiremos como variables de entrada a estudiar. Esas variables estudiadas son el diámetro exterior, el radio de doblado, la altura de la pestaña y el GAP entre la pieza exterior y el refuerzo interior. Se volverán a definir en los diferentes planes experimentales realizados.

#### 4.2.2 Defectos tipo en una unión engatillada

A continuación se describen los defectos tipo de una unión engatillada y que por lo tanto son los parámetros de salida del proceso de engatillado que se van a medir en esta tesis. Analizando los resultados de esas mediciones se evaluará la capacidad del EMF como tecnología para el engatillado.

Combado:

Aunque en la bibliografía algunos autores lo separan en dos defectos (“warp” y “recoil”), para este estudio se tomará como un mismo defecto al que se denominará **combado**. Se medirá la diferencia máxima existente entre el punto más alto y el más bajo tal y como se explica en la figura 4.5.

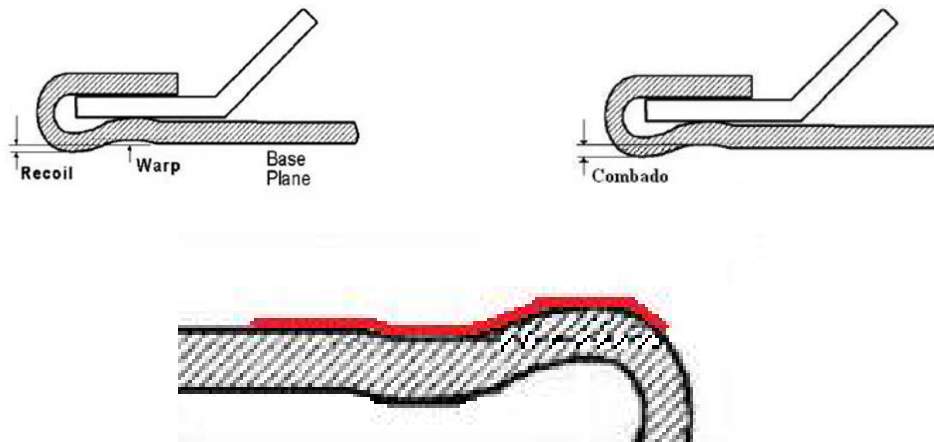


Figura 4.5: Defectos de combado (warp) y retroceso (recoil) recogidos en la bibliografía sobre engatillado [LIV04b] (izquierda arriba) y definición de combado que será el parámetro que se medirá en esta tesis (derecha arriba). En rojo aparece la zona que se medirá con el perfilómetro confocal para cuantificar este defecto (abajo).

Se trata de un defecto de superficie que no es fácilmente apreciable a simple vista ya que el orden de valores en los que nos movemos para este tipo de defectos es de micras [LIV04b]. Aunque se trata de un defecto pequeño en magnitud, puede llevar a cambios bruscos en el reflejo de la luz en las piezas una vez pintadas lo que se traduce en un defecto de apariencia. En la industria se mide pasando una piedra abrasiva prismática u observando la pieza con luces especiales (diffractometría) para detectar este defecto superficial analizando el reflejo de la luz (figura 4.6). De esta manera, expertos en conformado de chapa para automoción, califican la pieza como apta o no apta.

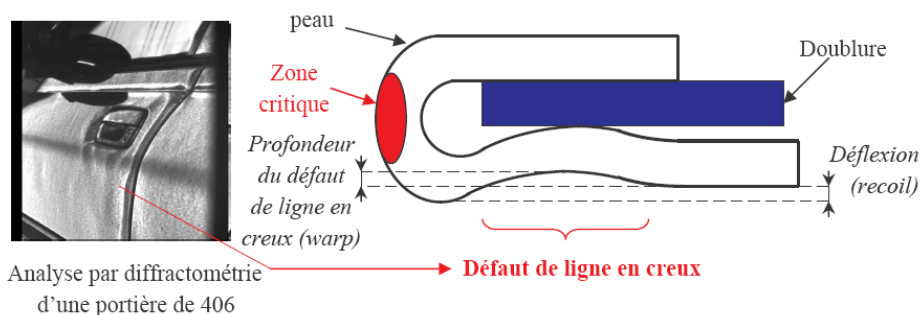


Figura 4.6: Análisis por diffractometría realizado por PSA para analizar el defecto del combado en una puerta. [LAN06]

Existen diversos estudios sobre las causas de este defecto de aspecto superficial. Estos estudios tratan de analizar y descubrir las variables de proceso más influyentes en la aparición de dicho

defecto. Un estudio realizado en simulación 2D del proceso de engatillado por G. Zhang [ZHA01], separa el origen del defecto en dos causas:

- 1- El comado que se produce durante el pre-engatillado y el engatillado mecánico
- 2- El comado que se produce por la recuperación elástica del material cuando se deja de aplicar la carga.

Durante la operación de engatillado se observa que el comado está en función de la posición final de la herramienta y que existe una posición final óptima donde se minimiza este defecto (figura 4.7).

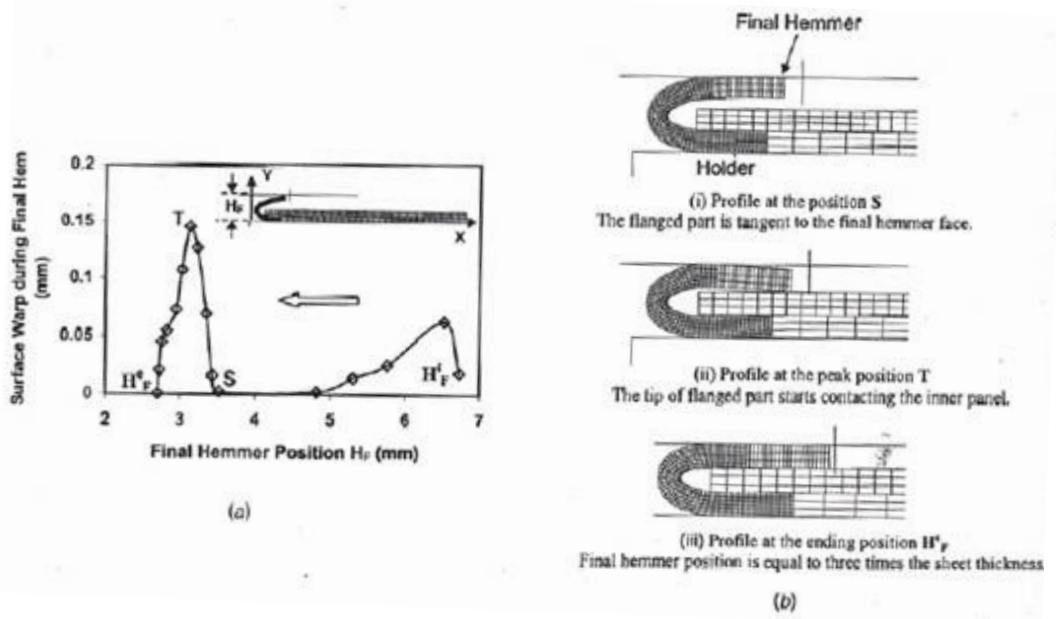


Figura 4.7: Evolución del comado (“Surface Warp”) durante la etapa de engatillado convencional para distintas posiciones de la herramienta de engatillado final (“Final Hemmer Position”) [ZHA01].

La explicación a este fenómeno que da el autor es el cambio de la zona de aplicación de la fuerza sobre la pestaña a medida que desciende la herramienta. Ese cambio en la zona de aplicación de la fuerza produce un momento de doblado reverso que genera el comado (figura 4.8).

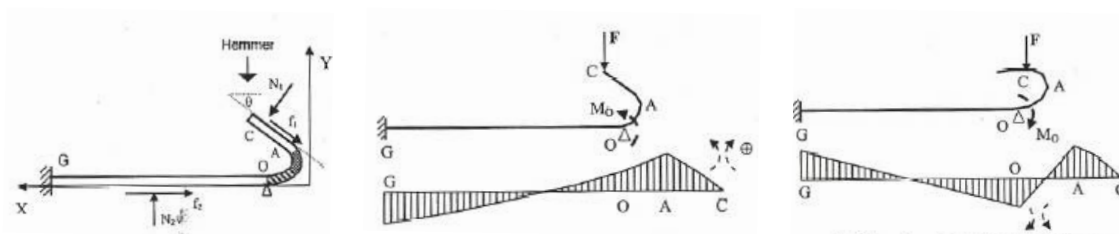


Figura 4.8: Explicación de porque se produce el comado en función del lugar de la aplicación de la fuerza, lo que genera el momento de doblado reverso o “reverse bending moment” en la imagen de la derecha. [ZHA01].

Sin embargo, la mayor parte de los estudios sobre engatillado citan como principal causa del combado a la recuperación elástica del material después de las operaciones de pre-engatillado y engatillado [LAN06], [LIN06].

En esta tesis se utilizará un perfilómetro confocal situado en los laboratorios de MU (Figura 4.9) para realizar las mediciones necesarias para cuantificar el combado. Este equipo realiza el barrido de una superficie específica y nos devuelve una imagen 3D de la zona. Esta imagen se trata para conseguir el valor del combado en el extremo de la unión.



Figura 4.9: Perfilómetro confocal para realizar las mediciones del combado situado en MU.

Un equipamiento similar ha sido utilizado en estudios anteriores para medir ese mismo parámetro [LIV00] por lo que los resultados pueden ser comparados.

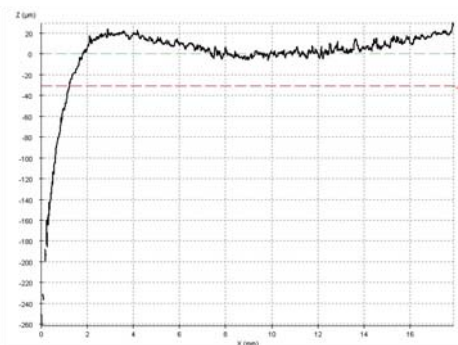
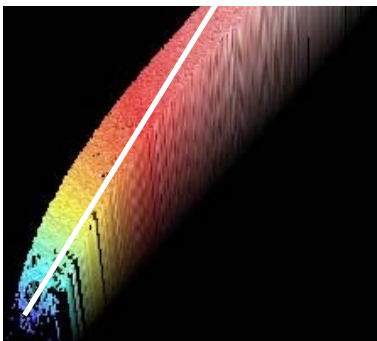


Figura 4.10: Imagen 3D obtenida del extremo de la unión engatillada (izquierda) y sección longitudinal representada con una línea blanca donde se mide el valor total del combado (derecha).

#### Enrollamiento:

Aunque sea descrito como un defecto en realidad se trata de un parámetro de salida a controlar. Una pieza puede cumplir perfectamente los requerimientos de calidad teniendo un valor de enrollamiento positivo o negativo elevado. Lo que es realmente fundamental es tenerlo bien controlado a lo largo de todo el contorno de la pieza a engatillar para que las medidas finales sean las deseadas por el cliente y posteriormente la distancia entre piezas engatilladas sea constante (figura 2.3).



Figura 4.11: Enrollamiento negativo (roll-in) (izquierda) y enrollamiento positivo (roll-out) (derecha) [LIV04b].

Es el parámetro más estudiado en la literatura sobre engatillado. Estos estudios se centran en la predicción de este parámetro de salida en función de las variables de entrada del proceso de engatillado [LIN05].

*Zona deformada:* (o también “radio de la unión engatillada” en la literatura):

La zona deformada corresponde a la distancia desde el extremo final de la unión engatillada hasta el comienzo de la zona recta de la pieza exterior (figura 4.12).



Figura 4.12: Zona deformada de una unión engatillada

La zona deformada de la unión es un parámetro importante para el GAP aparente como se explica en el capítulo 1. Este parámetro se medirá analizando imágenes digitales de las uniones engatilladas con el programa ImageJ, un procesador de imágenes en Java.

*Grietas:*

La aparición de grietas es importante cuando se estudia la formabilidad de los materiales. Para los estudios de doblabilidad/engatillabilidad las grietas se pueden definir como pequeñas penetraciones dentro del espesor de la chapa del orden de 2-5% del espesor. En general se refiere a las grietas como una aparición macroscópica del daño sufrido en una deformación dentro o fuera de la superficie.

En su tesis sobre engatillabilidad y doblabilidad de aluminio, Gusing Li [LIN06] se refiere a la creación de grietas como un comportamiento estocástico donde pequeñas grietas aparecen inhomogeneamente en la superficie deformada de la pieza y se unen produciendo grietas mayores a

medida que se aumenta la deformación aplicada. Utiliza una formulación para la detección de grietas definiendo una longitud de grieta característica ( $w_c$ ). Para ello se basa en un análisis de la calidad superficial a través del cual establece el umbral crítico para la detección de grietas.

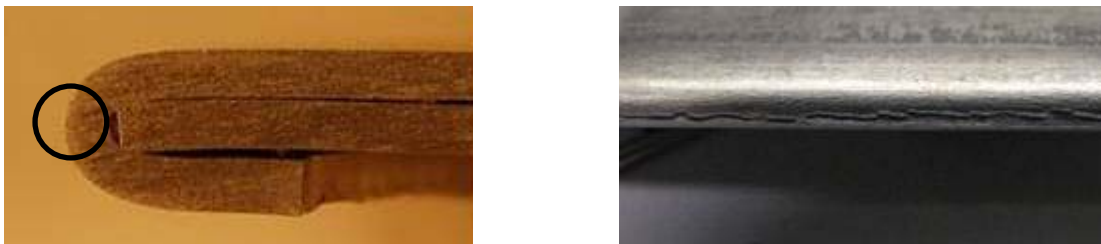
$$w_c = \frac{\sum_{i=1}^k A_i}{L_0} = 2.5\% \times t$$

Donde  $k$  es el número total de grietas,  $A_i$  es el área de la grieta  $i$ , mientras que  $L_0$  es la longitud de la zona medida o ensayada. Por lo tanto, para una chapa de 1mm de espesor la longitud de grieta crítica sería de 25 micras.

Para aplicar correctamente este criterio es necesario hacer dos consideraciones: las grietas tienen que estar distribuidas con cierta homogeneidad sobre la superficie a estudiar y para la medición de tensiones, la continuidad del material no debe de estar severamente dañada por la presencia de grietas. Sin embargo, dentro de la norma que estandariza y regula los ensayos de doblado, existe un criterio normalizado para establecer el grado de daño sufrido por la chapa doblada o engatillada.

Este criterio utilizado para clasificar las grietas es el especificado por la norma ASTM E290 que dice lo siguiente:

Después del doblado (según la norma ASTM E290 [AST97]), la superficie convexa del doblado es examinada en busca de evidencias de grietas o irregularidades superficiales. Si la probeta se fractura, el material no ha pasado el ensayo. Cuando la probeta ensayada no rompe, el criterio para establecer si el material ha pasado el ensayo o no lo da el número y tamaño de las grietas u otras irregularidades superficiales visibles a simple vista en la cara convexa de la probeta doblada o engatillada y que es especificada por los requerimientos de cada producto (figura 4.14). Las grietas situadas a menos de un espesor de distancia del extremo de la probeta no son concluyentes para considerar el ensayo como no pasado. Las grietas se buscarán en la cara exterior del extremo de la unión engatillada tal y como se muestra en la figura 4.13.



*Figura 4.13: Sección del extremo de una unión engatillada con la zona donde se producen la grietas dentro de un círculo (izquierda) y vista frontal de la misma pieza donde se aprecian las grietas (derecha).*

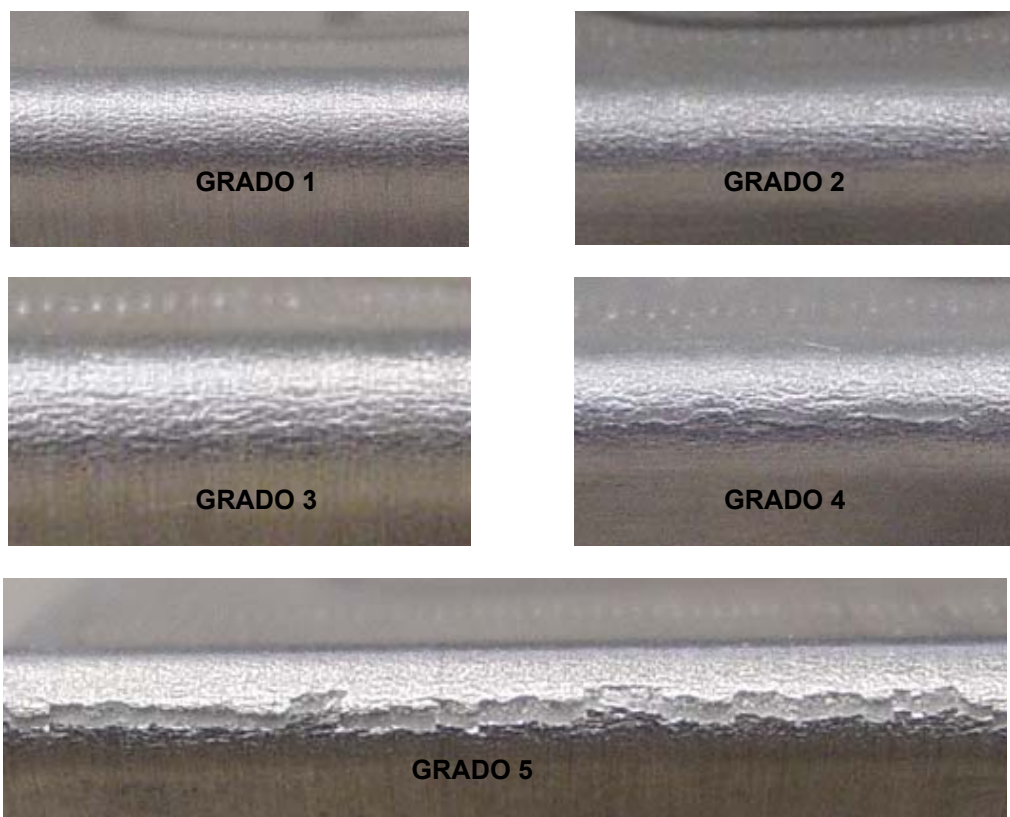
Para dicho análisis se utilizó un microscopio digital manual modelo DG-3 de la marca SCALAR con un objetivo de x25 aumentos.

*Piel de naranja:*

La piel de naranja es una superficie granulada que se genera al deformar chapas de aluminio con un tamaño de grano basto.

La rugosidad de la piel de naranja está relacionada con la deformación menos restringida individual de los granos con diferentes orientaciones en una superficie libre. Este defecto está relacionado con el tamaño de grano y no es apreciable en materiales de tamaño de grano pequeño porque los cristales individuales producen solo líneas de deslizamiento extremadamente pequeñas [ALT98].

A continuación se presenta el patrón que establece el grado de daño sufrido por el material para un ensayo de doblado o de engatillado para aleaciones de aluminio. Esta clasificación recoge defectos como la piel de naranja, las grietas o la rotura total de la muestra y va desde el 1 al 6 en función de su severidad. El que realiza el ensayo tiene que establecer cual es su límite aceptable en función de los requerimientos del producto.



*Figura 4.14: Diferentes grados de daño en función del aspecto superficial y del número y tamaño de las grietas.*

GRADO 1: No hay grietas, aunque se acepta una piel de naranja de suave a moderada.

GRADO 2: No hay grietas pero se acepta una fuerte piel de naranja.

GRADO 3: Líneas de comienzo de grieta (por ejemplo líneas de adelgazamiento localizado o estricción).

GRADO 4: Grietas discontinuas visibles a simple vista.

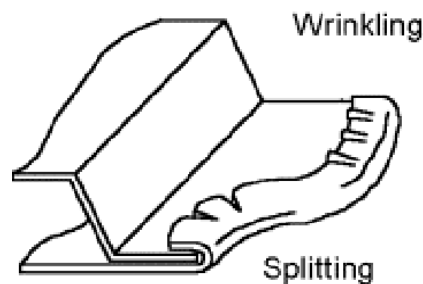
GRADO 5: Grieta continua a lo largo de toda la línea de doblado.

GRADO 6: Fractura a través del espesor doblado (por ejemplo la luz pasa a través de la grieta).

Este es el patrón que se utilizará en esta tesis para clasificar el daño sufrido por el material en la operación de engatillado.

#### *Arrugas y desgarro:*

Cuando la pestaña a engatillar presenta una geometría cóncava hay riesgo de que se produzcan desgarros o rajas ya que el material tiene que alargarse para ser engatillado. Al tratar de engatillar una pestaña con una geometría convexa se producen pliegues debido a que el material tiene que comprimirse para conseguir la unión engatillada.



*Figura 4.15: Defecto de arrugas (“wrinkling”) y desgarro (“splitting”) que aparecen al engatillar geometrías convexas y cóncavas [LIV04b].*

#### *4.2.3 Definición de buena calidad de una unión engatillada:*

**Una unión engatillada debe cumplir dos requisitos para que sea considerada aceptable desde el punto de vista de calidad para la industria de automoción.**

*1- Estar libre de defectos o dentro de las tolerancias marcadas por el cliente.*

*2- Obtener la unión que mejor apariencia visual dé a la pieza final.*

*1- Estar libre de defectos o dentro de las tolerancias marcadas por el cliente.*

Esta es la condición indispensable para que una pieza engatillada sea aceptada como buena. Estos defectos se pueden separar en dos grupos: **(i)** defectos que se deben medir tomando la pieza en su totalidad o en parte y **(ii)** defectos que pueden ser medidos en una sección de la unión engatillada o en una pequeña zona de varios milímetros.



En el **grupo (i)** entran los siguientes defectos:

*Tolerancias en esquinas de engatillado*

Todo el contorno de pieza ha de estar engatillado.

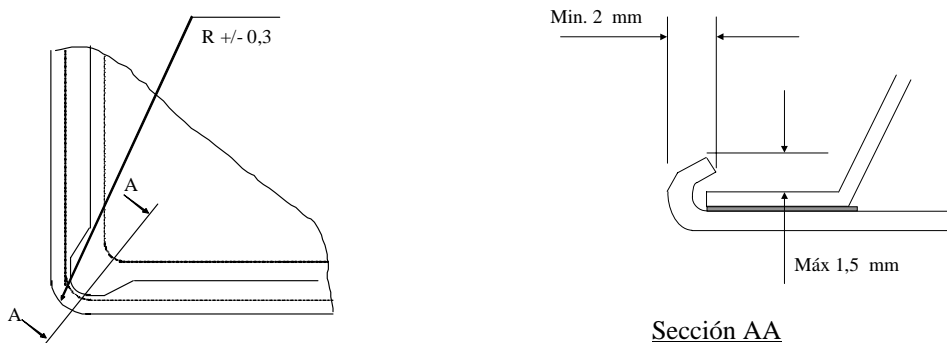


Figura 4.16: Tolerancias exigidas en los radios de las piezas engatilladas (izquierda) y en la unión engatillada (derecha) [GES07].

El radio a obtener en la esquina engatillada debe ser uniforme, y la desviación máxima aceptable respecto de la medida de plano será de +/- 0,3 mm tal y como se muestra en la imagen de la izquierda de la figura 4.16. En las zonas engatilladas de esquinas, no se aceptarán discontinuidades en la línea de contorno de la pieza de valor superior a 0,2 mm, en distancias de 30 mm desde el radio.

*Tolerancias en la altura de engatillado y arrugas*

La altura de engatillado es un parámetro que se controla en las piezas industriales pero que no vamos a controlar en esta tesis debido al tamaño reducido de las muestras aquí ensayadas. La altura de engatillado es la cota D de la figura 4.17. La dispersión de la medida de la altura de engatillado, entre diferentes piezas, no ha de sobrepasar los +/- 0,2 mm.

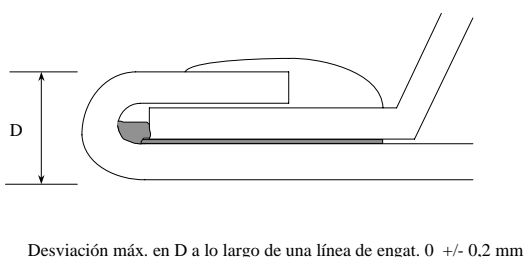


Figura 4.17: Tolerancia exigida al parámetro de altura de engatillado [GES07].

Este parámetro es el que restringe la aceptación de arrugas en la unión engatillada. No se admitirán zonas de pestaña con rotura en el borde.

### Calidad dimensional de la pieza en el contorno engatillado

#### Medida de contorno

La medida exterior de la pieza en contorno (medición en el canto), no podrá encontrarse en ningún punto fuera de la tolerancia de  $\pm 0,25$  mm.

La tolerancia de linealidad en el contorno de la pieza será de  $\pm 0,2$  mm. cada 200 mm.

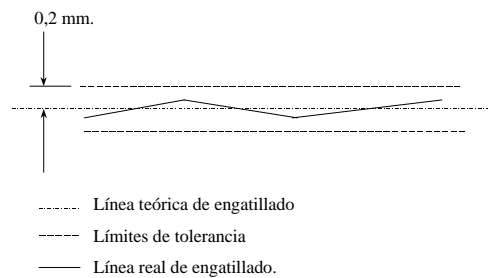


Figura 4.18: Tolerancia de linealidad en engatillado [GES07].

#### Medida de volumen en superficie

La medida de la pieza en puntos a 5 mm del canto, y tomada en dirección perpendicular a la superficie teórica de la pieza en cada punto, por la cara exterior, debe encontrarse dentro del intervalo de tolerancia de  $+0/-0,5$  mm.

El grupo (i) no se va a evaluar en esta tesis ya que al hacerse el estudio con piezas pequeñas y útiles y bobinas de laboratorio, aparecen pequeños defectos que imposibilitan el evaluar el grado de calidad obtenido tomando toda la muestra.

**Nos centraremos solamente en los defectos del grupo (ii).**

**En el grupo (ii) se encuentran defectos más locales** o que pueden ser evaluados localmente y que han sido explicados en profundidad con anterioridad en este mismo capítulo. Nos referimos a los siguientes defectos:

**Grietas o Piel de naranja, Combado, Enrollamiento puntual** (siempre medido en la misma zona de la pieza), **Arrugas y Zona deformada.**

**Estos defectos serán los que nos sirvan para evaluar la unión engatillada obtenida en esta tesis. Cuando los defectos explicados en el grupo (ii) estén dentro de tolerancias la unión engatillada será calificada como buena o aceptable.**

2- *Obtener la unión que mejor apariencia visual dé a la pieza final.*

Esto no se considera un defecto, aunque sirve para que la calidad de una unión que cumple con los requisitos del punto 1 sea considerada aceptable, buena o muy buena en función de la zona

deformada. Tal y como se ha explicado con anterioridad, la zona deformada está directamente relacionada con el GAP aparente (figura 1.5). Por lo tanto cuanto menor sea la zona deformada de la unión, mayor será su grado de calidad, siempre y cuando esté libre de los defectos locales explicados en el punto (ii). No sirve de nada tener una zona deformada muy pequeña si por ejemplo la unión tiene grietas o un combado excesivo.



## **CAPITULO 5– ESTUDIO PRELIMINAR**



## 5 ESTUDIO PRELIMINAR

Debido al carácter innovador de esta tesis, existe una falta de estudios sobre engatillado por EMF anteriores a este. Por esta razón se ve la necesidad de realizar una serie de ensayos preliminares antes de diseñar el plan de experimentos definitivo.

El objetivo del estudio preliminar es el de determinar las variables de mayor influencia en el engatillado por EMF y en que rangos deben ser estudiadas.

Para ello se ha seguido un proceso que consta de las siguientes partes:

Un primer apartado en el que se analizan las variables que a priori pueden gobernar el proceso de engatillado por EMF. Se determinan las variables de entrada fundamentales en el engatillado por EMF y su influencia en los parámetros de salida.

Basándose en los resultados obtenidos en este estudio preliminar, se establecerán las bases para el siguiente estudio experimental con las variables más influyentes.

Al final del estudio preliminar se identifica y define un nuevo defecto propio del engatillado por EMF denominado “doblado del refuerzo interior”. A partir de este defecto se ve la necesidad de definir el concepto de “geometría modelo”.

## 5.1 Determinación de las variables de proceso para el engatillado por EMF

El EMF posee un gran potencial como tecnología emergente para el conformado de piezas de chapa metálica e hibridación de tecnologías. Sin embargo, para conseguir un proceso eficiente es necesario que la aplicación que se está desarrollando cumpla ciertas características:

- La distancia entre la pieza (o la zona de la pieza) a deformar y la bobina de EMF debe ser del orden de 1-5mm para que el proceso tenga un rendimiento aceptable.
- Las corrientes inducidas en la pieza han de crear un recorrido cerrado sobre la pieza que a su vez coincida con la zona a deformar o la zona donde se ha de aplicar el impulso electromagnético.
- La bobina de EMF debe tener unas dimensiones mínimas y una rigidez estructural para poder absorber todos los esfuerzos electromagnéticos generados durante la descarga del banco de capacitores.

Por todas estas restricciones, a la hora de diseñar una nueva bobina de EMF, no hay lugar para muchos diseños posibles.

En este capítulo se identifican cuales son las variables de este nuevo proceso de engatillado. Una vez identificadas se hace un estudio preliminar sobre esas variables. Con este estudio se pretende identificar las variables más relevantes para posteriormente realizar un estudio más en profundidad. Aprovechando esos mismos resultados también se descartarán las variables de menor influencia en el proceso.

El objetivo que se persigue no es el de conseguir resultados cuantitativos ni sacar conclusiones absolutas, sino establecer las bases de lo que posteriormente se va a estudiar más en profundidad para caracterizar el proceso.

### 5.1.1 Elección de las variables de proceso

Las variables que se van a estudiar se pueden clasificar en dos grupos. Un grupo con variables que aparecen en los estudios sobre engatillado mecánico y que en este caso están relacionadas con la geometría de las piezas a engatillar y un segundo grupo con las variables propias del EMF.

Al no existir ningún estudio previo a este sobre engatillado por EMF hubo que definir las variables propias del EMF aplicadas al engatillado. Estas variables han sido elegidas basándose en el saber hacer en procesos de EMF y en la experiencia adquirida con esta tecnología en los últimos años.

Las variables relacionadas con los procesos de engatillado son fruto del estudio realizado sobre su bibliografía.



Además de las variables a estudio, a continuación se describen también las variables fijas. Se han denominado como variables fijas porque, aunque han sido estudiadas en la literatura sobre engatillado como variables de proceso, se han mantenido fijas para este estudio preliminar.

Las razones del estudio o no de cada variable se resumen a continuación.

### **Variables fijas**

#### *Material*

Estos primeros experimentos se realizaron en la The Ohio State University bajo la supervisión del profesor Glenn Daehn. Al realizar estos primeros experimentos en los EEUU el material elegido tanto para la pieza exterior como para el refuerzo interior fue una aleación de aluminio utilizada por la industria de automoción en ese país, la AA6061T6. La composición química y características mecánicas de esta aleación se muestran en las tablas 5.1 y 5.2.

<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe (Max.)</b>	<b>Mg</b>	<b>Si (Max.)</b>	<b>Zn (Max.)</b>
Resto	0.04-0.35	0.15-0.40	0.7	0.8-1.2	0.40-0.8	0.25

*Tabla 5.1: Composición química de la aleación 6061 T6 (%)*

A continuación las características mecánicas.

<b>Características mecánicas</b>	Límite de rotura (MPa)	Límite elástico (MPa)	Límite elástico en compresión (MPa)	Límite a cizalladura (MPa)	Modulo elástico E (MPa)
<b>6061T6</b>	290	240	240	185	69.600

*Tabla 5.2: Características mecánicas de la aleación 6061 T6 (%)*

El material seleccionado para el estudio experimental del capítulo 6 será una aleación distinta utilizada por la industria de la automoción en Europa, la AA6016T4. Por lo que no se va a profundizar más en la aleación de aluminio AA6061T6 y sí que se analizará la aleación Europea AA6016T4 utilizada en el estudio experimental del capítulo 6.

#### *Espesor*

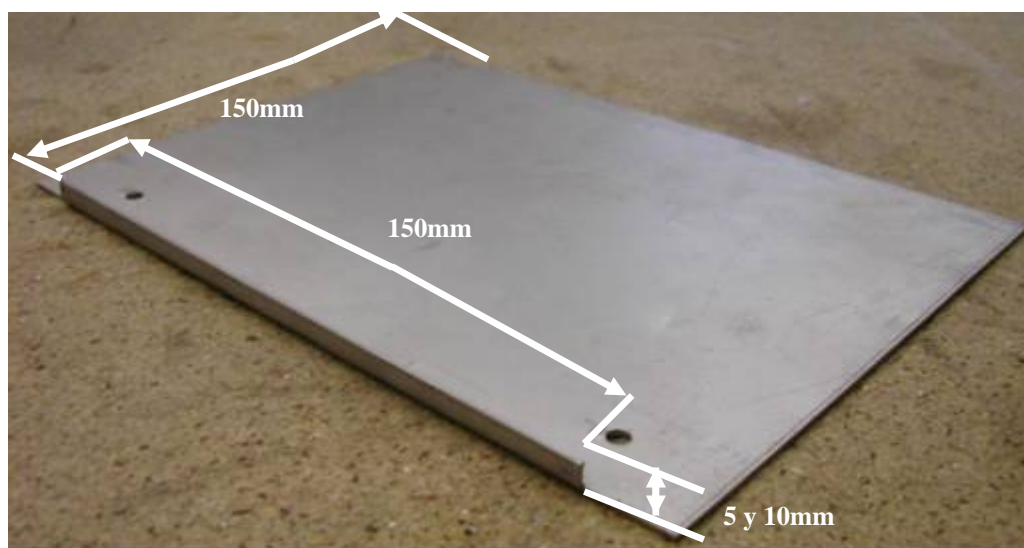
El espesor elegido ha sido 1,1mm para la pieza exterior y el refuerzo interior. Se trata de valores comúnmente utilizados por la industria de la automoción para este tipo de piezas de piel exterior de carrocería.

### *GAP entre pieza exterior-refuerzo interior*

Aunque es un parámetro que preocupa a la industria de la automoción, no se ha considerado necesario su análisis en el estudio preliminar ya que no se trata de una de las variables más influyentes en el proceso. Para estos primeros ensayos se ha elegido un GAP entre pieza exterior-refuerzo interior de 1,2mm. Este valor se sitúa en el límite inferior de los valores utilizados por la industria de la automoción.

### *Geometría*

Para los primeros ensayos se eligió la geometría más sencilla, la recta. Las dimensiones de esta geometría vienen detalladas en la figura 5.1.



*Figura 5.1: Geometría recta utilizada para los ensayos del estudio preliminar.*

A la hora de diseñar la bobina para engatillar la pestaña recta hubo que tener en cuenta sus peculiaridades geométricas. Al no tener una pestaña que cierre todo el perímetro de la pieza, como sucede con la pestaña continua, había que pensar la manera de inducir corrientes sobre la pestaña y que estas corrientes tuvieran un camino de retorno para cerrar el circuito sobre la misma pieza. Para solucionar este problema se realizó el diseño de la figura 5.2. Con este diseño de bobina se consiguen inducir corrientes en la pestaña en una dirección que cierran sobre la chapa cambiando de plano y siguiendo el recorrido de la bobina. No es tan eficiente como el caso de una pestaña continua porque parte de la energía no se utiliza para deformar (zona de presión baja en la figura 5.2).

De todos modos no tenemos que olvidar que este diseño de bobina es especial y no representa una aplicación de engatillado real. En piezas reales la pestaña es constante, por lo que el diseño de la bobina tiene todas las ventajas que presentan las bobinas de engatillado por EMF y que se explican en el apartado 4.1.1.

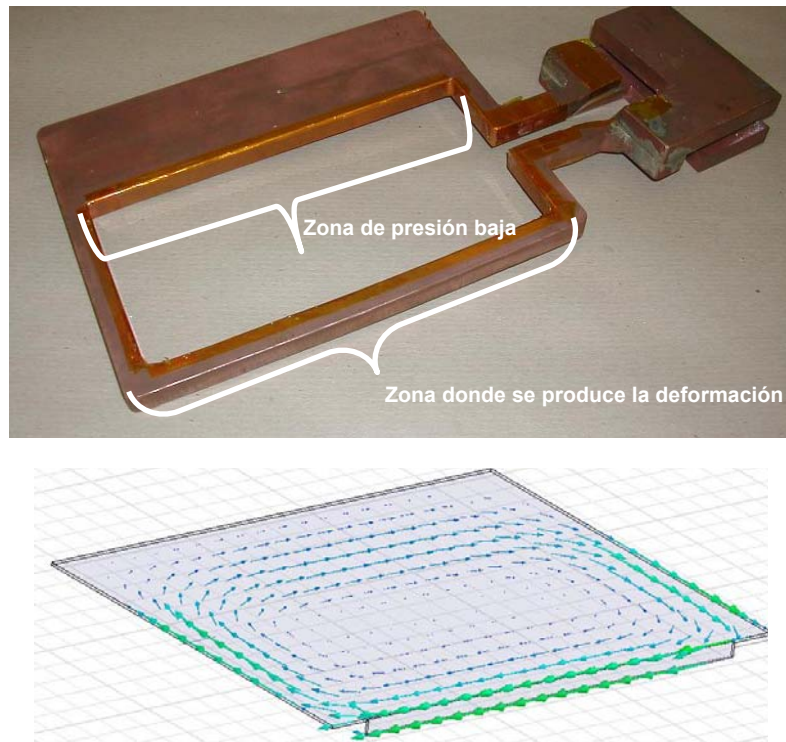


Figura 5.2: Bobina diseñada para engatillar la geometría recta (arriba) y corrientes que induce sobre la chapa (abajo)

En la figura 5.2 se puede observar como cierran las corrientes sobre la chapa, concentrándose en la pestaña donde se necesita la mayor densidad de campo magnético. La función de la parte ancha de la bobina es hacer de continuidad del circuito para las corrientes inducidas. Al ser más ancha que la zona enfrentada con la pestaña (zona donde se produce la deformación), la presión magnética generada es menor.

#### *Banco de capacitores o maquina de EMF utilizada*

Los ensayos del estudio preliminar se realizaron en el departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería de la Universidad de The Ohio State bajo la supervisión del Profesor Glenn Daehn.



Figura 5.3: Fotografía del banco de capacitores de 16kj utilizado para los experimentos básicos situado en la universidad de The Ohio State University

Se utilizó el banco de condensadores de 16 Kj de la figura 5.3 cuyas características eléctricas se recogen en la tabla 5.3:

V max. (V)	E max. (Kj)	C ( $\mu\text{F}$ )	R equ. ( $\mu\Omega$ )	L equ. (nH)
8650	16	426	15	200

Tabla 5.3: Características eléctricas del banco de capacitares utilizado en el estudio preliminar.

### **Variables a estudiar**

#### *Solapamiento*

El solapamiento es el % de la altura de pestaña que se enfrenta a la bobina de EMF. Este concepto se aclara en el punto 5.1.3 referente al estudio de dicha variable.

#### *Energía*

Al hablar de energía en esta tesis nos referiremos a la cantidad de energía descargada por el banco de condensadores. El banco de condensadores no es otra cosa que la maquina de EMF. El valor de la energía se expresará en kilojulios (Kj).

#### *Altura de pestaña*

Tal y como su nombre indica la altura de la pestaña es la altura que toma la pestaña medida desde la superficie exterior de la pieza hasta el extremo superior de la propia pestaña tal y como se representa en la figura 4.4.

#### *Radio de doblado*

En este estudio preliminar se van a probar dos radios de doblado, de 1,2 y de 2,5mm. Las razones para estos valores se detallan en el capítulo 5.1.6.

#### *5.1.2 Plan de ensayos preliminar*

Para la realización del estudio preliminar se diseñó un plan de experimentos. Al tratarse de un estudio singular y no conocerse ni la influencia de los distintos parámetros seleccionados ni los rangos en los que ensayarlos, se realizó una selección basándose en los valores utilizados para el engatillado convencional. El cuadro resumen con las variables a estudiar y los rangos en las que se van a estudiar queda resumido en la tabla 5.4.

Variable	Solapamiento	Energía	Altura pestaña	Radio doblado
Rango	De 0 a 100%	De 1Kj a rotura	5 y 10 mm	1,2 y 2,5mm

Tabla 5.4: Plan de ensayos para el estudio preliminar.

A continuación se explica más en detalle en que consiste cada una de las variables seleccionadas, el porqué del rango de estudio elegido junto con los resultados obtenidos después de los experimentos.

### 5.1.3 Estudio del solapamiento

Basándonos en la experiencia adquirida hasta el momento en EMF y en la deformación necesaria en la operación de engatillado, se estableció la primera de las variables a estudio, denominada como solapamiento entre pestaña y bobina (“solapamiento” de ahora en adelante). La definición es la siguiente: % de la altura total de la pestaña que se solapa o enfrenta con la bobina electromagnética (figura 5.4).



Figura 5.4: Bobina de engatillado recto con la pieza en posición (izquierda) y plano de la sección AA explicando el parámetro del solapamiento (derecha).

Esta variable define el % de la altura de la pestaña sobre el que se aplica la presión electromagnética generada al descargar el banco de condensadores. Variando el solapamiento se consigue inducir corrientes en diferentes zonas de la pestaña y por consiguiente aplicar el impulso electromagnético en diferentes áreas.

Para ver como varía realmente la distribución de las corrientes inducidas con el solapamiento se realizaron unas simulaciones utilizando el software para cálculos electromagnéticos MAXWELL 2D®. Los resultados de estas simulaciones se muestran en la figura 5.5. El color claro sobre la pestaña representa una mayor densidad de corriente y por lo tanto una mayor presión electromagnética. En

esas imágenes se puede ver como la zona clara se sitúa justo en frente de la zona solapada con la bobina. Por lo tanto se ha comprobado que la zona de la pestaña donde se aplica la presión electromagnética está en función del solapamiento.

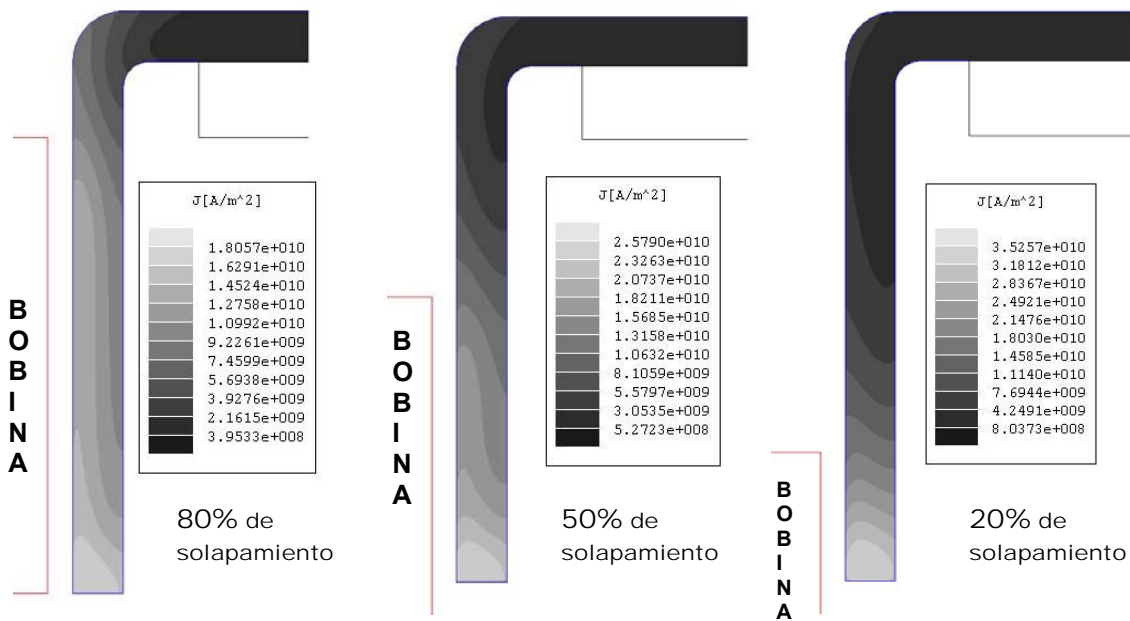


Figura 5.5: Distribución de la densidad de corriente eléctrica ( $J$  en Amperios/m<sup>2</sup>) para diferentes solapamientos obtenidas con el software Maxwell 2D ®.

Para analizar la influencia de esta variable en la unión engatillada se realizó un primer plan de ensayos (figura 5.6) para observar tendencias y establecer con mayor precisión el rango para el posterior estudio en profundidad.

**Diferentes solapamientos ensayados:**

- 0%
- 25%
- 50%

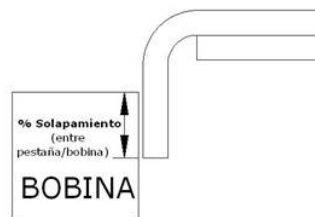


Figura 5.6: Diferentes valores de solapamiento para los ensayos con la geometría recta de 5mm de altura de pestaña.

Las primeras pruebas se realizaron solamente con los valores límite de 0% y 50% de solapamiento. Tal y como se ha comentado al comienzo de este capítulo, el objetivo del estudio preliminar es observar que sucede en la geometría final de la unión al modificar el valor de esta variable a nivel cualitativo.

### Resultados

A continuación se muestran los resultados de estas primeras pruebas y los comentarios al respecto.

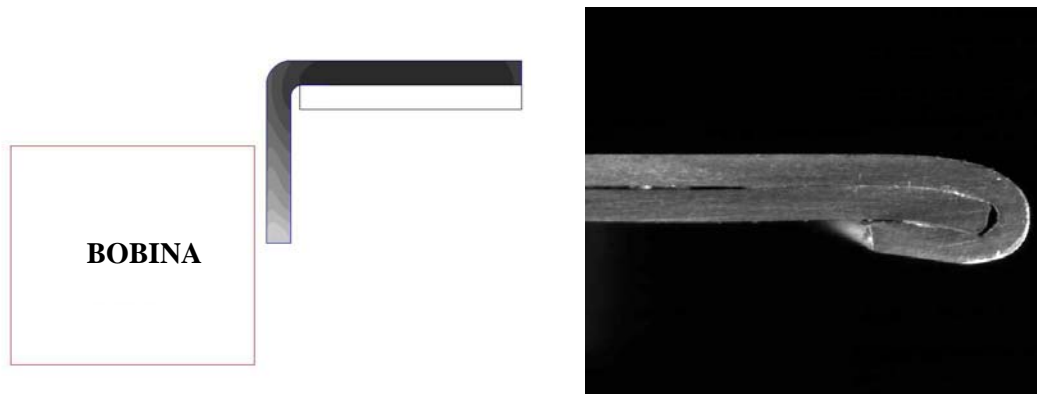


Figura 5.7: Imagen al 50% de solapamiento obtenida con Maxwell 2D® (izquierda) y foto de la unión obtenida en los experimentos físicos (derecha).

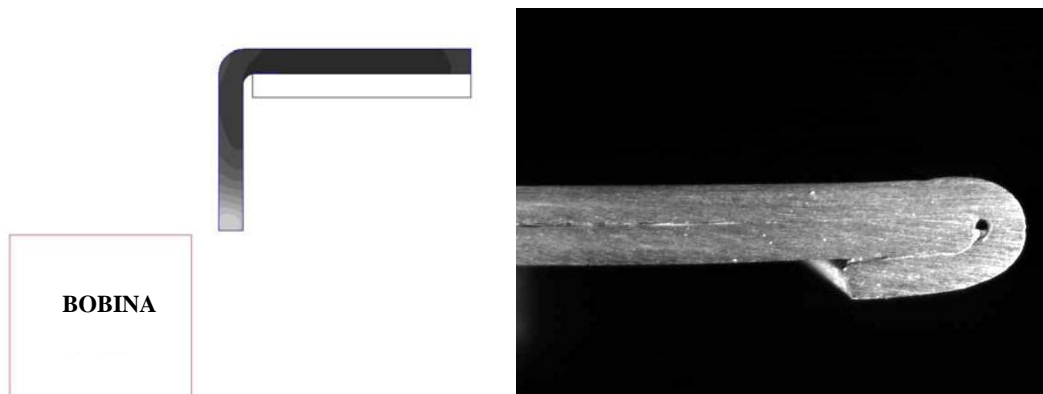


Figura 5.8: Imagen al 0% de solapamiento obtenida con Maxwell 2D® (izquierda) y foto de la unión obtenida en los experimentos físicos (derecha).

La influencia del solapamiento en la geometría final queda demostrada. Con estas primeras pruebas se intuye un valor óptimo del solapamiento ya que con un 50% la unión se dobla hacia abajo mientras que con un 0% se dobla hacia arriba. Por lo tanto hay un solapamiento óptimo entre 0% y 50% que da una unión sin deformar.

Para observar mejor la importancia del solapamiento sobre la pieza exterior se recoció el material a 350 °C durante 30 minutos hasta dejarlo en un estado T0. Con ello se consiguió aumentar su alargamiento y ductilidad reduciendo su dureza. Ello permitió observar la influencia del solapamiento en la pieza exterior en otros aspectos de la geometría final de la unión.

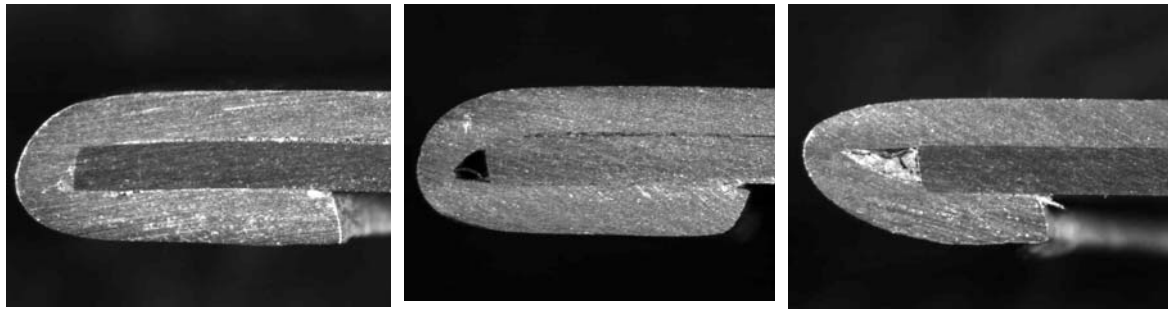


Figura 5.9: Uniones conseguidas a 2kj de energía con 50% (izquierda), 25% (centro) y 0% (derecha) de solapamiento.

Se observan varias cosas en las imágenes de la figura 5.9. La zona deformada disminuye al disminuir el solapamiento pero concentrando más las deformaciones en el extremo de la unión. También se aprecia claramente que el enrollamiento disminuye al disminuir el solapamiento ya que el hueco existente entre la pieza exterior y el refuerzo interior se reduce.

Los resultados sobre el enrollamiento están graficados en la figura 5.10. Hay que tener en cuenta que se trata de piezas recocidas a su estado más dúctil por lo que puede que el orden de los resultados no sea significativo para aleaciones en un estado más endurecido. Sin embargo la tendencia de la gráfica es clara.

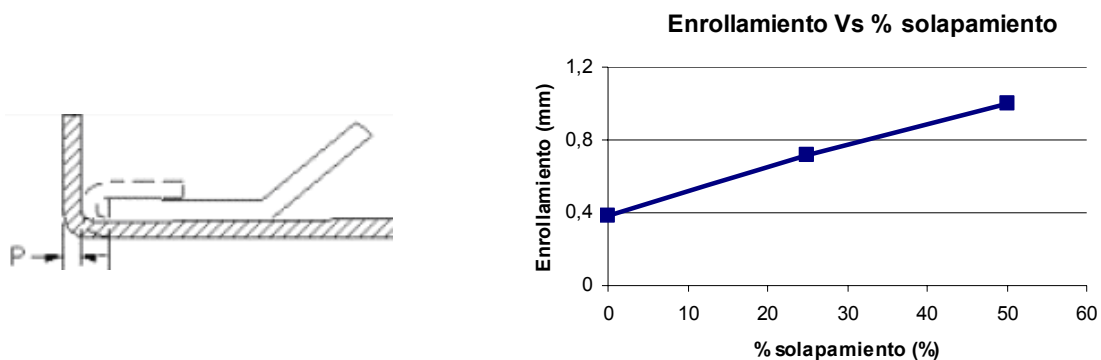


Figura 5.10: Descripción del enrollamiento P (izquierda) y evolución en función del solapamiento (derecha).

La gran influencia del solapamiento en la geometría final es debido al cambio en la componente de la presión electromagnética que ejerce sobre la pestaña. Tal y como se muestra en la figura 5.11 la componente cambia de horizontal a vertical a medida que disminuye el solapamiento. Este cambio en la componente de la presión electromagnética es la que hace que la unión doble hacia abajo o hacia arriba, que el enrollamiento sea menor o mayor y que la forma geométrica en el extremo de la unión cambie.



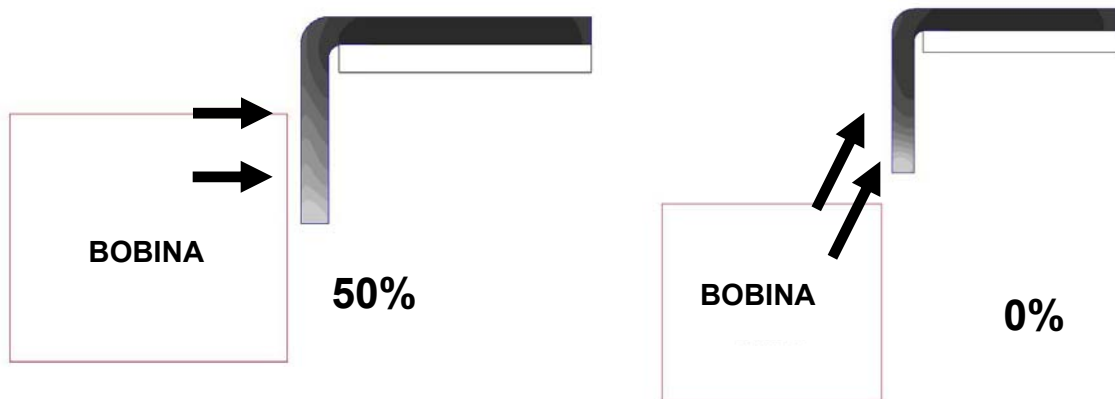


Figura 5.11: Fuerzas electromagnéticas generadas en función del solapamiento utilizado.

#### Conclusiones del solapamiento

El solapamiento es un parámetro clave a la hora de engatillar por EMF. Es una variable que influye en la geometría final de la unión, en el enrollamiento así como en la calidad de la unión. El rango de esta variable para los experimentos posteriores se ha establecido entre 0 y 50%.

#### 5.1.4 Estudio de la energía

En el EMF cuando se habla de energía es como hablar de toneladas en estampación. Cuanto mayor sea la energía mayor será la presión electromagnética generada y por lo tanto mayores serán también las deformaciones conseguidas. De todos modos esta relación no es tan directa ya que al aumentar la energía de la descarga aumenta también la velocidad de deformación de la pieza y por lo tanto también aumenta su energía cinética. La energía descargada se puede calcular fácilmente conociendo los parámetros de la máquina y utilizando la siguiente fórmula:

$$E = \frac{1}{2} C.V^2$$

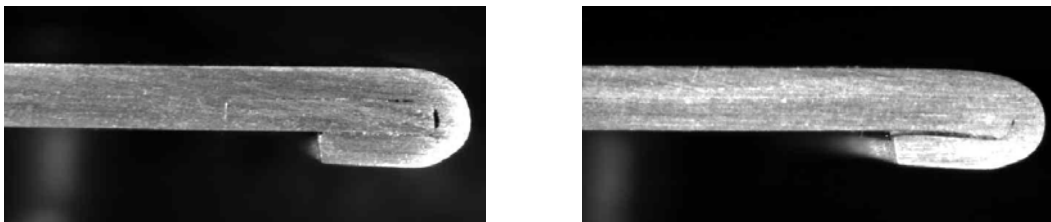
donde C es la capacitancia del banco de condensadores y V es la diferencia de potencial a la que se realiza la descarga.

Esta energía es diferente para cada máquina y puede ser fácilmente regulable. La máquina de OSU, utilizada para los experimentos de este estudio preliminar, tiene una capacitancia fija de 426 micro faradios y la energía descargada se calcula ajustando el voltaje de descarga con un potenciómetro hasta un máximo de 8,66kV. Por lo que aplicando la fórmula de arriba esto nos da una energía que va desde 0 hasta 16 kilojulios. La máquina que posee Labein y que será utilizada en el capítulo 6, tiene

960 microfaradios para un voltaje máximo de descarga de 8,8kV, lo que nos da unas energías que van desde 0 hasta 60 kilojulios como máximo.

#### *Resultados:*

Una vez realizados los experimentos se extraen las siguientes conclusiones en lo que a energía de descarga se refiere. En la figura 5.12 se muestran algunas uniones en las que solamente se ha variado la energía de un ensayo a otro.



*Figura 5.12: Uniones engatilladas obtenidas a con un 25% solapamiento a distintas energías. A 3kj (izquierda) y a 4kj (derecha)*

Tal y como se observa en la figura 5.12, al aumentar la energía conseguimos lanzar la pestaña a mayores velocidades, esto nos da una mayor energía cinética y por lo tanto mayores deformaciones. Esto se traduce evidentemente en una zona deformada mayor y un mayor enrollamiento.

#### *Conclusiones:*

La energía será un parámetro que siempre estará presente en todos los experimentos. Su valor se irá variando (generalmente empezando por valores bajos para ir subiendo) hasta conseguir la unión engatillada deseada o un doblado excesivo del refuerzo interior.

#### *5.1.5 Estudio de la altura de la pestaña*

Uno de los parámetros de entrada geométricos de las piezas a engatillar es la altura de la pestaña. Con los métodos actuales la altura de la pestaña a de ser variable, reduciendo su altura en las zonas difíciles a engatillar para disminuir arrugas (radios pequeños, cambios de plano,...) y aumentándola en las zonas rectas para conseguir una mayor superficie de contacto entre pieza exterior y refuerzo interior y así darle una mayor resistencia mecánica a la unión.

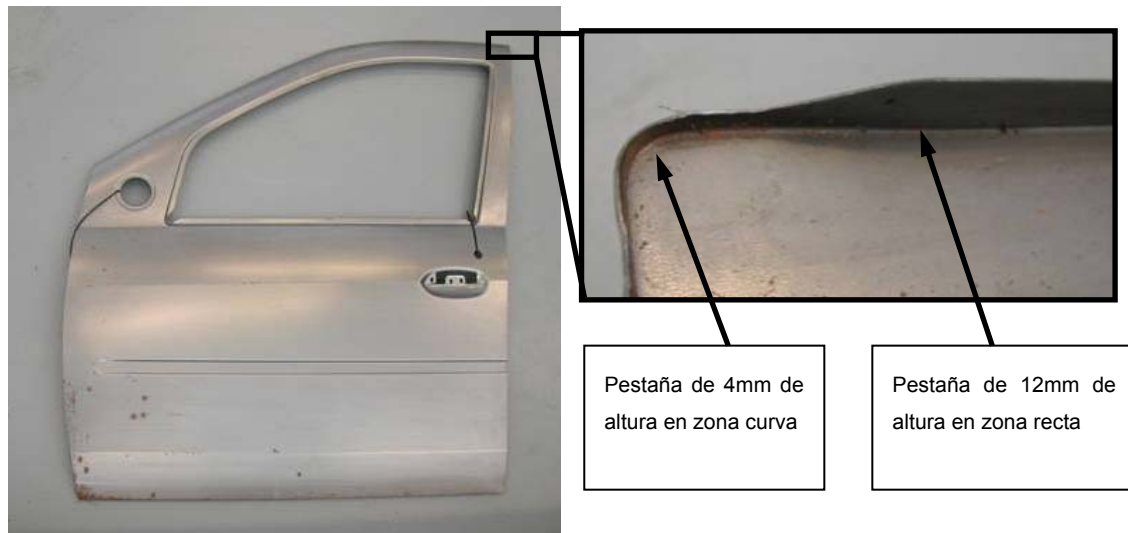


Figura 5.13: Puerta de automóvil (izquierda) y detalle de una esquina antes de ser engatillada (derecha).

Para estudiar el efecto de la altura de pestaña se eligieron dos valores basándose para ello en los datos facilitados por la industria de la automoción. Estos valores, actualmente, van desde los 3,5mm como valor mínimo hasta un máximo de 12mm de altura. El valor de 3,5mm de altura de pestaña se utiliza en las zonas con radios de curvatura de la pieza exterior por debajo de 20mm. Estas zonas no se engatillan completamente, sino que simplemente se doblan más allá de los 90 grados para dar sensación de engatillado desde el exterior, tal y como se explica en la figura 4.17 del apartado 4.2.

Para realizar el estudio preliminar se optó por dos valores, uno en el límite inferior de 5mm y otro en el límite superior de 10mm. Se realizaron una serie de experimentos con cada altura de pestaña variando la energía y el solapamiento (figura 5.14).

Altura pestaña	% solapamiento
5mm	0%
	25%
	50%
10mm	0%
	50%

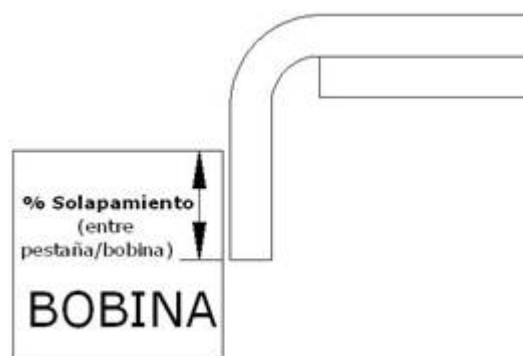
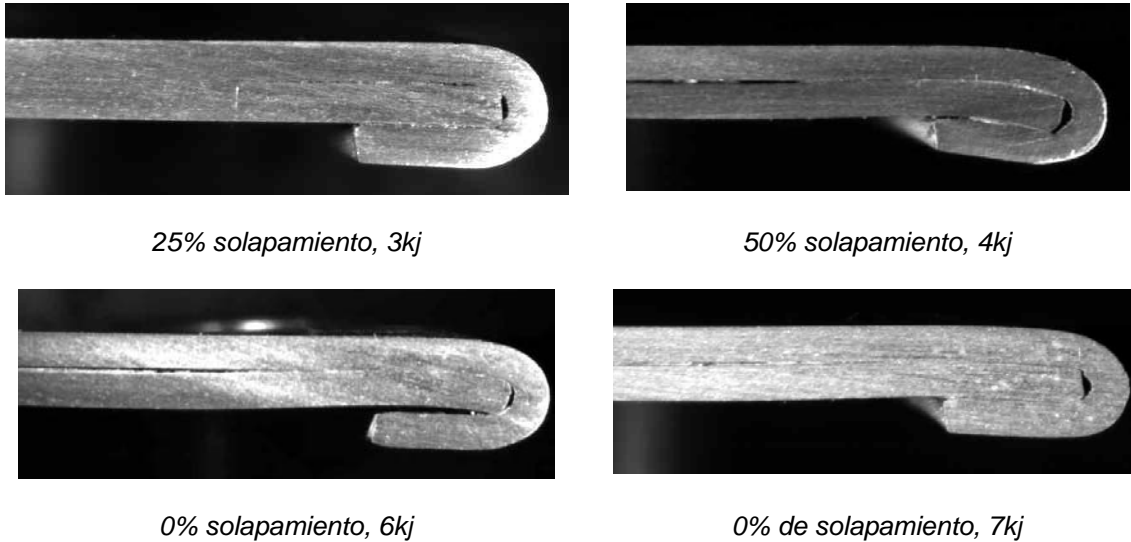


Figura 5.14: Solapamientos utilizados para los ensayos en recto con las distintas alturas de pestaña (izquierda) y esquema explicativo del parámetro del solapamiento (derecha).

Una vez seleccionados los distintos valores de solapamiento a ensayar para cada altura de pestaña es necesario ajustar la energía de descarga. La manera de proceder ha sido empezar con una energía baja e ir aumentándola hasta conseguir la unión engatillada que mejor cumpla los requerimientos de calidad.

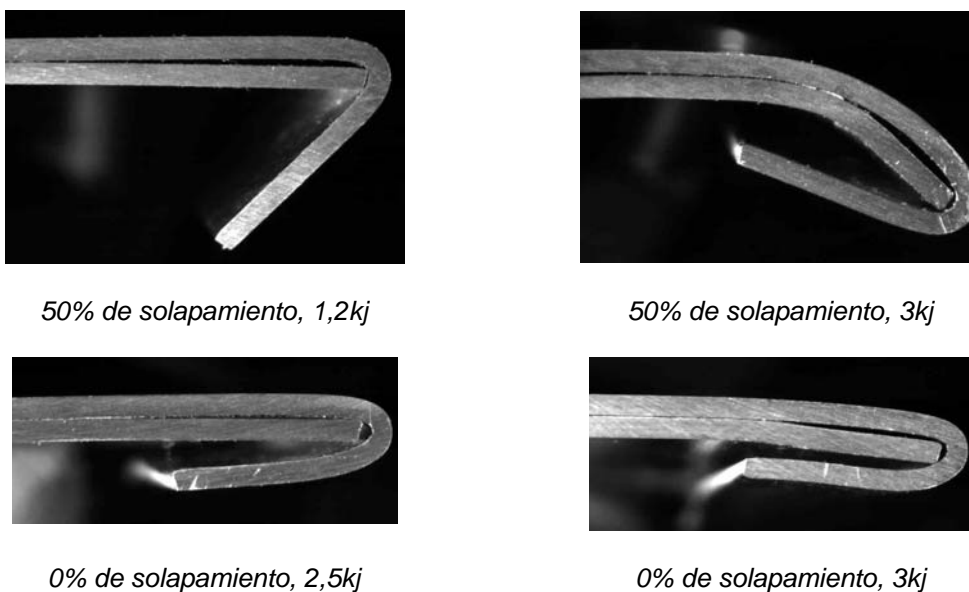
*Resultados:*

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la pestaña de 5mm de altura (figura 5.15):



*Figura 5.15: Secciones de la unión recta de 5mm de altura de pestaña a diferentes valores de solapamiento y energía*

Y para la pestaña de 10mm de altura (figura 5.16):

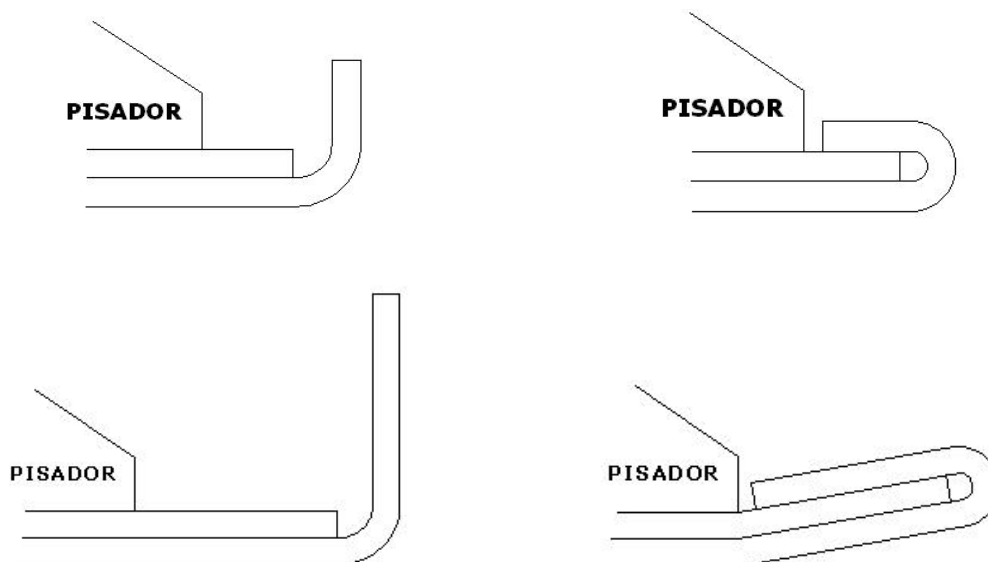


*Figura 5.16: Secciones de la unión recta de 10mm de altura de pestaña a diferentes valores de solapamiento y energía*

En las imágenes de las figuras 5.15 y 5.16 se observa la diferencia de calidades obtenidas en las uniones con la pestaña de 5mm y la de 10mm. Mientras que la pestaña de 5mm se presta bien para ser engatillada por EMF, la pestaña de 10mm no da ninguna geometría aceptable. Incluso variando el solapamiento o la energía, el refuerzo interior dobla antes de conseguirse el engatillado. Esto imposibilita el obtener uniones aceptables con esa altura de pestaña.

En la imagen de la figura 5.16 engatillada al 50% de solapamiento y con 1,2 kilojulios, se observa que el refuerzo interior comienza a deformarse aunque sólo se le aplique una pequeña energía de 1,2Kj. En la imagen de la figura 5.16 engatillada al 50% de solapamiento y con 3 kilojulios, se puede ver como la pestaña de 10mm arrastra el refuerzo interior y lo dobla lo que imposibilita la obtención de uniones aceptables con esa longitud de pestaña. Incluso reduciendo el solapamiento al 0% la geometría de la unión no es aceptable. Sin embargo con los procesos actuales se consigue engatillar pestañas de altura superior a 10mm. Esto es posible porque el engatillado convencional se realiza con dos operaciones, una primera llamada pre-engatillado y una segunda llamada propiamente engatillado (explicación en la figura 1.3). Al engatillar partiendo de la geometría pre-engatillada la componente de la fuerza realizada es vertical a 45° aproximadamente. La aplicación de esta fuerza semi-vertical hace posible la obtención de una unión engatillada con alturas de pestaña superiores a 10mm sin doblar el refuerzo interior.

Al engatillar directamente desde la posición de doblado a 90°, resulta imposible conseguir uniones engatilladas aceptables a partir de cierta altura de pestaña. Al aumentar la altura de la pestaña es necesario aumentar también la distancia entre el pisador y la pestaña (figura 5.17) para que ésta no choque contra el pisador al ser engatillada. Este alejamiento del pisador reduce la rigidez del sistema pieza exterior-refuerzo interior. Al reducirse la rigidez, el extremo de la unión engatillada no soporta la energía cinética que tiene la pestaña de 10mm de altura y se dobla (figura 5.17).

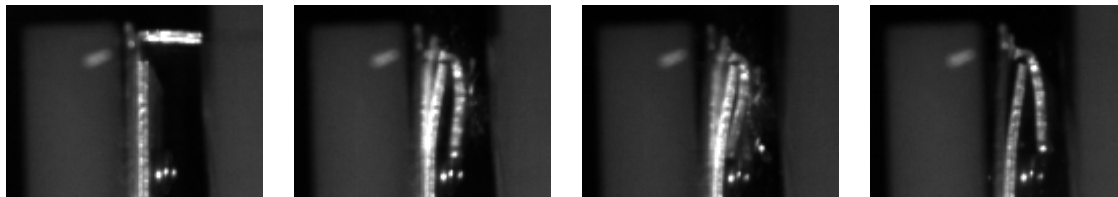


*Figura 5.17: Pieza exterior y refuerzo interior antes (izquierda) y después (derecha) de engatillar para una altura de pestaña de 5mm (arriba) y para una altura de pestaña de 10mm (abajo).*

Al engatillar por EMF y partiendo desde una pestaña doblada a 90°, la componente de la fuerza electromagnética es completamente horizontal. Al alejar el pisador de la pestaña para evitar el choque entre ambos y aplicar el impulso electromagnético, el refuerzo interior se dobla antes de conseguir el engatillado.

Este fenómeno se pudo observar gracias a las grabaciones realizadas con una cámara de alta velocidad de un engatillado con una pestaña de 10mm de altura (figura 5.18).

Se trata de una cámara de alta velocidad de la marca Photron's APX-RS [PHO07]. Es capaz de captar 250.000 imágenes por segundo lo que supone una imagen cada 4 microsegundos para una resolución de 128x16 pixels.



*Figura 5.18: Secuencia de engatillado de una pestaña de 10mm de altura por EMF a 3 kJ y a 0% de solapamiento realizada con una cámara de alta velocidad.*

En la figura 5.18 se puede observar como el refuerzo interior se deforma (segunda imagen) antes de llegar al punto máximo de deformación de la pestaña (tercera imagen) incluso aplicando el impulso al 0% de solapamiento. La cuarta imagen corresponde al estado final después de la recuperación elástica.

Para engatillar pestañas de 10mm con EMF habría que realizar una primera operación de pre-engatillado por EMF hasta conseguir una geometría próxima a los 45°. Posteriormente habría que hacer otra segunda operación de engatillado final por EMF para conseguir una unión sin deformaciones en el refuerzo interior.

Uno de los objetivos de esta investigación es eliminar el pre-engatillado que es una operación precisa que debe hacerse controlada ya que influye en la calidad final del engatillado [LIV00]. Por esta razón se desestimó la idea de realizar una operación de pre-engatillado por EMF.

### *Conclusiones*

Debido a las fuerzas inerciales que aparecen en el proceso del EMF y a la decisión de realizar el engatillado partiendo desde la posición de 90°, la altura de pestaña de 10mm resulta excesiva.

Esta reducción en la altura máxima de la pestaña se traduce en un ahorro de material, siempre que la unión engatillada obtenida cumpla con los requerimientos mecánicos exigidos.

A partir de este punto los experimentos del capítulo 5 se realizarán sobre la pestaña de 5mm de altura aunque en el estudio experimental (capítulo 6) se vuelve a estudiar esa variable, siempre por debajo de los 10mm fijados en este estudio preliminar.

### 5.1.6 Estudio del radio de doblado

Es una variable ampliamente estudiada en la literatura sobre engatillado y que tiene influencia en los parámetros de salida como se ve en el capítulo 2.4 sobre el estudio bibliográfico del engatillado convencional.

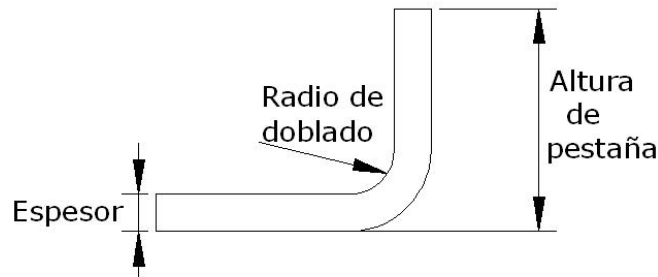


Figura 5.19: Definición del radio de doblado

Sigvant et al. señalan que el radio de doblado en la etapa de embutición es uno de los parámetros que influyen en el enrollamiento [SIG03]. Sin embargo el enrollamiento no se considera un defecto sino más bien un parámetro a controlar y a conocer durante el proceso, ya que de él dependen las dimensiones finales de la pieza.

Para elegir el valor del radio de doblado se consultó a varias empresas del entorno dedicadas a la fabricación de estaciones de engatillado y piezas engatilladas para automoción. Estas empresas manejan informes de los distintos constructores de automóviles que fijan sus propios límites y reglas de diseño a la hora de definir el radio de doblado para aleaciones de aluminio. Uno de estos informes [ING09] refleja lo siguiente sobre como fijar el radio de doblado para el posterior engatillado de aleaciones de aluminio:

PSA define el radio de doblado para la aleación 6016 y espesores de chapa de 1 a 1,2mm entre 1 y 3mm.

Renault por su parte lo define de la siguiente manera para espesores de chapa de 1mm:

$$R = \frac{2e_e + e_r + 0,75}{2} - e_e$$

Donde R es el radio de doblado,  $e_e$  es el espesor de la pieza exterior y  $e_r$  es el espesor del refuerzo.

Por lo tanto, y después de analizar los valores para el radio de doblado utilizados por la industria de la automoción, se ha probado con dos valores: 2,5mm y 1,2mm. Con estos dos valores se cubren el límite inferior y superior del rango de esta variable para piezas de aluminio que posteriormente se engatillarán en automoción.

En este informe [ING09] la aparición de grietas se presenta como el mayor problema a la hora de engatillar aleaciones de aluminio. El radio de doblado es uno de los factores que más influye en la

aparición de grietas en la etapa de engatillado junto con el espesor de la chapa y la estricción del material.

La probabilidad de aparición de grietas en el engatillado aumenta cuando:

- El radio de doblado es pequeño
- El espesor de la chapa es elevado
- La reducción en el espesor del material doblado es elevada

Para evitar problemas de grietas en la operación de engatillado se recomienda que la reducción del espesor en la etapa de doblada sea de entorno al 5% al trabajar con aleaciones de aluminio. Se comprobó por lo tanto el grado de estricción que habían sufrido las piezas dobladas. Para eso se midió la reducción de espesor sufrida por cada una de ellas. Estos valores se pueden ver en la tabla 5.5:

Radio de doblado (mm)	Espesor final (mm)	Reducción de espesor (%)
1,2	1,03	6,3
2,5	1,02	7,3

*Tabla 5.5: Valores de espesor final para los distintos radios de doblado ensayados.*

Se puede comprobar que la estricción es de entorno al 7%, tal y como recomiendan los constructores de automoción [ING09] y que el valor es similar para ambos radios de doblado. Ambas muestras fueron engatilladas utilizando los mismos parámetros de proceso: 5,5kj de energía de descarga y un 15% de solapamiento entre pieza y bobina.

### Resultados

Se midió el enrollamiento producido dando el mismo valor para ambos casos (tabla 5.6):

Radio de doblado (mm)	Enrollamiento (mm)
1,2	2
2,5	2

*Tabla 5.6: Valores de enrollamiento para los distintos radios de doblado ensayados.*

Se midió la zona deformada de las uniones engatilladas. Los resultados se muestran en la figura 5.20.



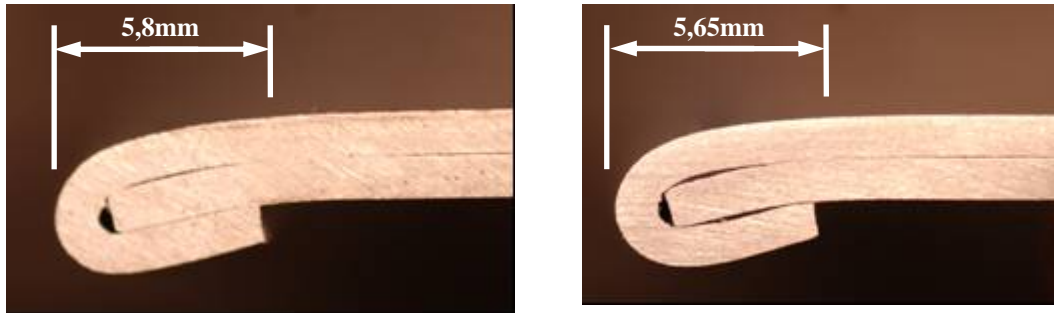


Figura 5.20: Valores de la zona deformada para los radios de doblado de 1,2mm (izquierda) y 2,5mm (derecha).

Se observa que este parámetro de salida no varía con el radio de doblado.

Se midió también el comado de las muestras antes y después de engatillar utilizando el perfilómetro confocal. Se pretende conocer el comado que poseen las piezas antes de ser engatilladas para así evitar errores a la hora de interpretar los resultados finales.

A continuación se muestran las mediciones del comado sobre el extremo de las uniones.

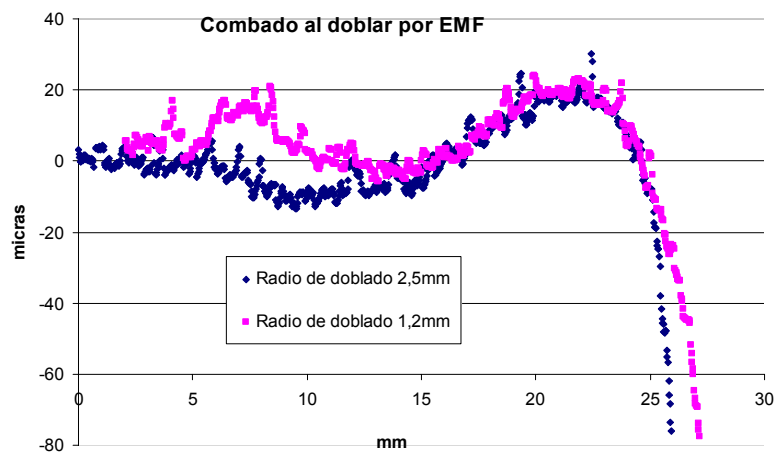


Figura 5.21: Gráfica obtenida con el perfilómetro confocal para piezas dobladas por EMF con distintos valores de radio de doblado.

Se obtienen valores de comado diferentes en función del radio de doblado. Para el radio de doblado de 1,2mm se obtiene un valor de comado máximo de 25 micras mientras que con el radio de doblado de 2,5 el valor máximo es de 32 micras. De todos modos la diferencia no es sustancial.

Si analizamos estas mismas probetas después de ser engatilladas:

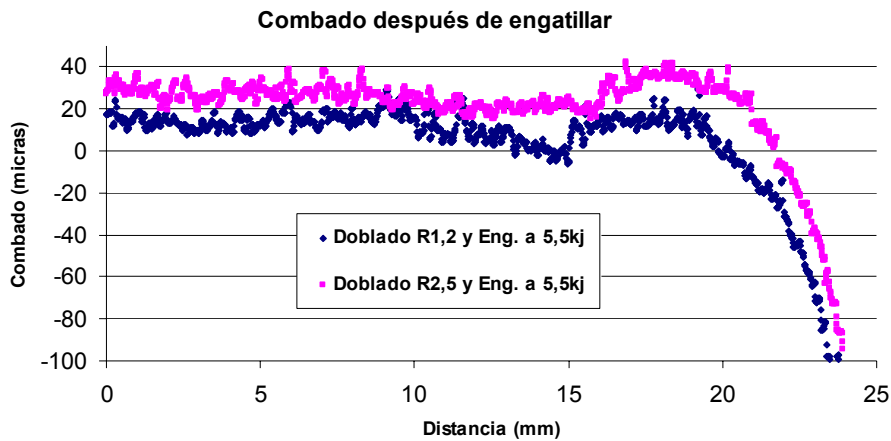


Figura 5.22: Gráfica obtenida con el perfilometro confocal para piezas dobladas por EMF con distintos valores de radio de doblado y posteriormente engatilladas.

Después de la operación de engatillado el combado es el mismo en los dos casos y se sitúa en torno a las 18 micras, por lo que se ha reducido levemente al engatillar. Esto viene a corroborar el estudio realizado por Livatyali et al. [LIV00] sobre engatillado mecánico convencional. En dicho estudio se aprecia un leve aumento del combado al aumentar el radio de doblado que es lo que se puede apreciar en la grafica de la figura 5.21. Sin embargo esa diferencia se reduce al engatillar las piezas por EMF, cosa que en el estudio al que se hace referencia no sucede. Por lo tanto el engatillado por EMF reduce el combado que pueden traer las piezas de la etapa de doblado. Al medir el defecto del combado sobre piezas industriales en las plantas de producción no se obtiene ningún valor numérico. En la mayoría de los casos se pasa una piedra abrasiva prismática especial que resalta el combado en caso de que exista. Es entonces cuando el cliente o el responsable de calidad califican la pieza como apta o no apta.

Para poder calificar las piezas engatilladas en esta tesis en función del combado como aptas o no aptas y conocer lo lejos o lo cerca que se encuentran de los engatillados industriales, se pidió ayuda a Ingemat, empresa suministradora de equipos de engatillado. Se llevaron varias piezas engatilladas por EMF sobre las que se midió el combado previamente con el perfilómetro confocal. A estas piezas se le pasó la piedra abrasiva por un operario experto y se obtuvieron los siguientes resultados:

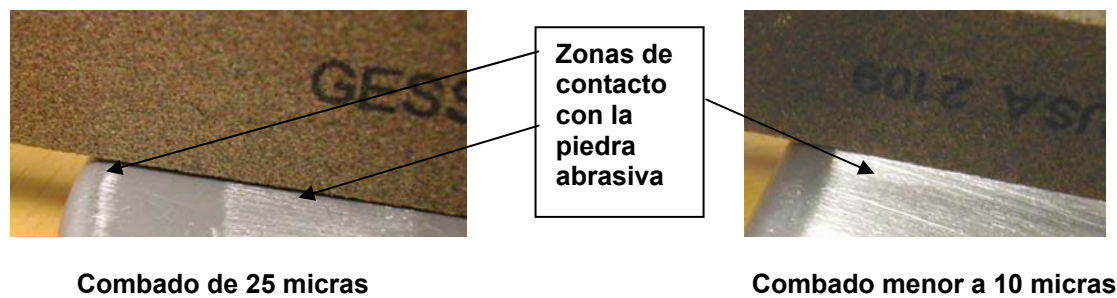


Figura 5.23: Piezas después de pasarles la piedra abrasiva con un combado excesivo (izquierda) y con un combado aceptable (derecha)

Según el experto que pasó la piedra abrasiva a ambas piezas, la pieza de la izquierda está fuera de calidad mientras la pieza de la derecha cumple con los requisitos que se le exigen a este tipo de piezas en lo que se refiere al defecto del combado. La imagen de la izquierda presenta dos zonas de contacto donde la piedra abrasiva ha marcado la pieza mientras que en la pieza de la derecha esa zona de contacto es única y continua lo que delata la ausencia de combado. Por lo tanto los valores de entorno a 10-15 micras están dentro de valores de calidad aceptables para el defecto del combado.

Para finalizar con el estudio sobre el radio de doblado se analizaron las muestras con la ayuda de un microscopio manual en busca de grietas.

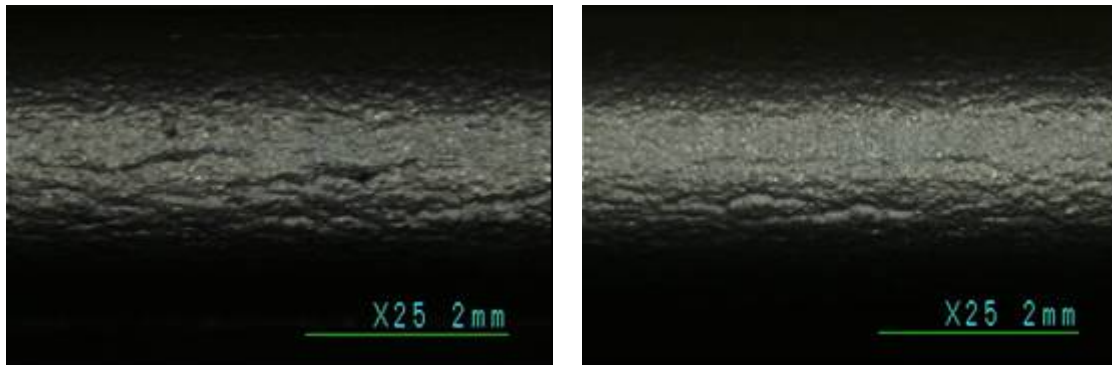


Figura 5.24: Cara exterior del extremo de la unión engatillada con un radio de doblado de 1,2mm (izquierda) y con un radio de doblado de 2,5mm (derecha).

Las piezas de la figura 5.24 dobladas con un radio de 2,5mm producen grietas de GRADO 3: Líneas de comienzo de grieta (por ejemplo líneas de adelgazamiento localizado o estricción) al ser engatilladas tal y como se puede ver en la imagen de la derecha. Las piezas dobladas con un radio de 1,2mm producen grietas de GRADO 4: Grietas discontinuas visibles a simple vista, como se puede ver en la imagen de la izquierda.

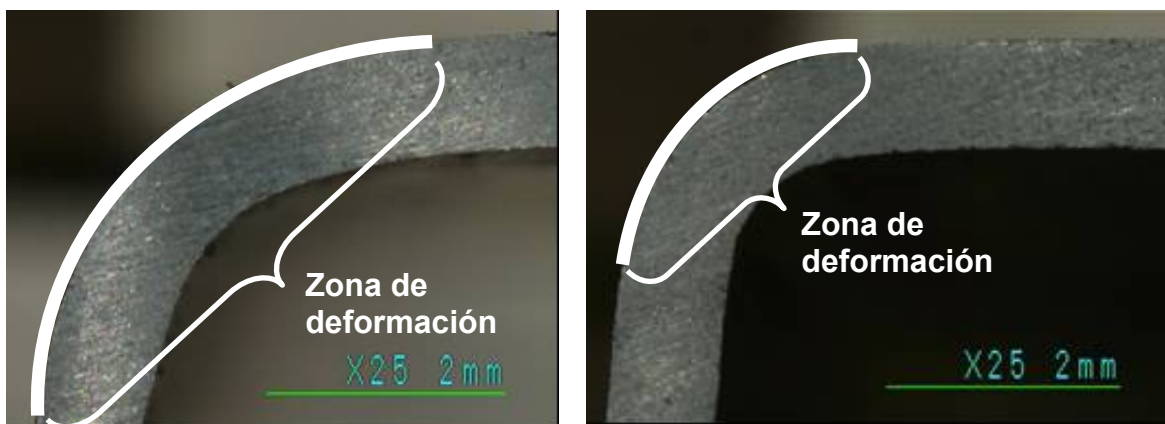


Figura 5.25: Zonas de deformación para el radio de doblado de 2,5mm (izquierda) y de 1,2mm (derecha).

Al doblar la pieza con un radio mayor la deformación generada no es tan local ya que se distribuye en una longitud de doblado mayor (figura 5.25). Al tener una deformación menos localizada las deformaciones máximas son menores para el radio de 2,5mm por lo que la aparición de grietas se retrasa. Estos datos corroboran la investigación realizada por Lin et al. [LIN06] para el caso del engatillado convencional de aluminio citada anteriormente.

### Conclusiones

El radio de doblado no tiene gran influencia en la geometría final de la unión, ni por lo tanto en la calidad geométrica ya que no influye ni en el enrollamiento ni en la zona deformada y su influencia en el combado es reducida. Sin embargo sí que facilita la aparición de grietas a medida que disminuye. Esto último se debe a una mayor concentración de tensiones en la zona de doblado ya que un radio de doblado menor genera una zona deformada menor para una misma deformación final. Una vez analizada la influencia del radio de doblado en el engatillado por EMF se optó por fijar esta variable ya que no influye en los parámetros geométricos y de calidad finales de la unión, únicamente en la aparición de grietas.

**Se eligió el límite inferior de 1,2mm como único valor para la variable del radio de doblado.**

Al reducir el valor de esta variable de entrada al mínimo nos situamos en el rango de aparición de grietas. Con ello se pretende analizar el parámetro de aparición de grietas más en profundidad ya que se dispondrá de muestras con y sin grietas. Mientras que si nos situamos en el límite superior es posible que no se obtengan grietas y por lo tanto no se puede analizar su aparición en función de otras variables de entrada estudiadas.

## 5.2 Nuevo defecto propio del engatillado por EMF

Al realizar las diferentes pruebas preliminares se observó un defecto propio del engatillado por EMF y que no está reflejado entre los defectos del engatillado convencional. Es un defecto parecido al “retroceso” pero en el que la unión acaba por doblarse en el otro sentido tal y como se ilustra en la figura 5.26. Este defecto se ha denominado como “doblado del refuerzo interior” y su control es de vital importancia si se quieren obtener uniones engatilladas de calidad por EMF.

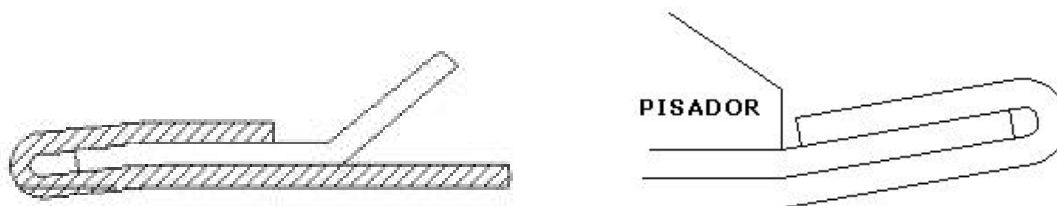


Figura 5.26: Defecto de “retroceso” que aparece en el engatillado mecánico convencional (izquierda [LIV00]) y defecto denominado como “doblado del refuerzo interior” propio del engatillado por EMF (derecha).

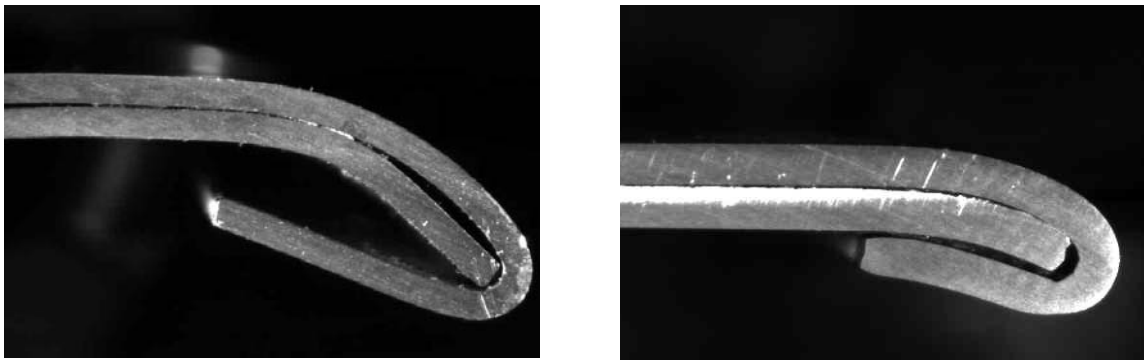
El problema principal radica en que **dicho defecto puede tener dos posibles causas:**

- La descarga de **una energía excesiva** a través de la bobina. Este exceso de energía hace que **la pestaña sea lanzada con demasiada fuerza**. La pestaña todavía conserva parte de su energía cinética al completar la deformación necesaria para engatillar por lo que **choca contra el refuerzo interior y lo dobla**.

- La segunda de las opciones es que **los parámetros de entrada del proceso de engatillado por EMF no hayan sido ajustados correctamente** por lo que **el refuerzo interior se dobla antes de completar el engatillado**.

El problema que esto nos presenta es conocer en cada caso cual de los dos motivos citados ha sido el culpable de que se produzca el doblado del refuerzo interior.

Para ilustrar mejor esto se presentan dos casos en la figura 5.27.



*Figura 5.27: Uniones engatilladas para ilustrar las causas del defecto “doblado del refuerzo interior”.*

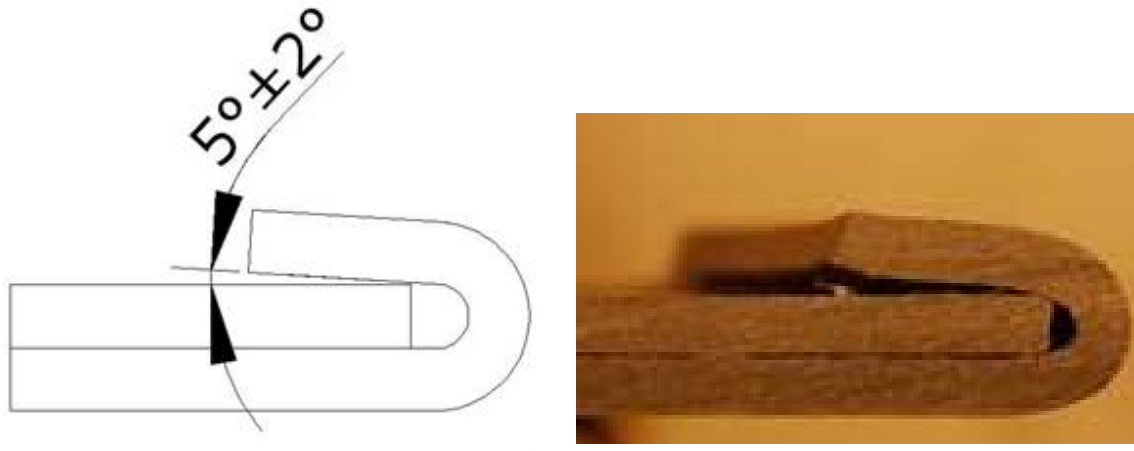
En la imagen de la izquierda de la figura 5.27 se observa claramente que el doblado del refuerzo interior se produce antes de conseguir el engatillado completo ya que el refuerzo interior se ha doblado antes de llegar a engatillar la unión.

El doblado del refuerzo interior es evidente también en este caso de la derecha aunque no tanto su porqué. A simple vista no se puede asegurar si ese doblado se ha producido durante el proceso de engatillado, y por lo tanto está causado por una mala elección de los parámetros de entrada de proceso o si se ha producido por un exceso de energía lo que ha originado un choque de la pestaña contra el refuerzo interior.

### 5.2.1 Definición de una geometría modelo

**Para solucionar este problema se ha definido una geometría modelo** que a partir de ahora **se utilizará para comparar ciertos parámetros** de salida. Esta geometría modelo, aún sabiendo que no representa una unión engatillada perfectamente, se aproxima mucho a una unión real y nos

permite aclarar de forma sencilla la incertidumbre presentada arriba. Esta geometría modelo se puede ver en la figura 5.28:



*Figura 5.28: Definición geométrica de la geometría modelo (izquierda) y fotografía de lo que será considerada como una geometría modelo de una unión engatillada real (derecha).*

De este modo, si una geometría modelo presenta el refuerzo interior doblado, sabremos que ha sido causado por una mala elección de las variables de proceso y habrá que modificarlas para intentar conseguir una unión con el refuerzo interior recto.

Pero si se consigue una geometría modelo con el refuerzo interior recto se considerará como una unión engatillada buena.

### 5.3 Conclusiones de los ensayos preliminares

#### ***Variables influyentes en el proceso:***

A continuación se listan las variables más influyentes de las analizadas en el estudio preliminar:

*Altura de pestaña:* No se han podido extraer conclusiones cuantitativas del estudio de la influencia de la altura de la pestaña. Las dos alturas probadas de 5 y 10mm fueron elegidas basándose en las alturas utilizadas en el engatillado mecánico convencional. Sin embargo ha sido imposible conseguir uniones aceptables con la altura de pestaña de 10mm debido a las fuerzas inerciales que aparecen en el proceso del EMF y a la decisión de realizar el engatillado partiendo desde la posición de doblado a  $90^\circ$ . Por lo tanto, aunque en este estudio preliminar no se han podido sacar muchas conclusiones sobre como influye la altura de pestaña en el engatillado por EMF, si que se ha visto su importancia en la calidad final de la unión. Por lo que se considera una variable de entrada importante que volverá a analizarse en el siguiente estudio experimental.

*Solapamiento:* El solapamiento es un parámetro clave a la hora de engatillar por EMF. Es un parámetro que influye tanto en la geometría final de la unión así como en su calidad. Es por lo tanto un parámetro a estudiar más en profundidad en los siguientes experimentos. El rango para los experimentos posteriores no se ha podido fijar aunque parece que se encuentra entre el 50 y el 0%.

*Energía:* La energía descargada por el banco de condensadores será un parámetro que siempre estará presente en todos los experimentos dada su influencia en el proceso. Su valor se irá variando (generalmente empezando por valores bajos para ir subiendo) hasta conseguir la rotura de la pieza o la unión engatillada deseada. Por lo tanto, la variable “energía” estará presente en casi todos los apartados del siguiente estudio experimental y su influencia será analizada dentro de cada capítulo pero no se estudiará como variable independiente.

***Variables de menor influencia:***

Se descartó una variable de menor influencia en los parámetros de salida estudiados.

*Radio de doblado:* El radio de doblado no tiene influencia en la geometría final de la unión, ni por lo tanto en la calidad geométrica ya que no influye en el enrollamiento, ni en el combado y tampoco en la zona deformada. Sin embargo sí que facilita la aparición de grietas a medida que disminuye. Esto último se debe a una mayor concentración de tensiones al tratarse de un radio menor para una misma deformación final. Por lo tanto y basándonos en los resultados obtenidos en este estudio preliminar, se elegirá un solo valor de radio de doblado para el siguiente estudio experimental.

Este valor se situará en el límite inferior del rango de valores utilizados con aleaciones de aluminio y tendrá un valor de 1,2mm. Al reducir el valor de esta variable de entrada al mínimo nos situamos en el rango de aparición de grietas. Con ello se pretende analizar el parámetro de aparición de grietas más en profundidad ya que se dispondrá de muestras con y sin grietas. Mientras que si nos situamos en el límite superior es posible que no se obtengan grietas y por lo tanto no se pueda analizar su aparición en función de otras variables de entrada estudiadas.





## **CAPITULO 6– ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DESARROLLO DEL PROCESO**



## **6 ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DESARROLLO DEL PROCESO**

En este capítulo es donde se aborda el estudio experimental de la tesis. El objetivo de este capítulo es el de desarrollar la tecnología del EMF para el engatillado de piezas de aluminio.

La primera parte del capítulo presenta el plan experimental con las distintas variables de entrada que se van a analizar y los parámetros de salida que se medirán para determinar la capacidad para engatillar que posee el EMF.

Posteriormente se analiza en profundidad cada una de las variables de entrada. Aquí es donde se medirán los diversos parámetros de salida presentados en el plan de experimentos y se estudiará como influyen dichas variables en ellos. Para acabar, cada uno de los apartados contará con un resumen de las conclusiones más relevantes obtenidas.

A continuación se agrupan las conclusiones más relevantes de todas las variables estudiadas en el estudio experimental.

La última parte de este capítulo presenta un estudio comparativo entre dos engatillados. Uno realizado mecánicamente con una prensa hidráulica y otro realizado por EMF. El objetivo de este estudio es conocer los cambios sufridos por el material y por los parámetros de calidad final de una unión engatillada al utilizar las distintas tecnologías.

## 6.1 Diseño del plan experimental

Los experimentos realizados hasta el momento tenían como objetivo principal obtener en una primera aproximación las variables de este nuevo proceso de engatillado.

Para el siguiente estudio experimental, se parte por lo tanto, con un conocimiento real sobre cuales son las variables que gobiernan el engatillado por EMF y cuales tienen menor influencia en la calidad final.

Se ha diseñado un plan de ensayos basado en los conocimientos adquiridos en la etapa de ensayos preliminares. Se han elegido las variables del estudio preliminar más influyentes en la geometría final, se han introducido variables nuevas y se han establecido los rangos en los que van a ser ensayadas. También se describen las variables que se han fijado para este estudio.

Antes de analizar las variables de entrada del engatillado por EMF se ha analizado la influencia que tendría el realizar la operación de doblado previa también por EMF. Para ello se realizará una comparativa entre piezas dobladas por EMF y dobladas mecánicamente. Posteriormente estas piezas serán engatilladas por EMF exactamente igual.

### *Plan experimental*

A continuación se presentan las distintas variables de proceso que se van a estudiar. Una introducción más extensa sobre cada una de ellas se realiza al comienzo de cada capítulo 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6.

De las 4 variables de entrada estudiadas en el estudio preliminar (solapamiento, energía, altura de pestaña y radio de doblado) se han seleccionado 2 para el estudio experimental de este capítulo: el solapamiento y de la altura de la pestaña.

**El solapamiento** es una variable de entrada que es propia del engatillado por EMF y parece, observando el estudio preliminar, que se trata de una variable de entrada fundamental para conseguir una unión engatillada que cumpla con los requisitos de calidad. Por lo tanto en este capítulo se va a profundizar en su estudio.

La otra variable a estudio es **la altura de la pestaña**. Esta es una variable presente en cualquier proceso de engatillado, bien sea convencional, por roldana o por EMF. Se trata de un parámetro importante ya que limita geoméricamente lo que es engatillable y lo que no, por lo que también se va a volver a estudiar.

**El radio de doblado se mantendrá fijo** a partir de ahora. Esta decisión está basada en los resultados obtenidos en el estudio preliminar. En el estudio realizado sobre el radio de doblado no se observaron grandes diferencias en la calidad de la unión al cambiar esta variable salvo en la generación de grietas. Por lo tanto se decidió fijar un solo valor de 1,2mm para el radio de doblado.

**La energía de descarga EMF, que fue tratada como variable de entrada en el estudio preliminar, no se tratará como tal en este estudio experimental.** Aunque se trata de una variable fundamental para conseguir una unión engatillada buena, es una variable que no es fácilmente comparable. Aunque se descargue la misma cantidad de energía por el banco de condensadores la presión magnética generada varía al cambiar cualquiera de las demás variables como el solapamiento, la altura de pestaña o la geometría de la bobina. Por esta razón no se estudiará como variable independiente aunque estará presente intrínsecamente en los experimentos y en los resultados obtenidos.

Además de las variables arriba mencionadas y analizadas en primera instancia en el estudio preliminar, se van a introducir **nuevas variables** de entrada para el estudio experimental. Estas variables nuevas son:

- **La operación de doblado** anterior al engatillado
- **La geometría de la pieza exterior**
- **GAP (o distancia) entre el refuerzo interior y la pestaña**

Antes de realizar la operación de engatillado **las piezas tienen que ser dobladas** para obtener la pestaña que posteriormente se engatillará. Al no disponer de piezas dobladas para la realización de este estudio experimental **se optó por doblar las piezas por EMF**. De esta manera se aprovechará la necesidad de doblar las chapas para analizar las muestras dobladas por EMF **y realizar un estudio de caracterización del proceso**.

En el estudio preliminar se ha estudiado una sola geometría, la recta. En este apartado se va a estudiar la **influencia de la geometría de la pieza exterior** en la calidad de la unión engatillada obtenida. Para ello se van a engatillar diversas piezas con **diferentes diámetros exteriores de 30mm, 60mm y 90mm**. También se realizarán diversos experimentos con la geometría recta. De todos modos no se analizarán todas las variables de entrada ni todos los parámetros de salida para la geometría recta. Sí para las 3 geometrías circulares.

**El GAP entre la pestaña y el refuerzo interior** ha sido una variable que se ha mantenido fija en el estudio preliminar. Sin embargo, en la industria de la automoción **es una variable importante**. Importante porque su valor puede tener una desviación de  $\pm 2\text{mm}$  entre piezas de diferentes series. Por lo que se vio la necesidad de estudiar esta variable y ver como se comporta al engatillar por EMF.

De todos modos conviene señalar que esta variable ha sido estudiada en un estado preliminar. Es decir, se ha realizado una serie de experimentos reducida variando el GAP entre el refuerzo interior y la pestaña para ver el impacto de esta variable en la unión engatillada conseguida. Es la misma estrategia utilizada en esta tesis con el estudio preliminar realizado en el capítulo 5, realizar un primer estudio para a partir de él decidir si merece la pena profundizar más en el estudio de esa variable o si por el contrario se trata de una variable poco influyente en el resultado final.

*Equipamiento utilizado:*

Para este segundo estudio experimental se utilizó el banco de capacitores que posee la unidad de Automoción de LABEIN-Tecnalia en su sede de Derio. En la figura 6.1 se pueden ver las distintas partes:

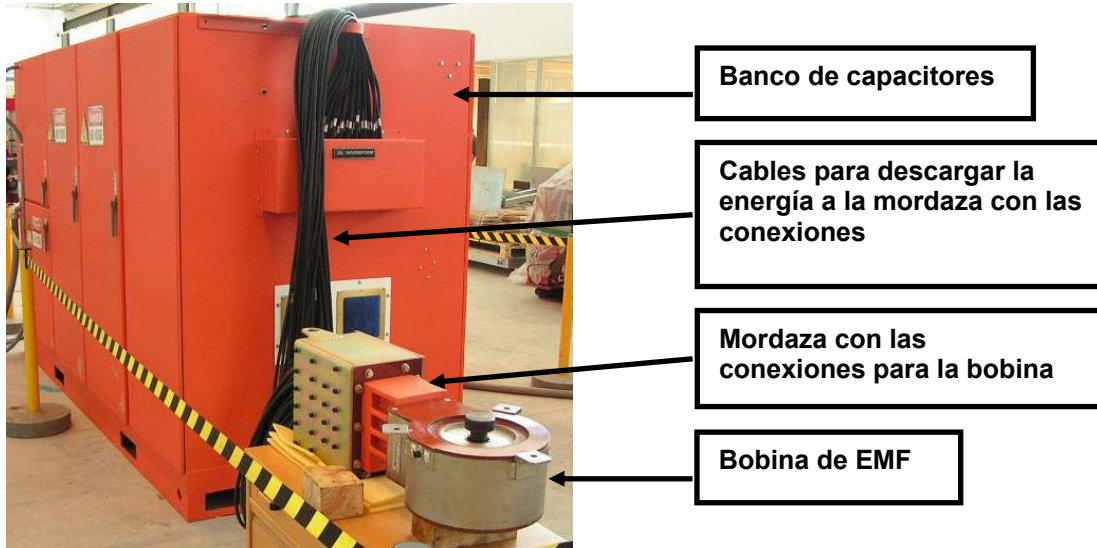


Figura 6.1: Banco de capacitores de LABEIN-Tecnalia Automoción utilizado para los experimentos físicos. Es de la marca Magneform modelo ESCU de 60 kJ de energía.

Sus características eléctricas se muestran a continuación:

Inductancia	Resistencia	Capacitancia max.	Voltaje max.	Energía max.
10,3 nH	956 $\mu\Omega$	1800 $\mu\text{F}$	8,8kV	60 kJ

*Material:*

La utilización del aluminio para fabricar piezas de carrocería de automóvil se remonta a los principios de la automoción y de la producción de aluminio. En tiempos en los que la prioridad de los fabricantes era el aumento de la producción en masa y la reducción de costes, el acero se estableció rápidamente como el material número uno para piezas de carrocería.

Sin embargo el aumento del precio de los carburantes, las nuevas regulaciones sobre emisiones de CO<sub>2</sub> junto con el aumento del peso debido a los nuevos equipos para el confort de los viajeros, hacen necesaria la reducción de peso en el automóvil.

Las principales familias de aluminios utilizados para la fabricación de piezas de carrocería exterior en automoción son la no tratable térmicamente serie 5XXX (Al-Mg) y la tratable térmicamente serie 6XXX (Al-Mg-Si). Actualmente se desarrollan aleaciones especiales buscando características específicas en cada caso (figura 6.3).

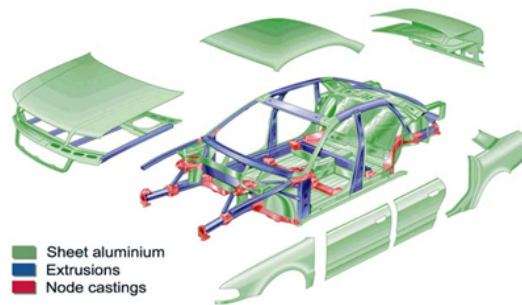


Figura 6.2: Audi A8 – Estructura de aluminio y distribución de semi-materiales (AUDI) [KEY09].

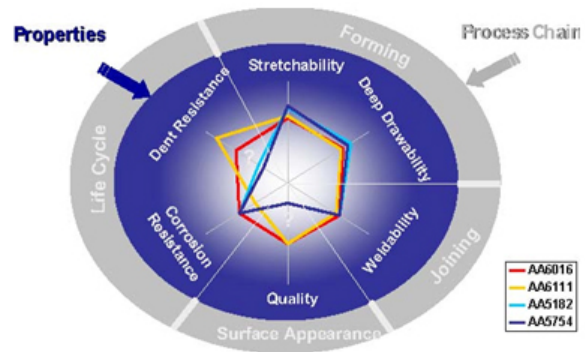


Figura 6.3: Aleaciones EN-AW 5xxx y 6xxx y sus características para piezas de piel exterior de automoción [KEY09].

Se ha elegido un material muy común en la estampación de piezas exteriores de carrocería del automóvil. Se trata de la aleación de aluminio endurecida por precipitación AA6016T4. Sus características mecánicas proporcionadas por el suministrador del material se resumen en la tabla 6.1.

	Re (MPa)	Rm (MPa)	Alargamiento (%)	Espesor (mm)	Dureza (HV)
<b>AA 6016 T4</b>	123	237	20	1.1	~70

Tabla 6.1: Propiedades mecánicas del material AA6016T4 utilizado en este estudio [ALU07].

A continuación se detallan las características mecánicas para los distintos estados dentro de la misma aleación en función del tratamiento térmico seguido:

EN-AW 6016	Temper	Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	Ag [%]	A80mm [%]
<b>standard*</b>	T4	90-130	190-240	≥ 20	≥ 24
	T6 (205°C/30min)	≥ 200	≥ 240		≥ 12
<b>forming-optimized **</b>	T4	≤ 110	≥ 200	≥ 22	≥ 26
	T6 (205°C/30min)	≥ 200	≥ 240		≥ 12
<b>fast-hardening **</b>	T4	90-130	190-240	≥ 20	≥ 24
	T6 (185°C/20min)	≥ 210	≥ 270		≥ 14

\* for panels + coil, thickness 0.8 to 2.0mm

\*\* target values for development: panels + coil, thickness 0.8 to 2.0mm

Tabla 6.2: Propiedades mecánicas estandarizadas para chapas de automoción de la aleación EN-AW 6016. [KEY09]

Se puede ver como nuestro material está dentro de los límites fijados por las distintas normas.

A continuación se hace una descripción del funcionamiento y del proceso de obtención de este tipo de aleaciones:

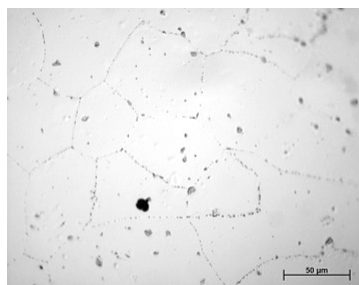
*Aleaciones de endurecimiento por precipitación (o envejecimiento):*

El objetivo del endurecimiento por precipitación es crear, en una aleación tratada térmicamente, una dispersión densa y fina de partículas precipitadas en una matriz de metal deformable. Las partículas precipitadas actúan como obstáculos del movimiento de las dislocaciones aumentando la resistencia mecánica. El proceso para obtener una aleación endurecida por precipitación consta de dos partes:

1. Tratamiento térmico de la solución.
2. Tratamiento térmico de precipitación.

1. Tratamiento térmico de la solución (solubilización): El objetivo de esta etapa, es disolver un máximo de la segunda fase en la solución sólida y después, retener esta solución hasta alcanzar la temperatura ambiente. Esto se efectúa así:

- Calentando la aleación hasta una temperatura elevada, pero inferior a la que produciría un crecimiento excesivo de grano o la fusión de uno de los constituyentes.
- Manteniendo esta temperatura desde una hasta varias horas, dependiendo del espesor de la pieza para que pueda producirse la solución.
- Templado en agua hasta obtener una solución sólida sobresaturada a temperatura ambiente. Después del tratamiento de disolución la dureza es relativamente baja, pero superior a la del material enfriado lentamente y revenido.



*Figura 6.4: Aleación de aluminio que contiene precipitados (microscopio óptico) [HMI09].*

2. Tratamiento de precipitación: Es necesario un tratamiento de precipitación para la formación de un precipitado finamente disperso. La formación de dicho precipitado en la aleación es el objetivo del envejecimiento. El precipitado fino en la aleación impide el movimiento de las dislocaciones durante la deformación, forzando a que éstas pasen a través de las partículas de precipitado cortándolas o rodeándolas. La aleación resulta reforzada mediante esta restricción del movimiento de las dislocaciones durante la deformación. En esta etapa se obtiene la dureza máxima de estas



aleaciones, la solución sobresaturada sufre cambios que conducen a la formación de la segunda fase.

Las aleaciones en las que la precipitación tiene lugar a temperatura ambiente, de modo que obtienen su resistencia total después de 4 ó 5 días de estar a temperatura ambiente, se conocen como aleaciones de envejecimiento natural, en tanto que las que necesitan recalentamiento a elevadas temperaturas para alcanzar su máxima resistencia, se conocen como aleaciones de envejecimiento artificial. Sin embargo, estas aleaciones también envejecen de forma limitada a temperatura ambiente, dependiendo de la rapidez y extensión del fortalecimiento de las características de las aleaciones.

A medida que se incrementa el tiempo de envejecimiento, se van formando las zonas de precipitación y su tamaño se incrementa; además, la aleación se hace más fuerte, dura y menos dúctil.

Estas propiedades mecánicas alcanzan un valor máximo durante la precipitación a una temperatura dada y después disminuyen gradualmente como consecuencia del sobre-envejecimiento. Este ablandamiento es consecuencia natural de la aproximación de la aleación al estado de equilibrio, al aumentar el tiempo durante el que la aleación se mantiene a temperatura. Una aleación muy sobre-envejecida sería esencialmente idéntica a una aleación recocida, es decir una aleación en la que la estructura de equilibrio se produce por medio de un enfriamiento lento desde la temperatura del tratamiento de solución.

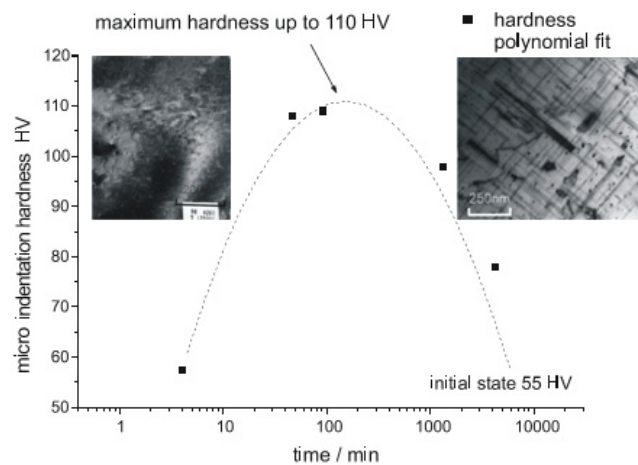


Figura 6.5: Evolución de la dureza de la aleación 6016 (curva de endurecimiento por envejecimiento) [HMI09].

Una aleación endurecible por precipitación en la condición de solución sólida supersaturada se encuentra en un estado de alta energía. Este estado de energía es relativamente inestable y la aleación tiende a buscar un estado menor de energía por la descomposición espontánea de la solución sólida supersaturada en fases metaestables o fases de equilibrio. Cuando la solución sólida supersaturada de la aleación endurecida por precipitación se envejece a una temperatura relativamente baja, para la que sólo se dispone de una pequeña cantidad de energía de activación, se forman unas agrupaciones de átomos segregados llamadas zonas de precipitación.

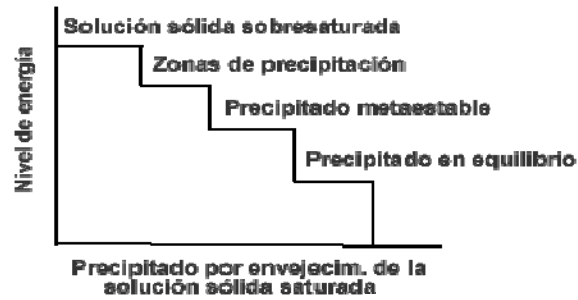


Figura 6.6: Evolución del nivel de energía de las aleaciones de endurecimiento por precipitación [UTP09].

El nivel energético superior es para la solución sólida sobresaturada y el nivel inferior para el precipitado en equilibrio. La aleación puede ir espontáneamente de un nivel energético superior a uno inferior si hay suficiente energía de activación para la transformación y si las condiciones cinéticas son favorables.

El endurecimiento por precipitación es el método más importante para aumentar la resistencia mecánica de los metales no ferrosos por reacción en el estado sólido. Es especialmente útil para el aluminio, el metal principal de esta clase, y tanto las aleaciones de aluminio de fundición como las de forja son endurecibles por precipitación.

## 6.2 Análisis del doblado

Antes de realizar la operación de engatillado las piezas tienen que ser dobladas para obtener la pestaña que posteriormente se engatillará. Para el caso de las piezas de automoción esta pestaña se obtiene al estampar la pieza en la línea de prensas.

Al no disponer de piezas dobladas para la realización del estudio experimental presentado en el capítulo 6.1 se abrieron dos posibles vías para su obtención. La primera consistiría en fabricar los útiles necesarios y posteriormente fabricar las piezas por estampación o embutición en prensa. La segunda vía es la de realizar la operación de doblado utilizando también el EMF. Teniendo en cuenta el saber hacer adquirido en estos últimos años se optó por doblar las piezas por EMF. De esta manera se aprovechará la necesidad de doblar las chapas para estudiar también este nuevo proceso de doblado, analizando las muestras dobladas por EMF y realizando un estudio de caracterización del proceso.

Este capítulo comienza por hacer una búsqueda y análisis de los estudios previos realizados en el campo del doblado por EMF. Posteriormente se diseñara un plan de ensayos y se extraerán las conclusiones obtenidas en lo referente a la operación de doblado por EMF.

Seguidamente se estudiará la influencia de esas variables del proceso de doblado por EMF en el engatillado final. Se seleccionarán piezas dobladas por EMF con distintos valores en sus variables de entrada y se analizarán los parámetros de salida después del engatillado por EMF.

A continuación se elegirán unos parámetros de doblado por EMF óptimos y se realizará una última prueba en lo referente al doblado. Ya que el principal objetivo de esta tesis es el proceso de engatillado por EMF y no el doblado, es fundamental saber en que parámetros y como influye el que la etapa de doblado haya sido realizada por EMF y no por estampación mecánica. Para analizar esto, la pieza obtenida con los parámetros óptimos de doblado por EMF se engatillará por EMF y se comparará con otra pieza doblada mecánicamente y engatillada también por EMF con los mismos parámetros de proceso.

El capítulo finaliza con las conclusiones referentes al estudio del doblado por EMF.

### 6.2.1 *Doblado por EMF*

#### *Antecedentes*

Al igual que sucede con la bibliografía referente al engatillado por EMF, existen muy pocos estudios sobre doblado por EMF. Solamente se han encontrado dos proyectos de fin de carrera.

Estos dos proyectos han sido desarrollados por el departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería de la Universidad de Ohio State. De ellos se extraen varias conclusiones aplicables a

nuestro estudio. Se observa que el radio de la herramienta de doblado no influye sobre los límites de conformabilidad de la pieza doblada (siempre dentro de los límites utilizados en procesos convencionales de doblado de chapa para automoción). Se consigue una misma altura de pestaña máxima antes de la aparición de grietas independientemente del valor del radio de doblado de la herramienta. Aumentando dicho radio se consiguen deformaciones más homogéneas y más arrugas, mientras que al reducir su valor, la deformación que se consigue es más local, pero la altura de pestaña máxima obtenible se mantiene constante [DAT00], [KAP01]. El estudio sobre el doblado por EMF que se presenta a continuación pretende establecer las variables de proceso más influyentes en la calidad final de las piezas dobladas. Una vez analizada la influencia de las variables del doblado por EMF se elegirán las más indicadas para fabricar las piezas que posteriormente se engatillarán.

#### *Plan de experimentos de doblado mediante EMF*

Una vez analizada la escasa literatura existente al respecto, se realizó el plan de ensayos de doblado por EMF, siempre adaptado a los ensayos de engatillado a realizar posteriormente con esas mismas piezas dobladas. **El material** utilizado es el mismo que utilizaremos para el estudio del engatillado por EMF, **la aleación de aluminio 6016T4**. Todas sus características están explicadas en el capítulo 6.1. El valor del **radio de doblado será de 1,2mm** a partir de ahora tal y como se concluye al final del estudio llevado a cabo en el punto 5.1.6. Además la literatura referente al doblado por EMF presentada al comienzo de este apartado concluye en que el valor del radio de doblado (dentro de los rangos utilizados por la industria de automoción) no influye en el límite de conformabilidad de las piezas dobladas. A continuación se resume en la tabla 6.3 el plan experimental para el doblado por EMF con las distintas variables de entrada y los valores ensayados.

<b>Diámetro exterior de la pieza (mm)</b>	<b>Altura de pestaña (mm)</b>	<b>Solapamiento (%)</b>
30	5	60
	7	60
		15
60	5	60
	7	60
		15
90	5	60
	7	60
		15

*Tabla 6.3: Plan de ensayos para el estudio del doblado por EMF.*

Para cada una de las combinaciones de la tabla de arriba se realizó un barrido de energías. Es decir, para cada combinación se realizaron experimentos variando la energía desde 1kj hasta la rotura de la pieza, por lo que el número aproximado de experimentos para caracterizar el doblado por EMF fue de entorno a los  $9 \times 5 = 45$  ensayos. Estos ensayos se multiplicaron por 2 al introducir la dirección de la laminación a  $0^\circ$  y a  $90^\circ$  para analizar la influencia de la anisotropía. Por lo que el número final de ensayos es de unos 90.

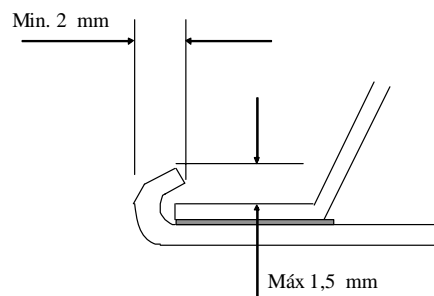
#### *Diámetro exterior de la pieza:*

Las geometrías elegidas para el estudio del doblado son las necesarias para realizar el posterior estudio del engatillado por EMF. Estas piezas circulares son 3 diámetros exteriores de 30mm, 60mm y 90mm. El rango de los diámetros utilizados por el sector del automovil va desde los 20mm a los 2000mm. Por razones constructivas de tamaño de bobinas se han elegido unos valores en el rango inferior para luego extrapolar resultados. Conviene señalar que los valores de diámetro exterior pequeños son los que más problemas dan a la hora de ser engatillados.

#### *Altura de pestaña:*

La elección de las alturas de pestaña a analizar viene definida por distintos aspectos. Se tuvo en cuenta la experiencia adquirida en los ensayos preliminares del capítulo 5 para limitar la altura de pestaña a menos de 10mm. Esto se debe a la imposibilidad de obtener uniones engatilladas sin doblar el refuerzo interior con dicha altura de 10mm tal y como se explica en el capítulo 5.

Se consultó a empresas del entorno dedicadas a engatillar acerca de las alturas que se utilizan en los procesos convencionales. Dichas empresas fijaron el límite inferior de esta altura entorno a los 3,5mm. Posteriormente este límite se subió hasta los 5mm ya que no se conseguía suficiente longitud de pestaña como para poder realizar la operación de engatillado posterior. Este límite inferior utilizado en la industria de automoción no llega a engatillarse del todo, simplemente se dobla para dar la sensación visual de un engatillado real visto desde fuera tal y como se detalla en la figura 6.7.

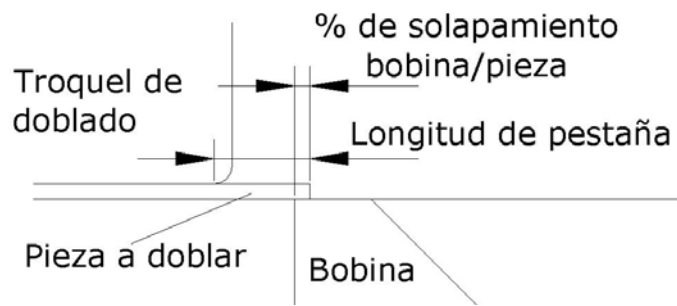


*Figura 6.7: Solución para engatillar diámetros exteriores pequeños y por lo tanto pestañas con alturas pequeñas [GES09]*

La pestaña de 7mm será el límite superior de esta variable. Vista la imposibilidad de obtener uniones aceptables con la altura de 10mm se decidió reducir el máximo hasta los 7mm. Con este valor se pretende ver cual es la tendencia que siguen los diferentes parámetros de salida estudiados al aumentar la altura de pestaña y si es posible establecer el límite de altura de pestaña engatillable para cada uno de los diámetros ensayados. Por lo tanto **las alturas de pestaña elegidas** para el estudio experimental **son 5mm y 7mm**.

#### *Solapamiento:*

Para el caso del doblado la definición del solapamiento es la misma que en el engatillado, la única diferencia es que el solapamiento corresponde a la distancia que se sobreponen la bobina de EMF con la pieza a doblar tomando como longitud total de pestaña desde el extremo de la pieza hasta el punto en el que entra en contacto con el troquel de doblado (figura 6.8).



*Figura 6.8: Esquema del solapamiento en el doblado por EMF.*

Al tratarse de un estudio complementario al estudio principal sobre engatillado no es posible cubrir todo el rango de las variables. Por ello haciendo la siguiente suposición, basada en la experiencia adquirida en EMF, se consiguió reducir el número de experimentos y ajustar el proceso a los resultados que nos interesan y que están relacionados con el engatillado posterior.

Un valor de solapamiento de entorno al 100% resultaría excesivo ya que ello provocaría un aumento de la componente de cizalladura en la pieza lo que produciría grietas o una gran estricción en la zona del radio de doblado. Por lo tanto se fijará un valor medio del 60% y otro valor en el extremo inferior del 15% para el solapamiento.

#### *Dirección de laminación:*

Se analizará la influencia de la dirección de laminación en el doblado. Para ello se realizarán ensayos rotando la pieza 90 grados, como se explica en la figura 6.9.

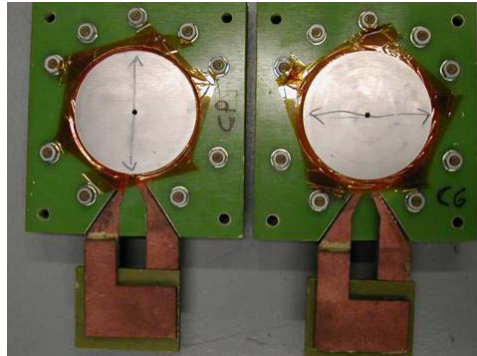


Figura 6.9: Piezas colocadas sobre las bobinas de doblado con la dirección de laminación en vertical (izquierda) y con la dirección de laminación en horizontal (derecha)

De todos modos el material a estudio no es muy anisótropo si nos ceñimos a sus características mecánicas obtenidas variando la dirección de laminación (tabla 6.4):

6016 T4	0°	45°	90°
Rp0,2 (MPa)	123	119	120
Rm (MPa)	237	230	230
Rp0,2/Rm	0,52	0,52	0,52
A%	25,6	29,4	28,8
n	0,25	0,26	0,25
r	0,6	0,5	0,7

Tabla 6.4: Datos mecánicos facilitados por el suministrador del material [ALU07].

#### Energía:

La energía es la variable más fácilmente alterable de todo el proceso. Basta con girar el potenciómetro de la maquina de EMF para conseguir las distintas energías necesarias. Por lo tanto en los experimentos se ha ido aumentando la energía descargada por el banco de capacitores a través de la bobina hasta conseguir grietas en las diferentes configuraciones ensayadas.

Se fabricaron dos bobinas y dos discos iniciales para cada diámetro (figura 6.10). Combinando los discos iniciales con las bobinas se consiguen ensayar las distintas configuraciones planteadas en la tabla 6.3.

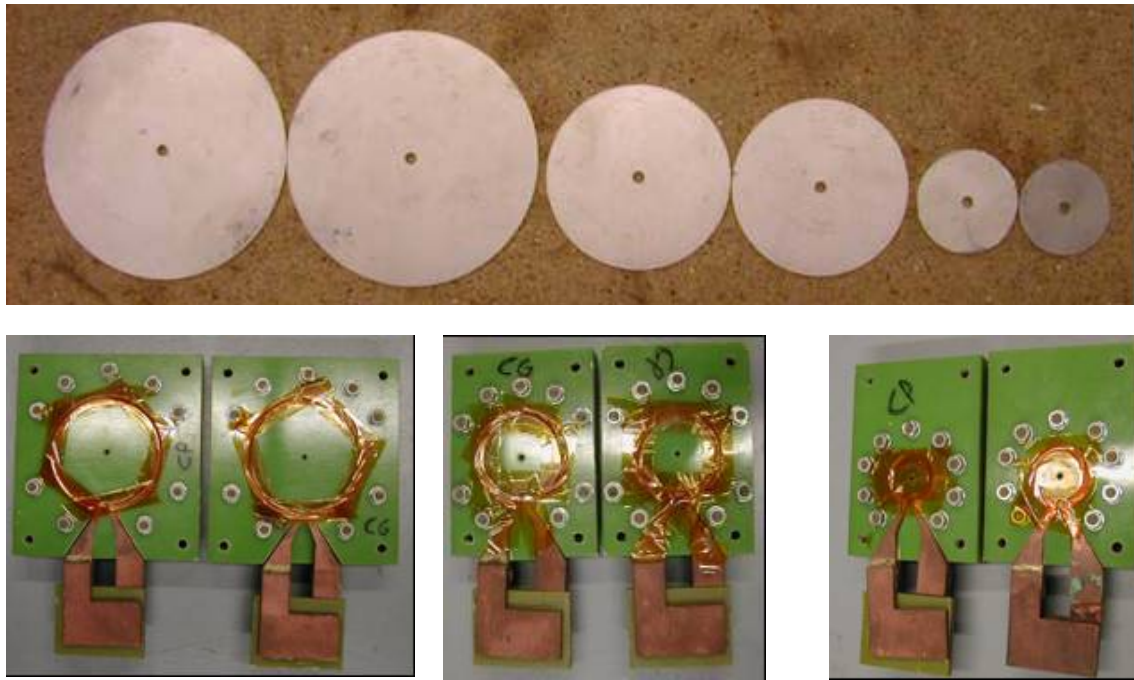


Figura 6.10: Recortes iniciales utilizados para los ensayos de doblado por EMF. Dos recortes por diámetro exterior, uno para la pestaña de 5mm y otro para la pestaña de 7mm (arriba). Bobinas para el doblado por EMF. Dos bobinas por diámetro para los distintos solapamientos ensayados de 15% y de 60% (abajo).

En la figura 6.11 se muestra el set-up para uno de los ensayos de doblado por EMF.

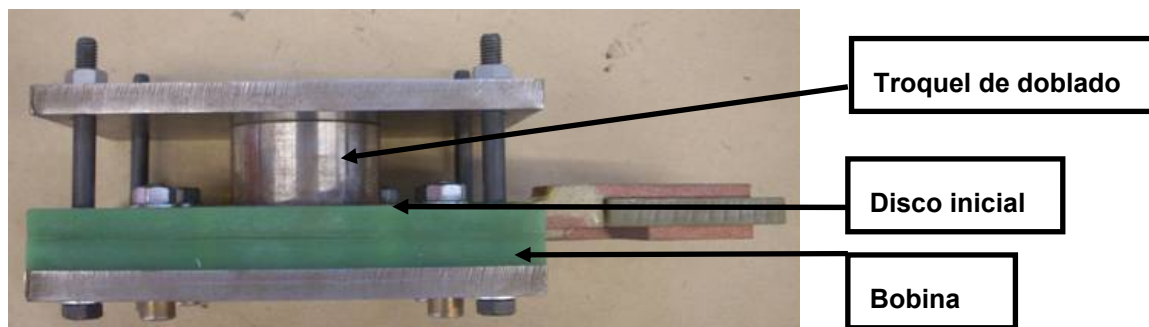


Figura 6.11: Vista en perfil del montaje de un experimento de doblado por EMF con la bobina, el disco inicial y el troquel de doblado.

### Resultados

Los resultados se han clasificado en función de los distintos parámetros de salida del doblado por EMF. Estos parámetros de salida son:

- Diámetro exterior final después del doblado
- Reducción del espesor (en la zona del radio)
- Combado



Se analiza la influencia que tiene cada una de las variables de entrada (planteadas en la tabla 6.3) en los 3 parámetros de salida arriba expuestos.

Antes de pasar a analizar los resultados obtenidos del doblado por EMF se va a definir la geometría modelo de doblado.

#### *Geometría modelo de doblado*

Para analizar los resultados obtenidos de los ensayos de doblado por EMF es necesario definir una geometría modelo de doblado que es la pieza objetivo de estos experimentos. Esta geometría modelo de doblado es la geometría que mantiene un compromiso entre el diámetro final y la reducción de espesor obtenida. Será utilizada como la geometría “buena” para cada una de las configuraciones ensayadas y que se presentan en la tabla 6.5.

Para las distintas configuraciones ensayadas, las geometrías modelo se sitúan en torno al 17% de reducción de espesor para la altura de pestaña de 7mm y en un 16% de reducción de espesor para la pestaña de 5mm (tabla 6.5).

Para el diámetro de 30mm con la pestaña de 7mm y un 60% de solapamiento fue imposible conseguir un diámetro final próximo al nominal con reducciones de espesor menores del 25%.

<b>15%, 7mm</b>	<b>E (kj)</b>	<b>Red. espesor (%)</b>	<b>Diam. Final (mm)</b>	<b>Combado (micras)</b>
Ø30	3	19	30,7	10
Ø60	4	16	60,2	30
Ø90	4,5	14,8	90,17	40
<b>60%, 7mm</b>	<b>E (kj)</b>	<b>Red. espesor (%)</b>	<b>Diam. Final (mm)</b>	<b>Combado (micras)</b>
Ø30	2,5	25	30,74	0
Ø60	2,5	19,6	60,3	0
Ø90	2,5	18,2	90,2	0
<b>60%, 5mm</b>	<b>E (kj)</b>	<b>Red. espesor (%)</b>	<b>Diam. Final (mm)</b>	<b>Combado (micras)</b>
Ø30	1,75	15,5	30,6	0
Ø60	2	16	60,24	0
Ø90	2,5	16	90,14	0

*Tabla 6.5: Características geométricas de salida de las geometrías modelo de doblado por EMF.*

*Diámetro exterior*

A la hora de interpretar las graficas hay que tener en cuenta varios aspectos. El punto de máxima energía para cada uno de los casos se corresponde con el límite de conformado de dicha geometría. O dicho de otra manera, la energía máxima antes de producirse la rotura de la pieza. En la figura 6.12 se han graficado los resultados del diámetro final en función de la energía descargada para cada uno de los tres diámetros ensayados.

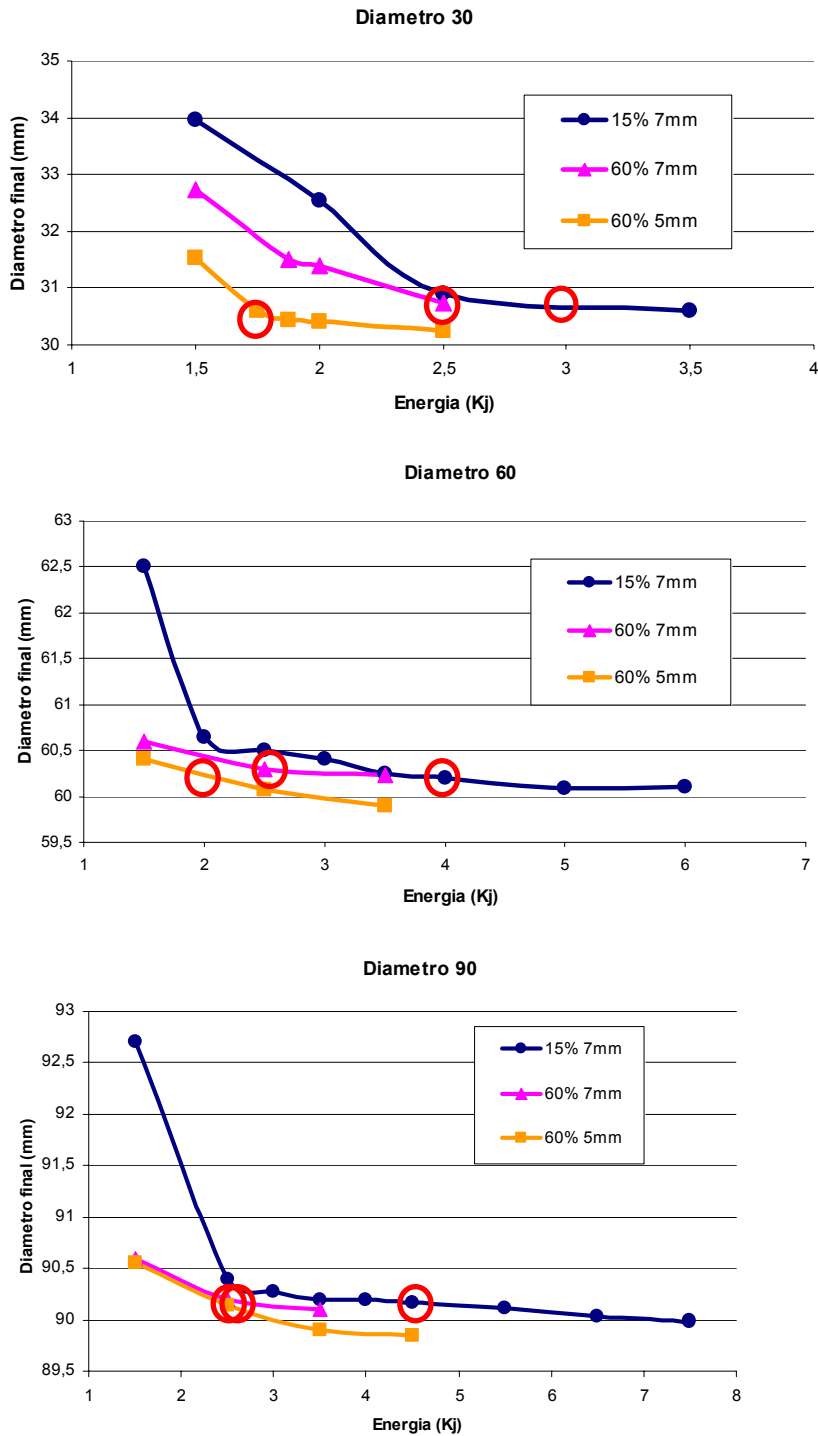


Figura 6.12: Gráficas del diámetro final obtenido en función de la energía para cada configuración ensayada. Las geometrías modelo aparecen señaladas dentro de un círculo rojo.

Si graficamos la energía necesaria para conseguir la geometría modelo de doblado para cada diámetro en función del solapamiento obtenemos las curvas del 60% y del 15% de la gráfica de la figura 6.13. A partir de esas dos curvas se han representado los demás valores de energía por interpolación lineal para el resto de los valores de solapamiento (figura 6.13).

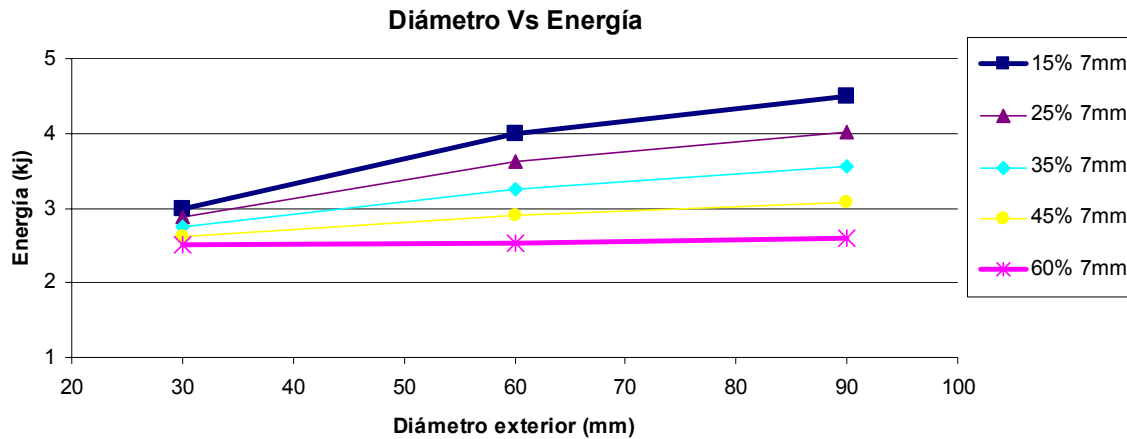


Figura 6.13: Diámetro Vs Energía para obtener la geometría modelo de doblado para distintos valores de solapamiento para la pestaña de 7mm de altura.

Se observa que a mayor porcentaje de solapamiento la energía necesaria para conseguir la geometría modelo es menos dependiente del diámetro exterior de la pieza.

Si se grafica la energía necesaria por milímetro de perímetro del diámetro final para la geometría modelo de doblado obtenemos la gráfica de la figura 6.14:

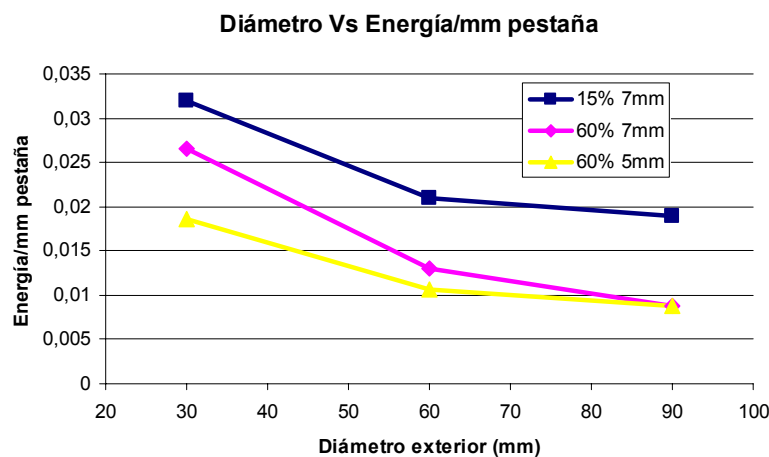


Figura 6.14: Gráfica de la energía por mm de perímetro necesaria para conseguir las distintas geometrías modelo de doblado.

Si en la gráfica de la figura 6.13 se ha visto que la energía total necesaria para conseguir la geometría modelo aumenta con el diámetro exterior de la pieza, la energía necesaria por milímetro de perímetro a doblar disminuye tal y como se observa en la gráfica de la figura 6.14.

Además se puede observar en esa misma gráfica que la energía por milímetro de perímetro necesaria para conseguir la geometría modelo de doblado aumenta al reducir el solapamiento y al aumentar la altura de la pestaña.

A continuación se comparan las energías necesarias para conseguir la geometría modelo de doblado para cada configuración ensayada al 60% de solapamiento:

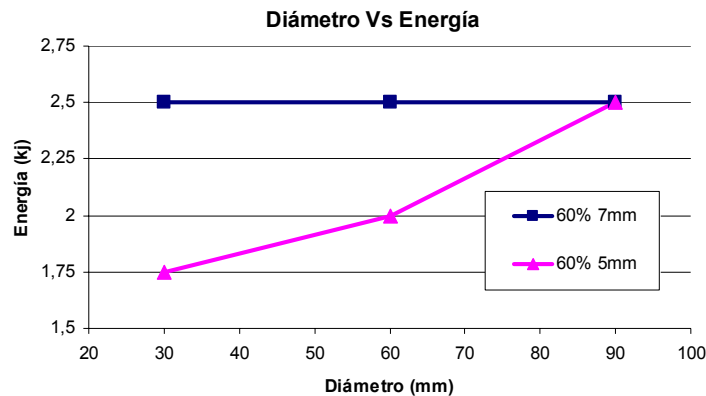


Figura 6.15: Diámetro Vs Energía para obtener la geometría modelo de doblado para las distintas alturas de pestaña.

En la gráfica de la figura 6.15 se observa que la pestaña de 5mm de altura necesita menos energía para ser doblada que la de 7mm. Aunque este efecto es mayor a medida que se reduce el diámetro de la pieza exterior.

#### Conclusiones sobre el diámetro exterior

Al reducir el solapamiento entre bobina y pieza la energía necesaria para obtener el mismo diámetro final en la pieza aumenta. Aunque esta diferencia va disminuyendo a medida que los resultados se aproximan al diámetro nominal (figura 6.12). Con la pestaña de 5mm se necesita menos energía para conseguir el diámetro nominal. Por lo tanto, se consigue mayor precisión con la pestaña de 5mm que con la de 7mm antes de producirse grietas (tabla 6.6).

Ø/Altura de pestaña	7mm	5mm
30mm	30,6	30,25
60mm	60,2	60
90mm	90,15	90

Tabla 6.6: Diámetros finales conseguidos antes de la aparición de grietas.

La energía necesaria para conseguir el diámetro nominal con un error aceptable no está en función del diámetro nominal de la pieza sino en el solapamiento (tabla 6.7). Sin embargo el daño que sufre

cada una de las piezas para conseguir ese diámetro sí que aumenta a medida que disminuye el diámetro exterior de la pieza (tabla 6.7).

Solap.-Altura pestaña	Diámetro final	Energía	% reducción espesor
<b>60%- 5mm</b>	30,25mm	2,5 kj	23,6% (Grietas)
	60,1mm	2,5 kj	21,2%
	90,1mm	2,5 kj	18%
<b>60%- 7mm</b>	30,74mm	2,5 kj	25% (Grietas)
	60,3mm	2,5 kj	19,6%
	90,2mm	2,5 kj	18,2%
<b>15% 7mm</b>	30,6mm	3,5 kj	23% (Grietas)
	60,25mm	3,5 kj	12,7%
	90,2mm	3,5 kj	18%

Tabla 6.7: Daño sufrido en la zona del radio de doblado para las distintas configuraciones ensayadas.

*Reducción de espesor*

Los siguientes resultados han sido obtenidos aumentando progresivamente la energía descargada hasta conseguir la rotura para cada configuración.

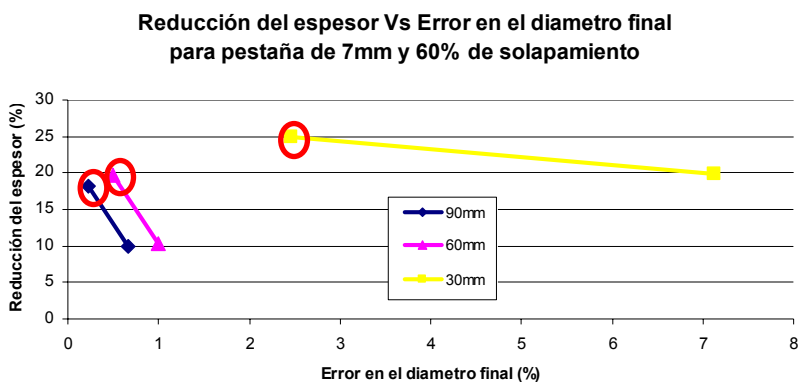


Figura 6.16: Reducción de espesor Vs Error en el diámetro final para la altura de pestaña de 7mm y un solapamiento del 60%. Las geometrías modelo aparecen dentro de un círculo rojo.

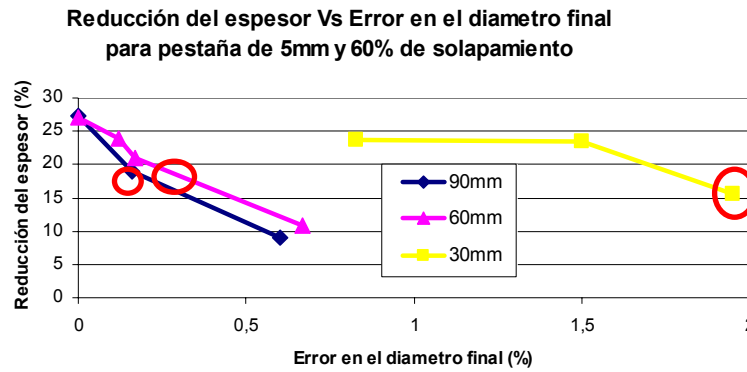


Figura 6.17: Reducción de espesor Vs Error en el diámetro final para la altura de pestaña de 5mm y un solapamiento del 60%. Las geometrías modelo aparecen dentro de un círculo rojo.

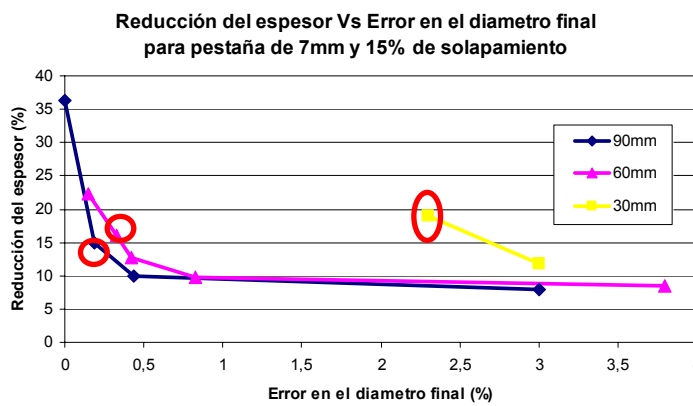


Figura 6.18: Reducción de espesor Vs Error en el diámetro final para la altura de pestaña de 7mm y un solapamiento del 15%. Las geometrías modelo aparecen dentro de un círculo rojo.

### Conclusiones sobre la reducción del espesor

A medida que los valores del diámetro exterior se aproximan al nominal, la reducción sufrida en el espesor aumenta. Además, esta reducción que sufre en el espesor aumenta a medida que disminuye el diámetro nominal de la pieza para un mismo error en el diámetro final. Esto sucede tanto para la altura de pestaña de 5mm como para la de 7mm.

Se observa que para una misma reducción de espesor y altura de pestaña (en los casos en los que ha sido posible) la dimensión del diámetro final es más precisa a medida que aumenta la dimensión del mismo.

### Combado

Se midieron piezas del mismo diámetro para analizar la influencia del solapamiento en el combado de la pieza doblada.

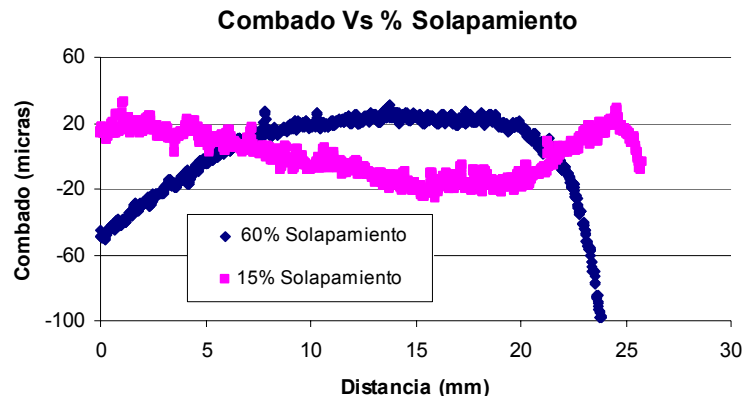


Figura 6.19: Combado Vs Solapamiento para geometrías de 90mm de diámetro exterior y 7mm de altura de pestaña

En la gráfica de la figura 6.19 se observa una forma en el combado muy diferente al variar el solapamiento utilizado para el doblado. La forma del perfil correspondiente al 15% de solapamiento se corresponde con la forma del combado en la bibliografía sobre engatillado. Sin embargo la medición de la superficie en el caso del 60 % no se corresponde con la forma de ese defecto (figura 4.5). Para buscarle una explicación a esa forma del combado tan atípica producida con el 60% de solapamiento, se midió de nuevo la pieza pero esta vez hasta el centro de la misma (figura 6.20).

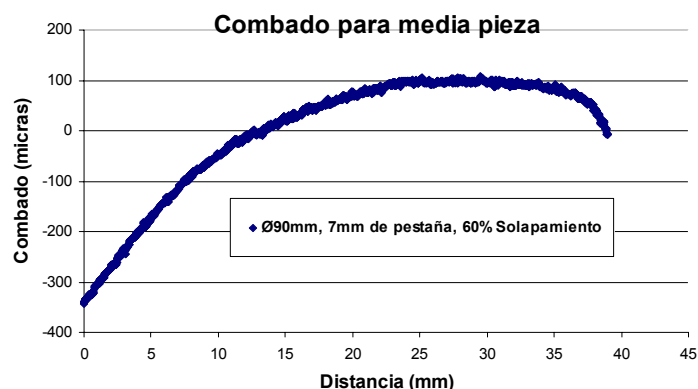


Figura 6.20: Combado medido sobre la superficie de media pieza para el diámetro exterior de 90mm y 7mm de altura de pestaña al 60% de solapamiento..

El defecto que aparece en la gráfica de la figura 6.20 no puede calificarse como combado. Esa deflexión en la superficie exterior a lo largo de toda la pieza de más de 300 micras es otro tipo de defecto creado al extraer la pieza de la herramienta de doblado.

Las piezas dobladas al 60% tienen una mayor tendencia a quedarse sujetas al mandrino. Para sacarlas se introduce aire a presión por un agujero realizado en el centro del mandrino. La presión generada en la cara interior de la pieza para su extracción es la causante de ese defecto (figura 6.21).



Figura 6.21: Pieza doblada al 60% de solapamiento sujeta al mandrino (izquierda) y deflexión de la superficie apreciable a simple vista generada al extraer la pieza (derecha).

Por lo tanto, las piezas dobladas al 60% de solapamiento no tienen combado. Si nos ceñimos a estos resultados se observa un aumento en el combado a medida que se reduce el solapamiento en el doblado por EMF. Se estudió también la influencia de la altura de la pestaña en el combado (figura 6.22).

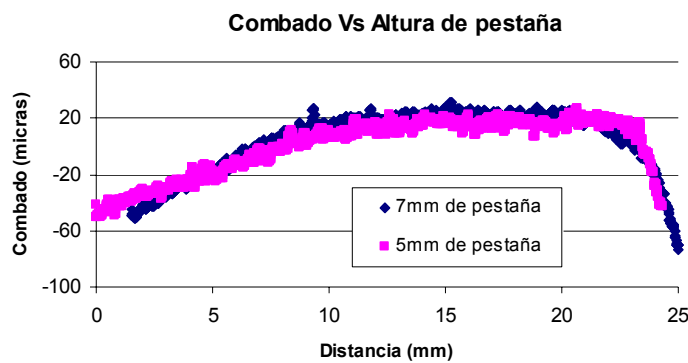


Figura 6.22: Combado Vs Altura de pestaña para geometrías de 90mm de diámetro exterior y 60% de solapamiento

Se puede decir que la altura de pestaña no influye en el combado obtenido tras el doblado ya que ambas mediciones de la figura 6.22 son prácticamente iguales. Se ha graficado también el combado generado para la geometría modelo de doblado en función del diámetro exterior (figura 6.23).

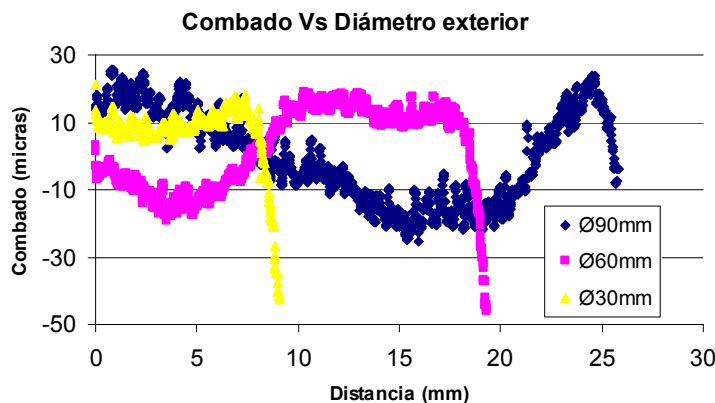


Figura 6.23: Combado producido en las geometrías modelo de doblado para los distintos diámetros exteriores ensayados.



Al analizar la gráfica de la figura 6.23 se observa que el combado disminuye al disminuir el diámetro exterior.

Para finalizar con el estudio sobre el combado generado en el doblado por EMF se realizó una última comparativa. Se analizaron muestras dobladas por EMF a distintas energías. Estas mediciones aparecen en la gráfica de la figura 6.24.

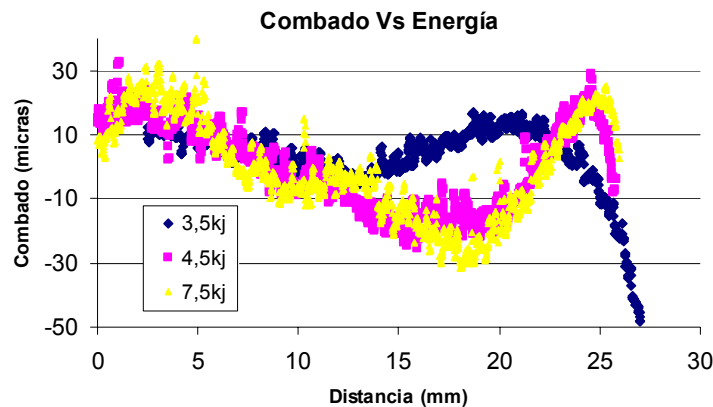


Figura 6.24: Combado para la geometría de 90mm de diámetro exterior y 7mm de altura de pestaña al 15% de solapamiento para distintas energías de doblado.

Las medidas de combado máximo para las curvas de la gráfica de la figura 6.24 se presentan en la tabla 6.8.

Energía de doblado	3,5kj	4,5kj	7,5kj
Combado	19 micras	40 micras	50 micras

Tabla 6.8: Medidas de combado máximo para las curvas de la gráfica de la figura 6.23 en función de la energía de doblado.

A medida que se aumenta la energía de doblado aumenta el valor del combado máximo. Además de aumentar ese valor aparecen más ondulaciones en la chapa. Esto se debe al aumento de la energía en el impacto de la pestaña contra el troquel de doblado.

#### Conclusiones sobre el combado

El combado disminuye al aumentar el solapamiento. La altura de pestaña no influye en el combado obtenido después del doblado por EMF. Además de obtener un valor de combado absoluto mayor, la superficie de la pieza presenta más ondulaciones al doblar con más energía (figura 6.23).

### *La dirección de laminación*

Para analizar la influencia de la dirección de laminación en la pieza final se han realizado muestras de doblado girando la pieza 90 grados (figura 6.9).

Las muestras se han analizado tanto en su forma global (aparición de arrugas, dobleces, defectos, inicios de grieta,...) como en su sección (para calcular reducciones de espesor, forma de la deformación, ángulo final,...).

Las grietas se producen en las mismas zonas independientemente de la colocación de la dirección de laminación.

La sección del doblado tiene la misma geometría indiferentemente de la dirección de laminación.

### *Conclusiones sobre la dirección de laminación*

El cambio de posicionamiento de la pieza con respecto a la bobina en función de la dirección de laminación no ha producido diferencias en las piezas dobladas por EMF.

La no variación de los resultados obtenidos al cambiar la dirección de laminación son totalmente lógicos si tenemos en cuenta que la aleación utilizada no presenta un gran anisotropía (ver tabla 6.4).

### *Conclusiones*

Los valores óptimos para las variables de doblado por EMF han sido establecidos basándose en el compromiso entre la geometría final de la pieza doblada (diámetro final cercano al nominal) y el daño sufrido por la misma (reducción de espesor en el radio de doblado). Su elección se ha basado en las conclusiones extraídas de este estudio sobre doblado por EMF:

- Reduciendo el solapamiento se consigue la misma geometría final para un menor daño de la pieza. Hay que señalar que esa reducción implica un aumento en la energía de descarga y por lo tanto una reducción en la vida útil de la bobina.
- Es importante fijar bien la energía de doblado ya que la utilización de una energía elevada de doblado se traduce en un valor de combado y de reducción de espesor elevados.
- Para un mismo error en el diámetro final, el daño aumenta cuando se doblan piezas de menor diámetro.
- El combado generado en la operación de doblado por EMF es mayor con un solapamiento menor.

Basándose en este análisis, se eligieron **las piezas dobladas por EMF para cada diámetro y altura de pestaña que posteriormente se engatillarán** (tabla 6.9). Para la altura de pestaña de 5mm hubo que elegir un valor de solapamiento del 60% al ser el único probado para esa geometría. Para la altura de pestaña de 7mm se eligió el 15% de solapamiento que aunque produce un mayor combado nos da un menor daño para un diámetro final más próximo al nominal.

Diam (mm)	Alt. Pest. (mm)	Solap. (%)	Energía (kj)	Diam final (mm)	Reduc. esp (mm)	Alt. Pe. Fin (mm)
30	5	60	1,75	30,6	15,5	5,1
60	5	60	2	60,24	16	5,1
90	5	60	2,5	90,14	16	5,1
30	7	15	3	30,7	19	7,05
60	7	15	4	60,2	16	7,1
90	7	15	4,5	90,17	14,8	6,95

*Tabla 6.9: Piezas dobladas por EMF para cada diámetro y altura de pestaña que posteriormente se engatillarán*

### 6.2.2 Influencia del doblado por EMF en el engatillado por EMF

Una vez establecidas las posibilidades que ofrece el EMF para el doblado, se decidió analizar la influencia que puede tener la variación de alguno de los parámetros del doblado por EMF en la calidad del engatillado final.

Después de analizar las probetas dobladas por EMF se hizo una selección de los factores que pueden influir en el engatillado posterior.

Estos parámetros de salida del proceso de doblado analizados son: (i) la reducción de espesor sufrida en la zona del radio de doblado (que es consecuencia directa de la energía de descarga utilizada para realizar el doblado por EMF) y (ii) el combado. Las muestras estudiadas tienen un diámetro exterior de 90mm, una altura de pestaña de 7mm y han sido dobladas con el 15% de solapamiento a distintas energías.

Antes de engatillar:



*Figura 6.25: Piezas dobladas por EMF a distintas energías lo que produce distintos grados de reducción de espesor y de combado.*

En la tabla 6.10 se presentan las mediciones de las piezas presentadas en la figura 6.25 antes de ser engatilladas (las gráficas de donde se han obtenido esos valores se pueden ver en el apartado 6.2.1 referente a los resultados del doblado por EMF).

<b>Energía de doblado (kj)</b>	3,5	4,5	6,5
<b>Reducción de espesor (%)</b>	17,5	19	30
<b>Altura de pestaña (mm)</b>	6,77	6,92	7,5
<b>Combado máximo (micras)</b>	19	40	50

Tabla 6.10: Parámetros de salida medidos después del doblado por EMF.

Esas piezas dobladas por EMF y con distintos valores de reducción de espesor y combado se engatillaron utilizando los mismos parámetros de proceso. En este caso los parámetros de engatillado fueron: 20% de solapamiento y 4kj de energía para las probetas de 90mm de diámetro exterior y 7mm de altura de pestaña.

### Resultados

Medición de las piezas **después del engatillado** (tabla 6.11):

<b>Energía de doblado (kj)</b>	3,5	4,5	6,5
<b>Energía de engatillado (kj)</b>	4	4	4
<b>Enrollamiento (mm)</b>	0,87	0,84	0,9
<b>Combado máximo (micras)</b>	No se dispone	14	25

Tabla 6.11: Valores después de engatillar

### Combado

Se midió el combado nuevamente después de engatillar las distintas piezas (figura 6.26).

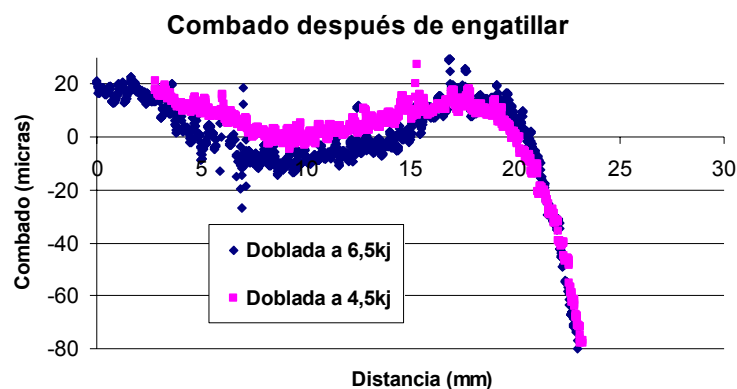


Figura 6.26: Combado para piezas de 90mm de diámetro y 7mm de altura de pestaña engatilladas al 20% de solapamiento con 4kj y dobladas utilizando distintas energías.

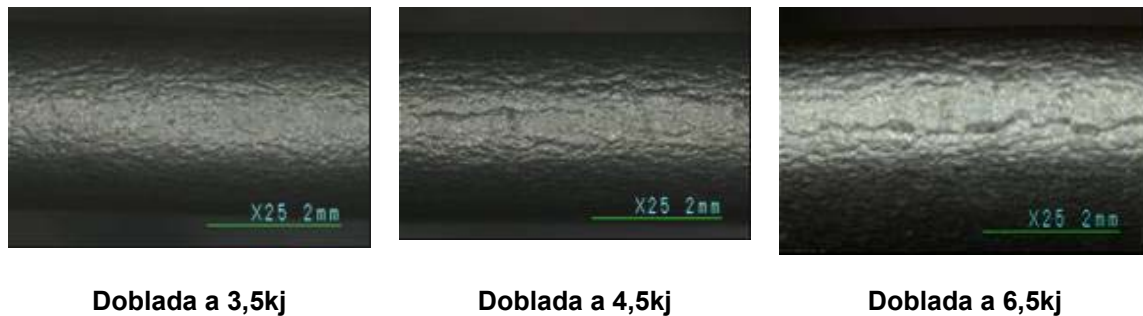
La diferencia de 10 micras que teníamos en el combado después de doblar (tabla 6.8 y figura 6.24) se mantiene en ese mismo valor después de engatillar. Se constata que los parámetros de doblado sí que influyen en la calidad final ya que una energía de doblado menor da un combado final menor después del engatillado. Sin embargo esa energía de doblado no influye en el engatillado ya que la diferencia de combado que existía antes de engatillar se mantiene después del engatillado.

Otro resultado que se desprende de este estudio es que el combado puede ser reducido en la operación de engatillado por EMF. Esto es lo que ha sucedido en los experimentos realizados ya que el combado se reduce en 10 micras para ambos casos. Este resultado no es concluyente teniendo en cuenta el número de muestras tan reducido utilizado pero puede servir como referencia.

### *Grietas*

Al aumentar la energía de doblado la zona del radio sufre un daño mayor que se traduce en una mayor reducción en el espesor.

Al realizar la operación de engatillado posterior se le suma una segunda deformación en esa misma zona. Cuando la suma de estas dos deformaciones supera el límite de deformación del material aparecen las grietas (figura 6.27):



*Figura 6.27: Grietas en el extremo exterior de la unión engatillada para piezas dobladas por EMF a distintas energías.*

En las imágenes de la figura 6.27 se ve como las grietas aumentan de tamaño para las piezas dobladas a mayor energía.

### *Enrollamiento*

Los resultados de la tabla 6.11 se han graficado en la figura 6.28 para una mejor interpretación de los mismos.

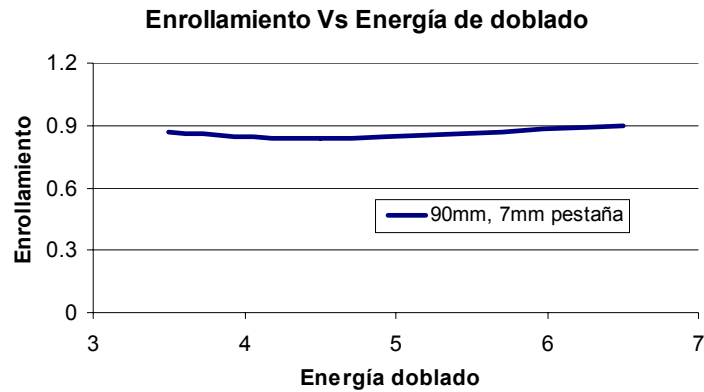


Figura 6.28: Enrollamiento tras engatillar por EMF para piezas dobladas por EMF a distintas energías.

Se observa que la energía de doblado por EMF no influye en el parámetro de enrollamiento posterior al engatillado.

#### Zona deformada

A continuación se presentan las mediciones de la zona deformada de las piezas dobladas a distintas energías después de ser engatilladas:

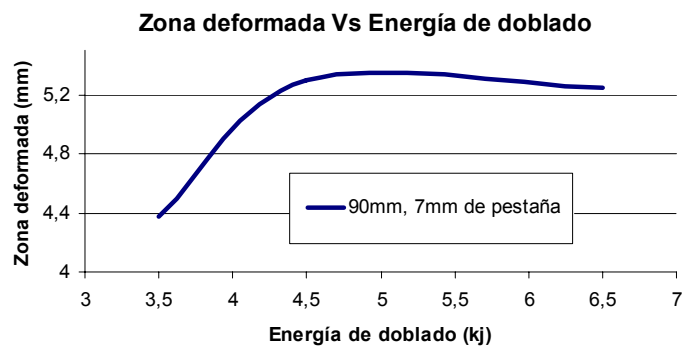


Figura 6.29: Gráfica de la zona deformada en función de la energía utilizada en la etapa de doblado por EMF.

La zona deformada aumenta al engatillar piezas que hayan sufrido una operación de doblado más severa y por lo tanto presenten un estado de daño mayor. Sin embargo este aumento tiene un límite ya que a partir de un valor se estabiliza.

6.2.3 Doblado por EMF Vs Doblado mecánico

Para acabar con el estudio sobre el doblado por EMF y comparar la influencia de esta tecnología con respecto a la convencional se realizó el siguiente procedimiento:

Se doblaron chapas utilizando ambas tecnologías; mecánicamente con una dobladora y utilizando el EMF con la bobina recta utilizada en el estudio preliminar (figura 5.2). En ambos casos se doblaron sobre un útil con 1,2mm de radio de doblado.

Las variables de entrada para este doblado por EMF recto se extrajeron del capítulo 6.2.1 dedicado al doblado EMF. Estas variables son el solapamiento y la energía de descarga. Los valores elegidos corresponden a los ensayos que dan una mayor exactitud geométrica (es decir, que más se aproximen al ángulo final del troquel) para una menor reducción en el espesor.

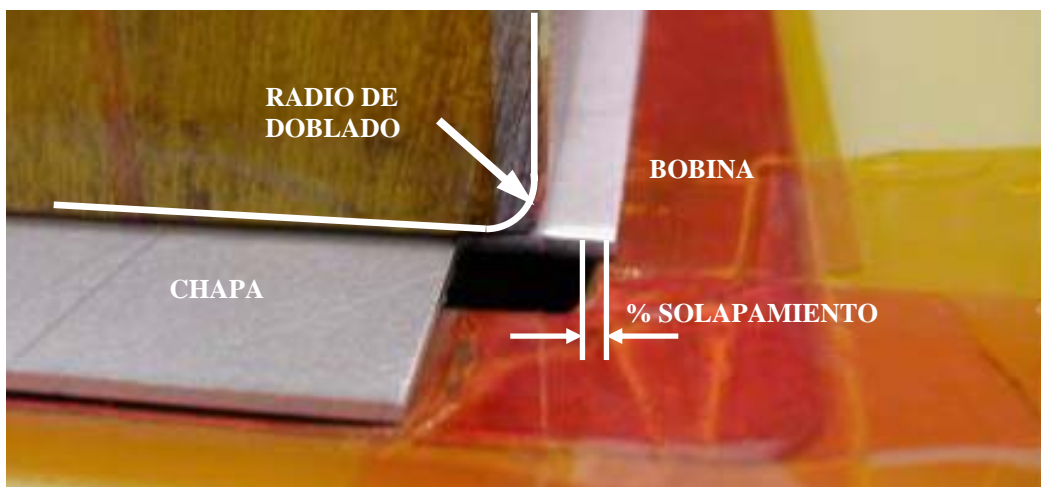


Figura 6.30: Set-up del ensayo de doblado por EMF

Los parámetros finalmente seleccionados para el doblado de la geometría recta son un solapamiento del 15% y tras realizar varios experimentos se eligió una energía de 4 kJ tal y como se muestra en la gráfica de la figura 6.31.

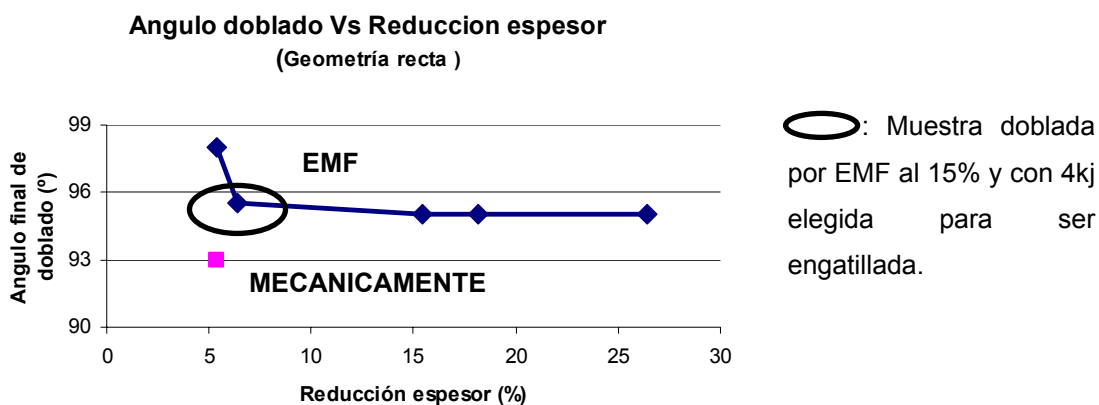
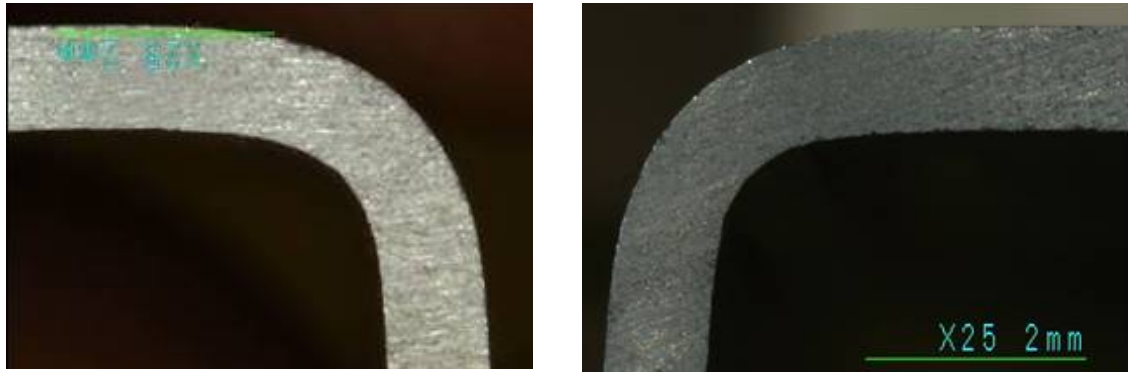


Figura 6.31: Grafica de reducción de espesor Vs ángulo final para la geometría recta doblada mecánicamente y por EMF al 15% de solapamiento y a varias energías de descarga.

En la grafica de la figura 6.31 se pueden observar las mediciones geométricas de los diferentes ensayos realizados en doblado recto por EMF y los resultados del doblado mecánico.

El doblado por EMF da más problemas en recto que en circular para obtener el ángulo final deseado de  $90^\circ$  ya que a medida que se aumenta la energía aparece un efecto de rebote y este ángulo vuelve a aumentar.

Una vez elegidas las geometrías (figura 6.32) se procedió a realizar la operación de engatillado por EMF.

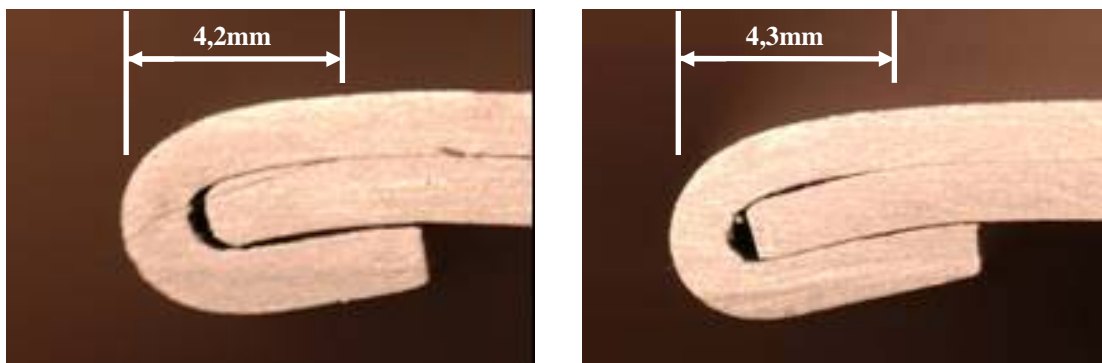


*Figura 6.32: Sección de las muestras dobladas mecánicamente (izquierda) y por EMF correspondiente a 4kj de descarga y 15% de solapamiento (derecha) y que se han utilizado para analizar la influencia de la tecnología de doblado en el engatillado por EMF posterior.*

Los ensayos de engatillado se realizaron utilizando los mismos parámetros en ambos casos, 15% de solapamiento y 5,5kj de energía. Estos parámetros no son los óptimos para la geometría recta, dan una unión engatillada deformada. Sin embargo se utilizaron para maximizar los defectos y poder comparar mejor el efecto del procedimiento de doblado en la geometría de la unión engatillada.

#### *Zona deformada*

En la figura 6.33 se muestran dos uniones dobladas con las disitintas tecnologías, mecánica y por EMF y posteriormente engatilladas por EMF.



*Figura 6.33: Unión doblada mecánicamente (izquierda) y doblada por EMF (derecha) y posteriormente engatilladas por EMF.*



La zona deformada prácticamente no varía entre la pieza doblada mecánicamente y la pieza doblada por EMF.

### Combado

Se midió el combado antes y después del engatillado para ambos casos. Los resultados se muestran en las gráficas de las figuras 6.34 y 6.35.

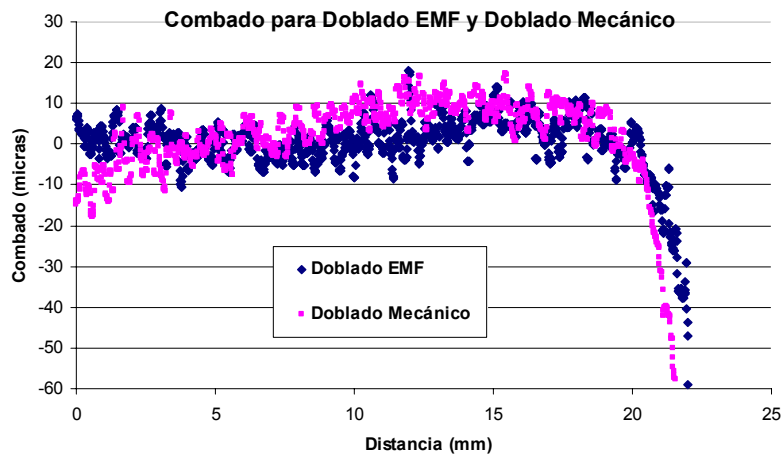


Figura 6.34: Combado obtenido después de la operación de doblado.

El combado que se produce en ambos casos, aunque tiene forma distinta, tiene un mismo valor de entorno a 10 micras.

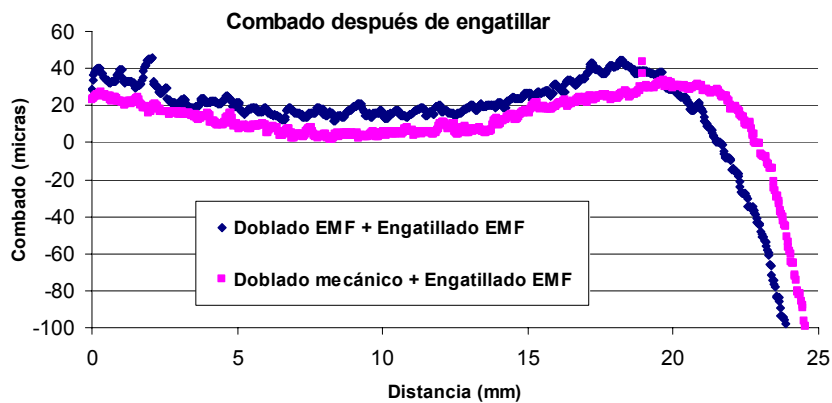


Figura 6.35: Combado en piezas dobladas por EMF a 4kj y 15% de solapamiento y dobladas mecánicamente y posteriormente engatilladas al 15% de solapamiento y 5.5kj de energía.

El valor de combado sigue siendo el mismo en ambos casos incluso después del engatillado, un máximo de 27 micras y además las dos curvas tienen la misma forma. Se ha demostrado que la tecnología utilizada en el doblado no influye en el combado final de las piezas engatilladas por EMF.

### Grietas

Se analizó la superficie exterior del extremo de la unión engatillada en busca de grietas. Los resultados se muestran en la figura 6.36.

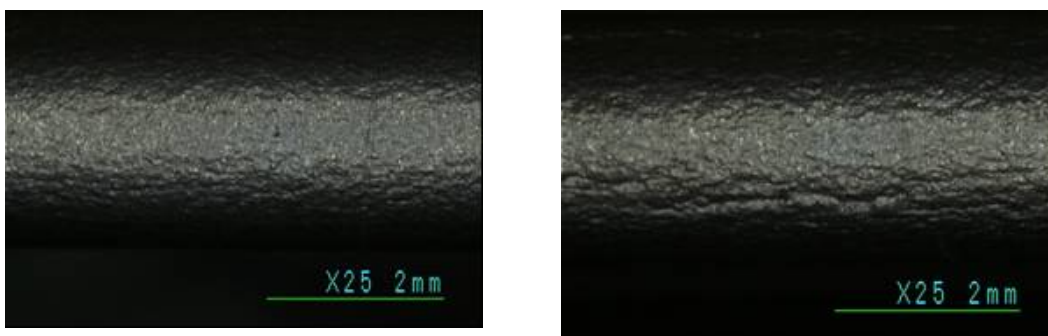


Figura 6.36: Vista frontal de la unión después de ser engatillada para la pieza doblada mecánicamente (izquierda) y la doblada por EMF (derecha).

Aunque las piezas previamente dobladas presentan prácticamente las mismas características geométricas (reducción de espesor, radio de doblado y ángulo) en la doblada por EMF aparecen grietas al engatillarla. Puede clasificarse como una superficie doblada de GRADO 3: Líneas de comienzo de grieta (por ejemplo líneas de adelgazamiento localizado o estricción) según la clasificación presentada en el capítulo 4.2. Sin embargo la doblada mecánicamente está libre de grietas. Utilizando la misma clasificación anterior la superficie generada en este caso es una superficie de GRADO 2: No hay grietas pero se acepta una fuerte piel de naranja.

Para tratar de buscarle una explicación a dicho fenómeno se realizaron unas microdurezas en el espesor de la zona del radio de doblado.

### Microdurezas

En un primer momento se pensó en hacer un análisis de la microestructura de las piezas dobladas por EMF para compararlo con las piezas dobladas mecánicamente. Sin embargo, este tipo de análisis microestructural para comparar piezas deformadas por EMF y piezas deformadas por métodos convencionales ya había sido probado con anterioridad. El resultado siempre ha sido el mismo: no se aprecian diferencias analizando simplemente la microestructura [JIM06]. Habría que hacer un estudio de las dislocaciones con un TEM.

Se optó por un análisis de microdurezas, mucho más sencillo y que mide también el grado de la concentración de dislocaciones ya que en este caso es el apilamiento de las dislocaciones que se produce durante la deformación el que hace aumentar el grado de dureza.

Este tipo de ensayo fue desarrollado para medir la dureza en piezas muy finas o muy pequeñas. Pueden distinguir distintos valores de dureza dentro de una misma pieza por lo que es necesario realizar varias mediciones para posteriormente hacer la media. Las mediciones se hicieron según la

norma ASTM E384-08ae1 referente a ensayos de microdureza [AST08]. Teniendo en cuenta la dureza del material se utilizó una carga de 200 gramos durante un tiempo de 10 segundos de aplicación.

Se realizaron 3 mediciones en el espesor para cada una de las muestras dobladas por EMF y mecánicamente en la zona del radio tal y como se muestra en la figura 6.37.

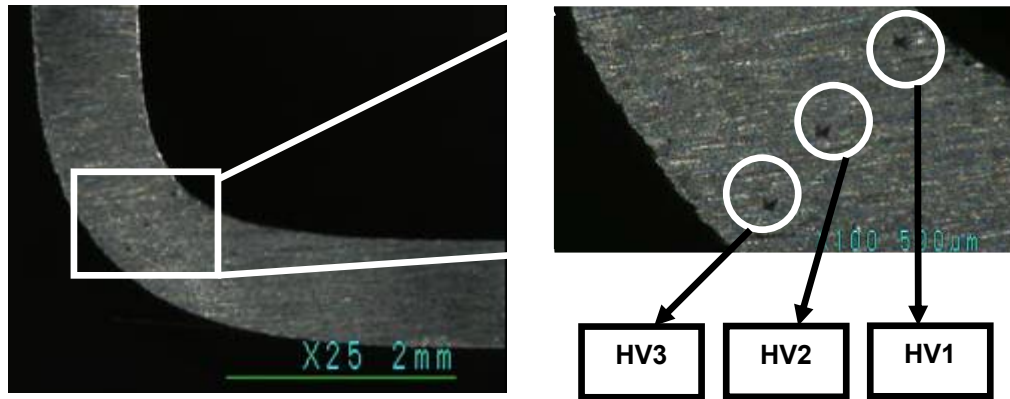


Figura 6.37: Radio de doblado (izquierda) y detalle de las zonas de medición de las microdurezas realizadas (derecha).

A continuación se muestran los valores medios de las mediciones en cada uno de los puntos explicados en la figura 6.37.

HV material virgen ~70HV	HV1	HV2	HV3
Doblado mecánico	83,5	78,75	85,83
Doblado por EMF a 4kj y 15%	98,8	91,65	97,54

Tabla 6.12: Resultados de microdureza realizados en las piezas dobladas

Los resultados presentados en la tabla 6.12 se han graficado para una mejor interpretación de los mismos en la figura 6.38.

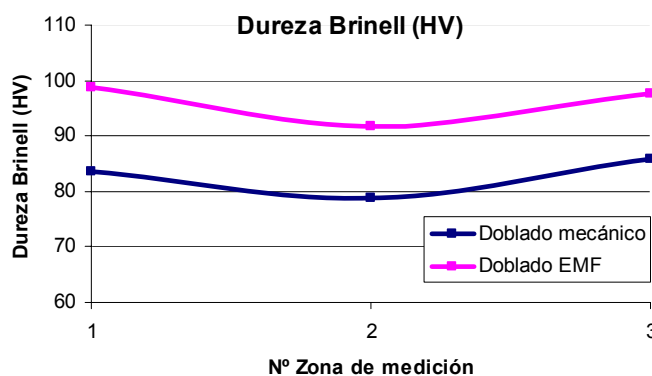


Figura 6.38: Microdurezas registradas en las piezas dobladas mecánicamente y por EMF.

Al comparar la dureza de piezas dobladas por EMF y mecánicamente se observa una diferencia sustancial. Las piezas dobladas por EMF experimentan un aumento medio en su dureza del 37% mientras que en las piezas dobladas mecánicamente este aumento es del 18%.

Esto corrobora el estudio realizado por Balanethiram et al. [BAL94b] sobre endurecimiento de aleaciones de aluminio por impacto (figura 6.39):

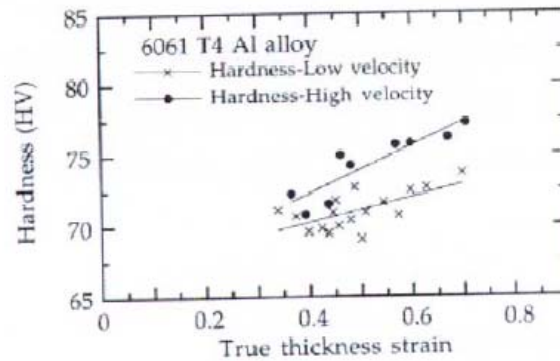


Figura 6.39: Gráfica comparativa de durezas obtenidas para la aleación AA6061T4 a alta velocidad ("Hardness-High velocity") y a baja velocidad de impacto ("Hardness-Low velocity") [BAL94b].

Este aumento se atribuye al impacto que sufre la pestaña contra el troquel a una velocidad de unos 200 metros por segundo. Esta velocidad se ha calculado utilizando unas grabaciones realizadas con la cámara de alta velocidad [PHO07] sobre una de las geometrías circulares. Las grabaciones se realizaron a 70.000 imágenes por segundo. La pestaña tarda 3,5 imágenes en subir lo que supone un recorrido de un cuarto de perímetro para un radio de 7mm equivalente a 11 milímetros para el extremo superior de la pestaña. Calculando la velocidad lineal media nos da ese valor de 220 m/s o de 720 km/h. Si calculamos la velocidad de una zona inferior de la pestaña en la zona del radio (a una altura de 3mm) está velocidad se reduce hasta los 110 m/s o 400 km/h.

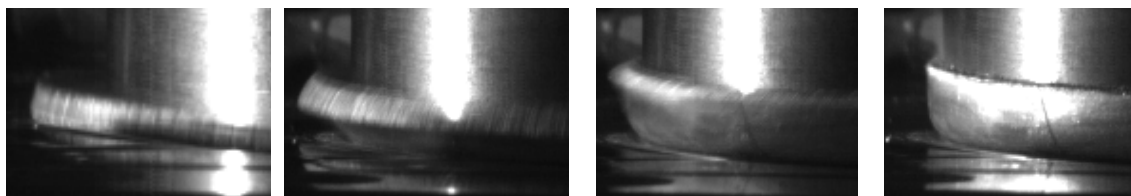


Figura 6.40: Secuencia de doblado por EMF de una pestaña de 7mm y un diámetro exterior de 60mm captada con la cámara de alta velocidad a 70.000 imágenes por segundo [PHO07].

El impacto a esas velocidades genera unas presiones de impacto enormes que rigidizan el material aumentando su dureza y disminuyendo su conformabilidad.

### Estudio del impacto

Cuando chocan dos cuerpos elásticos con una velocidad ( $V$ ), la presión de impacto ( $P$ ) máxima se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{\rho_1 \rho_2 C_1 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} V_1$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material y  $C$  es la velocidad de la propagación de las ondas después del impacto.

$$C = \sqrt{\frac{3K(1-\nu)}{\rho(1+\nu)}}$$

Aquí  $K$  representa el módulo volumétrico, y  $\nu$  el ratio de Poisson.

Cuando uno o ambos materiales envueltos en el impacto son plásticos el cálculo se complica ya que la presión generada en el impacto puede deformar alguno de los cuerpos.

Sin embargo, existen formulas reducidas en función del tipo de cuerpos que intervengan en el impacto. Para el caso de chapas finas chocando contra un cuerpo másico (que supondremos inmóvil) se puede realizar un cálculo rápido utilizando la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\rho t V_o^2}{2\delta}$$

Donde  $t$  es el espesor de la chapa,  $V_o$  es la velocidad de la chapa en el momento del impacto y  $\delta$  es la distancia que se mueve el centro de gravedad de la chapa después de la deformación sufrida tras el impacto.

En nuestro caso se puede hacer un cálculo rápido de las presiones que se generan en la zona del radio de doblado. El espesor es de 1,1mm, la densidad del aluminio utilizado es de 2700kg/m<sup>3</sup>, el desplazamiento del centro de gravedad es la mitad de la reducción del espesor, para este caso concreto es de 0,07mm y la velocidad de impacto en la zona del radio de 110m/s a 3,5kj de descarga. Estos datos nos dan una presión de impacto ( $P$ ) de 256 MPa en el espesor de la chapa.

Estas presiones de impacto son uno de los factores que influyen en el aumento del límite de deformación de los materiales conformados por EMF. Se produce un efecto de “inertial ironing” que aumenta su alargamiento. Sin embargo en este caso lo que nos interesa es el endurecimiento que puede generar en el material. El material queda estirado y endurecido lo que reduce su deformabilidad posterior reduciendo así su engatillabilidad.

Al aumentar la energía de la descarga de EMF, la velocidad de la pieza aumenta linealmente tal y como se observa en la figura 6.41 extraída de un estudio de Seth et al. [SET05].

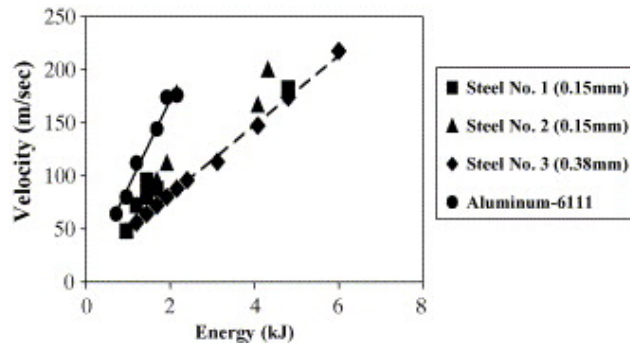


Figura 6.41: Relación entre energía de descarga EMF y velocidad de la pieza para distintos materiales [SET05].

Por lo tanto, según este estudio, es suficiente con realizar dos grabaciones a distintas energías para cubrir todo el rango de energías ya que esta relación es lineal.

#### 6.2.4 Conclusiones

Las reducciones de espesor en la zona de doblado que se consiguen al doblar por EMF son mayores que las reducciones que sufren las piezas reales de automoción tras la etapa de estampación que rondan el 5% de reducción [ING09]. Este fenómeno se acentúa al reducir el diámetro de la geometría ya que con la geometría recta la reducción si que se aproxima (figura 6.31) a la obtenida mecánicamente. Esto tiene una influencia directa en el engatillado aunque solamente en la aparición de grietas. De este estudio se concluye que el doblado por EMF daña más la pieza que el doblado mecánico (sobre todo las geometrías circulares, a menor diámetro y mayor altura de pestaña) pero este daño solamente influye en la aparición de grietas. Por lo que hay que tener en cuenta que las piezas circulares dobladas por EMF que posteriormente se van a engatillar se encuentran en un caso más desfavorable que las reales para el defecto de aparición de grietas.

La operación de engatillado por EMF, lejos de aumentar el combado que tienen las piezas después de ser dobladas, reduce el valor final de este parámetro de salida después del engatillado.

El doblado por EMF aumenta la dureza de la pieza. Este aumento se puede atribuir al impacto que sufre la pestaña contra el troquel (“shock hardening”). Como ejemplo decir que las piezas rectas dobladas por EMF experimentan un endurecimiento por deformación del 37% mientras que en las piezas rectas dobladas mecánicamente este aumento es del 18%.

Una disminución del solapamiento en el doblado aumenta el combado y la energía necesaria para conseguir el diámetro nominal. Sin embargo la pieza sufre una menor reducción en el espesor.

### 6.3 Influencia del solapamiento

En el estudio preliminar ya se constató la importancia de esta variable en la calidad final de la unión engatillada. Una de las conclusiones de esos experimentos preliminares era la que concierne al doblado del refuerzo interior. Según se intuye en el capítulo 5, parece existir un valor de solapamiento con el que se consigue una unión engatillada sin doblar el refuerzo interior. En los experimentos realizados en ese estudio preliminar se observó que variando el solapamiento se conseguían uniones dobladas hacia abajo y uniones dobladas hacia arriba (figuras 5.7 y 5.8). Por lo tanto se supone un punto de inflexión en esa transición de deformaciones que nos dará el valor del solapamiento óptimo sin deformar el refuerzo interior.

Por esa razón antes de analizar los resultados sobre la influencia del solapamiento en los diferentes parámetros de salida, se realizaron una serie de ensayos para tratar de encontrar ese valor del solapamiento óptimo para cada una de las geometrías ensayadas.

Conocer el solapamiento óptimo servirá para establecer las distintas geometrías óptimas de engatillado. Esas geometrías serán las equivalentes a la geometría modelo definida en el estudio preliminar (figura 5.28) pero con la principal variable del engatillado por EMF optimizada: el solapamiento. Una vez identificadas nos servirán para poder comparar ciertos parámetros de salida sobre esas geometrías que son las óptimas.

Sin embargo, al realizar los experimentos, se observó que con valores de solapamiento elevados el refuerzo sí dobla hacia abajo como sucedía en el estudio preliminar pero con valores bajos el refuerzo no se dobla hacia arriba como sucedía en el estudio preliminar sino que se mantiene recto (figura 6.42).



*Figura 6.42: Extremo de dos uniones engatilladas. A la izquierda el refuerzo interior se ha doblado por utilizar un solapamiento excesivo (40%) mientras que en la unión de la derecha se utilizó el 0% y el refuerzo no dobla hacia arriba.*

Se comprobó que la unión engatillada doblada hacia arriba que se generaba en el estudio preliminar estaba ocasionada por la falta de rigidez del pisador que retrocedía al recibir el impulso electromagnético generando ese defecto.

Por lo tanto hubo que cambiar ese concepto de **solapamiento óptimo**. A partir de ahora ese valor corresponde al **valor máximo que puede alcanzar el solapamiento sin llegar a deformar el refuerzo interior**.

Una vez definido el solapamiento óptimo ya se puede definir también la geometría modelo óptima para cada uno de los diámetros exteriores ensayados. Por lo tanto la definición de la **geometría modelo óptima** del engatillado es la siguiente: **geometría modelo conseguida con el solapamiento máximo sin que se produzca la deformación o doblado del refuerzo interior.**

#### *Establecimiento del solapamiento óptimo para evitar el doblado del refuerzo interior*

El estudio para conocer el solapamiento óptimo para cada diámetro exterior se planteó de la siguiente manera:

Se realizaron ensayos de engatillado por EMF para cada uno de los diámetros variando el solapamiento. Para cada solapamiento ensayado se fue aumentando la energía hasta conseguir una unión engatillada con la geometría modelo. Esta geometría conseguida es observada en el macroscopio. Si el refuerzo interior está doblado para esa geometría modelo significa que el solapamiento utilizado ha sido demasiado elevado por lo que para el siguiente experimento se debe reducir su valor. Si por el contrario, la geometría obtenida tiene la base sin doblar significa que todavía es posible aumentar más el solapamiento hasta encontrar el óptimo que se busca. El solapamiento máximo que nos dé una geometría modelo es el que se denominará de ahora en adelante como solapamiento óptimo. En la figura 6.43 aparece el caso para el  $\varnothing 90\text{mm}$  y 7mm de altura de pestaña.



*Figura 6.43: Geometrías modelo analizadas para establecer la geometría modelo óptima en el caso del  $\varnothing 90\text{mm}$ .*

Como se puede apreciar en la figura 6.43, para el diámetro de 90mm el solapamiento óptimo está en torno al 30%. De este porcentaje para arriba el refuerzo interior se dobla. Sin embargo al disminuir el solapamiento por debajo de este porcentaje la unión no dobla hacia arriba tal y como se intuyó que pasaría en el capítulo del estudio preliminar. La unión obtenida al 20% se considera buena en lo que al doblado de la pieza interior se refiere. Sin embargo no puede considerarse óptima porque todavía se puede aumentar el solapamiento sin doblar el refuerzo interior. Esto es fundamental ya que al disminuir el solapamiento, la energía necesaria para conseguir la misma deformación aumenta enormemente. Este aumento en la energía se debe a que la corriente inducida es menor y por lo tanto la presión magnética generada también disminuye (figura 6.46). Por lo tanto para aumentar la vida útil de las bobinas y reducir el coste energético se va a buscar siempre ese valor óptimo de solapamiento. Como se puede observar en la figura 6.44, el pasar de un 40% a un 0% en el solapamiento supone un aumento del 100% en la energía necesaria. Este aumento de la energía de



descarga supone doblar los esfuerzos que soporta la bobina, por lo que el número de descargas que puede aguantar se ve reducido.



90mm, 40%, 2kj



90mm, 0%, 4kj

Figura 6.44: Ejemplo ilustrativo de cómo varía la energía al disminuir el solapamiento para conseguir la geometría modelo.

Para demostrar este aumento en las fuerzas generadas dentro de la bobina se modelizó una de las bobinas circulares junto con la pieza a engatillar y se realizaron varias simulaciones utilizando el programa de calculo electromagnético MAXWELL 3D®. Se calcularon las fuerzas generadas en los tres ejes de la bobina tal y como aparece reflejado en la figura 6.45.

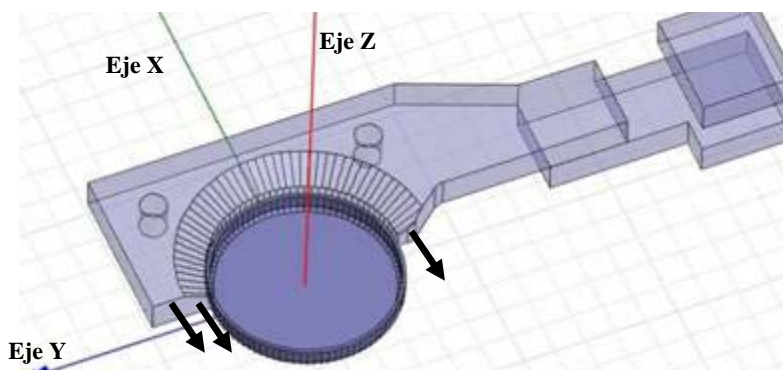


Figura 6.45: Bobina de engatillado de diámetro exterior de 90mm con la que se han calculado las fuerza sobre la bobina utilizando Maxwell 3D®. Las fechas indican el eje X que es donde se han calculado las fuerzas principales.

En la figura 6.46 se muestran las gráficas de las fuerzas generadas en los 3 ejes.

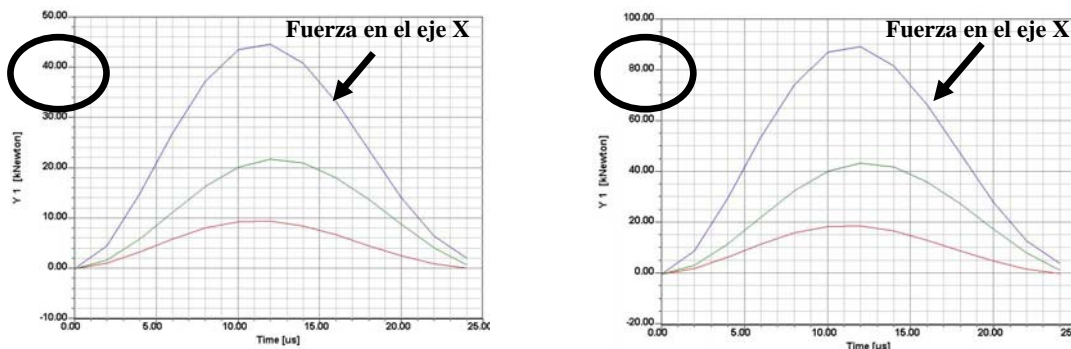


Figura 6.46: Fuerzas generadas en los 3 ejes en la bobina de la figura 6.45 para el caso de 3kj (izquierda) y 6kj (derecha).

En la figura 6.46 se observa como al aumentar la energía descargada al doble se doblan también las fuerzas generadas en la bobina.

Otro de los factores a tener en cuenta es el calentamiento tanto de la bobina como de los cables del banco de condensadores. Al aumentar la corriente que pasa por la bobina aumenta también el calentamiento de la misma por lo que habría que diseñar sistemas de refrigeración de la misma si se quiere trabajar a cadencias industriales. Además, el paso reiterado de una corriente de descarga elevada hace que los cables que van del banco de condensadores a la bobina sufran también un deterioro más rápido.

### Resultados del valor óptimo de solapamiento

Se realizaron los ensayos para conocer el solapamiento óptimo para los distintos diámetros exteriores de 30mm, 60mm y 90mm ensayados y se graficaron en la figura 6.47.

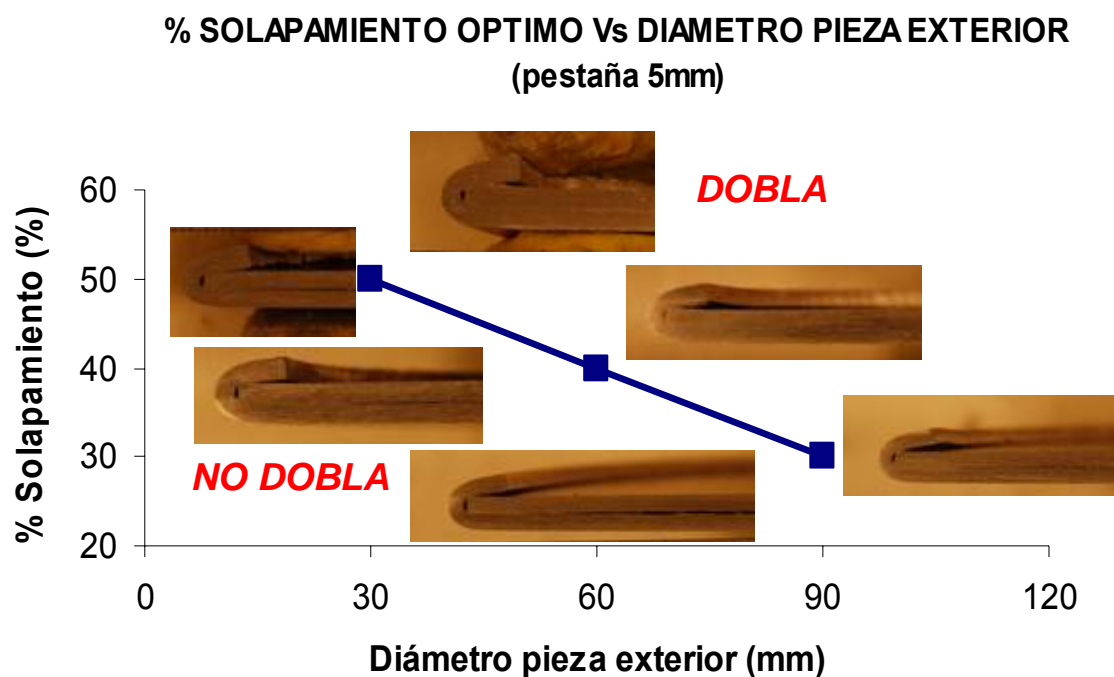
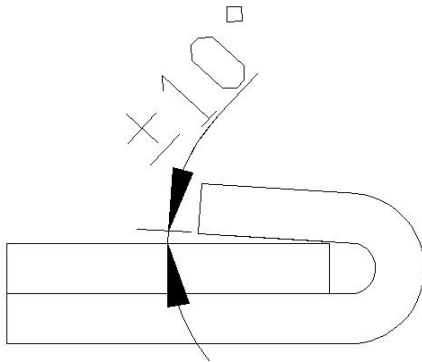


Figura 6.47: Gráfica del solapamiento óptimo para cada uno de los diámetros exteriores con la pestaña de 5mm.

Para la geometría recta el solapamiento óptimo es del 5% según los experimentos realizados. Este valor no se ha incluido en la gráfica de la figura 6.47 porque correspondería a un valor infinito en el eje de abscisas.

Estos mismos valores de solapamiento se repiten para el caso de la pestaña de 7mm de altura para los diámetros de 60mm y 90mm ya que el diámetro de 30mm fue imposible de engatillar con la pestaña de 7mm.

Por lo tanto, de ahora en adelante al hablar de las **geometrías modelo óptimas** nos referimos a las geometrías modelo obtenidas al 50% de solapamiento para el diámetro de 30mm, al 40% para el diámetro de 60mm y al 30% para el diámetro de 90mm.



Diámetro pieza exterior	Valores de solapamiento óptimo
30mm	50%
60mm	40%
90mm	30%
Recta	5%

Figura 6.48: Geometría **modelo óptima** para cada una de las geometrías ensayadas.

Una vez calculados los distintos valores de solapamiento óptimos, se analiza la influencia del solapamiento en los diferentes parámetros de salida de la unión engatillada.

### 6.3.1 En la aparición de grietas

Para entender la influencia del solapamiento en la producción de grietas en el extremo de la unión engatillada se analizaron varias geometrías modelo de las piezas circulares en busca de grietas.

Observando las diferentes muestras se estableció el límite a partir del cual comienza la creación de grietas para cada diámetro exterior. Basándonos en el patrón normalizado para la clasificación de grietas explicado en la figura 4.14 y teniendo en cuenta la geometría tan exigente de doblado elegida para este estudio, se da como pieza libre de grietas aquellas muestras que estén en el grado 3 (GRADO 3: Líneas de comienzo de grieta (por ejemplo líneas de adelgazamiento localizado o estricción) y se considerarán piezas con grietas aquellas que entren dentro del grado 4 (GRADO 4: Grietas discontinuas visibles a simple vista).

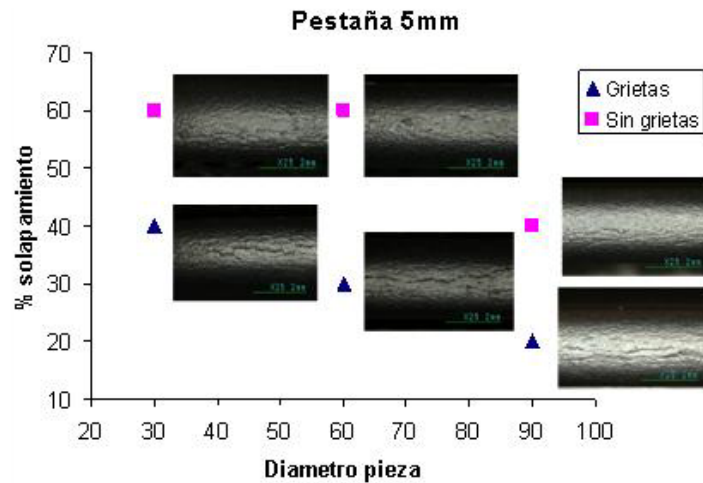


Figura 6.49: Gráfica de aparición de grietas en función del solapamiento para los 3 diámetros exteriores engatillados con la altura de pestaña de 5mm.

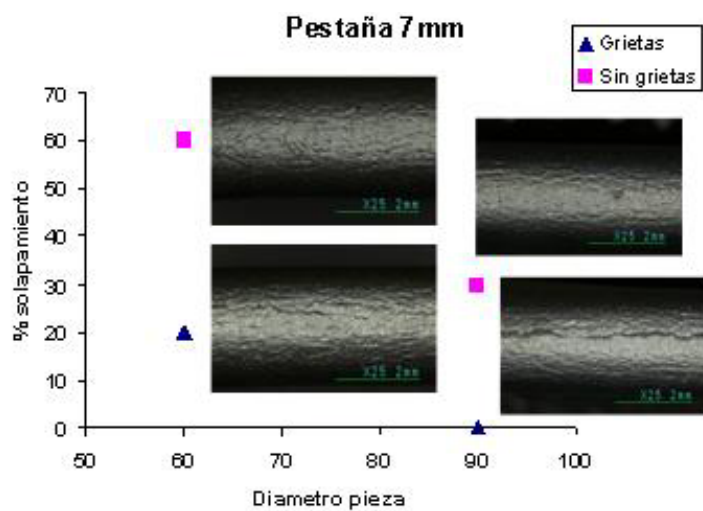


Figura 6.50: Gráfica de aparición de grietas en función del solapamiento para los 2 diámetros exteriores engatillados con la altura de pestaña de 7mm.

En ambas figuras se puede ver como un aumento del solapamiento retrasa la aparición de grietas. Al reducir el solapamiento y aplicar la presión magnética en el extremo superior de la pestaña, toda la deformación producida en el engatillado se concentra en el extremo de la unión aumentando el daño y por lo tanto favoreciendo la aparición de grietas.

Si relacionamos el diámetro exterior de la pieza a engatillar con el solapamiento vemos que la aparición de grietas se da a un mayor solapamiento a medida que se reduce el diámetro. Es decir, que un diámetro exterior grande permite ser engatillado por EMF en un rango de solapamiento mayor que un diámetro exterior pequeño sin que aparezcan grietas. Así por ejemplo, en la gráfica de la figura 6.50 se puede comprobar que un diámetro exterior de 90mm y 7mm de altura de pestaña puede ser engatillado sin grietas al 10% de solapamiento. Sin embargo un diámetro exterior de 60mm y la misma altura de pestaña de 7mm nos producirá grietas si se engatilla con un solapamiento inferior al 20%.

### 6.3.2 En el enrollamiento

Para realizar el siguiente estudio se compararon las muestras correspondientes a la geometría modelo para cada diámetro y altura de pestaña ensayados.

Los resultados se presentan en la grafica de la figura 6.51.

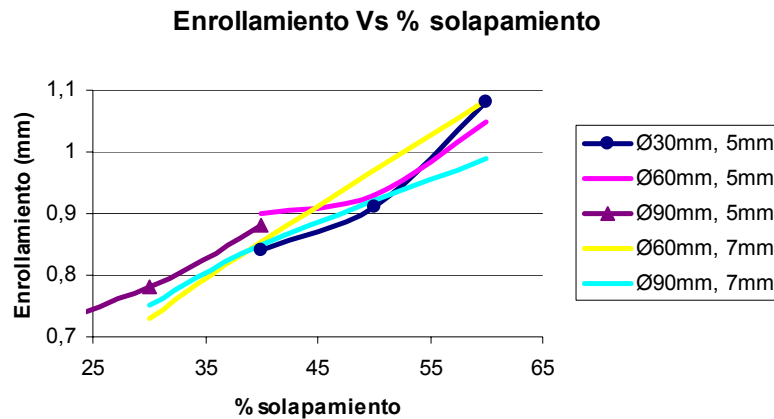


Figura 6.51: Enrollamiento Vs Solapamiento para las distintas geometrías ensayadas.

Analizando los resultados se observa un aumento del enrollamiento a medida que aumenta el solapamiento. Este resultado es totalmente lógico. Un solapamiento elevado genera unas fuerzas perpendiculares a la pestaña que se traducen en un enrollamiento mayor que el conseguido con un solapamiento bajo que genera unas fuerzas más verticales y por lo tanto un menor empuje en la dirección del enrollamiento.

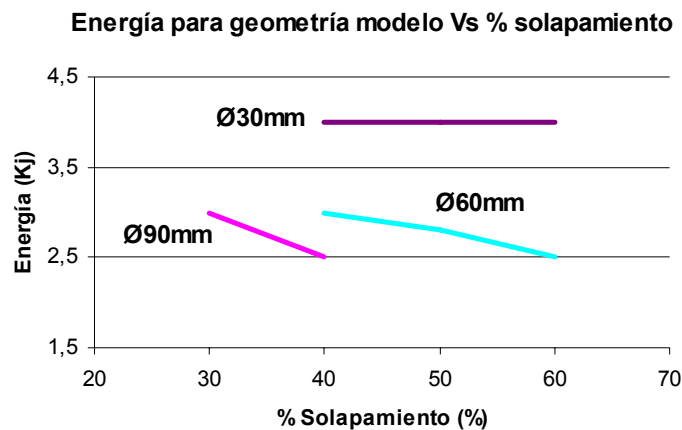
Esta misma tendencia ya se había observado en el estudio preliminar pero ahora además se puede observar que la pendiente que siguen todas las geometrías es muy similar. Por lo tanto se puede constatar que para cualquier geometría modelo de los diámetros y alturas de pestaña ensayadas, el enrollamiento que se producirá está solamente en función del solapamiento y no en función de la geometría exterior de la pieza. Esto ayuda a la hora de industrializar el proceso ya que sabiendo solamente el solapamiento se puede predecir el enrollamiento en cualquier punto de la pieza para obtener la geometría modelo.

### 6.3.3 En la energía necesaria para obtener la geometría modelo:

Tal y como se explica al comienzo de este capítulo 6.3, el aumento de la energía de descarga implica un aumento proporcional en las fuerzas generadas en la bobina. También sabemos que a medida que disminuimos el parámetro del solapamiento la energía necesaria para conseguir la geometría modelo aumenta.

Sin embargo no se ha calculado como aumenta la energía necesaria para conseguir la geometría modelo en función del solapamiento.

A pesar de que la energía no está considerada como un parámetro de salida del proceso, a la hora de diseñar un proceso de engatillado por EMF sería de gran utilidad si se conociera de qué manera cambia la energía necesaria para conseguir la geometría modelo al aumentar o disminuir el solapamiento ya que esa es la geometría que nos interesa conseguir.



*Figura 6.52. Energía para conseguir las geometrías modelo de 5mm de altura de pestaña en función del solapamiento.*

En la gráfica de la figura 6.52 se puede observar la energía necesaria para conseguir la geometría modelo para los distintos diámetros exteriores con 5mm de altura de pestaña. Aunque no se haya barrido todo el rango de valores del solapamiento para todas las geometrías se observan varias tendencias.

Se ve claramente que es necesaria más energía para engatillar diámetros exteriores más pequeños. Se aprecia también que la pendiente de la gráfica se suaviza a medida que disminuye el diámetro exterior de la pieza a engatillar.

Por lo tanto se necesita más energía para engatillar diámetros exteriores pequeños (ejemplo: al 40% de solapamiento se necesitan 2,5kj para la geometría de 90mm, 3kj para la geometría de 60mm y 4kj para la geometría de 30mm) pero la sensibilidad al solapamiento (pendiente de la gráfica) disminuye al reducir el diámetro exterior.

#### 6.3.4 En la zona deformada

Para ver como influye el solapamiento en la zona deformada, se han vuelto a comparar las geometrías modelo de cada caso. Los valores se han graficado en función del solapamiento al que han sido obtenidas para las diferentes configuraciones ensayadas.

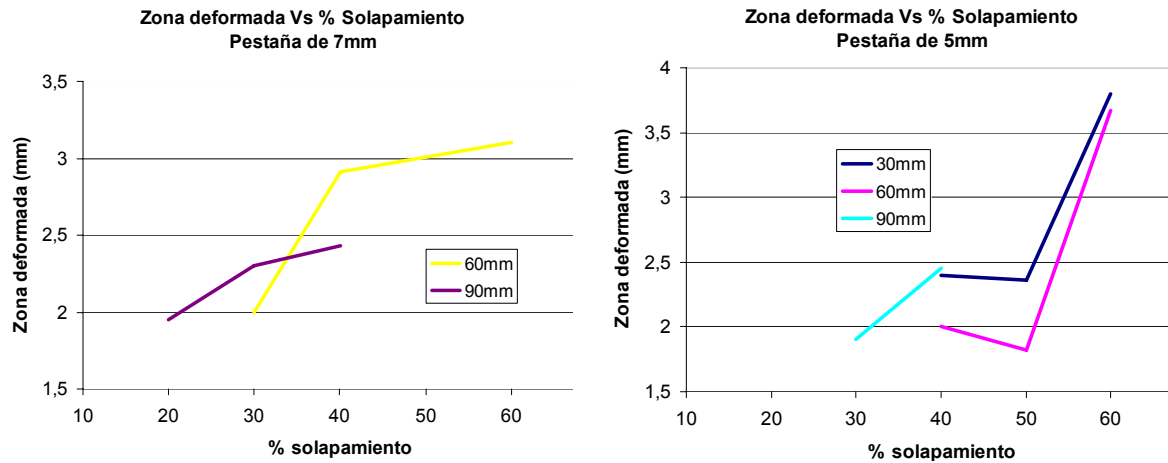


Figura 6.53: Zona deformada Vs solapamiento para las distintas configuraciones geométricas ensayadas. La zona de inflexión corresponde con el punto donde empieza a doblar la base

Observando ambas gráficas se ve una tendencia clara. La zona deformada de la geometría modelo aumenta a medida que aumenta el solapamiento. Este mismo resultado se repite además para los 3 diámetros exteriores. En el caso de la pestaña de 5mm de altura existe una zona de inflexión Esa zona de inflexión corresponde con el punto donde empieza a doblar la base que se sitúa entre el 40% y el 50% para los diámetros de 60mm y de 30mm. En el diámetro de 90mm el punto de inflexión corresponde exactamente con el 30% y se observa un aumento importante en la zona deformada al pasar del 30% al 40%. De las gráficas de la figura 6.53 se concluye que la zona deformada aumenta drásticamente a partir del solapamiento óptimo ya que el refuerzo interior empieza a deformarse.

### 6.3.5 En el combado

Para analizar la influencia del solapamiento en el combado se midieron las muestras de diámetro exterior de 90mm. Se compararon las geometrías modelo obtenidas a distintos valores de solapamiento.

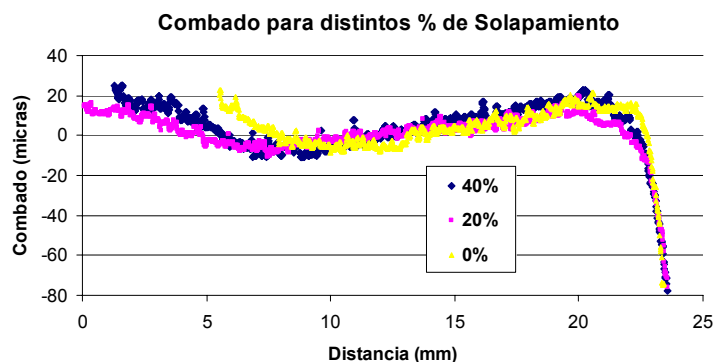


Figura 6.54: Combado para distintas geometrías modelo del diámetro de 90mm engatilladas a distintos valores de solapamiento.

Las piezas medidas han sido dobladas por EMF con las mismas variables de entrada, por lo tanto la diferencia existente en los valores de combado son fruto de la operación de engatillado. Se aprecia una leve disminución del combado a medida que se reduce el solapamiento. Los valores de combado máximos obtenidos de la gráfica de la figura 6.54 son los siguientes:

- 40% de solapamiento: 30 micras
- 20% de solapamiento: 24 micras
- 0% de solapamiento: 20 micras

### 6.3.6 Conclusiones

A continuación se recapitulan las conclusiones más relevantes del estudio sobre la influencia del solapamiento. En el apartado 6.3.1 referente a la aparición de grietas se ha conseguido relacionar la geometría de la pieza exterior con el solapamiento para establecer los límites a partir de los cuales se generan grietas en la unión engatillada (figura 6.49). Según esa gráfica al aumentar el solapamiento utilizado, la aparición de grietas disminuye. Esa misma relación entre la geometría de la pieza exterior y el solapamiento ya ha sido graficada con anterioridad en este mismo capítulo 6.3 pero en ese caso para relacionar el solapamiento óptimo con el diámetro exterior evitando el doblado del refuerzo interior (figura 6.47).

Estas dos gráficas limitan la unión que se obtendrá a buena o no buena en función del lado de la curva en el que se elijan las variables de entrada (solapamiento y diámetro de la pieza exterior). Una limita el doblado del refuerzo interior y la otra limita la generación de grietas. La zona restante entre ambas curvas es la ventana de engatillabilidad del material. Por lo tanto si colocamos ambas gráficas en una sola, obtenemos la gráfica de la figura 6.55 que nos da la ventana de engatillabilidad para la aleación de aluminio 6016T4.

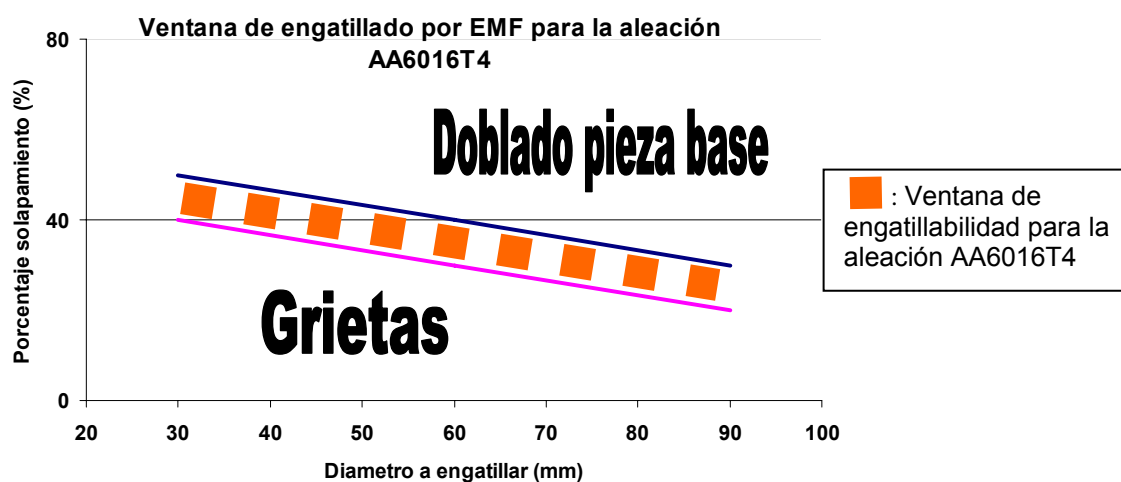


Figura 6.55: Ventana de engatillabilidad para la aleación AA6016T4 (espesor = 1,1mm, R doblado = 1,2mm y Altura pestaña = 5mm).



Desde los primeros experimentos realizados en el transcurso de esta tesis doctoral se estableció que el solapamiento entre la bobina electromagnética y la pestaña de la pieza a engatillar sería un parámetro fundamental a la hora de caracterizar este nuevo proceso de engatillado. Después de realizar un exhaustivo plan de ensayos y analizar los resultados se puede concluir en que efectivamente el solapamiento es un parámetro fundamental, sino el más importante, a la hora de engatillar electromagnéticamente.

La utilización de un solapamiento demasiado elevado conlleva la imposibilidad de obtener una unión engatillada sin deformar el refuerzo interior. Por otro lado, la utilización de un solapamiento demasiado pequeño se traduce en una mayor concentración de las deformaciones en el extremo de la unión lo cual puede generar grietas. En este caso, como se aprecia en la gráfica de la figura 6.55, el material elegido para esta tesis tiene una ventana de engatillabilidad bastante reducida. Esta ventana podría abrirse simplemente aumentando el valor del radio de doblado lo que disminuiría el riesgo de aparición de grietas.

Conviene señalar también que, al ser dobladas por EMF, las piezas engatilladas han sufrido un endurecimiento y una reducción de espesor mayor que las piezas estampadas en prensa para posteriormente ser engatilladas por métodos mecánicos. Por lo que la ventana se ve reducida también debido a esta reducción previa en el espesor y al endurecimiento sufrido en el doblado por EMF. Además de las conclusiones referentes a la ventana de engatillado, se ha observado también que el enrollamiento, la zona deformada y el combado aumentan al aumentar el solapamiento. Sin embargo la energía necesaria para conseguir la unión engatillada disminuye al aumentar el solapamiento.

### ***Aplicación de las conclusiones del solapamiento a un caso complejo***

La idea que reside en el fondo de cada plan de experimentos probado en esta tesis es el desarrollo de una tecnología de engatillado que cumpla los requisitos exigidos por el sector de la automoción para su posterior industrialización. Con tal fin, y aprovechando la estancia realizada en The Ohio State University se ha podido trabajar en un proyecto en curso entre el grupo de conformado a alta velocidad de esa universidad dirigido por el profesor Glenn Daehn y el centro tecnológico sueco de Svensk Verktygsteknik sobre engatillado por EMF. Se probaron las conclusiones sobre el solapamiento con la pieza seleccionada en dicho proyecto.

La pieza en cuestión es una pieza prototipo para probar la viabilidad del EMF para el engatillado. Tiene un contorno que combina zonas rectas con zonas curvas como se puede observar en la figura 6.56. Este proyecto actualmente en curso, se encuentra parado por falta de conocimiento sobre el proceso de engatillado por EMF. Se trata de un proyecto 100% aplicado a una pieza semi-industrial con diferentes alturas de pestaña y distintas geometrías de contorno, todo en una misma pieza, pero sin tener el “know how” suficiente sobre la aplicación concreta de la tecnología. Por lo tanto se aplicó el conocimiento adquirido en este capítulo a una parte de la pieza que combina una zona recta y una

zona curva para una misma altura de pestaña de 5mm (figura 6.56). Se trata de una zona recta unida a una zona curva de diámetro exterior de 120mm.

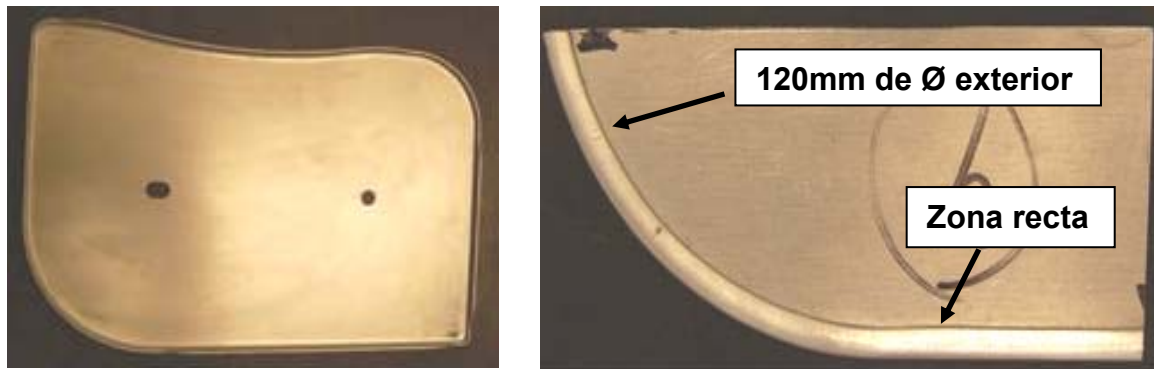


Figura 6.56: Pieza compleja para engatillar con distintas geometrías exteriores (izquierda) y zona de esa misma pieza utilizada para aplicar las conclusiones sobre el solapamiento (derecha [JIM08]).

La conclusión que se va a aplicar a esta zona es la gráfica de la figura 6.47 de este mismo capítulo 6.3 referente al solapamiento óptimo para cada diámetro. Se pretende extrapolar los resultados de esa gráfica, que ha sido obtenida con geometrías básicas independientes, a una pieza que combine distintas zonas en una misma pieza para ver si se cumple la misma tendencia. Para ello se fijó un primer valor del solapamiento constante en ambas zonas del 20 %. Este porcentaje del 20% se ha elegido alargando la recta de la gráfica hasta el diámetro de 120mm como se muestra en la gráfica de la figura 6.57.

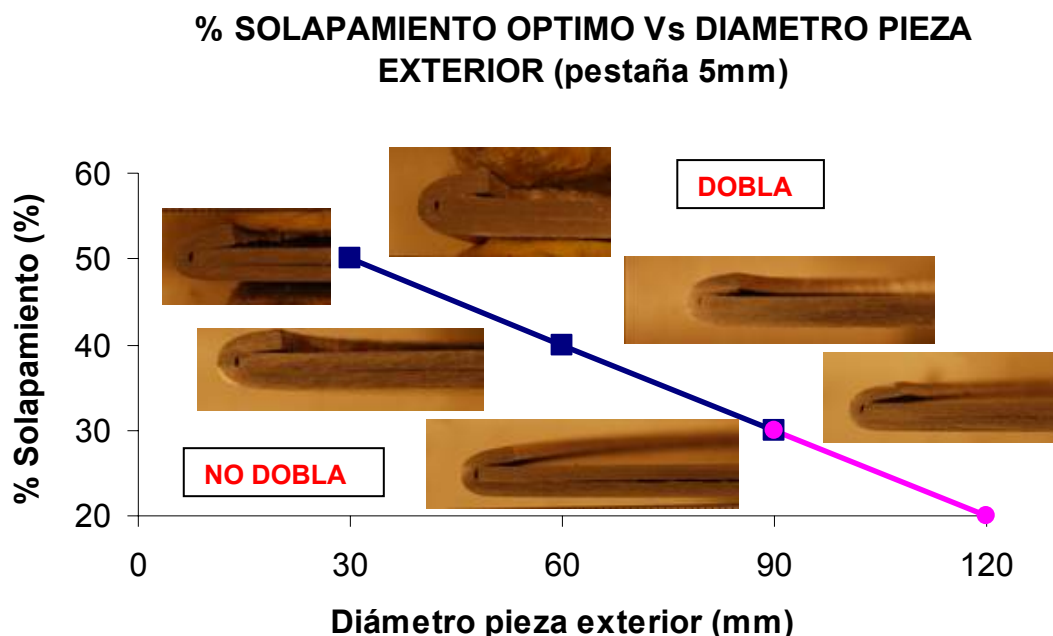
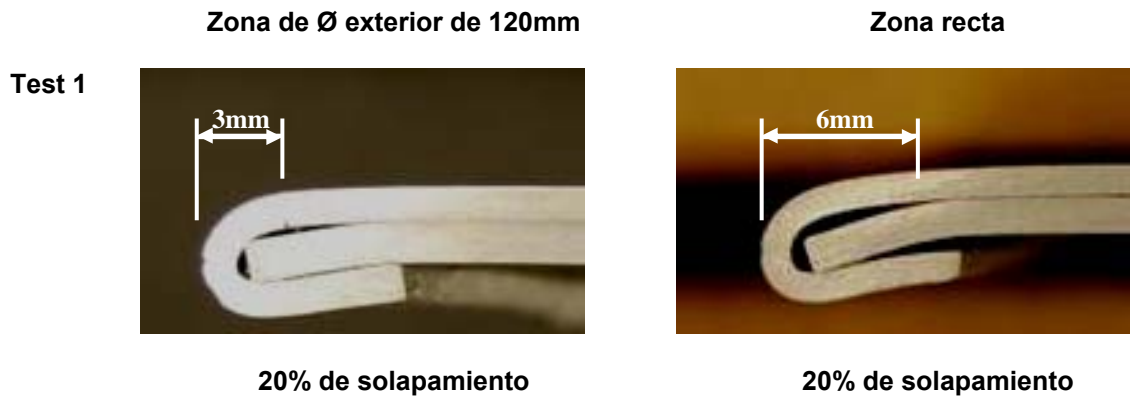


Figura 6.57: Gráfica del solapamiento óptimo para los distintos diámetros exteriores ensayados y extrapolación de los resultados para un diámetro exterior de 120mm en rosa.

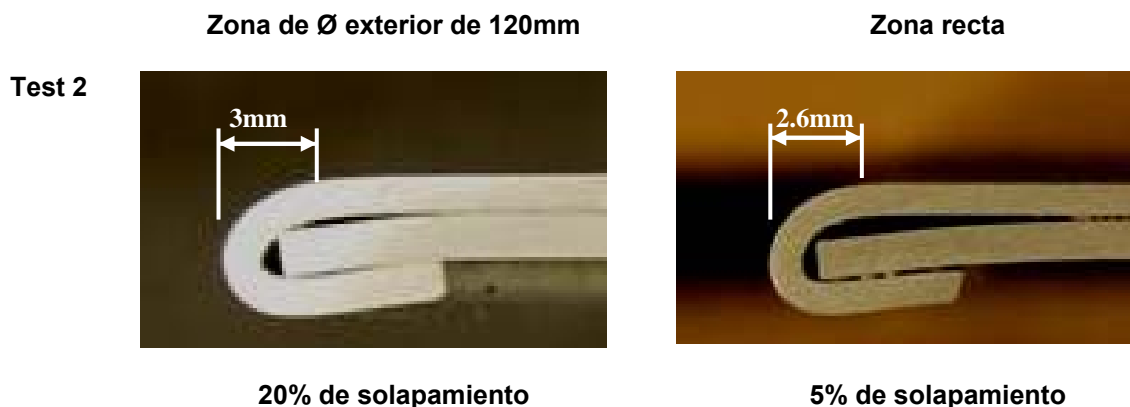
Se realizó el experimento con el solapamiento del 20 % para ambas zonas y se obtuvieron las zonas deformadas de la figura 6.58.



*Figura 6.58: Zonas deformadas en el primer test con un 20% de solapamiento en la zona recta (izquierda) y en la zona de 120mm de diámetro exterior (derecha).*

Se obtiene una zona deformada mayor en la zona recta. Este resultado corrobora las conclusiones de la gráfica de la figura 6.57. Si se fija el solapamiento en esa gráfica se obtiene un mayor doblado del refuerzo interior a medida que se aumenta el diámetro exterior lo que se traduce en un aumento de la zona deformada.

Para el siguiente ensayo se fijó el solapamiento para la zona recta en función de los resultados obtenidos en los experimentos. Dicho solapamiento óptimo para la geometría recta se sitúa en el 5% (figura 6.48). Para conseguir esos valores de solapamiento hubo que mecanizar la bobina de tal manera que el solapamiento fuera del 5% en la zona recta y se mantuviera al 20% en la zona curva. Se realizaron los experimentos con esta nueva bobina y se obtuvieron los siguientes resultados:



*Figura 6.59: Zonas deformadas en el segundo Test con un 20% de solapamiento en la zona recta (izquierda) y con un 5% de solapamiento en la zona de 120mm de diámetro exterior (derecha).*

El objetivo de estos experimentos es conseguir una misma geometría de la unión engatillada en diferentes zonas de una misma pieza con diferentes contornos geométricos utilizando la misma bobina y ajustando simplemente el solapamiento.

Basándose en los resultados obtenidos se corrobora la validez de la grafica de la figura 6.57. Se ha conseguido una unión con la misma zona deformada en zonas con diferentes contornos exteriores ajustando solamente el solapamiento según la gráfica obtenida con las geometrías básicas.

#### 6.4 Influencia de la geometría de la pieza:

En el estudio preliminar se ha visto la viabilidad de utilizar la tecnología del EMF para conseguir uniones engatilladas rectas. Sin embargo las piezas reales presentan zonas rectas y curvas como se puede ver en la figura 6.60.



Figura 6.60: Ejemplo del tipo de piezas engatilladas. [LAN06]

En la figura 6.60 se puede ver que el contorno de las distintas piezas está formado por zonas rectas y zonas curvas de distintos valores. Por lo tanto se presenta absolutamente lógico el introducir una nueva variable de entrada relacionada con la geometría exterior de la pieza. Para ir avanzando hacia ese propósito final de pieza de automoción, se planteó realizar diversas geometrías circulares.

Con ello se pretenden conseguir varios objetivos:

- Relacionar las variables estudiadas hasta ahora para diferentes diámetros exteriores.
- Establecer los límites de engatillabilidad del EMF para el material estudiado y para la propia tecnología. Es decir, definir diámetro mínimo engatillable o altura de pestaña máxima engatillable para las distintas geometrías que se van a ensayar.
- Analizar las diferentes variables por separado evitando introducir más de una variable a la vez. Posteriormente sacar las suficientes conclusiones como para plantear las siguientes variables a estudiar.
- Empezar a relacionar las variables geométricas de entrada con los parámetros de salida para ir evolucionando hacia geometrías más complejas.

Este capítulo está estructurado de la misma manera que los demás capítulos del estudio experimental. Se ha dividido en diferentes apartados y en cada uno de ellos se analiza la influencia de la variable del diámetro exterior en los diferentes parámetros de salida estudiados.

Finalmente las conclusiones más relevantes del capítulo se resumen en el apartado final de conclusiones.

### Plan de experimentos

Las geometrías a engatillar para estos nuevos ensayos son las explicadas en el capítulo 6.1 referente al plan de ensayos: tres diámetros exteriores (30mm, 60mm y 90mm) y dos alturas de pestaña (5 y 7mm).

A continuación se presentan las fotos de las bobinas de engatillado y de las piezas a engatillar

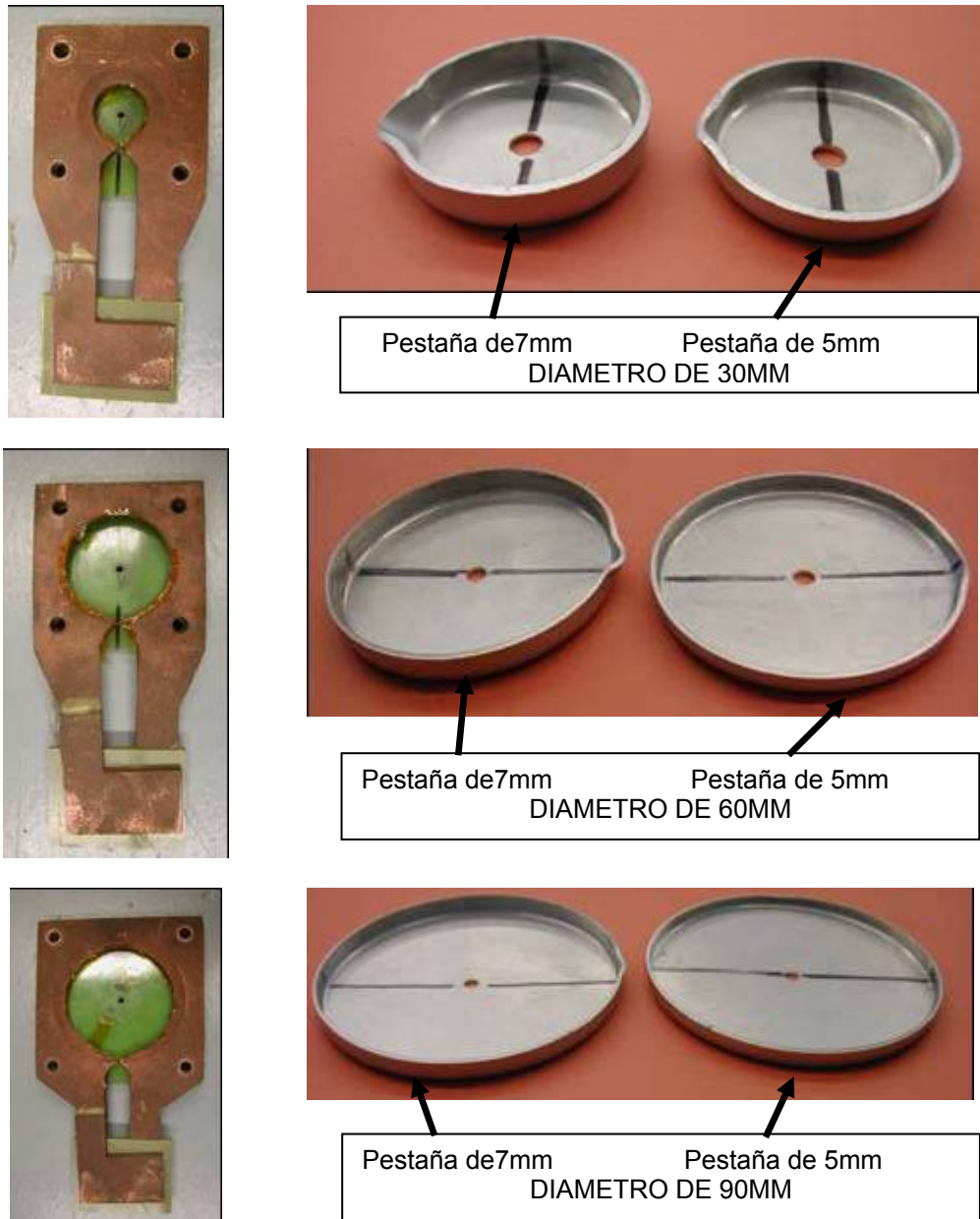


Figura 6.61: Bobinas de engatillado por EMF utilizadas (izquierda) y piezas para cada diámetro con las distintas alturas de pestaña (derecha).

El defecto que se puede apreciar en las piezas dobladas por EMF de la figura 6.61, aparece debido al diseño de las bobinas y al reducido tamaño de las muestras.

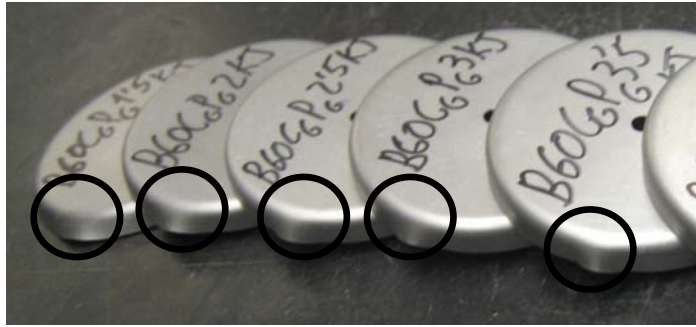


Figura 6.62: Defecto producido en el doblado en la zona de menor presión de la bobina para distintas energías de descarga.

Al tratarse de bobinas experimentales de reducido tamaño no están lo suficientemente rigidizadas como para aguantar una cadencia industrial. Además han sido fabricadas manteniendo una distancia en la zona de menor presión (figura 6.63) más grande de la necesaria para evitar posibles problemas de cortocircuitos durante los ensayos lo que produce el defecto. Ese pequeño defecto que aparece en la zona de menor presión se magnifica al estar trabajando con muestras de un tamaño reducido tanto en el doblado como en el engatillado por EMF.

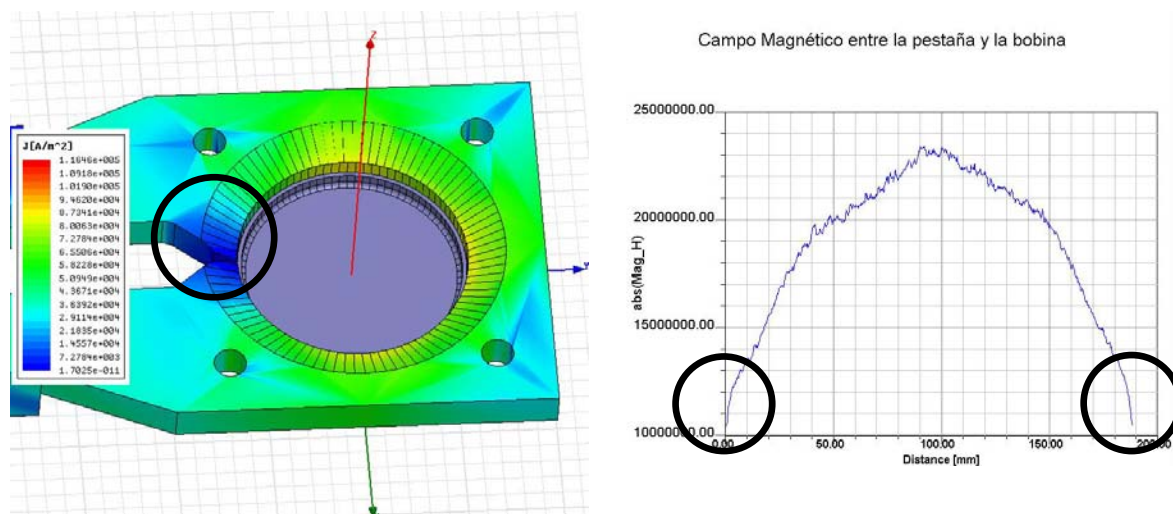


Figura 6.63: Localización de la zona de menor presión en una bobina de engatillado circular (izquierda) y gráfica de la presión magnética generada en el perímetro de la pestaña con la zona de menor presión detallada (derecha) realizadas por MAXWELL 3D®.

Estas imprecisiones generan defectos locales en las piezas engatilladas que imposibilitan el análisis de defectos en los que es necesario una medición de la unión o la pieza en su totalidad (tal y como se explica en el capítulo 4.2 en el apartado 3 referente a la calidad de una unión engatillada).

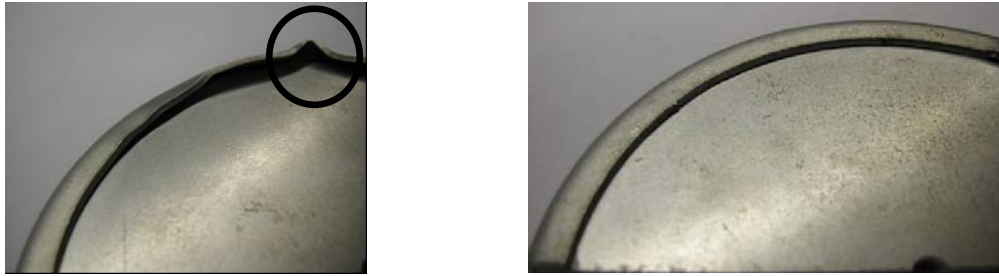


Figura 6.64: Defecto generado en la zona de menor presión (izquierda) y zona de presión uniforme (derecha) de una misma pieza circular al engatillar por EMF

Sin embargo estos defectos pueden ser eliminados al trabajar con piezas de dimensiones mayores, colocando la zona de menor presión en una zona conveniente de la pieza a engatillar y utilizando bobinas más industriales y de mayor precisión.

Para corroborarlo se realizaron varios experimentos con las bobinas del proyecto sobre engatillado por EMF desarrollado en conjunto entre la Universidad de Ohio State y el centro tecnológico sueco Svensk Verktygsteknik y que se ha utilizado también en el apartado anterior 6.3. Estos resultados fueron presentados en el ICHSF 2008 celebrado en Dortmund [JIM08].

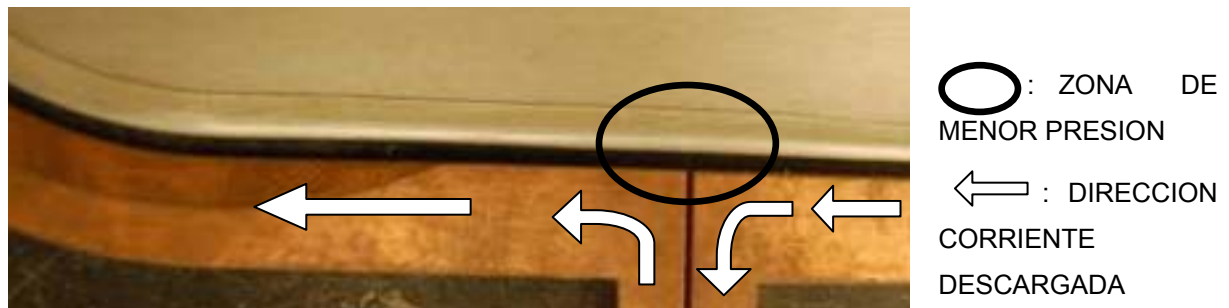


Figura 6.65: Zona de menor presión de la bobina y pieza engatillada con esa bobina libre de defecto. La zona de menor presión está señalada dentro de la elipse.

Como se observa en la figura 6.65, colocando la zona de menor presión magnética en una zona recta de la pieza y realizando un ajuste en esa zona del orden de 0,5mm se consigue una pieza libre de ese defecto.

#### 6.4.1 En el combado:

Al comparar piezas con distintos diámetros exteriores primero se midió el combado que traían esas piezas de la etapa de doblado por EMF. Se analizará la geometría de 5mm de altura de pestaña ya que se han conseguido engatillar los 3 diámetros con esa pestaña. Las piezas fueron dobladas con un 60% de solapamiento.



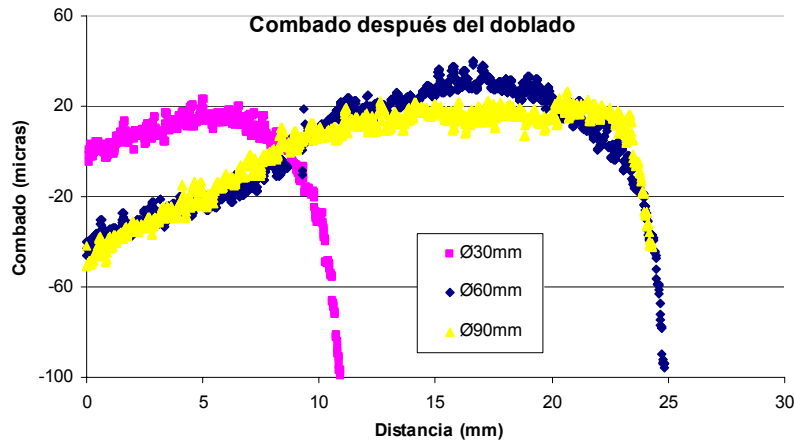


Figura 6.66: Combado para los distintos diámetros exteriores con la pestaña de 5mm de altura después de doblar.

Se observa lo mismo comentado en el capítulo 6.2.1. Las piezas dobladas al 60% de solapamiento están libres del defecto de combado. La deflexión que aparece es debida a la extracción de la pieza del mandrino de doblado utilizando aire a presión.

Por lo que el valor de combado antes del engatillado es inexistente para los 3 diámetros exteriores.

Una vez comprobado el combado inicial que presentan las distintas geometrías antes del engatillado, se midió el combado producido en las geometrías modelo óptimas después del engatillado.

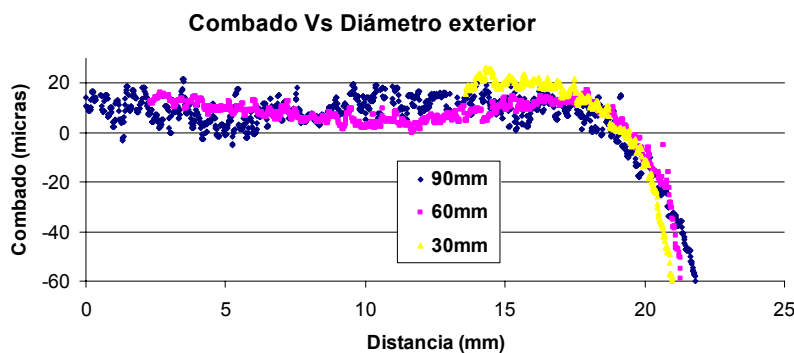


Figura 6.67 Combado después de engatillar por EMF para las geometrías modelo óptimas de 5mm de altura de pestaña.

De la gráfica de la figura 6.67 se extraen los valores de combado máximos para los distintos diámetros exteriores después de engatillar:

- Ø30mm: 0 micras de combado
- Ø60mm: 7 micras de combado
- Ø90mm: 12 micras de combado

Se observa un aumento en el combado para la geometría modelo óptima a medida que aumenta el diámetro exterior de la pieza.

6.4.2 En el enrollamiento

El enrollamiento es la diferencia en milímetros entre el diámetro de la pieza doblada y el diámetro de la pieza final una vez engatillada por EMF. Las mediciones se realizaron en la misma zona de la pieza tal y como se explica en la figura 6.68.



Figura 6.68: Zona de medición del diámetro máximo antes de engatillar (izquierda) y después de engatillar (derecha) para calcular el enrollamiento.

Se analizaron muestras realizadas utilizando las mismas variables de proceso (energía, altura de pestaña y solapamiento) pero con distinto diámetro exterior (figura 6.69).

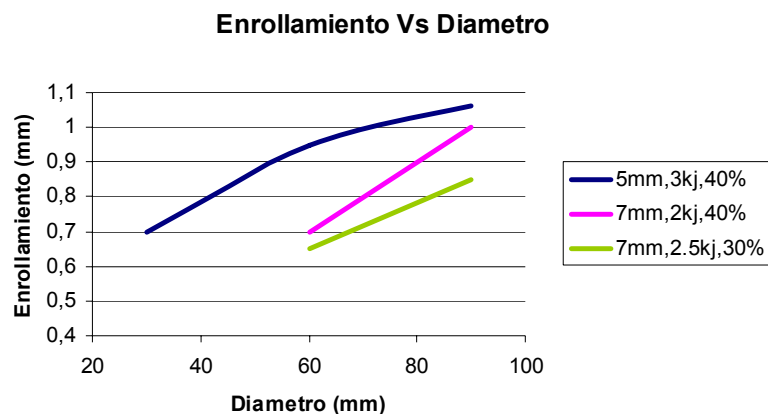
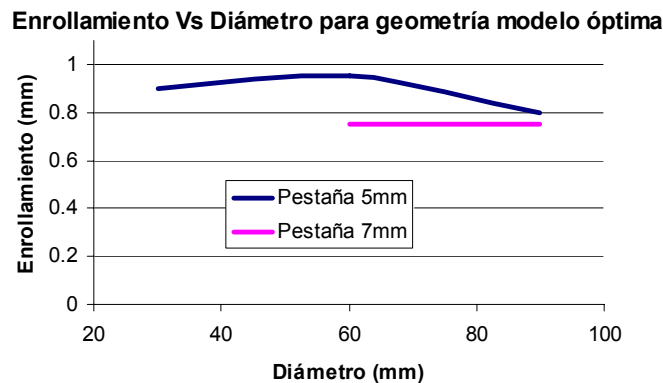


Figura 6.69: Enrollamiento para los distintos diámetros exteriores utilizando las mismas variables de entrada.

Utilizando las mismas variables de entrada (energía, altura de pestaña y solapamiento) el enrollamiento aumenta a medida que aumentamos el diámetro a conformar. Sin embargo es más sencillo engatillar una misma pestaña para un diámetro de 90mm que para un diámetro de 30mm ya que este último exige un mayor grado de compresión. Es por eso que ante un mismo impulso electromagnético la pieza de mayor diámetro enrolla más que la pieza de menor diámetro, porque tiene que vencer menores esfuerzos de compresión para conseguir engatillar esa pestaña.

Si graficamos el enrollamiento que se produce para las geometrías modelo óptimas de los diámetros exteriores ensayados el resultado es diferente (figura 6.70).



*Figura 6.70: Enrollamiento que sufren las geometrías modelo óptimas para las dos alturas de pestaña ensayadas.*

Si se ajustan las variables de entrada del engatillado por EMF hasta conseguir la geometría modelo óptima para cada diámetro, el enrollamiento que se produce en cada caso es más o menos el mismo (figura 6.70). Esto significa que aunque la energía o el solapamiento sean diferentes para cada diámetro exterior, cuando se consigue la geometría modelo óptima, el enrollamiento generado siempre es el mismo y según este estudio está en función de la altura de la pestaña.

Esto se debe a que el solapamiento para conseguir la geometría modelo óptima sí que varía en función del diámetro exterior, a mayor diámetro exterior, menor solapamiento y por lo tanto el enrollamiento se mantiene constante. Esto facilita mucho el diseño de piezas industriales, ya que el enrollamiento conseguido es constante en todo el contorno de la pieza cuando se consigue la geometría modelo óptima, que es la geometría que se quiere obtener en toda la pieza.

#### 6.4.3 En la zona deformada

Con anterioridad se ha hablado de la importancia de la zona deformada en la calidad de las piezas engatilladas en automoción (figura 1.5). Al estudiar las diferentes geometrías se analizó la influencia del diámetro a engatillar en la dimensión de esa zona deformada. Este parámetro resulta de vital

importancia para la industria del automóvil ya que, además de desear una zona deformada pequeña, necesitan que esta sea constante en toda la pieza.

Para realizar este estudio se compararon las geometrías modelo óptimas para las distintas geometrías ensayadas, incluyendo la recta. Estas geometrías modelo óptimas se presentan en las fotografías de la figura 6.71.



Ø30mm, 50% de solapamiento, zona deformada=2,36mm



Ø60mm, 40% de solapamiento, zona deformada=2,1mm



Ø90mm, 30% de solapamiento, zona deformada=1,9mm



Recta, 5% de solapamiento, zona deformada=2,2mm

Figura 6.71: Geometrías modelo óptimas con la pestaña de 5mm de altura para cada una de las geometrías exteriores ensayadas.

Los resultados de esas mediciones se reflejan en la gráfica de la figura 6.72. Solamente se han analizado las muestras de 5mm de altura de pestaña ya que con la pestaña de 7mm no se han conseguido engatillar todas las geometrías.

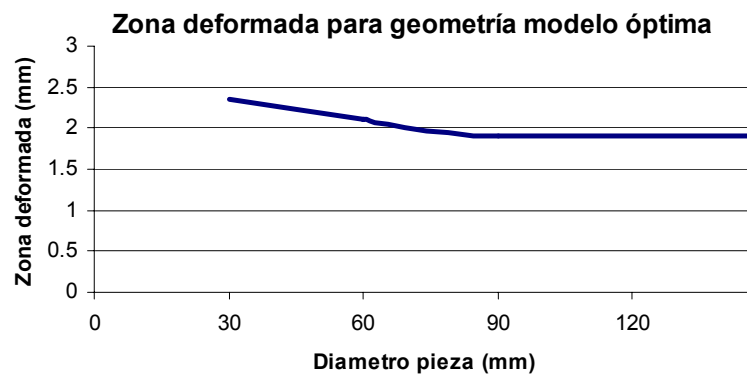


Figura 6.72: Zona deformada para la geometría modelo óptima de cada geometría exterior para la altura de pestaña de 5mm y aproximando la recta a un diámetro exterior infinito.

La zona deformada aumenta a medida que disminuye el diámetro de la pieza exterior a engatillar.

Cuanto más pequeño es el valor del diámetro exterior de la pieza a engatillar, los esfuerzos de engatillado son mayores ya que la fuerza de compresión que hay que superar es mayor. Este aumento en los esfuerzos realizados es el responsable de que la zona deformada también aumente.

Sin embargo, a medida que aumenta el diámetro exterior de la pieza ese valor se estabiliza en lo que es el valor de la zona deformada mínimo que se puede conseguir.

#### 6.4.4 En las arrugas

Las arrugas generadas es un parámetro de salida que no ha sido estudiado hasta ahora. Sin embargo en este apartado se ha observado una influencia importante del diámetro exterior en la generación de arrugas por lo que se ha analizado esta influencia.

Se han comparado las geometrías modelo óptimas de cada uno de los diámetros exteriores ensayados (figura 6.73 y figura 6.74).



Figura 6.73: Piezas engatilladas de 5mm de altura de pestaña con distintos diámetros exteriores de 90mm (izquierda), 60mm (centro) y 30mm (derecha).

A medida que disminuye el diámetro exterior de la pieza a engatillar aumenta el número de arrugas. Así, para el caso de 5mm de altura de pestaña (figura 6.73), el diámetro de 30mm sería el límite inferior para esa variable ya que se producen demasiadas arrugas. En el caso de la pestaña de 7mm de altura (figura 6.74), el límite se sitúa en el diámetro exterior de 60mm, aunque se puede observar que el diámetro de 90mm también tiene alguna arruga.



Figura 6.74: Piezas engatilladas de 7mm de altura de pestaña con distintos diámetros exteriores de 90mm (izquierda) y 60mm (derecha).

Se han fijado unos límites de engatillabilidad por EMF para la aleación AA6016T4 estudiada. Con los parámetros geométricos utilizados la altura de pestaña de 5mm puede engatillarse hasta piezas de diámetro exterior de 30mm mientras que con una pestaña de 7mm el diámetro mínimo se sitúa en torno a los 60mm.

#### 6.4.5 *En la aparición de grietas*

Para observar si existe alguna diferencia en lo que a aparición de grietas se refiere para los distintos diámetros exteriores, se analizaron las geometrías modelo óptimas.

No se observan diferencias. Las geometrías modelo óptimas se caracterizan porque cumplen ciertos requisitos geométricos que son iguales para todas. De hay que el grado de daño sufrido por el material sea muy similar para todas ellas y por consiguiente también el grado de agrietamiento.

#### 6.4.6 *Conclusiones*

El combado aumenta a medida que aumenta el diámetro exterior. De todos modos ese combado se produce en la etapa de doblado por EMF ya que al engatillar el valor final se reduce, siendo mayor el valor tras el doblado que después del engatillado final. Por lo tanto otra conclusión es que la operación de engatillado por EMF reduce el combado que pudieran tener las piezas de la etapa de doblado.

El enrollamiento se mantiene constante para la geometría modelo óptima mientras que la zona deformada alcanza su límite inferior a partir de cierto valor del diámetro exterior.

Las arrugas aumentan al disminuir el diámetro exterior de la pieza a engatillar.

Si comparamos las diferentes geometrías modelo no se aprecia variación en las grietas producidas para los distintos diámetros exteriores ensayados. Las geometrías modelo óptimas se caracterizan porque cumplen ciertos requisitos geométricos que son iguales para todas. De hay que el grado de daño sufrido por el material sea muy similar para todas ellas.

## 6.5 Influencia de la altura de la pestaña

En el estudio preliminar (capítulo 5.1.5) se analizaron dos alturas de pestaña, una de 5mm y otra de 10mm. La pestaña de 5mm dio buenos resultados consiguiéndose incluso una geometría de mayor calidad que la conseguida mecánicamente. Sin embargo la pestaña de 10mm no dio uniones engatilladas aceptables por razones explicadas en ese mismo capítulo. Teniendo en cuenta que se trata por lo tanto, de una variable de entrada que limita el proceso en gran medida, se ha creído conveniente realizar nuevos experimentos con distintas alturas de pestaña.

Se trató de fabricar piezas con pestañas por debajo de 5mm pero resultaron demasiado cortas como para ser engatilladas posteriormente por lo que el valor de 5mm de altura de pestaña fue elegido como límite inferior. En el estudio preliminar se constató la dificultad de engatillar 10mm con el proceso diseñado para esta tesis (eliminando la operación de pre-engatillado), por lo que se eligió un segundo valor de altura de pestaña intermedio de 7mm.

Se presentan los resultados de la influencia de la altura de la pestaña en los distintos parámetros de salida estudiados. Para terminar se recogen las principales conclusiones del capítulo.

### 6.5.1 *En la aparición de grietas*

Solamente se han podido comparar los diámetros de 60mm y 90mm ya que fue imposible conseguir uniones engatilladas con la pestaña de 7mm de altura para el diámetro exterior de 30mm.

Para este estudio se analizaron las distintas muestras en busca de grietas. Tal y como concluye el punto 6.3.6, la aparición de grietas está en función del solapamiento y del diámetro exterior. Al disminuir el solapamiento se produce una concentración de deformaciones en el extremo de la unión lo cual puede degenerar en la creación de grietas.

Los resultados obtenidos en este apartado se grafican para cada altura de pestaña, en función del solapamiento y de los dos diámetros exteriores en la figura 6.75.

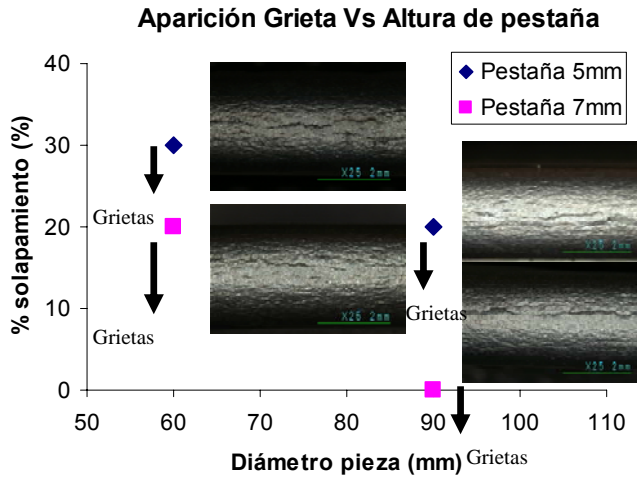


Figura 6.75: Gráfica que representa la aparición de grietas en función del solapamiento y del diámetro exterior para cada altura de pestaña. Las flechas indican la dirección de la generación de grietas con el solapamiento.

De la gráfica se pueden extraer varias conclusiones. La pestaña de 5mm empieza a generar grietas con un solapamiento mayor que la pestaña de 7mm. A medida que se reduce el diámetro de la pieza exterior a engatillar aumenta el solapamiento al que comienzan a generarse grietas para ambas alturas de pestaña.

6.5.2 En la zona deformada

Para realizar el estudio sobre la influencia de la altura de la pestaña en la zona deformada se volvió a tomar como referencia la geometría modelo óptima. Se midieron las zonas deformadas y los resultados de esas mediciones se graficaron para las dos alturas de pestaña (figura 6.76). Tal y como se ha comentado con anterioridad, fue imposible engatillar la pestaña de 7mm de altura para el diámetro de 30mm por lo que solamente se muestran los resultados para los diámetros exteriores de 60mm y 90mm.

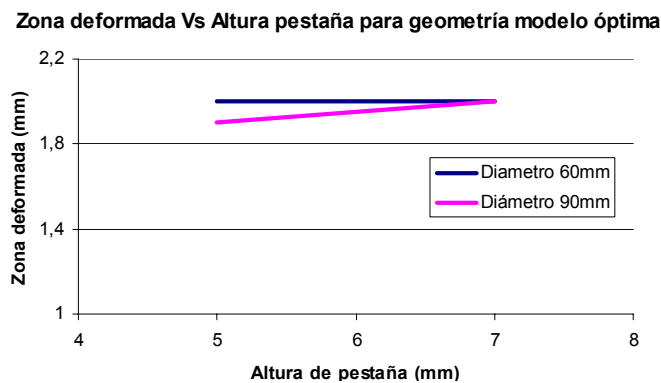


Figura 6.76: Zona deformada Vs Altura de pestaña para la geometría modelo óptima.



Se puede observar en la gráfica de la figura 6.76 que la zona deformada se mantiene prácticamente constante para la geometría modelo óptima. Esto significa que la zona deformada de la geometría modelo óptima es independiente de la altura de la pestaña.

Por lo tanto, si la geometría de la unión (radio de doblado, espesor, altura de pestaña y diámetro exterior) puede ser engatillada sin generar grietas o arrugas excesivas, la zona deformada obtenida para la geometría modelo óptima será siempre la misma.

### 6.5.3 En el combado

Se midió el combado que se produce para las dos alturas de pestaña ensayadas de 5 y 7mm para la geometría de 90mm de diámetro exterior.

Se midió el combado que tenían las piezas antes de ser engatilladas ya que habían sido dobladas por EMF con distintos % de solapamiento. Las muestras de 5mm de altura de pestaña se doblaron con un 60% de solapamiento mientras que las muestras con 7mm de altura de pestaña se doblaron con un 15% de solapamiento.

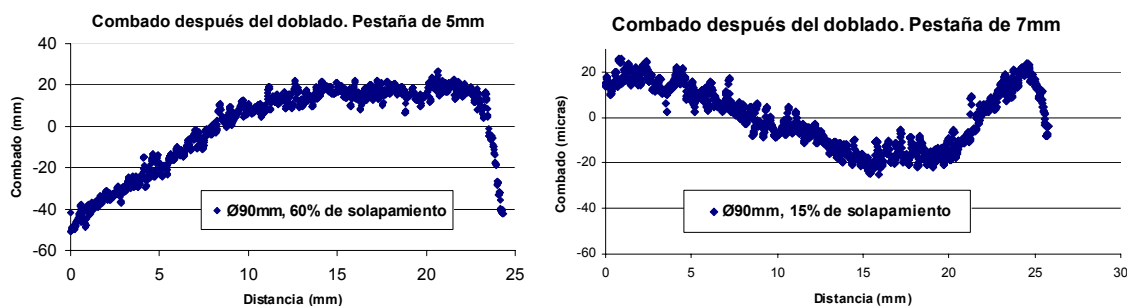


Figura 6.77: Combado después del doblado por EMF para las altura de pestaña de 5mm (izquierda) y 7mm (derecha) obtenidas a distinto % de solapamiento.

Se observa lo que ya se observó al hacer el estudio sobre doblado por EMF del capítulo 6.2, que las piezas dobladas al 60% no presentan combado sino una deflexión de toda la superficie de la pieza generada al extraer la pieza del mandrino. Sin embargo las piezas dobladas al 15% si que presentan un combado que en este caso es de 40 micras.

A continuación se muestran los valores de combado medidos en las muestras de la figura 6.77 después de ser engatilladas (figura 6.78). Estas mediciones se realizaron sobre las geometrias modelo óptimas.

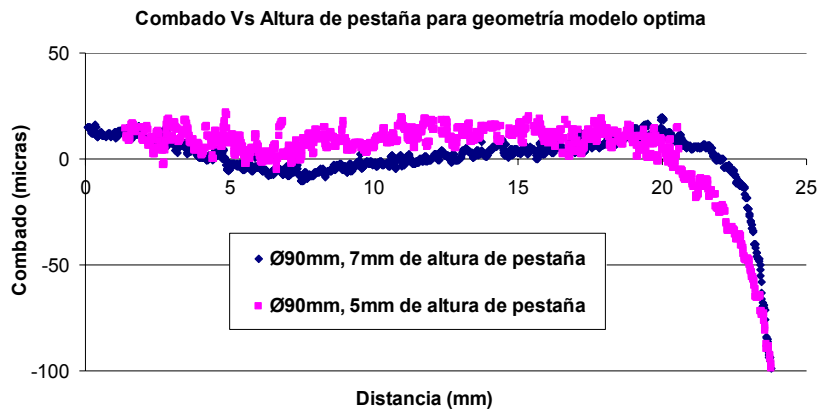


Figura 6.78: Combado para las distintas alturas de pestaña con la geometría de 90mm de diámetro exterior.

El valor máximo para cada caso:

- 5mm de altura: 10 micras
- 7mm de altura: 20 micras

Se aprecia un aumento del combado a medida que aumenta la altura de pestaña.

De todos modos estos datos no pueden tomarse como definitivos ya que las piezas comparadas han sido dobladas utilizando distintos parámetros de proceso EMF. La de 7mm de altura de pestaña ha sido obtenida con un 15% de solapamiento mientras que la de 5mm de altura de pestaña ha sido obtenida con un 60% de solapamiento por lo que ambas partían con valores de combado distintos antes del engatillado por EMF (figura 6.77).

Lo que sí se puede ver es la reducción del combado que traía la pieza de 7mm de altura de pestaña de la operación de doblado por EMF. Se ha pasado de un valor de combado máximo de 40 micras a un valor de 20 micras tras el engatillado por EMF.

#### 6.5.4 En las arrugas

Para realizar este estudio se volvieron a examinar en busca de arrugas las distintas geometrías modelos óptimas obtenidas para cada diámetro exterior y altura de pestaña.

La geometría de 30mm de diámetro exterior no aparece en los resultados ya que sólo se pudo engatillar la altura de pestaña de 5mm. A continuación se muestran las distintas uniones obtenidas para el diámetro exterior de 60mm (figura 6.79).



**5mm de altura de pestaña**



**7mm de altura de pestaña**

*Figura 6.79: Pieza engatillada de diámetro exterior de 60mm con 5mm de altura de pestaña (izquierda) y con 7mm de altura de pestaña (derecha).*

Y para el diámetro exterior de 90mm (figura 6.80).



**5mm de altura de pestaña**



**7mm de altura de pestaña**

*Figura 6.80: Pieza engatillada de diámetro exterior de 90mm con 5mm de altura de pestaña (izquierda) y con 7mm de altura de pestaña (derecha).*

Si comparamos las arrugas generadas para las geometrías modelo óptimas vemos que a medida que aumenta la altura de la pestaña se generan un mayor número de arrugas.

Este resultado es totalmente lógico ya que a mayor altura de pestaña, mayor cantidad de material a comprimir a la hora de realizar el engatillado tal y como ilustra la figura 6.81.



*Figura 6.81: Generación de arrugas al engatillar una zona convexa (izquierda) [LIV04b] y arrugas excesivas generadas al intentar engatillar una pestaña de 7mm de altura para el diámetro exterior de 30mm (derecha).*

### 6.5.5 En el enrollamiento

Para hacer un análisis de la influencia de la altura de la pestaña en el enrollamiento se volvió a utilizar la geometría modelo óptima para ambas alturas de pestaña y diámetros exteriores. Los resultados se pueden observar en la gráfica de la figura 6.82.

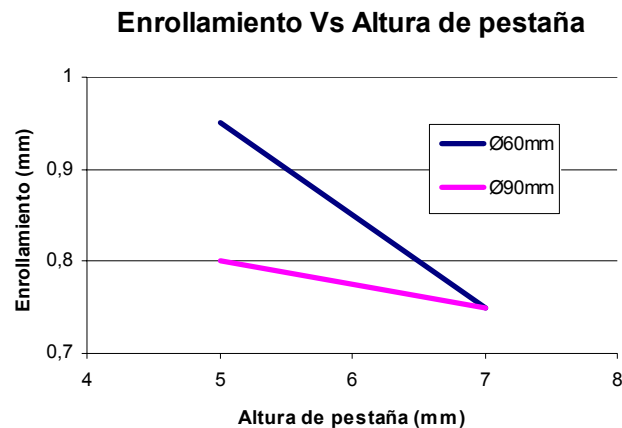


Figura 6.82: Enrollamiento Vs Altura de pestaña para las distintas geometrías modelo óptimas.

Se puede observar que el enrollamiento generado para conseguir la geometría modelo óptima aumenta al disminuir la altura de la pestaña. Este aumento es más acusado a medida que se reduce el diámetro exterior.

### 6.5.6 Conclusiones

Con las diferentes configuraciones de alturas de pestaña y diámetros ensayados es posible establecer varios límites de engatillabilidad en lo que a geometría se refiere. Para el diámetro de 30mm el límite en altura de pestaña engatillable se sitúa por debajo de los 5mm ya que con esa altura se producen arrugas en la zona de la unión. Para el diámetro de 90mm la altura máxima engatillable se sitúa en torno a los 7mm ya que, aunque se pueda engatillar, no se obtienen piezas totalmente libres de arrugas, mientras que con la pestaña de 5mm sí (figura 6.80). El diámetro exterior de 60mm sin embargo tiene su límite de altura de pestaña superior en torno a los 5mm ya que con 7mm se generan demasiadas arrugas (figura 6.79).

Además de establecer las alturas máximas engatillables en función del diámetro exterior, también se han observado ciertas tendencias en los parámetros de salida analizados.

La ventana de engatillabilidad para evitar la creación de grietas que nos da el solapamiento en función del diámetro exterior aumenta con la altura de la pestaña. O dicho de otra manera, una pestaña de mayor altura nos permite un mayor rango de valores de solapamiento sin problemas de aparición de grietas.

Al comparar las distintas geometrías modelo óptimas se observa un aumento en el enrollamiento al disminuir la altura de la pestaña pero sin embargo la zona deformada se mantiene constante. Esto último es un indicador de buena calidad ya que permite mantener una zona deformada constante en toda la pieza independientemente de su geometría o diámetro exterior.

### 6.6 Influencia del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior:

El GAP entre la pieza exterior y el refuerzo interior (figura 6.83) es una variable a controlar. Es una distancia que interesa y preocupa a la industria de la automoción porque tiene variaciones de  $\pm 2\text{mm}$  en una misma serie de piezas. Esta variación del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior existente en las piezas a engatillar hace que resulte interesante conocer su influencia en la calidad final de las piezas engatilladas por EMF.

Se realizaron unas pruebas para ver como afecta la variación del parámetro del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior en la geometría final de la unión engatillada. Tal y como se explica en el capítulo 6.1 en el que se presenta el plan de experimentos, la variable del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior se estudiará en un estado preliminar para posteriormente decidir su influencia en la unión engatillada por lo que el número de experimentos realizado fue reducido.

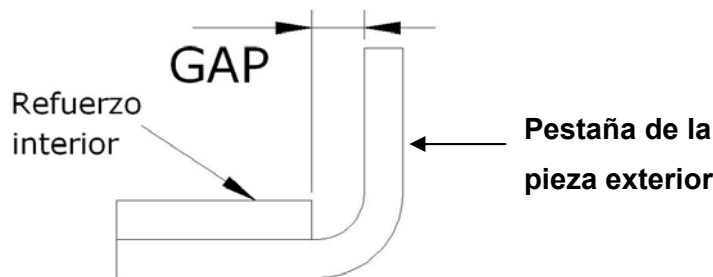


Figura 6.83: Explicación esquemática de la variable de entrada GAP entre refuerzo interior y pestaña.

Para realizar dicho estudio preliminar se optó por engatillar dos geometrías (una circular y una recta) con dos valores de GAP y dos valores de solapamiento.

El plan de experimentos realizado viene resumido en la siguiente tabla 6.13.

Geometría	Solapamiento (%)	GAP pestaña-refuerzo interior (mm)
Circular	20	1,2 y 2,2
Circular	40	1,2 y 2,2
Recta	15	1,2 y 2,5

Tabla 6.13: Plan experimental para el estudio de la variable de entrada del GAP entre pestaña y refuerzo interior.

Los resultados están clasificados en función de la influencia del GAP entre pestaña-refuerzo interior en los distintos parámetros de salida. Finalmente se extraen las conclusiones referentes a esta variable.

### 6.6.1 En el enrollamiento

El enrollamiento se midió solamente con la geometría circular ya que los resultados obtenidos de esas mediciones son más precisos que los obtenidos con la geometría recta. Se midieron los diámetros antes y después de la operación de engatillado por EMF y se calculó lo que había enrollado cada una de las muestras. Los valores se han graficado en la figura 6.84 para poder interpretar mejor los resultados.

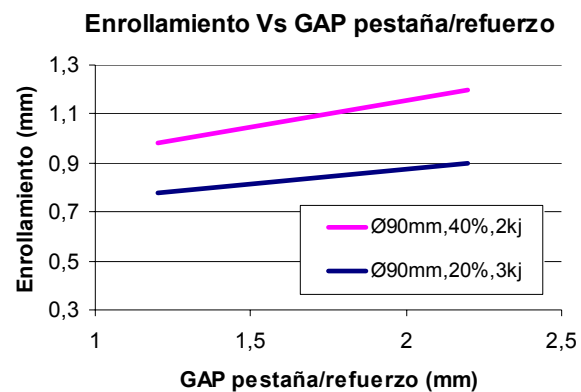


Figura 6.84: Enrollamiento Vs GAP entre la pestaña-refuerzo interior para la pestaña de 7mm.

De la grafica de la figura 6.84 se pueden extraer varias conclusiones. La primera está relacionada directamente con la variable estudiada en este caso. Un aumento del valor del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior aumenta el enrollamiento obtenido. La segunda conclusión es que ese aumento es menos acusado si se engatilla con un solapamiento menor.

### 6.6.2 En la zona deformada

Se midió la zona deformada de las muestras engatilladas para este estudio. En la tabla 6.14 se muestran los resultados de esas mediciones para la geometría recta con 5mm de altura de pestaña y para la circular de 90mm de diámetro exterior y 7mm de altura de pestaña.

Geometría	GAP (mm)	Solapamiento (%)	Energía (kj)	Zona deformada (mm)
Ø90mm	1,2	40	2	2,3
Ø90mm	2,2	40	2	2,7
Ø90mm	1,2	20	3	2,17
Ø90mm	2,2	20	3	2,54
Recta	1,2	15	5,5	4,31
Recta	2,5	15	5,5	5,8

Tabla 6.14: Zona deformada obtenida en función del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior.

Las mediciones correspondientes a la geometría circular de  $\varnothing 90\text{mm}$  se graficaron para una mejor interpretación de los resultados en la figura 6.85.

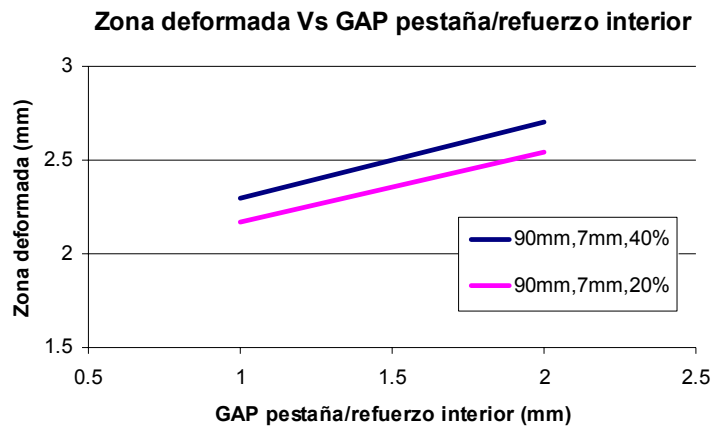


Figura 6.85: Gráfica de la zona deformada obtenida en función del GAP entre pestaña y refuerzo interior.

Tanto con la geometría recta como con la geometría circular, la zona deformada aumenta al aumentar la distancia entre la pestaña y el refuerzo interior. En las imágenes de la figura 6.86 se observa como al aumentar la distancia entre la pestaña y el refuerzo interior aumenta la zona deformada. El comienzo de la zona deformada está limitado por la posición del extremo del refuerzo interior, señalado en la imagen por una línea blanca.

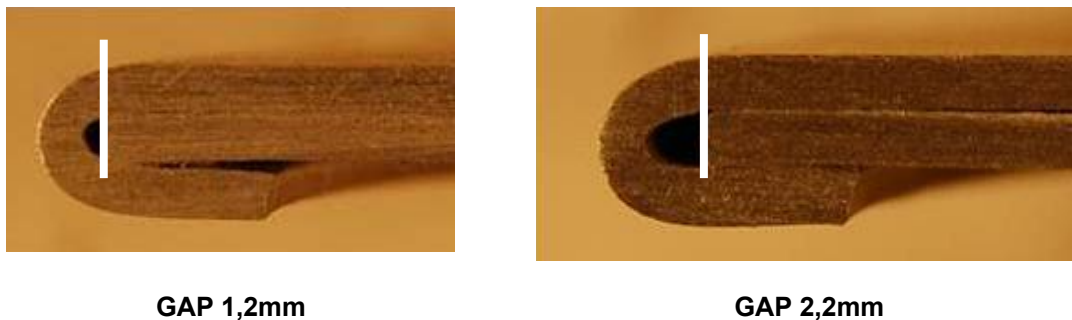


Figura 6.86: Uniones engatilladas utilizando los mismos valores para las variables de entrada pero con distinto GAP entre la pestaña y el refuerzo exterior.

Al aumentar el GAP entre la pestaña y el refuerzo interior se reduce la rigidez del sistema pieza exterior-refuerzo interior. Al aplicar el impulso electromagnético, la pieza exterior no es capaz de absorber por sí sola los esfuerzos generados sin deformarse.

La línea blanca dibujada sobre ambas uniones en la figura 6.86 delimita la zona recta de la zona deformada en la cara exterior de la unión. Se observa que el comienzo de la zona deformada coincide con el extremo final del refuerzo interior.



### 6.6.3 En la aparición de grietas

Se analizaron las uniones engatilladas rectas y las circulares en sus extremos en busca de grietas. A continuación se muestran los resultados:

En recto:

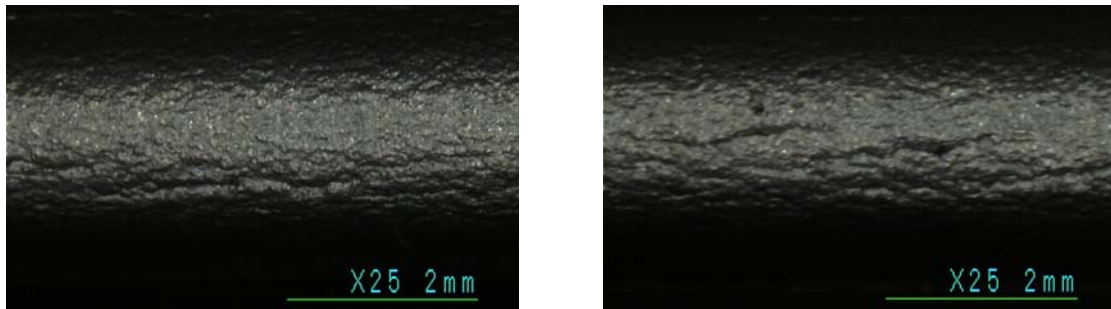


Figura 6.87: Cara exterior del extremo de la unión engatillada para la geometría recta utilizando un GAP entre pestaña y refuerzo interior de 1,2mm (izquierda) y de 2,5mm (derecha).

En circular:

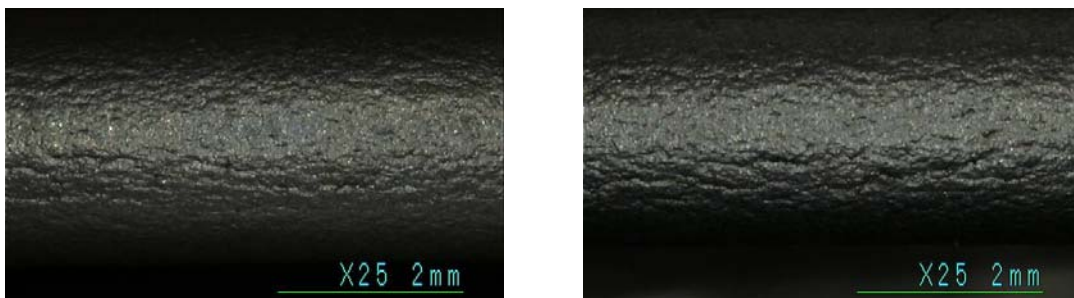


Figura 6.88: Cara exterior del extremo de la unión engatillada para la geometría de  $\varnothing 90\text{mm}$  de diámetro exterior y 7mm de altura de pestaña utilizando un GAP entre pestaña y refuerzo interior de 1,2mm (izquierda) y de 2,2mm (derecha).

No se aprecia gran diferencia aunque sí un leve aumento del agrietamiento al aumentar el GAP. La causa de este aumento del agrietamiento es consecuencia de la forma geométrica del extremo de la unión (figura 6.89).



Figura 6.89: Sección del extremo de la unión engatillada para la geometría de  $\varnothing 90\text{mm}$  de diámetro exterior y 7mm de altura de pestaña utilizando un GAP entre pestaña y refuerzo interior de 1,2mm (izquierda) y de 2,2mm (derecha).

En la imagen de la derecha de la figura 6.89 se puede ver que la pieza no dobla sobre el refuerzo interior sino que se pliega sobre si misma. Esto produce una zona en el extremo de la unión donde el material sufre una deformación más localizada lo que aumenta la aparición de grietas.

En esa misma figura se ve que las piezas engatilladas con un GAP menor tienen un radio en el extremo de la unión mayor. Dicho de otra forma, el extremo de la unión con el GAP de 1,2mm tiene una forma que se asemeja a una circunferencia, mientras que el extremo de la unión obtenida con un GAP de 2,2mm tiene una forma elíptica. Esto se traduce en una mayor distribución de las deformaciones en el primer caso y una concentración de esas deformaciones en el segundo que favorece la generación de grietas.

#### 6.6.4 En el combado

Se midió el combado generado para la geometría circular y para la geometría recta en función del GAP entre la pestaña y el refuerzo interior. Los resultados se pueden ver en las siguientes gráficas:

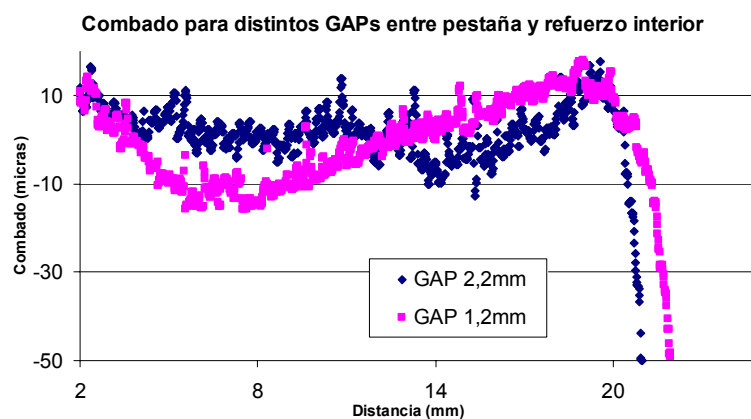


Figura 6.90: Piezas de 90mm de diámetro y 7mm de altura de pestaña dobladas al 15% con 4,5kj y engatilladas al 40% de solapamiento con 2kj.

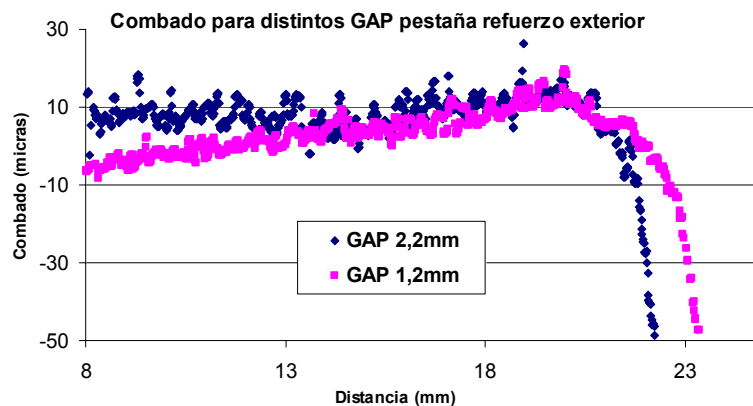


Figura 6.91: Piezas de 90mm de diámetro y 7mm de altura de pestaña dobladas al 15% con 4,5kj y engatilladas al 20% de solapamiento con 3kj.

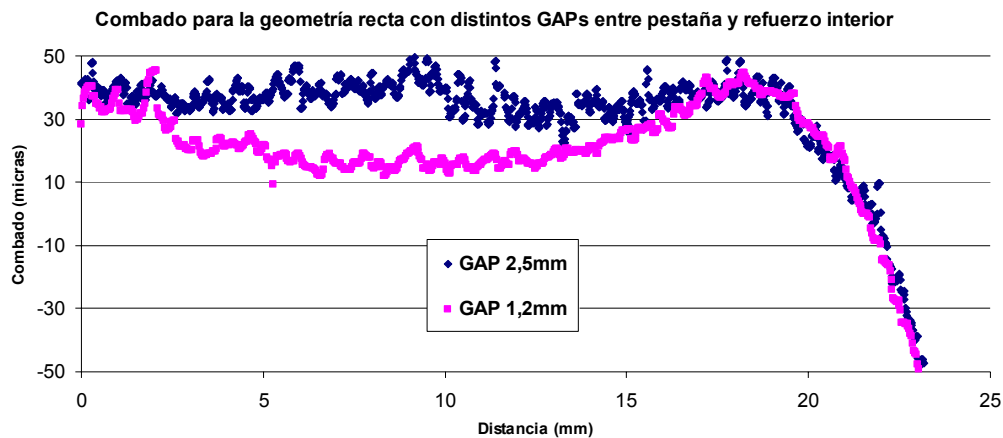


Figura 6.92: Recta doblada por EMF al 15% y 4kj y engatilladas a 15% y con 5,5kj.

Se aprecia una reducción del comado al aumentar el GAP entre la pestaña y el refuerzo interior.

#### 6.6.5 Conclusiones

El GAP entre la pestaña y el refuerzo interior debe reducirse para conseguir una unión final de mayor calidad ya que con ello se reduce también la zona deformada, el enrollamiento y el riesgo de agrietamiento. Sin embargo la reducción de dicha variable de entrada aumenta el defecto de comado de la pieza exterior.

## 6.7 Estudio comparativo engatillado Mecánico Vs EMF

Todas las uniones engatilladas estudiadas en esta tesis han sido obtenidas por EMF. En el estudio realizado en esta tesis se ha observado la posibilidad de obtener uniones engatilladas por EMF equiparables a las obtenidas por la industria de la automoción utilizando métodos convencionales en términos de calidad y geometría final.

Sin embargo ha sido imposible conseguir una pieza real engatillada por el método convencional que tenga los mismos parámetros de material, altura de pestaña, radio de doblado y geometría que las realizadas a lo largo de esta tesis para poder realizar alguna comparación entre ellas. Por ello se ha visto la necesidad de realizar un engatillado mecánico convencional con los mismos parámetros geométricos de las piezas engatilladas por EMF. Estos parámetros a los que se hace referencia son el mismo material AA6016T4, mismo radio de doblado, misma altura de pestaña y mismo GAP entre pestaña y refuerzo interior.

A continuación se detalla como se realizaron los experimentos de engatillado mecánico convencional para el material AA6016T4 y las conclusiones que podemos sacar al compararlos con la misma unión engatillada por EMF.

Este estudio se realizó utilizando la geometría recta dada la dificultad que supone el obtener piezas circulares dobladas y engatilladas mecánicamente.

### 6.7.1 Engatillado mecánico

#### *Doblado mecánico*

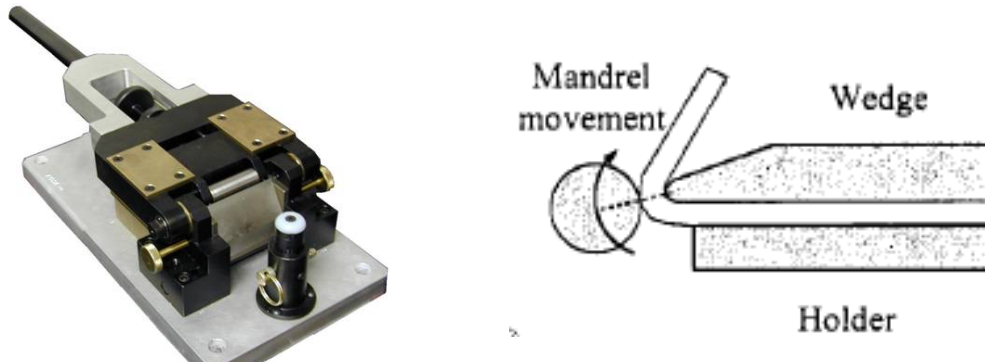
Para evitar posibles errores a la hora de doblar las piezas mecánicamente, fueron enviadas al centro tecnológico de Novelis Global Technology Centre situado en Ontario, Canadá. Este centro ha desarrollado un equipamiento para realizar ensayos de doblado (“wrap bend test”) semi guiados. Este equipo está en conformidad con la norma ASTM Standard E-290-97a sobre ensayos de doblado [AST97] y es utilizado para el estudio de las capacidades de doblado y engatillado de aleaciones de aluminio en chapa.

A continuación se detalla el procedimiento del ensayo de doblado seguido para doblar las probetas que posteriormente serán engatilladas.

La probeta de chapa plana es doblada sobre el radio de un mandrino con un rodillo que rota sobre ese mismo mandrino. En nuestro caso el radio del mandrino se fijó a 1,2mm, pero el ensayo tiene como propósito establecer el radio de doblado mínimo aceptable para cada material. Para ello la cara convexa resultante del ensayo es clasificada según el grado de daño sufrido durante la operación de doblado. Se fija el límite de daño aceptable y se va reduciendo el radio del mandrino hasta conseguir

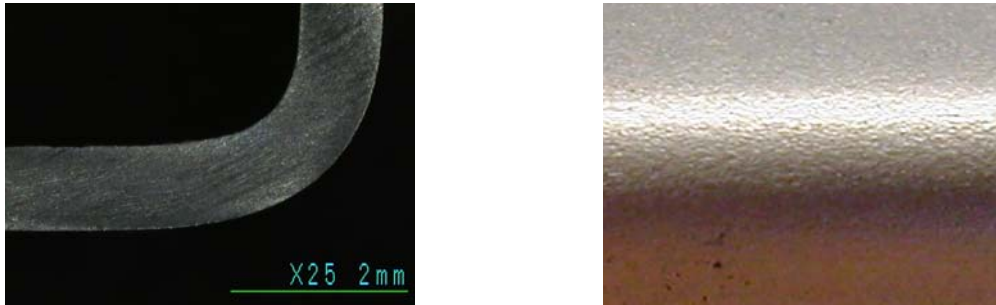
el ángulo de doblado deseado con ese grado de daño límite. Los resultados son expresados por el parámetro del radio de doblado dividido entre el espesor de la chapa.

Es un procedimiento que se utiliza para analizar la capacidad de doblado y engatillado de las distintas aleaciones de aluminio así que es un procedimiento muy válido y contrastado para este caso.



*Figura 6.93: Equipamiento para realizar ensayos de doblado semi guiados utilizado por el Novelis Global Technology Centre (izquierda) y sección de la zona de doblado (derecha [LIN06]).*

Se analizaron las probetas dobladas y se compararon con el patrón de daño presentado en la figura 4.14.



*Figura 6.94: Zona del radio de doblado de una de las probetas dobladas en el Novelis Global Technology Centre (izquierda) y superficie exterior generada en la zona del doblado (derecha).*

Se observa en la imagen de la derecha de la figura 6.94 que el daño en la superficie es de grado 1, por lo tanto aceptable.

#### *Pre-engatillado mecánico*

La operación de pre-engatillado es fundamental en el engatillado convencional mecánico. Resulta impensable obtener una calidad aceptable sin realizar esta operación antes de la del engatillado final por los métodos convencionales [LIV00].

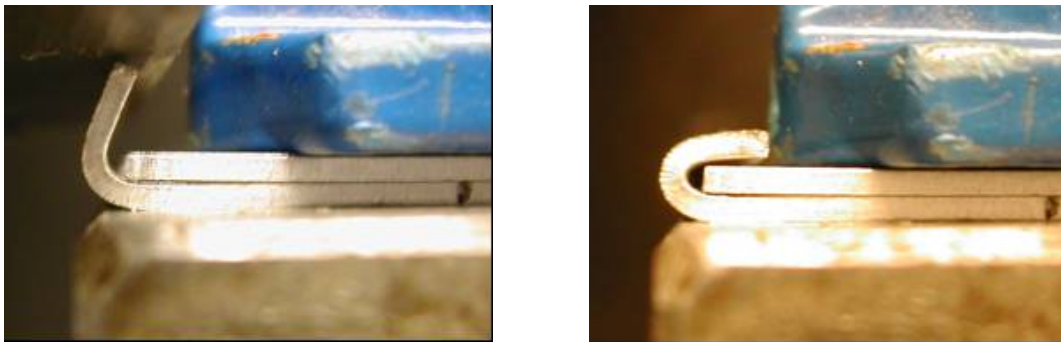
Para ello se dispuso de un útil amarrado a una maquina de ensayos mecánicos convencional SCHENK. Asimismo se amarraron la pieza exterior junto con el refuerzo interior dejando un GAP de 1,2 mm. Se colocó todo en posición y se hizo descender el útil de pre-engatillado a una velocidad de 1mm/segundo simulando el estado cuasi estático de deformación que se produce en el engatillado mecánico convencional.



*Figura 6.95: Operación de pre-engatillado mecánico convencional sobre las piezas previamente dobladas por el Novelis Global Technology Centre, Canadá. Estado inicial (izquierda) y estado final (derecha) del pre-engatillado mecánico convencional.*

#### *Engatillado mecánico*

Posteriormente se cambió el útil de pre-engatillado que posee un ángulo determinado por un útil de engatillado que tiene una superficie inferior plana (figura 6.96).



*Figura 6.96: Operación de engatillado mecánico convencional hasta conseguir la geometría modelo. Estado inicial (izquierda) y estado final (derecha) del engatillado mecánico convencional.*

#### *6.7.2 Engatillado por EMF*

##### *Doblado*

Las piezas utilizadas para el engatillado por EMF fueron dobladas exactamente igual que las piezas dobladas para el engatillado mecánico convencional en el Novelis Global Technology Centre.

### Engatillado

Una de las ventajas que presenta este estudio es la eliminación de la operación de pre-engatillado. Por lo tanto de la etapa de doblado se pasa directamente a la de engatillado final por EMF.

Se ajustó el solapamiento para la geometría modelo óptima recta. Este parámetro está recogido en la figura 6.48 del capítulo 6.3 y corresponde a un 5% de solapamiento. Se utilizó la bobina recta (figura 5.2) para realizar los experimentos.

#### 6.7.3 Comparación de resultados

Después de conseguir diversas muestras con cada uno de los procesos explicados se escogieron las más próximas a la geometría modelo para comparar los parámetros de salida.

#### Zona deformada

Se midió la zona deformada utilizando el programa informático ImagenJ.

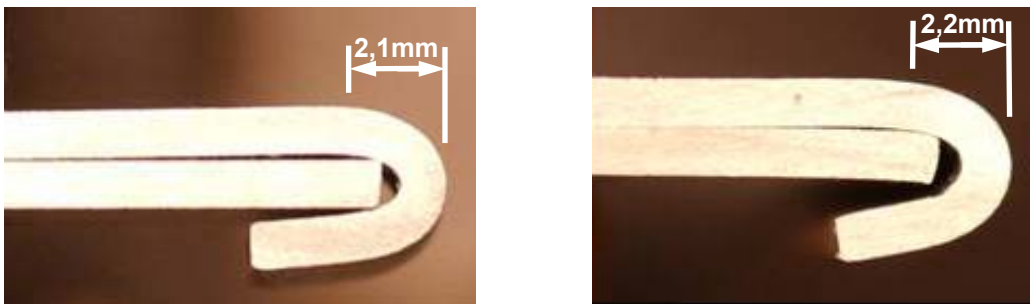


Figura 6.97: Valores de la zona deformada para una unión engatillada mecánicamente (izquierda) y una unión engatillada por EMF al 5% de solapamiento (derecha).

Se obtiene prácticamente el mismo valor de la zona deformada para ambos casos.

#### Grietas

Se analizaron las muestras en la cara exterior del extremo de la unión tal y como se explica en la figura 4.13 en busca de grietas y se compararon con el patrón de grietas explicado en la figura 4.14.

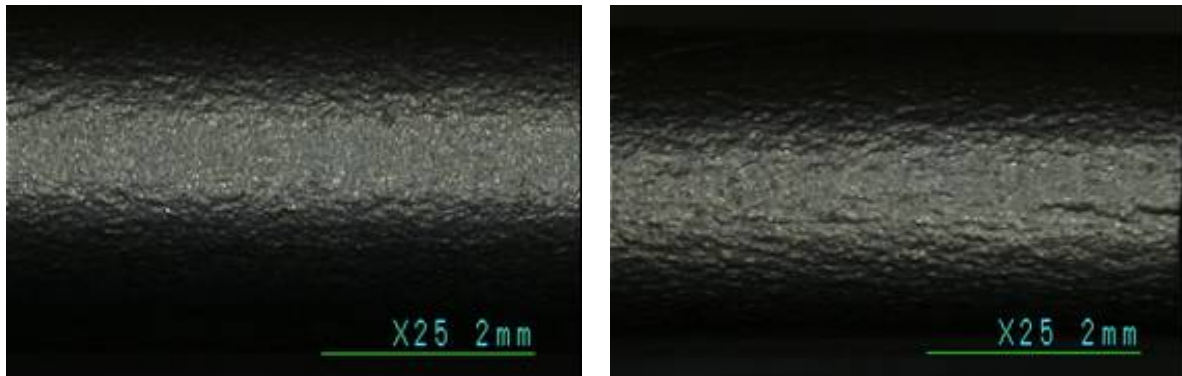


Figura 6.98: Muestras dobladas en el Novelis Global Technology Centre y engatilladas por EMF (izquierda) y mecánicamente (derecha).

Se observa un mayor grado de piel de naranja acompañado de un inicio de grieta en la probeta engatillada mecánicamente. La pieza obtenida por EMF es de grado 2: No hay grietas pero se acepta una fuerte piel de naranja, y la pieza engatillada mecánicamente entra dentro del grado 3: Líneas de comienzo de grieta (por ejemplo líneas de adelgazamiento localizado o estricción) ya que además de una fuerte piel de naranja existen líneas de comienzo de grieta en forma de estricción.

Para analizar esa diferencia más en profundidad se cortaron ambas muestras en sección y se realizaron unas micrografías. Esas micrografías revelan grietas en la pieza engatillada mecánicamente. Estas grietas aparecen tanto en la cara exterior como en la interior tal y como se puede ver en la figura 6.99. Por su parte, la muestra engatillada por EMF está libre de grietas.

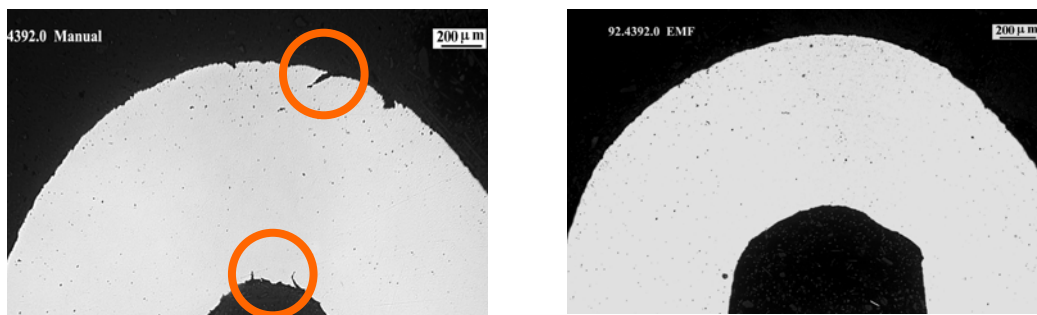


Figura 6.99: Extremo de uniones engatilladas mecánicamente (izquierda) y por EMF (derecha).

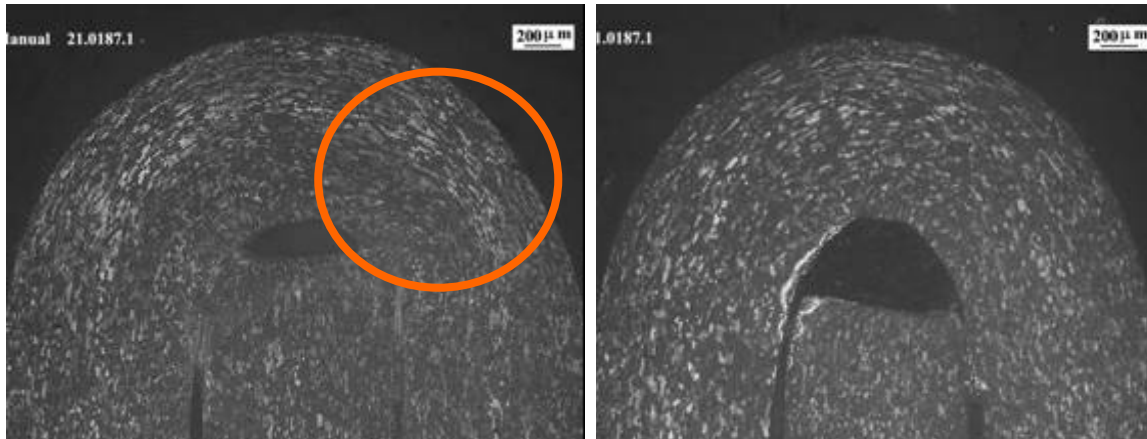
Los resultados que se desprenden de esta comparación son debidos a la manera en que se produce la deformación.

En el engatillado convencional la deformación está restringida a la zona del radio de doblado al tratarse de una deformación cuasi-estática. Sin embargo al engatillar por EMF la pestaña es “lanzada” y la deformación se distribuye en una zona mayor. Los efectos inerciales que aparecen en el EMF



debido a la alta velocidad de deformación retrasan la aparición de la estricción y a su vez crean más zonas de estricción distribuyendo la deformación, retrasando así la rotura y aumentando su límite de deformación como se corrobora en la bibliografía [SET06], [SET05b].

Las muestras fueron atacadas electrolíticamente y observadas en el microscopio para ver la distribución de la deformación en la microestructura.



*Figura 6.100: Muestra engatillada mecánicamente con una zona de concentración de deformaciones señalada (izquierda) y muestra engatillada por EMF con una deformación en los granos homogénea (derecha)*

En la figura 6.100 se puede observar como existe una zona en la que los granos están más deformados en la muestra engatillada mecánicamente. Sin embargo, la pieza engatillada por EMF presenta una deformación en los granos más homogénea sin zonas de concentración de deformaciones.

Otra explicación posible es que con el EMF la pieza exterior se dobla apoyándose para ello en el refuerzo interior y rotando sobre el mismo. Esto le da un radio de rotación mayor que a la pestaña doblada mecánicamente que simplemente es “aplastada” desde la posición de pre-engatillado hasta la de engatillado final. Esto hace que toda la deformación se concentre en el extremo de la unión y favorezca la aparición de grietas.

Con el EMF se consigue una unión libre de grietas aún teniendo una zona de deforma menor, porque la deformación no está tan localizada en el extremo de la unión como en el engatillado convencional sino que se distribuye en una zona mayor debido a los efectos inerciales de la alta velocidad de deformación.

### *Combado*

Se midieron esas mismas piezas con un perfilómetro confocal para observar si varía el combado al realizar el engatillado con una tecnología o con la otra. No se vio necesario medir el combado después de la operación de doblado ya que ambas piezas han sido dobladas exactamente igual. En

la figura 6.101 se presentan los valores de combado para las piezas engatilladas por EMF y mecánicamente.

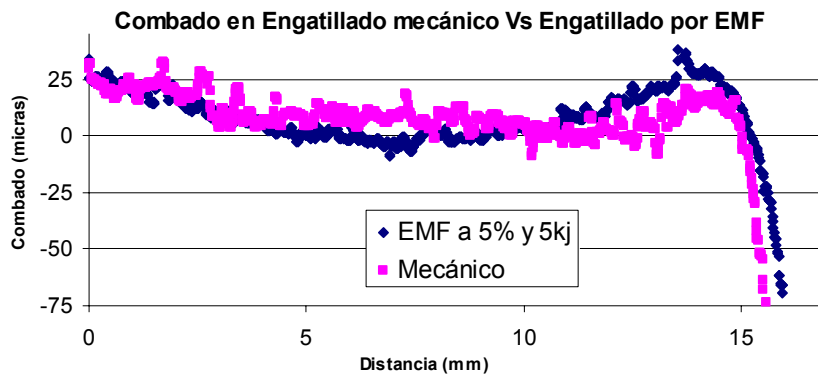


Figura 6.101: Combado para piezas engatilladas mecánicamente y por EMF.

Los valores máximos de combado para ambos casos son los siguientes:

- Engatillado mecánico (operación de pre-engatillado + engatillado): 23 micras
- Engatillado por EMF: 30 micras

Se obtiene un combado ligeramente mayor al engatillar por EMF que al engatillar mecánicamente. Sin embargo hay que tener en cuenta que los parámetros utilizados para el engatillado recto por EMF no han sido optimizados para minimizar el combado sino que han sido ajustados hasta conseguir una geometría modelo. Por lo que, ajustando otros parámetros, cabe la posibilidad de obtener una geometría modelo óptima con un valor de combado menor que el obtenido en este caso.

De todos modos la diferencia de combado entre ambas tecnologías no es muy relevante, aunque si existente.

### Microdurezas

Para analizar la influencia del EMF en el material después del engatillado se realizaron mediciones de microdureza sobre las piezas engatilladas por EMF y mecánicamente. Las mediciones se realizaron según la norma ASTM E384-08ae1 [AST08] utilizando los mismos parámetros de ensayo explicados en el estudio de microdurezas anterior realizado en el capítulo 6.2.3. En la tabla 6.15 se muestran las medias de los valores obtenidos en las mediciones realizadas en cada una de las zonas explicadas en la figura 6.102:

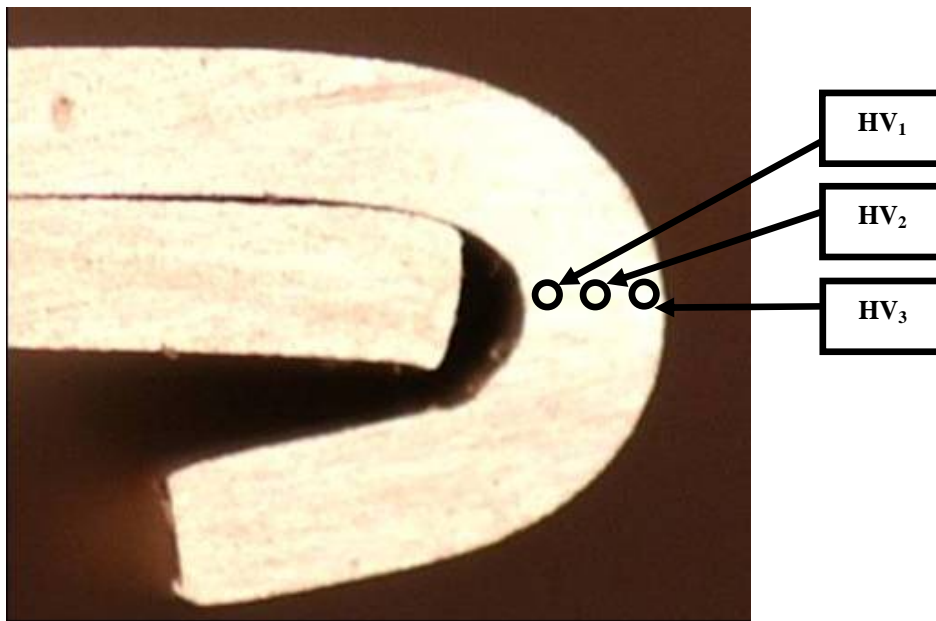


Figura 6.102: Sección del extremo de una unión engatillada donde se señalan con una circunferencia las zonas donde se midieron las microdurezas con su nomenclatura correspondiente.

A continuación se representan los valores en la tabla 6.15.

HV virgen≈~70		HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>
ANTES de engatillar		83,5	78,75	85,83
DESPUES de engatillar	Mecánicamente	88	82	86
	Por EMF	88	80	84

Tabla 6.15: Valores de microdureza antes de engatillar y después de engatillar mecánicamente y por EMF.

No se aprecia diferencia sustancial entre las mediciones realizadas sobre las probetas engatilladas por EMF y mecánicamente. El material del extremo de la unión que sufre la mayor deformación, se endurece igual al engatillarlo por EMF que mecánicamente. Por lo tanto la tecnología utilizada para el engatillado no influye en el endurecimiento del material.

#### 6.7.4 Conclusiones

La operación de engatillado por EMF endurece el material tanto como el engatillado mecánico. Por lo que el aumento de dureza que sufre el material en la operación de doblado por EMF (capítulo 6.2.3) es debido al impacto contra el troquel y no a la tecnología del EMF.

Se constata la poca conformabilidad de la aleación utilizada ya que engatillándola mecánicamente también aparecen grietas. Sin embargo se ha descartado la posibilidad de que dichas grietas hayan sido creadas por la tecnología del EMF. Es más, las muestras engatilladas por EMF presentan menos grietas que las engatilladas convencionalmente para un mismo valor de zona deformada. Estos resultados son debidos a la manera en que se produce la deformación. En el engatillado convencional la deformación está restringida a la zona del radio de doblado al tratarse de una deformación cuasi-estática.

Sin embargo al engatillar por EMF la pestaña es “lanzada” y la deformación se distribuye en una zona mayor produciendo así una deformación más homogénea. Los efectos inerciales que aparecen en el EMF debido a la alta velocidad de deformación retrasan la aparición de la estricción y a su vez crean más zonas de estricción distribuyendo la deformación. Esto hace que se retrase la rotura y aumente su límite de deformación como se corrobora en la bibliografía [SET06], [SET05b].

## **CAPITULO 7 - SIMULACION**



## 7 SIMULACION

Después de realizar la parte experimental de la tesis se observó la gran sensibilidad que existe entre las variables de entrada y los parámetros de salida. De esos experimentos se han extraído diversas conclusiones aplicables a geometrías sencillas como son la recta y la circular. El objetivo del estudio que se presenta a continuación sobre simulación es el de implementar las variables optimizadas con el saber hacer adquirido, en un método de simulación del proceso. Este método de simulación, una vez validado con los experimentos físicos del capítulo 6, servirá para establecer una metodología de simulación del engatillado por EMF. Esta metodología podrá ser utilizada para el diseño y optimización de bobinas para el engatillado de piezas reales más complejas.

Al igual que sucede con la mayoría de procesos de fabricación industriales, el engatillado también ha sido reproducido y estudiado utilizando diversos programas de elementos finitos para su mejor comprensión y análisis. El proceso de engatillado consta de una deformación muy local que debe ser discretizada en elementos de un tamaño pequeño (por debajo del espesor) para poder obtener los resultados deseados. Pero a su vez, esta deformación tan local y precisa, se produce en piezas de un tamaño que puede llegar a los dos metros de diámetro por lo que exige tiempos de cálculo elevados y la necesidad de hacer ciertas simplificaciones si se quiere simular la pieza completa. Por lo tanto se trata de un proceso complicado de reproducir con cierto grado de fiabilidad.

Por otra parte el EMF presenta sus propios problemas. Hoy por hoy, no hay en el mercado un programa comercial específico para simular el proceso del conformado electromagnético. De todos modos, son varios los grupos que han trabajado y están trabajando en esta materia con el objetivo de poner en el mercado un software para tal uso [ELA03], como se verá más adelante en este capítulo. La principal razón para que todavía no haya un programa que simule el EMF reside en que el proceso del conformado electromagnético es un proceso complicado en el que la interacción entre el campo electromagnético y el mecánico dificulta su simulación.

En este capítulo se recoge el esfuerzo llevado a cabo para realizar simulaciones numéricas por elementos finitos del engatillado por EMF. En la primera parte se resumen los aspectos más importantes del estado del arte de las simulaciones realizadas en engatillado convencional y en EMF.

En la segunda parte se explica el trabajo realizado modelizando el proceso con diversos programas de simulación para finalmente extraer las conclusiones.

Conviene señalar que no existe ningún estudio publicado a día de hoy sobre simulación de engatillado por EMF.

## 7.1 Estado del arte de la simulación del EMF y del engatillado

### 7.1.1 Simulación numérica del proceso de EMF

Las simulaciones permiten predecir la evolución de la pieza durante su conformado prediciendo valores como las deformaciones, las tensiones, la forma final de la pieza o los lugares donde pueden aparecer defectos. Sirve para determinar el valor de los parámetros que optimizan tanto la calidad final de las piezas como del proceso de una manera rápida y eficaz.

Hoy por hoy, no hay en el mercado un programa comercial específico para simular el proceso del conformado electromagnético. Son varios los grupos que han trabajado y están trabajando en esta materia con el objetivo de poner en el mercado un software para tal uso [ELA03]. La principal razón de que todavía no haya un programa que simule de forma eficiente el EMF reside en que se trata de un proceso complicado en el que la interacción entre el campo electromagnético y el mecánico dificulta su simulación.

El objetivo de este capítulo es identificar la evolución de la modelización del EMF a lo largo de la historia, así como identificar las diferentes estrategias posibles llevadas a cabo para su simulación numérica.

#### *Simulación del EMF a lo largo de la historia*

Como se ha comentado anteriormente, el proceso de EMF comenzó a emplearse a principios de la década de los 60, durante la carrera espacial. Sin embargo, en los comienzos de esta tecnología, la dinámica fue modelada de manera rudimentaria. Los primeros trabajos, atendiendo a Fenton et al. [FEN98] fueron realizados por Furth et al. [FUR56], [FUR57], donde se describían las ecuaciones físicas básicas del proceso. El trabajo posterior realizado por Birdsall et al. [BIR61] describe el proceso de conformado de manera analítica.

Baines et al. [BAI66] consideraron tanto la bobina como la pieza como el circuito eléctrico de un transformador, siendo la pieza una bobina en cortocircuito acoplado con la bobina. En este trabajo, consideran la inductancia mutua constante durante el tiempo.

Los trabajos de Al-Hassani et al. [ALH67] resumen el estado del arte de la modelización del conformado electromagnético hasta la década de los 70 y en su modelo emplean el método de circuito eléctrico equivalente anteriormente explicado, para asumir una distribución de corrientes inducidas y calcular de este modo la dinámica del material. Jablonski et al. demostraron que este método del circuito equivalente era efectivo para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales con respecto al tiempo [JAB78].



Este primer esfuerzo en describir de manera analítica el proceso se ve frenado por la complicación que supone su resolución. Por esta razón, es necesario realizar algunas simplificaciones y resolver las ecuaciones de manera numérica. A medida que el poder computacional de los ordenadores ha ido en aumento, los investigadores han sido capaces de implementar nuevos algoritmos de cálculo y resolver los modelos numéricamente.

En los años 80, Takatsu et al. desarrollaron un modelo axisimétrico para resolver el conformado de un disco circular plano mediante una bobina multiespiral plana [TAK88].

En la siguiente década, Fenton y Daehn [FEN98] resolvieron el problema numéricamente empleando el código CALE, que es un código escrito en lenguaje C hidrodinámico ALE (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*) bidimensional. A continuación, en el año 2000, estudiaron la simulación con el código GEM (*Gridless Engine for Multiphysics*) [PAN00], que aunque prometía ser un método adecuado para este tipo de simulaciones, no ha tenido un eco demasiado grande. El código GEM es una técnica tridimensional que no emplea malla y está basado en el método *smooth-particle-hydrodynamics* (SPH) que fue inventado en 1977 para simular fenómenos astrofísicos no axisimétricos como los choques entre cuerpos planetarios [PAN00].

Más recientemente, algunos investigadores se han centrado en el acoplamiento de los campos empleando programas de elementos finitos comerciales [KLE06], [MAM04], [OLI05], mientras otros han desarrollado su propio programa de simulación [STI06].

Por su parte desde Mondragón Unibersitate, Ulacia et al están trabajando en desarrollar un método acoplado de simulación numérica del proceso de EMF. En un primer trabajo, mostraron el acoplamiento entre los campos electromagnético y mecánico utilizando el método de los elementos finitos para un caso 2D [ULA07]. El mayor inconveniente de este estudio radicaba en el remallado entre las diferentes etapas o *time steps* de acoplamiento. Más adelante, para hacer frente a este problema, han empleado el método de los elementos de contorno para el cálculo electromagnético, con lo que el coste computacional del remallado se ha disminuido pudiendo, de este modo, acometer simulaciones 3D [ULA08a]. Asimismo, han mostrado la influencia del método de acoplamiento en los resultados obtenidos mediante simulación numérica, así como la importancia del cálculo térmico [ULA08b]. Recientemente, han abordado el estudio del conformado de magnesio por EMF [ULA09a], incluso a diferentes temperaturas [ULA09b].

#### *Diferentes estrategias de simulación numérica del proceso de EMF*

Existen tres estrategias básicas a la hora de abordar la simulación por FEM del problema acoplado magneto-estructural [MAM06].

- Acoplamiento directo (*Direct coupling*): Los efectos de los campos acoplados son calculados en cada elemento (todos los grados de libertad son resueltos en el nivel de la matriz de coeficientes del análisis de elementos finitos). La desventaja principal de este procedimiento es la dificultad para que la solución converja, debido a que se resuelve de manera implícita.

- Acoplamiento secuencial (*Sequential coupling*): en cada intervalo de tiempo son calculadas las fuerzas de Lorentz inducidas en la pieza gracias al modelo electromagnético y entonces, estas fuerzas son transferidas automáticamente como carga de entrada en el modelo mecánico. En el análisis mecánico se calcula la deformación que sufre la pieza y se actualiza la geometría del modelo electromagnético. Se repite este proceso iterativo hasta que las fuerzas inducidas en la pieza son muy pequeñas, momento a partir del cual sólo se resuelve el cálculo mecánico. Esta estrategia viene siendo la más empleada y la que obtiene los resultados más precisos. En la siguiente figura 7.1 se puede ver este bucle iterativo de manera visual:

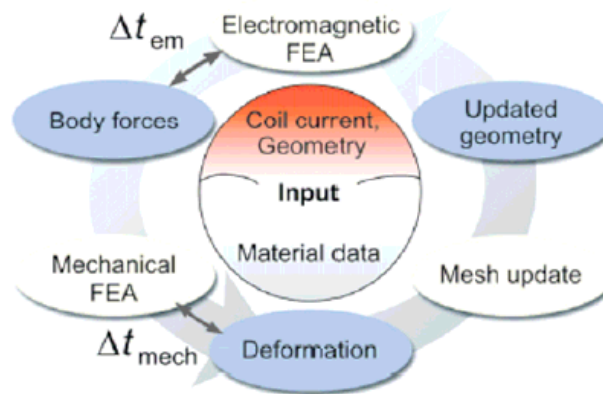


Figura: 7.1. Estrategia de acoplamiento secuencial [KLE06].

- Acoplamiento débil (*Loose Coupling*): Inicialmente, en el modelo electromagnético se calculan, numérica o analíticamente, las fuerzas de Lorentz que actúan en la pieza sin tener en cuenta la deformación de la misma. Entonces, estas fuerzas son transferidas como datos de entrada al modelo mecánico para la simulación de la deformación de la pieza y se ejecuta esta simulación en un único paso. Este modelo descuida la influencia de la deformación de la pieza en la evolución del campo magnético, es decir, se desprecia el cambio de los valores de las fuerzas debido al cambio de la geometría. De modo que sólo es aplicable en deformaciones pequeñas y pulsos de presiones magnéticas grandes. Este método, aunque sea menos preciso, es el más flexible, ya que necesita modelos menos complicados que pueden ser resueltos con un menor coste computacional.

Dentro de las tres estrategias generales de resolución del problema, cada análisis (electromagnético o mecánico) puede ser abordado de diferentes formas. Por ejemplo, el análisis electromagnético se puede resolver considerando un régimen transitorio, armónico o estacionario, y la resolución mecánica se puede llevar a cabo de manera implícita o explícita. Estas particularidades son fruto de las asunciones que se realizan en cada caso dando lugar a diferentes resultados. En el trabajo [QUI06] se recogen de manera más amplia algunos ejemplos de las diversas estrategias explicadas.

Una vez vistas las diferentes estrategias de simulación, en la tabla 7.1 de la siguiente página se recogen las estrategias seguidas para la simulación del proceso por diferentes investigadores.

Tal y como se aprecia en esta tabla 7.1, en la actualidad, mientras varios investigadores siguen trabajando en la simulación del proceso, la mayoría asumen una distribución de la presión magnética en la pieza, la calculan analíticamente y simulan su deformación. Mientras estos investigadores se han centrado en el modelado y simulación del acoplamiento entre el modelo electromagnético y mecánico, otros investigadores se han esforzado en adaptar los modelos de material a las particularidades del proceso [SVE05].

Estrategias empleadas para la simulación del proceso de EMF

Institución	Estrategia de simulación	Autor	Software empleado		Observaciones	
			Electromagnetismo	Mecánico		
<i>Universität Dortmund (ALEMANIA)</i>	Sequential	[BEI03]	Transitorio MSC.EMAS	Armónico FEMM	MSC.MARC	--
		[KLE 06]	MSC.EMAS		FEAP	Diferente simu de la parte mecánica para reducir tiempo y comp. result. Código de FEM propio que pretende disminuir el tiempo de calculo
	Direct Coupling	[UNG05]	SOFAR			<a href="http://www.mathematik.uni-dortmund.de/lex/research/software/sofar/index.html">http://www.mathematik.uni-dortmund.de/lex/research/software/sofar/index.html</a>
<i>University of Waterloo (CANADA)</i>	Loose Coupling	[IMB05]	Análiticamente		LS-DYNA	Aplica una distribución de presiones y calcula la deformación.
	Sequential Coupling	[OLI02] [OLI05]	ANSYS/EMAG		ANSYS-LS-DYNA	Acople secuencial interesante entre fuerzas y deformación cada tiempo
<i>National Technical University of Athens (GRECIA)</i>	Loose Coupling	[MAM04b] [MAM05]	ANSYS/EMAG	Free ANSYS	Impact ANSYS-LS-DYNA	Calculan el la presión magnética mediante Ansys y la deformación con Ansys cuando no hay contacto y LS-Dyna cuando hay matriz.
	Direct Coupling	[MAM05]	ANSYS - Multiphysics			Compresión libre de tubo en 3D
<i>Ohio State University (USA)</i>	Direct Coupling	[FEN98]	CALE			Código hidrodinámico 2D
		[PAN00]	GEM			No emplea malla, sino partículas. Logra deformaciones mayores a la realidad
<i>Chemnitz University Fraunhofer Institute IWU (ALEMANIA)</i>	Finite Network Method	[FAR06]	FNM vs ANSYS/EMAG		(No calculan)	Utilizan otro método en el que no se emplea malla por lo que es más rápido y consiguen resultados aceptables comparándolos con ANSYS/EMAG
<i>Harbin Institute of Technology (CHINA)</i>	Loose Coupling	[WAN06]	Análiticamente		ADINA	Calculan deformaciones
		[LI04] [YU05a]	ANSYS/EMAG		(No calculan)	Calculan $\vec{B}$ para ver efecto del concentrador y la longitud del tubo
		[YU05b]	ANSYS/EMAG		LS-DYNA	Calcula la fuerza a partir de $\vec{B}$ y con ello las deformaciones
<i>Daimler Chrysler (ALEMANIA)</i>	Sequential Coupling	[KAR05]	ANSYS - Multiphysics			Acoplan Electromagnético-Térmico-Estructural en simulación de tubos
<i>Boeing (USA)</i>	Loose Coupling	[MAH96]	Análiticamente		DYNA2D	Concluyen que los parámetros más importantes de proceso son el pico de presión y el periodo del pulso

Tabla 7.1: Diferentes ejemplos de estrategias de simulación del EMF [QUI06].

### 7.1.2 Simulación numérica del proceso de engatillado

Los esfuerzos de las empresas y los investigadores en el campo de la simulación del engatillado han ido encaminados a desarrollar una herramienta de simulación que les permita conocer la calidad y dimensión final de la unión engatillada antes de su fabricación. El principal objetivo de estos estudios ha sido el de reducir los tiempos de diseño y puesta a punto de los útiles de engatillado. A continuación se presenta un estado del arte sobre simulación del engatillado donde se recogen las conclusiones más relevantes de los distintos investigadores.

En 1986, en la conferencia IDDRG de Colonia, Hishida y Sato [HIS86] presentaron un artículo sobre el análisis del proceso del engatillado mediante el método de los elementos finitos. Usaron un modelo de elementos de deformación plana para simular el proceso y concluyeron que el endurecimiento del material, el radio de doblado de la pieza exterior, la presión de engatillado y la fricción tenían fuertes efectos en la calidad del engatillado.

En 1998, Livatyali presentó su tesis doctoral en la The Ohio State University [LIV98]. En su estudio presentó resultados de experimentos y simulaciones de doblado y engatillado de piezas planas con pestañas rectas y curvas. Las simulaciones se realizaron con tres códigos implícitos: DEFORM-2D, DEFORM-3D y ABAQUS Standard, y con el código explícito Pam-Stamp. En las simulaciones implícitas se usaron diferentes tipos de elementos sólidos, incluyendo elementos de deformación plana y axisimétricos bidimensionales y tridimensionales. En las simulaciones explícitas se usaron elementos placa. En este estudio el contacto entre los paneles exteriores e interiores originó problemas en las simulaciones implícitas. Se midieron diferentes parámetros en los experimentos, tales como enrollamiento, recuperación elástica y fuerzas requeridas. Livatyali concluye que los códigos implícitos y los elementos sólidos tienen mejor concordancia con los resultados experimentales que el código explícito y los elementos placa. Por otra parte el código explícito junto con los elementos placa es más fácil de usar en un entorno industrial, ya que tiene menos problemas de convergencia que el código implícito. Se concluye también que por el momento no hay disponible un método que pueda simular el doblado y engatillado de piezas industriales tridimensionales.

Zhang [ZHA01] propuso un análisis de elementos finitos puramente implícito para el engatillado de un acero AKDQ. Desarrollaron posiciones finales del útil de pre-engatillado y de engatillado basándose en la minimización del defecto de combado equivalente final. Asimismo, Zhang [ZHA03] llevó a cabo una integración de una técnica de modelado de respuesta con un “orthogonal latin hypercube sampling”, para analizar y optimizar procesos de engatillado de acero.

En 2002, Svensson y Mattiasson [SVE02] publicaron un estudio de elementos finitos explícito sobre el engatillado de un capó de automóvil usando un modelo de elementos placa. Ellos investigaron el comportamiento del enrollamiento de la línea de engatillado ignorando las etapas previas de estampación y corte. Sin embargo, aunque el enrollamiento puede ser bien reproducido por el método explícito de elementos finitos, los defectos de distorsión y el combado no pueden ser reproducidos por el modelo sin un análisis de recuperación elástica. Es ampliamente reconocido que el uso de elementos placa en las simulaciones de engatillado es cuestionable ya que el radio o zona deformada

del extremo de la unión engatillada es similar al espesor de la chapa, lo que viola los principios básicos de la teoría de los elementos placa. Sin embargo, según Svensson [SVE98] la comparación de elementos sólidos y elementos placa usando LS-DYNA con ensayos experimentales dio como resultado que el modelo de elementos placa sorprendentemente predecía mejor la realidad. Por otra parte, a medida que el tamaño del modelo aumenta, los elementos placa se convierten prácticamente en la única opción debido al coste computacional que supondría la utilización de elementos sólidos con geometrías grandes.

Otro trabajo de H. Livatyali [LIV02] muestra las predicciones por el método de elementos finitos para unos ensayos de doblado recto y compara los resultados con las mediciones experimentales. Además investiga mediante métodos de elementos finitos el doblado con acuñado para reducir la recuperación elástica y tener un mejor control dimensional de los procesos de doblado y engatillado.

Los objetivos específicos de las simulaciones son desarrollar un modelo de elementos finitos y una metodología de simulación precisa y eficaz, que sea capaz de predecir deformaciones en el contorno de la unión engatillada, tensiones, recuperación elástica y esfuerzos sobre los útiles.

Dos códigos comerciales de elementos finitos fueron usados: DEFORM y ABAQUS Standard, ambos implícitos. Los resultados obtenidos con ambos programas fueron los siguientes:

La recuperación elástica prevista por ambos, DEFORM y ABAQUS Standard, coincide muy bien con las medidas experimentales

Ambos, ABAQUS Standard y DEFORM, sobreestimaron los esfuerzos sobre los útiles.

En líneas generales las predicciones de esfuerzos de conformado con ABAQUS Standard fueron más cercanas a los resultados experimentales que las de DEFORM

Ambos, DEFORM Y ABAQUS Standard, pueden usarse para simular procesos de engatillado recto plano bajo la hipótesis de deformación plana. Mientras que ABAQUS da ligeramente mejores resultados, DEFORM tiene la ventaja de un interfaz gráfico fácil de usar y potentes capacidades de pre y post procesado.

Un trabajo de S. Golovashchenko [GOL05b] presenta el desarrollo de un nuevo proceso de doblado basado en la idea de redistribuir las deformaciones plásticas a través de un área más grande, metiendo metal adicional en la zona del radio de doblado y creando una compresión axial adicional. De este modo la zona del radio de doblado tiene un menor grado de deformación a la hora de ser engatillado. Se han llevado a cabo simulaciones numéricas con un código de elementos finitos sólidos y esquema de integración explícito. La interacción de contacto entre la chapa y el útil se ha simulado basándose en una formulación suave de contacto. Se ha asumido la hipótesis de deformación plana.

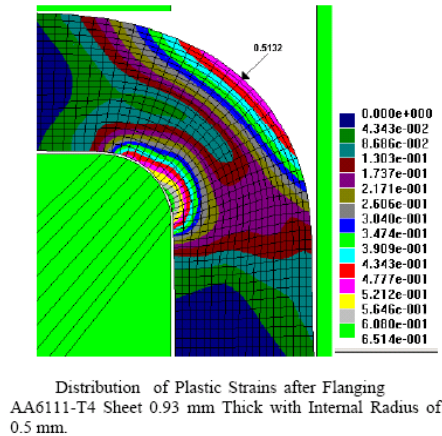


Figura 7.2: Nueva redistribución de la deformación en la zona de doblado para aleaciones de aluminio [GOL05b].

En un estudio presentado por E.H. Atzema [ATZ98] se ha desarrollado un modelo numérico con el software de elementos finitos DiekA, desarrollado en la Universidad de Twente. El modelo se ha usado para estudiar el enrollamiento en función del radio y de la altura de la pestaña.

Los mejores resultados se han conseguido omitiendo el panel interior durante el pre-engatillado. El refinamiento local de la malla para obtener una buena zona de contacto de conformado es primordial para obtener resultados realistas.

El enrollamiento puede predecirse aceptablemente bien usando herramientas rígidas y un algoritmo “penalty” para el contacto. El enrollamiento disminuye apreciablemente en los contornos de la unión engatillada curvos ya sea con reducción o estiramiento de pestaña. Una menor altura de pestaña produce un menor enrollamiento. En la realidad los bordes curvos suelen producir problemas severos de arrugas.

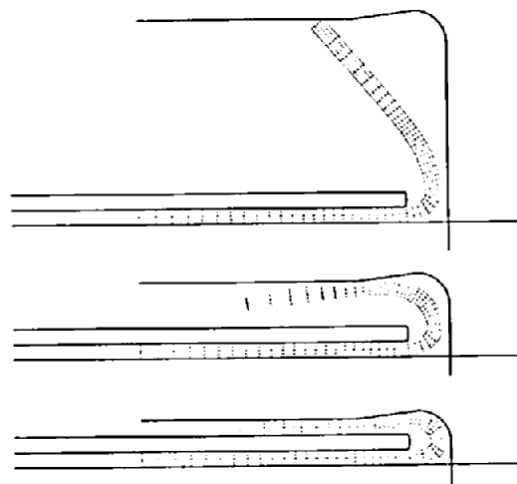


Figura 7.3: Diferentes estados de la simulación de un engatillado con el software DiekA [ATZ98].

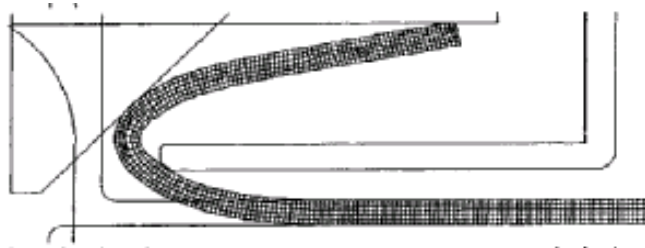
El modelo utilizado muestra una diferencia de deformación plástica entre una unión plana (“flat hem”) y una tipo gota (“rope hem”). El modelo no proporciona ninguna indicación cuantitativa de ruptura. Para ello sería necesario introducir en el modelo un modelo de daño.

En otro trabajo de H. Livatyali [LIV00] se ha estudiado el doblado y engatillado de un tramo recto y plano con refuerzo interior. Se han determinado los principales parámetros de proceso del engatillado recto, así como las relaciones entre dichos parámetros y algunos defectos típicos. Se han analizado, experimentalmente y mediante simulación, posibles modificaciones de diseño de proceso y herramientas, buscando mejorar la calidad del engatillado. Se ha usado el programa DEFORM para las operaciones de doblado y engatillado, incluyendo la recuperación elástica, y se ha comparado con resultados experimentales. Los resultados de los experimentos y las simulaciones se han resumido en forma de líneas de tendencia para los ingenieros de diseño de proceso.

En simulaciones preliminares se usaron el código dinámico explícito PamStamp 3D y el código implícito DEFORM 2D. PamStamp con elementos placa no fue capaz de reproducir con precisión las operaciones de doblado y engatillado, principalmente por dos motivos:

El ratio Radio de doblado/Espesor es demasiado pequeño para modelizar con elementos placa

El método explícito dinámico no es preciso en casos de curvado libre (sin estiramiento), como son el doblado y el engatillado.



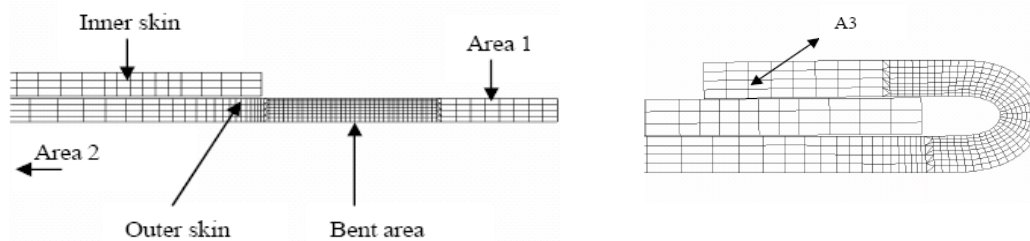
*Figura 7.4: Simulación de un engatillado utilizando elementos sólidos 2D con el código implícito DEFORM 2D [LIV00]*

Esto demostraría que no es posible usar el mismo tipo de técnica de elementos finitos para estampación (donde sí hay estiramiento) que para doblado y engatillado. Así, para doblado y engatillado es necesario un método que pueda modelizar efectos de espesor, como elementos sólidos 2D que proporcionan programas comerciales como DEFORM y ABAQUS. En este trabajo se usó DEFORM, que no dio especiales dificultades de convergencia.

En el estudio presentado por S. Thuilier [THU05] se presenta una simulación numérica 2D de un proceso de engatillado consistente en tres etapas: doblado, pre-engatillado y engatillado. Entre operación y operación hay recuperación elástica. Este estudio investiga la influencia de la ley constitutiva en las curvas fuerza-desplazamiento así como en la geometría final del engatillado. Se han considerado tres leyes de endurecimiento: isotrópico, cinemático y mixto, y dos criterios de fluencia: Von Mises y Hill'48.



Las simulaciones se han llevado a cabo con ABAQUS. La longitud sobre la que la chapa se curva es habitualmente muy alta comparada con la longitud de la pestaña (ratio alrededor de 50) y, por lo tanto, se han considerado elementos de deformación plana. La deformación está muy localizada en el área de curvado, usándose una malla no uniforme. La pieza exterior se ha mallado usando elementos cuadrangulares con interpolación cuadrática. Se han dispuesto 8 capas de elementos a través del espesor, dentro de la zona de curvado, con un tamaño no uniforme de los elementos a lo largo de la dirección del espesor. El tamaño de elemento decrece cerca de la superficie interior de la chapa exterior. El número de elementos en el espesor decrece gradualmente lejos del área de curvado. Hay 4 capas en el área 1 y dos capas en el área 2, ubicada en el otro lado de la chapa. El refuerzo interior está mallado también con elementos de 8 nodos y hay tres capas de elementos a través del espesor. La malla está ligeramente refinada en el área donde la pieza exterior entra en contacto durante la etapa final.



*Figura 7.5: Malla utilizada por S. Thuilier [THU05] usando elementos cuadrangulares con interpolación cuadrática y disminuyendo el tamaño de los mismos en la zona del radio de doblado antes del engatillado (izquierda) y después del engatillado (derecha).*

Se ha tomado un coeficiente de fricción de Coulomb de 0,12 para todos los pares de contacto, excepto el contacto entre la superficie exterior de la pieza exterior y el punzón de pre-engatillado y engatillado, en el que se ha subido hasta 0,17. Las condiciones de contorno son tales que los nodos al extremo izquierdo de la chapa son fijados tanto para el refuerzo interior como para la pieza exterior.

Los resultados muestran que cualquiera que sea la ley de endurecimiento, en el caso del criterio de fluencia isotrópico, las curvas esfuerzo-desplazamiento son muy similares. Se observa en general que no hay una gran influencia del modelo constitutivo en la geometría final.

En PSA Peugeot Citroën usan un código dinámico explícito y elementos placa para llevar a cabo simulaciones tridimensionales de engatillado en un tiempo razonable. En este trabajo [LAN00] se comparan satisfactoriamente resultados de simulaciones realizadas con formulación explícita-elementos placa frente a simulaciones realizadas con formulación implícita-elementos sólidos.

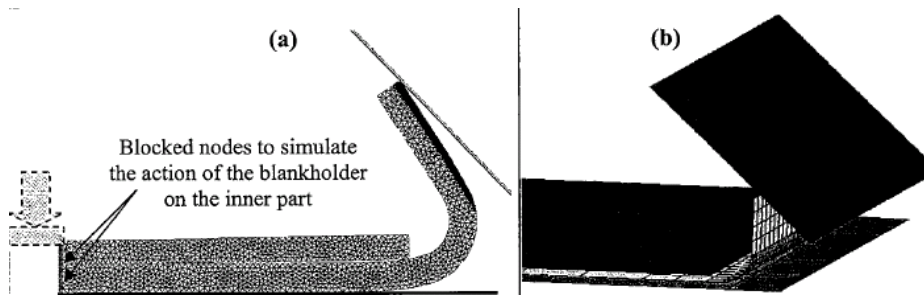


Figura 7.6: Operación de pre-engatillado para piezas malladas con elementos sólidos en FORGE2® (izquierda) y con elementos placa en OPTRIS (derecha) [LAN00].

Asimismo, los resultados de las simulaciones se comparan en términos de enrollamiento con ensayos experimentales sobre paneles rectos de un aluminio 5754 y un acero E220 BH. Se investiga el efecto del modelo de material, comparando los resultados del modelo de endurecimiento isotrópico, con los del modelo de endurecimiento cinemático, que tiene en cuenta el efecto Bauschinger durante el engatillado.

La introducción del endurecimiento cinemático en las simulaciones produce significativas mejoras en términos de predicción del enrollamiento. El efecto Bauschinger observado en la simulación del engatillado ha demostrado tener una gran influencia en la predicción de la geometría final. La influencia de la ley del material a altas deformaciones también se ha investigado pero ha demostrado tener un efecto sobre los resultados mucho menor que el endurecimiento cinemático.

En 2006 C. Lange presentó su tesis doctoral sobre engatillado [LAN06] en la que presentó un estudio con experimentos físicos y de simulación. La tesis consta de varias partes. Al principio hace una serie de ensayos para caracterizar los aceros y aluminios que utiliza a tracción, microdureza, flexión, doblado y engatillado además de aspectos tribológicos y reológicos.

Después realiza los experimentos físicos con varias geometrías y posteriormente las simulaciones usando diferentes códigos. Primero con OPTRIS v6.1 y elementos placa y posteriormente con el código FORGE2® y elementos sólidos.

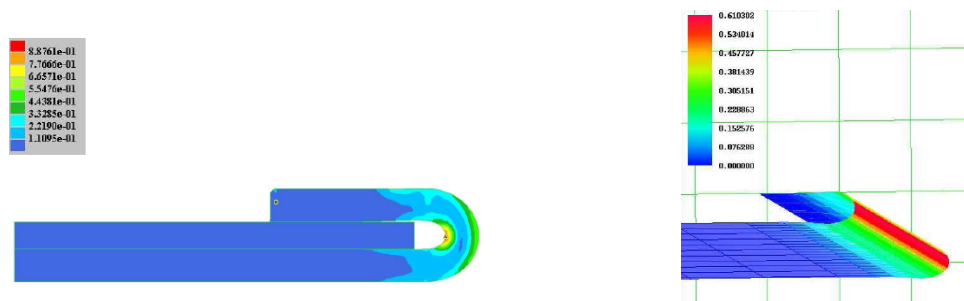


Figura 7.7: Deformación plástica equivalente calculada con FORGE2D® (izquierda) y con OPTRIS V6.1 (derecha) para el engatillado final [LAN06].

Concluye en que la caracterización del material para conocer sus leyes de deformación, así como sus parámetros tribológicos ayudan a obtener unos resultados de las simulaciones más cercanos a los reales. Los datos reológicos introducidos predicen bien el enrollamiento pero no el combado, que es causado por la recuperación elástica del material. También concluye en que es importante simular todas las etapas del engatillado, desde el doblado inicial hasta el engatillado final.

Por su parte, M. Murata [MUR02] examina, por medio de simulación FEM 3D elasto-plástica, el mecanismo y características del proceso de engatillado: distribución de deformaciones, precisión de los perfiles, recuperación elástica y esfuerzos de conformado. El material es el aluminio A6063 y el espesor de 1 mm. Se ha usado el programa LS-DYNA con elementos sólidos de 8 nodos. El número total de nodos es 64.224 y el de elementos 43.082. El número de nodos de la chapa es de 51.224 y el de elementos es de 34.320, teniendo tres elementos en el espesor

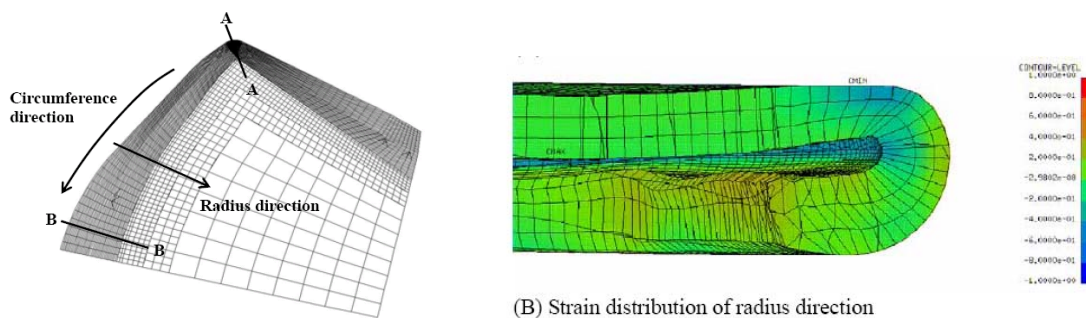


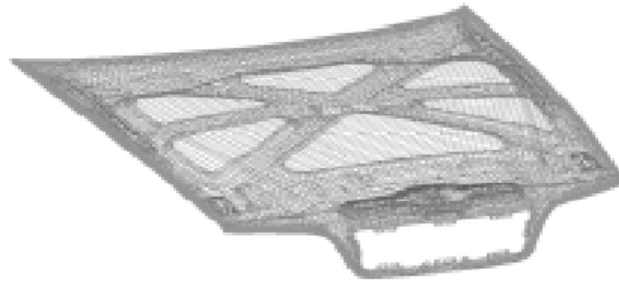
Figura 7.8: Geometría 3D simulada (izquierda) y sección del extremo (derecha) [MUR02].

Las conclusiones del estudio indican que:

- La tensión y la deformación presentan valores máximos en el extremo de la unión engatillada
- Apenas quedan tensiones residuales después del engatillado
- Las tensiones y deformaciones aparecen principalmente en la pieza engatillada
- El mayor defecto de combado se produce en la zona de la pieza con un diámetro exterior menor y es del orden de 0,15 a 0,05mm

M. Sigvant presentó su tesis doctoral sobre engatillado por la Universidad de Goteborg [SIG03]. La primera mitad de esta tesis es una investigación del orden de magnitud de los errores que resultan de usar elementos placa en la simulación por elementos finitos del proceso de engatillado. Para estimar estos errores, se ha analizado un modelo de elementos finitos bidimensional de una sección transversal de una pieza recta usando elementos sólidos y elementos placa. Los resultados de estos modelos se comparan entre sí y a su vez con datos experimentales. El modelo de elementos sólidos ha usado una nueva implementación del modelo de material Barlat'91. Esta implementación asume condiciones de deformación plana y anisotropía planar; también usa un algoritmo de integración iterativo Backward-Euler implementado en el código de elementos finitos LS-DYNA.

La segunda mitad de la tesis está dedicada a simulaciones tridimensionales del engatillado de un capó de automóvil. Se han usado dos versiones del código explícito de elementos finitos LS-DYNA y cinco tipos de elementos placa. También se ha estudiado las influencias sobre el enrollamiento de los adhesivos, anisotropía y pre-deformación uniforme. Los resultados de la simulación de una operación previa de estampación fueron introducidos como datos de partida en las simulaciones de doblado y engatillado para estudiar la influencia del proceso de estampación del panel exterior en el enrollamiento.



*Figura 7.9: Capó de automóvil simulado por Sigvant [SIG03] con elementos placa.*

En todos los modelos de elementos finitos de esta tesis los útiles fueron modelizados con elementos placa y considerados cuerpos infinitamente rígidos. Los desplazamientos de los aceros móviles fueron prescritos; para reducir el tiempo de simulación, las velocidades de los útiles en las simulaciones fueron más altas que las velocidades reales en los experimentos. Los contactos entre superficies fueron modelizados utilizando un método “penalty”. Se simularon ambas operaciones de doblado y engatillado, ya que estudios previos demostraron que la operación previa de doblado tiene una gran influencia en la operación de engatillado.

Las principales conclusiones de esta tesis pueden resumirse como sigue:

- Los elementos placa son aplicables en las simulaciones por elementos finitos de engatillado, a pesar de que el radio de doblado sea del mismo orden de magnitud que el espesor de la chapa.
- Los resultados de las simulaciones por elementos finitos bidimensionales muestran buena coincidencia con los datos experimentales. El enrollamiento previsto por las simulaciones es más cercano a los datos experimentales que las fuerzas previstas.
- El enrollamiento previsto por las simulaciones tridimensionales de todas las etapas del proceso es muy similar al enrollamiento medido en piezas industriales.
- La fricción influye sobre todo en el enrollamiento y en las fuerzas de apoyo, es decir, la fuerza vertical durante el pre-engatillado y la fuerza horizontal durante el engatillado final. Las condiciones de fricción son muy complicadas, como queda demostrado tanto en las simulaciones como en los experimentos.

- Los parámetros de material influyen mayormente en las otras fuerzas, es decir, la fuerza horizontal durante el pre-engatillado y la fuerza vertical durante el engatillado final. Las simulaciones y los experimentos muestran que el tipo de anisotropía (normal o plana), la curva tensión-deformación (ensayo de tracción extrapolado o ensayo de cortadura), el modelo constitutivo (Hill' 48 o Barlat' 91), y los efectos de la velocidad de deformación, todos ellos influyen en la magnitud de las fuerzas.

Un estudio presentado por G. Lin [LIN04] resume los procedimientos y resultados de una serie de simulaciones numéricas tridimensionales de engatillados de superficie cóncava-borde convexo en aleación de aluminio AA6111-T4. Se ha desarrollado en ABAQUS un modelo de elementos finitos sólidos, usando una formulación explícita quasi estática para el doblado, pre-engatillado y engatillado, y una formulación implícita para la correspondiente precarga y recuperación elástica resultante a un alto coste computacional. Tratando precisamente de mejorar la eficiencia computacional, se han analizado varias metodologías de simulación tales como la utilización de elementos placa como alternativa, el desarrollo de procedimientos simplificados híbridos de simulación combinando los esquemas implícito y explícito y despreciando los análisis de recuperación elástica intermedios. Se ha investigado también el efecto del número de puntos de integración de los elementos placa a través del espesor, viendo que aumentarlos no supone una gran mejora. Las mismas condiciones se han analizado usando elementos placa en LS-DYNA pero sólo se ha considerado la recuperación elástica del engatillado final. Los resultados de los modelos simplificados se han comparado con los resultados del modelo de elementos sólidos de ABAQUS con el procedimiento completo, que se toma como referencia debido a su contrastada formulación de elementos finitos y sus buenos resultados en validaciones de modelos 2D. Se han comparado tanto la precisión de los resultados como la eficacia computacional.

El propio G. Lin dentro de su tesis doctoral [LIN06] simula los 3 procesos, doblado, pre-engatillado y engatillado con ABAQUS con el módulo explícito y elementos sólidos y luego el springback con el módulo implícito y elementos placa haciendo un mapeado para pasar la malla deformada de un módulo a otro y utilizando un escalado de masas para optimizar el tiempo computacional. Los resultados de estas simulaciones reproducen bien los experimentos físicos.

Concluye que el aumento del radio de la etapa de doblado o la disminución de las pre-tensiones de la pieza a engatillar disminuye las deformaciones superficiales generadas en el extremo de la unión engatillada y por lo tanto reducen el riesgo de que se produzcan grietas.

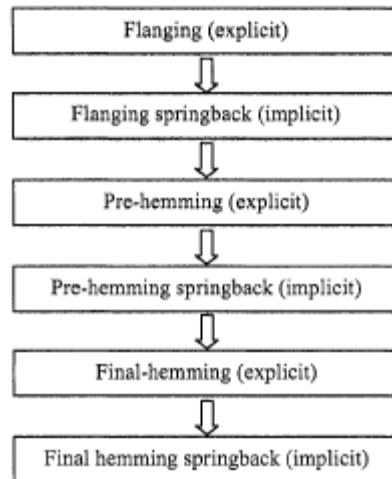


Figura 7.10: Método de elementos finitos híbrido utilizado por [LIN06] para simular el engatillado con los módulos implícito y explícito de ABAQUS®.

Un proyecto de fin de carrera llevado a cabo en la universidad de Twente [JON06] desarrolla un modelo 3D de simulación del engatillado por roldana utilizando ABAQUS®. Se centra sobretodo en predecir el enrollamiento.

Concluye en que los elementos placa continuos son los más eficientes para simular el engatillado por roldana 3D de piezas grandes. Con un elemento en el espesor las simulaciones son bastante rápidas y tienen una precisión aceptable para predecir el enrollamiento.

### Conclusiones

Existen muchos trabajos que tratan de desarrollar modelos de simulación por elementos finitos para engatillados precisos y eficientes.

La mayoría de los estudios sobre la simulación del engatillado realizados hasta ahora son modelos 2D para reducir el tamaño del modelo y el tiempo computacional. Sin embargo, los modelos de deformación plana impiden que el material se mueva en la dirección de la anchura, lo que no siempre es una hipótesis válida ya que las superficies y/o bordes de engatillado pueden tener curvaturas. Hay varios defectos debidos a la deformación (grietas y arrugas) que no pueden ser reproducidos por modelos 2D. Consecuentemente, es necesario realizar simulaciones de engatillado 3D.

Existen también numerosos estudios que tratan de dilucidar la cuestión de si es más apropiado utilizar un código implícito o explícito para simular el proceso de engatillado. En contraste con el algoritmo implícito convencional, el algoritmo explícito es bastante eficiente ya que no necesita matriz tangencial global y el estado del modelo es adelantado explícitamente, por lo que no necesita iteraciones y tolerancias. Además, las grandes deformaciones, los problemas no lineales, y las restricciones de contacto son relativamente fáciles de implementar en un algoritmo explícito. Por otra parte, el algoritmo implícito es todavía irremplazable para las simulaciones de la recuperación elástica

de conformado de chapa, puesto que es generalmente poco realista alcanzar el equilibrio a través de la relajación dinámica en explícito.

Otro motivo de controversia es la cuestión de si es posible o no utilizar elementos placa en las simulaciones de engatillado. El engatillado genera un radio de curvatura de la chapa exterior cuyo orden de magnitud es el mismo que su espesor, lo que hace que las condiciones para usar este tipo de elementos teóricamente no se cumplan en este caso según la teoría de Reissner-Mindlin. Sin embargo, algunos estudios realizan comparaciones con elementos sólidos que demostrarían que los elementos placa son tan apropiados o más que los elementos sólidos para simular el engatillado.

Aunque, tal y como se observa en la bibliografía sobre simulación de engatillado, existe alguna que otra controversia entre los distintos estudios se observan una serie de conclusiones generales.

En lo referente al tipo de elemento se ha visto la necesidad de utilizar un tipo de elemento que pueda modelizar efectos de espesor, como es el sólido, que da una mayor cantidad de información contrastada sobre los distintos defectos y parámetros geométricos de salida. Sin embargo para realizar simulaciones de piezas reales de automoción en 3D la utilización de elementos sólidos se traduce en modelos muy costosos computacionalmente hablando. Es por eso que para medir ciertos parámetros como por ejemplo el enrollamiento en una pieza 3D real es prácticamente necesario a día de hoy trabajar con elementos placa.

Si se trabaja con sólidos es importante realizar un mallado más discreto en el extremo de la unión engatillada tanto en la pieza exterior como en el refuerzo interior.

Si se trabaja con elementos placa no es necesario introducir puntos de integración de elementos placa en el espesor ya que su influencia en el resultado final es muy baja.

Al elegir entre trabajar con un código implícito o explícito, ambos métodos reproducen el engatillado convencional aunque es aconsejable realizar las operaciones de doblado, pre-engatillado y engatillado con un código explícito y calcular la recuperación elástica final en implícito. Algunos estudios apuntan a la recuperación elástica como el causante del defecto de combado.

Para conseguir que los resultados finales de las simulaciones de engatillado sean similares a los experimentales, es necesario realizar las etapas de doblado y pre-engatillado previas al engatillado sobre la misma malla o geometría.

En lo referente a parámetros de material parece que el modelo constitutivo no influye en la geometría final mientras que la introducción del endurecimiento cinemático (que tiene en cuenta el efecto Bauschinger) sí que influye.

No hay que olvidar que todo lo comentado se refiere al engatillado mecánico. La tecnología utilizada en este caso para engatillar es el EMF por lo que estas conclusiones no serán siempre aplicables a la nueva tecnología.

## 7.2 Simulación del doblado y engatillado por EMF

### 7.2.1 Estrategia de simulación utilizada

Para estudiar la simulación por elementos finitos del engatillado electromagnético se ha elegido la estrategia de acoplamiento débil. Esta misma estrategia de acoplamiento débil ha sido probada para simular otras aplicaciones del EMF por personal de LBEIN-Tecnalia obteniendo una buena correlación entre los resultados experimentales y los resultados de la simulación [JIM06], incluso comparándolos con una estrategia de simulación acoplada [ARA08].

La estrategia de acoplamiento débil o “Loose Coupling” consta de varias etapas. Inicialmente, en el modelo electromagnético se calculan las fuerzas de Lorentz que actúan en la pieza sin tener en cuenta la deformación de la misma. Estas fuerzas son transferidas como datos de entrada al modelo mecánico para la simulación de la deformación de la pieza. La simulación de la parte mecánica se ejecuta en un único paso. Esta estrategia de acoplamiento débil descuida la influencia de la deformación de la pieza en la evolución del campo magnético. Se desprecia el cambio de los valores de las fuerzas debido al cambio de la geometría. De modo que sólo es aplicable en deformaciones pequeñas y pulsos de presiones magnéticas grandes. Esta estrategia, aunque sea menos precisa, es la más flexible, ya que necesita modelos menos complicados que pueden ser resueltos con un menor coste computacional.

En nuestro caso se está utilizando el programa Maxwell 3D® para simular la parte electromagnética del proceso. Para la parte mecánica del proceso se han seguido dos metodologías distintas.

Después de analizar la bibliografía referente a la simulación del engatillado no existen referentes claros sobre que tipo de programa de elementos finitos mecánico utilizar (capítulo 7.1.2). Hay que tener en cuenta además que el estudio bibliográfico sobre simulación de engatillado se refiere al engatillado mecánico convencional y en este caso se trata de simular el engatillado a altas velocidades de deformación por lo que en realidad se trata de un problema diferente. Por lo tanto se han planteado dos estrategias diferentes para simular la parte mecánica del engatillado basándose en el estudio bibliográfico.

Se ha utilizado un código explícito (PAM-Stamp®) para las simulaciones de las geometrías circulares completas en 3D con elementos placa. Esta estrategia reproduce defectos como el enrollamiento pero no está claro hasta que punto es capaz de reproducir defectos más complejos como el combado. En este caso se ha simulado la pieza completa ya que al utilizar elementos placa el tiempo computacional que ello supone es aceptable.

Para tratar de reproducir otro tipo de defectos se va a probar una segunda estrategia diferente. Utilizando un código también explícito como es ABAQUS®, se ha simulado una sección 2D de la unión engatillada con elementos sólidos. Al realizar un modelo 2D se puede reducir el tamaño del elemento y utilizar elementos sólidos para tener efectos de espesor. Realizar una simulación 3D de



una pieza completa con elementos sólidos de reducido tamaño resultaría muy costoso computacionalmente hablando. Por esta razón se realiza una simulación con un falso 2D. Es decir, un 2D con una pequeña profundidad de varios milímetros en el tercer eje.

### Simulación electromagnética

Para comenzar con la estrategia de acoplamiento débil se introduce el circuito eléctrico de descarga con los valores de las distintas variables (figura 7.12) en el programa de cálculo electromagnético Maxwell 3D®. Este circuito, que reproduce la descarga eléctrica del banco de condensadores a través de la bobina electromagnética, consta de las siguientes partes:

A= Capacitancia de los condensadores. El banco de condensadores nos permite almacenar energía eléctrica en sus capacitores y posteriormente seleccionar el voltaje al que esa energía se descarga hasta un máximo de 8 kV. La energía de descarga se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad \text{donde } C \text{ es la capacitancia seleccionada de la máquina y } V \text{ es el potencial eléctrico al que se realiza la descarga.}$$

B= Resistencia de la maquina de EMF y de sus cables

C= Inductancia de la maquina de EMF y de sus cables

D= Bobina de EMF utilizada en cada caso. El programa Maxwell 3D® calcula los parámetros eléctricos de la bobina (L y R) en función de la geometría y del material introducidos y la incluye en este circuito de descarga.

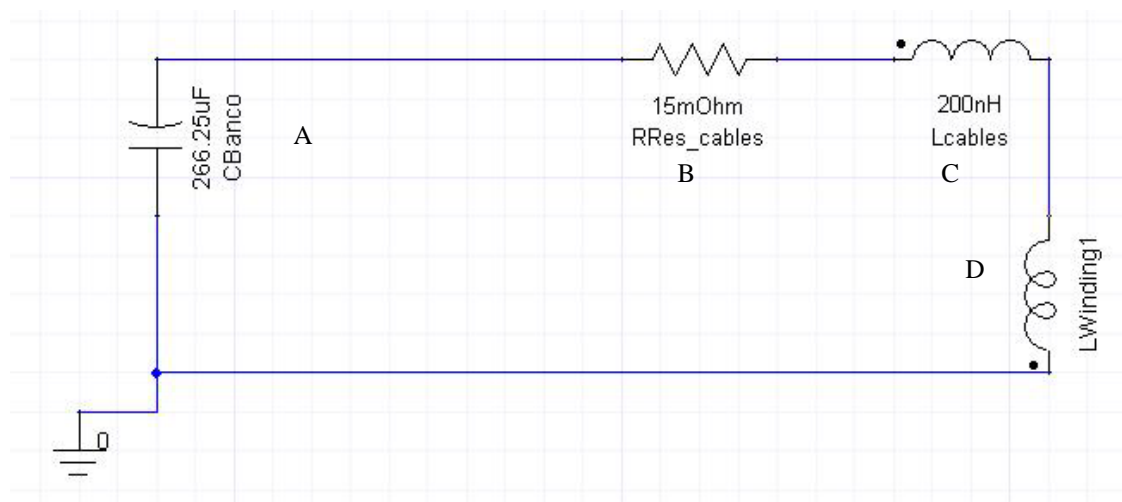


Figura 7.12: Circuito de descarga introducido en Maxwell 3D® con los parámetros fijos de la máquina y la energía seleccionada.

El programa realiza la descarga de la energía, grafica la corriente que circula por la bobina (figura 7.13), genera las corrientes inducidas en la pieza y los campos y las presiones electromagnéticas que soporta la pieza a lo largo del tiempo de descarga. Esto nos permite obtener los datos de la presión magnética ejercida sobre la pieza a deformar en el tiempo y en el espacio.

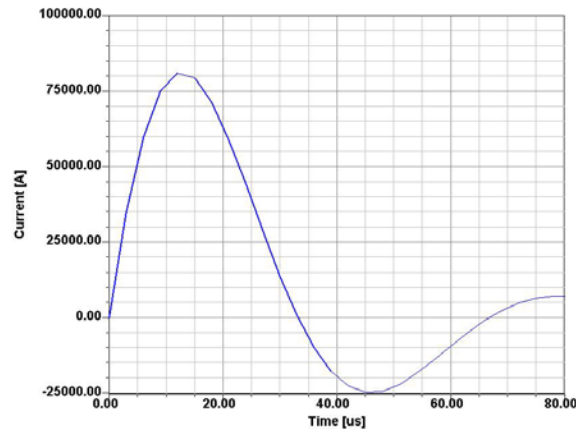


Figura 7.13: Señal de corriente generada por el programa MAXWELL 3D®

Con la corriente de descarga se pueden visualizar y elegir los tiempos donde la corriente es máxima para posteriormente calcular la presión magnética en ese instante en la pieza a deformar e introducirla como input al programa mecánico.

El medio periodo de la descarga se aproxima a una curva unitaria que posteriormente multiplica la presión magnética calculada en cada elemento para los distintos estados de la simulación.

Sin embargo dependiendo de la deformación producida en la pieza, está curva de presión magnética en el tiempo se corta cuando la pieza se aleja de la bobina de EMF.

Esto se debe a que el fenómeno de la inducción de corrientes es altamente dependiente de la distancia entre la bobina y la pieza. A medida que la pieza se aleja de la bobina las corrientes inducidas en la pieza disminuyen y con ello las presiones magnéticas generadas.

Este hecho se puede observar al simular con un método totalmente acoplado como el que están desarrollando en la The Ohio State University.

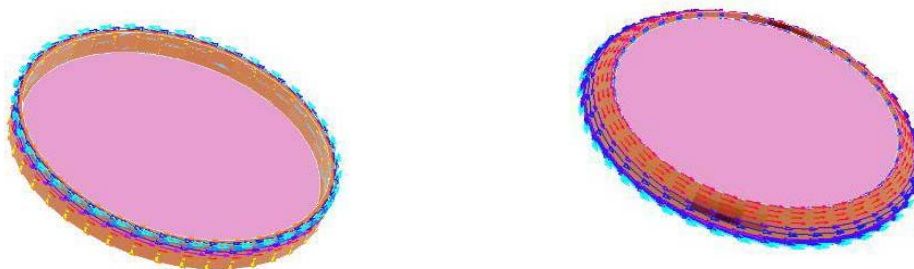


Figura 7.14: Distribución de las corrientes inducidas sobre una pieza a engatillar por EMF circular obtenidas con LS-Dyna para el primer instante de la descarga (izquierda) y para el instante 20 microsegundos (derecha).

En la figura 7.14 se observan la distribución de las corrientes inducidas sobre una pieza a engatillar circular obtenidas con LS-Dyna para el primer instante de la descarga (izquierda) y para el instante 20 microsegundos (derecha). El valor máximo (representado en azul) se ve en el vértice superior de la pestaña cuando está cerca de la bobina y se desplaza hacia abajo al deformarse y alejarse de la misma.

Para calcular ese instante en el que la pieza se aleja de la bobina y deja de recibir las presiones electromagnéticas generadas se utilizó la cámara de alta velocidad [PHO07] (figura 7.15).

Para grabar el engatillado hubo que aumentar la resolución hasta 128x80 pixels por lo que la velocidad fue de 105.000 imágenes por segundo (una imagen cada 9,5 microsegundos).

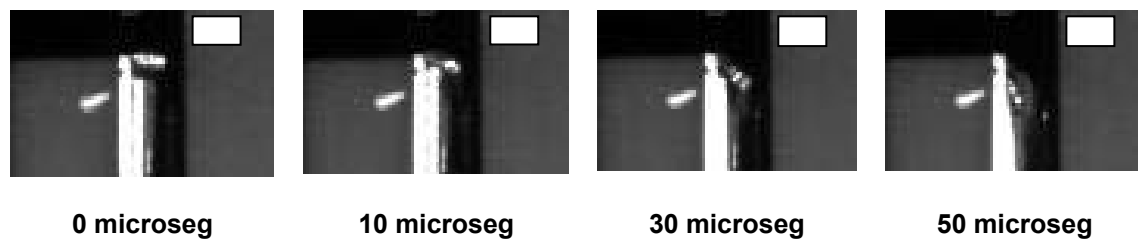


Figura 7.15: Diferentes estados del engatillado de una pestaña recta de 5mm obtenidos con la cámara de alta velocidad a 105.000 fotografías por segundo. La posición de la bobina está representada por el rectángulo blanco.

En el estado de 10 microsegundos la pieza todavía se encuentra lo suficientemente cerca de la bobina como para que las corrientes inducidas sigan generando presión magnética sobre la pieza. Sin embargo en el estado de 30 microsegundos la pestaña se encuentra lejos de la pieza y la presión magnética ejercida sobre ella disminuye tanto que es despreciable.

Por lo tanto se ha modificado la onda de presión unitaria y se ha cortado a partir del microsegundo 20.

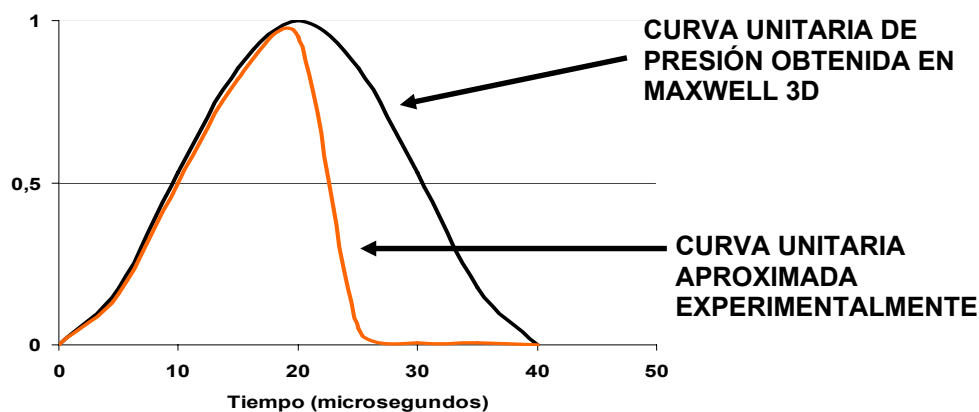


Figura 7.16: Curva unitaria de presión obtenida para el tiempo de descarga y curva aproximada para la simulación con la ayuda de la cámara de alta velocidad.

### *Simulación mecánica*

La presión magnética máxima obtenida por Maxwell 3D® en los distintos puntos de la pestaña se multiplica por la curva unitaria aproximada de la figura 7.16 y se introduce en el programa mecánico. Para la parte mecánica del proceso se van a utilizar dos estrategias basándose en el estudio bibliográfico sobre engatillado convencional.

Se realizará una primera simulación 3D con una de las geometrías circulares, utilizando el código explícito PAM-Stamp® y elementos placa. Según la bibliografía esta estrategia sirve para poder predecir ciertos parámetros como el enrollamiento, la zona deformada o las arrugas. Pero sin embargo no sería capaz de predecir otros parámetros de salida más complejos. Para predecir estos parámetros se plantea la segunda estrategia basándose también en el estudio bibliográfico sobre simulación de engatillado convencional. Esta segunda estrategia es una simulación 2D con elementos sólidos y el código explícito de ABAQUS®.

### *Validación del método desacoplado*

Para validar el método de simulación utilizado en esta tesis los resultados obtenidos de las simulaciones serán comparados con las piezas de las geometrías básicas obtenidas experimentalmente. Se comparará tanto la validez para simular la operación de doblado por EMF como la operación de engatillado por EMF.

#### *7.2.2 Elementos placa y simulación 3D (Maxwell-Pam-Stamp)*

En el estudio bibliográfico del capítulo 7.1.2 sobre la simulación del engatillado mecánico convencional existen estudios que desaconsejan la utilización de elementos placa para simular dicho proceso [LIV00]. El radio de curvatura de la chapa exterior es del mismo orden de magnitud que el espesor de la chapa lo que contradice la teoría de Reissner-Midlin sobre este tipo de elementos.

Sin embargo también existen estudios que entran en controversia con los arriba citados [SIG98] en los que los elementos tipo placa dan resultados tan próximos a los experimentales como los elementos sólidos. Además, hay que tener en cuenta que no se trata de un proceso de engatillado convencional sino que se trata de un estudio novedoso, por lo que las conclusiones extraídas de la bibliografía sobre engatillado convencional han de tomarse como datos orientativos y nunca definitivos ya que no se trata de la misma tecnología.

Por lo tanto, y teniendo en cuenta el reducido tiempo computacional de los elementos placa y la facilidad de preparación de casos con PAM-Stamp, se realizaron unas primeras pruebas sobre la parte mecánica del problema utilizando elementos placa. Se simularon los procesos de doblado y engatillado por EMF.

### Doblado 3D

Para simular la operación de doblado por EMF se utilizó la geometría circular de 60mm de diámetro y 7mm de altura de pestaña con un radio de doblado interior de 1,2mm. Se eligió esta geometría ya que se encuentra en el límite de engatillabilidad. Los resultados experimentales con pestaña de 7mm dan buenas uniones con el diámetro exterior de 90mm mientras que el de 30mm no se consigue engatillar. Por lo tanto, para analizar hasta que punto el método de simulación es capaz de reproducir la realidad, se eligió una geometría que se encuentra en los límites de la engatillabilidad por EMF. También se varió el parámetro del solapamiento utilizando los dos valores probados experimentalmente del 15% y del 60%.

Se realizó la parte electromagnética tal y como se detalla en el apartado 7.1.3 calculando el instante en el que la pestaña se aleja de la pieza con la cámara de alta velocidad [PHO07] para posteriormente aplicar esos tiempos en el cálculo mecánico del problema (figura 7.17).

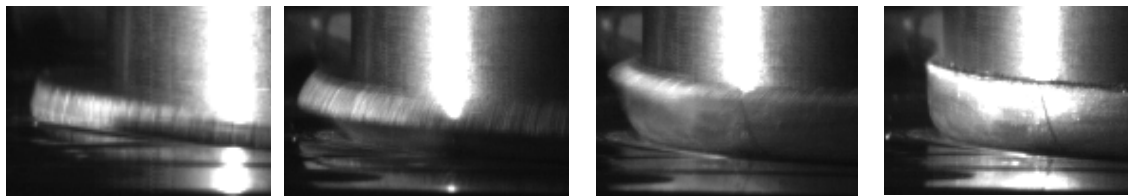


Figura 7.17: Secuencia de doblado por EMF de una pestaña de 7mm y un diámetro exterior de 60mm captada con cámara de alta velocidad a 70.000 imágenes por segundo.

Estas mismas imágenes han sido utilizadas en el apartado 6.2 para calcular la velocidad de impacto de la pestaña contra el troquel. Sin embargo en este caso nos interesa calcular el instante en el que la pestaña se aleja de la bobina lo suficiente como para dejar de inducir corrientes en la misma. Ese instante corresponde al estado de la segunda de las imágenes de la figura 7.17, concretamente a 14,5 microsegundos.

A continuación se muestran el campo de las presiones electromagnéticas generadas sobre la pieza obtenidas por Maxwell 3D (figura 7.18). Esa presión electromagnética se introduce en PAM-Stamp para el cálculo de la deformación en la parte mecánica. El color amarillo-verde indica el máximo y el azul el mínimo de esas presiones generadas.

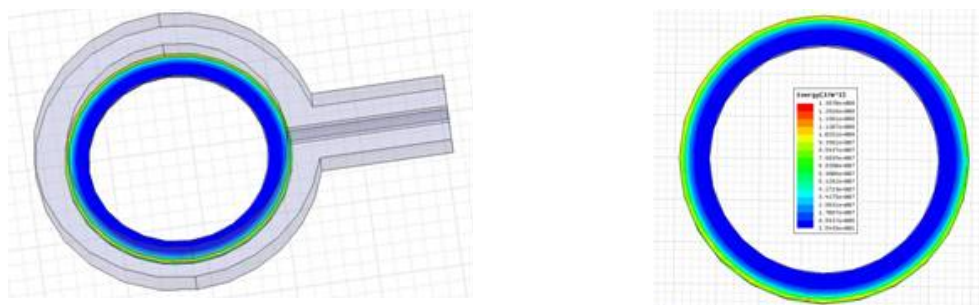


Figura 7.18: Bobina de doblado modelizada (izquierda) y campo de presiones electromagnéticas generadas en una pieza de diámetro final de 60mm y 7mm de altura de pestaña al 15% de solapamiento (derecha) obtenidas con Maxwell 3D®.

También se muestra el mallado realizado para la parte mecánica. El disco inicial se convirtió en un anillo ya que solamente nos interesa la zona de doblado, reduciendo de esta manera el número de elementos (figura 7.19).

Como se puede observar en la imagen de la izquierda de la figura 7.19, la malla del recorte inicial ha sido discretizada en la zona del radio de doblado reduciendo el tamaño del elemento hasta el límite inferior, que es la mitad del espesor de la chapa, por lo tanto 0,55mm.



7.19: Malla discretizada en la zona del radio de la pieza a doblar (izquierda) y troquel utilizado contra el que doblar (derecha) para la parte mecánica del problema utilizando el programa Pam-STAMP.

Una vez realizadas las simulaciones de doblado se compararon los resultados obtenidos con las mediciones sobre las piezas experimentales (figura 7.20).

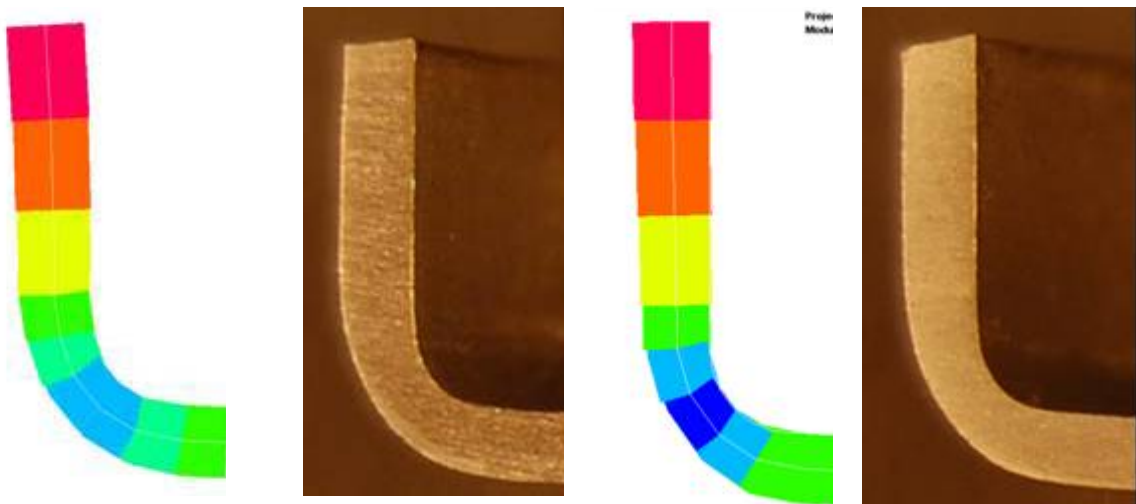


Figura 7.20: Diámetro 60mm con 15% de solapamiento (izquierda) y diámetro 60mm con 60% de solapamiento (derecha)

Se compararon los diferentes diámetros finales obtenidos así como el espesor en la zona del radio de doblado y las alturas de la pestaña. Los resultados de estas mediciones se recogen en la tabla 7.2. También se han calculado los errores producidos con respecto a la medición sobre las piezas reales.

Ø 60	Solapamiento (%)	Altura pestaña (mm)	Espesor final (mm)	Diam final (mm)
Exp.	15	6,94	0,96	60,2
Simu.	15	6,7 (e= 3,5 %)	0,89 (e=7,3%)	60,58 (e=6,3%)
Exp.	60	7,1	0,884	60,3
Simu.	60	7.05 (e= 0,8%)	0.8 (e=9,5%)	60.2 (e=0,2%)

Tabla 7.2: Resultados comparativos entre ensayos experimentales (Exp.) y de simulación (Simu). El error producido entre la simulación y los experimentales se expresa como "e" entre paréntesis.

Basándonos en los resultados obtenidos en las simulaciones de doblado electromagnético podemos concluir en que existe una buena correlación entre los resultados de la simulación y los físicos. Por lo tanto, el método desacoplado utilizado con Maxwell 3D para la parte electromagnética y PAM-Stamp con elementos placa para la parte mecánica es capaz de reproducir la operación de doblado electromagnético.

### Engatillado 3D

Basándonos en el estudio bibliográfico realizado previamente (apartado 7.1.2) sobre la simulación del engatillado convencional, se observa la importancia de utilizar una malla deformada en la etapa previa de estampación antes de realizar el engatillado [SIG03], [LIN06]. Sin embargo, al trabajar con dos códigos de simulación diferentes dentro de una misma etapa de conformado, es necesario importar y exportar la malla deformada de un programa a otro.

Los formatos deformados que exporta el programa PAM-Stamp no los puede importar Maxwell 3D. Por lo tanto la pieza obtenida anteriormente mediante doblado electromagnético no puede ser importada por Maxwell 3D para realizar la operación posterior de engatillado. Esta imposibilidad nos obliga a simular la operación de engatillado partiendo de una geometría sin deformaciones. A continuación se presenta la malla realiza en la pieza exterior para la parte electromagnética del proceso (figura 7.21).

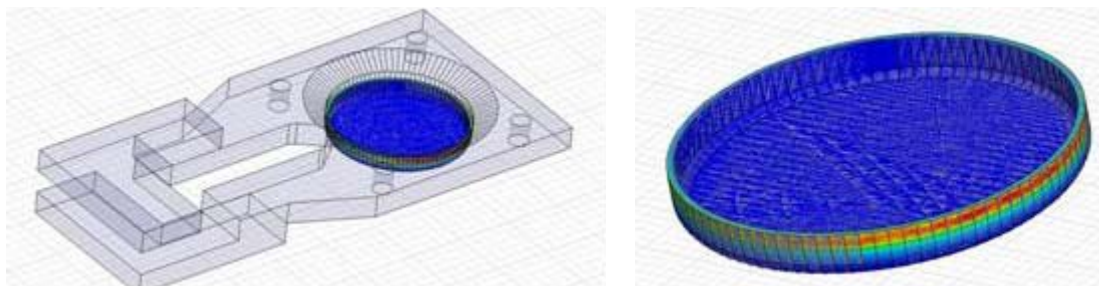
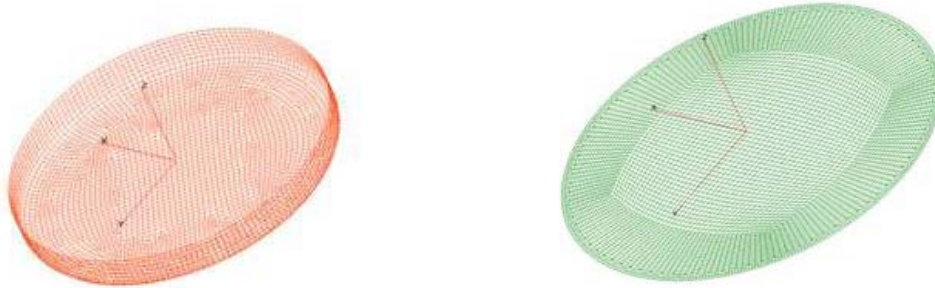


Figura 7.21: Conjunto de bobina y pieza colocada en posición para ser engatillada por EMF (izquierda) y corrientes inducidas generadas en la pieza exterior para el caso del diámetro exterior de 60mm con 7mm de altura de pestaña al 30% y con 3kj de energía de descarga.

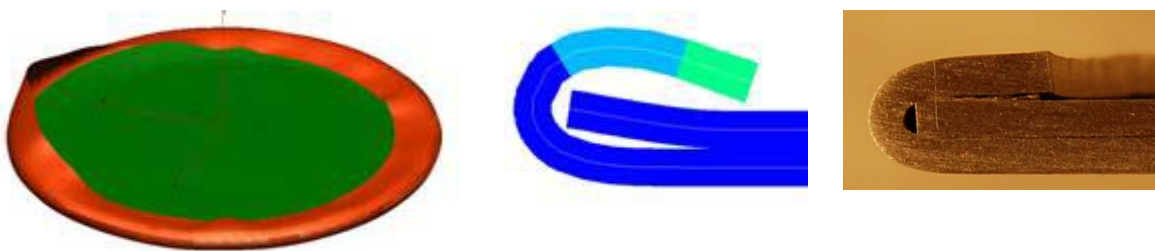
En la figura 7.21 se puede ver el campo de presiones electromagnéticas generado sobre la pestaña de la pieza a engatillar. El color rojo indica la zona del valor máximo de esa presión y el azul el mínimo. Esa presión es introducida posteriormente en el programa PAM-Stamp para el cálculo mecánico.

Se presenta la malla utilizada para la pieza exterior y para el refuerzo interior realizada con elementos placa para el cálculo de la parte mecánica con el programa PAM-Stamp (figura 7.22).



*Figura 7.22: Pieza exterior (izquierda) y refuerzo interior (derecha) mallados con un tamaño de elemento de 0,55mm para una mayor precisión en los resultados.*

Después de realizar las simulaciones utilizando elementos placa, los resultados se compararon con los experimentos físicos:



*Figura 7.23: Pieza de diámetro exterior de 60mm y 7mm de altura de pestaña obtenida al 30% de solapamiento con 3kj de energía de escarga con Pam-STAMP® (izquierda), sección de la zona de unión de esa misma simulación (centro) y del experimento físico (derecha).*

En las imágenes de la figura 7.23 se observa que la simulación con elementos placa, aunque puede simular la operación de doblado, no es capaz de reproducir el proceso de engatillado electromagnético. Esto corrobora la investigación de Livatyali [LIV98] usando el software Deform3D pero entra en controversia con la investigación de Svenson y Mattiasson [SVE02] realizada con LS-Dyna.

Sin embargo hay que tener en cuenta que aunque se trate del mismo proceso, el engatillado, la tecnología utilizada es diferente a la convencional. Ningún estudio anterior se puede considerar como definitivo sino más bien como orientativo ya que a día de hoy no existe constancia de ningún otro estudio sobre simulación de engatillado electromagnético.



### 7.2.3 Elementos sólidos y simulación 2D (Maxwell-Abaqus)

La segunda de las estrategias de simulación estudiada en esta tesis consiste en realizar un modelo 2D con elementos sólidos para la parte mecánica. Para ello se va a utilizar el programa ABAQUS explícito.

Según la bibliografía sobre la simulación del engatillado convencional, el modelo 2D con elementos sólidos da resultados más próximos a los reales. Además ofrece la posibilidad de medir defectos imposibles de medir con elementos placa como el combado (haciendo el cálculo de la recuperación elástica en implícito). Sin embargo no es capaz de reproducir defectos que se producen en geometrías 3D como las arrugas.

Una ventaja que tiene con respecto al método 3D con elementos placa es la posibilidad de poder simular las operaciones de doblado y engatillado sobre la misma geometría. Al ser una geometría 2D es posible calcular la zona de acción de la presión electromagnética e introducirse a la geometría ya doblada sin necesidad de importar y exportar las geometrías entre los distintos programas. De este modo la pieza posee un estado tensional generado en la etapa de doblado que acerca a este método más al proceso del engatillado real.

Se realizó un mallado selectivo disminuyendo el tamaño de elemento en la zona del radio de doblado que es donde se producen las mayores deformaciones.

A la hora de modelizar el refuerzo interior se observó que físicamente resulta imposible crear un vértice tan afilado y en caso de que se pudiera obtener se deformaría al aplicarle una pequeña carga. Además, en las simulaciones previas realizadas con el modelo 3D se observó que la pieza exterior tiende a “clavarse” en el refuerzo y no reproduce de manera real el proceso de engatillado por EMF. Por esta razón, además del mallado selectivo realizado también en el extremo del refuerzo interior, se redondearon los vértices disminuyendo todavía más el tamaño de elemento (figura 7.24). Esta misma solución ya ha sido utilizada con anterioridad [ATZ98] para la simulación del engatillado convencional con buenos resultados.

El tamaño de los elementos más pequeños es de 0,275mm x 0,1mm.

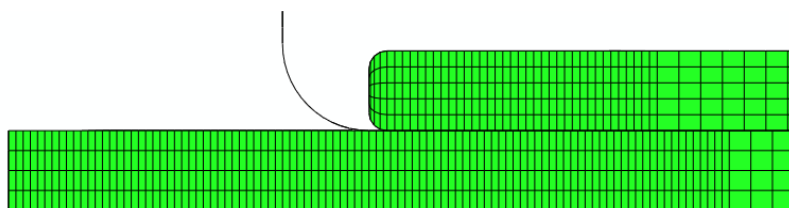


Figura 7.24: Malla discretizada en la pieza exterior y en el refuerzo interior con el extremo de este último redondeado antes de la operación de doblado por EMF.

En este caso la presión magnética generada en la pestaña se calculó sobre una recta. En la figura 7.25 se muestra como se consigue y la forma que tiene esa curva de presión generada durante la etapa de EMF para el caso del engatillado.

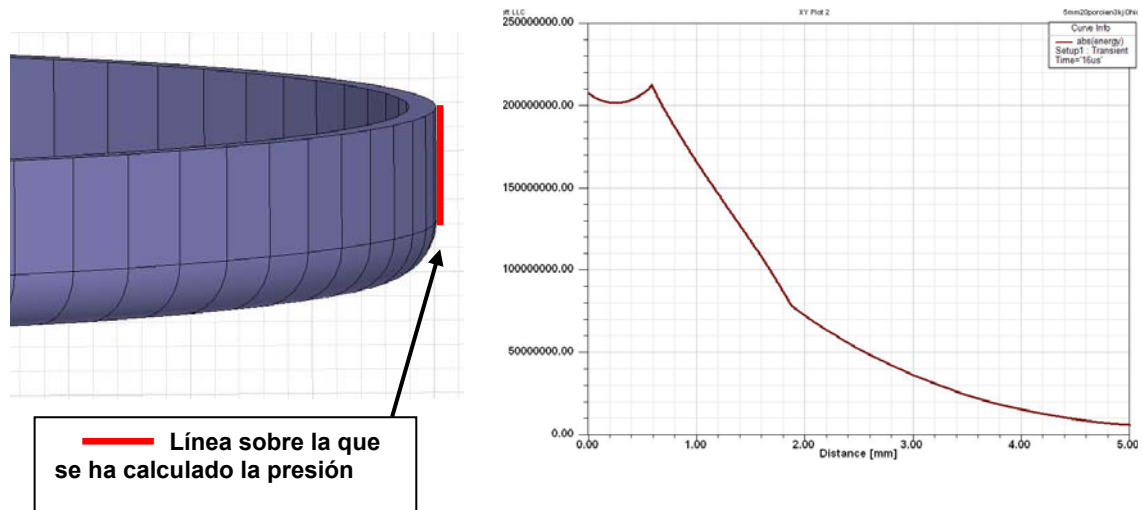


Figura 7.25: Línea donde se ha calculado la presión magnética generada durante la descarga (izquierda) y gráfica con la presión generada en esa línea para 3kj en Pascales (derecha).

Esta presión magnética (figura 7.25) será introducida sobre la superficie de los elementos en el programa ABAQUS como una onda de presión. Al igual que se hiciera con el modelo 3D, la onda de presión magnética obtenida en Maxwell 3D y que se introduce en ABAQUS, ha sido ajustada con la cámara de alta velocidad tal y como se explica en la figura 7.15. Este ajuste consiste en considerar el instante en el que la deformación de la chapa es lo suficientemente grande para que las corrientes dejen de inducirse sobre ella y por lo tanto deje de ejercerse la presión magnética.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tanto en el doblado como en el engatillado usando elementos sólidos y un modelo 2D.

### Doblado 2D

Se realizó la operación de doblado por EMF para poder partir de una pieza ya deformada en la operación de engatillado. Estos experimentos de doblado se realizaron utilizando un 15% de solapamiento que es el valor que se utilizó para doblar la geometría recta en los experimentos físicos.

La curva de presión magnética generada en el doblado se calculó como se explica en la figura 7.25 pero con la bobina de doblado. Una vez calculada la curva de presión se introdujo en el programa ABAQUS para realizar la parte mecánica del doblado.

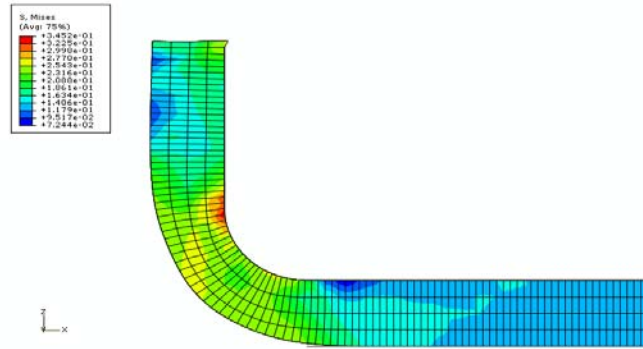


Figura 7.26: Geometría 2D de doblado obtenida con ABAQUS.

La pieza doblada en ABAQUS (figura 7.26) tiene una reducción de espesor del 8% frente al 5-6% de la geometría recta doblada experimentalmente. Se puede considerar por lo tanto que el resultado es aceptable.

### Engatillado 2D

Como se ha comentado con anterioridad en este capítulo la pieza se introdujo en el programa mecánico ABAQUS con su deformación originada en la operación de doblado por EMF como se puede observar en la figura 7.27.

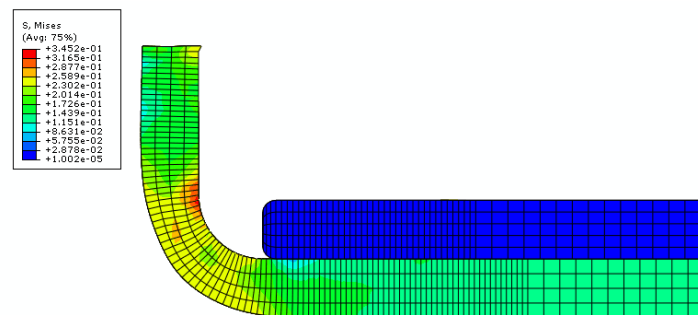


Figura 7.27: Geometría 2D de doblado obtenida con ABAQUS.

Los experimentos de engatillado se realizaron utilizando un 5% de solapamiento que es el valor de solapamiento óptimo para engatillar la geometría recta en los experimentos físicos. La zona deformada obtenida en la simulación es de 2,1mm mientras que la zona deformada de la pieza real es de 2mm (figura 7.28).

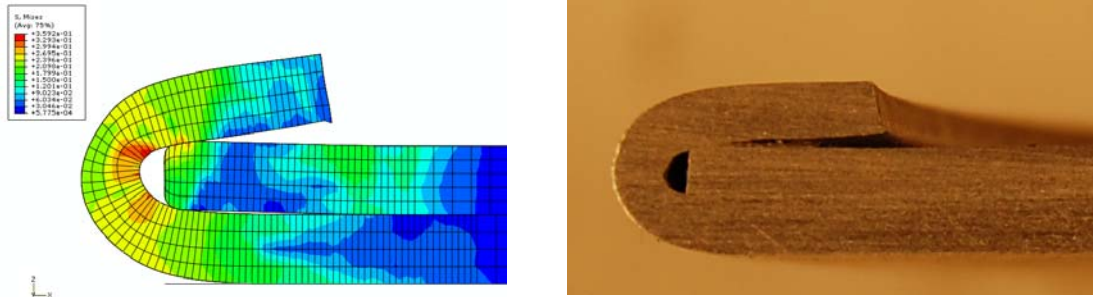


Figura 7.28: Geometría 2D después del engatillado obtenida con ABAQUS (izquierda) y pieza experimental (derecha).

Al aplicarle un pulso de presión de mayor amplitud a la parte mecánica, la pestaña choca contra el refuerzo interior como se observa en la figura 7.29. El valor de la zona deformada se mantiene en los 2mm para los ensayos experimentales mientras que se reduce hasta los 1,74mm en la simulación. De todos modos esto es lo que sucede en el caso en el que el choque no suceda con demasiada energía cinética acumulada ya que en ese caso el refuerzo interior se dobla y la zona deformada aumenta.

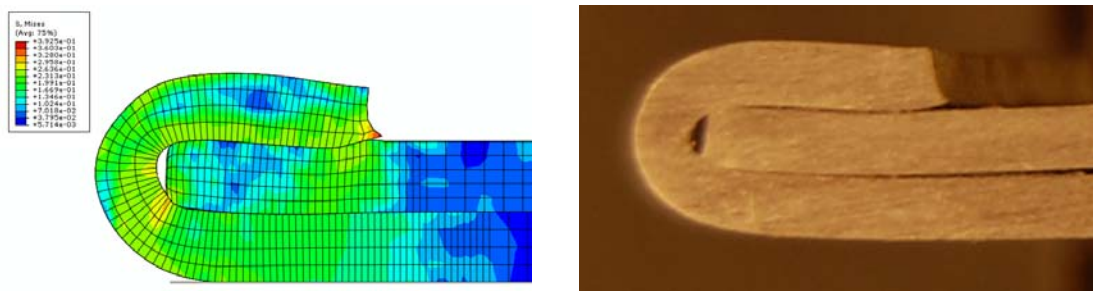


Figura 7.29: Geometría 2D después del engatillado obtenida con ABAQUS (izquierda) y pieza experimental (derecha). La energía descargada ha sido excesiva en ambos casos.

Las tensiones que se generan en el extremo de la cara exterior son de entorno a los 200 MPa. Si tenemos en cuenta que el límite elástico de nuestro material 6016T4 es de 120 MPa y el límite a rotura es de 230 MPa es totalmente lógico que aparezcan grietas y zonas de estricción en las piezas reales ya que estamos en la zona de la deformación plástica.

El método de simulación utilizando un modelo 2D con elementos sólidos ha dado mejores resultados que el método 3D utilizando elementos placa. Esta diferencia es más acusada sobre todo en la operación de engatillado ya que el doblado ha sido bien simulado por ambos métodos.

Para poder calcular defectos como el combado con el método de simulación presentado es necesario hacer un cálculo implícito que calcule la recuperación elástica, ya que es ella la causante del combado en el engatillado convencional.

## Conclusiones

Al tratarse de un proceso de alta velocidad, el tiempo computacional se reduce enormemente si lo comparamos con simulaciones de engatillado convencional e incluso más si lo comparamos con el proceso de engatillado por roldana.

Además el método de acoplamiento débil utilizado da unos resultados aceptables si las presiones calculadas por Maxwell 3D son transferidas a un programa explícito y se realiza una simulación con elementos sólidos bien discretizados en la zona de la unión engatillada.

Los elementos placa son validos para simular la operación de doblado dando un error medio del 4,6% en la medición combinada de la reducción de espesor, altura pestaña y diámetro final de la geometría circular. Sin embargo el modelo 3D con elementos placa no da resultados comparables a los experimentales al calcular el engatillado. Estos resultados vienen a corroborar las conclusiones que refleja el estudio de la literatura [LIV00].

Por su parte el segundo método de simulación 2D utilizando el programa ABAQUS explícito y elementos sólidos da resultados más proximos a la realidad. La simulación 2D llevada a cabo reproduce de manera más real la etapa de engatillado ya que se consiguen uniones sin deformaciones en el refuerzo interior cosa que ha sido implosible con el programa PAM-Stamp 3D y los elementos placa.

De todos modos no hay que olvidar que se trata de una simulación a alta velocidad de deformación en la que además se engatilla partiendo desde la etapa de doblado sin realizar el pre-engatillado. Por lo que los resultados obtenidos no tienen porqué ajustarse a lo observado en la literatura sobre simulación de engatillado convencional.



## **CAPITULO 8 - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**





## 8 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### *Sobre engatillado por EMF*

En esta tesis se ha desarrollado el proceso de engatillado por EMF y se ha establecido su validez como proceso alternativo al engatillado convencional para piezas de chapa de aleaciones de aluminio. Se han analizado y finalmente establecido las variables de entrada más influyentes en los parámetros de salida del proceso. Estos parámetros de salida son tanto geométricos como de calidad. Además de identificar y cuantificar la influencia de cada variable estudiada se ha identificado la variable de engatillado por EMF de mayor influencia en la calidad final denominada “Solapamiento”. El solapamiento es el parámetro a controlar y a ajustar para conseguir una unión engatillada de calidad por EMF con un diseño de proceso eficiente.

- Un valor elevado del solapamiento dobla el refuerzo interior además de aumentar la zona deformada, el enrollamiento y el combado.
- Un valor demasiado pequeño aumenta la energía de descarga reduciendo la vida útil de las bobinas y aumenta el riesgo de aparición de grietas. Sin embargo reduce la zona deformada lo que influye positivamente en el GAP aparente.

Es importante señalar que se han conseguido uniones engatilladas con una aleación de aluminio de automoción por EMF de la misma calidad que las obtenidas por la industria con los métodos convencionales. Este hecho cobra mayor importancia si se tiene en cuenta que se ha eliminado la operación de pre-engatillado.

Además de igualar los parámetros geométricos de salida obtenidos con el engatillado mecánico, se ha observado un aumento en la engatillabilidad de la aleación de aluminio estudiada al utilizar el EMF. Teniendo la misma geometría antes y después del engatillado con ambas tecnologías, la muestra engatillada por EMF presenta un daño menor que la engatillada mecánicamente. Esto es debido a los efectos inerciales que se producen en el EMF que hacen que la deformación no se concentre en el extremo de la unión sino que se distribuya en una zona mayor.

En el engatillado convencional la deformación es cuasi-estática y está restringida a la zona del radio de doblado. Sin embargo al engatillar por EMF la pestaña es “lanzada” por los campos electromagnéticos generados y la deformación se distribuye en una zona mayor debido a la inercia que lleva la pestaña. Los efectos inerciales que aparecen en el EMF debido a la alta velocidad de deformación retrasan la aparición de la estricción y a su vez crean más zonas de estricción distribuyendo la deformación más homogéneamente y retrasando así la rotura.

Se ha realizado una extrapolación de los resultados obtenidos con las geometrías básicas aplicando las conclusiones obtenidas a una pieza compleja que combina zonas rectas con curvas. Se ha

obtenido una correlación satisfactoria ya que las conclusiones de las geometrías básicas aplicadas a la pieza compleja han mejorada la calidad final de esta última.

A continuación se detallan varias conclusiones puntuales importantes extraídas del estudio experimental:

- El valor del diámetro exterior nos limita la engatillabilidad de la unión debido a la aparición de arrugas. Sin embargo, si una geometría es engatillable y se puede conseguir la geometría modelo, algunos de los parámetros de calidad que se han medido en esta tesis como son la zona deformada y el enrollamiento se mantienen constantes independientemente del valor que tenga el diámetro exterior.
- Tras la operación de engatillado por EMF el combado que traen las piezas de la operación de doblado se ve reducido.
- La operación de engatillado por EMF endurece el material del mismo modo que los métodos convencionales.
- La altura de la pestaña limita la posibilidad de engatillar ciertas geometrías debido a la aparición de arrugas al aumentar su valor.
- Una pestaña de mayor altura nos permite un mayor rango de valores de solapamiento sin problemas de aparición de grietas.
- En lo referente a la variable GAP entre pestaña y refuerzo interior conviene reducir su valor ya que su aumento repercute negativamente en la calidad de la unión: aumenta la zona deformada, aumenta el enrollamiento y aumenta la aparición de grietas.

La realización de grabaciones del proceso con la cámara de alta velocidad ha sido de gran utilidad. Sus imágenes han servido para comprender mejor lo que sucede durante la deformación. Además se ha podido calcular la velocidad de impacto de la pestaña contra el mandrino en la operación de doblado y ha servido para poner a punto el método de simulación desacoplado utilizado.

#### *Sobre doblado por EMF*

Se ha realizado una primera caracterización del doblado por EMF analizando las variables de entrada y su influencia en la geometría de la pieza final.

Se ha constatado que la operación de doblado anterior al engatillado, al realizarla por EMF reduce la engatillabilidad posterior de la pieza ya que aumenta su dureza un 20% más con respecto al doblado mecánico. Esto es debido al endurecimiento por impacto contra el macho de doblado que en el caso del doblado mecánico convencional no se produce. En el impacto del doblado por EMF se generan fuerzas de compresión en el espesor del orden de 250 MPa. Además del endurecimiento por el impacto sufrido en el doblado por EMF hay que tener en cuenta la reducción de espesor tan acusada que sufre el material. Si en la industria este parámetro ronda el 5% [ING09] en las geometrías

circulares engatilladas en esta tesis ronda el 15%. Este aumento sufrido en la estricción favorece la aparición de grietas en la operación de engatillado posterior.

#### *Sobre simulación*

Los elementos placa son validos para simular la operación de doblado dando un error medio del 4,6% en la medición combinada de la reducción de espesor, altura pestaña y diámetro final de la geometría circular.

Sin embargo para simular el engatillado, el modelo 3D con elementos placa no da resultados comparables a los experimentales. Estos resultados vienen a corroborar las conclusiones que refleja el estudio de la literatura [LIV00].

Por su parte el segundo método de simulación 2D utilizando el programa ABAQUS explícito y elementos sólidos da resultados más proximos a la realidad tanto para la operación de doblado como para la de engatillado. La simulación 2D llevada a cabo reproduce de manera más real la etapa de engatillado ya que se consiguen uniones sin deformación en el refuerzo interior cosa que ha sido imposible con el programa PAM-Stamp 3D y los elementos placa. Esto se ha conseguido gracias a la utilización de elementos sólidos y a la realización de la operación de doblado y de engatillado sobre la misma geometría.

De todos modos no hay que olvidar que se trata de una simulación a alta velocidad de deformación en la que además se engatilla partiendo desde la etapa de doblado sin realizar el pre-engatillado. Por lo que los resultados obtenidos no tienen porqué ajustarse a lo observado en la literatura sobre simulación de engatillado convencional.

#### *Trabajo Futuro*

Para seguir con la caracterización del proceso se deben optimizar nuevas variables de entrada aplicables a piezas reales más complejas. Las variables para el engatillado por EMF han sido optimizadas para las geometrías básicas estudiadas en esta tesis. Estas variables sin embargo no son suficientes a la hora de diseñar bobinas para engatillar geometrías más complejas que incluyan zonas curvas y rectas. Esto se debe a que las distintas variables interactúan entre sí al colocarlas todas en la misma geometría. Por lo que es necesario definir nuevas variables a estudio como la distancia entre la bobina y la pestaña para poder comprender esas interacciones y conseguir engatillar piezas complejas por EMF.

El método de simulación desacoplado desarrollado en este estudio ha dado buenos resultados. Sin embargo es necesario realizar simulaciones 3D de piezas completas con elementos sólidos para poder analizar todos los parámetros de salida. Además es necesario realizar las operaciones de doblado y engatillado sobre la misma geometría realizando un cálculo implícito al final para calcular la recuperación elástica. Diversos grupos están trabajando en desarrollar un método de simulación del EMF acoplado. Una vez puesto a punto será una herramienta importante a la hora de experimentar con nuevas variables y geometrías complejas en cuanto a reducción de costes y tiempos de ensayos.

Hay que desarrollar el engatillado por EMF para otros materiales, sobre todo para el acero ya que es el material más utilizado para este tipo de piezas. Al realizar este estudio habrá que definir nuevos parámetros de salida a estudiar que son defectos propios del acero como las arrugas.

Es necesario realizar un estudio de repetitibilidad de proceso y de vida útil de las bobinas para la posterior implantación en la industria del nuevo proceso de engatillado. Para ello es necesario diseñar un equipamiento más robusto y próximo al industrial.

## **CAPITULO 9 – CONTRIBUCION CIENTIFICA**



## 9 CONTRIBUCION CIENTIFICA

En este capítulo se presenta la contribución científica en publicaciones y congresos:

### Publicaciones:

Jimbert P., Eguia I., Perez I., "Straight Hemming of Aluminum Sheet Panels Using the Electromagnetic Forming Technology: First Approach", KEY ENGINEERING MATERIALS (ISSN: 1662-9795), Vol 344 pp 365-372, 2007.

Jimbert P., Eguia I., Ulacia, I., Fernandez J. I., Gutierrez M. A., Hurtado I., "New Forming Limits For Light Alloys By Means Of Electromagnetic Forming And Numerical Simulation Of The Process", AIP CONFERENCE PROCEEDINGS (ISSN 094-243X), Vol 907, Part B, pp 1295-1300, 2007.

### Congresos:

Jimbert P., Daehn G.S., Zhang Y., "Hemming of Auto Body Panels Using the Electro Magnetic Forming Technology", International Plasticity symposium, Hawaii, USA, 2008.

Jimbert P., Eguia I., Gutierrez M. A., Gonzalez B., Daehn G. S., Zhang Y., Anderson R., Sundberg H., Olsson S-O., Brännström P., "Flanging and Hemming of Auto Body Panels using the Electro Magnetic Forming technology", Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Conference On High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2008.

Jimbert P., Eguia I., Ulacia I., Fernandez J. I., Gutierrez M. A., Hurtado I., "New Forming Limits For Light Alloys By Means Of Electromagnetic Forming And Numerical Simulation Of The Process", 10th ESAFORM Conference on Material Forming, Zaragoza, España, 2007.

Jimbert P., Eguia I., Perez I., Gonzalez B., "Hemming of aluminum sheet panels using the electromagnetic forming technology", International Deep-drawing Research Group IDDRG International Conference, Győr, Hungary, 2007.

Jimbert P., Eguia I., Perez I., "Straight Hemming of Aluminum Sheet Panels Using the Electromagnetic Forming Technology: First Approach", Sheet Metal Conference, Palermo, Italia, 2007.

Jimbert P., Arroyo A., Eguia I., Fernandez J. I., Silveira E., Garuz I., Daehn G. S., "Efficiency improvement and analysis of changes in microstructure associated to a uniform pressure actuator", Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference On High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2006.

Jimbert P., Eguia I., Fernandez J. I., Gonzalez B., "Conformado electromagnético y conformado electrohidráulico: influencia de procesos de deformación a alta velocidad en la embutición de piezas de forma cónica", XVI Edición del Congreso Máquina-Herramienta, San Sebastián, 2006.

Jimbert P., Eguia I., Iriondo I., Silveira E., Garuz I., "On the Influence of High Speed Forming Technologies in the Forming of Conical Specimens: Fluid -Specimen Interaction against Magnetically Induced Repulsion", International Deep Drawing Research Group IDDRG Conference, Porto, Portugal, 2006.

Jimbert P., Eguía I., Iriondo E., Fernandez J. I., Alcaraz J. L., Silveira E., Garuz I., “Deformación de chapas de aluminio AA1050 y AA6016 a alta velocidad mediante conformado electromagnético y electrohidráulico”, X Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de los Sólidos: Santiago de Compostela, España, 2006.



## **CAPÍTULO 10 – REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**



**10 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- [AIZ07] Aizawa T., Kashani M., Okagawa K., "Application of magnetic pulse welding for aluminium alloys and spccsteel sheet joints" *Welding journal*, vol. 86, pp 119-124, 2007.
- [ALH67] Al-Hassani S. T. S., Duncan J. L., Johnson W., "Analysis of the electro-magnetic metal forming process", *Int. Conf. On Manuf. Tech., Univ. of Michigan*, pp.853-882 1967.
- [ALH74] Al-Hassani S. T. S., Duncan J. L., Johnson W., "On The Parameters of The Magnetic Forming Process", *J. of Mech. Engg. Science*, Vol. 16 (1), pp. 1-9, 1974.
- [ALT98] Altenpohl, D.G., "Aluminum: Technology, Application, and Environment", *The Aluminum Association and The Minerals, Metals, and Material Society*, pp. 438, 1998.
- [ALT99] Altan T., "Interactive Educational Multimedia Modules in Net Shape Manufacturing, Short Course on Sheet Metal Forming, Module 6B, flanging & hemming", *ERC/NSM*, 1999.
- [ALU07] Alusuisse, "Documento facilitado por el suministrador del material con sus características mecánicas", 2007.
- [ARA08] Aranguren I., Pérez I., González B., Eguia I., "A New Multiphysics Simulation Approach for Electromagnetic Forming", *ECCOMAS 2008, Venice, Italy*, 2008.
- [AST97] ASTM Standard E290, 1997a, "Bend Testing of Material for Ductility", *ASTM Internacional*, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [AST08] ASTM Standard E384, 2008ae1, "Microindentation Hardness of Materials", *ASTM Internacional*, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [ATZ98] Atzema E. H., Baartman R., Klomp A. J. H., "Finite element simulations of the hemming process", *Proceedings of NUMIFORM*, pp 933-939, 1998.
- [BAI66] Baines K., Duncan J. L., Johnson W., "Electro-magnetic metal forming", *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, vol.180, n.4, 1966.
- [BAL94a] Balanethiram V. S., Daehn G. S., "Hyperplasticity-Increased Forming Limits at High Workpiece Velocities", *Scripta Metallurgica*, Vol.31, pp. 515-520, 1994.
- [BAL94b] Balanethiram V. S., Hu X, Altnova M., Daehn G. S., "Hyperplasticity: Enhanced formability at high rates *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 45, Issues 1-4, Pages 595-600, 1994.
- [BAR06] Barreiro P., Schulze V., "Strength of tubular joints made by electromagnetic compression at quasi-static and cyclic loading", *Proc. of the 2nd International Conference On High Speed Forming, Dortmund, Germany*, 2006.

- [BIR61] Birdsall D. H., Ford F. C., Furth H: P.; Riley R. E.; “Magnetic forming”, Am. Mach./Metalworking Manuf., vol.105, 1961.
- [BRA05] Bradley J. R., Carsley J. E., “Electromagnetic flanging and hemming apparatus and method”, Pat. Pub. No.: US 2005/0229377 A1 by GM, Oct. 20, 2005.
- [CAR05] Carsley J. E., “Microstructural evolution during bending: Conventional Vs. Roller hemming”. Trends in materials and manufacturing Technologies for transportation industries and powder metallurgy research and development in the transportation industry, Materials Processing & manufacturing division, 6th global Innovations Proceedings, TMS Annual Meeting, San Francisco, California, USA, February 13-17, pp 169-174, 2005.
- [DAE99] Daehn G. S., Vohnout V. J., DuBois L., “Improved Formability with Electromagnetic Forming: Fundamentals and a Practical Example, Sheet Metal Forming Technology”, Edited by Mahmoud Y. Demeri, The Minerals, Metals & Materials Society, pp.105-116, 1999.
- [DAE02] Daehn G. S., “Electromagnetically Assisted Sheet Forming: Enabling Difficult Shapes and Materials by Controlled Energy Distribution”, Research Proposal to NSF, 2002.
- [DAE03a] Daehn G. S., “High Velocity Metal Forming”, Draft for publication in ASM Handbook (2003/2004), “Forming and Forging”, 2003.
- [DAE03b] Daehn G. S., “Electromagnetically Assisted Stamping- A vision of a future for Metal Forming”, [www.hyperplasticity.com](http://www.hyperplasticity.com), 2003.
- [DAE08] Daehn G. S., Zhang Y., Golowin S., Banik K., Vivek A., Jonson J. R., Taber G., Fenton G. K., Henchi I., L’Eplattenier P., “Coupling Experiment and Simulation in EMF Using Photon Doppler Velocimeter”, , 3rd ICHSF, Dortmund, Alemania, 2008.
- [DAT00] Datta S., “Electromagnetic forming and flanging of aluminum 6061 tubes”, Master Thesis, OSU, 2000.
- [DUN02] Duncan J. L., Hu J., Marciniak Z., “Mechanics of Sheet Metal Forming”, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [EGU04] Eguia I., Zhang P., Daehn G. S., “Improved Crimp-Joining of Aluminum Tubes onto Mandrels with Undulating Surfaces” ,Proc. of the 1<sup>st</sup> International Conference On High Speed Forming, Dortmund, Germany 2004.
- [ELA03] El-Azab A., Garnich M, Kapoor A., “Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs”, Journal of Materials Processing Technology, vol.142, pág. 744-754, 2003.
- [ESP07] Espinosa R. H., Das S., Weaver J., “Simulation of warm forming assisted hemming to study the effects of process parameters on product quality”, SAE World Congress, Detroit, USA, 2007.

- [EZR73] Ezra A. A, "Principles and Practices of Explosive Metallurgy", Metal Working, Industrial Newspapers Ltd., London, 1973.
- [FEN98] Fenton, G.K., Daehn, G.S., "Modelling of electromagnetically formed sheet metal", Journal of Materials Processing Technology, v.75, pp. 6-16, 1998.
- [FOL88] Follansbee P. S., Kocks U. F., "A Constitutive Description of the Deformation of Copper Based on the Use of the Mechanical Threshold Stress as an Internal State Variable", Acta Metallurgica Materialia, Vol.36, 1, pp. 81-93, 1988.
- [FRE85] Fressengeas C., Molinari A., "Inertia and Thermal Effects on the Localization of Plastic Flow", Acta Metallurgica Materialia, Vol.33, 3, pp.387-396, 1985.
- [FUR56] Furth H. P., Waniek R., "Production and use of high magnetic fields, I", Rev.Sci.Intr., vol.27, 1956.
- [FUR57] Furth H. P., Levin M. A., Waniek R., "Production and use of high magnetic fields, II", Rev.Sci.Intr., vol.28, 1957.
- [FYF80] Fyfe I. M., Rajendran A. M., "Dynamic Pre-strain and Inertia effects on the Fracture of Metals", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 28, pp.17-26, 1980.
- [GES07] Documento interno sobre calidad en engatillado convencional facilitado por Gestamp S.A., 2007.
- [GOL99] Golovashchenko, S., "Numerical and experimental results on pulsed tube calibration", Proceedings of the TMS annual meeting: Sheet metal forming technology-1999, M. Demeri ed., San Diego, Ca., TMS, pp. 117-127, 1999.
- [GOL05a] Golovashchenko S., "Sharp flanging and flat hemming of aluminum exterior body panels", Journal of materials engineering and performance, Vol. 14, pp 508-515, 2005.
- [GOL05b] Golovashchenko S., Bessonov N., "Development of sharp flanging technology for aluminum panels" AIP Conf. Proc. 2005 – Volume 778, pp. 687-690 NUMISHEET, 2005.
- [GOL06] Golovashchenko S. "Electromagnetic, Forming and Joining for Automotive Applications", 2nd International Conference on High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2006.
- [GOU89] Gourdin W. H., "Analysis and Assessment of Electromagnetic Ring Expansion as a High-Strain-Rate Test", J. Applied Physics, Vol. 65(2), pp. 411-422, 1989.
- [GRO46] Grover F. W., "Inductance Calculations: Working Formulas and Tables", D. Van Nostrand Co., New York, NY, 1946.
- [HER05] Herman E. A., "Electromagnetic trimming, flanging and hemming apparatus and method", Pat. Pub. No.: US 2005/0229376 A1 by GM, Oct. 20, 2005.

- [HIS86] Hishida Y., Sato Y., "Analysis of hemming processes by the finite element method for improving hemming quality", Proceedings of the 14th Biennial Congress of IDDRG, Koln, April 21–23, 1986.
- [HMI09] <http://www.hmi.de/>
- [HOS93] Hosford W. F., Caddell R. M., "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy", Second Edition, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 1993.
- [HU96] Hu X., Daehn G. S., "Effect of Velocity on Localization in Uniaxial Tension", Acta Materialia, Vol. 44, pp.1021-1033, 1996.
- [IMB04] Imbert J., Worswick M., Winkler S., Golovashchenko S., Dmitriev V., "Analysis of the Increased Formability of Aluminum Alloy Sheet Formed Using Electromagnetic Forming", Ford Motor Company, Scientific Research Laboratories, SAE International, 2004.
- [IMB05] Imbert J., "Increased Formability and the Effects of the Tool/Sheet Interaction in Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet", Dissertation, Waterloo, Ontario, Canada, 2005.
- [ING09] INGEMAT, Informe interno sobre engatillado de piezas de aluminio, 2009.
- [IRI05] Iriondo E., "Springback in Sheet Metal Forming Applications", TMS Conference, Pittsburgh, Pa. USA, 2005.
- [IRI06a] Iriondo E., González B., Gutiérrez M. A., Daehn G. S., "New Approach for Springback Correction: Electromagnetic Impulses", IFU Conference on "New Developments in Sheet Metal Forming Technology", Stuttgart, Germany, 2006.
- [IRI06b] Iriondo E., "Springback and Sidewall Curl Correction on DP600 and TRIP 700 U-channels by electromagnetic pulses", Autosteel Great Designs in Steel, Livonia, Michigan, USA, 2006.
- [IRI06c] Iriondo E., "Electromagnetic Springback Reshaping", 2nd International Conference on High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2006.
- [JAB78] Jablonski J. Winkler R., "Analysis of the Electromagnetic Forming Process", Int. J. Mech. Sci., Vol. 20(5), pp. 315-325, 1978.
- [JIM06] Jimbert P., Arroyo A., Eguia I., Fernandez J. I., Silveira E., Garuz I., Daehn G. S., "Efficiency improvement and analysis of changes in microstructure associated to a uniform pressure actuator", Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference On High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2006.
- [JIM08] Jimbert P., Eguia I., Gutierrez M. A., Gonzalez B., Daehn G. S., Zhang Y., Anderson R., Sundberg H., Olsson S-O., Brännström P., "Flanging and Hemming of Auto Body Panels using the Electro Magnetic Forming technology", Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Conference On High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2008.

- [JON06] Jonkers B., "Simulation of the Robot Roller Hemming process" Master thesis, Universiteit Twente, 2006.
- [KAM05] Kamal, M., "A uniform pressure electromagnetic actuator for forming flat sheets", Dissertation, The Ohio State University, 2005.
- [KAM06] Kamal M., Cheng V., Bradley J., Hatkevich S., Daehn G. S., "Design, Construction, and Applications of the Uniform Pressure Electromagnetic Actuator", Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference On High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2006.
- [KAP01] Kapoor A., "Electromagnetic Forming of Aluminum- Computational Simulation, Shrink Flanging and Dimensional Reproducibility Issues", Master Thesis, OSU, 2001.
- [KLE06] Kleiner M., Brosius A., "Determination of Flow Curves at High Strain Rates using the Electromagnetic Forming Process and an Iterative Finite Element Simulation Scheme", CIRP Annals, vol.55, n.1, pág.267-270, 2006.
- [KEY09] [www.key-to-metals.com](http://www.key-to-metals.com)
- [KOR08] Kore S. D., Date P. P., Kulkarni S. V., "Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets", Journal of Materials Processing Technology vol. 208 390-400, 2008.
- [KRA03] Krajewski P. E., Carsley J. E., "Heat treatment effects on bending in AA6111", Aluminum 2003, ed: S.K. Das, TMS, pp 25-35, 2003.
- [LAN00] Lange C., Felder E., Massoni E., Auger P., Nanji A. K., "Hemming simulations with different element formulations and material models", International Deep Drawing Research Group (IDDRG) Conference Besançon, France, 2000.
- [LAN06] Lange C., "Etude physique et modélisation numérique du procédé de sertissage de pièces de carrosserie", C. Lange, Tesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [LAR99] Larris S. J., "Investigation of key characteristics of flanging and hemming of flange surface-curved edge sheet metal", Master thesis, The Ohio State University, 1999.
- [LIN04] Lin G., Koç M., Hu S. J., Cai W., "Three-dimensional numerical simulations of curved edge-curved surface hemming of aluminum alloy", Proceedings of IMECE, Anaheim, California, USA, 2004.
- [LIN05] Lin G., "A computational design-of-experiments study of hemming process for automotive aluminum alloys" Proc. IMechE Vol. 219 Part B, 2005.
- [LIN06] Lin G., "Quality and formability of automotive aluminium alloys", Dissertation, The University of Michigan, 2006.
- [LIV98] Livatyali H., "Computer aided process design of selected sheet metal bending processes-Flanging and Hemming", Dissertation, The Ohio State University, 1998.

- [LIV00] Livatyali H., Muderrisoglu A., Ahmetoglu M. A., Akgerman N., Kinzel N. A., Altan T., "Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design", *Journal of Materials Processing Technology* 98 pp. 41-52, 2000.
- [LIV02] Livatyali H., Wu H. C., Altan T., "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*, Vol. 120, 348-354, 2002.
- [LIV04a] Livatyali H., Laxhuber T., Altan T., "Experimental investigation of forming defects in flat surface-convex edge hemming" *Journal of Materials Processing Technology* 146, pp 20-27, 2004.
- [LIV04b] Livatyali H., Larris S. J., "Experimental investigation on forming defects in flat surface-convex edge hemming: roll, recoil and warp", *Journal of Materials Processing Technology* 153-154, pp 913-919, 2004.
- [MAG06] [www.magnepress.com](http://www.magnepress.com)
- [MAM04] Mamalis A. G., Manolakos D.E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K., "On the electromagnetic sheet metal forming: numerical simulation", *American Institute of Physics*, pág. 778-783, 2004.
- [MAM06] Mamalis A. G., Manolakos D.E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K., "Electromagnetic Forming Tools and Processing Conditions: Numerical Simulation", *Materials and Manufacturing Processes*, vol.21, pág.411-423, 2006.
- [MCC05] McClure J. L., Ramalingam S. C., Lezotte J. P., "Electromagnetic hemming machine and method for joining sheet metal layers", *Pat. Pub. No: US 2005/0109769A1*, by Chrysler May 26, 2005.
- [MOO84] Moon F. C., "Magneto-Solid Mechanics", John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- [MUD96] Muderrisoglu A., Murata M., Ahmetoglu M. A., Kinzel G., Altan T., "Bending. Flanging and hemming of aluminum sheet-an experimental study", *Journal of Materials Processing Technology* 59, 1996, pp 10-17.
- [MUD97] Muderrisoglu A., "Bending, flanging and hemming of aluminum and steel sheets", *Master thesis*, The Ohio State University, 1997.
- [MUR02] Murata M., Junhu L., Tanaka K "Simulation for hemming of aluminum sheet metal", *Mater. Sci. Forum*, Vols 396-402, pp. 1629-34, 2002.
- [NEE92] Needleman A., Tevergaard V., "Analyses of Plastic Flow Localization in Metals", *Applied Mechanics Reviews*, Vol.45, pp. S3-S15, 1992.
- [OLI02] Oliveira, D.A., "Electromagnetic forming of Aluminum Alloy Sheet : Experiment and Model", *Masters of Applied Science thesis*, University of Waterloo, 2002.



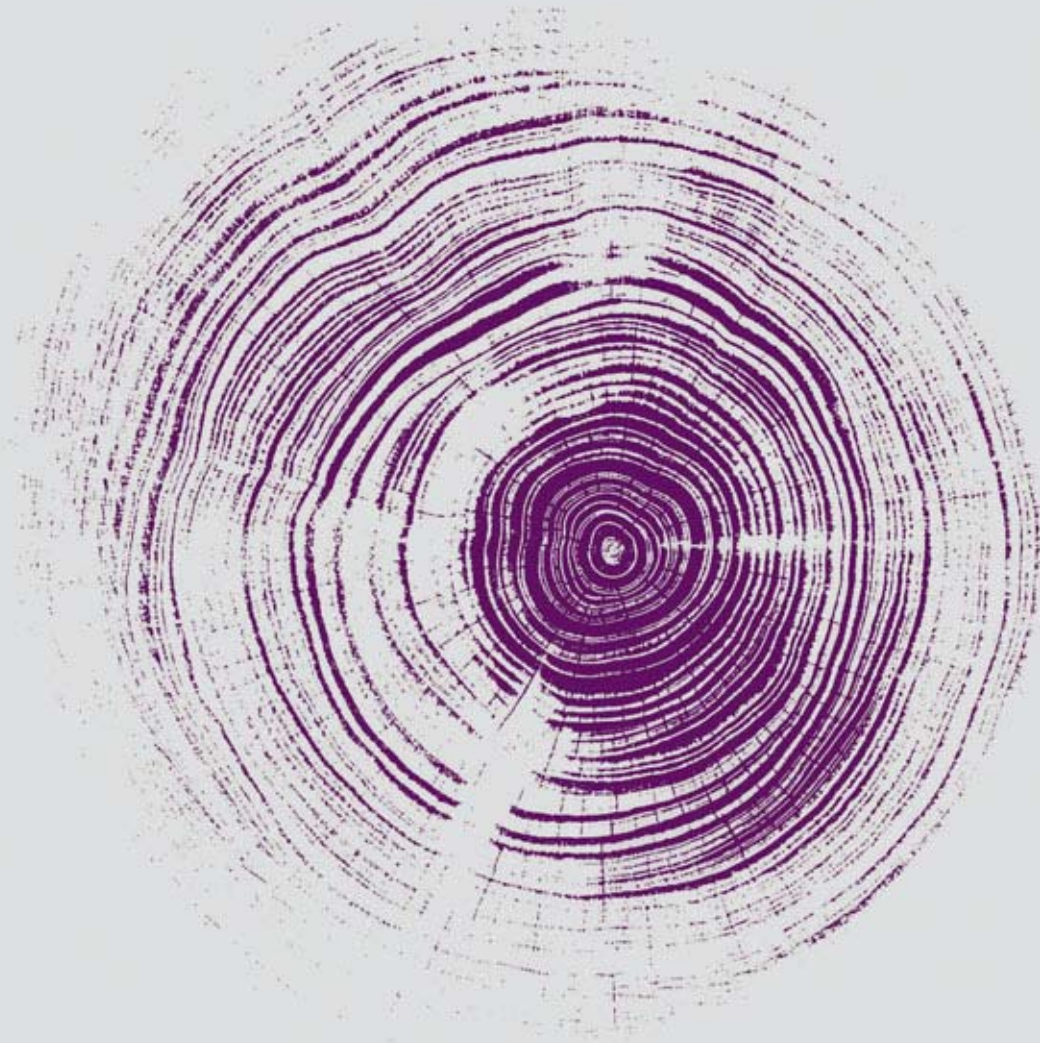
- [OLI05] Oliveira D. A., Worswick M. J., Finn M., Newman D., “Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: Free-form and cavity fill experiments and model”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.170, no.1-2, pág. 350-362, 2005.
- [PAN00] Panshikar H. M., “Computer modelling of electromagnetic forming and impact welding”, M.S. Thesis, Ohio State University, USA, 2000.
- [PHO07] [http://www.photron.com/pdf/ultima\\_APX-RS.pdf](http://www.photron.com/pdf/ultima_APX-RS.pdf)
- [PSY06] Psyk V., Beerwald C., Homberg W., Kleiner M., Beerwald M., Henselek A., “Investigation of the Process Chain Bending-Electromagnetic compression-Hydroforming on the Basis of an Industrial Demonstrator Part”, 2nd International Conference on High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2006.
- [QUI06] Quintana I., “Conformado electromagnético de aleaciones ligeras: modelización y optimización del proceso”, PFC Ing.Tec.Mecánica, MGEP, Mondragon Unibertsitatea, 2006.
- [REG86] Regazzoni G., Johnson J. N., Follanbsbee P. S., “Theoretical study of the dynamic tensile test”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 53, September, pp. 519-528, 1986.
- [SET05a] Seth M., Vohnout V. J., Daehn G. S., “Formability of steel sheet in high velocity impact”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 168 pp 390-400, 2005.
- [SET05b] Seth M., Daehn G. S., “Effect of aspect ratio on high velocity formability of aluminum alloy”, *Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries* Edited by TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2005.
- [SET06] Seth M., “High velocity formability and factors affecting it”, PhD Dissertation, The Ohio State University, 2006.
- [SHA06] Shang J., “Electromagnetically assisted sheet metal stamping”, Dissertation, The Ohio State University, 2006.
- [SIG98] Sigvant M., Svensson, M., “The Hemming Process. A numerical and experimental study”, *Proceedings of the NUMIFORM '98*, pp. 925–931, 1998.
- [SIG03] Sigvant M., “Hemming process, A numerical and experimental study”, Dissertation, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2003.
- [STI06] Stiemer M., Unger J., Svendsen B., Blum H., “Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming”, *ECCOMAS*, 2006.
- [SVE05] Svendsen B., Chanda T., “Continuum thermodynamic formulation of models for electromagnetic thermoinlastic materials with application to electromagnetic metal forming”, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol.17, pág.1-16, 2005.
- [SVE98] Svensson, M., “Hemming simulation,” *Proceedings of the NUMIFORM*, pp. 925–931, 1998.

- [SVE02] Svensson M., Mattiasson K., “Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method”, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 128, pp 142-154, 2002.
- [TAK88] Takahasi M., Murakoshi Y., Terasaki M., Sano T., Matsuno K., “Study on electromagnetic forming (v) - Free bulging of high-strength-metal plates – 2”, *Kikai Gijutsu Kenkyusho Shoho/Journal of Mechanical Engineering Laboratory, Tokyo, Japan*, vol.42, n.1, pág.1-8, 1988.
- [TAM96] Tamhane A. A., Altynova M. M., Daehn G. S., “Effect of Sample Size on Ductility in Electromagnetic Ring Expansion”, *Scripta Materialia*, Vol. 34, 8, pp. 1345-1350, 1996.
- [THU05] Thuillier S., Le Maout N., Manach P. Y., “Numerical simulation of the hemming process in the case of Al alloys”, *NUMISHEET : Proceedings of the 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Process*; Volume 778, pp. 691-698, 2005.
- [TUR61] Turner T. F., Butler H. S., “High-power switching by impulti-grid ignitrons Internal Memorandum M Report No. 257 Project stanford university stanford California, 1961.
- [ULA06] Ulacia I., Jimbert P., Hurtado I., García C., “Conformado electromagnético de materiales ligeros y simulación numérica del proceso”, *Congreso Nacional de Materiales, Vigo*, 2006.
- [ULA07] Ulacia I., Kintana J., Jimbert P., Hurtado I., “Strategies for the numerical simulation of electromagnetic forming process”, *International Conference on Engineering and Mathematics*, pp. 157–164. 2007.
- [ULA08a] Ulacia I., Imbert J., L’Eplattenier P., Hurtado I., Worswick M., “Numerical simulation of electromagnetic forming process using a combination of BEM and FEM”, *7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*, pp. 733–738. 2008.
- [ULA08b] Ulacia I., Hurtado I., Imbert J., Worswick M., “Influence of the coupling strategy in the numerical simulation of electromagnetic sheet metal forming”, *10th International LS-DYNA Users Conference*, pp. 17.25–17.33. 2008.
- [ULA09a] Ulacia I., Hurtado I., Imbert J., Salisbury C., Worswick M., Arroyo A., “Experimental and numerical study of electromagnetic forming of AZ31B magnesium alloy sheet”, *Steel Research International*. Accepted for publication. 2009.
- [ULA09b] Ulacia I., et al. “Electromagnetic forming of magnesium alloys at different temperatures”, En preparación.
- [UTP09] <http://www.utp.edu.co>

- [VOH98] Vohnout V. J., "A Hybrid Quasi-static/Dynamic Process for Forming Large Sheet Metal Parts From Aluminum Alloys", Ph.D. Dissertation, the Ohio State University, Columbus, OH, 1998.
- [WAG60] Wagner H.J., Boulger F.W., "High velocity metalworking processes based on the sudden release of electrical energy" memorandum prepared by the Battle Memorial Institute for the Defense Metals Information Center, 1960.
- [WIL64] Wilson F.W., "High-velocity Forming of Metals", American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1964.
- [ZHA01] Zhang G., "A study on fundamental mechanisms of Warp and recoil in hemming", Journal of Engineering and Technology, vol. 123, pp. 436-441, 2001.
- [ZHA03] Zhang G., Hu S. J., Wu X., "Numerical Analysis and Optimization of Hemming Processes," J. Manuf. Process., Vol 51, pp. 87–96, 2003.
- [ZHA08] Zhang Y., Daehn G. S., L'Eplattenier P., Babu S., "Experimental Study and Numerical Simulation on Magnetic Pulse Welding for Pre-flanged AA6061-T6 and Cu101 Sheets", Science and Technology of Welding and Joining, Vol 13, No 5, page 467-471, 2008.







  
**MONDRAGON**  
UNIBERTSITATEA

GOI ESKOLA  
POLITEKNIKOA

ESCUELA  
POLITÉCNICA  
SUPERIOR