



UNIVERSIDAD DE BURGOS

Programa de Doctorado en Ingeniería Civil e Industrial

Simulación numérica de procesos de estampación en frío y su aplicación a la industria de la automoción

TESIS DOCTORAL

Enrique Curiel Sanz

Director: Isidoro Iván Cuesta Segura

Burgos, octubre 2015

AGRADECIMIENTOS

No puedo iniciar sino dándole las gracias a las dos personas sin las que esta Tesis seguro que nunca hubiese llegado a realizarse, mis chicas, mi Rosana y mi Celia. Gracias por la paciencia que habéis tenido, por el ánimo cada día y cada minuto. Gracias Rosana por ayudar a Celia a entender el trabajo de papá. Gracias Celia por tus besos y comprensión aun siendo tan pequeña. Por fin hemos acabado, ahora sí.

Quiero agradecer a mi director de Tesis, Iván Cuesta Segura, que no solo me haya guiado y ayudado a ordenar las ideas para este trabajo sino que haya hecho de confesor personal y paño de lágrimas en los momentos difíciles, que los ha habido. Gracias, Iván. Es el turno para el impulsor de esta idea, Jesús Manuel Alegre Calderón, que me propuso empezar con esto y durante mucho tiempo me animó a seguir y darle forma.

No puedo dejar de incluir aquí a mis compañeros de departamento en Grupo Antolín, Abel, Diego, Gema, Natalia y Óscar, por entender la importancia de este trabajo y apoyarme sobre todo en estos meses finales, en los que ha sido difícil no perder ritmo de trabajo en la oficina y seguir con la Tesis al salir.

Gracias también a mis padres y hermanos por comprender que esto era importante para mí. Ya está hecho.

Finalmente, durante los cuatro últimos años ha habido mucha gente aportando pequeños granos de arena para que esta Tesis pudiese ver la luz. Probablemente, en ese momento ni ellos ni yo éramos totalmente conscientes de que aquella pequeña conversación, aquel ensayo, aquel chiste, etc., formaría parte o haría posible este trabajo de una u otra manera. Para todos aquellos, imposibles de recordar y nombrar vaya este agradecimiento final.

“No, try not. Do, or do not. There is no try”

-Yoda.

The Empire Strikes Back

ÍNDICE

NOMENCLATURA	1
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	5
1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.2. OBJETIVOS	8
CAPÍTULO 2 - ESTADO DEL ARTE	13
2.1. INTRODUCCIÓN.....	13
2.2. PROCESOS DE ESTAMPACIÓN.....	13
2.3. SIMULACIONES ACOPLADAS	15
2.4. ANÁLISIS INVERSOS.....	18
2.5. SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	19
2.5.1. Aleaciones de aluminio	20
CAPÍTULO 3 - CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	27
3.1. INTRODUCCIÓN.....	27
3.2. MATERIAL	28
3.3. COMPORTAMIENTO EN TRACCIÓN UNIAXIAL	30
3.4. ANISOTROPÍA PLÁSTICA	37
3.5. ENSAYO DE EMBUTIBILIDAD	39
CAPÍTULO 4 - METODOLOGÍA	51
4.1. INTRODUCCIÓN.....	51
4.2. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL	54
4.2.1. Parámetros del material.....	57
4.2.2. Ensayos de embutibilidad.....	58
4.2.3. Simulaciones de embutición	59
4.2.4. Diseño de experimentos.....	61
4.2.5. Validación del diseño de experimentos	67
4.2.6. Transferencia de los resultados de embutición al modelo de simulación estructural	67
4.2.7. Asignación de los parámetros elasto-plásticos estimados a partir de superficies de respuesta	69
4.2.8. Simulaciones de embutición inversas.....	70
4.2.9. Validación de resultados.....	71

CAPÍTULO 5 - APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
5.1. INTRODUCCIÓN	73
5.2. CARACTERIZACIÓN UNIAXIAL	73
5.2.1. Potencial plástico de Hill	76
5.3. ENSAYOS DE EMBUTICIÓN	79
5.3.1. Medida de la deformación	84
5.3.2. Ensayos de tracción de probetas pre-deformadas..	98
5.4. RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS MEDIANTE SUPERFICIES DE RESPUESTA	104
5.4.1. Validación del diseño de experimentos	119
5.5. SIMULACIONES DE EMBUTICIÓN	125
5.5.1. Simulaciones inversas	135
5.6. MAPEADO DE RESULTADOS	148
5.7. PROGRAMACIÓN DE LOS SCRIPTS	153
5.8. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA. SIMULACIÓN ENSAYO TRACCIÓN UNIAXIAL	159
CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	165
6.1. CONCLUSIONES	165
6.1.1. De las técnicas experimentales.....	165
6.1.2. De las simulaciones numéricas	167
6.1.3. De la metodología	169
6.2. TRABAJO FUTURO	172
CAPÍTULO 7 - BIBLIOGRAFÍA	175
ANEXO I - SCRIPT CREACIÓN MATERIALES	183
ANEXO II - SCRIPT ASIGNACIÓN MATERIALES	185



NOMENCLATURA

$A_{50}(\%)$, Elongación en el punto de rotura.

a [mm], Longitud del diámetro mayor de la elipse tras deformar los círculos de control de la deformación.

b [mm], Longitud del diámetro menor de la elipse tras deformar los círculos de control de la deformación.

$b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{12}, b_{22}$, Coeficientes del modelo cuadrático.

d [mm], Diámetro original de los círculos de control de la deformación.

d_o [mm], Media de los diámetros originales de cada círculo inscrito en la rejilla de control.

E [MPa], Módulo de Young.

$E(\beta^*, \varepsilon_I^*)$, Superficie de respuesta de E .

F, G, H, L, M y N , Constantes del material para el modelo de Potencial plástico de Hill.

$f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$, Función de respuesta del modelo cuadrático.

K [MPa], Constante de la Ley Potencial de Hollomon.

$K(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ [MPa], Superficie de respuesta de K .

n , Exponente de la Ley Potencial de Hollomon.

$n(\beta^*, \varepsilon_I^*)$, Superficie de respuesta de n .

R , Coeficiente de Lankford.



$R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{12}, R_{13}, R_{23}$, Coeficientes del Potencial plástico de Hill para ABAQUS.

R_{45}, R_{90}, R_0 , Coeficientes de Lankford en diferentes direcciones del material.

\bar{R} , Anisotropía normal plástica.

X_i , Valor real de los parámetros variables.

x_i , Valor codificado de los parámetros variables.

X_{iNINF} , Valor real del nivel más bajo del factor i .

X_{iNSUP} , Valor real del nivel más alto del factor i .

β , Relación entre deformación menor y mayor.

β^* , Valor de β codificado.

$\Delta\bar{R}$, Variación de anisotropía normal plástica con el ángulo.

ε , Deformación real.

ε_{REAL} , Deformación real.

$\varepsilon_{INGENIERIL}$, Deformación ingenieril.

ε_0 , Deformación inicial Ley de Swift.

ε_{rot} , máxima elongación ingenieril a rotura.

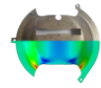
$\varepsilon_{rot}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$, Superficie de respuesta de ε_{rot} .

ε_t , Reducción de espesor durante ensayo tracción uniaxial.

ε_w , Reducción de anchura durante ensayo tracción uniaxial.

ε_x , Deformación dirección X local probetas Marciniak.

ε_y , Deformación dirección Y local probetas Marciniak.



ε_I , Deformación principal mayor.

ε_I^* , Valor de ε_I codificado.

ε_{II} , Deformación principal menor.

μ , Coeficiente de rozamiento.

ν , Coeficiente de Poisson.

σ [MPa], Tensión verdadera.

σ_{REAL} [MPa], Tensión verdadera.

$\sigma_{INGENIERIL}$ [MPa], Tensión ingenieril.

σ_{UTS} [MPa], Tensión máxima ingenieril.

$\sigma_{UTS}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$, Superficie de respuesta de σ_{UTS} .

$\sigma_{0.2}$ [MPa], Tensión en el límite elástico al 0.2% ingenieril.

$\sigma_{0.2}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$, Superficie de respuesta de $\sigma_{0.2}$.





INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la industria de automoción, hoy por hoy, no se entiende la realización de cualquier componente o sistema sin el apoyo, durante las etapas tempranas de su desarrollo, de las herramientas de simulación por ordenador. La Figura 1.1 muestra una comparativa de su uso. Se puede observar cómo todas las empresas más avanzadas del sector las usan ya en las etapas de diseño mientras que, sólo el 80% de las más rezagadas, lo hacen en esta fase.

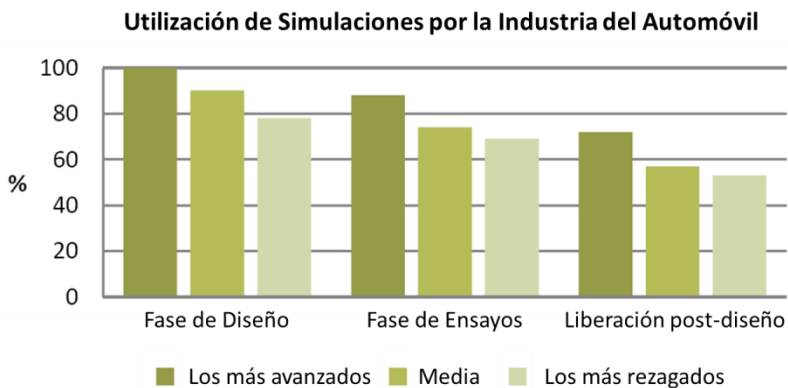


Figura 1.1. Comparación del uso de las simulaciones.

Estas herramientas abarcan cualquiera de los campos implicados para todas las etapas de desarrollo de los componentes de un automóvil: simulación de procesos de fabricación, de diversos estados de carga, escenarios logísticos, etc.

Dentro de estas etapas, existen dos fundamentales para definir el diseño y estructura final de un componente: el proceso de fabricación que finalmente se elegirá para realizar la pieza y la



superación de las exigencias del cuaderno de cargas establecido por el cliente.

Hasta hace unos pocos años, los resultados ofrecidos por las herramientas de simulación, de cada etapa mencionada anteriormente, se empleaban exclusivamente dentro de su propio ámbito, es decir, con los resultados de una simulación de inyección de una pieza plástica, se obtenían únicamente los parámetros necesarios para definir adecuadamente el proceso de inyección. De igual manera, los estados de carga simulados guían a los ingenieros hacia la configuración más robusta que sea capaz de soportar las exigencias mecánicas planteadas. El reto surge al intentar interconectar varias etapas, de modo que se puedan emplear los datos proporcionados por una de las etapas como alimentación de otra.

Para poder abordar dicho reto, es necesario conocer el esquema conceptual en el diseño de un componente en el sector de la automoción. La Figura 1.2 muestra de manera esquemática el diagrama que se sigue habitualmente en el diseño de componentes.

Como se puede observar en la Figura 1.2, el diseño de un componente se trata de un proceso iterativo donde el paso de los resultados, de las simulaciones de estados de carga a las de procesos, se hace a través de la modificación del diseño del componente, para reiniciar el proceso con el nuevo rediseño planteado.

De este modo, no existe una interconexión directa entre la simulación de proceso y la de estados de carga. Este paso directo de información supondría un valor añadido ya que las simulaciones de procesos aportarían las tensiones, deformaciones y demás parámetros geométricos que definirían un estado inicial, a partir del cual, se simularían los estados de carga requeridos. Este sería el “paso innovador” desarrollado en la presente Tesis.

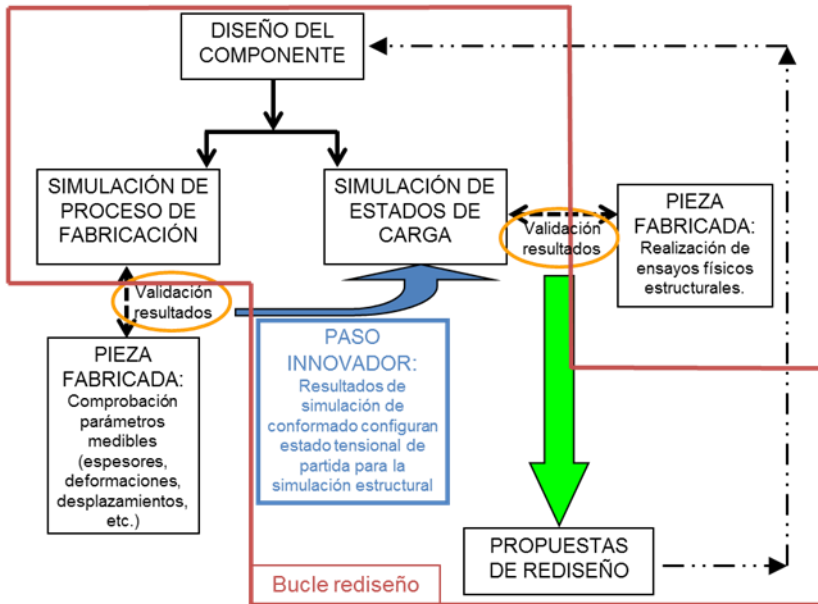
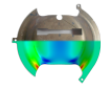


Figura 1.2. Diagrama de diseño de componentes de automoción.

En consecuencia, se mejorarían las correlaciones numérico-experimentales dado que es conocido que en numerosas ocasiones se ha detectado discrepancia entre ensayos estructurales físicos y sus simulaciones, para piezas metálicas que provienen de un proceso de conformado en frío. Tras un análisis detallado de los diferentes factores que influyen en este comportamiento, se puede concluir que, la variación de propiedades sufrida durante el conformado no se tiene en cuenta, en general, al lanzar las simulaciones estructurales o de crash, lo que provoca la falta de correlación numérico-experimental en demasiadas ocasiones.

Hoy en día ya existen herramientas comerciales que permiten realizar ese paso de trasladar ciertas características, resultado de las simulaciones de proceso, como datos de entrada para las simulaciones estructurales. Las características más comunes que se trasladan entre programas de simulación,



desde proceso a estructural, son los espesores y deformaciones plásticas tras el proceso de estampado.

Ya en el programa de simulación estructural, en cuanto a los espesores, está claro que su efecto será el de aumentar el número de colectores conteniendo zonas de espesores diferentes al nominal general, por lo que directamente la pieza ya no tendrá espesor uniforme. No hay que perder de vista que no existen las piezas metálicas estampadas en frío de espesor variable y que, estas variaciones debidas al proceso, son porcentualmente pequeñas comparadas con el espesor original.

Lo que no es tan claro de interpretar es en qué manera trata el programa “receptor” de los datos, el que se empleará para la simulación estructural, la entrada de deformaciones plásticas provenientes de la simulación de estampación. Hasta donde se ha podido ver durante la revisión del estado del arte, lo que realizan es una traslación de la curva del material en el eje horizontal, en la que se le proporcionan al programa los datos de tensión-deformación plástica verdaderas para cada material, como muestra la Figura 1.3.

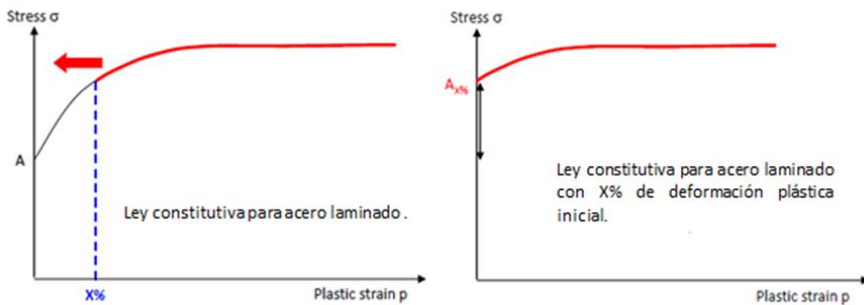
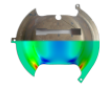


Figura 1.3. Aproximación de las propiedades del material en función de la deformación plástica observada durante el proceso.

1.2. OBJETIVOS

Tras lo expuesto anteriormente, los principales objetivos de la presente Tesis son los siguientes:



- a. Transferir, de manera óptima, los resultados de la simulación de estampado a los datos de entrada necesarios para la simulación estructural.
- b. Una vez encontrada la mejor manera de “comunicar” ambos procesos, para trasladar al software de simulación estructural la afectación a las propiedades del material, que tienen lugar durante la simulación de estampación, se definirá una metodología de trabajo y se buscará optimizarla para que se pueda implementar industrialmente.

Para lograr estos objetivos principales, se plantearán una serie de hitos intermedios que se pueden considerar como objetivos secundarios:

- a. Se realizarán simulaciones estructurales de cada uno de los ensayos de estampación, con intención de validar los modelos de simulación empleados.
- b. Se realizarán simulaciones de estampación “rápidas”, a través de procesos *one-step* e *inverse*, con intención de ver la exactitud de los mismos frente a las estructurales, más exactas pero más costosas en tiempo de computo.
- c. Una vez validadas las simulaciones de conformado, se pasará a buscar el mejor método para comunicar los datos de deformación, espesores finales, etc., obtenidos del software de simulación de conformado al software de simulación estructural.
- d. Definido el diagrama completo de todo el proceso, y como paso final de este trabajo, habría que optimizarlo desde el punto de vista de su implantación en procesos industriales, es decir, fijar los parámetros más importantes del proceso, desestimando probablemente alguno que haría pesar demasiado dicha implantación, para que, de esa manera, sea más fácil y directa su aplicación industrial.

Para la consecución de los objetivos descritos anteriormente, esta Tesis ha sido dividida en 6 capítulos, sin tener en cuenta



los correspondientes a la nomenclatura y a la bibliografía. En el presente capítulo se han descrito, a modo de introducción, tanto la motivación como los objetivos a alcanzar en este trabajo. El Capítulo 2 recorrerá brevemente, tanto los trabajos desarrollados en el campo de la intercomunicación entre programas de simulación de proceso-simulación estructural, como la afectación de los procesos de estampado en frío a las propiedades mecánicas de los metales. El Capítulo 3 mostrará la caracterización del material que ha sido seleccionado, tratándose de una aleación ligera de aluminio, típica de componentes estampados del sector de la automoción. A lo largo del Capítulo 4 se mostrará la metodología propuesta para la consecución de los objetivos ya planteados, así como la posible inclusión de nuevos objetivos parciales aparecidos durante el trabajo. En el Capítulo 5 se mostrarán los resultados obtenidos, tanto de los ensayos de estampación, de caracterización a tracción uniaxial, de metrología dimensional, etc., como los obtenidos de los diferentes programas de simulación, de proceso y estructurales, así como su correspondiente análisis. Ya en el último capítulo, se describirán las principales conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo de la presente Tesis, así como el posible trabajo futuro. El esquema de la Figura 1.4 muestra gráficamente las relaciones entre los diferentes capítulos que conforman la Tesis.

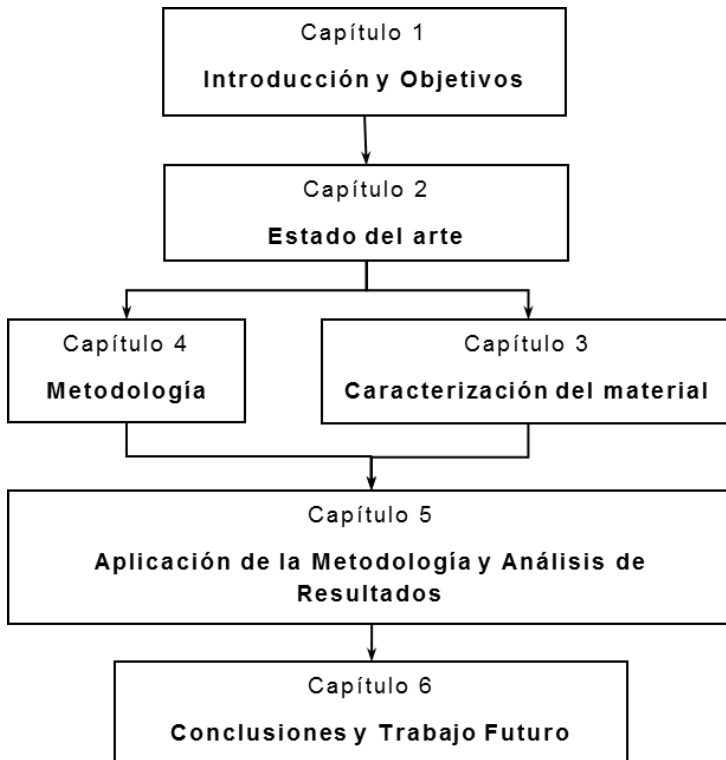
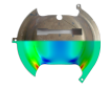


Figura 1.4. *Esquema de interrelación entre los capítulos de la presente Tesis.*





CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del presente capítulo se recogen diferentes trabajos y estudios relacionados, tanto con los diferentes métodos de intercomunicación entre programas de simulación de procesos de estampación de metales y estructurales, como referentes a la necesidad de tener en cuenta los resultados del proceso de conformado en frío, para obtener un nivel de correlación adecuado entre simulaciones y ensayos.

2.2. PROCESOS DE ESTAMPACIÓN

La gran mayoría de los productos metálicos a nivel industrial se obtienen mediante conformado de chapas, los cuales son empleados en diversidad de aplicaciones, desde carrocerías de automóviles, electrodomésticos, aviones hasta envases de bebidas. Este proceso se caracteriza, principalmente, por ofrecer productos acabados de gran resistencia mecánica y peso reducido.

El proceso de estampación implica, en sí, deformaciones plásticas, por lo que el material de la chapa irá cambiando, no sólo de forma, sino de propiedades mecánicas, sin afectar prácticamente al volumen de la chapa original. El objetivo final es alcanzar la forma deseada, sin que en el material se produzca una estricción localizada o la rotura.

La experiencia previa es fundamental en el desarrollo y puesta a punto de los procesos de conformado de chapa. Multitud de pruebas ensayo-error han de realizarse cuanto más nueva o desconocida sea la forma a embutir o el material a emplear. Esto supone, al enfrentarse a nuevos materiales o diseños, un elevado tiempo de puesta a punto del proceso, que se hace incompatible con los actuales requerimientos de tiempo de desarrollo de nuevos productos en automoción.



Es por lo tanto, en este momento, cuando la aplicación de técnicas de simulación por ordenador, mediante el método de los elementos finitos, resulta de capital importancia para ayudar a la predicción de, tanto la fidelidad de la pieza final fabricada respecto al diseño elegido, como del comportamiento del material tras el proceso de fabricación.

La capacidad de las chapas de metal para ser conformadas en frío se avalúa, habitualmente, empleando los Diagramas de Límite de Conformado o *FLD (Forming Limit Diagram)*. La información que proporcionan está relacionada con las limitaciones que presentaría esa chapa de metal ante un proceso de conformado, en función de los diferentes estados de deformación unitaria principal que se presentarán en la misma [1-9], como se muestra en la Figura 2.1. Los criterios de fallo representados en estos diagramas son la estricción localizada o rotura. Estos diagramas se realizan representando las mediciones de deformación que sufre una chapa tras someterla a un proceso de conformado. Son uno de los principales criterios comparativos, a nivel industrial, entre materiales, así como un criterio de fallo ampliamente utilizado, a nivel de simulaciones de estampación por elementos finitos.

La curva del diagrama marca el límite, por debajo del cual las deformaciones no generan el fallo del material. Los pares de combinaciones Deformación mayor-Deformación menor que generen puntos en el FLD por debajo de la curva límite, indican que el material no ha llegado al límite de deformación. Por otro lado, si el punto se sitúa por encima de dicha curva, es muy probable que sí se produzca el fallo del material.

Si bien no es el objetivo de esta Tesis la obtención directa del FLD para la aleación ligera seleccionada, ampliamente estudiada [1], se empleará una de las técnicas habituales para su obtención, el ensayo Marciniak [7-10], para obtener diferentes estados de deformación en chapas embutidas a diferentes profundidades.

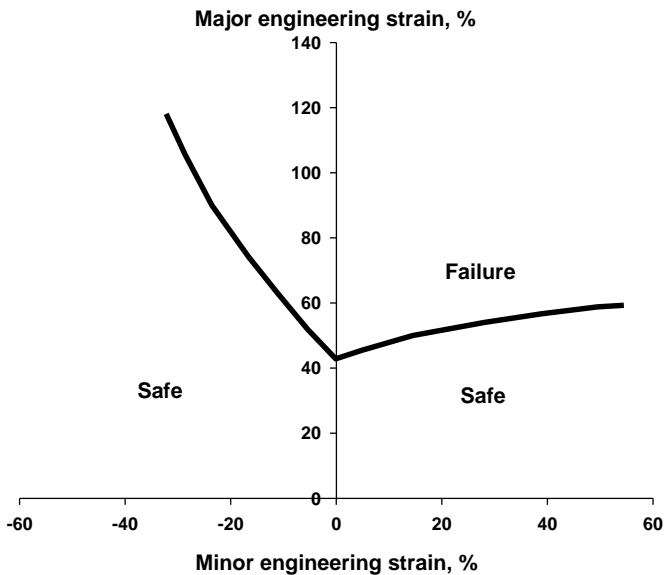
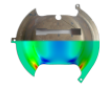


Figura 2.1. Diagrama FLD en el que se muestran las diferentes regiones en función del estado de deformación alcanzado.

2.3. SIMULACIONES ACOPLADAS

El acoplamiento de simulaciones provenientes de diferentes dominios está tomando cada vez más importancia, creciendo día a día, dirigida sobre todo por la evolución de los programas de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE) hacia problemas multi-físicos. En relación a las simulaciones de conformado en frío de metales, se utilizan los estados de tensiones/deformaciones residuales, así como los datos de adelgazamiento/engrosamiento locales de la chapa de origen, para “alimentar”, como dato adicional de entrada, a las simulaciones estructurales que impliquen a la pieza proveniente de ese proceso de conformado en frío. Este proceso se inició utilizándose únicamente en el entorno de programas de simulación denominados *explícitos*, para la simulación de eventos de choque (*crash test*). Dado que los programas de simulación de procesos de estampado en frío de metales usan el mismo tipo de algoritmos explícitos que los de simulación de eventos de choque, el paso de resultados entre ellos era asumible.



Esta necesidad surgió al detectarse discrepancias importantes entre los resultados provenientes de las simulaciones de *crash*, realizadas durante el desarrollo del vehículo, y los primeros ensayos de choque de vehículo completo. Al analizarse en profundidad estas diferencias, se estableció que una de las fuentes de error podría deberse a que, durante las simulaciones, se consideraron las piezas estampadas, tanto con sus espesores nominales como sin histórico de deformaciones debidas al proceso de conformado en frío [11,12].

Es natural que surgiese, primero, un interés por buscar las fuentes de la falta de correlación entre resultados de simulación y sus correspondientes ensayos físicos. Esta búsqueda está en el ADN del ingeniero, planteándose además, en segundo lugar, sobre todo desde el punto de vista del ingeniero de simulación estructural: ¿por qué no estamos aprovechando ese torrente de información que podría obtenerse de las simulaciones del proceso de estampación?

Es aquí donde, en un acercamiento más profundo al desarrollo del proceso de conformado en frío se observa que, en sí mismo, es un proceso de diseño con gran consumo de tiempo, que necesita de un gran número de pasos e iteraciones desde que se fija el diseño geométrico del componente. Si bien las simulaciones de conformado son de gran ayuda para el diseño de la matriz de estampado, reduciendo su tiempo de desarrollo, las simulaciones incrementales, que engloban todo el ciclo de conformado de la pieza, como se muestra en la Figura 2.2, no pueden ser realmente usadas hasta que las geometrías de punzón y matriz hayan sido totalmente congeladas, lo cual sucede en las etapas finales del ciclo de desarrollo del producto [13-33]. De esta manera, no se podrían acoplar los resultados de las simulaciones del proceso de conformado con las simulaciones estructurales hasta unas etapas del desarrollo en las que, cualquier propuesta de rediseño se antoja prácticamente imposible de implementar, no solo por el corto tiempo restante hasta el lanzamiento sino por el elevado coste de las modificaciones en las etapas finales del desarrollo.

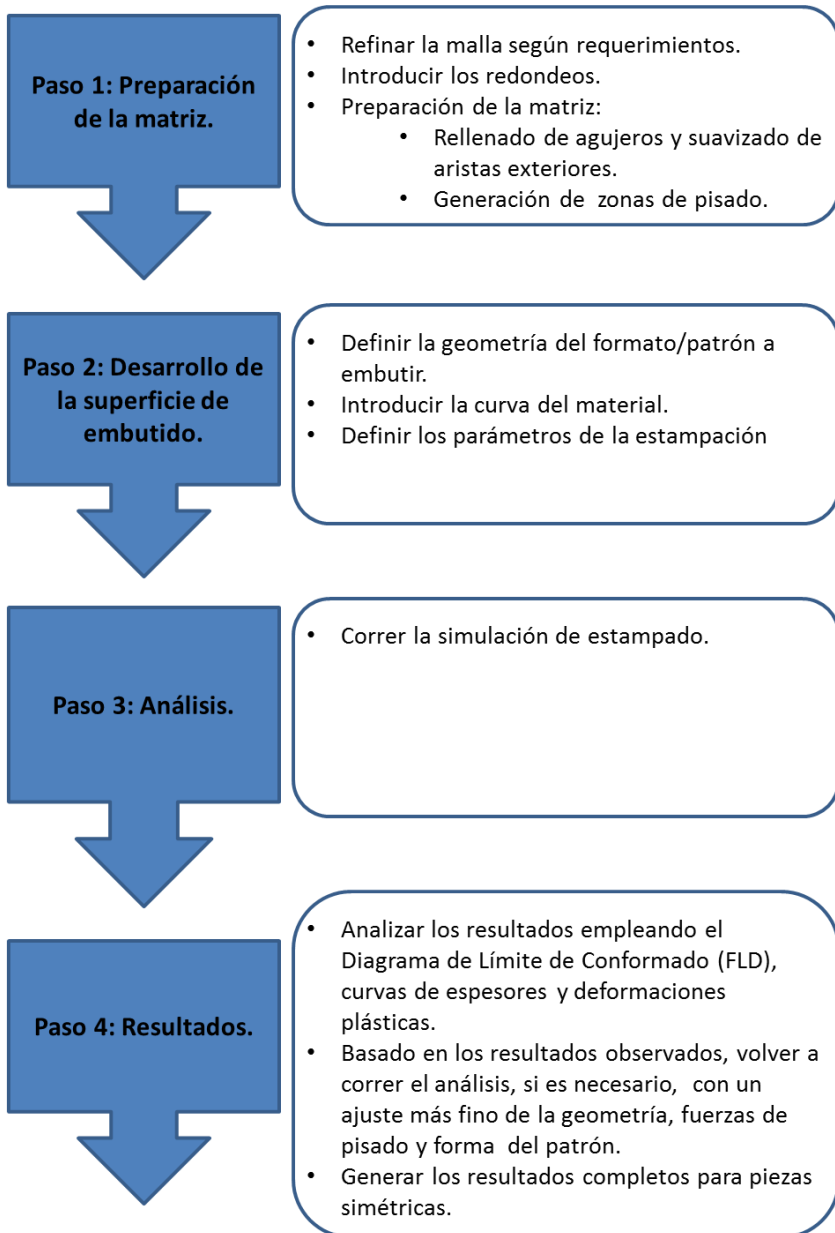
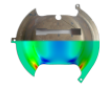


Figura 2.2. Metodología de simulación de conformado incremental.



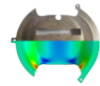
2.4. ANÁLISIS INVERSOS

Adicionalmente, debido a que en la construcción de un automóvil se ven involucrados multitud de diferentes proveedores, usando cada uno su programa preferido de simulaciones de estampación, este manejo no sólo de ingentes cantidades de datos, sino también de multitud de diferentes formatos de salida de los datos, supone un gran esfuerzo de gestión de datos para poder ser estos utilizados como datos de entrada de las simulaciones estructurales.

Para poder “sortear” las limitaciones impuestas por las simulaciones de estampación incrementales, en términos de tiempos de cálculo y entrada en etapas avanzadas del desarrollo, se presenta como alternativa lo que se denomina simulaciones *one-step* o análisis inversos (*Inverse analysis*). Estos análisis son especialmente interesantes por dos importantes razones:

- a. Son muy rápidos, tanto de preparar como de simular.
- b. Pueden ser realizados empleando la misma malla realizada para los análisis estructurales, sin necesidad de hacer re-mallados más finos y, sobre todo, solventando los problemas de “mapeado” de resultados entre diferentes mallas.

Hoy en día, los paquetes de programas comerciales más utilizados para simulaciones de *crash*, como pueden ser ©Altair HyperWorks, tienen implementadas herramientas para la realización de este tipo de análisis inversos. Si bien su principal razón de existencia es dar la posibilidad, a los ingenieros de producto, de disponer de una herramienta para poder realizar análisis de factibilidad de fabricación de manera rápida, en etapas tempranas del desarrollo y sobre cientos de piezas a la vez, algo impensable si se utilizasen las simulaciones de estampación incrementales. De manera adicional, ofrecen resultados de deformaciones plásticas, variaciones de espesor, posibles roturas, formación de arrugas, etc., susceptibles de ser usados como datos de entrada de los



programas de simulación estructural, de manera que se pueda tener en cuenta la afectación del proceso de conformado en frío sobre la pieza estudiada [11,12,34-39].

Estos análisis inversos se utilizan con bastante frecuencia hoy en día, tanto por la industria de estampación, como por ingenieros de simulación estructural ya que, desde sus comienzos, multitud de desarrollos y mejoras se han ido introduciendo, hasta hacerlos suficientemente exactos para que su uso no plantee ninguna duda acerca de la validez de sus resultados [40-42]. Todos sus usuarios habituales son conscientes de que los resultados, sin ser tan cercanos a la realidad como los obtenidos por una simulación de estampación incremental, son de una calidad importante para estudios en las primeras etapas de desarrollo.

De este modo, en la presente Tesis, se utilizarán simulaciones del ensayo de estampación propuesto, con el programa Abaqus Standard®, en el que se representará exactamente el proceso de estampación ensayado, así como análisis inversos de esos mismos ensayos, con el programa © Altair Hyperworks HyperForm, para realizar un comprobación cruzada de resultados.

2.5. SELECCIÓN DEL MATERIAL

En la actualidad, el sector de la automoción muestra un interés especial en el conocimiento del comportamiento mecánico de ciertos componentes fabricados en aleaciones de aluminio, el cual puede ser diferente en función de la zona que se analice. Este interés surge de la necesidad de desarrollar vehículos cada vez con menos peso, para conseguir mayor eficiencia en el comportamiento global frente a consumos de combustible y emisiones contaminantes. Ante esta situación ideal, se plantea el problema de mantener los estándares de seguridad y resistencia mecánica ofrecida por los mismos componentes, altamente estudiados y probados, fabricados en acero.

En ciertos componentes del automóvil, con más altas exigencias de resistencia estructural, se ha optado por aceros



de ultra alto límite elástico llevados a menores espesores generales. En otros componentes en cambio se ha decidido la opción de fabricarlos en aluminio, siendo necesario un rediseño completo de dicho componente en función de las completamente nuevas propiedades del material.

2.5.1. Aleaciones de aluminio

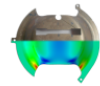
El descubrimiento del aluminio ha supuesto la disponibilidad de un material con características excepcionales de ligereza, ductilidad, resistencia mecánica y a los agentes atmosféricos, inalterabilidad y buena conductividad térmica y eléctrica. Estas características hicieron que el aluminio se convirtiera, rápidamente, en uno de los materiales más empleados en la producción de productos de consumo de gran serie. De hecho, hoy está en segundo lugar, por detrás solamente del acero y cada día va en aumento su utilización.

El aluminio tiene una densidad baja ($2,7 \text{ g/cm}^3$) y es muy dúctil y maleable. Es un material totalmente reciclable y de muy fácil reciclado, gracias a su bajo punto de fusión, lo que permite un gran ahorro de costes respecto a la primera fusión. Es muy buen conductor del calor y la electricidad, pudiendo ser soldado mediante sistemas TIG/MIG.

Respecto a su buena resistencia a la corrosión, reacciona con el oxígeno del aire de manera casi inmediata, dando lugar a una capa superficial de óxido de aluminio (alúmina). Esta capa ejerce un efecto protector ante la corrosión del ambiente, manteniéndose esta capacidad por tiempo ilimitado (al proceso de crear esta capa de manera artificial se denomina *anodizado*).

El Aluminio se puede alear con los siguientes elementos: Mn, Mg, Si, Zn, Cu y Fe, produciendo los siguientes efectos en función del aleante:

- a. Manganeso: aumenta la tenacidad y disminuye la cinética de recristalización.



- b. Magnesio: buena soldabilidad, aumenta la resistencia a la corrosión.
- c. Silicio: resistencia media, buena conformación, aumenta la resistencia a la corrosión y al desgaste.
- d. Cobre: aumenta la tenacidad y disminuye la resistencia a la corrosión.
- e. Zinc: mejora las propiedades mecánicas en combinación con otros aleantes.

Para su mejor clasificación, las aleaciones de aluminio se designan con un número de 4 dígitos, siguiendo la nomenclatura marcada por la *Aluminum Association* [43].

El primer dígito se refiere al tipo de aleación, de acuerdo con el elemento principal de la aleación (Tabla 2.1). El segundo, si es distinto de 0, indica una modificación de las aleaciones específicas en la aleación. Los dos últimos indican la aleación específica de aluminio, dentro de la serie especificada por el primer dígito, o la pureza de éste.

Por ejemplo, en la aleación 5183, el número 5 indica que se trata de la serie de aleación de magnesio, el 1 indica que se trata de la modificación 1ª a la aleación original de 5083, y el 83 se identifica en la serie 5xxx.

La única excepción a este sistema de numeración es con las aleaciones de aluminio serie 1xxx (aluminios puro), en cuyo caso, los 2 últimos dígitos proporcionan el porcentaje mínimo de aluminio por encima del 99%, es decir, aleación 1350 (99,50% de aluminio mínimo).

La designación del temple indica el tratamiento recibido por la aleación hasta conseguir las condiciones y propiedades actuales. El temple se indica con las letras: **O** (Recocido y recristalizado. Endurecimiento con una mínima resistencia y máxima ductilidad), **F** (tal como se fabricó. Sin control sobre la cuantía del endurecimiento por deformación, ningún límite de propiedades mecánicas), **H** (Endurecimiento por deformación en frío) o **T** (Tratado térmicamente para producir endurecimientos estables además de F u O).



Tabla 2.1. Series del aluminio.

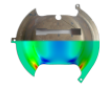
SERIES DE ALEACIÓN	PRINCIPAL ELEMENTO DE ALEACIÓN
1xxx	99,000% mínimo de aluminio.
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio y silicio
7xxx	Zinc
8xxx	Otros elementos

Las aleaciones de aluminio forjado se dividen en dos clases: endurecidas y reforzadas solo con trabajo en frío y las que deben sus propiedades mejoradas al tratamiento térmico.

Las aleaciones más importantes, con capacidad de endurecer al trabajarlas, son el aluminio comercialmente puro (1100) o la aleación (3003) con 1.25% de manganeso. Las citadas aleaciones tienen la capacidad de endurecerse mediante el trabajo en frío sin someterse a tratamiento térmico.

Las aleaciones del tipo duraluminio presentan una gran resistencia mecánica y, en caliente, se trabajan con cierta facilidad. Tras pasar unas cuantas horas desde el temple por inmersión, han de someterse a un largo proceso de trabajo en frío, donde la resistencia a la corrosión es máxima.

La mayoría de las aleaciones tratables térmicamente son menos resistentes a la corrosión. Muchas de las aleaciones susceptibles de tratamiento térmico se encuentran en forma de lámina o con un recubrimiento de aluminio de gran pureza o de aleación resistente a la corrosión en cada lado. Estos productos se conocen como aleaciones *alclad* con excelente resistencia a la corrosión.



Un nuevo tipo de producto de aluminio forjado, denominado APM (*Advanced Pore Morphology*), se caracteriza por presentar una elevada resistencia mecánica a altas temperaturas, una gran estabilidad y resistencia a los fenómenos de termofluencia (*creep*) superiores a las de cualquier aleación conocida de aluminio. Se obtiene compactando un fino polvo de aluminio de alta pureza junto con óxido de aluminio.

El aluminio es susceptible de experimentar endurecimiento por deformación plástica en frío (acritud), que produce un aumento de las características mecánicas y de la dureza del material. Se produce simultáneamente una pérdida de su capacidad de deformación y maleabilidad (más marcado a mayor tasa de acritud).

Para recuperar la aptitud para deformarse se aplican tratamientos de recocido (T^a superiores a 300°C). La estructura evoluciona de una estructura laminar a una estructura recristalizada. Durante la fase de recristalización y en el momento del recocido, el tamaño de grano es susceptible de crecer. El aumento del tamaño de grano reduce las propiedades mecánicas (límite elástico, resistencia, dureza,...). El aumento del tamaño de grano por encima de 100 micras, reduce la capacidad de deformación.

Para evitar el crecimiento del grano y conservar una estructura de grano fino del metal recocido, hay que respetar las siguientes condiciones:

- Asegurarse de que el metal ha sufrido un índice de deformación suficiente, correspondiente a una disminución relativa de la sección de al menos un 15%. Es la acritud crítica, si no se cumple esta condición, hay que limitarse a un tratamiento de recocido sin permitir la recristalización.
- Adoptar una velocidad rápida de aumento de la temperatura: de 20° a 60°C por hora.
- Limitar el nivel de temperatura al intervalo de 350° a 380°C .
- Limitar a dos horas máximo la duración del tratamiento.



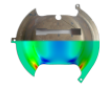
Para las aleaciones de la familia 5000 (Aluminio-Magnesio) 5005, 5050, 5251, 5052, 5754, 5454, 5086, 5083 y 5056, los recocidos se hacen habitualmente en un intervalo entre 345° y 380°C, con una duración de 30 a 120 minutos.

En base a los diferentes niveles de acritud, cómo se ha explicado anteriormente, existen una serie de subdivisiones:

- a. **H1 Acritud solamente:** semiproductos endurecidos por deformación plástica en frío, hasta obtener la resistencia mecánica deseada. Sin tratamiento complementario.
- b. **H2 Acritud + recocido parcial:** semiproductos endurecidos por deformación plástica en frío, hasta obtener la resistencia mecánica superior a la deseada. La resistencia final deseada se obtiene después de un proceso de recocido. Para un mismo nivel de resistencia que el H, presenta mayor alargamiento.
- c. **H3 Acritud + estabilizado:** semiproductos endurecidos por deformación plástica en frío, y cuyas características mecánicas son estabilizadas por un tratamiento térmico a baja temperatura (menor que la del tratamiento de recocido parcial). La estabilización generalmente disminuye la resistencia mecánica y aumenta la ductilidad. Sólo aplicable a las aleaciones que sufren un ablandamiento a temperatura ambiente como las AlMg.

Lo que supone una subdivisión de Grados Finales de acritud:

- **HX2: Estado ¼ duro:** resistencia a la tracción (50%) entre recocido y semiduro.
- **HX4: Estado semiduro:** resistencia a la tracción (50%) entre recocido y duro.
- **HX6: Estado ¾ duro:** resistencia a la tracción (50%) entre semiduro y duro.
- **HX8: Estado duro:** tiene el máximo grado de acritud generalmente utilizado.
- **HX9: Estado extraduro:** su estado excede al estado duro.



Los dígitos impares indicaran estados cuya resistencia a la tracción es la media de las correspondientes a los estados dígitos pares adyacentes.

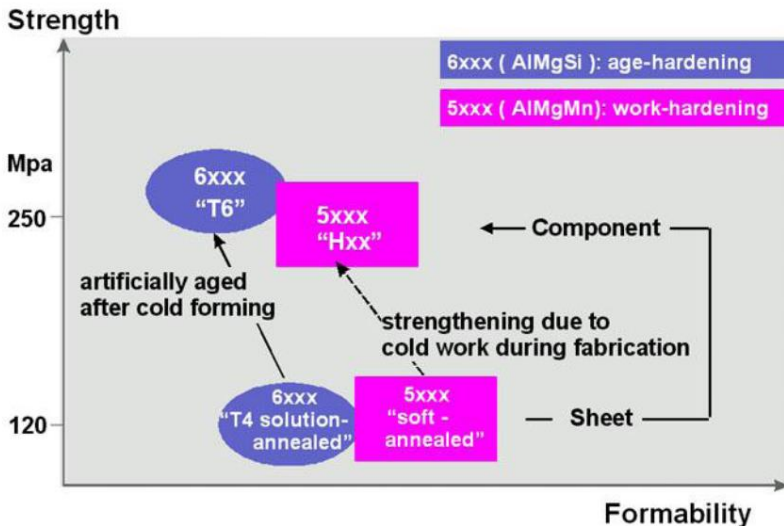


Figura 2.3. Ejemplo de relación propiedades mecánicas-formabilidad para las series 5 y 6.

La Figura 2.3 representa de forma gráfica dónde se sitúan, tanto las series 6xxx como las 5xxx, respecto a su capacidad de ser conformados y su resistencia en función de los tratamientos térmicos recibidos.

Para el desarrollo de esta Tesis se ha empleado una aleación de aluminio de la serie 5XXX, con las siguientes características generales a modo de resumen:

- No tratable térmicamente.
- El Magnesio es el aleante principal (hasta un 5%).
- A mayor contenido de Magnesio mayor dificultad para deformarse.
- Alta resistencia a corrosión, especialmente en ambientes salinos.
- Muy buena soldabilidad.



- Buena para laminación en aplicaciones para automoción y aplicaciones marinas.

Aplicaciones:

- En forma de placa o lámina se usan en la industria del transporte en carrocerías, tanques o escaleras.
- Son ideales para cuerpos de embarcaciones marítimas, para la fabricación de carros de ferrocarril o de trenes urbanos.
- Fabricación de envases abre-fácil para bebidas gaseosas y en general para aplicaciones estructurales.



CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

3.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, debido a la especial coyuntura mundial, tanto desde el punto de vista de fuentes alternativas de combustible, provocadas no sólo por la escasez, sino también por el encarecimiento paulatino de los combustibles fósiles tradicionales, como de la delicada relación entre industria y medioambiente, el sector del automóvil se ha erigido como punta de lanza, tanto en la innovación respecto a vehículos más ligeros, más reciclables y que incorporen sistemas de tracción totalmente independientes de los combustibles fósiles, como en mejorar esa relación con el medioambiente, ya incluso con los actuales motores de hidrocarburos.

Independientemente de que en los próximos años, los vehículos eléctricos, además de la innovación en sus sistemas de tracción, supongan una innovación en cuanto a capacidad de reciclado de sus componentes y ligereza de los mismos, esos mismos conceptos empiezan ya a aplicarse en los actuales automóviles, ya que si bien los motores tradicionales han dado un gran salto en cuanto a disminución de consumos y emisiones, estos se han visto ayudados por la construcción de, cada vez, componentes más ligeros, pero garantizando los mismos requerimientos de resistencia estructural y seguridad que sus antecesores.

Situados en este escenario, el sector de la automoción reclama constantemente componentes de vehículos más ligeros y reciclables que sean capaces de mantener los actuales requerimientos de resistencia y seguridad o incluso mejorarlos, a través del uso de materiales y aleaciones más ligeras, junto con diseños optimizados para poder cumplir con los objetivos estructurales planteados para esos componentes tras su “reconversión” a componente ligero.



En consecuencia, la elección del material empleado en la presente Tesis se ha realizado en base al interés que presenta para la elaboración de elementos metálicos embutidos en automoción, con el fin de aligerar estos elementos respecto a sus versiones anteriores, realizadas en acero. En particular, este material se emplea en la construcción de carriles guía de mecanismos de elevallunas.

En este capítulo se muestra la caracterización realizada para el material seleccionado, el cual ha sido una aleación de aluminio-magnesio AW 5083 O/H111.

3.2. MATERIAL

El material seleccionado se presenta en placas laminadas que fueron suministradas en dimensiones de 500x500 *mm* y 1.5 *mm* de espesor, provenientes de un proceso de laminación en frío, lo que supone unas propiedades mecánicas de acuerdo a las mostradas en la Tabla 3.1. según los datos suministrados por el proveedor. Su composición química se muestra en la tabla Tabla 3.2.

Tabla 3.1. *Propiedades mecánicas AW5083 según datos del proveedor.*

PROPIEDADES MECÁNICAS	VALOR
Dureza, Brinell	73-75
Tensión última de tracción (<i>MPa</i>)	270-275
Límite elástico (<i>MPa</i>)	115-125
Elongación A_{50} (%)	15-16
Módulo elástico en tensión (<i>MPa</i>)	70000

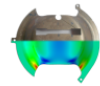


Tabla 3.2. *Composición química en % de la aleación de aluminio AW 5083 O/H111.*

Mn	Si	Cr	Cu	Pb	Fe	Ti	Mg	Al
0.436	0.186	0.083	0.063	0.016	0.393	0.012	4.449	Resto

Respecto a este material y según lo expuesto a este respecto en el Capítulo 2, al ser una aleación perteneciente a la serie 5 y tener al magnesio como elemento de aleación principal, hasta un 5%, este material presenta mayor dificultad para deformarse, ofreciendo a cambio un buen comportamiento en ambientes húmedos y salinos además de una buena soldabilidad.

Debido al método de fabricación de las placas empleadas, laminadas en frío, es de esperar, a priori, y a lo largo de la dirección de laminación de dichas placas, un comportamiento mecánico diferente al de la dirección perpendicular al laminado y a lo largo del espesor. Tras una observación de la microestructura en un microscopio óptico (Figura 3.1) se observa que la orientación del grano en la matriz no muestra una dirección predeterminada (L o T), viéndose con claridad los cuboides de silicio. Esto permite presuponer ya un comportamiento prácticamente isótropo.

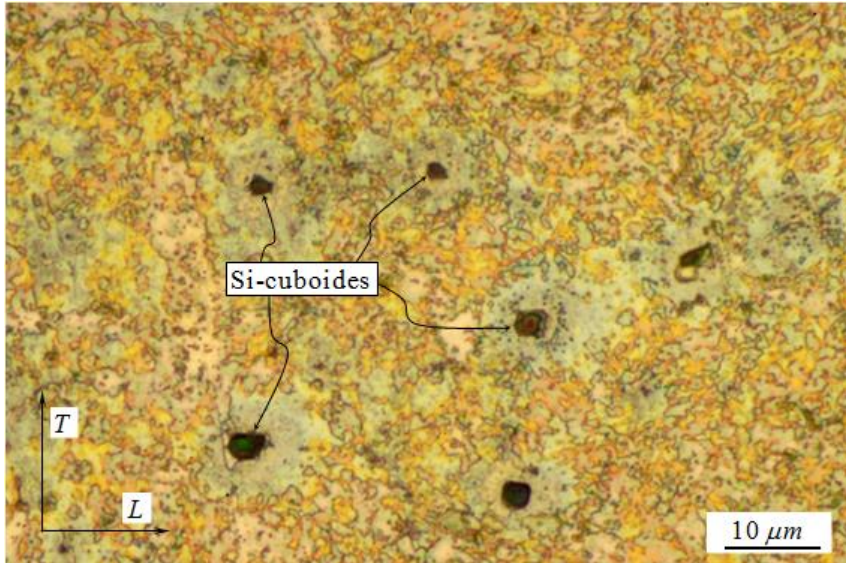


Figura 3.1. Microestructura de la aleación de aluminio AW 5083 O/H111.

3.3. COMPORTAMIENTO EN TRACCIÓN UNIAXIAL

La caracterización del comportamiento del material en tracción se ha efectuado mediante el ensayo de probetas convencionales siguiendo la norma ASTM:E8M [44]. La Figura 3.2 muestra las dimensiones normalizadas de la probeta empleada. El tratamiento de la curva tensión-deformación ha permitido conocer los parámetros elasto-plásticos referentes al módulo de elasticidad E , el límite elástico al 0.2% $\sigma_{0.2}$, la tensión última σ_{UTS} y la máxima elongación a rotura ε_{rot} . Además se ha determinado la curva tensión-deformación real, que ha sido extrapolada para grandes deformaciones para su utilización en las simulaciones numéricas que sean necesarias posteriormente. Además, se ha aproximado la zona plástica, de la curva ingenieril, desde el valor de $\sigma_{0.2}$ hasta el valor de σ_{UTS} empleando a este efecto una aproximación mediante una ecuación potencial de constante K y exponente n .



El límite elástico en el ensayo de tracción uniaxial (en condiciones de suministro del material) fue determinado por el método del *offset*, como se describe en la sección 7.7.1 de la E8M, el cual consiste en realizar una línea paralela a la pendiente elástica de la curva tensión-deformación para el correspondiente nivel de deformación y determinar el punto de corte en la citada curva.

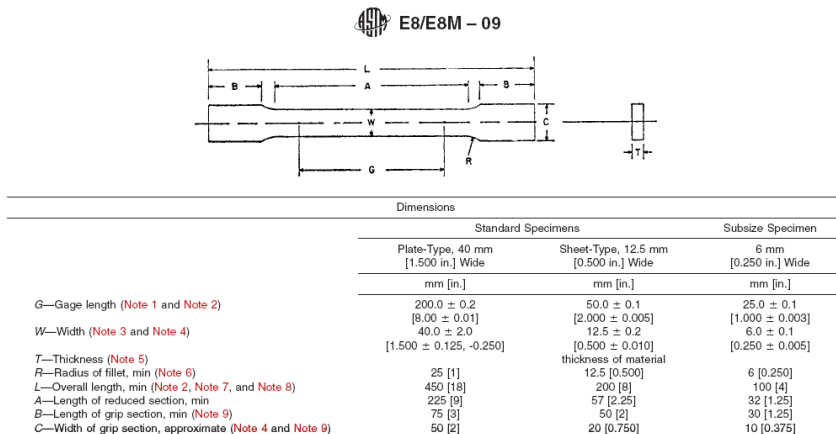


Figura 3.2. Dimensiones normalizadas de probeta para el ensayo de tracción [38].

Todos los ensayos de tracción uniaxial fueron realizados usando una máquina universal de ensayos MTS Criterion® 43 junto con un extensómetro láser de 150 mm de rango de medida. En la Figura 3.3 puede observarse el sistema montado y preparado para un ensayo de tracción uniaxial.

Para la determinación de las propiedades del material en condiciones de suministro, se han cortado mediante electroerosión probetas en tres direcciones, como se muestra en la Figura 3.4. Se dispondrá así de probetas en la dirección de laminación (Longitudinal o L), en la dirección perpendicular a esta (Transversal o T) y a 45 grados (45).



Figura 3.3. Montaje del sistema de ensayos de tracción uniaxial.

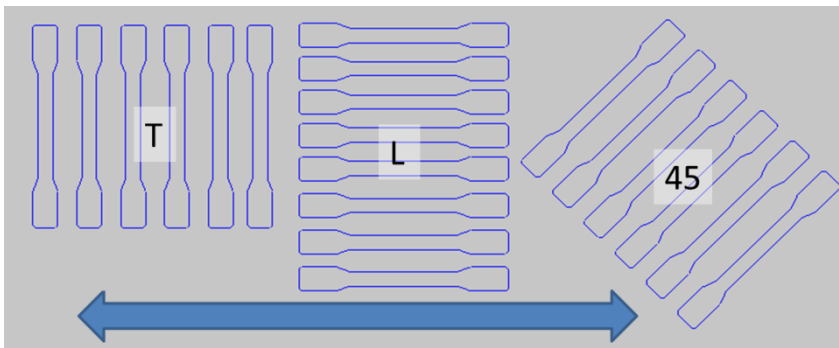
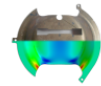


Figura 3.4. Disposición de las probetas extraídas de las placas suministradas de AW 5083. La doble flecha indica la dirección de laminación de las placas.



Esto permitirá conocer las propiedades reales del material suministrado, de capital importancia ya que será uno de los datos de entrada para las simulaciones del ensayo Marciniak de embutición tal y como se verá más adelante. Esto además, al conocerse el comportamiento en estas direcciones del material, permitirá decidir si finalmente se considera el material como isótropo o no en los programas de simulación.

Las curvas características tensión-deformación ingenieril obtenidas en el ensayo de tracción para las probetas L, T y 45, descritas anteriormente, se muestran en la Figura 3.5. A partir de estas curvas es posible obtener las curvas tensión-deformación verdadera (Figura 3.6).

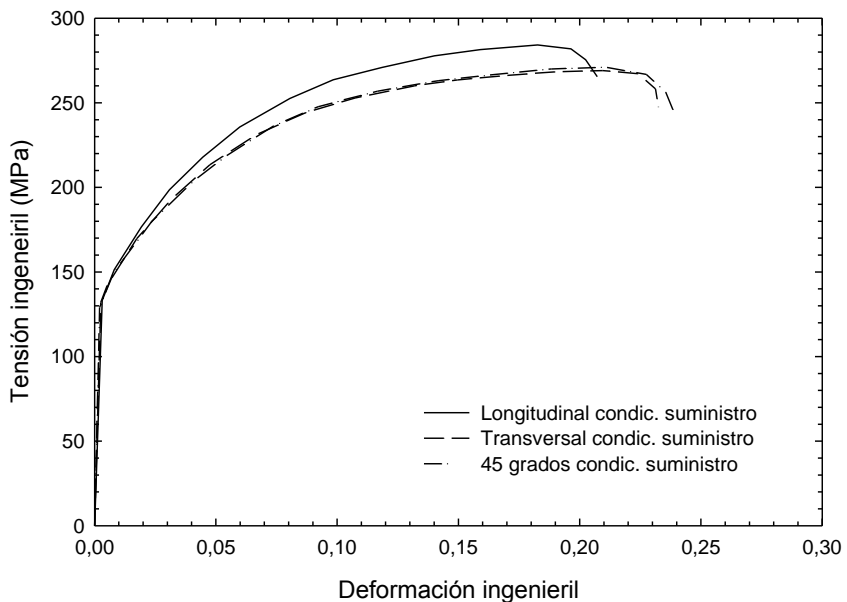


Figura 3.5. Curvas tensión-deformación ingenieril del AW 5083 O/H111 en condiciones de suministro.

En cuanto al ajuste de la zona plástica, en los modelos mecánicos, es preferible usar una ley empírica simple para aproximar la curva tensión-deformación (o la curva de endurecimiento por deformación). Para este estudio y dado que



se pretende obtener estos coeficientes descritos anteriormente, se ha de poder representar la curva en su zona plástica completamente con los seis parámetros obtenidos. De esta manera se hace necesario el uso de una ley empírica que aproxime ese tramo de la curva.

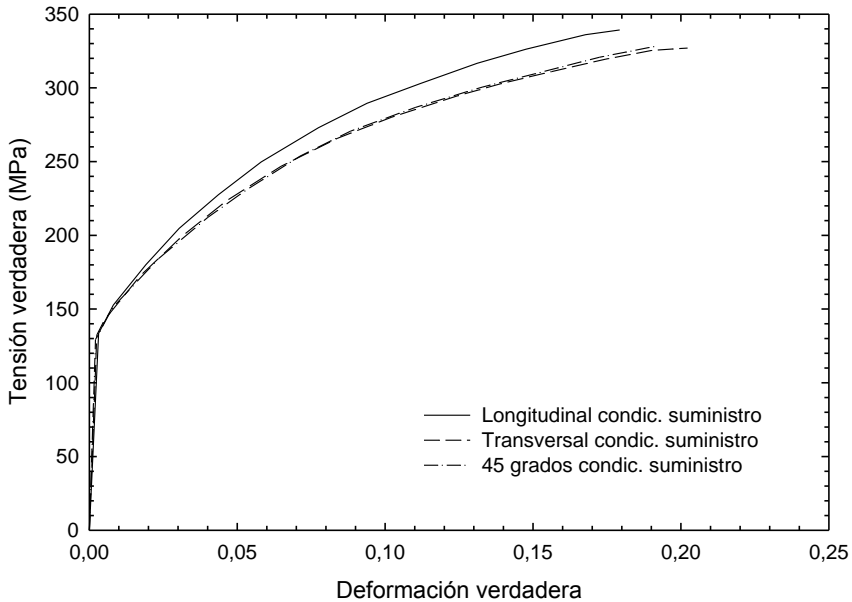
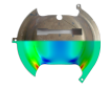


Figura 3.6. Curvas tensión-deformación verdadera del AW 5083 O/H111 en condiciones de suministro.

Una de las relaciones más comunes para representar este tramo plástico es la obtenida mediante ajuste de datos experimentales con una ecuación del tipo mostrado en la expresión (3.1), en el que el exponente n se denomina *coeficiente de endurecimiento por deformación* y K *coeficiente de dureza*. Esta ecuación empírica es ampliamente conocida como Ley Potencial o Ley de Hollomon.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (3.1)$$

Esta ley proporciona una aproximación bastante exacta de la curva tensión-deformación, salvo para la zona de régimen elástico y durante las primeras etapas de la deformación



plástica, ya que por su definición, esta ley predice tensiones nulas y una pendiente de la curva infinita al nivel de deformación cero.

Como alternativa se plantea la Ley de Swift, dada por la expresión (3.2), empleada para materiales que han sido endurecidos en un proceso anterior ya que esta constante ε_0 , llamado pre-deformación, indica una traslación de esa magnitud de deformación en el eje de deformaciones. En la Figura 3.7 puede observarse la representación del ajuste mediante estas leyes (línea sólida) frente a la curva experimental (línea discontinua).

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (3.2)$$

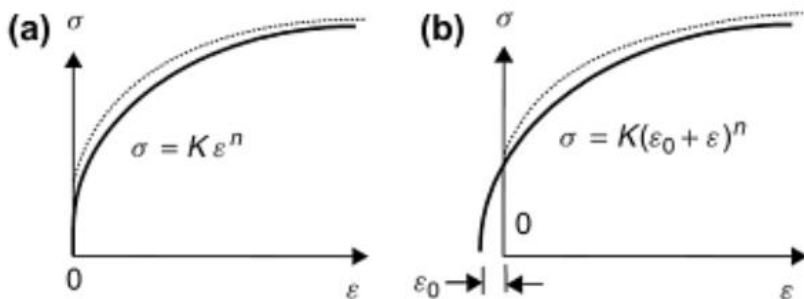


Figura 3.7. Leyes de ajuste empíricas ajustando una curva experimental (a) Hollomon, (b) Swift.

En el presente trabajo se empleará el ajuste mediante la ley de Hollomon al no tenerse en cuenta ese offset ε_0 en las deformaciones y ajustarse directamente la curva plástica a partir del valor de $\sigma_{0.2}$.

En la Figura 3.8 se muestra además un ejemplo de la aproximación de la zona plástica, de la curva ingenieril, a través de una ecuación potencial de parámetros K y n .



La ecuación de aproximación de la zona plástica es de acuerdo a la mostrada en la ecuación 3.1, para valores de deformación total entre el correspondiente al límite elástico y el máximo de la tensión ingenieril.

El valor del parámetro E es el correspondiente a la pendiente del tramo elástico de la curva tensión-deformación ingenieril, el valor de $\sigma_{0.2}$ se ha determinado trazando una recta paralela al tramo elástico de la curva anterior que pase por un valor de deformación del 0.2%, σ_{UTS} es el máximo valor de la tensión ingenieril a partir del cual comienza la estricción en la probeta y el valor de ϵ_{rot} corresponde al instante de rotura de la probeta, representado por la caída vertical al final de cada curva.

Los parámetros característicos del ensayo de tracción (E , $\sigma_{0.2}$, σ_{UTS} y ϵ_{rot}) además de los del ajuste de la zona plástica K y n , se recogen en la Tabla 3.3 para las probetas L, T y 45.

Tabla 3.3. *Parámetros ingenieriles elasto-plásticos medios del AW5083 en condiciones de suministro.*

PARÁMETROS ELASTO-PLÁSTICOS						
PROBETA (ensayadas)	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot} (%)	K	n
Long. L (5)	52749 ±4209	136.18 ±5.13	287.30 ±4.43	0.21 ±0.022	416.7 ±6.5	0.2059 ±0.006
Trans. T (5)	51768 ±3274	138.51 ±1.45	272.37 ±3.54	0.23 ±0.036	377.2 ±5.8	0.1886 ±0.005
45 (5)	64070 ±2139	138.63 ±2.62	273.46 ±4.5	0.24 ±0.032	385.5 ±6.2	0.1966 ±0.005

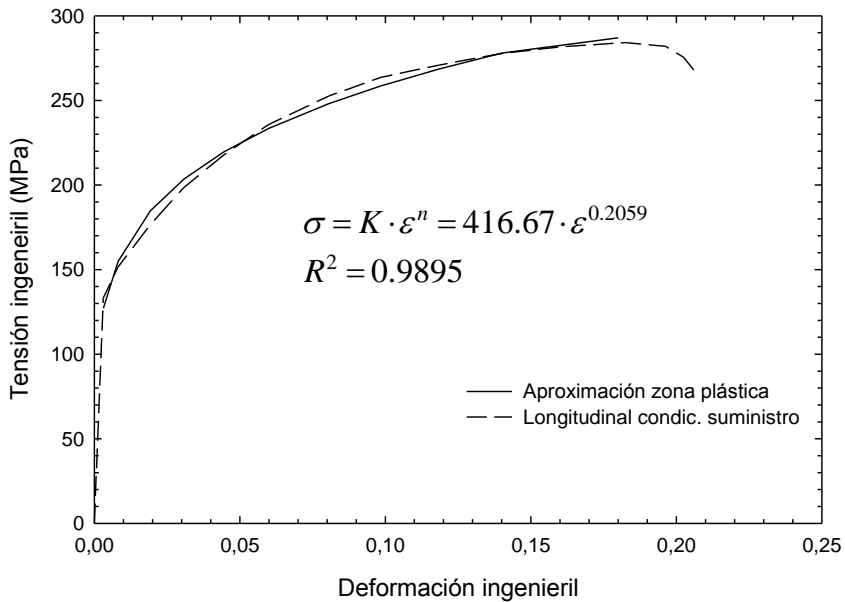
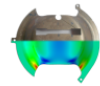


Figura 3.8. *Curvas tensión-deformación ingenieril y su ajuste de la zona plástica mediante la ley potencial.*

3.4. ANISOTROPÍA PLÁSTICA

Cuando se pretende someter al material bien a procesos de embutición o bien de corte mediante estampado, el comportamiento del material se ve altamente influido por el grado de anisotropía plástica. Esta característica, la anisotropía, en los materiales indica que estos presentan propiedades mecánicas diferentes en función de la dirección en la que se están midiendo dichas propiedades.

La causa de que aparezca este fenómeno de anisotropía en los metales se debe comúnmente a que los granos del cristal se orientan de manera preferencial, teniendo tendencia a determinadas orientaciones cristalográficas. Estas estructuras de los cristales del material vienen condicionadas tanto por su composición química, como por el proceso de fabricación de las placas (laminado en frío o en caliente), así como de los tratamientos térmicos, etc. [45].



Para poder evaluar esa diferencia de propiedades en el comportamiento plástico del material, en función de la dirección, se emplea el coeficiente de Lankford [46], R , el cual viene definido por el ratio entre la deformación sufrida a lo ancho, ε_w , dividida por la reducción del espesor, ε_t , durante el ensayo de tracción uniaxial (Figura 3.9, ecuación 3.3).

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (3.3)$$

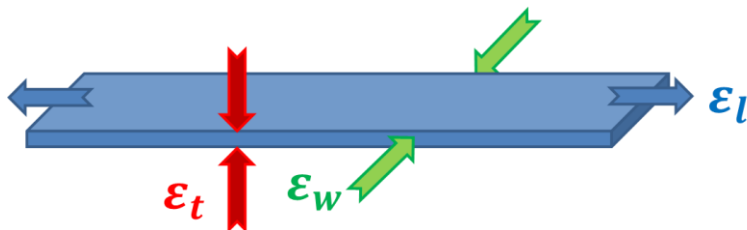
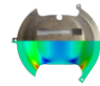


Figura 3.9. Valores para la determinación del coeficiente de anisotropía plástica.

Tras el proceso de laminado, las chapas metálicas suelen tener diferentes grados de anisotropía plástica. Este coeficiente ha de ser evaluado, según la ecuación 3.3, en las diferentes direcciones del material, siendo lo más habitual la obtención de R_0 , R_{90} y R_{45} (Figura 3.10) en las direcciones Longitudinal (dirección de laminado), Transversal (perpendicular a la dirección de laminado) y a 45 grados, respectivamente, mediante ensayos de tracción uniaxial descritos en la norma ASTM E517 [46], según las probetas normalizadas mostradas anteriormente al inicio del capítulo. En este ensayo se somete a la probeta a una tracción hasta un valor de deformación establecido, con lo que se obtiene un valor constante del parámetro R . En particular se ha sacado el valor medio a deformaciones plásticas equivalentes entre 5 y 15%. La anisotropía normal, \bar{R} , se corresponde con el valor medio de los medidos en las diferentes direcciones, según la ecuación 3.4. Además puede evaluarse la variación de la anisotropía plástica normal, $\Delta\bar{R}$, según varía el ángulo de la dirección de laminación, empleando la ecuación 3.5.



$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3.4)$$

$$\Delta\bar{R} = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (3.5)$$

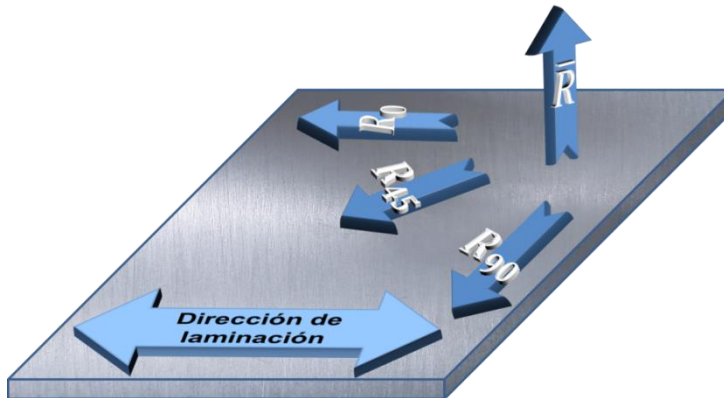


Figura 3.10. Determinación de los parámetros de Lankford.

El valor de la anisotropía plástica normal, \bar{R} , es una buena medida de la capacidad para ser embutido de un material. En los ensayos de embutición profunda con punzones cilíndricos, la mayoría de la deformación tiene lugar en el reborde superior de la muestra. Valores más elevados de anisotropía plástica normal no solo incrementan el flujo plano en este reborde sino que además disminuyen el adelgazamiento en la pared vertical de la muestra embutida, retrasando la aparición del estrechamiento. Por lo tanto, cuanto más alto es el valor de la anisotropía plástica normal, es posible alcanzar mayores profundidades de embutición [47,48].

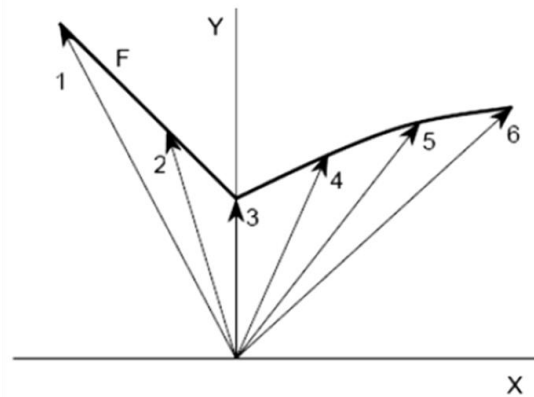
3.5. ENSAYO DE EMBUTIBILIDAD

En el campo de la caracterización del comportamiento mecánico de los materiales, para estimar sus capacidades de ser conformado en frío, mediante embutición, son ampliamente utilizados los ensayos normalizados UNE-EN_ISO_12004-2 [10] para la determinación del Diagrama de Límites de Conformado (*FLD*), como se ha expuesto en el Capítulo 2. Estos diagramas



cubren estados de deformación desde tensión uniaxial hasta tensión biaxial a través de un estado de deformación plana.

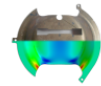
Durante la elaboración de los diagramas FLD, los caminos que sigue la deformación son lineales, es decir, la relación entre la deformación principal menor, ε_{II} , respecto a la mayor, ε_I , se mantiene constante durante el proceso de deformación (Figura 3.11). De esta manera, para poder representar la curva límite entre estado seguro y fallo, dentro del FLD, habrán de prepararse diferentes caminos de deformación, desde tensión biaxial hasta uniaxial. Cada estado de deformación o camino presentará el fallo a un nivel concreto del par $(\varepsilon_I, \varepsilon_{II})$. El conjunto de todos estos puntos generará la curva límite del FLD.



Caminos

- | | |
|--|--|
| Tensión uniaxial $\varepsilon_{II} \approx -0.5 \cdot \varepsilon_I \rightarrow 1$ | ε_I Deformación Principal Mayor |
| Deformación plana $\rightarrow 3$ | ε_{II} Deformación Principal Menor |
| Deformación biaxial $\varepsilon_{II} = \varepsilon_I \rightarrow 6$ | |
| Deformación intermedia $\rightarrow 2, 4$ y 5 | |

Figura 3.11. Caminos de deformación durante la elaboración de la curva límite del FLD [10].



En la norma UNE-EN_ISO_12004-2 [10] se describen los dos tipos de ensayos más comunes en este ámbito, como son el ensayo de Nakajima y el ensayo de Marciniak. La principal diferencia entre ambos métodos radica en el tipo de punzón empleado. En el Nakajima se emplea un punzón semi-esférico mientras que en el Marciniak, el punzón es la base de un cilindro. Ambos pueden verse en detalle en las Figuras 3.12 y 3.13 respectivamente.

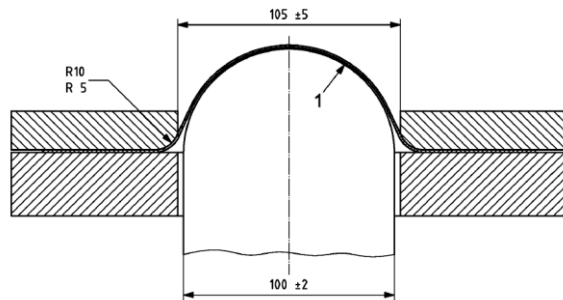


Figura 3.12. Sección transversal del útil empleado en el ensayo Nakajima [10].

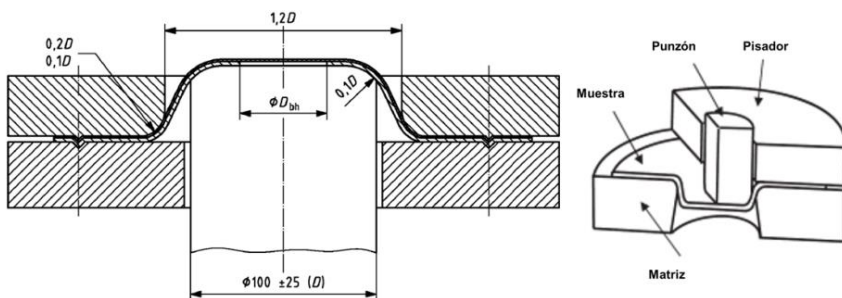


Figura 3.13. Sección transversal y esquema del útil en el ensayo Marciniak [10].

Para la realización de esta Tesis se ha decidido emplear el ensayo Marciniak ya que permite disponer de una zona prácticamente plana, en la zona central embutida de la probeta, trabajando en tensión plana (Figura 3.14) [4], de la que se puede, posteriormente, extraer probetas de tracción uniaxial que permitirán caracterizar el material para diferentes niveles de predeformación.

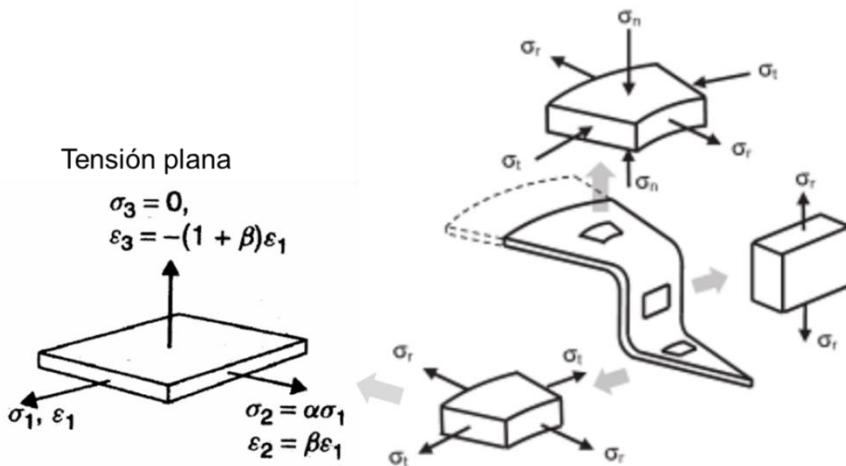


Figura 3.14. Estados de deformación generados durante la embutición usando el método Marciniak [4,10].

Para la realización de estos ensayos, se emplearon dos equipamientos:

- Prensa hidráulica de doble acción, con 1500 y 500 kN de capacidad de embutido en los pistones superior e inferior respectivamente. El pistón inferior se encarga de evitar el deslizamiento del material y conseguir así su estiramiento. El pistón superior se usa para deformar las muestras. Esta instalación permite, para la medida de la deformación, emplear el sistema ARAMIS® GOM mbh, el cual, mediante el uso de dos cámaras y un pintado estocástico de la probeta, permite medir la deformación de la superficie de la muestra.
- Sistema de ensayo MTS 810@ modelo 318.25 al que se acopló un utillaje diseñado y construido *ad-hoc*. En las Figuras 3.15 y 3.16 se muestran tanto el utillaje diseñado para los ensayos Marciniak como el montaje definitivo en el sistema de ensayo. En el utillaje diseñado, la base hexagonal sirve como estructura portante de un horno de alta temperatura que sería acoplado en el caso de realizar ensayos Marciniak a temperatura.

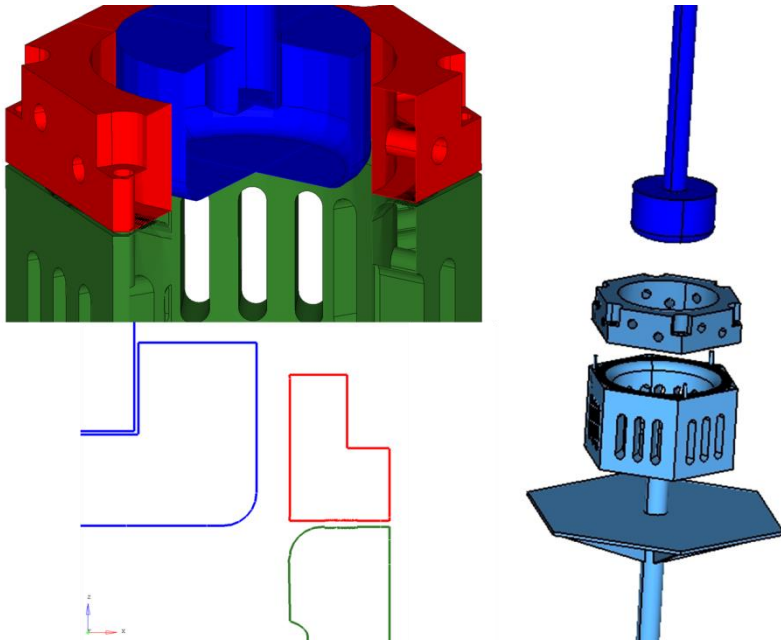
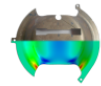


Figura 3.15. *Utillaje diseñado para el ensayo Marciniak.*



Figura 3.16. *Montaje del sistema de ensayos para el ensayo Marciniak.*



El primero de ellos se ha empleado para las embuticiones de las muestras biaxiales, al disponer del sistema de medición ARAMIS® GOM mbh, estas se marcan con una pintura estocástica. Dicho patrón es de generación sencilla y permite que, las dos cámaras del sistema, tomen imágenes a una frecuencia predefinida durante el ensayo de embutición. Estas imágenes son procesadas por el software permitiendo conocer, en cualquier instante del proceso, las deformaciones mayor y menor así como la reducción de espesor (Figura 3.17). Este método es realmente interesante para la definición de la curva límite de conformado, ya que permite analizar, en todo momento, el camino de deformación que se sigue durante el ensayo.

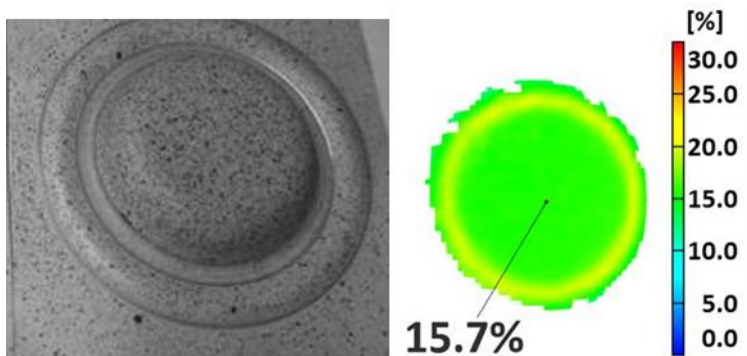
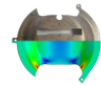


Figura 3.17. *Ejemplo de medida de la deformación proporcionado por el sistema ARAMIS para la probeta Marciniak biaxial.*

Para el resto de embuticiones se ha utilizado el segundo equipamiento (Figuras 3.15 y 3.16) y se ha usado un método similar al clásico [5,7] basado en el empleado por Hecker [9] (Figura 3.18) para la medición de las deformaciones en las probetas Marciniak. En particular, Hecker empleó una malla de puntos que se plasma en la chapa mediante métodos foto o electro-químicos. Habitualmente se emplean patrones de círculos en los que, manteniendo la hipótesis de volumen constante durante la deformación, se establece la deformación en la superficie relacionando las dimensiones de los diámetros



de estos círculos antes y después del proceso de embutición (Figura 3.19). Estos métodos estáticos ofrecen menos resolución que el sistema anterior para la definición de la curva límite del FLD al considerarse sólo el estado inicial y final de la pieza. Para esta Tesis, en el que el objetivo no es la obtención de dicha curva, sino la generación de varios estados de deformación intermedios sin llegar a dicho límite de fallo, son más que adecuados.

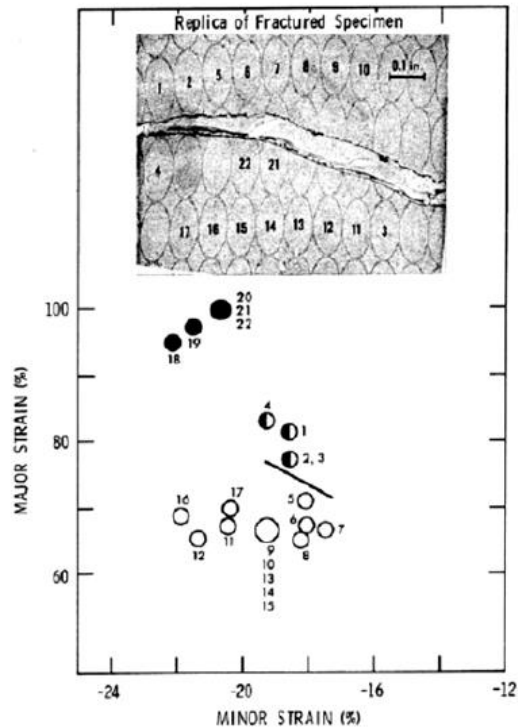


Figura 3.18. Estado de la malla deformada empleada por Hecker para determinar la deformación superficial [9].

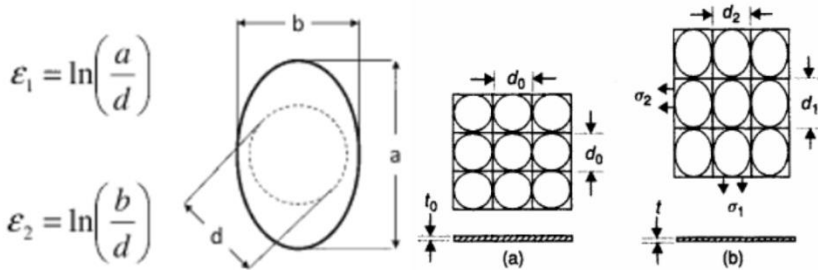


Figura 3.19. Medida de las deformaciones principales en la superficie de la muestra embutida mediante patrón de círculos [5,7].

Una vez definidas, en base al método anterior, las deformaciones principales mayor y menor, estas se llevan al diagrama FLD para su completa definición. En la Figura 3.20 se muestran los diferentes estados de deformación plasmados en el diagrama, así como la configuración original y deformada de los patrones circulares.

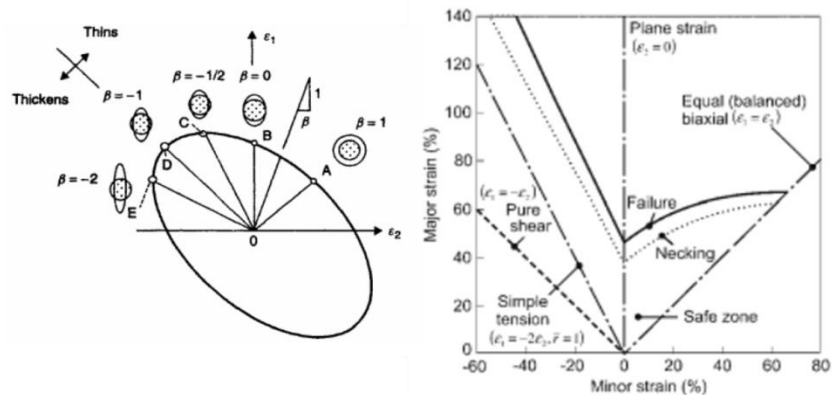
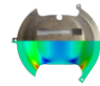


Figura 3.20. FLD con los diferentes estados de deformación representados [5,7].

El método empleado en la presente Tesis es similar al descrito ya que, en vez de marcar círculos, se ha marcado un patrón de nueve puntos, dispuestos en una cuadrícula de 40x40 mm, perfectamente centrada en cada muestra a embutir. Cada punto está separado 20 mm entre sí. Esto se debe a que, como uno



de los objetivos es contrastar los valores de los ensayos con los obtenidos de las simulaciones de elementos finitos de cada uno de esos ensayos, se marcarán nodos en la malla de elementos finitos en las mismas posiciones de los puntos de esta rejilla (Figura 3.21). De esta manera, la comparación del desplazamiento de esos puntos es directa, pudiéndose además emplear estos mismos puntos para realizar una medición similar a la de los círculos.

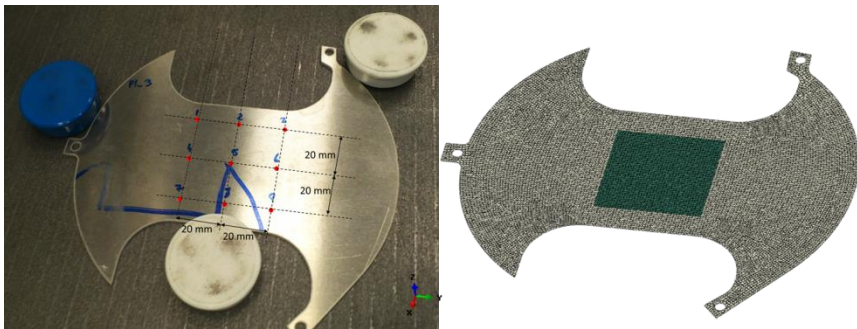


Figura 3.21. Ejemplo, para una de las probetas Marciniak, de la rejilla de control para medir las deformaciones.

Los datos de deformación de esta rejilla se tratarán asumiendo que hay círculos inscritos dentro de las celdas definidas por esa rejilla. Para cada rejilla, se emplearán las ecuaciones (3.6) a (3.10) de acuerdo a lo explicado anteriormente. Los valores empleados son d_o como el diámetro original de cada círculo, d_{ik} como la distancia original entre los puntos i y k y d'_{ik} como la distancia tras la deformación entre los puntos i y k . Debido a que el estado de deformación generado en la zona de la rejilla se corresponde a tensión plana y por el tipo de ensayo llevado a cabo, las tensiones principales en el plano se corresponderán con los ejes mostrados en la Figura 3.22. La correspondencia será $\varepsilon_I = \varepsilon_y$ y $\varepsilon_{II} = \varepsilon_x$.

$$d_o = \frac{d_{12} + d_{45} + d_{14} + d_{25}}{4} \quad (3.6)$$

$$a = \frac{d'_{12} + d'_{45}}{2} \quad (3.7)$$



$$b = \frac{d'_{14} + d'_{25}}{2} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_I = \ln\left(\frac{a}{d_o}\right) \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{II} = \ln\left(\frac{b}{d_o}\right) \quad (3.10)$$

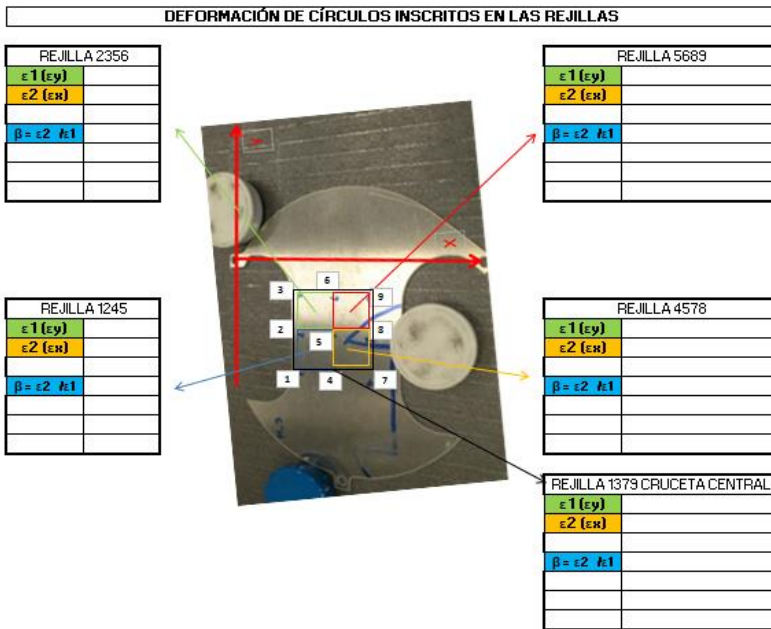


Figura 3.22. Plantilla para el cálculo de las deformaciones en función de las distancias medidas entre los puntos de la rejilla.

Las medidas de los desplazamientos de los puntos de la rejilla se han tomado con dos dispositivos.

Uno de los sistemas empleado ha sido una máquina tridimensional Brown&Sharpe VENTO-C® 50x16x20, controlada por el software metrolog XG® de Metrologic. En la Figura 3.22 se puede ver el sistema de referencia empleado para las mediciones, en la que pueden verse los ejes X e Y. Este dispositivo realiza un control dimensional de las probetas antes



y después de la embutición, dando como resultado las coordenadas X, Y y Z de cada punto controlado en base a un sistema de referencia definido al comienzo (Figura 3.23).


 Export from Metrolog XG		Actual	Nominal	Tol -	Tol +	Dev	Out
		Feature: Punto Name: 1					
	D.N.						
	X	45.32	45.025				
	Y	-58.199	-57.633				
	Z	9.28	-0.004				

Figura 3.23. Ejemplo de salida de coordenadas para un punto de la rejilla, medido con MetrologXG.

El otro sistema empleado para la adquisición de las dimensiones de las probetas y obtener, a partir de ellas, su deformación, ha sido el sistema TRITOP Deformation® GOM mbh. Este sistema realiza mediciones de coordenadas mediante fotografía, referenciadas, en alta resolución que son procesadas por un software. Este detecta, mediante diferentes puntos y dispositivos de referencia y calibración colocados alrededor de la muestra, aquellos puntos marcados de interés. Finalmente, proporciona, como una de las salidas posibles, los incrementos de desplazamiento relativo entre puntos respecto a un sistema de referencia pre-establecido. En la Figura 3.24 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos mediante este sistema, con el estado antes de deformar y el estado ya deformado, con vectores indicando las direcciones de desplazamiento y valores de incremento de desplazamiento para cada punto. En esa figura se aprecian los puntos de control alrededor de la muestra a medir, así como la cruceta



usada para definir el sistema de referencia. Los ejes de referencia se alinean como en el sistema anterior.

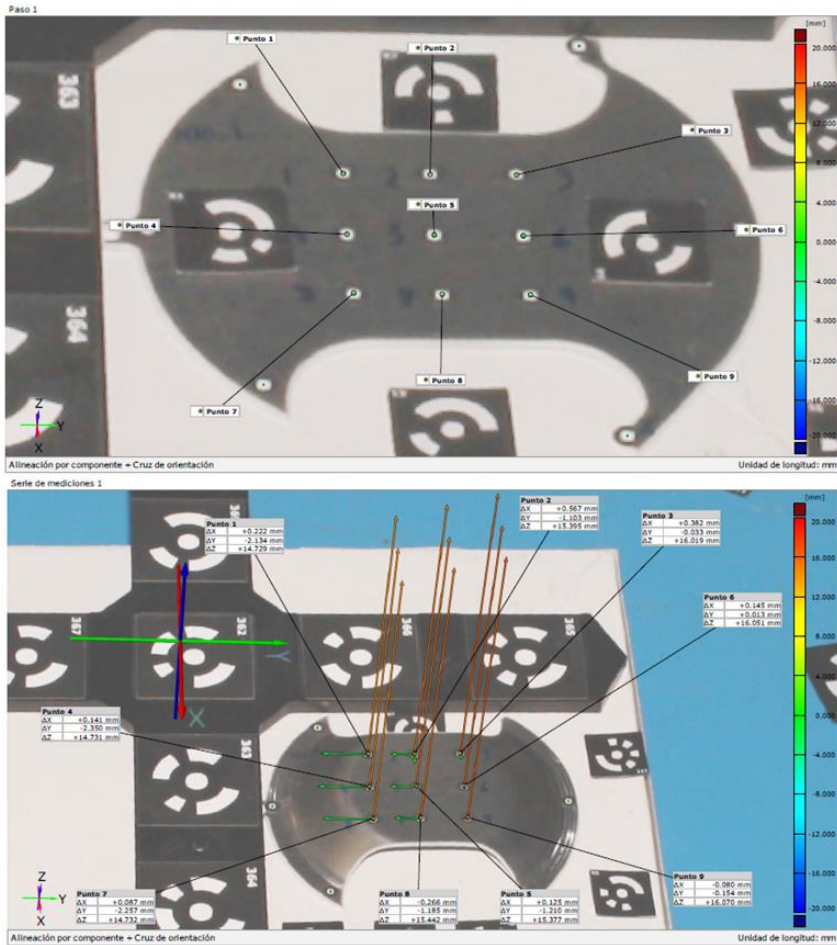


Figura 3.24. Ejemplo de salida de datos, del sistema TRITOP®, para una probeta antes y después del ensayo.



METODOLOGÍA

4.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en el sector de la automoción, los tiempos de desarrollo para el lanzamiento de cada nuevo vehículo, se ven reducidos más y más. Hace tan sólo 10 años, se empleaban aproximadamente 4 años (Figura 4.1) para todo el desarrollo de un nuevo coche. A día de hoy, raro es el proyecto que se prolonga más allá de un año y medio.



Figura 4.1. Reducción en tiempos de desarrollo de un automóvil en los últimos años y predicción futura. Volvo cars© [49].

Esto ha supuesto que hay etapas de este desarrollo (Figura 4.2) que hay que eliminar o al menos afrontar de una forma completamente diferente. Desde hace ya unos años, uno de los pasos eliminados es la elaboración de prototipos de cada pieza al final de cada etapa. Esto, no sólo supone un ahorro importante en términos de tiempo y presupuesto, si no también delegar cada vez más una gran responsabilidad sobre las simulaciones numéricas y la veracidad de sus resultados.

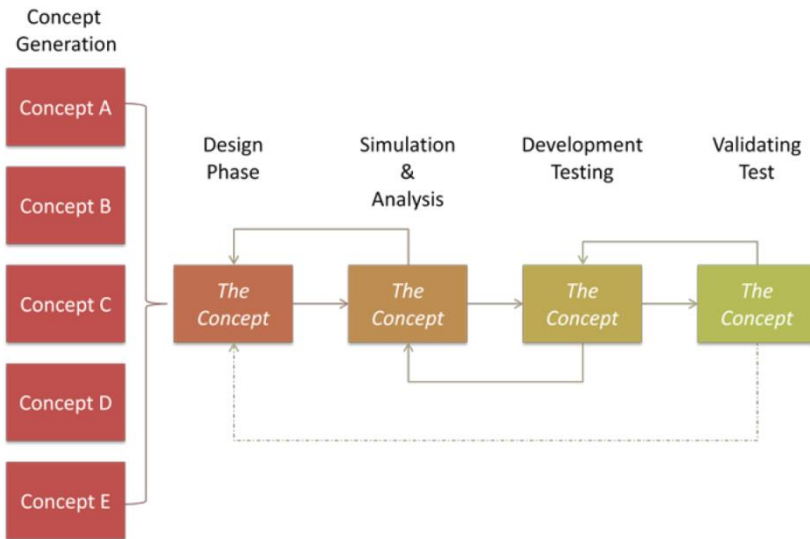


Figura 4.2. Esquema del proceso tradicional de desarrollo de productos en automoción [50].

Los períodos de ensayos y validaciones que se llevaban a cabo con esas piezas prototipo se han visto sustituidos, en su totalidad, por las simulaciones de elementos finitos, mediante la ingeniería asistida por ordenador, y de esta manera utilizar los resultados de las mismas como base de las propuestas de mejora y de refuerzo a implementar en la siguiente etapa (Figura 4.3) [51]. El gran objetivo de las simulaciones numéricas es la obtención, al final del proceso de desarrollo, del mejor primer prototipo.

Desde el punto de vista de las simulaciones estructurales, bien sean implícitas (cargas estáticas) o explícitas (eventos de alta velocidad de deformación), si bien los programas empleados para realizar estas simulaciones se han ido haciendo cada vez más potentes e inter-relacionables, esto ha abierto la puerta a plantearse una modelización cada vez más exacta, tanto desde el punto de vista de la geometría del componente, como del otro parámetro clave, el material con el que se pretende fabricarlo.

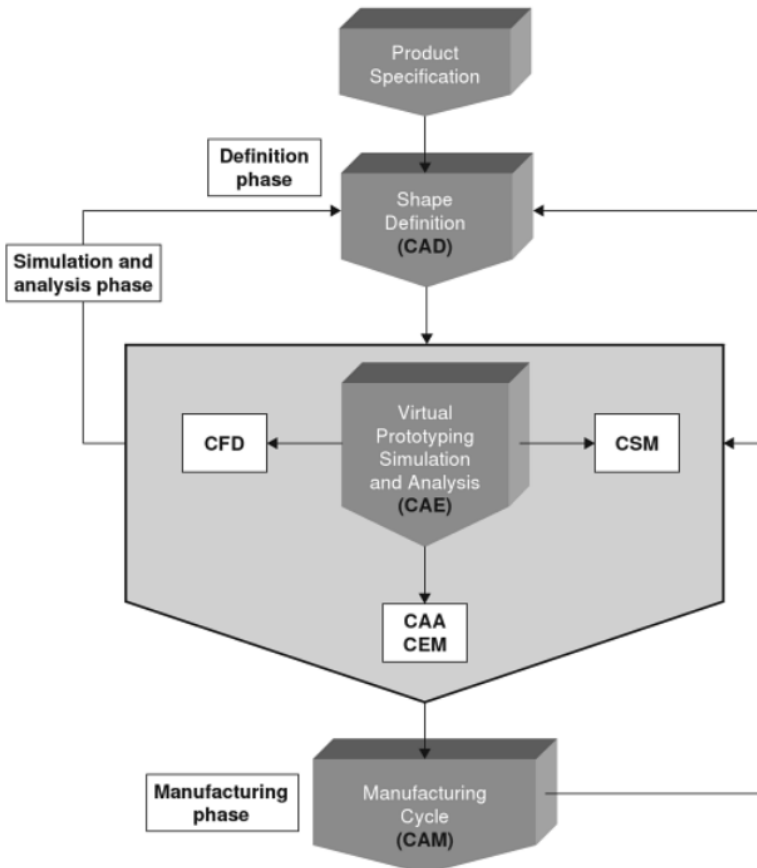
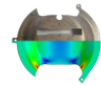


Figura 4.3. Esquema del entorno de prototipado virtual [51].

Por ejemplo, hace tan sólo 10 o 15 años, la mayor preocupación era modelar el componente a estudiar con elementos cuadrados, evitando los triangulares lo más posible, utilizando programas muy complicados y que necesitaban de una elevada preparación particular. El proceso era muy tedioso y complicado incluso con componentes relativamente sencillos, como puede ser una pieza de metal estampado de espesor constante. Hoy en día ese proceso, sin dejar de tener una gran importancia, se lleva a cabo con programas mucho más amigables desde el punto de vista de la experiencia de usuario



y mucho más potentes para trabajar y modelar la geometría en elementos finitos.

Desde el punto de vista del otro dato de entrada crítico, como es el material, también se han ido implementando cada vez más modelos característicos de materiales disponibles en los programas de simulación, permitiendo modelar prácticamente cualquier comportamiento mecánico y tipo de material.

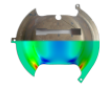
Como se describió en el Capítulo 2 de la presente Tesis, el mejor control de estos parámetros de modelado ha permitido abrir las posibilidades de simulación a la interrelación entre simulaciones de diferentes campos, como pueden ser las de proceso y las de comportamiento mecánico. Diferentes softwares aprovechan los resultados de la afectación a las propiedades del material, debidas al propio proceso de fabricación como puede ser un proceso de conformado en frío, para que puedan ser tenidas en cuenta en las simulaciones estructurales y simular de esta manera una pieza con unas propiedades de geometría y material más próximas a la situación real.

La metodología que se describe a lo largo de este capítulo pretende sentar la base para la elaboración de un método de trabajo que permita, una vez se recibe el diseño de una pieza que se fabricará por estampación, predecir la afectación de este proceso sobre las propiedades elasto-plásticas del material y tenerlas en cuenta durante la simulación por elementos finitos de los diferentes casos de carga a los que se verá sometida dicha pieza.

4.2. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

De acuerdo con los objetivos descritos en el Capítulo 1, los dos objetivos principales radican en definir:

- Los datos de entrada necesarios para que, en la simulación estructural de un componente metálico estampado, se tenga en cuenta la afectación del



proceso de estampado sobre las propiedades elasto-plásticas y el espesor de la pieza.

- La manera más adecuada para transferir esos datos desde la simulación de estampación hasta el modelo estructural.

La Figura 4.4 muestra el hilo conductor de los pasos seguidos para el desarrollo de la presente Tesis. Dicho diagrama se basa en el esquema presentado en la Figura 1.2, pero se representa de manera más detallado, con las tareas que se han llevado a cabo en cada una de las etapas que constituyen el proceso definitivo.

En un primer paso se han realizado los ensayos de caracterización del material en condiciones de suministro. Se definen así los parámetros elasto-plásticos fundamentales que, en paralelo, sirvan para planificar el diseño de experimentos (DOE), mediante superficies de respuesta. En la siguiente etapa, se han llevado a cabo los ensayos de embutibilidad Marciniak, de acuerdo a los experimentos propuestos por el DOE, extrayéndose las medidas de deformación de cada ensayo, así como los parámetros elasto-plásticos del material tras cada uno de los ensayos Marciniak. Esto ha permitido obtener la variación de cada uno de estos parámetros en función del estado de deformación alcanzado durante la embutición. Se han realizado simulaciones de estos ensayos de embutición Marciniak, con el programa Abaqus®, y validado los modelos de simulación empleando los resultados de los ensayos físicos.

Para ver el grado de exactitud de las simulaciones inversas respecto a las hechas con Abaqus®, ya que su preparación y tiempo de cálculo es menor, se emplea el programa Hyperform® para éstas, validándose sus resultados. Los resultados de estas simulaciones inversas se mapearán sobre los modelos estructurales y se asignarán, mediante scripts programados *ad-hoc*, los materiales definidos en el DOE, según el estado de deformación de cada elemento. Para finalizar, se ha simulado una probeta uniaxial con un estado de deformación asignado por el script y validado frente a su ensayo experimental correspondiente.

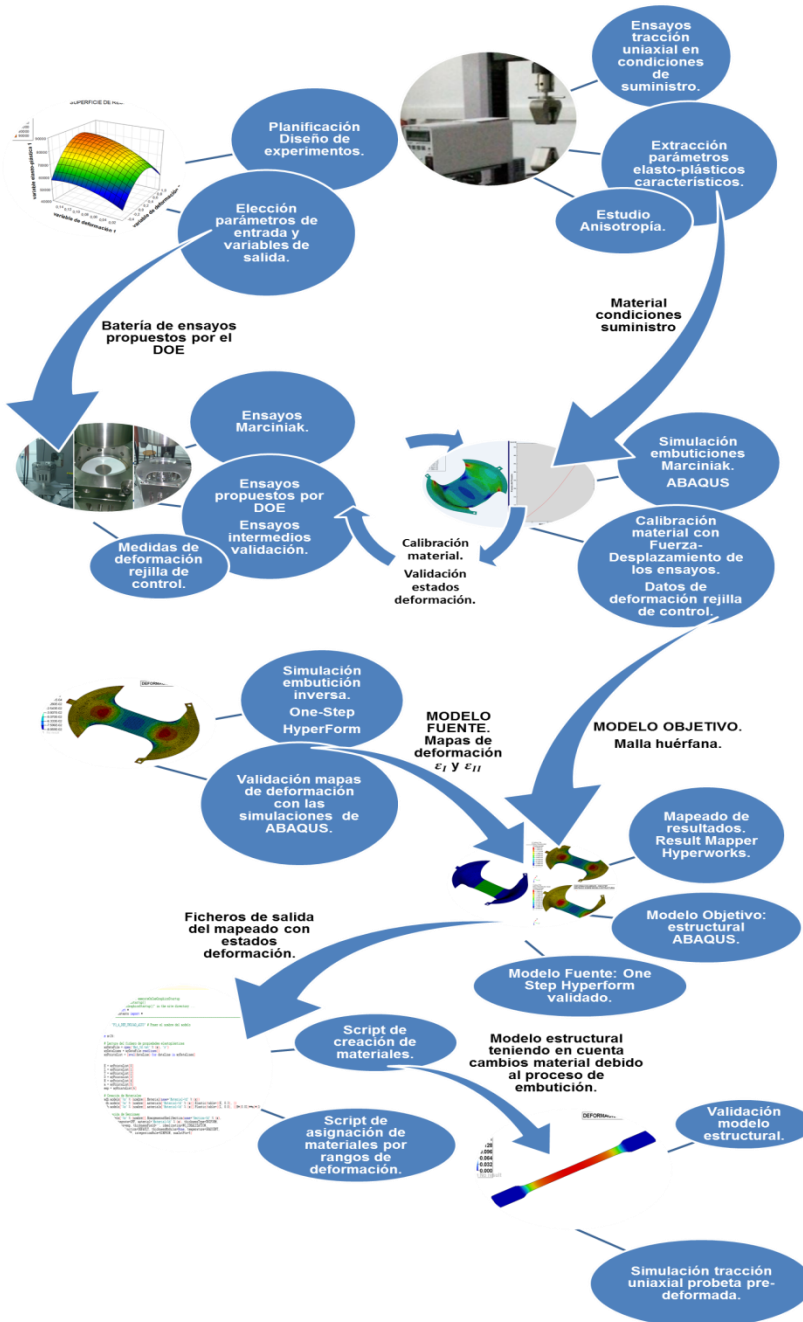


Figura 4.4. Esquema metodológico de la presente Tesis.



4.2.1. Parámetros del material

Dado que los datos de entrada admitidos por el programa de simulación estructural ABAQUS Standard®, en cuanto a parámetros de material se refiere, se introducen en forma de curva tensión-deformación plástica verdadera proveniente del ensayo normalizado de tracción uniaxial [44], es necesario decidir qué parámetros extraídos de este ensayo son los necesarios para definir ese comportamiento. Los parámetros más habituales, ya descritos en el Apartado 3.3 de esta Tesis, son: el módulo de elasticidad del material E , el límite elástico convencional $\sigma_{0.2}$, la tensión última σ_{UTS} y la máxima elongación a rotura ε_{rot} . Además del coeficiente de endurecimiento por deformación n y del coeficiente de dureza K de la ley de Hollomon (Figura 4.5).

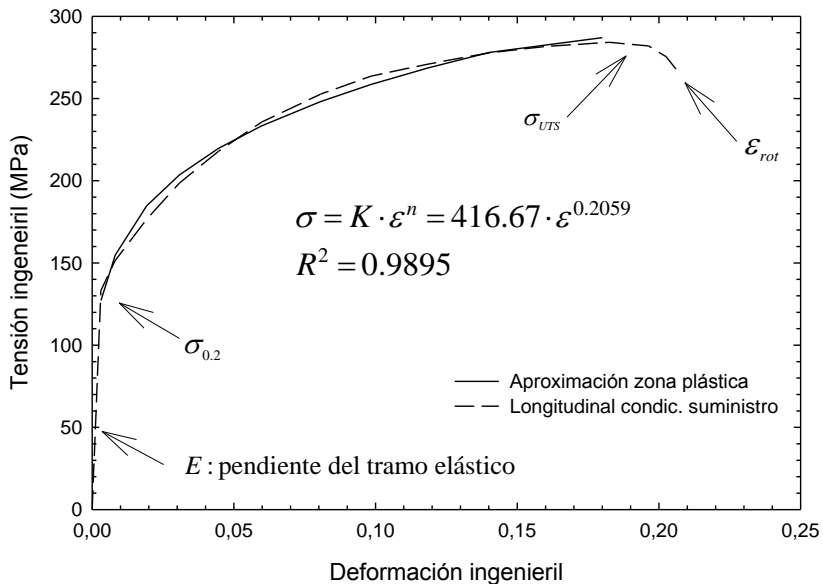


Figura 4.5. Parámetros elasto-plásticos del material.

Tal y como se ha expuesto en los Capítulos 2 y 3, la afectación del proceso de conformado sobre el comportamiento del material está directamente relacionada con el nivel de deformación alcanzado durante este proceso, por lo que habrá



que relacionar estos estados de deformación, en forma de deformación principal mayor ε_I y deformación principal menor ε_{II} provenientes del ensayo de embutibilidad, con los parámetros elasto-plásticos del material que se seleccionen finalmente.

Para poder conocer el comportamiento del material y decidir las variables elasto-plásticas a utilizar provenientes de este ensayo, tanto en condiciones de suministro del material como tras ser sometido a diferentes niveles de deformación, se hará necesario realizar ensayos de tracción uniaxial [44] del material “virgen” así como de zonas con niveles de deformación conocidos y que permitan la extracción de probetas, de las muestras ya embutidas, para este ensayo de tracción uniaxial.

4.2.2. Ensayos de embutibilidad

Al ser necesario disponer del comportamiento elasto-plástico del material, tras haberse sometido a un proceso de embutición, habrá que disponer de muestras de material con las siguientes condiciones:

- Haber sido embutido bajo condiciones normalizadas.
- Que esa embutición ofrezca un valor conocido y controlado del estado de deformación ($\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$).
- Que la muestra embutida permita la obtención de probetas de tracción uniaxial (Figura 4.6).

Para cumplir estas condiciones, como se ha descrito en el Apartado 3.4, se ha empleado el ensayo Marciniak de acuerdo a la norma UNE-EN_ISO_12004-2 [10].

En este sentido, se han de definir una serie de parámetros, tanto geométricos de utillaje (radios de acuerdo y diámetros de punzón y matriz, fuerza del pisador, velocidad de ensayo) como de las muestras a ensayar (material, espesor, dimensiones de las probetas). Estos parámetros, al igual que los escogidos para definir el comportamiento elasto-plástico, se utilizarán también como entrada del diseño de experimentos (*DOE*) a planificar, tal y como se verá en apartados posteriores.



Para cada uno de los ensayos de embutición propuestos, se dispondrá, mediante los medios de medida de deformaciones mostrados anteriormente, de una medida del estado de deformación generado en la zona de interés (zona plana de máxima embutición de definición de la rejilla de control) de las probetas Marciniak.

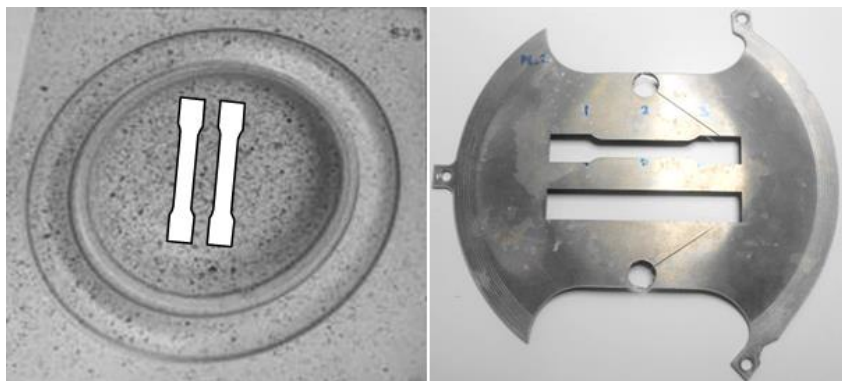


Figura 4.6. *Detalle de la zona de extracción de probetas uniaxiales tras embutir.*

4.2.3. Simulaciones de embutición

Con el objetivo de validar los modelos empleados en las simulaciones de elementos finitos, realizadas con el software comercial ABAQUS Standard®, se han simulado los ensayos de embutición experimentales.

ABAQUS es un programa informático para la resolución de problemas de ciencias e ingeniería mediante el método de los elementos finitos. El programa puede resolver casi todo tipo de problemas, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales. ABAQUS posee una extensa biblioteca de elementos finitos que permite modelar prácticamente cualquier geometría. Dispone además de una amplia variedad de modelos de comportamiento para una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería [52].



El primer paso para resolver cualquier problema por el Método de los Elementos Finitos (MEF) es *discretizar* su geometría utilizando un conjunto de elementos. Cada elemento representa una porción discreta del conjunto físico. Los elementos finitos están unidos mediante nodos compartidos. Al conjunto final de nodos y elementos finitos se le denomina malla. El número de elementos por unidad de longitud, área o volumen en una malla se llama densidad de malla. En un análisis de tensiones, el desplazamiento de los nodos es la variable fundamental que se calcula en el MEF. Una vez se conocen todos los desplazamientos de los nodos, las tensiones y las deformaciones en cada elemento se pueden determinar fácilmente.

Para calcular los desplazamientos, se puede resolver el problema de dos maneras diferentes: de forma implícita (ABAQUS/Standard®) y de forma explícita (ABAQUS/Explicit®). La diferencia entre las dos formas de calcular es que, en el caso del método implícito, se necesita resolver simultáneamente el sistema de ecuaciones de los desplazamientos y la matriz de rigidez, mientras que en el método explícito, la solución se avanza cinemáticamente de un incremento al siguiente [50].

En la presente Tesis, el parámetro principal de comparación entre ensayo y simulación ha sido la fuerza de reacción del punzón durante el avance de la embutición, obteniéndose una gráfica Fuerza-Desplazamiento del punzón, para ambas situaciones, que han servido de contraste (Figura 4.7).

Como parámetro de comparación adicional, se ha empleado el estado de deformación generado en la rejilla de control, tanto de los ensayos como de sus simulaciones equivalentes.

Utilizándose uno de los experimentos como valor de referencia, se ha realizado la calibración del modelo y del rozamiento entre punzón y probeta hasta conseguir la correlación de los parámetros de control expuestos anteriormente. Una vez fijados, se han usado esos mismos parámetros de material y



rozamiento para la simulación del resto de modelos numéricos de los experimentos propuestos.

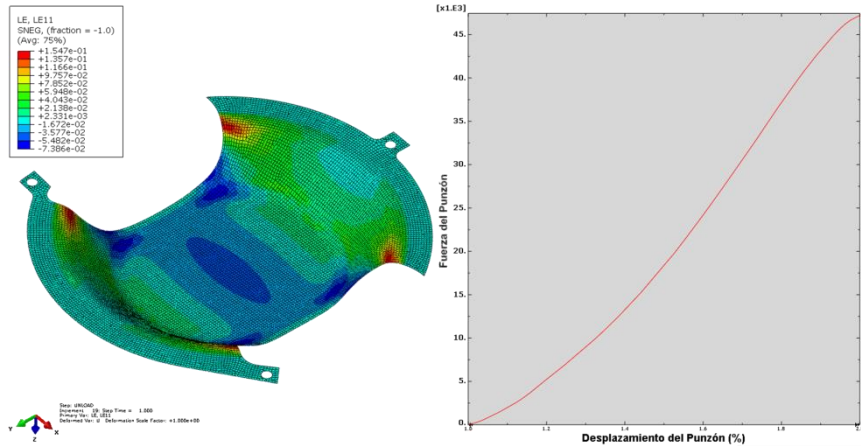


Figura 4.7. Ejemplo de probeta embutida mediante ABAQUS®, con el mapa de distribución de ϵ_{II} y la fuerza de reacción del punzón.

4.2.4. Diseño de experimentos

Con el objetivo de abordar de una manera coherente la problemática planteada anteriormente, se ha definido un diseño de experimentos basado en superficies de respuesta.

Antes de proceder a la determinación de estas superficies de respuesta es necesario apuntar una primera reflexión sobre los parámetros que influyen en su valor. Dichos parámetros se pueden englobar en dos grandes grupos, que denominaremos parámetros de ensayo y parámetros de probeta. Todos estos parámetros aparecen recogidos en la Tabla 4.1.

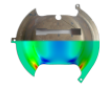


Tabla 4.1. *Parámetros influyentes en el valor de las propiedades elasto-plásticas.*

PARÁMETROS DE ENSAYO	PARÁMETROS DE PROBETA
Diámetro del punzón	Material
Radio de acuerdo punzón	Espesor
Diámetro de la matriz inferior	Anchura de probeta
Radio de acuerdo matriz inferior	
Velocidad de ensayo	
Profundidad de embutición	

Resulta evidente que es extremadamente complicado obtener una superficie de respuesta que englobe la variación de todos estos parámetros, por lo que es necesario fijar algunos de ellos. Siguiendo un criterio de economía de costes, resulta justificado fijar los parámetros de ensayo dependientes del utillaje que se han fijado según la norma UNE-EN_ISO_12004-2 [10], así como la velocidad de ensayo, el material y el espesor de la probeta.

La profundidad de embutición, es una dimensión claramente variable porque su valor constituye uno de los parámetros fundamentales del proceso de embutición de las probetas Marciniak para lograr diferentes rangos en la deformación principal máxima (ε_I). En este sentido, se ha variado la profundidad de embutición entre 6 y 18 mm. El otro parámetro fundamental es la anchura de la probeta Marciniak ya que su variación hace variar el ratio $\beta = \varepsilon_{II}/\varepsilon_I$ desde el valor de 1 de la probeta biaxial (100 mm de anchura) hasta el valor de -0.5 de la probeta uniaxial (20 mm). Con el objetivo de poder implementar los resultados obtenidos en la metodología desarrollada se ha optado por emplear como parámetros variables ε_I y β , tal y como se acaba de comentar pueden ser relacionados directamente con la profundidad de embutición y con la anchura de probeta respectivamente. La Tabla 4.2



recoge tanto los intervalos de los parámetros variables como los parámetros fijos con los que se ha trabajado para la obtención de las superficies de respuesta de las propiedades elasto-plásticas.

Tabla 4.2. *Parámetros considerados en el cálculo de las superficies de respuesta.*

PARÁMETROS FIJOS	
Diámetro del punzón (<i>mm</i>)	90
Radio de acuerdo punzón (<i>mm</i>)	9
Diámetro matriz inferior (<i>mm</i>)	108
Radio acuerdo matriz inferior (<i>mm</i>)	9
Velocidad de ensayo (<i>mm/s</i>)	1
Material	AW 5083 O/H111
Espesor (<i>mm</i>)	1.5
PARÁMETROS VARIABLES	
$\beta = \varepsilon_{II}/\varepsilon_I$	[-0.5,1]
Deformación principal mayor ε_I	[0.01,0.17]

La relación existente entre los parámetros variables y el valor de las diferentes propiedades elasto-plásticas se pueden expresar como una función f , donde $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ se postula como modelo cuadrático de la forma expresada en la ecuación (4.1), con β^* y ε_I^* como las variables codificadas de β y ε_I respectivamente. La codificación de los valores reales de los parámetros es necesaria para que todos ellos varíen en el mismo intervalo, favoreciendo de esta manera la estimación precisa de los coeficientes que definen la función $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$. Para cualquier valor real X_i de los parámetros variables dicha codificación se puede realizar a través de la expresión (4.2), obteniendo el valor codificado x_i correspondiente. Donde X_{iNINF} es el valor real del nivel más bajo del factor i , X_{iNSUP}



es el valor real del nivel más alto del factor i , y \tilde{X}_i es la media entre los valores reales del nivel más alto y más bajo del factor i .

$$f(\beta^*, \varepsilon_i^*) = b_0 + b_1\beta^* + b_2\varepsilon_i^* + b_{11}\beta^{*2} + b_{12}\beta^*\varepsilon_i^* + b_{22}\varepsilon_i^{*2} \quad (4.1)$$

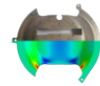
$$X_i = \frac{2 \cdot (X_i - \tilde{X}_i)}{X_{iNSUP} - X_{iNINF}} \quad i = \beta^*, \varepsilon_i^* \quad (4.2)$$

La determinación de los coeficientes de la función $f(\beta^*, \varepsilon_i^*)$ para cada propiedad elasto-plástica se va a realizar a través de un diseño de experimentos cúbico [53-55], utilizando el software STATGRAPHICS Centurion [56].

Las principales características de este diseño son:

- Utilización de dos factores, los cuáles son los parámetros β^* y ε_i^* .
- Dominio cúbico.
- Codificación de los intervalos de valores de los dos factores recogidos en la Tabla 4.2., para que varíen entre $[-1, 1]$, según la expresión (4.2).
- Matriz de experimentos con tres niveles, tanto para el factor β como para el factor ε_i , en función de la anchura de probeta y de la profundidad de embutición respectivamente (Tabla 4.3).
- Sin repeticiones en el punto central del dominio.
- Utilización de un modelo cuadrático, definido por la expresión (4.1), para el ajuste de las superficies de respuesta.

La Tabla 4.3 recoge, tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas, como la matriz del plan de experimentación con los valores de los factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_i^*)$. Hay que hacer notar que los datos correspondientes a β , ε_i , β^* y ε_i^* se obtienen tras la realización de cada uno de los experimentos.



Cada uno de los experimentos del plan de experimentación se realiza a través de la embutición de una probeta Marciniak y la posterior extracción y ensayo de una probeta de tracción tal y como se recoge en el Apartado 4.2.2 anterior, con la única salvedad que los valores de β y ε_I son los recogidos en la Tabla 4.3, obteniendo como resultado final del experimento la respuesta de las diferentes propiedades elasto-plásticas (E , $\sigma_{0.2}$, σ_{UTS} , ε_{rot} , K y n). Una vez obtenidos estas propiedades, con la ayuda de STATGRAPHICS Centurion, será posible determinar los coeficientes de las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$. En la Figura 4.5 mostrada anteriormente aparece una curva tensión-deformación ingenieril típica donde se han indicado las propiedades elasto-plásticas que serán extraídas en cada experimento del plan de experimentación.

Tabla 4.3. *Diseño propuesto para obtener las superficies de respuesta.*

MATRIZ DE EXPERIMENTOS (Variables codificadas)			PLAN DE EXPERIMENTACIÓN (Variables reales)			
Nº Exp.	β^*	ε_I^*	β	ε_I	Anchura de probeta (mm)	Profundidad de embutición (mm)
1	-1.00	-0.98	-0.50	0.012	20	6
2	-0.79	-0.95	-0.34	0.014	80	6
3	-1.00	-0.33	-0.50	0.064	20	12
4	-0.79	-0.58	-0.34	0.044	80	12
5	-1.00	1.00	-0.50	0.17	20	18
6	-0.79	0.19	-0.34	0.105	80	18
7	1.00	-0.56	1.00	0.045	100	12
8	1.00	0.04	1.00	0.093	100	17
9	1.00	0.84	1.00	0.157	100	21



Es importante indicar que la definición de la anchura de probeta se ha realizado basándose en estudios previos [3,5] que muestran que, en cuanto se reduce la anchura restante de las probetas de “hueso de perro”, descritas en la página 11 de la UNE-EN_ISO_12004-2 [10], se pasa rápidamente del estado biaxial puro a estados entre la deformación plana, con $\varepsilon_{II}=0$, y la tensión uniaxial, con $\varepsilon_{II}<0$ (Figura 4.9). Esto hace que se definan dos de las tres probetas en estados de $\varepsilon_{II}<0$.

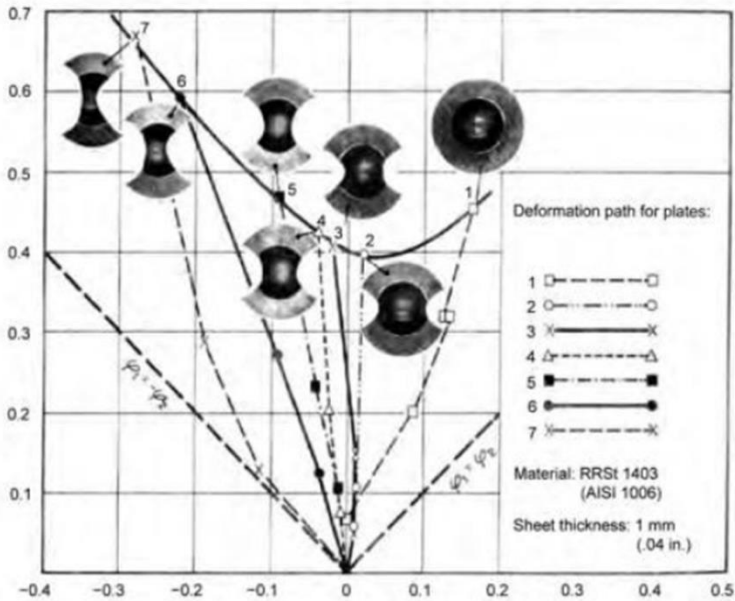
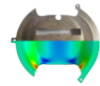


Figura 4.9. FLD con la mayoría de experimentos en la zona de $\varepsilon_{II}<0$ [5].



4.2.5. Validación del diseño de experimentos

Con objeto de validar el diseño de experimentos realizado, se han llevado a cabo ensayos de embutición de tamaños intermedios de probeta de “hueso de perro” de los que se extraerán, tanto los valores de β y ε_I mediante la medida de la deformación sufrida durante la embutición, como los parámetros elasto-plásticos mediante los ensayos de probetas de tracción uniaxial extraídas de las muestras embutidas.

Al ser los parámetros de entrada del diseño β y ε_I , se han medido estos parámetros de las probetas embutidas y, mediante las superficies de respuesta obtenidas del diseño de experimentos, se han estimado los parámetros elasto-plásticos predichos por las superficies de respuesta. Estos últimos se han comparado con los mismos parámetros elasto-plásticos reales, extraídos del ensayo de tracción uniaxial de las muestras deformadas.

En este punto, si la correlación es satisfactoria, se pueden dar por buenas las superficies de respuesta para la predicción de parámetros elasto-plásticos en función de los parámetros β y ε_I , que definen cualquier estado de deformación entre los rangos establecidos durante la embutición.

4.2.6. Transferencia de los resultados de embutición al modelo de simulación estructural

Llegados a este punto, con las simulaciones de embutición validadas usando los ensayos Marciniak del diseño de experimentos, así como las probetas intermedias embutidas para validar este mismo diseño, disponemos de unos resultados de estado de deformación y espesores finales.

En el mercado está disponible una herramienta, dentro del paquete Altair Hyperworks® empleado para la realización de esta Tesis, llamada Result Mapper [11,57], que permite el mapeo de resultados entre diferentes programas de simulación. En este caso se ha empleado para comunicar los resultados del estado de deformación, obtenido en las simulaciones de



embutición, al correspondiente modelo de cálculo estructural (Figura 4.10).

La decisión de emplear este paquete Altair Hyperworks® junto con el programa de simulación ABAQUS Standard® se debe, primero, a que son los programas comúnmente utilizados en el sector de la automoción y, segundo, a que existe una completa integración entre ellos. Esto no es casualidad si se conoce el mercado de programas de simulación por elementos finitos, ya que estos dos paquetes son de los más empleados para la realización de todo tipo de simulaciones multi-físicas, en todos los ámbitos industriales y universitarios.

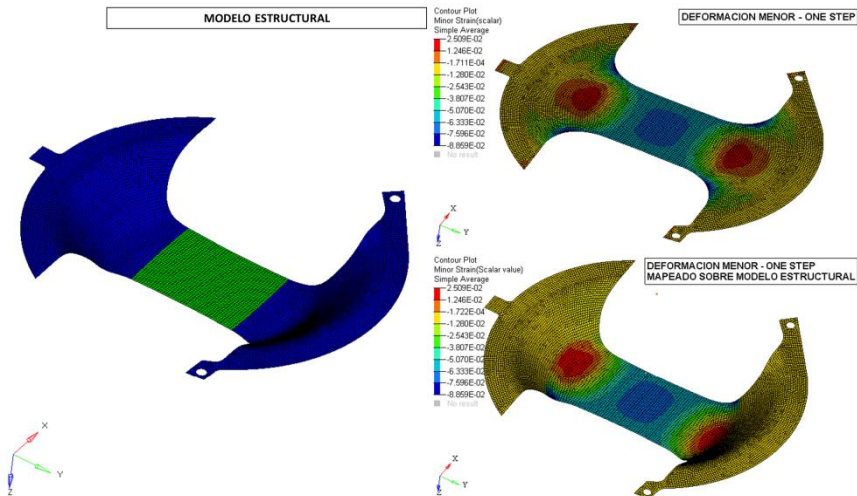
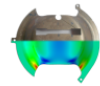


Figura 4.10. Ejemplo de mapeado de resultados desde simulaciones de proceso a modelos estructurales.

El proceso de trabajo con el programa Result Mapper, empieza definiendo el modelo de destino, previamente importado en el programa HypeMesh (también disponible dentro del paquete Altair Hyperworks®) [58]. Se cargan luego los resultados provenientes del programa de simulación de embutición indicando una zona de referencia en cada modelo, para que el programa de mapeado pueda identificar que se trata de la misma pieza, aun cuando ambos modelos tengan diferente malla de elementos finitos. Como salida adicional, el programa



de mapeado permite escribir un fichero de texto con la numeración de los elementos del modelo receptor y su valor correspondiente del parámetro mapeado, que en este caso han sido ε_I y ε_{II} .

4.2.7. Asignación de los parámetros elasto-plásticos estimados a partir de superficies de respuesta

En este momento se dispone de los valores de ε_I y ε_{II} , en dos ficheros separados, para cada uno de los elementos del modelo de simulación estructural de ABAQUS®.

Aquí es donde entra el paso innovador de la presente Tesis que consiste en, mediante una serie de macros denominadas *scripts* en ABAQUS®, leer esos valores de ε_I y ε_{II} , convertirlos en los parámetros de entrada de las superficies de respuesta (β y ε_I) y, mediante las superficies de respuesta obtenidas, calcular las diferentes constantes elasto-plásticas para cada pareja (β , ε_I). Cada grupo de esas constantes generado, permite generar un modelo de material diferente en el que ya se tiene en cuenta la afectación del proceso de embutición sobre las propiedades elasto-plásticas. Esto generaría tantos materiales diferentes como pares β y ε_I , es decir, prácticamente un material por cada elemento. Para evitar el desmesurado tamaño que podría llegar a tener el fichero de materiales y propiedades, se ha empleado, en base al diseño de experimentos, un número manejable y a la vez representativo de materiales para ser asignados definido por rangos de valores de β y ε_I .

De este modo, mediante los scripts desarrollados, el modelo estructural de simulación quedaría automáticamente definido con un material y espesor correspondiente para cada rango de deformación definido y sufrido durante el proceso de embutición, asignados a cada grupo de elementos con estados de deformación dentro de esos mismos rangos de deformación.

Al tratar de simular ahora, con ese modelo, cualquier caso de carga al que vaya a ser sometido ese componente, este ya



tendría en cuenta la afectación del proceso de embutición sobre las propiedades del material.

4.2.8. Simulaciones de embutición inversas

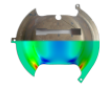
Como se describió en el Capítulo 2, se dispone de un tipo de herramientas de simulación de procesos de estampación-embutición denominados *inverse* o *one-step*.

Su utilidad radica en que son capaces de dar un valor aproximado de la embutibilidad del componente estudiado, así como una estimación de los valores de deformación y cambios de espesor que tendrán lugar durante el proceso de embutición, de manera relativamente rápida y muy útil en las primeras etapas de desarrollo de un producto estampado.

Los modelos empleados suponen un ahorro tanto en tiempo de preproceso como de simulación y postproceso de resultados. Por otro lado, la imposibilidad de capturar los efectos dependientes del camino de estampado, al asumir un camino lineal entre las geometrías inicial y final, puede causar que se infravaloren las deformaciones. Cuantos más parámetros del proceso se puedan incluir en la simulación de one-step, más exactos serán los resultados obtenidos [34,38,39].

Dado que la metodología desarrollada en este trabajo será aplicable a cualquier etapa del desarrollo, tanto con resultados de simulaciones incrementales de embutición, como con los resultados de una simulación inversa, es en estas etapas iniciales donde la sinergia es mayor, al emplearse los resultados de una simulación one-step junto con la metodología desarrollada para predecir las propiedades elasto-plásticas en función de la deformación ocurrida en el proceso.

Es por lo tanto necesario, a pesar de la gran cantidad de estudios existentes en este campo [34-42], validar los resultados ofrecidos por la simulación inversa de la embutición Marciniak comparándolos con la simulación de embutición en sí.



De esta manera, se obtiene una reducción en los tiempos de cálculo, optimizándose el proceso y permitiendo usar los resultados de deformación de las simulaciones de estampación inversa como dato de entrada para los scripts de generación de materiales, descritos en el apartado anterior.

Dentro del paquete Altair Hyperworks® se dispone de una herramienta que permite realizar todo tipo de simulaciones de proceso de conformado de metales, dentro de las cuales está disponible un módulo de simulación inversa denominado Hyperform One-Step ® [59]. Otra de las utilidades importantes de este programa, si bien no es tan interesante para el desarrollo y consecución de los objetivos de esta Tesis, es que ofrece como resultado el patrón que habría de tener la chapa original, antes de ser embutida, teniendo en cuenta los estiramientos y cambios de geometría ocurridos durante el proceso. Esto permite, en etapas tempranas del diseño del componente, decidir los formatos de chapa a emplear para su fabricación, así como el anidado de patrones dentro de este formato.

4.2.9. Validación de resultados

Como paso final de la metodología planteada y debido a que la pieza empleada en la Tesis va a ser siempre una probeta de embutición Marciniak, se hace necesario comprobar si el nuevo modelo de simulación estructural, en el que se han asignado mediante scripts los diferentes materiales a partir de las superficies de respuesta, reproduce las características de resistencia mecánica correspondiente al componente real.

Para la realización de esta validación se ha procedido a realizar una simulación, de una probeta uniaxial “extraída” del modelo estructural de la misma zona de la que han sido extraídas las probetas uniaxiales experimentales, permitiendo de este modo analizar la correlación numérico-experimental obtenida.





CAPÍTULO 5

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se presentan los resultados obtenidos y su correspondiente análisis en cada una de las etapas, descritas anteriormente, que conforman la metodología desarrollada en la presente Tesis.

5.2. CARACTERIZACIÓN UNIAXIAL

Como ya se ha descrito en el Apartado 3.3 y a modo de recordatorio, la Tabla 5.1 recoge los valores de los parámetros elasto-plásticos medidos en estos ensayos para la aleación estudiada.

Tabla 5.1. *Parámetros ingenieriles elasto-plásticos medios del AW5083 en condiciones de suministro.*

	PARÁMETROS ELASTO-PLÁSTICOS					
PROBETA (ensayadas)	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	K	n
Long. L (5)	52749 ±4209	136.18 ±5.13	287.30 ±4.43	0.21 ±0.022	416.7 ±6.5	0.2059 ±0.006
Trans. T (5)	51768 ±3274	138.51 ±1.45	272.37 ±3.54	0.23 ±0.036	377.2 ±5.8	0.1886 ±0.005
45 (5)	64070 ±2139	138.63 ±2.62	273.46 ±4.5	0.24 ±0.032	385.5 ±6.2	0.1966 ±0.005



En base a estos resultados, se ha definido una única curva de comportamiento mecánico para ser introducida en el programa de simulación empleado en el modelado de las embuticiones (ABAQUS Standard®). Para ello se ha realizado una media para cada uno de los parámetros elasto-plásticos de la Tabla 5.1, presentándose estos en la Tabla 5.2. En la Figura 5.1 puede observarse la curva final utilizada para las simulaciones frente a las obtenidas, para cada dirección, de los ensayos de tracción uniaxial. Esta curva se ha obtenido, primero generando una curva ingenieril con los parámetros de la Tabla 5.2 para luego convertirlos a valores reales mediante las expresiones (5.1) y (5.2).

$$\varepsilon_{REAL} = \ln(\varepsilon_{INGENIERIL} + 1) \quad (5.1)$$

$$\sigma_{REAL} = \sigma_{INGENIERIL} \cdot (\varepsilon_{INGENIERIL} + 1) \quad (5.2)$$

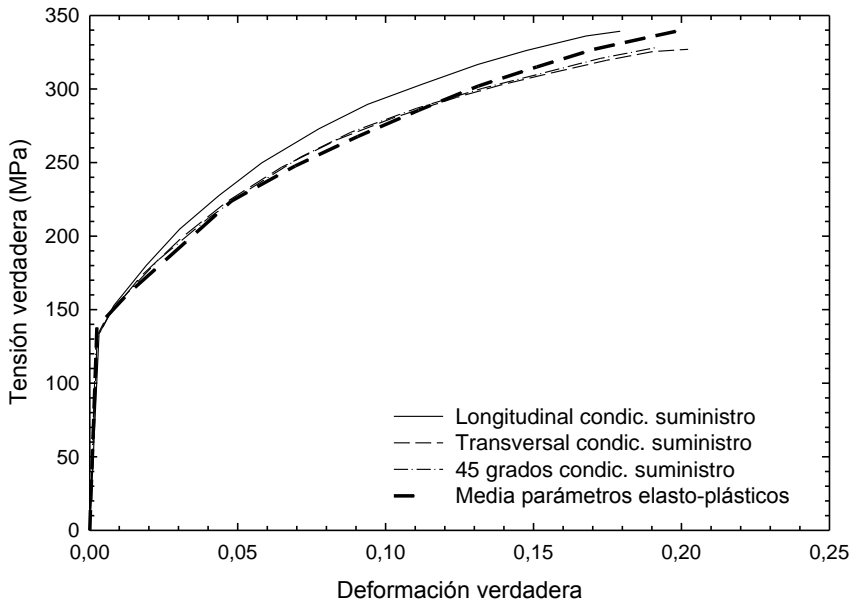
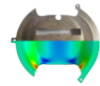


Figura 5.1. Curva tensión-deformación media frente a curvas tensión-deformación verdadera en condiciones de suministro.

**Tabla 5.2.** *Parámetros ingenieriles elasto-plásticos medios.*

PARÁMETROS ELASTO-PLÁSTICOS INGENIERILES						
SIMULACIÓN	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	K	n
Valores medios	55676	137.8	277.5	0.226	392.41	0.1967

Para la introducción de la curva en el programa ABAQUS, esta ha de introducirse en el programa en forma de curva plástica más módulo de elasticidad ($E=55676$ MPa) y coeficiente de Poisson ($\nu=0.3$). La curva plástica se obtiene tras restar la deformación elástica correspondiente a cada valor de deformación verdadera de la Figura 5.2. De esta manera, el primer punto en el eje de deformaciones es 0 y su correspondiente tensión plástica, el límite elástico $\sigma_{0.2}$. Para definir los estados de tensión que involucran mayores deformaciones que las que se obtienen mediante los métodos convencionales en un ensayo de tracción uniaxial, esta curva plástica se extiende, manteniendo la pendiente del último tramo, para capturar debidamente las grandes deformaciones que aparecerán (Figura 5.2).

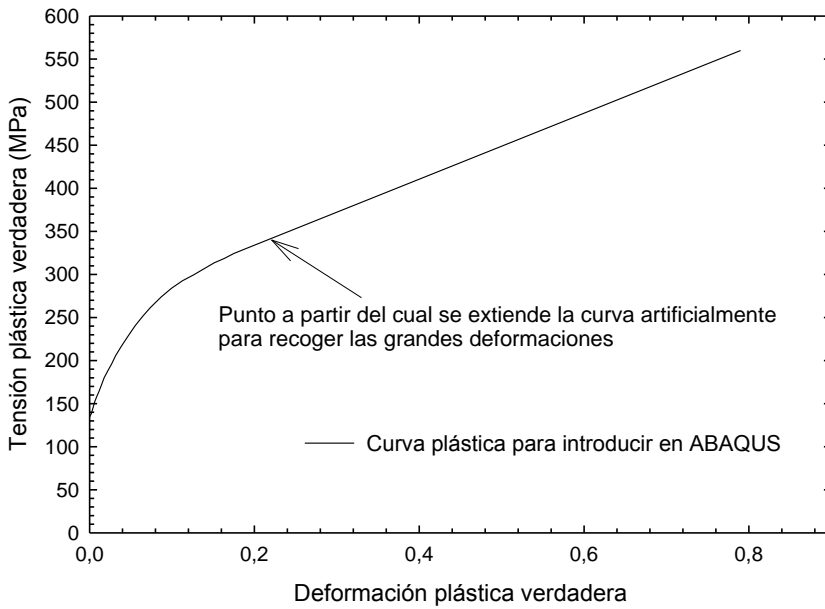
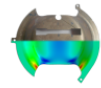


Figura 5.2. Curva tensión-deformación plástica verdadera para introducir en ABAQUS.

5.2.1. Potencial plástico de Hill

Si bien, para poder calcular las tensiones del modelo de simulación, es necesario introducir la ley de plasticidad descrita con anterioridad, para poder incorporar el fenómeno de anisotropía plástica, descrito en el Apartado 3.4, en la simulación por elementos finitos, se ha empleado el potencial plástico de Hill [60]. Consiste en un modelo cuadrático de fluencia que es una generalización del modelo de Von Mises. La ecuación constitutiva del modelo de Hill se muestra en la expresión 5.3, siendo F, G, H, L, M y N constantes del material. En el caso de que $F=G=H$ y $L=M=N=3F$ el criterio se particulariza en el de Von Mises. Estas constantes se calculan a partir de los coeficientes de Lankford (Apartado 3.4) según las expresiones 5.4 a 5.7.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \tag{5.3}$$



$$F = \frac{R_0}{R_{90}(R_0+1)} \quad (5.4)$$

$$G = \frac{1}{(R_0+1)} \quad (5.5)$$

$$H = \frac{R_0}{(R_0+1)} \quad (5.6)$$

$$N = \frac{(R_0+R_{90})(1+2R_{45})}{2R_{90}(R_0+1)} \quad (5.7)$$

Donde cada valor de R_i se obtiene de la expresión $R = \varepsilon_w/\varepsilon_t$, de acuerdo a lo explicado en el Apartado 3.4, para cada dirección de la probeta extraída de la placa suministrada y lo mostrado en la Figura 5.3.

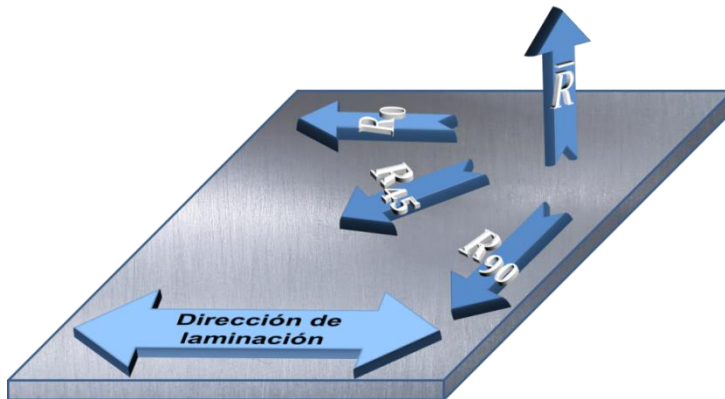


Figura 5.3. Determinación de los parámetros de Lankford.

Por otra parte, los parámetros L y M, relacionados con el esfuerzo cortante fuera del plano, generalmente no se miden debido a las dificultades experimentales. Por lo tanto, su valor se asume como 1.5, siendo este valor el que correspondería a un material isotrópico.



En el programa ABAQUS se ha implementado este modelo a través de los coeficientes de una matriz R_{ij} , que se relaciona con los coeficientes de la Ley de Hill y los parámetros de Lankford a través de las expresiones 5.8 hasta la 5.15.

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (5.8)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (5.9)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (5.10)$$

$$L = \frac{3}{2R_{23}^2}, M = \frac{3}{2R_{13}^2}, N = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (5.11)$$

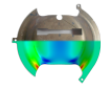
$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1 \quad (5.12)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0+1)}{R_0(R_{90}+1)}} \quad (5.13)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0+1)}{(R_{90}+R_0)}} \quad (5.14)$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3 R_{90}(R_0+1)}{(2 R_{45}+1)(R_{90}+R_0)}} \quad (5.15)$$

La matriz R_{ij} , formada por los valores anteriores, es la que se ha utilizado finalmente para la simulación por elementos finitos.



5.3. ENSAYOS DE EMBUTICIÓN

Continuando con la metodología planteada, se muestran en este apartado los ensayos de embutición Marciniak fijados por el diseño de experimentos (Figura 5.4), así como algunas posiciones adicionales intermedias para ser empleadas como medio de validación de las superficies de respuesta obtenidas.

La Tabla 5.4 muestra todos los ensayos Marciniak que han sido realizados. Para los ensayos adicionales, es decir, aquellos no definidos por la matriz de experimentos, se han escogido los mismos valores de profundidad de embutición pero con anchuras intermedias de las probetas de hueso de perro. En esta misma tabla se incluye el sistema de medición de la deformación empleado en cada ensayo.

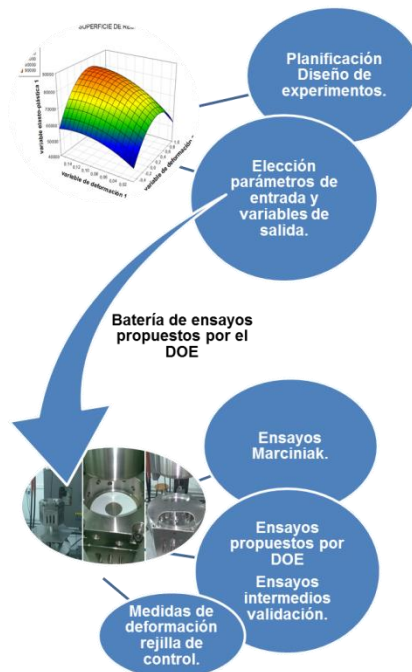


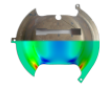
Figura 5.4. Esquema descriptivo del presente apartado dentro de la metodología de trabajo.

**Tabla 5.4.** *Planificación de ensayos Marciniak.*

Nº ENSAYO.	ANCHURA DE PROBETA (MM)	PROFUNDIDAD DE EMBUTICIÓN (MM)	MEDIDA DEFORMACIÓN
1	20	6	TRITOP
2	80	6	METROLOG XG
3	20	12	TRITOP
4	80	12	METROLOG XG
5	20	18	TRITOP
6	80	18	METROLOG XG
7	100	12	ARAMIS
8	100	17	ARAMIS
9	100	21	ARAMIS
10*	40	6	METROLOG XG
11*	60	6	METROLOG XG
12*	40	12	METROLOG XG
13*	60	12	METROLOG XG
14*	40	18	METROLOG XG
15*	60	18	METROLOG XG

**Ensayos realizados para la validación de la metodología.*

De acuerdo a lo descrito en la norma UNE-EN_ISO_12004-2 [10] se cortan las probetas alineadas con la dirección de laminación de las planchas (Figura 5.5). La velocidad del punzón durante cada ensayo ha sido de 1 mm/s . Para evitar el ensanchamiento del material y asegurar en la medida de lo posible trayectorias lineales de deformación, tanto la matriz como el pisador llevan un moleteado que garantiza el correcto agarre de la probeta, sin que ello implique deformación localizada en esas zonas (Figura 5.6). El pisador aplica fuerzas



de cierre, según el sistema empleado, de hasta 500kN en la prensa de doble acción (pistón inferior) y de aproximadamente 84kN en el sistema MTS-810® (6 tornillos de M8 con un par de apriete de $20\text{ N}\cdot\text{m}$ por tornillo).

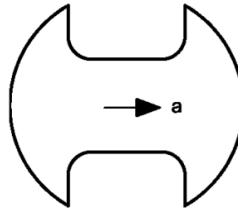


Figura 5.5. Posición de la probeta de hueso de perro al ser extraída de la placa en relación a la dirección de laminación (a).

Las probetas de anchos 20 , 40 , 60 y 80mm se han ensayado con el sistema MTS 810® (Figura 5.7), mientras que en las de ancho 100mm (biaxiales) se ha empleado la prensa hidráulica de doble acción. Para evitar el contacto directo entre el punzón y la probeta y obtener una distribución homogénea de deformaciones, se ha colocado una lámina de teflón entre ambos en todos los casos (Figura 5.8).

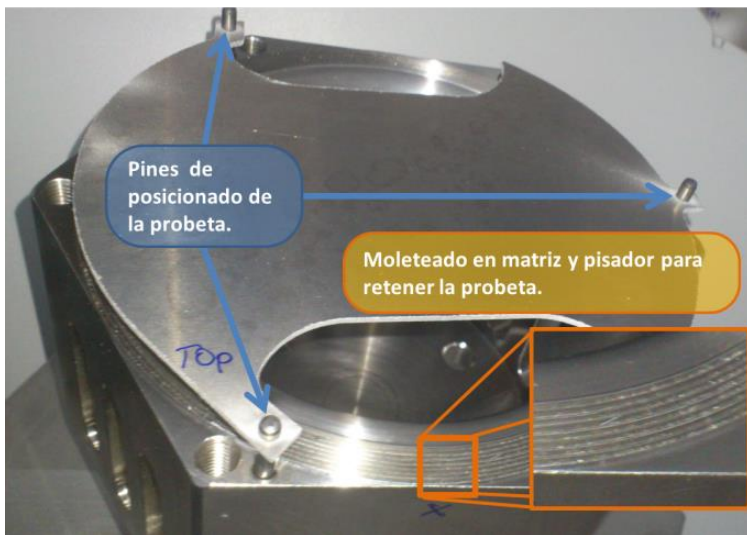


Figura 5.6. Posicionado inicial de la probeta en la matriz.

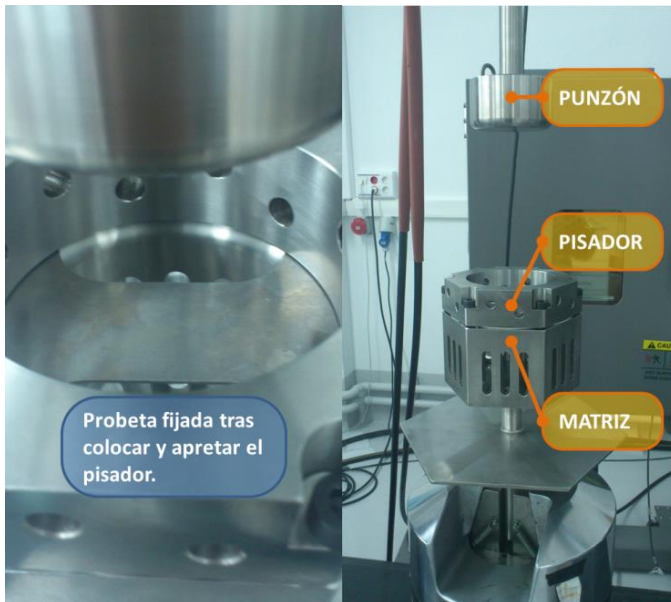
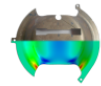


Figura 5.7. Pisador aplicando la fuerza de cierre. Elementos.



Figura 5.8. Lámina de teflón para evitar contacto directo punzón-probeta.



Una vez realizados todos los ensayos Marciniak (Figura 5.9), se dispone de manera directa de los registros de la fuerza de reacción en el punzón frente al desplazamiento del mismo. Estas gráficas serán las empleadas para calibrar el modelo de simulación de embutición. En la Figura 5.10 se muestran dichas gráficas fuerza-desplazamiento correspondientes a la profundidad mayor para los diferentes anchos de probeta.



Figura 5.9. Detalle de las probetas de ancho 80mm tras ser embutidas a las diferentes profundidades fijadas en el DOE.

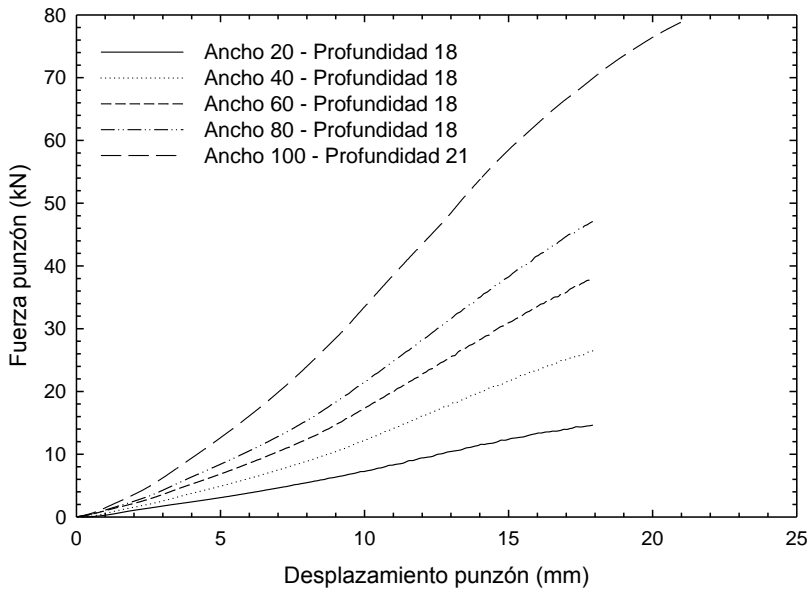


Figura 5.10. Curvas de fuerza-desplazamiento del punzón para cada ancho de probeta a su profundidad máxima.

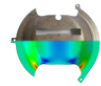


5.3.1. Medida de la deformación

Una vez realizadas todas las embuticiones, se ha procedido a medir los desplazamientos sufridos por los puntos de control de la rejilla definida en cada probeta. Obviamente, antes de realizar los ensayos de embutición, estos mismos puntos fueron controlados para definir el estado de deformación cero o inicial.

Para el caso de las probetas biaxiales, ensayadas en la prensa hidráulica, dado que se ha empleado el sistema de medición de las deformaciones ARAMIS®, no es necesario dejar fijado un estado inicial, ya que este sistema va registrando, en tiempo real, durante la realización del ensayo, la medida de deformación que va sufriendo la probeta. Es un método realmente útil y rápido pero que requiere de una gran preparación inicial del programa de medición y procesado de resultados. Como el estado de deformación esperado para este caso, como se ha descrito con anterioridad, es biaxial, esto se ha comprobado viendo que ambas lecturas de ε_I y ε_{II} arrojan valores prácticamente iguales. Además, toda la rejilla central esta englobada en el mismo rango de deformaciones observado para el punto central de control, mostrado en la Figura 5.11.

En lo que se refiere al resto de las probetas, se ha decidido emplear el sistema de medición TRITOP®. Para ello se colocan, sobre cada punto de control de la rejilla, unas pegatinas circulares de 4mm de diámetro y fondo blanco, con una corona exterior negra de 2mm de espesor, para ofrecer un alto contraste sobre estos puntos al capturarlos con la cámara de fotos. Estas pegatinas han sido suministradas por el proveedor del sistema de medición. En este punto hay que hacer notar que estos círculos han de colocarse exactamente sobre el centro del punto marcado en la probeta para asegurar una correcta referencia. Además, para tener una referencia de la zona que no va a deformarse, se colocan otras pegatinas en puntos de la zona de pisado de las probetas. Esto ayudará a referenciar los puntos de la rejilla, así, si se colocase la probeta en una posición diferente a la que se usó para la toma



de datos sin deformar, y las referencias exteriores variasen, siempre se dispondría de estos puntos fijos en cada probeta.

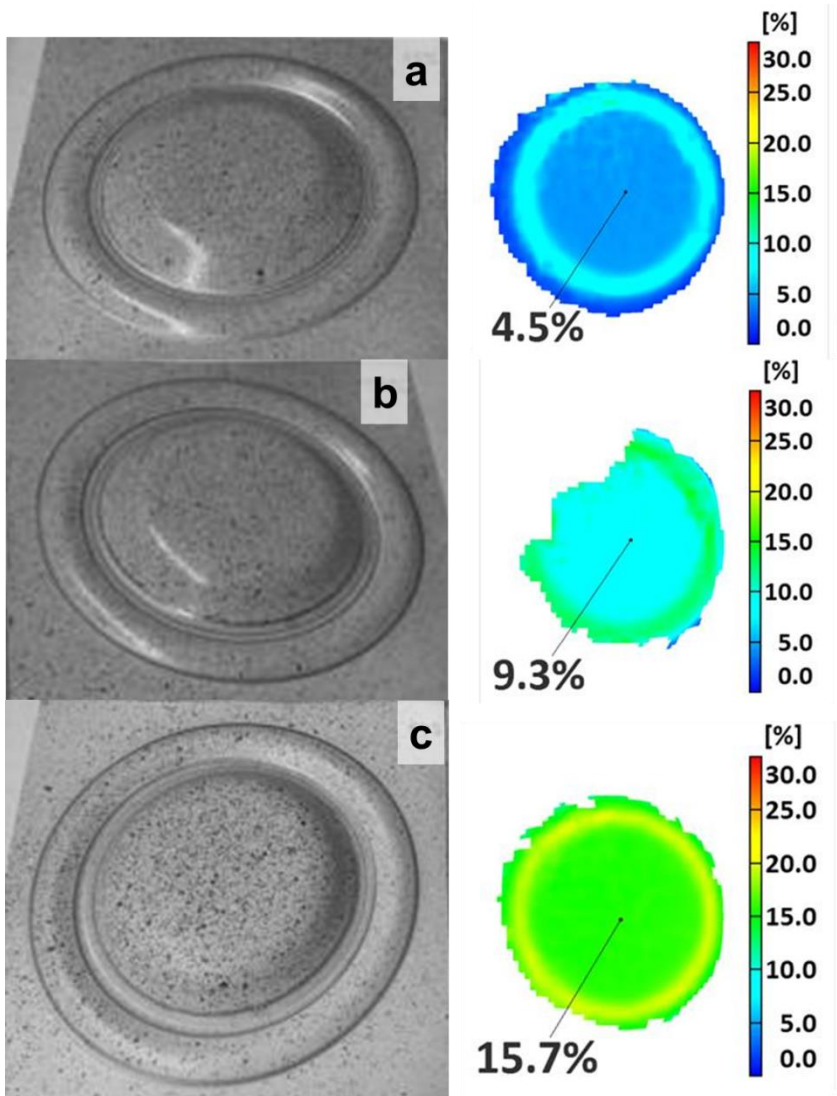


Figura 5.11. Detalle de cada una de las probetas biaxiales con la medida de ε_I recogida mediante el sistema ARAMIS®, a) profundidad 12mm, b) profundidad 17mm y c) profundidad 21mm.



La primera probeta en ensayarse ha sido la de anchura 20 mm. En la Figura 5.12 se muestra cómo quedan los puntos de referencia una vez colocados sobre la probeta antes de ser embutida. De nuevo, hacer notar que han de colocarse bien centrados respecto a los puntos, previamente marcados con una plantilla en la probeta, sobre la cara opuesta al punzón. En este caso en particular, debido al ancho disponible, la parte exterior de color negro de las pegatinas se superpone ligeramente, lo que podría dar lugar a problemas al tomar las referencias fotográficas. Se pueden observar también los puntos que se utilizarán como referencias fijas en las zonas no deformadas.

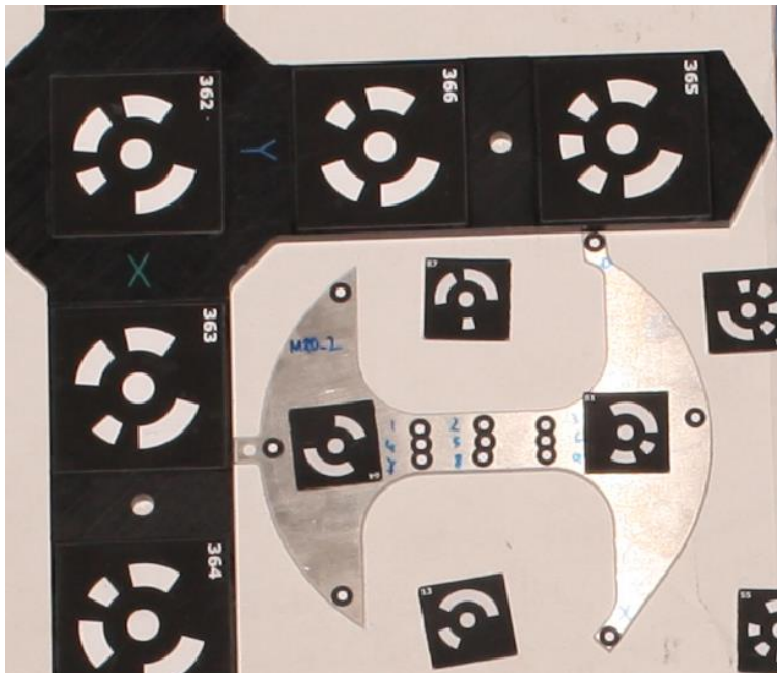
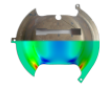


Figura 5.12. *Detalle de una de las probetas de ancho 20mm con las pegatinas de control para el sistema TRITOP®.*

Una vez embutidas, se procede a realizar de nuevo la medida de la rejilla mediante las fotografías, colocando las probetas en la misma posición relativa a los elementos de referencia y calibración que cuando se midió el estado inicial. Debido al



marcado de referencias fijas en la probeta, no es tan crítica esta posición frente al resto del sistema. En las Figuras 5.13 a 5.16 se presenta el informe de resultados emitido por el sistema TRITOP®.

En estos informes se incluye una imagen del estado inicial con los puntos marcados (Figura 5.13 y 5.14) y una imagen, ya deformada (Figura 5.15), con los vectores y valores de desplazamiento de cada punto, relativo a su posición inicial y en los tres ejes del sistema de referencia fijado. En la Figura 5.16 se muestra la hoja Excel para el cálculo de las deformaciones a partir de los valores registrados. Sabiendo lo que se ha desplazado cada punto, desde su posición original, en los ejes del sistema de referencia X e Y, que se han hecho coincidir con los ejes de deformación principal menor y mayor en el plano respectivamente, es posible calcular lo que se ha deformado cada uno de los lados de la rejilla de control, en esas mismas direcciones. Esto proporciona, tanto los d_{ik} como los valores de “a” y “b” de las expresiones 3.6 a 3.8. Con ellos se calcula el valor de las deformaciones principales, para cada rejilla, según las expresiones 3.9 y 3.10.

En esta hoja Excel se han de introducir los datos de salida de TRITOP® correspondientes al incremento de desplazamiento relativo a la posición inicial y a la medida de la distancia inicial entre cada punto de la rejilla d_{ik} . A partir de estos datos, devuelve los valores de esas distancias tras la deformación y los valores de ε_I , ε_{II} y β para cada una de las cuadrículas de la rejilla, así como para la cuadrícula grande (toda la rejilla), como se muestra en la Figura 5.17.

Estos valores de ε_I y β alimentan, en primera instancia, la tabla de resultados del diseño de experimentos.

También, estos resultados, tanto de desplazamientos de los puntos de la rejilla, como de incrementos de longitud de cada uno de los lados de las cuadrículas, así como los valores de deformación, se emplearán para la calibración inicial del modelo de simulación y para la validación de los resultados de las simulaciones de embutición.



Generated with TRITOP Professional V8

M20_3

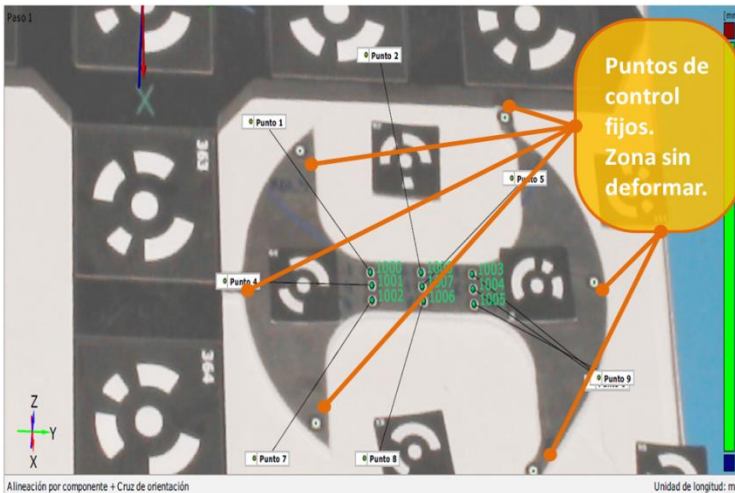


Figura 5.13. Detalle del informe ofrecido por TRITOP®. Imagen del estado inicial con los puntos de control fijos en la probeta.

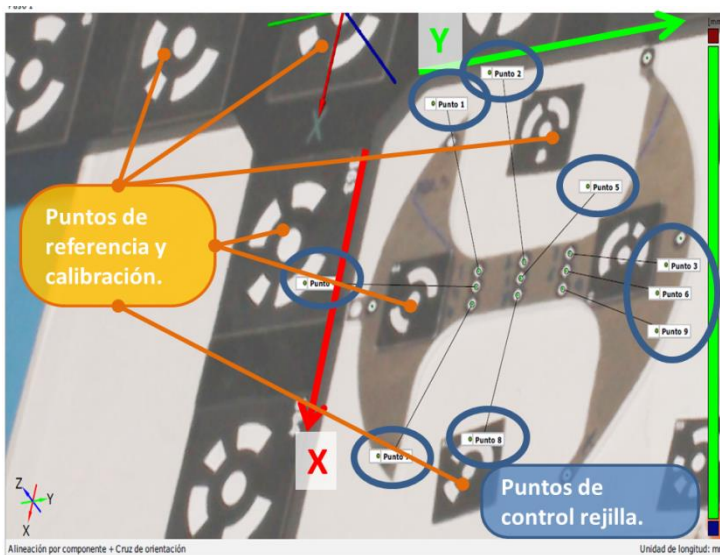


Figura 5.14. Detalle del informe ofrecido por TRITOP®. Imagen del estado inicial con los puntos de referencia y calibración y los puntos de la rejilla de control.

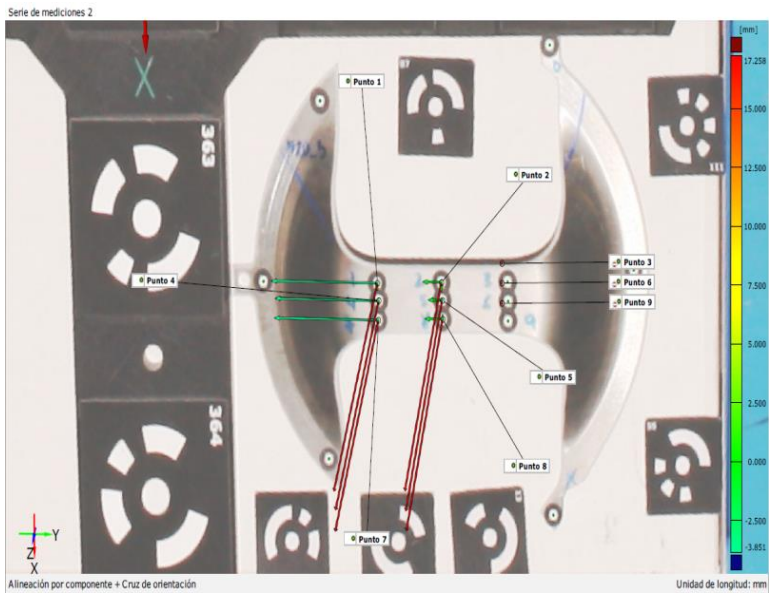
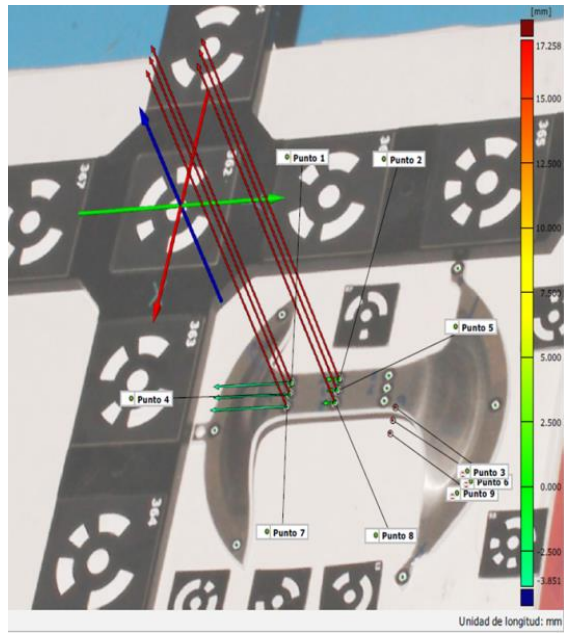
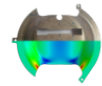


Figura 5.15. Detalles del informe ofrecido por TRITOP®. Imágenes del estado final con los vectores indicando el desplazamiento en cada eje relativo a la posición inicial.



Serie de mediciones 2

Element	Property	Tol -	Tol +	Dev	Check	Out
• Punto 1	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	+0.198 mm	█	
• Punto 1	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	-3.851 mm	█	
• Punto 1	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	+17.216 mm	█	
• Punto 2	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	+0.277 mm	█	
• Punto 2	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	-0.685 mm	█	
• Punto 2	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	+17.232 mm	█	
⊕ Punto 3	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
⊕ Punto 3	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
⊕ Punto 3	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
• Punto 4	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	+0.120 mm	█	
• Punto 4	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	-3.762 mm	█	
• Punto 4	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	+17.194 mm	█	
• Punto 5	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	-0.043 mm	█	
• Punto 5	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	-0.519 mm	█	
• Punto 5	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	+17.257 mm	█	
⊕ Punto 6	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
⊕ Punto 6	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
⊕ Punto 6	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
• Punto 7	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	+0.036 mm	█	
• Punto 7	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	-3.777 mm	█	
• Punto 7	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	+17.186 mm	█	
• Punto 8	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	-0.120 mm	█	
• Punto 8	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	-0.647 mm	█	
• Punto 8	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	+17.206 mm	█	
⊕ Punto 9	ΔX	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
⊕ Punto 9	ΔY	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	
⊕ Punto 9	ΔZ	-20.000 mm	+20.000 mm	¿¿¿???	█	

ANCHO BANDA INICIO	ANCHO BANDA FINAL
--------------------	-------------------

Punto 1	Punto 4	Punto 7
ΔX	ΔX	ΔX
ΔY	ΔY	ΔY
ΔZ	ΔZ	ΔZ
Punto 2	Punto 5	Punto 8
ΔX	ΔX	ΔX
ΔY	ΔY	ΔY
ΔZ	ΔZ	ΔZ
Punto 3	Punto 6	Punto 9
ΔX	ΔX	ΔX
ΔY	ΔY	ΔY
ΔZ	ΔZ	ΔZ

d_{17}	d_{79}	d_{39}	d_{13}	d_{28}	d_{46}	d_b	d_a
----------	----------	----------	----------	----------	----------	-------	-------

d_{17}	d_{79}	d_{39}	d_{13}	d_{28}	d_{46}	b	a
----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----	-----

ϵ_1 (ey)	ϵ_2 (ex)
$Ln(a/d_a)$	$Ln(b/d_b)$

$$\beta = \epsilon_2 / \epsilon_1$$

Figura 5.16. Tabla de salida de incrementos de desplazamientos en cada punto y eje. Detalle de la hoja Excel para el cálculo de las deformaciones.

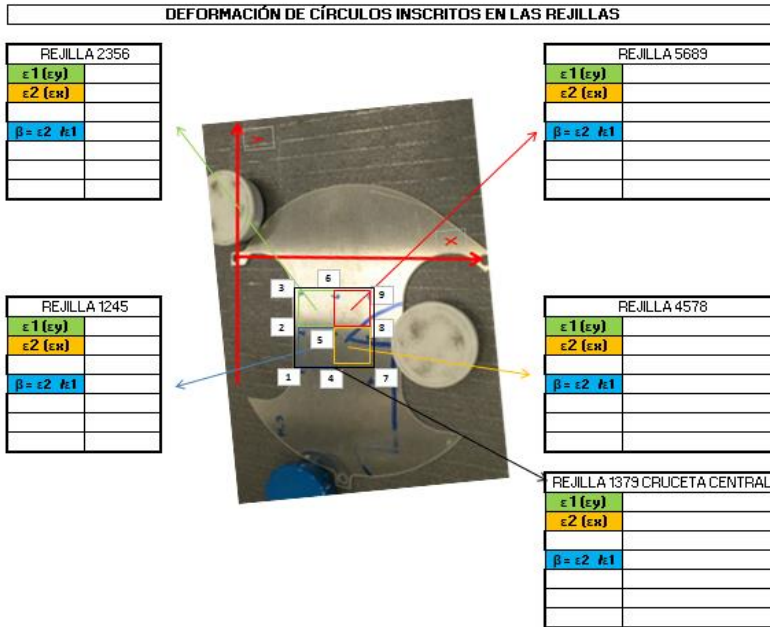
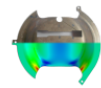


Figura 5.17. Plantilla para el cálculo de las deformaciones en función de las distancias medidas entre los puntos de la rejilla.

Durante el proceso de extracción de resultados para la primera probeta, de ancho 20mm, se han observado varios problemas asociados al sistema de medida que se recogen a continuación:

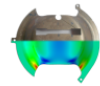
- Que para algunos de los puntos, el software de reconocimiento y cálculo de los desplazamientos no era capaz de reconocerlos, bien en la fase inicial antes de deformar, bien en la fase final, tras la deformación. Tras revisar esta situación se ha establecido que esto sucede porque, al menos en la probeta de 20mm de ancho, los puntos de control en el eje X estaban separados 5mm entre sí, desde el eje longitudinal, dejando así otros 5mm al borde libre de la probeta. Esta proximidad ha hecho que, como se ha comentado anteriormente, las pegatinas se superpusieran unas sobre otras, haciendo perder al sistema el contraste necesario para su detección o incluso, que parte de la corona negra entrase dentro del área central blanca.



- Que algunos de esos puntos parecían haberse despegado ligeramente de la superficie de la probeta, con lo que aparecía la incertidumbre de haber podido perder la referencia inicial. A este respecto, se ha podido observar que, al igual que en el punto anterior, al estar todas las pegatinas juntas (a lo largo del eje X), estas se adaptaban mal al proceso de deformación. Si bien en esta probeta la deformación a lo largo del eje X será la menor, el material se estira algo en esa dirección, pero las pegatinas no lo hacen con él, al estar juntas, por lo que se despegan.
- Que las pegatinas de los puntos fijos, en la zona no deformada de la probeta, estaban inservibles o habían desaparecido por completo debido al moleteado en la matriz en las zonas de pisado. Este fenómeno se observó directamente al retirar el pisador tras el ensayo. Parte de estas pegatinas se quedaban adheridas a la matriz, haciendo perder por completo la referencia planteada en la probeta. Esto hace depender exclusivamente de recolocar las probetas en la misma posición exacta relativa al resto de referencias exteriores, para tomar las fotos después de deformar, lo que se antoja prácticamente imposible.

Estos problemas han supuesto el replanteamiento del proceso de medida de las deformaciones ya que, si bien para las probetas de mayor anchura, las pegatinas ya no se superpondrían, quedaba la duda, de gran importancia, de si no acabarían despegándose en cualquier caso y hacer peligrar todas las medidas. Además, se antoja insalvable el tercer punto, de evitar perder las referencias fijas de la probeta debido al moleteado de la matriz.

Las opciones son, por un lado usar otro tipo de referencia, a colocar sobre las marcas de la rejilla, que garantice su captura por el sistema TRITOP® y que evite los problemas anteriores, y por el otro, cambiar el método de medida de los desplazamientos.



En el caso de continuar con el método TRITOP® se podrían usar pegatinas más pequeñas, que no se superpongan, pero podrían seguir despegándose y el moleteado seguiría eliminándolas. También se podrían pintar puntos en cada posición, con un diámetro y contraste suficientes para poder ser recogidos por el sistema pero con la incertidumbre de si no se verían afectados por la deformación. Finalmente se ha decidido descartar este sistema de medida, no por falta de exactitud o productividad, sino porque para este caso en particular, por los problemas descritos, no ofrece garantías de buenos resultados. Hay que hacer notar que es un sistema definido inicialmente para medir desplazamientos en situaciones de antes/después de eventos que provoquen movimiento, y no deformación, y en zonas puntuales aisladas.

Como método alternativo de captura de los desplazamientos se dispone de una máquina tridimensional, descrita en el Capítulo 3. Este sistema es de gran precisión y exactitud pero cuya disponibilidad era restringida, por eso no se planteó su uso desde un principio. Finalmente se ha conseguido disponer del equipo durante un breve periodo de tiempo, por lo que se ha planificado meticulosamente el proceso necesario para medir el estado inicial, ensayar seguidamente y volver a medir el estado deformado.

Lo primero es definir un mismo sistema de referencia para todas las probetas, que pueda registrarse siempre igual y con los mismos puntos de referencia. Estos puntos de referencia serán los planteados anteriormente en la zona de pisado que no se deformará. Además, se orientará el sistema de manera que el eje X coincida con el de menor deformación esperada en el plano, a lo ancho de la probeta, y el eje Y con la dirección de laminación, en la dirección de la máxima deformación en el plano. En la Figura 5.18 se muestra, para una de las probetas, el posicionado de la misma para ser medida en el estado inicial y cómo queda definido el sistema de referencia. En la Figura 5.19 se muestra un detalle de la captura de la posición inicial de algunos de los puntos de la rejilla de control.

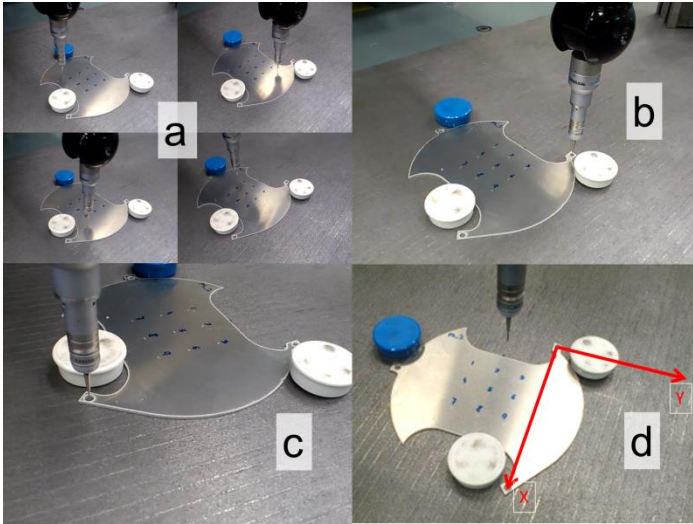


Figura 5.18. Posicionado y definición sistema referencia: a) marcado de 4 puntos en el plano de la probeta, b) definición del origen del sistema de referencia (centro del taladro), c) definición de la dirección del eje X desde el origen y d) sistema de coordenadas definitivo.

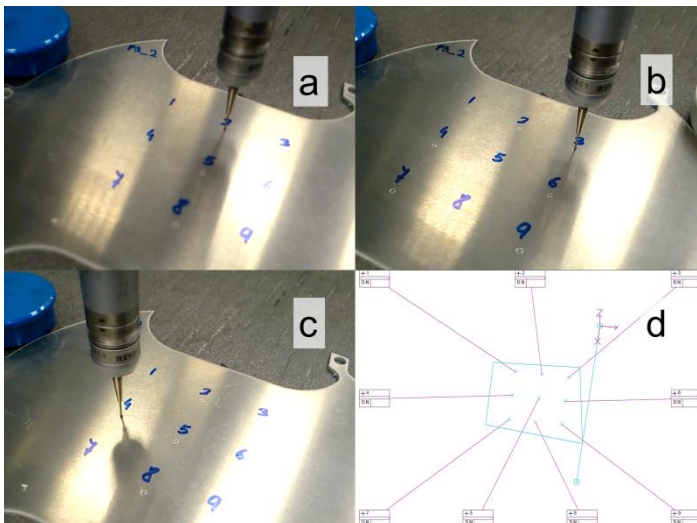
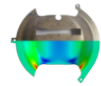


Figura 5.19. Marcado de algunos puntos de la rejilla a) punto 2, b) punto 3, c) punto 4 y d) esquema completo final.



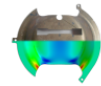
Dado que ahora el sistema de medición ofrece unos datos de salida diferentes, como son directamente las coordenadas X, Y y Z de cada uno de los puntos de la rejilla, respecto al nuevo sistema de referencia, se ha modificado convenientemente la hoja Excel para calcular los parámetros deseados ya descritos (expresiones 3.6 a 3.8) en función de los nuevos datos. Finalmente, la salida de resultados sigue siendo la misma que la mostrada en la Figura 5.17. En dicha hoja Excel se puede apreciar de un vistazo si hay algún tipo de desviación en las deformaciones de cada cuadrícula pequeña respecto a la rejilla central grande y poder evaluar la existencia de errores en la medida.

Una vez extraídos todos los datos de posición de todas las probetas y tratados con las plantillas Excel, es posible determinar los valores de ε_I y β en cada uno de los ensayos de embutición planificados anteriormente. La Tabla 5.5 muestra dichos valores, donde los resultados correspondientes a los experimentos 1 a 9 se emplearán en la obtención de las superficies de respuesta y, los de los experimentos 10 a 15, servirán para la validación de la metodología propuesta.



Tabla 5.5. Variables de entrada del diseño de experimentos, obtenidas de medir la deformación de la zona central plana de las probetas Marciniak.

PLAN DE EXPERIMENTACIÓN (Variables reales)				
Nº Exp.	β	ε_I	Anchura de probeta (mm)	Profundidad de embutición (mm)
1	-0.50	0.012	20	6
2	-0.34	0.014	80	6
3	-0.50	0.064	20	12
4	-0.34	0.044	80	12
5	-0.50	0.17	20	18
6	-0.34	0.105	80	18
7	1.00	0.045	100	12
8	1.00	0.093	100	17
9	1.00	0.157	100	21
10	-0.45	0.007	40	6
11	-0.40	0.01	60	6
12	-0.45	0.053	40	12
13	-0.40	0.053	60	12
14	-0.45	0.12	40	18
15	-0.40	0.11	60	18



Para tener una visión general de todos los ensayos de embutición Marciniak realizados y poder identificar, rápidamente, el tipo de probeta y el estado de deformación al que ha sido sometida a lo largo del proceso de embutición, se han graficado en la Figura 5.20 los datos de la Tabla 5.5. Este gráfico está en el formato habitual empleado para representar los Diagramas de límite de conformado o *FLD*. En el eje de abscisas se muestra la deformación menor en el plano ε_{II} , que puede ser positiva, si se está en la zona de deformación biaxial, o negativa, si se mueve hacia la tracción uniaxial. En este caso coincide con la deformación a lo ancho de la probeta o eje X. En el eje de ordenadas se muestra la deformación mayor en el plano ε_I , que siempre es positiva y se produce a lo largo de la probeta o eje Y.

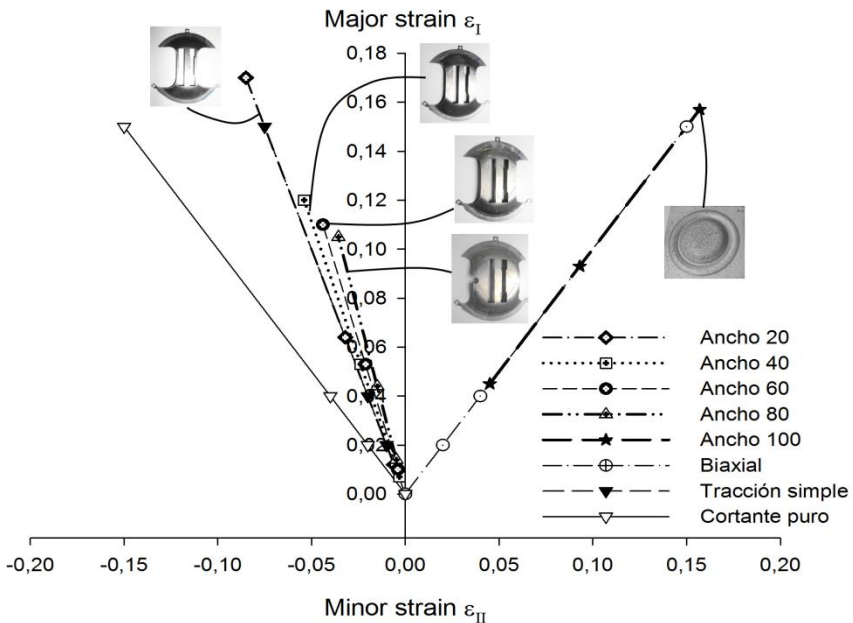


Figura 5.20. Estado de deformación para cada probeta Marciniak en formato *FLD*.



5.3.2. Ensayos de tracción de probetas pre-deformadas

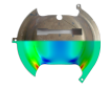
Una vez realizados todos los ensayos de embutición y medidas las correspondientes deformaciones en la zona plana más profunda, se han extraído, mediante corte por electro-erosión, las correspondientes probetas de tracción uniaxial. En la Figura 5.21 se muestran detalles de estas probetas uniaxiales, tras ser ensayadas, con sus correspondientes probetas Marciniak de las que han sido extraídas. Se ha procurado, en la medida de lo posible, extraer estas probetas de tracción de la zona central, ya que es en la que se ha medido y se conoce la deformación producida durante el proceso de embutición.

De cada uno de los ensayos de tracción uniaxial se ha registrado su curva fuerza-desplazamiento y se han extraído los parámetros elasto-plásticos establecidos, para completar el plan de experimentación fijado por el diseño de experimentos.



Figura 5.21. *Detalle de algunas de las probetas Marciniak, con sus correspondientes probetas de tracción ya ensayadas.*

A continuación se muestran, en las Figuras 5.22 hasta la 5.26, las curvas tensión-deformación, en valores reales, de cada una de las probetas de tracción. Se van a mostrar, en primer lugar, agrupadas por cada ancho de probeta y sus diferentes profundidades. En estas se aprecia a primera vista cómo, para



el mismo ancho de probeta, al aumentar la profundidad de embutición, se incrementa el valor de $\sigma_{0,2}$ y σ_{UTS} y, a su vez, se va perdiendo capacidad de deformación, disminuyendo ε_{rot} .

Antes de continuar con la exposición del resto de gráficas, hacer notar que se ha añadido, en todos los grupos de curvas, la curva tensión-deformación verdadera del material original de las placas, en condiciones de suministro y para la dirección longitudinal. De esta manera se pueden comparar y ver de qué manera afecta la embutición y, por lo tanto, los diferentes estados de deformación generados, sobre el comportamiento mecánico del material.

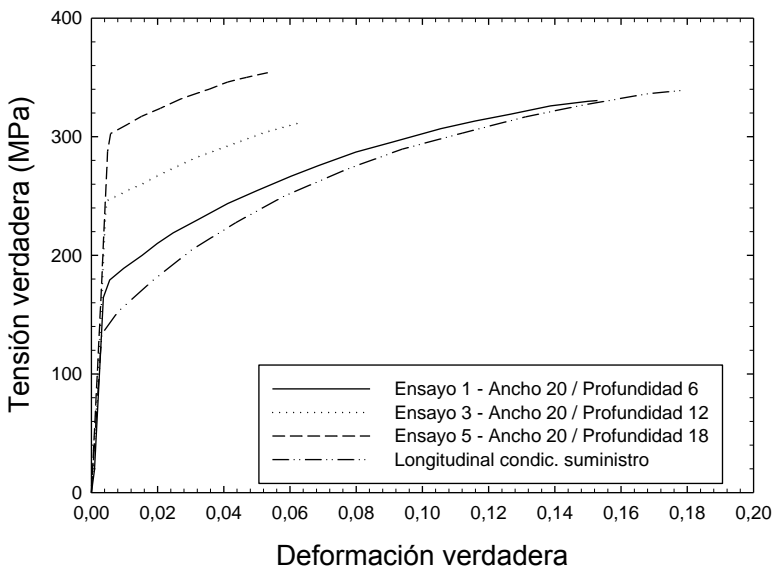


Figura 5.22. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir las probetas de ancho 20mm.

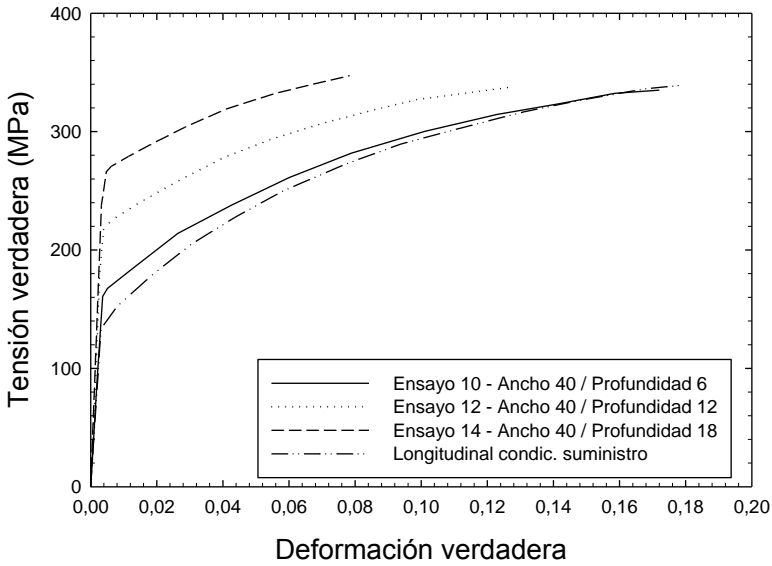


Figura 5.23. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir las probetas de ancho 40mm.

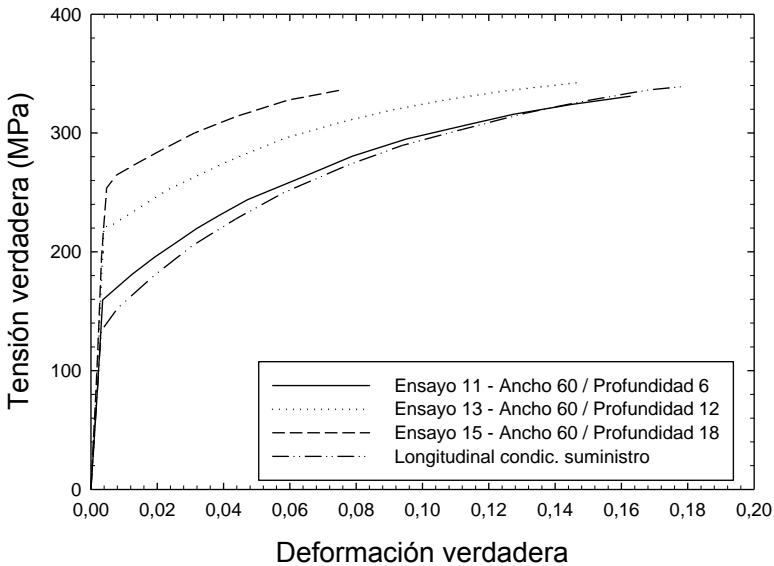


Figura 5.24. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir las probetas de ancho 60mm.

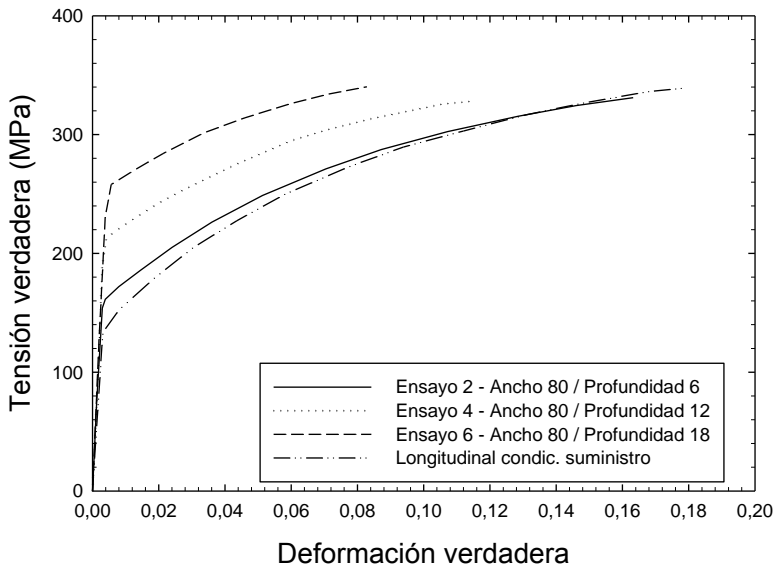
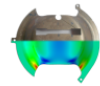


Figura 5.25. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir las probetas de ancho 80mm.

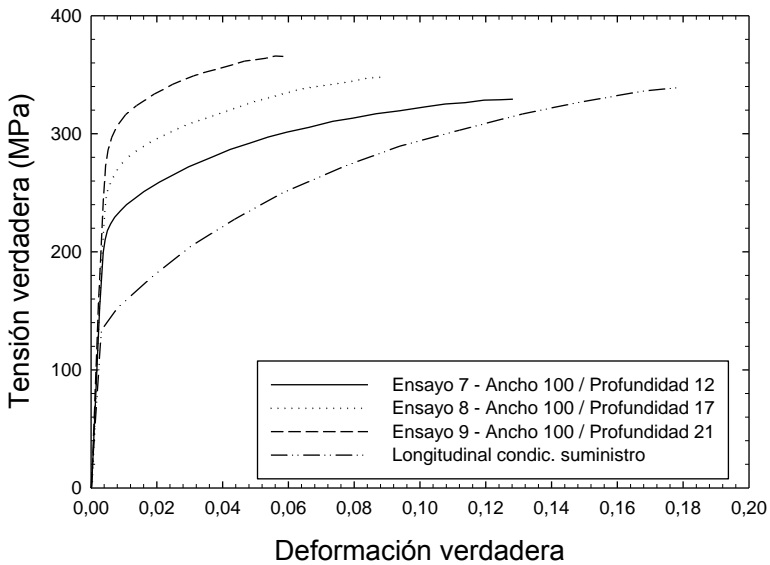


Figura 5.26. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir las probetas de ancho 100mm.



Tras haber comprobado cómo afecta el aumento del estado de deformación, según se aumenta la profundidad de embutición, a cada tipo de probeta ensayada, se muestran en las Figuras 5.27 a 5.29 las gráficas tensión-deformación anteriores pero agrupadas por profundidad de embutición. En este caso, solamente para el nivel más bajo de embutición, 6mm, las curvas aparecen muy agrupadas. Esto se corrobora viendo que, para esta profundidad, prácticamente todas están en similar nivel de ε_I . Para el resto de profundidades, aun apareciendo relativamente cercanas, existe una dispersión, achacable también a esa misma variación en los valores de ε_I de la Tabla 5.5.

Estas curvas se han empleado para extraer los parámetros elasto-plásticos necesarios para alimentar el diseño de experimentos y validar la metodología. Dichos parámetros se pueden consultar en el siguiente apartado de este capítulo.

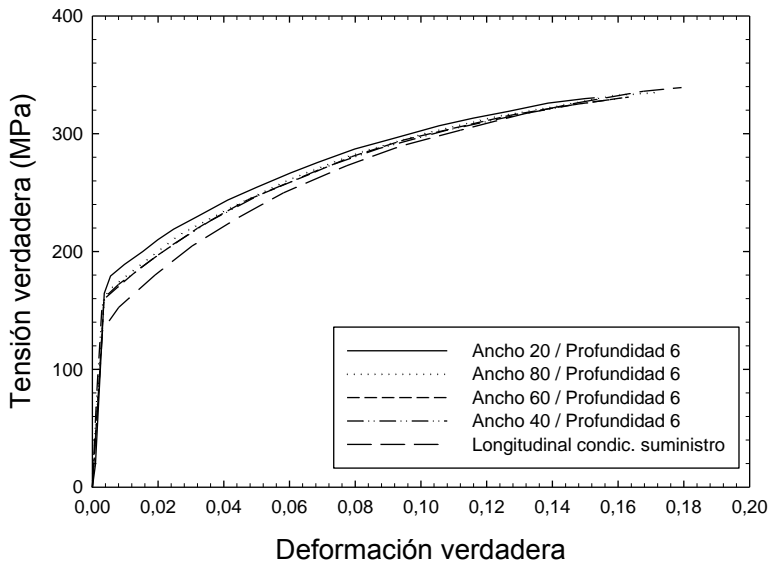


Figura 5.27. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir a profundidad 6mm.

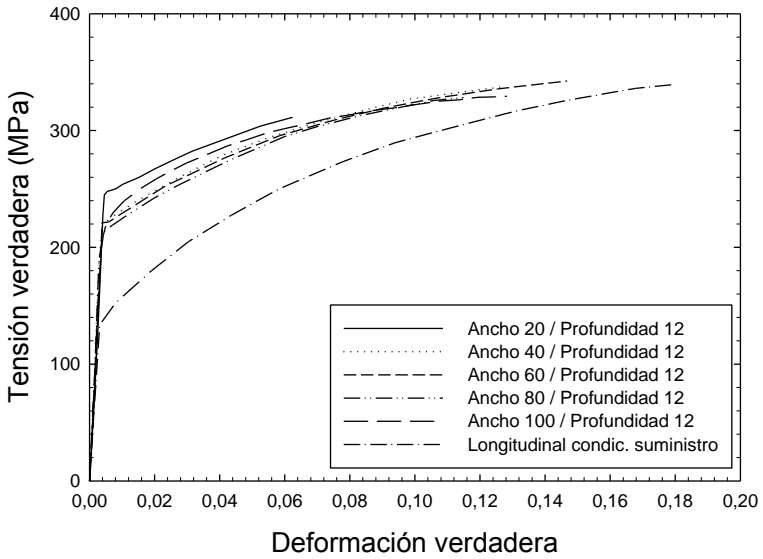
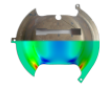


Figura 5.28. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir a profundidad 12mm.

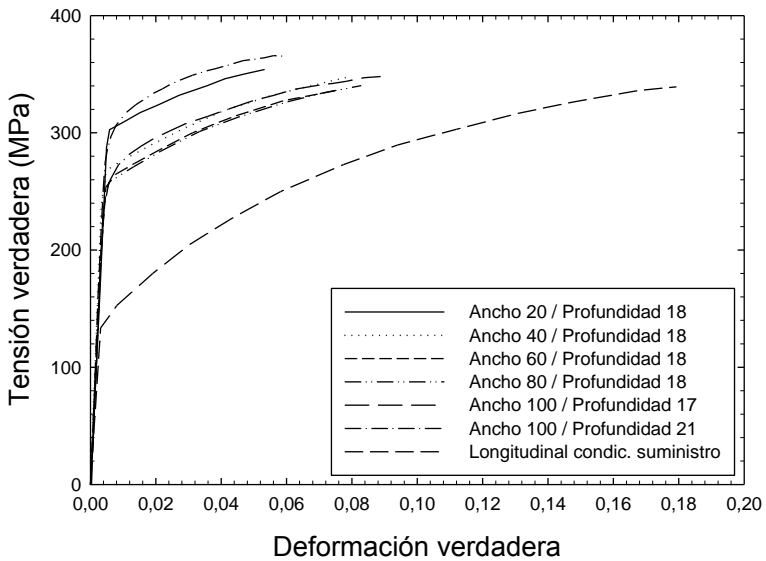


Figura 5.29. Curvas tensión-deformación verdadera del ensayo de tracción uniaxial tras embutir a profundidad 18mm y la de 21mm.



5.4. RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS MEDIANTE SUPERFICIES DE RESPUESTA

Una vez realizados cada uno de los experimentos que conforman el plan de experimentación, se han extraído las propiedades elasto-plásticas (respuestas) recogidas en la Tabla 5.6. A partir de estos valores y con la ayuda de STATGRAPHICS Centurion, es posible determinar los coeficientes de las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ de cada una de las respuestas (E , $\sigma_{0.2}$, σ_{UTS} , ε_{rot} , K , n), los cuales se muestran en la Tabla 5.7. Al 95% de confianza los coeficientes significativos para las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ son los que se han marcado con asteriscos en función del grado de significación. Los coeficientes que no son significativos contribuyen a curvar correctamente las superficies de respuesta, por lo que no es conveniente eliminarlos de las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$.

Tabla 5.6. Valores de las propiedades elasto-plásticas.

PLAN DE EXPERIMENTACIÓN (VARIABLES REALES)			PROPIEDADES ELASTO-PLÁSTICAS					
Nº Exp	β	ε_I	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ε_{rot}	K	n
1	-0.50	0.012	51150	179.95	289.38	0.17	403.61	0.1722
2	-0.34	0.014	51563	164.88	286.50	0.19	408.56	0.1869
3	-0.50	0.064	53398	248.74	299.67	0.07	372.62	0.0872
4	-0.34	0.044	63737	216.21	296.77	0.13	386.17	0.1222
5	-0.50	0.17	57058	306.77	340.43	0.06	392.00	0.0524
6	-0.34	0.105	67261	258.45	316.75	0.10	396.34	0.0920
7	1.00	0.045	62547	225.17	329.30	0.13	435.01	0.1316
8	1.00	0.093	67750	261.73	348.00	0.09	453.08	0.1083
9	1.00	0.157	75242	298.95	365.90	0.06	477.86	0.0916



En todos los casos, las regresiones son muy significativas estadísticamente, el coeficiente de determinación y el error absoluto medio de cada una de ellas se puede consultar en la Tabla 5.8.

Tabla 5.7. Coeficientes de las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ (variables codificadas).

COEF.	$E(\beta^*, \varepsilon_I^*)$		$\sigma_{0.2}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$		$\sigma_{UTS}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	
	VALOR	SIG. (%)	VALOR	SIG. (%)	VALOR	SIG. (%)
b₀	80323.1	<0.01***	222.26	<0.01***	318.05	<0.01***
b₁	5627.2	5.1	-2.77	48.2	16.65	0.1**
b₂	7752.8	4.4*	61.76	0.08**	26.00	0.07**
b₁₁	-16895.7	14.9	45.14	7.7	9.52	24.7
b₁₂	3155.0	28.9	-1.28	80.7	-0.70	73.4
b₂₂	-5011.0	28.2	-26.82	3.7*	2.40	46.9

COEF.	$\varepsilon_{rot}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$		$K(\beta^*, \varepsilon_I^*)$		$n(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	
	VALOR	SIG. (%)	VALOR	SIG. (%)	VALOR	SIG. (%)
b₀	0.1598	<0.01***	426.01	<0.01***	0.1342	<0.01***
b₁	0.0118	19.5	35.42	0.4*	0.0157	8.4
b₂	-0.0572	0.8*	10.85	14.5	-0.0491	0.9*
b₁₁	-0.0890	8.4	-15.81	50.5	-0.0492	20.4
b₁₂	-0.0073	51.3	13.84	10.0	0.0087	38.9
b₂₂	0.0520	4.2*	20.76	10.8	0.0417	5.2



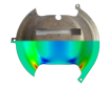
Tabla 5.8. Ajuste y error absoluto medio de las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$.

SUPERFICIE DE RESPUESTA	R² (%)	ERROR ABSOLUTO MEDIO
$E(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	91.6	1922.5 MPa
$\sigma_{0.2}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	99.1	3.77 MPa
$\sigma_{UTS}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	99.6	1.50 MPa
$\varepsilon_{rot}(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	95.9	0.0078
$K(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	97.2	4.76
$n(\beta^*, \varepsilon_I^*)$	96.1	0.00686

A partir de las funciones $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ que ajustan adecuadamente las respuestas obtenidas en el diseño, es posible determinar las propiedades elasto-plásticas para cualquier combinación de valores de los parámetros β y ε_I , previa codificación, siempre y cuando nos encontremos dentro del dominio cúbico definido anteriormente para este diseño. Las expresiones (5.16) a (5.21) representan las superficies de respuesta de las propiedades elasto-plásticas obtenidas a partir de los coeficientes de la Tabla 5.7. Las Figuras 5.30 a 5.35 muestran las superficies de respuesta en 3D de cada una de las expresiones anteriores respectivamente. De igual manera, las Tablas 5.6 a 5.11 ofrecen valores de esos coeficientes para combinaciones de β y ε_I .

$$E(\beta^*, \varepsilon_I^*) = 80323.1 + 5627.2\beta^* + 7752.8\varepsilon_I^* - 16895\beta^{*2} + 3155\beta^*\varepsilon_I^* - 5011\varepsilon_I^{*2} \quad (5.16)$$

$$\sigma_{0.2}(\beta^*, \varepsilon_I^*) = 222.26 - 2.77\beta^* + 61.76\varepsilon_I^* + 45.14\beta^{*2} - 1.28\beta^*\varepsilon_I^* - 26.82\varepsilon_I^{*2} \quad (5.17)$$



$$\sigma_{UTS}(\beta^*, \varepsilon_I^*) = 318.05 + 16.65\beta^* + 26\varepsilon_I^* + 9.52\beta^{*2} - 0.7\beta^*\varepsilon_I^* + 2.4\varepsilon_I^{*2} \quad (5.18)$$

$$\varepsilon_{rot}(\beta^*, \varepsilon_I^*) = 0.1598 + 0.0118\beta^* - 0.0572\varepsilon_I^* - 0.089\beta^{*2} - 0.0073\beta^*\varepsilon_I^* + 0.052\varepsilon_I^{*2} \quad (5.19)$$

$$H(\beta^*, \varepsilon_I^*) = 426.01 + 35.42\beta^* + 10.85\varepsilon_I^* - 15.81\beta^{*2} + 13.84\beta^*\varepsilon_I^* + 20.76\varepsilon_I^{*2} \quad (5.20)$$

$$m(\beta^*, \varepsilon_I^*) = 0.1342 + 0.0157\beta^* - 0.0491\varepsilon_I^* - 0.0492\beta^{*2} + 0.0087\beta^*\varepsilon_I^* + 0.0417\varepsilon_I^{*2} \quad (5.21)$$

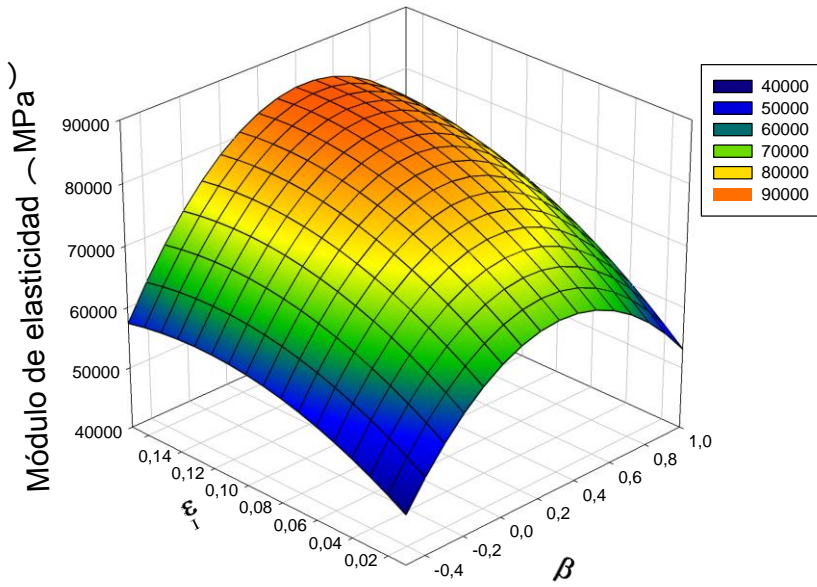


Figura 5.30. Superficie de respuesta 3D de E .

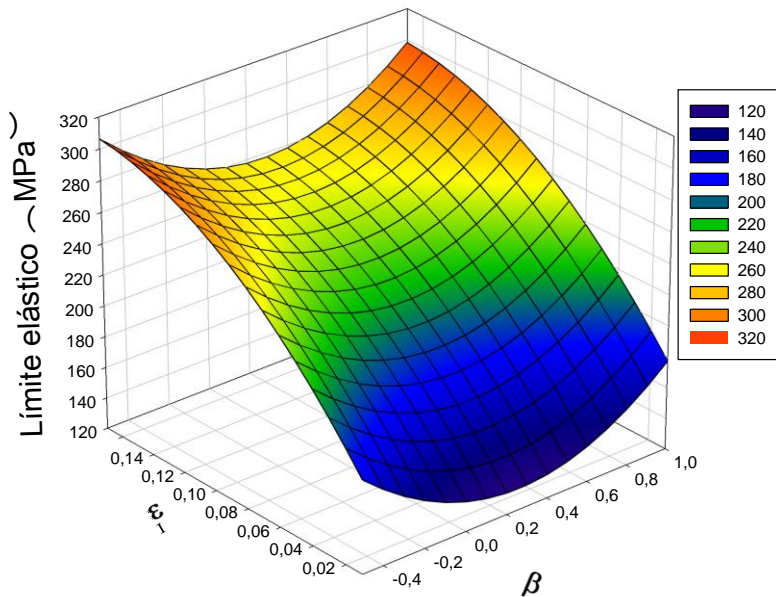


Figura 5.31. Superficie de respuesta 3D de $\sigma_{0.2}$.

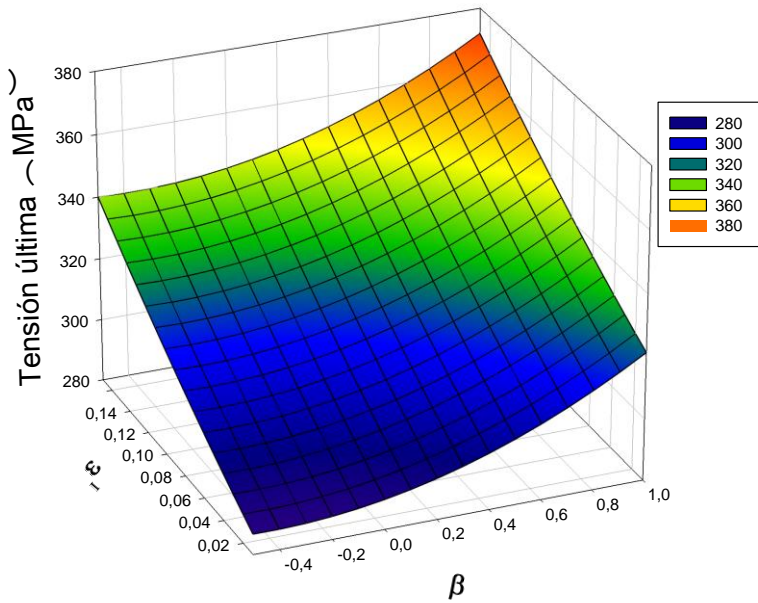
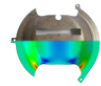


Figura 5.32. Superficie de respuesta 3D de σ_{UTS} .

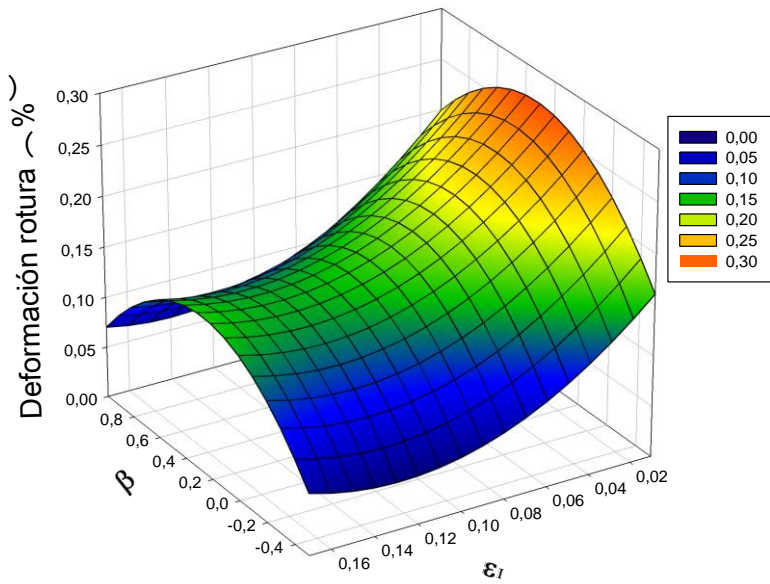


Figura 5.33. Superficie de respuesta 3D de ϵ_{rot} .

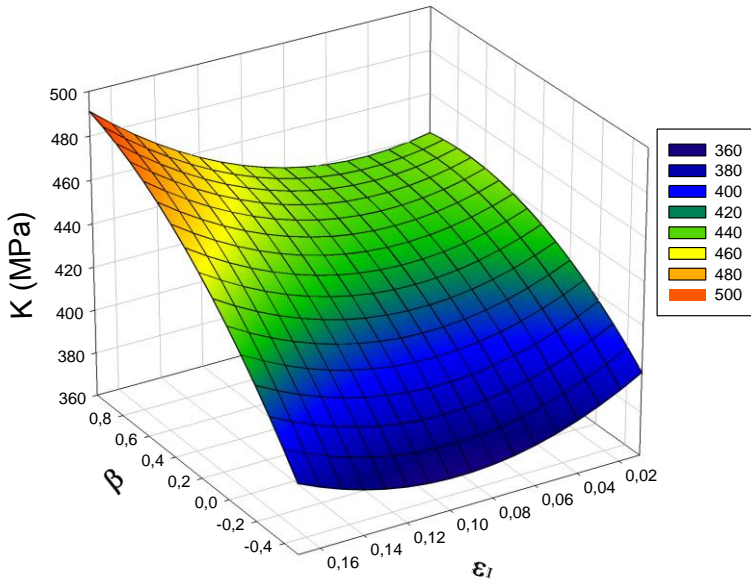


Figura 5.34. Superficie de respuesta 3D de K .

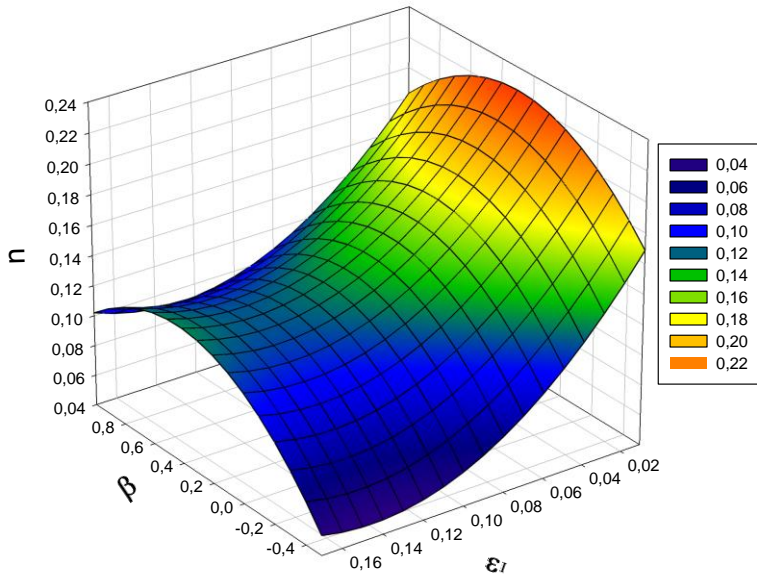


Figura 5.35. Superficie de respuesta 3D de n .



Una vez establecidas las superficies de respuesta para cada parámetro elasto-plástico, se ha procedido a elaborar una lista manejable y a la vez representativa de materiales en función de los diferentes pares β y ε_I . Para esta tarea se han dividido ambos rangos de cada variable en 5 tramos, lo que permitirá definir una lista de 25 materiales, a los que habrá que sumar el material original sin deformación (Tabla 5.9). En base a esta división se generarán posteriormente, mediante un script, las diferentes cartas de material para la simulación en ABAQUS.

Tabla 5.9. Lista de los diferentes materiales generados según su estado de deformación dado por el par β y ε_I .

		MATERIALES (β , ε_I)				
ε_I	0.16	21 (-0.5,0.17)	22 (-0.35,0.17)	23 (-0.125,0.17)	24 (0.4,0.17)	25 (1,0.17)
	0.12	16 (-0.5,0.14)	17 (-0.35,0.14)	18 (-0.125,0.14)	19 (0.4,0.14)	20 (1,0.14)
	0.08	11 (-0.5,0.1)	12 (-0.35,0.1)	13 (-0.125,0.1)	14 (0.4,0.1)	15 (1,0.1)
	0.04	6 (-0.5,0.06)	7 (-0.35,0.06)	8 (-0.125,0.06)	9 (0.4,0.06)	10 (1,0.06)
	0.01	1 (-0.5,0.025)	2 (-0.35,0.025)	3 (-0.125,0.025)	4 (0.4,0.025)	5 (1,0.025)
		0 ($\forall \beta , \varepsilon_I < 0.01$)				
		-0.45	-0.25	0	0.8	β

Para obtener los valores de los parámetros elasto-plásticos, correspondientes a cada rango, se ha desarrollado una hoja Excel en la que, tras introducir las ecuaciones de las superficies de respuesta mediante sus diferentes coeficientes, basta con introducir, como se muestra la Figura 5.36, el par de valores β y ε_I (puntos medios en cada rango) para el material seleccionado de la Tabla 5.9 y la hoja Excel devuelve todos los parámetros elasto-plásticos.



Coefficiente	E	Limite elástico	Tensión rotura	Deformación rotura	K	n
B_0	80323.1	222.26	318.05	0.1598	426.01	0.1342
B_1	5627.2	-2.77	16.65	0.0118	35.42	0.0157
B_2	7752.8	61.76	26	-0.0572	10.85	-0.0491
B_{11}	-16895.7	45.14	9.52	-0.089	-15.81	-0.0492
B_{12}	3155	-1.28	-0.7	-0.0073	13.84	0.0087
B_{22}	-5011	-26.82	2.4	0.052	20.76	0.0417

Beta	1	Codificado
ϵ_f	-0.8125	Codificado

E	E1=	-56883.97
Limite elástico	L1=	197.78
Tensión rotura	T1=	325.25
Deformación rotura	D1=	0.1693
K	K1=	439.26
n	n1=	0.1611
1.5	esp=	1.4250

Paso 2: Se generan automáticamente los parámetros elasto-plásticos correspondientes.

Beta	1	Sin Codificar
ϵ_f	0.025	Sin Codificar

Paso 1: Se introducen los pares de valores β y ϵ_f .

VALOR -1	-0.5	0.01
VALOR 1	1	0.17

VALIDACION				Módulo (Mpa)	Limite 0.2%	Máx Tens lng	Def rotura	K	n
SIN CODIFICAR	SIN CODIFICAR	CODIFICADO	CODIFICADO						
Beta	e1	Beta	e1						
-0.45	0.007	-0.93	-1.04	55886	168.25	287.62	0.19	409.73	0.18
-0.40	0.01	-0.87	-1.00	54778	164.57	286.71	0.19	406.12	0.19
-0.45	0.053	-0.933333333	-0.4625	65116	224.58	301.4934428	0.15061696	377.52	0.109
-0.4	0.053	-0.866666667	-0.4625	64333	222.18	301.6497036	0.17101465	385.52	0.1183
-0.45	0.12	-0.933333333	0.375	70972	270.49	324.4470152	0.0986125	397	0.0826
-0.4	0.11	-0.866666667	0.25	57905	262.06	316.8008534	0.09286862	394.59	0.0891

Figura 5.36. Detalle de la hoja Excel para calcular los parámetros elasto-plásticos a partir de cada par β y ϵ_f .

A continuación se muestran, a través de las Figuras 5.37 a la 5.42, con sus respectivas Tablas 5.10 a la 5.15, tanto las curvas de nivel, para cada superficie de respuesta, como los valores de cada parámetro elasto-plástico para los materiales del 1 al 25 definidos en la Tabla 5.9.

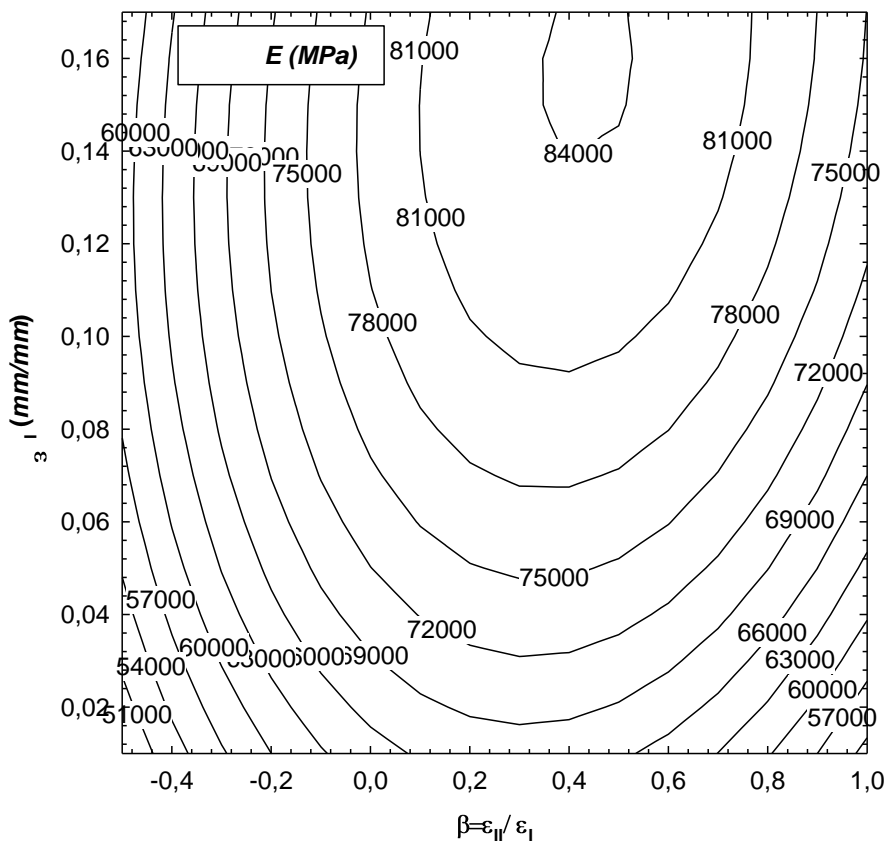


Figura 5.37. Contornos de la superficie de respuesta de E .

Tabla 5.10. Valores de E para pares de valores β y ϵ_I .

$\beta \backslash \epsilon_I$	-0.5	-0.35	-0.125	-0.4	-1
0.17	57387	65225	74449	84145	74951
0.14	58716	66318	75187	84005	73914
0.1	58296	65583	73979	81742	70339
0.06	55371	62342	70265	76924	64259
0.025	50756	57451	64960	70652	56883

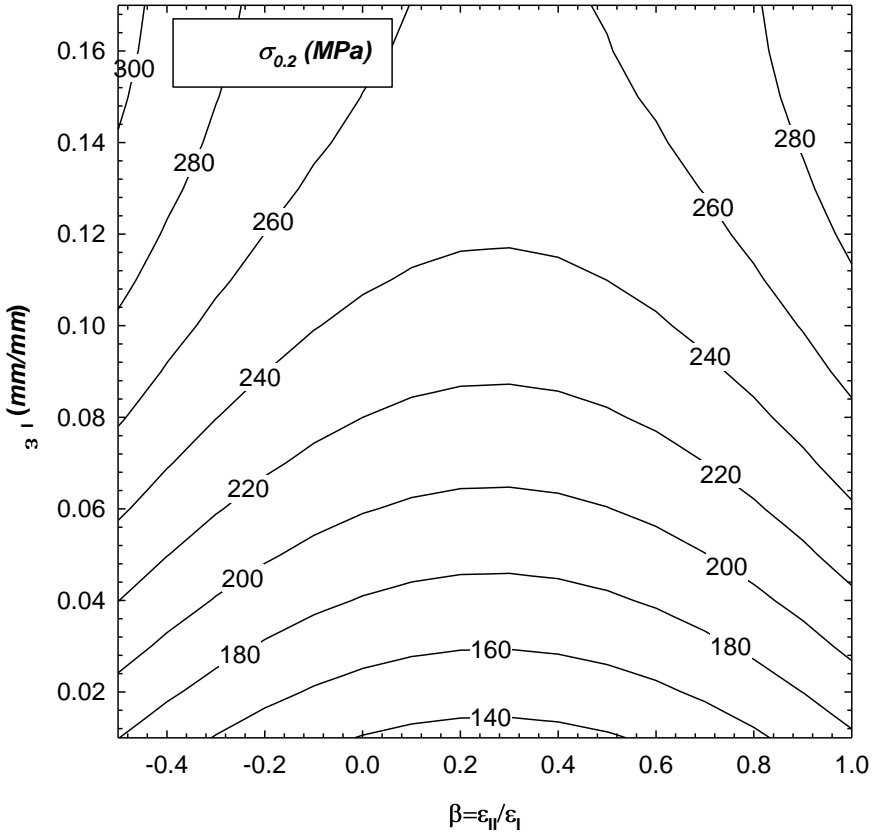


Figura 5.38. Contornos de la superficie de respuesta de $\sigma_{0.2}$.

Tabla 5.11. Valores de $\sigma_{0.2}$ para pares de valores β y ϵ_I .

β ϵ_I	-0.5	-0.35	-0.125	-0.4	-1
0.17	306.39	289.33	270.51	258.2	298.29
0.14	299.09	282.13	263.45	251.48	291.95
0.1	277.63	260.79	242.31	230.78	271.77
0.06	242.76	226.05	207.76	196.68	238.18
0.025	201.24	184.65	166.52	155.83	197.78

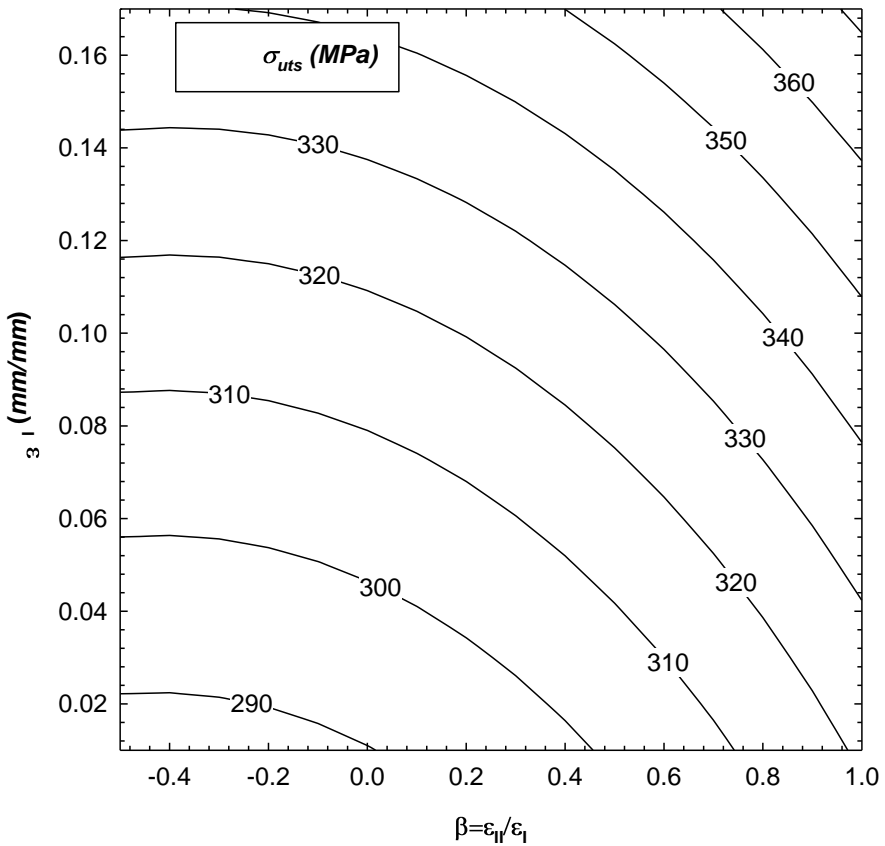
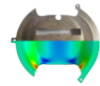


Figura 5.39. Contornos de la superficie de respuesta de σ_{UTS} .

Tabla 5.12. Valores de σ_{UTS} para pares de valores β y ϵ_I .

β ϵ_I	-0.5	-0.35	-0.125	-0.4	-1
0.17	340.02	339.78	340.86	350.02	371.92
0.14	328.55	328.36	329.51	338.86	360.97
0.1	314.3	314.18	315.44	325.03	347.42
0.06	301.25	301.2	302.56	312.4	335.07
0.025	290.81	290.83	292.28	302.33	325.25

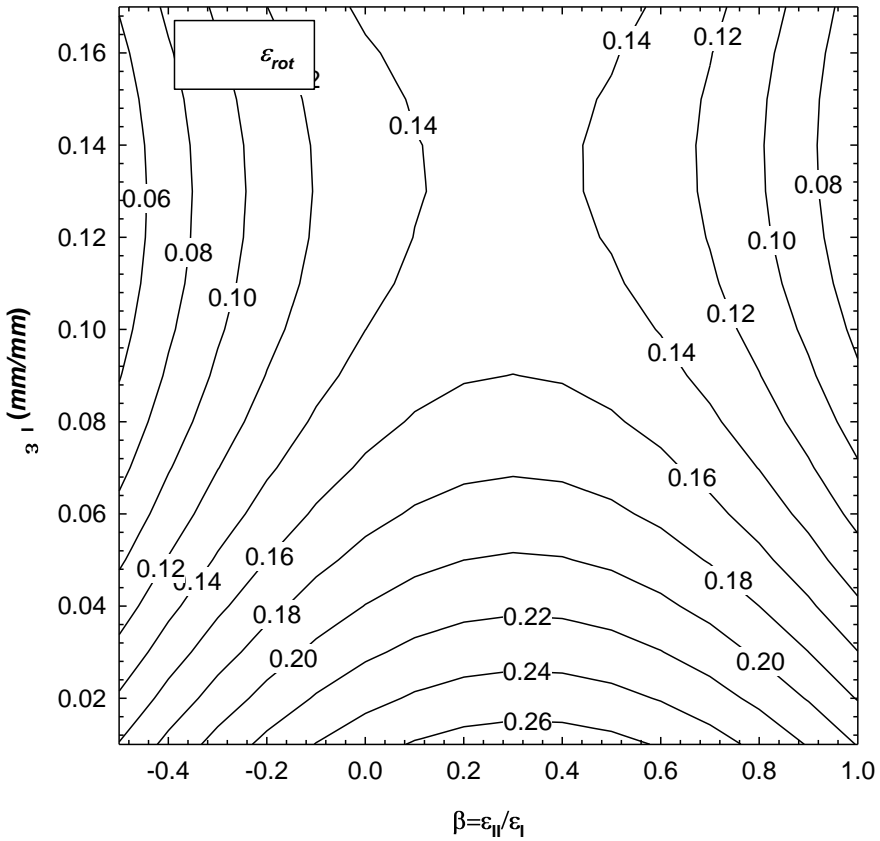


Figura 5.40. Contornos de la superficie de respuesta de ε_{rot} .

Tabla 5.13. Valores de ε_{rot} para pares de valores β y ε_I .

$\beta \backslash \varepsilon_I$	-0.5	-0.35	-0.125	-0.4	-1
0.17	0.0611	0.094	0.1301	0.1519	0.0701
0.14	0.0481	0.0816	0.1185	0.1423	0.0626
0.1	0.0536	0.0878	0.1258	0.1521	0.0753
0.06	0.085	0.12	0.159	0.1879	0.1141
0.025	0.1339	0.1695	0.2095	0.2406	0.1693

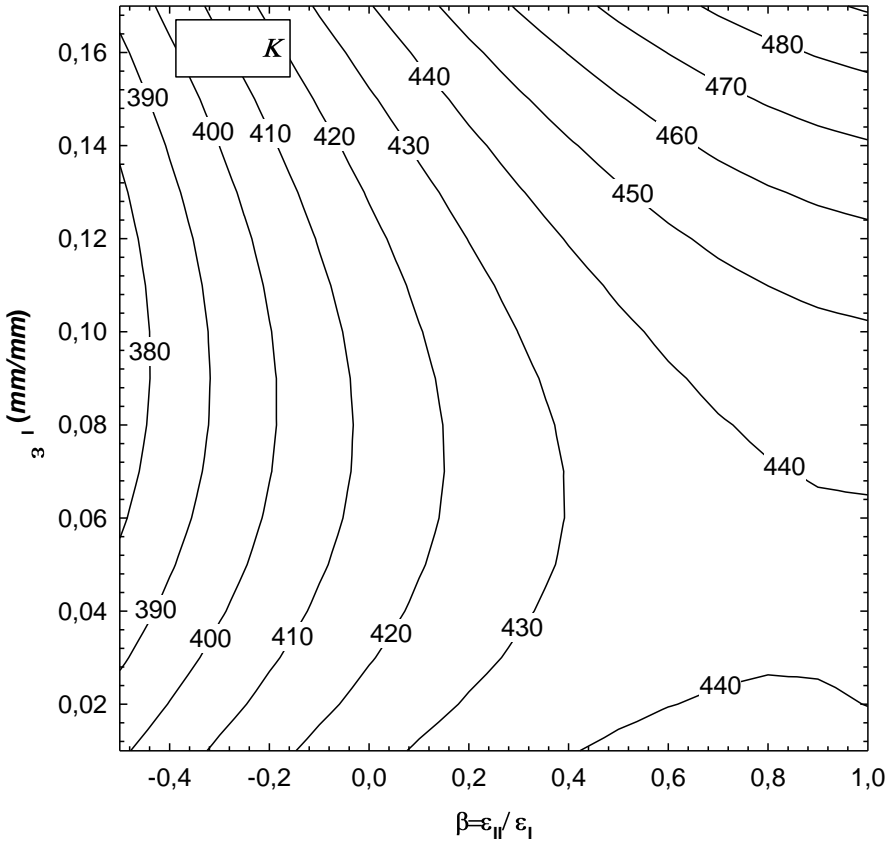
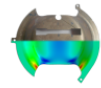


Figura 5.41. Contornos de la superficie de respuesta de K .

Tabla 5.14. Valores de K para pares de valores β y ϵ_I .

β / ϵ_I	-0.5	-0.35	-0.125	-0.4	-1
0.17	392.55	408.09	429.04	466.84	491.07
0.14	381.03	395.53	414.91	449.08	469.16
0.1	374.73	387.85	405.16	434.49	449.03
0.06	378.82	390.56	405.79	430.27	439.28
0.025	390.91	401.44	414.86	435.1	439.26

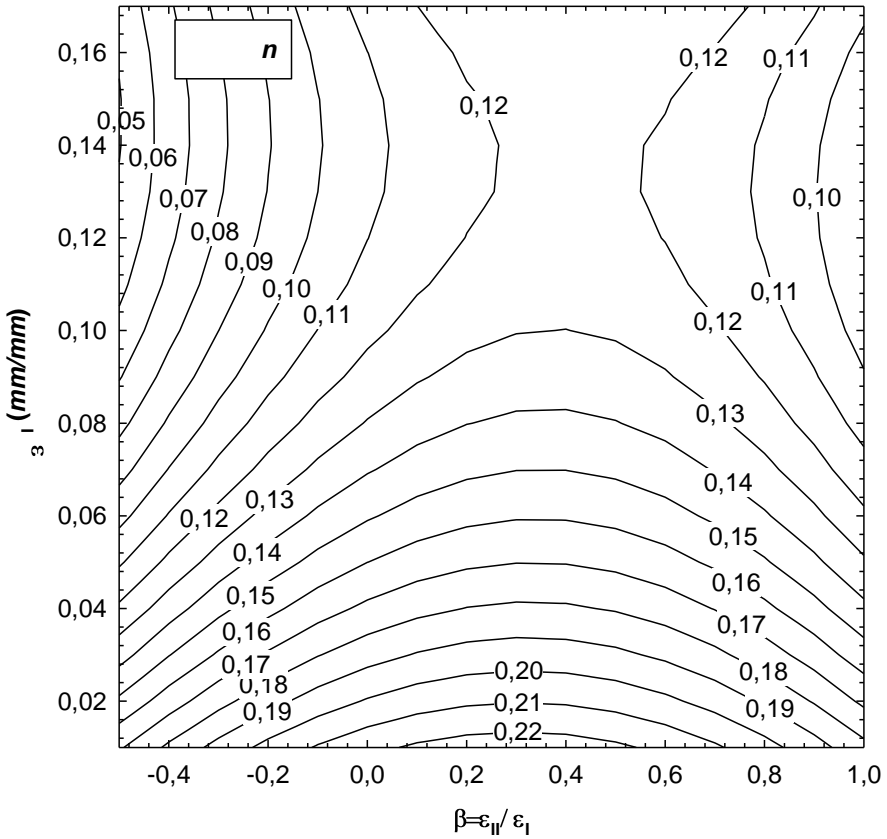
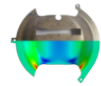


Figura 5.42. Contornos de la superficie de respuesta de n .

Tabla 5.15. Valores de n para pares de valores β y ϵ_I .

β ϵ_I	-0.5	-0.35	-0.125	-0.4	-1
0.17	0.0532	0.0758	0.1023	0.1297	0.102
0.14	0.0495	0.0714	0.0969	0.122	0.0917
0.1	0.0627	0.0838	0.108	0.1301	0.0963
0.06	0.0968	0.117	0.14	0.159	0.1217
0.025	0.1438	0.1632	0.185	0.2014	0.1611



5.4.1. Validación del diseño de experimentos

Una vez se tienen las superficies de respuesta, estas han de ser capaces de predecir, para cualquier par de valores β y ε_I en el rango de estudio, sus correspondientes parámetros elasto-plásticos que definen un material particular.

Para validar los resultados de este diseño de experimentos, se han realizado los siguientes pasos:

1. Definir un estado de deformación mediante un par de valores β y ε_I .
2. Obtener los parámetros elasto-plásticos para ese par β y ε_I usando las superficies de respuesta y generar, a partir de ellos, una curva de material.
3. Asignar un material de la Tabla 5.9 según el rango en el que se encuentre el par (β, ε_I) .
4. Embutir una probeta Marciniak hasta conseguir el estado de deformación del punto 1.
5. Extraer una probeta de tracción uniaxial del ensayo del punto 4 y obtener su curva tensión-deformación.
6. Comparar las curvas tensión-deformación obtenidas en los puntos anteriores: la predicha por las superficies de respuesta (punto 2), la predicha por el material asignado (punto 3) y la correspondiente curva de tracción uniaxial obtenida de la probeta real (punto 5).

Para llevar a cabo esta validación se han empleado los resultados de los ensayos 10 a 15 de la Tabla 5.5. Como se ha comentado anteriormente, estos no se han empleado para la definición de las superficies de respuesta por lo que su utilidad se centra en poder ser empleados como datos de validación. Ya que para los niveles de embutición más bajos, 6mm , las curvas son muy similares entre sí y cercanas al material virgen, se han usado para la validación los ensayos de profundidades mayores, que son los ensayos 12, 13, 14 y 15.

Las Figuras 5.43 a 5.46 y las Tablas 5.16 a 5.19 muestran la comparación de resultados de cada uno de los ensayos anteriores respectivamente. En todas ellas se puede observar



la buena correlación obtenida tanto en lo referente a las curvas tensión-deformación como a los parámetros elasto-plásticos de cada ensayo de validación. En consecuencia puede darse por aceptable el empleo de los rangos de β y ε_I establecidos para la definición de los materiales que se han empleado más adelante en las simulaciones numéricas.

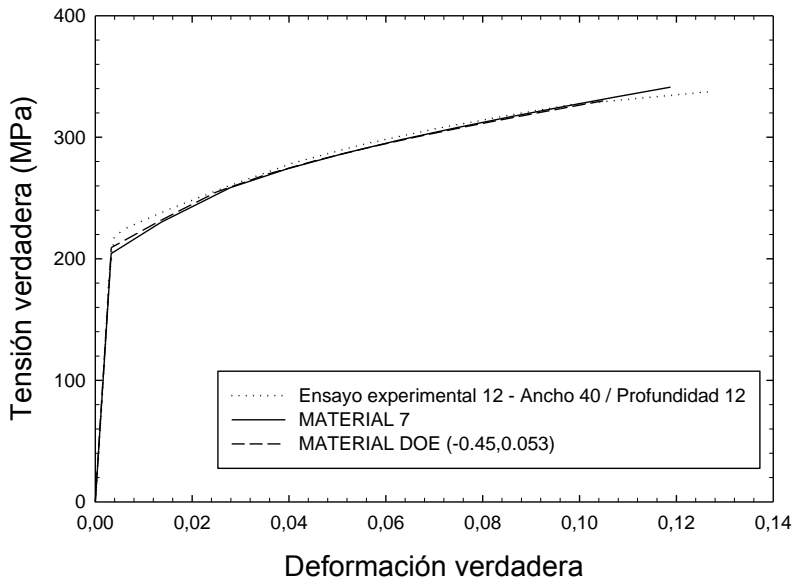
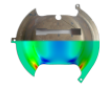


Figura 5.43. Comparativa curvas tensión-deformación del ensayo 12.

Tabla 5.16. Comparativa propiedades elasto-plásticas del ensayo 12.

		DEFORMACIÓN		PROPIEDADES ELASTO-PLÁSTICAS				
Exp	β	ϵ_I	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	K	n
DATOS ENSAYO TRACCIÓN UNIAxIAL TRAS EMBUTIR								
12	-0.45	0.053	65116	224.58	301.49	0.15	377.52	0.1090
-0.45 ≤ β < -0.25 y 0.04 ≤ ϵ_I < 0.08 → MATERIAL 7 (TABLA 5.10)								
	-0.35	0.06	62342	226.05	301.2	0.119	390.56	0.117
MATERIAL DIRECTO DE SUPERFICIES DE RESPUESTA (-0.45,0.053)								
	-0.45	0.053	57057	229.31	298.99	0.1057	384.58	0.112
DESVIACIÓN ESTANDAR								
			4094	2.42	1.37	0.02	6.53	0.0041

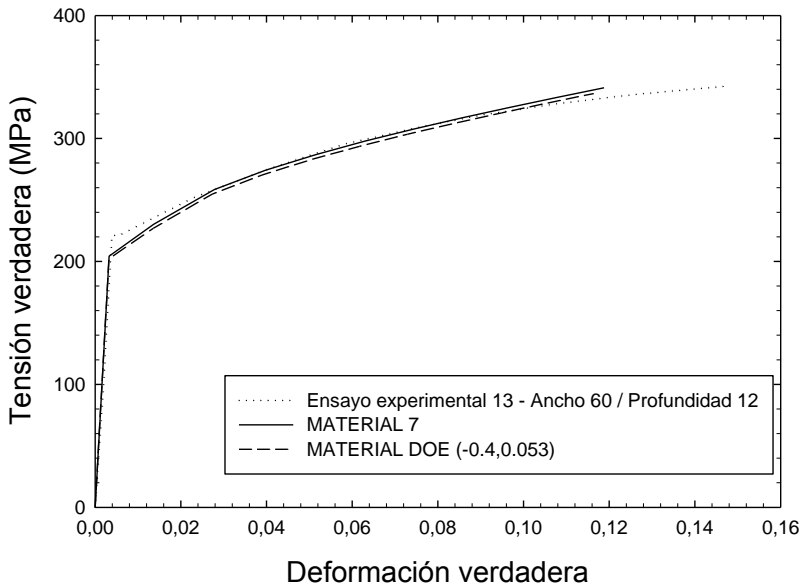


Figura 5.44. Comparativa curvas tensión-deformación del ensayo 13.

Tabla 5.17. Comparativa propiedades elasto-plásticas del ensayo 13.

DEFORMACIÓN			PROPIEDADES ELASTO-PLÁSTICAS					
Exp	β	ϵ_I	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	K	n
DATOS ENSAYO TRACCIÓN UNIAXIAL TRAS EMBUTIR								
13	-0.4	0.053	64333	222.18	301.65	0.17	385.52	0.1183
-0.45 ≤ β < -0.25 y 0.04 ≤ ε_I < 0.08 → MATERIAL 7 (TABLA 5.10)								
	-0.35	0.06	62342	226.05	301.2	0.119	390.56	0.117
MATERIAL DIRECTO DE SUPERFICIES DE RESPUESTA (-0.4,0.053)								
	-0.4	0.053	59362	223.75	298.98	0.1173	388.4	0.1187
DESVIACIÓN ESTANDAR								
			2501	1.95	1.43	0.03	2.53	0.0009

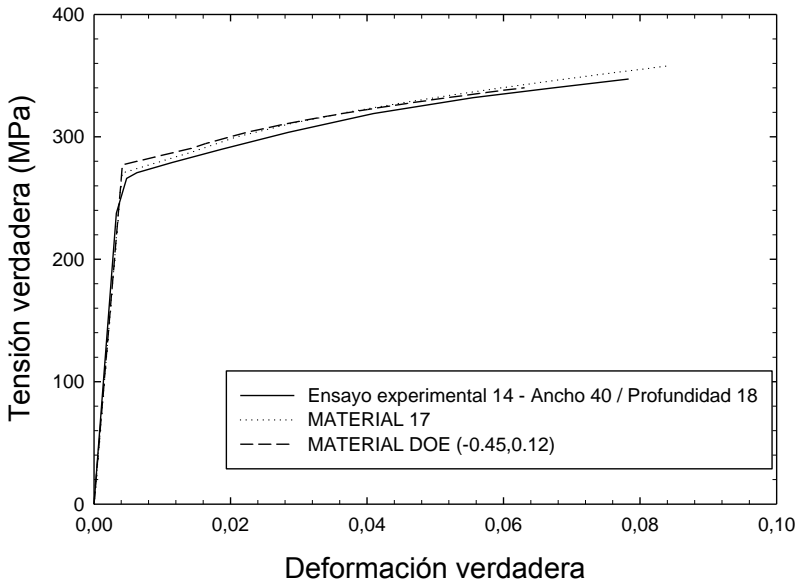
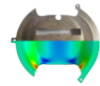


Figura 5.45. Comparativa curvas tensión-deformación del ensayo 14.

Tabla 5.18. Comparativa propiedades elasto-plásticas del ensayo 14.

		DEFORMACIÓN		PROPIEDADES ELASTO-PLÁSTICAS				
Exp	β	ϵ_I	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	K	n
DATOS ENSAYO TRACCIÓN UNIAxIAL TRAS EMBUTIR								
14	-0.45	0.12	70972	270.49	324.45	0.10	397.00	0.0826
-0.45 ≤ β < -0.25 y 0.12 ≤ ε_I < 0.16 → MATERIAL 17 (TABLA 5.10)								
	-0.35	0.14	66318	282.13	328.36	0.0816	395.53	0.0714
MATERIAL DIRECTO DE SUPERFICIES DE RESPUESTA (-0.45,0.12)								
	-0.45	0.12	61451	284	321.14	0.0597	381.32	0.0611
DESVIACIÓN ESTANDARD								
			4760	7.32	3.62	0.02	8.66	0.0108

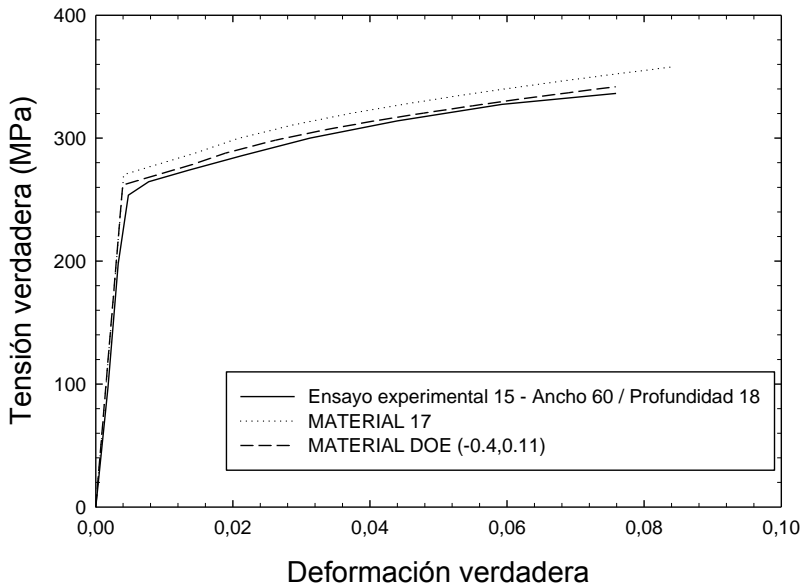
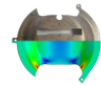


Figura 5.46. Comparativa curvas tensión-deformación del ensayo 15.

Tabla 5.19. Comparativa propiedades elasto-plásticas del ensayo 15.

DEFORMACIÓN			PROPIEDADES ELASTO-PLÁSTICAS					
Exp	β	ϵ_I	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	K	n
DATOS ENSAYO TRACCIÓN UNIAxIAL TRAS EMBUTIR								
15	-0.4	0.11	57905	262.06	316.80	0.09	394.59	0.0891
-0.45 ≤ β < -0.25 y 0.12 ≤ ε_I < 0.16 → MATERIAL 17 (TABLA 5.10)								
	-0.35	0.14	66318	282.13	328.36	0.0816	395.53	0.0714
MATERIAL DIRECTO DE SUPERFICIES DE RESPUESTA (-0.4,0.11)								
	-0.4	0.11	63697	272.61	317.57	0.0732	384.45	0.0721
DESVIACIÓN ESTANDAR								
			4305	10.04	6.46	0.01	6.14	0.0100



5.5. SIMULACIONES DE EMBUTICIÓN

Una vez mostrados los resultados de la parte experimental de la presente Tesis, llega el momento de abordar la parte numérica (Figura 5.47), en la que, a lo largo de este apartado se presentan los resultados de las simulaciones de embutición, realizadas con el programa de simulación por elementos finitos ABAQUS Standard®. Aparte de las simulaciones de embutición, se ha calibrado antes el modelo [61] para ajustarlo a los resultados obtenidos de uno de los ensayos reales de embutición. Una vez ajustado, esos mismos parámetros se han usado para simular la embutición de todas las probetas.

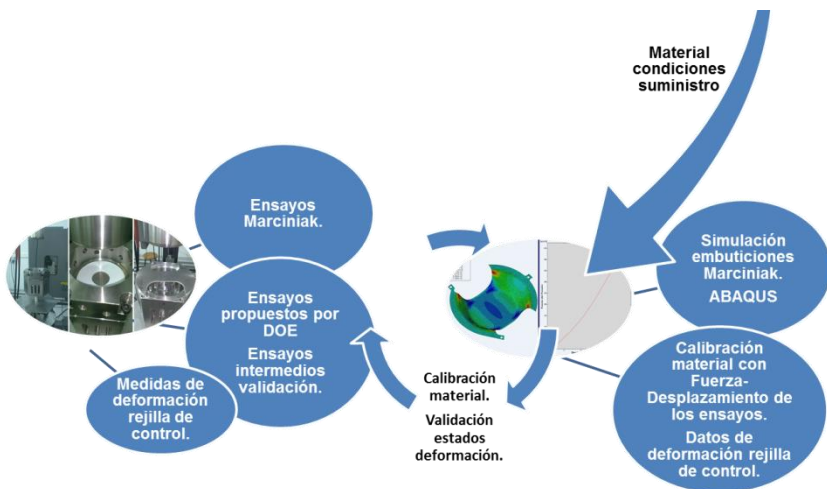


Figura 5.47. Esquema descriptivo de la etapa actual dentro de la metodología de trabajo.

El primer paso consiste en mallar las piezas que van a intervenir en la simulación. En este caso se ha utilizado el diseño 3D del utillaje para realizar un mallado de las superficies que van a entrar en contacto con la probeta Marciniak, las cuales se han modelado como sólidos rígidos indeformables. En la Figura 5.48 se muestran las piezas consideradas como rígidas, con sus correspondientes modelados en elementos finitos. La malla se ha realizado en elementos planos (*shell*) de cuatro nodos (*quads*) de tamaño medio 3mm.

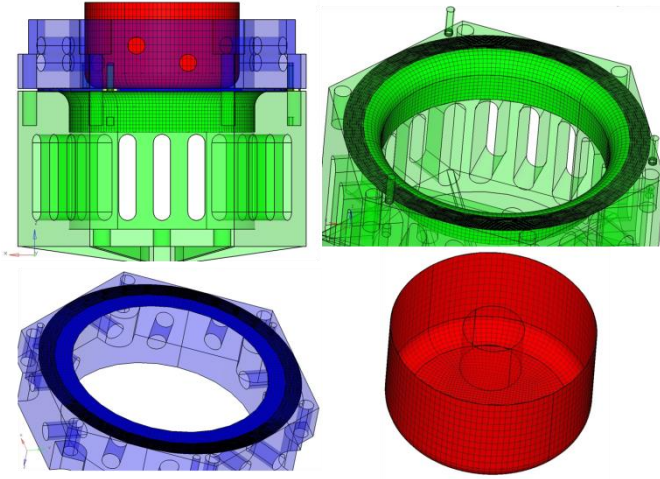


Figura 5.48. *Detalle de conjunto y por separado de los cuerpos rígidos, del utillaje, empleados en las simulaciones de embutición con ABAQUS.*

Respecto al modelado de las diferentes geometrías de probeta Marciniak, para todas se ha empleado el mismo tipo de elemento (*shell quads*) y tamaño medio (1mm). En todas ellas se ha modelado de la misma forma la parte central de la rejilla, respetando la numeración de los puntos de control empleados para la rejilla de las probetas experimentales. En la Figura 5.49 se muestran un par de detalles del montaje de estas probetas durante la preparación del modelo numérico.

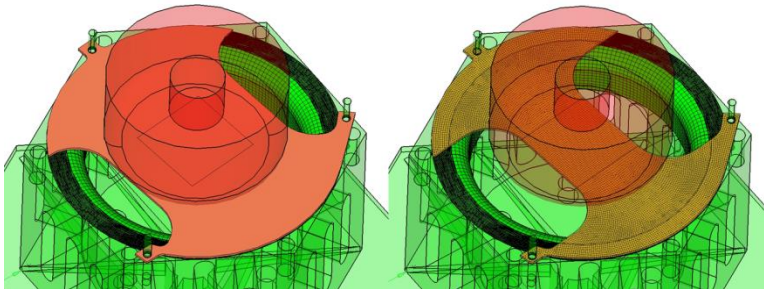
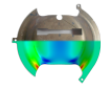


Figura 5.49. *Detalle de las probetas ensambladas en la matriz.*



El modelo final de ABAQUS se muestra en la Figura 5.50. En él ya se han asignado las diferentes propiedades a cada componente. El único cuerpo deformable es la probeta Marciniak, a la que se ha asignado su correspondiente curva de material y un espesor de 1.5 mm , dado que este es el espesor nominal de la chapa de la que han sido extraídas las probetas.

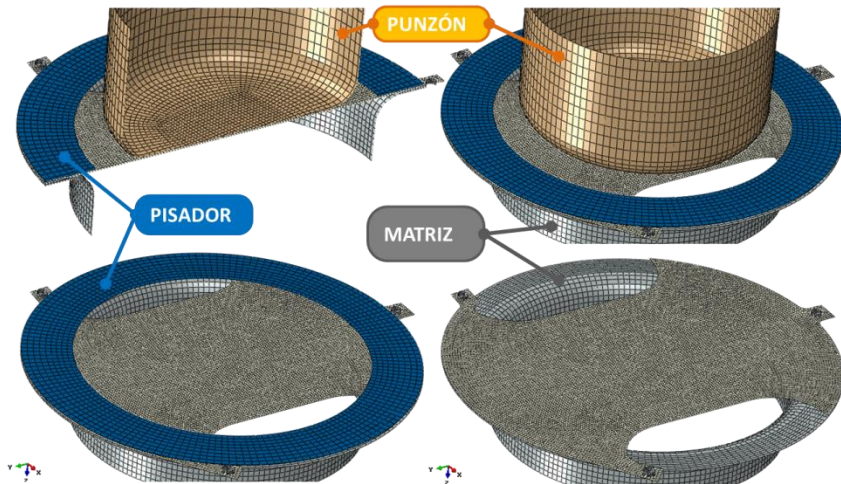


Figura 5.50. Detalle del modelo de elementos finitos de ABAQUS.

En lo referente a la interacción entre cada componente, se han definido los siguientes pares de contacto superficie-superficie: punzón-probeta, pisador-probeta y matriz-probeta. En la definición de las propiedades de estos pares de contacto hay que tener muy en cuenta el coeficiente de rozamiento (μ). En particular, para el par punzón-probeta, ya que es el par que realmente sufrirá deslizamiento entre piezas, se han probado diferentes valores de dicho coeficiente y se han analizado, tanto la variación de la fuerza de reacción en el punzón como el estado de deformación producido en la rejilla de control. Estos dos parámetros son los que se han contrastado con los valores experimentales, con el objetivo de calibrar el modelo numérico. Este proceso de calibración se ha realizado tomando como base el ensayo experimental número 6, correspondiente a un ancho de probeta de 80 mm y una profundidad de embutición



de 18mm. En la Figura 5.51 se muestra la curva fuerza-desplazamiento experimental junto con las iteraciones más representativas de la calibración, donde se ha usado el coeficiente de rozamiento como parámetro variable, ya que no se conoce su valor real para los elementos en contacto durante el ensayo. Se han empleado valores en el rango esperado teórico para los materiales en juego. La simulación se ha llevado a cabo en varias etapas de cálculo, o *steps*, reproduciendo el proceso de ensayo. En un primer paso se aplica la fuerza de cierre del pisador sobre la probeta y la matriz, luego el punzón se desplaza hacia abajo la profundidad requerida. En un tercer paso se retira el punzón, para terminar con la retirada del pisador.

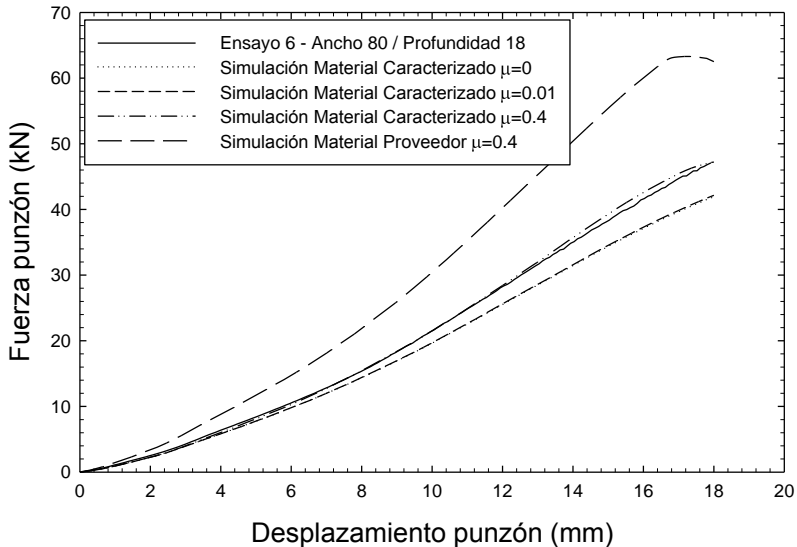
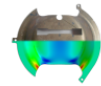


Figura 5.51. Correlación de la curva fuerza-desplazamiento del punzón para diferentes coeficientes de rozamiento.

Finalmente se ha establecido un coeficiente de rozamiento de 0.4 ya que es el que mejor ajusta la curva fuerza-desplazamiento del punzón y el estado de deformaciones en la rejilla. Por lo tanto, se pueden lanzar todas las simulaciones de embutición usando los mismos parámetros para todos los ensayos descritos en la Tabla 5.5.



En la Figura 5.52 se muestran las correlaciones numérico-experimentales de las curvas fuerza-desplazamiento, para el resto de probetas Marciniak, empleando los parámetros calibrados anteriormente. Obviamente, para profundidades de embutición menores, la correlación está asegurada. En la Tabla 5.20 se presenta la correlación numérico-experimental de los valores del estado de deformación alcanzado para las diferentes probetas.

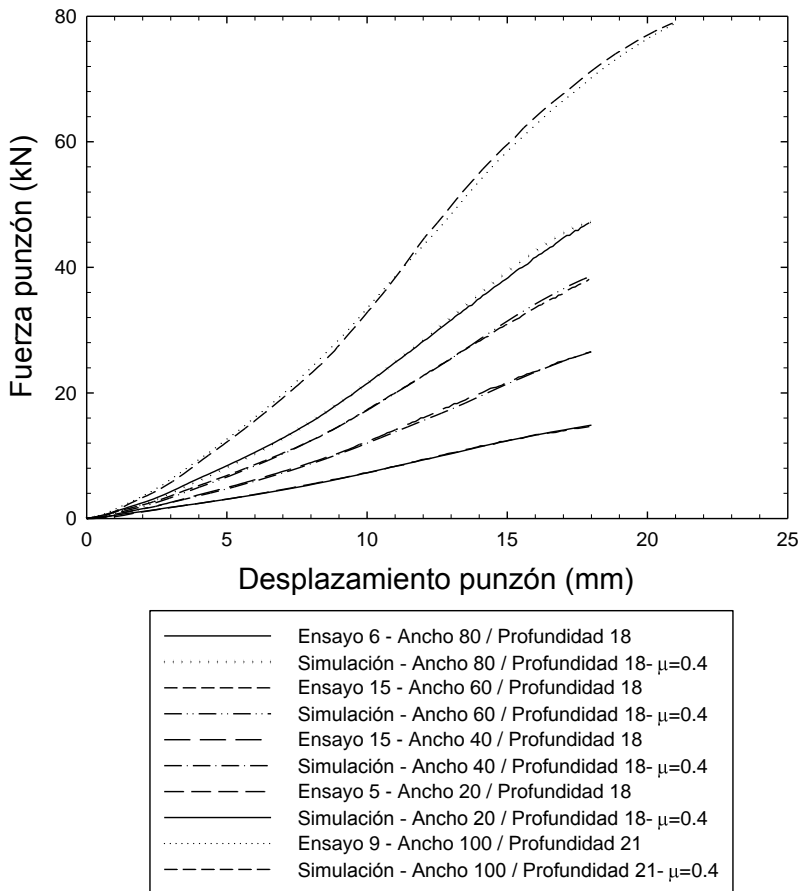


Figura 5.52. Correlaciones numérico experimentales para las diferentes probetas Marciniak.



Tabla 5.20. *Correlación numérico-experimental de los valores del estado de deformación alcanzado.*

Nº EXP.	ANCHURA DE PROBETA (mm)	PROFUND. DE EMBUTICIÓN (mm)	SIMULACIÓN		ENSAYO	
			β	ε_I	β	ε_I
1	20	6	-0.50	0.018	-0.50	0.012
2	80	6	-0.37	0.011	-0.34	0.014
3	20	12	-0.51	0.082	-0.50	0.064
4	80	12	-0.34	0.049	-0.34	0.044
5	20	18	-0.53	0.19	-0.50	0.17
6	80	18	-0.33	0.08	-0.34	0.105
7	100	12	1.00	0.044	1.00	0.045
8	100	17	1.00	0.094	1.00	0.093
9	100	21	1.00	0.147	1.00	0.157
10	40	6	-0.46	0.013	-0.45	0.007
11	60	6	-0.43	0.012	-0.40	0.01
12	40	12	-0.46	0.06	-0.45	0.053
13	60	12	-0.41	0.054	-0.40	0.053
14	40	18	-0.45	0.135	-0.45	0.12
15	60	18	-0.41	0.095	-0.40	0.11

Si bien se identifica con claridad en la tabla anterior la buena correlación alcanzada para el coeficiente β , en la Figura 5.53 se muestra de manera gráfica lo que sucede con los valores de ε_I numéricos y experimentales. De nuevo puede destacarse la buena correlación obtenida en todos los ensayos a partir del modelo numérico desarrollado para simular el ensayo Marciniak.

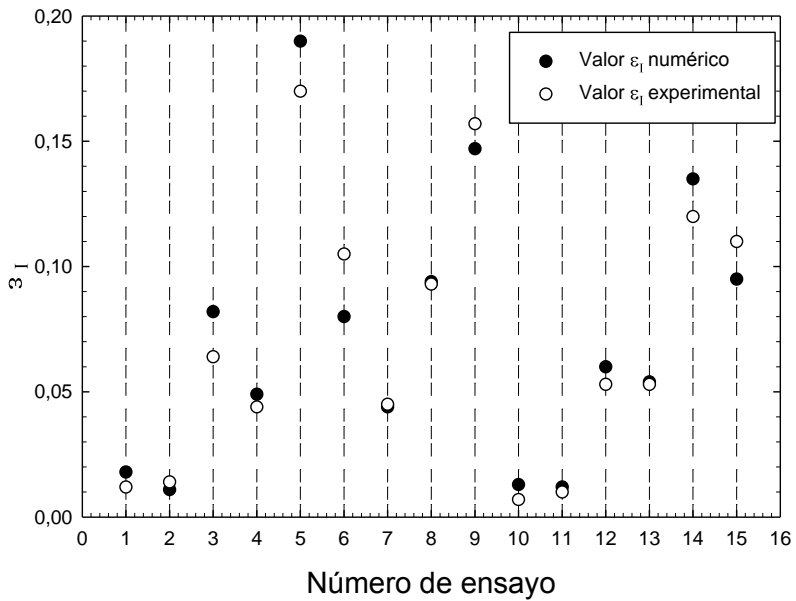
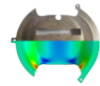


Figura 5.53. *Correlación numérico-experimental de los valores de deformación principal mayor.*

A continuación se muestran, en las Figuras 5.53 a 5.58, los resultados de las simulaciones de embutición para algunos de los casos más representativos. En todas ellas los contornos de colores representan los valores de deformación principal mayor y menor. Además se indican numéricamente los valores de las mismas en los puntos de control de la rejilla.

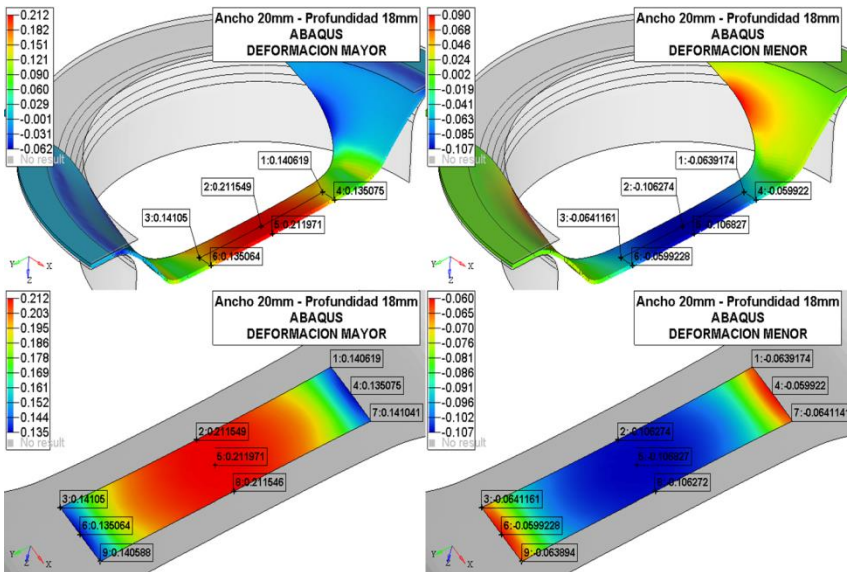


Figura 5.53. Deformación principal mayor y menor para la probeta 5.

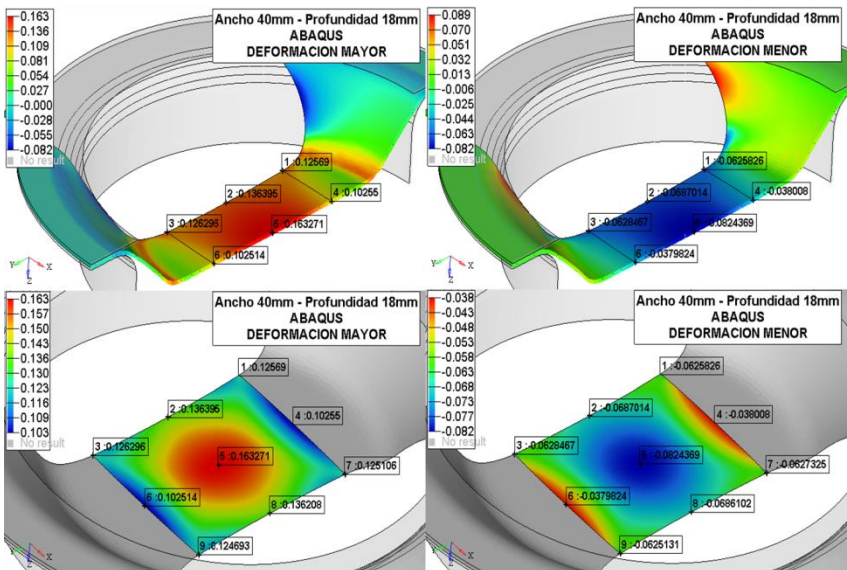


Figura 5.54. Deformación principal mayor y menor para la probeta 14.

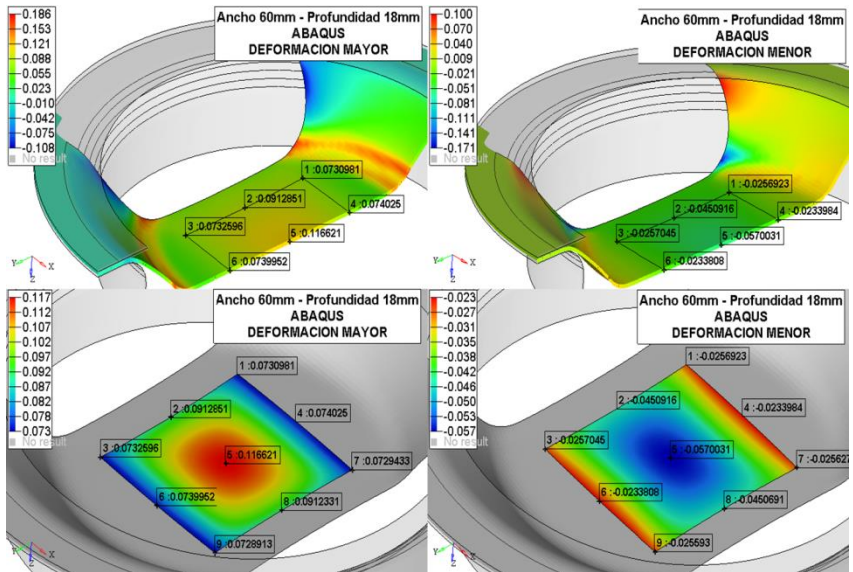
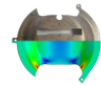


Figura 5.55. Deformación principal mayor y menor para la probeta 15.

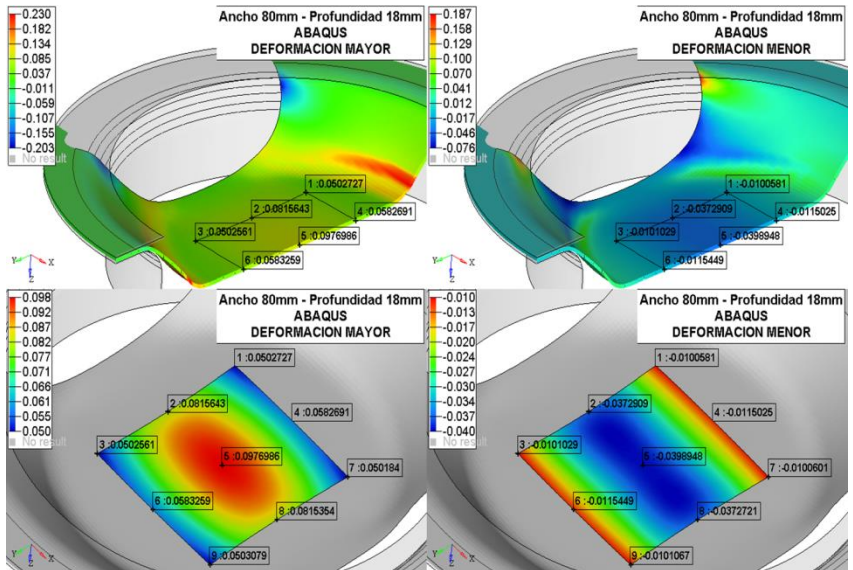


Figura 5.56. Deformación principal mayor y menor para la probeta 6.

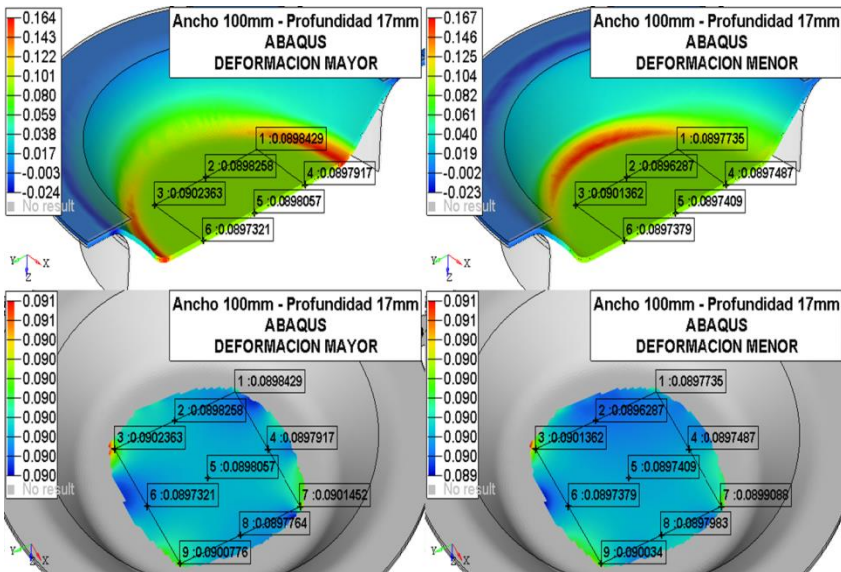


Figura 5.57. Deformación principal mayor y menor para la probeta 8.

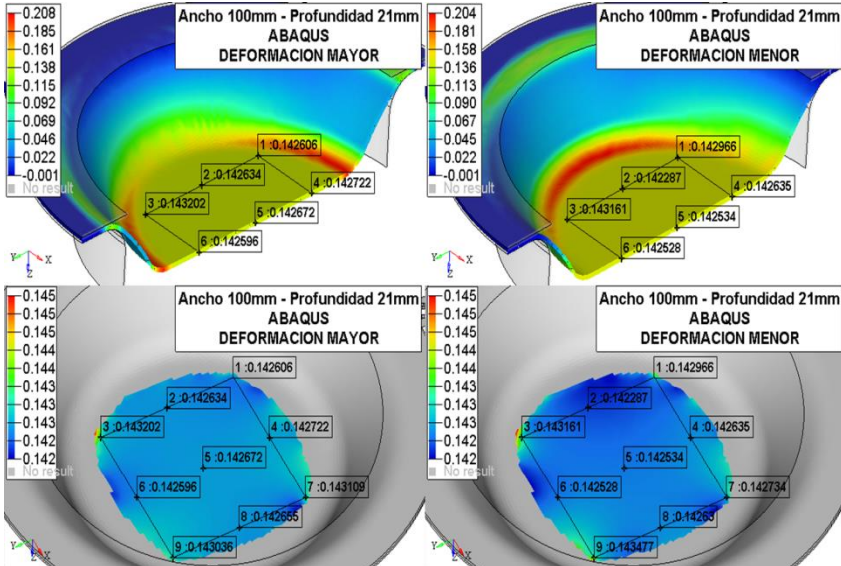
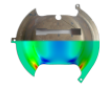


Figura 5.58. Deformación principal mayor y menor para la probeta 9.



5.5.1. Simulaciones inversas

En este paso se han realizado, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 4, las simulaciones de embutición inversas, empleando el programa ALTAIR HyperForm. Se muestra en este apartado, según la Figura 5.59, la preparación general de los modelos inversos y los resultados obtenidos. Estos últimos se han comparado con los obtenidos del programa ABAQUS® para decidir si se pueden emplear las simulaciones inversas para extraer los niveles de deformación, ya que el tiempo de preparación y cálculo es mucho menor que en las incrementales.

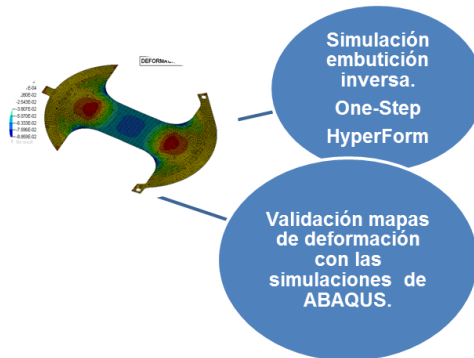


Figura 5.59. Etapa correspondiente a este apartado de acuerdo a la metodología desarrollada.

El programa HyperForm realiza una estimación, teniendo como dato de entrada la geometría final de la pieza embutida, de la embutibilidad de dicha geometría de acuerdo con los parámetros introducidos de material, proceso, tipo de pisador, zonas de fijación, rozamiento, a través de los diagramas FLD teóricos calculados por el mismo programa. Como datos de salida, además de mostrar dicha embutibilidad, ofrece datos del estado de deformación esperado, variaciones de espesor y geometría de la chapa original a usar para obtener la forma final deseada. Todo este proceso se realiza de manera muy rápida obteniéndose dichos resultados en un tiempo muy corto. En particular, la simulación de la embutición de las probetas Marciniak en ABAQUS, con los parámetros descritos, dura en



torno a tres horas, mientras que la simulación inversa tiene una duración de 5 segundos. Tan solo entra en juego la probeta o geometría de estudio y no hace falta definir punzón, pisador o matriz mediante modelos geométricos mallados.

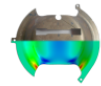
En este caso y dado que no se dispone de geometría final objetivo para estimar su embutibilidad, se ha partido de la geometría ya deformada (Figura 5.60) proveniente de las simulaciones de embutición previas de ABAQUS. Dicho programa permite exportar la malla deformada tras el proceso de embutición. Tras definir los parámetros descritos de material, etc., HyperForm realiza un “desdoblado” en un solo paso para ofrecer los resultados descritos.



Figura 5.60. *Ejemplo de geometría de entrada para HyperForm, deformada proveniente de las simulaciones de embutición de ABAQUS para el ancho 40mm y profundidad 18mm.*

Una vez importada la geometría, el material se define de igual manera que en ABAQUS, a través de la curva tensión-deformación en variables verdaderas y los parámetros de Lankford.

En el siguiente paso se definen las zonas de pisado de la probeta (Figura 5.61), con la presión de pisado y el coeficiente de rozamiento pisador-probeta. Hay que hacer notar que el rozamiento general de la simulación, el que se aplicará a la virtual interacción entre punzón y probeta, ha de definirse con el mismo valor decidido anteriormente.



Se marcarán a continuación las líneas de fijación o de restricción total ante el deslizamiento de la probeta (Figura 5.61). Estas representan el moleteado aplicado en la matriz y el pisador reales para realizar esta fijación.

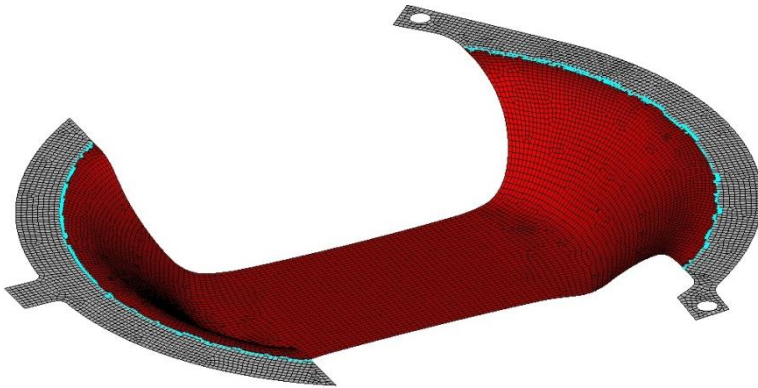


Figura 5.61. Zonas de pisado en blanco y líneas de fijación en azul.

La salida de resultados ha de configurarse de manera que, además de registrar los resultados por defecto representados sobre la geometría resultante (que es el formato de chapa plano sin deformar predicho por este programa), se escriban todos los resultados de espesores, tensiones y deformaciones en formato LsDyna. De esta manera los valores de salida se ofrecen con más exactitud y sobre la geometría de partida (la probeta deformada tras la simulación de embutición de ABAQUS o, para piezas diferentes, la geometría deformada objetivo). El problema de exactitud de resultados se ha detectado durante el desarrollo de la presente Tesis y, tras comunicación con la empresa Altair, responsable del paquete Hyperworks, estos explicaron que para el caso de salidas en formato por defecto, el programa hace una media con los valores calculados para mostrar una salida cualitativa. Esto ha hecho aparecer dispersiones extrañas y mapas de resultados inadecuados. A raíz de estos resultados, la compañía está trabajando para que en la siguiente versión del programa, se incluya la posibilidad de obtener los resultados de manera configurable.



Una vez configurado el proceso de estampación (Figura 5.62) y los parámetros de material y rozamiento, se procede a lanzar la simulación inversa.

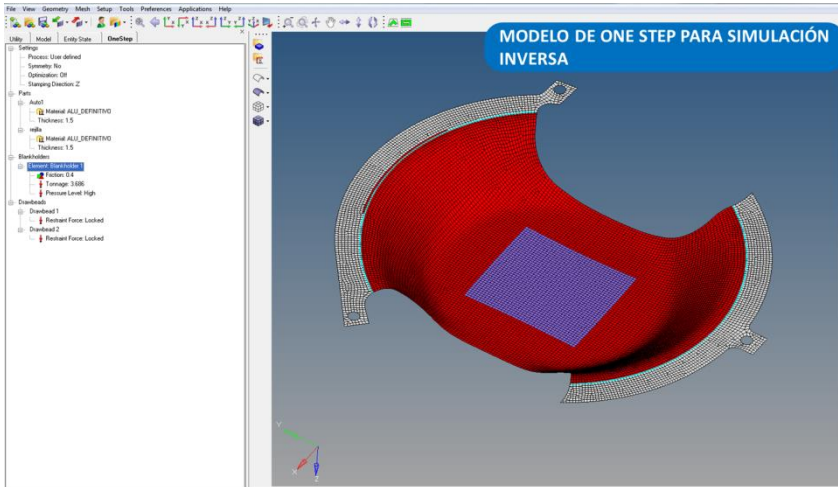


Figura 5.62. Interfaz de HyperForm con el modelo de One-step listo para ser simulado.

El primer resultado ofrecido por el programa es una estimación de la *formabilidad* de esa geometría, representada en un diagrama FLD calculado de forma teórica por el programa con los datos de material proporcionados. En él se presentan los estados de deformación principal mayor y menor de todos los nodos del modelo, estableciéndose una escala de colores para identificar en qué zona se encuentra cada elemento de la pieza. En las Figuras 5.63 y 5.64 puede verse este mapa de *formabilidad* para la probeta 6 y la probeta 5 respectivamente. La escala de colores muestra, en verde la zona segura, en azul claro la aparición de pequeñas arrugas, en azul oscuro las arrugas importantes, en amarillo la aparición de estricciones localizadas y en rojo la rotura.

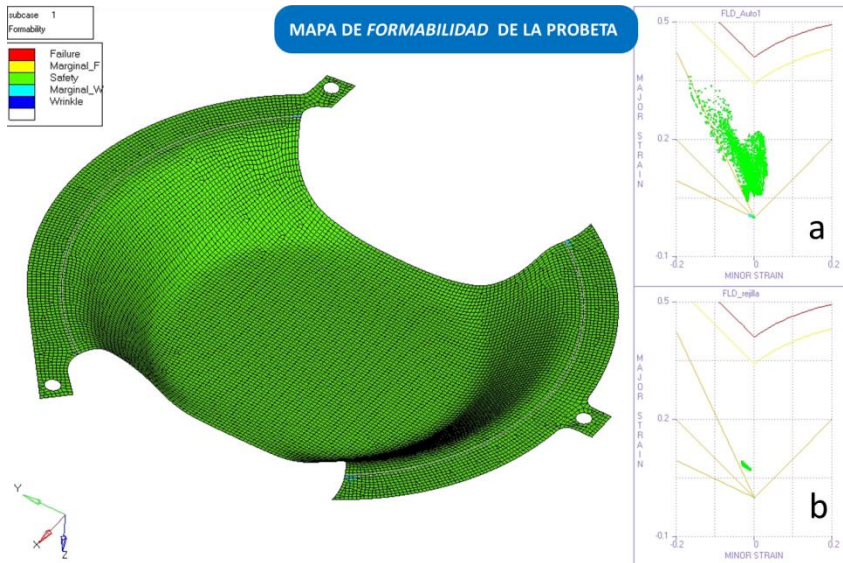
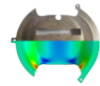


Figura 5.63. Resultados de formabilidad para la probeta 6. a) Probeta completa b) Rejilla central de control.



Figura 5.64. Resultados de formabilidad para la probeta 5. a) Probeta completa b) Rejilla central de control.



Una vez finalizadas las simulaciones inversas, para poder realizar la correlación entre los resultados de deformación, obtenidos de las simulaciones de embutición realizadas en ABAQUS, con las simulaciones inversas, llevadas a cabo en Hyperform One-step, se post-procesan todos los resultados en el programa HyperView. En lo que respecta al fichero de resultados de HyperForm, se empleará el escrito en formato LsDyna, por los motivos explicados anteriormente. En las Figuras 5.65 hasta la 5.74 se presentan las correlaciones para algunas de las probetas más representativas. A la izquierda de cada figura se presentan los resultados de One-step, mientras que a la derecha están los de ABAQUS. El resultado mostrado es el valor de la deformación (deformación mayor o deformación menor según la figura) en la probeta completa y en la rejilla de control.

A continuación, en la Tabla 5.21 se presenta la correlación entre simulaciones de ABAQUS y de One-step para el par de valores β y ε_I . Dichos valores se han obtenido de la misma forma en la que se han calculado para el resto de casos, es decir, empleando la hoja Excel generada en la que, como datos de entrada, se introducen los desplazamientos de los nodos de la rejilla de control. En esta Tabla puede apreciarse un más que aceptable nivel de correlación con pequeñas desviaciones en casos puntuales. Para el caso de los valores de β , en las simulaciones inversas se obtienen valores levemente superiores. Con objeto de obtener una visión completa de los resultados de la correlación se presentan los gráficos de las Figuras 5.65 y 5.66.

En conjunto, observando también los mapas de las Figuras 5.67 a 5.76, los resultados de las simulaciones inversas ofrecen valores aceptables para ser empleados como *input* para el paso siguiente, en el que se van a asignar las diferentes zonas, por estado de deformación, en la probeta.



Tabla 5.21. *Correlación numérico-experimental de los valores del estado de deformación alcanzado.*

Nº EXP.	ANCHO (mm) / PROF. (mm)	SIMULACIÓN ABAQUS		SIMULACIÓN ONE-STEP		ENSAYO EXPERIMENTAL	
		β	ϵ_I	β	ϵ_I	β	ϵ_I
1	20 / 6	-0.50	0.018	-0.50	0.015	-0.50	0.012
2	80 / 6	-0.37	0.011	-0.25	0.012	-0.34	0.014
3	20 / 12	-0.51	0.082	-0.42	0.081	-0.50	0.064
4	80 / 12	-0.34	0.049	-0.29	0.057	-0.34	0.044
5	20 / 18	-0.53	0.19	-0.42	0.19	-0.50	0.17
6	80 / 18	-0.33	0.08	-0.25	0.097	-0.34	0.105
7	100 / 12	1.00	0.044	1.00	0.045	1.00	0.045
8	100 / 17	1.00	0.094	1.00	0.09	1.00	0.093
9	100 / 21	1.00	0.147	1.00	0.128	1.00	0.157
10	40 / 6	-0.46	0.013	-0.40	0.012	-0.45	0.007
11	60 / 6	-0.43	0.012	-0.35	0.012	-0.40	0.01
12	40 / 12	-0.46	0.06	-0.42	0.065	-0.45	0.053
13	60 / 12	-0.41	0.054	-0.35	0.06	-0.40	0.053
14	40 / 18	-0.45	0.135	-0.41	0.135	-0.45	0.12
15	60 / 18	-0.41	0.095	-0.35	0.132	-0.40	0.11

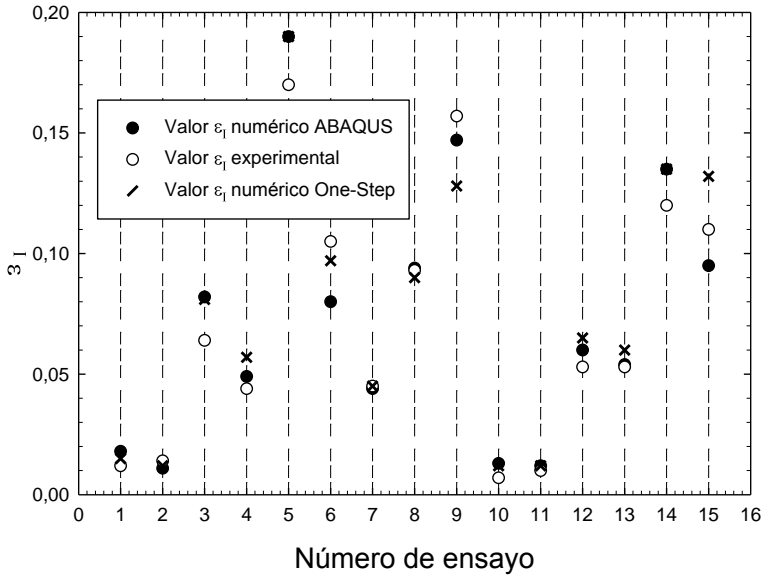


Figura 5.65. Correlación numérico-experimental de los valores de deformación principal mayor.

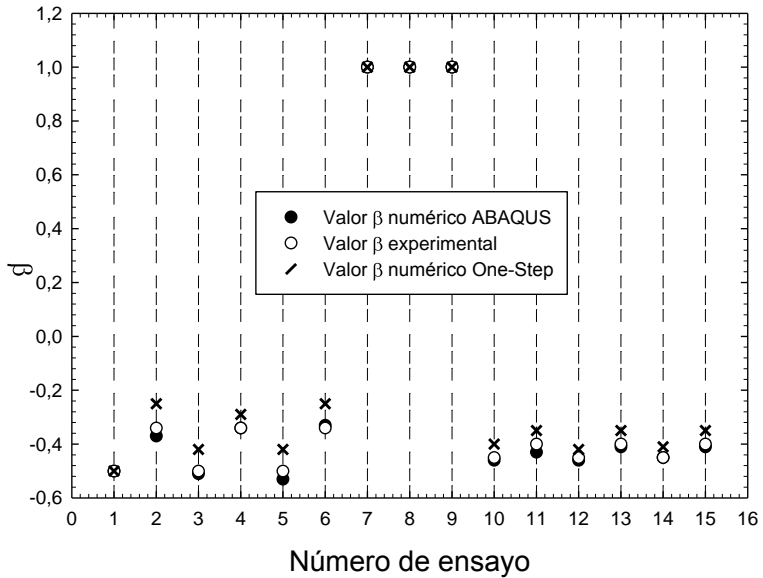


Figura 5.66. Correlación numérico-experimental de los valores de β .

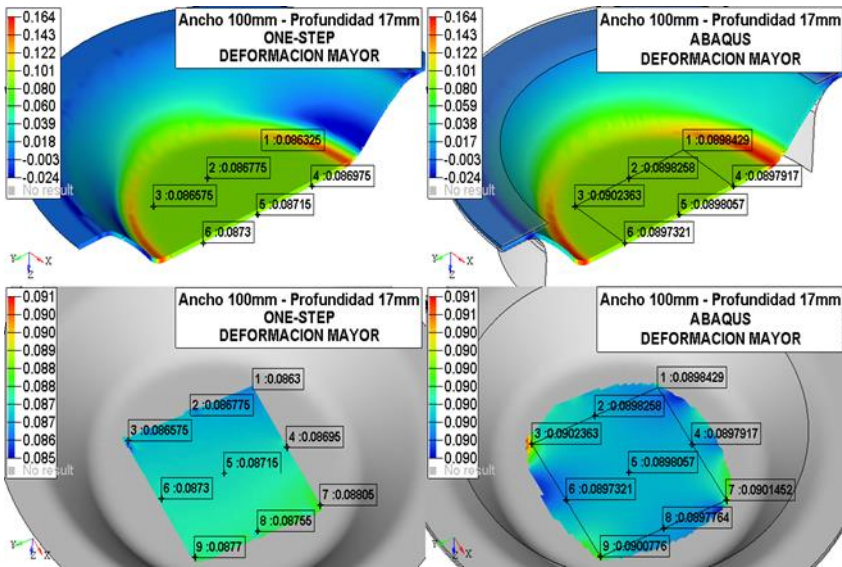
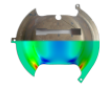


Figura 5.67. Correlación de la deformación mayor ABAQUS-*One-Step* para la probeta 8.

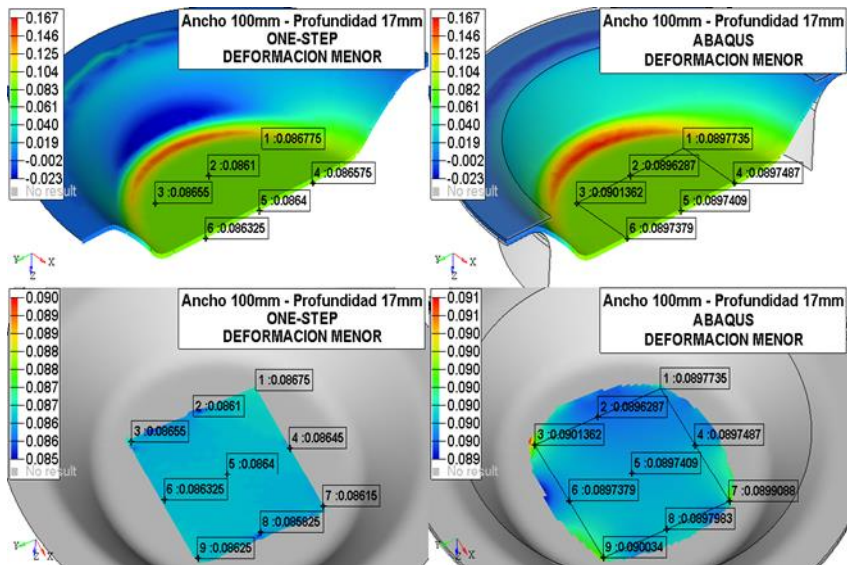


Figura 5.68. Correlación de la deformación menor ABAQUS-*One-Step* para la probeta 8.

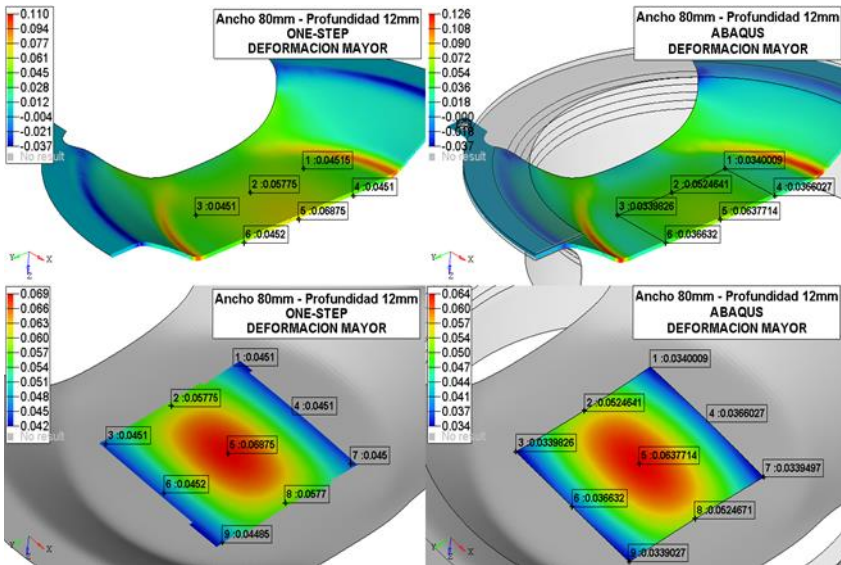
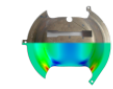


Figura 5.69. Correlación de la deformación mayor ABAQUS-One-Step para la probeta 4.

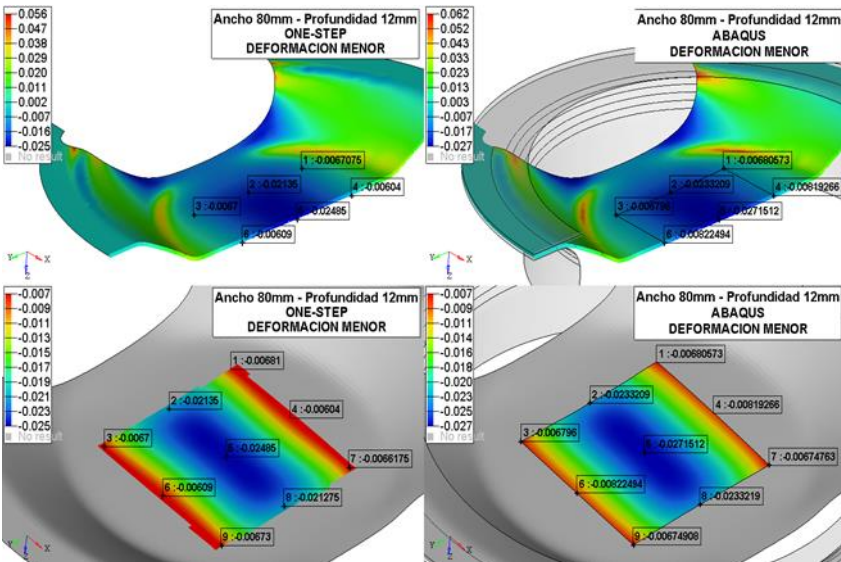


Figura 5.70. Correlación de la deformación menor ABAQUS-One-Step para la probeta 4.

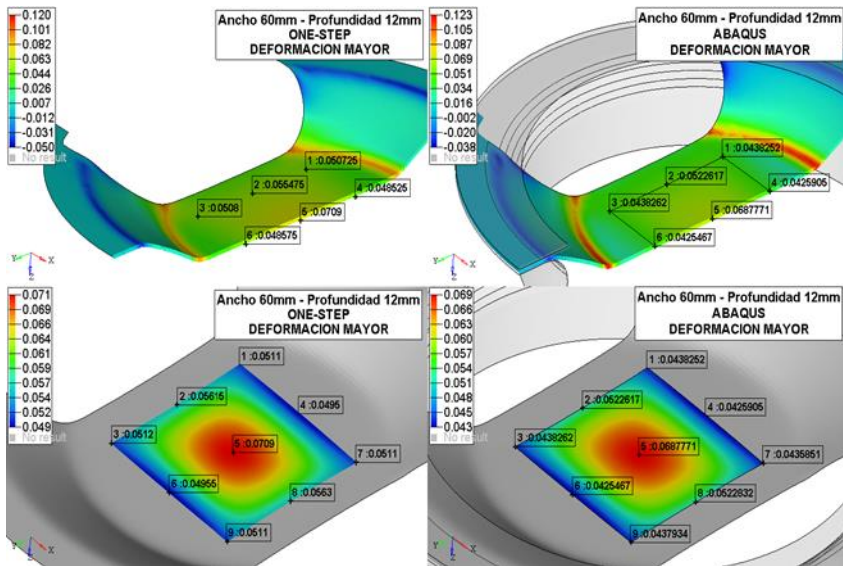
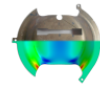


Figura 5.71. Correlación de la deformación mayor ABAQUS-One-Step para la probeta 13.

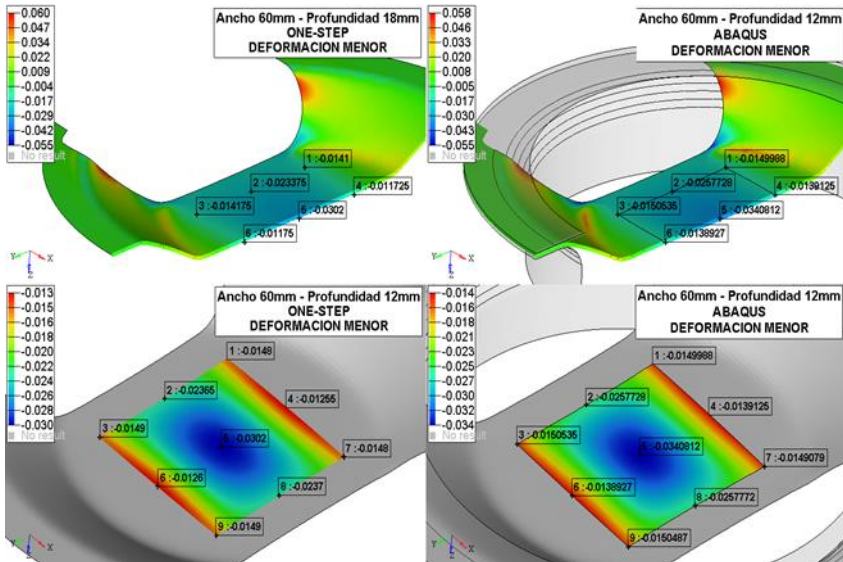


Figura 5.72. Correlación de la deformación menor ABAQUS-One-Step para la probeta 13.

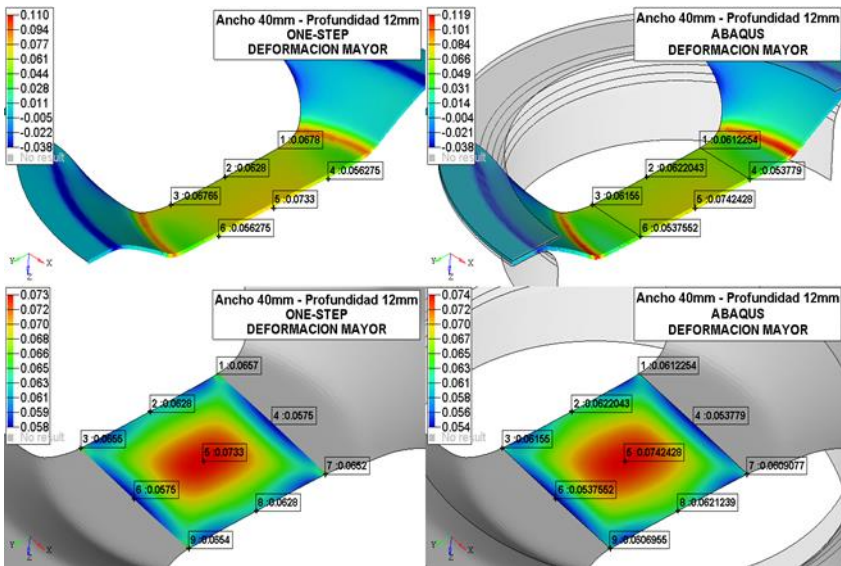


Figura 5.73. Correlación de la deformación mayor ABAQUS-
One-Step para la probeta 12.

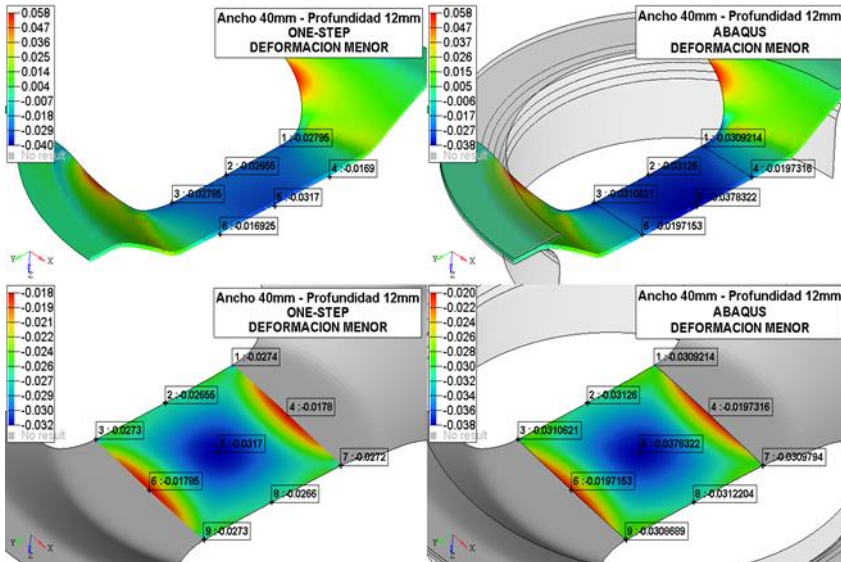


Figura 5.74. Correlación de la deformación menor ABAQUS-
One-Step para la probeta 12.

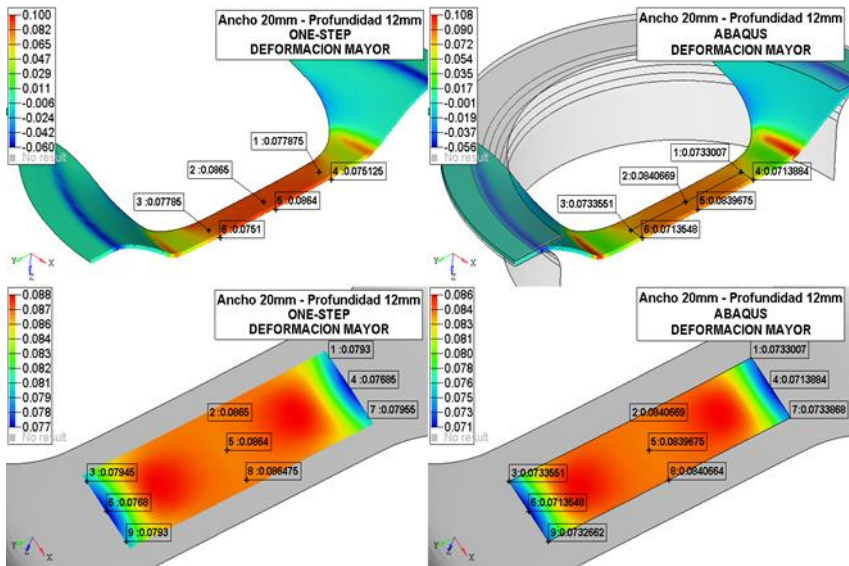
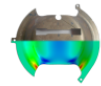


Figura 5.75. Correlación de la deformación mayor ABAQUS-
One-Step para la probeta 3.

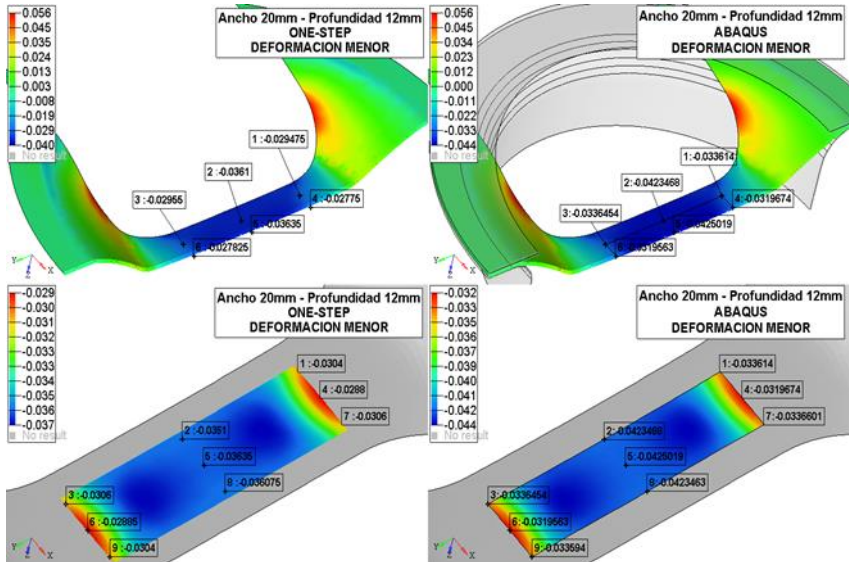


Figura 5.76. Correlación de la deformación menor ABAQUS-
One-Step para la probeta 3.



5.6. MAPEADO DE RESULTADOS

En el presente apartado, correspondiente al esquema de la Figura 5.77, se han empleado dos tipos de datos de entrada (ABAQUS y One-step). En primer lugar se ha tomado la geometría deformada de la probeta, obtenida de la simulación de ABAQUS, que posteriormente ha sido la geometría objetivo sobre la que se han mapeado los resultados del estado de deformación, provenientes de la simulación inversa de One-step.

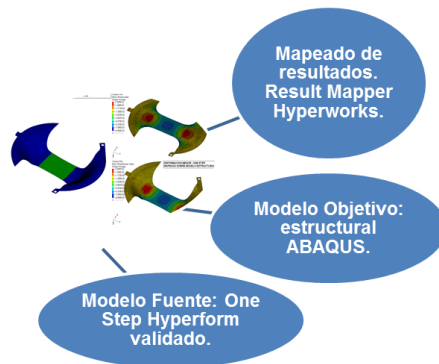
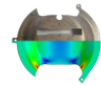


Figura 5.77. Etapa correspondiente a este apartado de acuerdo a la metodología presentada.

Se ha decidido emplear el programa Results Mapper, incluido en el paquete Altair Hyperworks®, que ofrece una gran compatibilidad con diferentes modelos estructurales de entrada así como de lectura de resultados de estampación en los formatos más comunes.

Antes de comenzar con el desarrollo de este apartado hay que comentar que, durante el uso de este programa se detectaron varios problemas en el mapeado de resultados, relacionados principalmente con la falta de precisión al mapear resultados provenientes en formato por defecto de HyperForm. Recordar que este formato fue descartado en el paso anterior por la falta de control que se tenía sobre los resultados de tensiones y deformaciones escritos en el fichero de salida. De esta manera, el soporte técnico de Altair está trabajando tanto en lo



referente al fichero de salida por defecto de HyperForm como en el problema detectado al mapear resultados desde este fichero. Por lo tanto, se empleará como fichero de entrada, conteniendo los datos del estado de deformación, el generado en el apartado anterior, es decir, en formato LsDyna.

El proceso de mapeado de resultados se encuentra descrito en los manuales del programa [57] y se muestra, en sus pasos más representativos, a través de las Figuras 5.78 a 5.80.

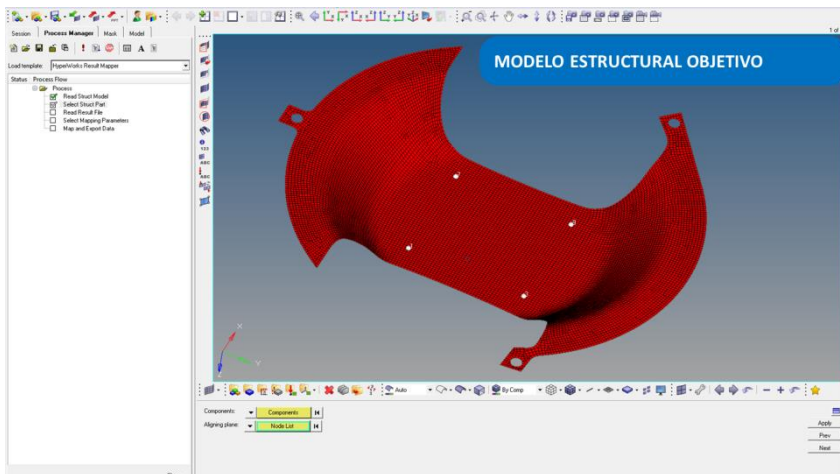


Figura 5.78. Primer paso con la definición del modelo estructural objetivo.

Para continuar con el proceso de mapeado ha sido necesario emplear un paso adicional, en el que ha sido preciso generar un fichero de resultados intermedio que contiene los resultados, provenientes del resultado de One-step en formato LsDyna, para cada uno de los estados de deformación necesarios. Se han generado por lo tanto dos ficheros, uno con la deformación mayor y otro con la menor para cada ensayo. Esto se ha hecho debido a que el programa Results Mapper no permite seleccionar exactamente para su mapeado los resultados particulares escogidos en la presente Tesis, como son las deformaciones mayor y menor. Estos ficheros adicionales se han generado con una herramienta incluida en el paquete Altair Hyperworks®, llamada HvTrans. Este programa permite leer ficheros de resultados de programas de simulación



por elementos finitos en multitud de formatos y, previa selección de la los datos necesarios, escribir un fichero que finalmente contiene los datos de salida seleccionados. Se emplea habitualmente para reducir el tamaño de los ficheros de resultados, comúnmente muy grandes, seleccionando sólo aquellos datos necesarios para cada caso.

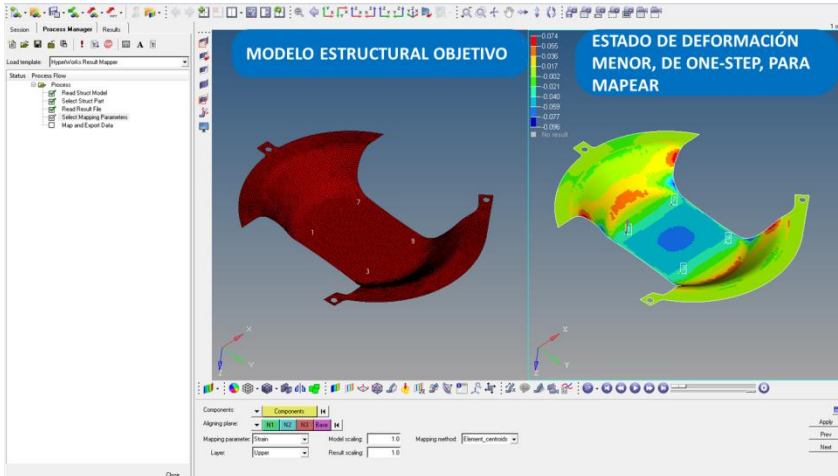


Figura 5.79. Segundo paso con la selección del resultado de deformación para mapear.

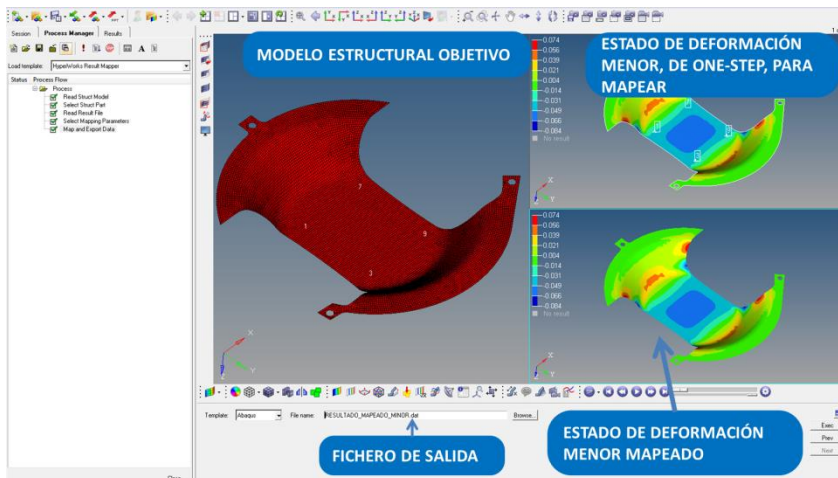


Figura 5.80. Tercer paso con la geometría final en la que se muestra el mapa de deformaciones asignado.



Como puede apreciarse en la Figura 5.80, el contorno de deformaciones se mapea con una gran precisión sobre el modelo estructural objetivo. Una vez comprobado que el contorno de deformaciones se plasma con exactitud sobre el modelo estructural, el dato realmente útil de este proceso es el fichero de salida que se genera en formato ABAQUS (Figura 5.80). En este fichero se escriben, en formato texto, una primera columna que contiene la numeración de los elementos que conforman el modelo numérico, ordenados en orden creciente y, en una segunda columna separada por una coma, el valor de la variable de salida escogida, ya sea la deformación menor o la mayor en cada caso, para cada elemento. Es por lo tanto necesario generar dos ficheros de texto conteniendo cada una de las deformaciones.

Para cada probeta simulada se han generado dos ficheros cuyo nombre termina en `_MINOR` en el caso de contener los valores de la deformación menor y `_MAJOR` para el caso de la deformación mayor.

A continuación se muestran, en las Figuras 5.81 a 5.83 algunos ejemplos de mapeado para tres de las probetas simuladas.

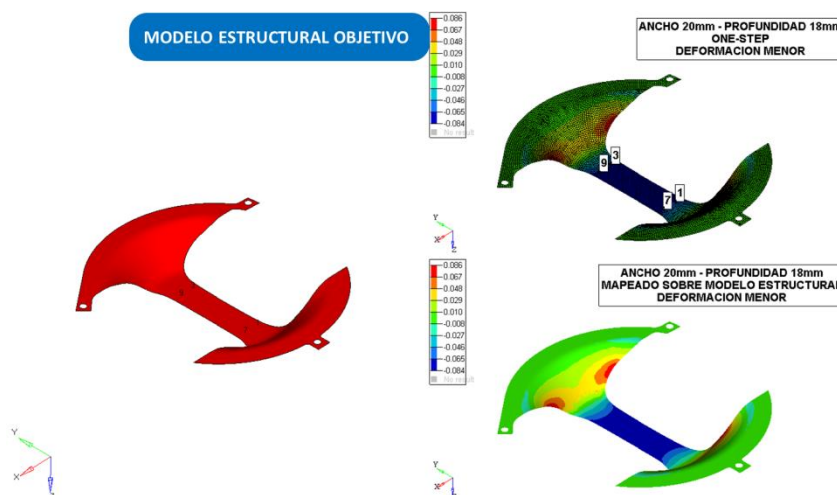


Figura 5.81. *Probeta 5: mapeado de la deformación menor.*

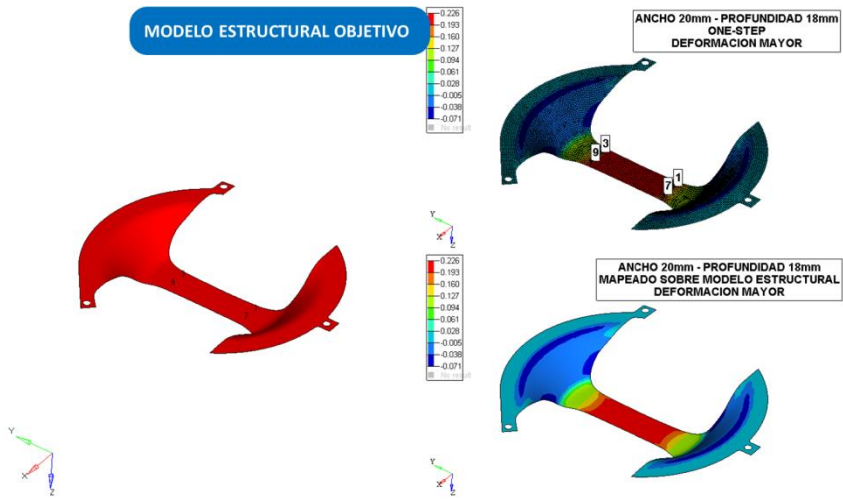


Figura 5.82. . Probeta 5: mapeado de la deformación mayor.

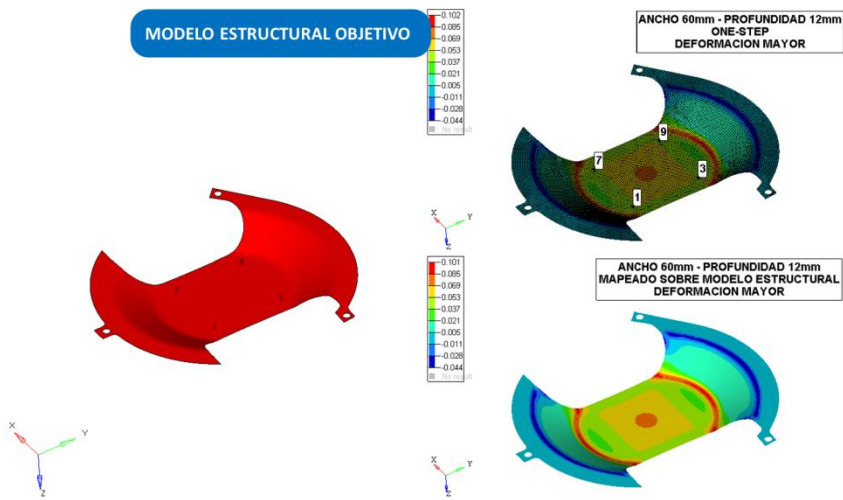
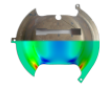


Figura 5.82. Probeta 13: mapeado de la deformación mayor.



5.7. PROGRAMACIÓN DE LOS SCRIPTS

Es en este apartado, en el que ya se dispone del estado de deformación que hay en cada elemento de la probeta embutida, se han programado, en base a todos los datos disponibles, una serie de programas, llamados *scripts*. Esta etapa se corresponde, según la metodología definida, con la mostrada en la Figura 5.83.

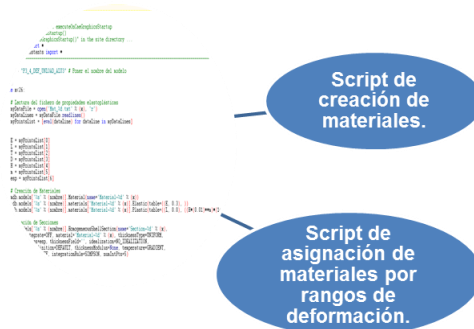


Figura 5.83. Etapa correspondiente a este apartado de acuerdo a la metodología presentada.

En particular, se han programado dos scripts diferentes. El primero se encarga de, utilizando como dato de entrada los 26 ficheros de parámetros elasto-plásticos generados de acuerdo a la Tabla 5.9, crear tanto el material como la sección de los elementos en formato ABAQUS y definirlos dentro del modelo escogido. El segundo script se encargará de leer los datos de deformación mayor y menor de los ficheros de resultados (*nombre_del_modelo_MAJOR* y *nombre_del_modelo_MINOR*) generados en la etapa de mapeado y asignar cada elemento, en función de sus valores β y ε_I , a su material correspondiente generado anteriormente.

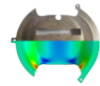
Para clarificar este proceso, los pasos a seguir se recogen a continuación:

- Colocar en el directorio de trabajo de ABAQUS los 26 ficheros de texto, correspondientes a los 26 materiales previamente definidos, con los parámetros elasto-



plásticos y el espesor correspondiente a cada rango de valores β y ε_I .

- En este mismo directorio colocar los dos ficheros de texto generados correspondientes a la deformación mayor (*nombre_del_modelo_MAJOR.dat*) y a la deformación menor (*nombre_del_modelo_MINOR.dat*).
- Debido a que los parámetros empleados para la selección y asignación del material son β y ε_I y dado que β se calcula como el cociente entre ε_{II} y ε_I , hay que asegurarse que ningún valor de deformación en el fichero que contiene ε_I (*_MAJOR*) es 0, ya que esto provocará un error de división por cero al ser una operación indeterminada. Como la precisión de los datos empleada es de seis decimales, de ser necesario, se cambiará la cadena 0.000000 por 0.000001. Esto no afectará a los valores de β y evitará errores.
- Desde ABAQUS se comprueba el nombre del modelo y de la *part* correspondiente, ya que estos nombres han de introducirse en cada script para que se creen y asignen de manera correcta los materiales.
- Desde ABAQUS se lanza el primero de los scripts "*Creacion-Materiales.py*" (Anexo I). Este se encarga de generar los 26 materiales y secciones dentro de ABAQUS, en el modelo impuesto en la cabecera del script. Genera cada material, en formato ABAQUS con su parte elástica y su curva plástica, en base a los parámetros elasto-plásticos y también crea cada sección haciendo coincidir cada material con su espesor de pieza correspondiente.
- Una vez que termina de ejecutarse el anterior script, se lanza el segundo "*Asignacion-Materiales.py*" (Anexo II). Este abre del fichero *_MAJOR* y cuenta el número de filas para saber cuántas veces ha de leer datos, ya que cada fila corresponde a un elemento. Lee la primera fila y se guarda el número de elemento y su deformación mayor en dos variables temporales. Busca en qué rango de ε_I se encuentra según la Tabla 5.9 y, cuando lo encuentra, abre el fichero *_MINOR* y en el número de fila correspondiente al elemento extrae el valor de



deformación menor ε_{II} y calcula con ella el valor de β . Busca entonces el rango correspondiente de β y, una vez identificado el material, guarda ese número de elemento en un fichero de texto independiente, que se guarda automáticamente en el directorio de trabajo, que contiene a todos los elementos que comparten ese rango de β y ε_I . Este proceso se repite hasta completar todas las filas del fichero _MAJOR, es decir, hasta tener todos los elementos identificados con un tipo de material.

- Hecho esto, el script genera grupos de elementos, llamados *sets*, con cada fichero de elementos agrupados anteriormente y acaba asignando al *set i* la correspondiente *sección i* definida a su vez por el *material i* y el *espesor i*, donde *i* son cada uno de los 26 posibles materiales.
- Al final de la ejecución del segundo script se dispone de una probeta con la forma final tras el proceso de embutición en la que, por zonas, tiene asignadas diferentes secciones (material, espesor) dependiendo de su estado de deformación final tras la embutición. Como máximo, cada probeta tendrá 26 secciones diferentes asignadas.

En las Figuras 5.84 a 5.86 se muestran ejemplos de cómo quedan algunas de las probetas Marciniak tras su asignación de secciones y una comparativa entre el estado de deformación de partida y la pieza final con las nuevas secciones.

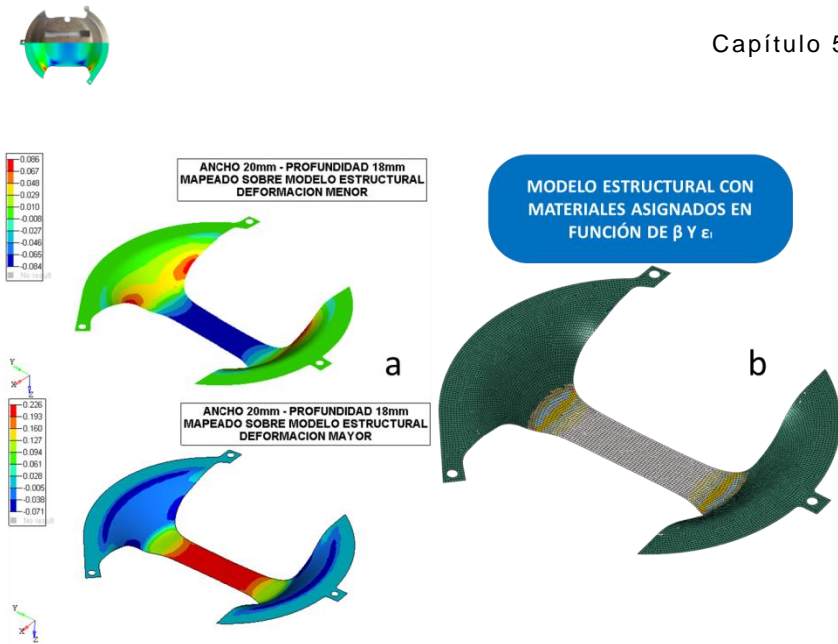


Figura 5.84. Ejemplo de asignación de materiales para la probeta 5, a) estado de deformación tras la simulación de One-step, b). Probeta tras la asignación de materiales con los scripts.

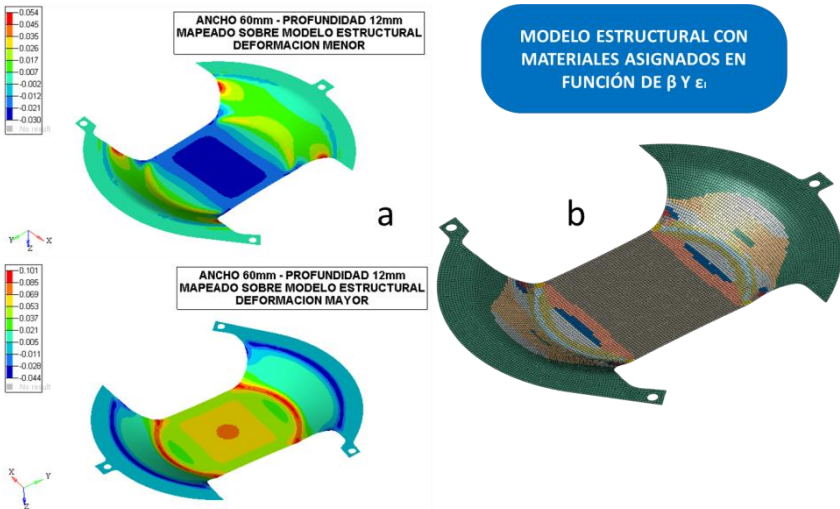


Figura 5.85. Ejemplo de asignación de materiales para la probeta 13, a) estado de deformación tras la simulación de One-step, b). Probeta tras la asignación de materiales con los scripts.

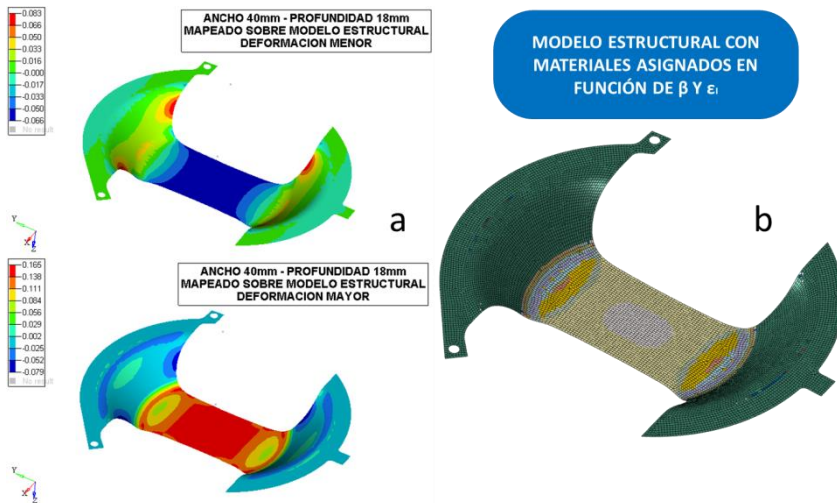


Figura 5.86. Ejemplo de asignación de materiales para la probeta 14, a) estado de deformación tras la simulación de One-step, b). Probeta tras la asignación de materiales con los scripts.

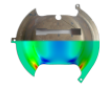
Para comprobar que el proceso de asignación y estimación de materiales realizado por el script es correcto, se presenta en la Tabla 5.22 una comparativa entre el material correspondiente a cada rejilla de control en base a los valores β y ϵ_I medidos en la realidad y el que le ha sido asignado por los scripts, a esa misma zona de elementos de la rejilla, según los valores mapeados provenientes de las simulaciones de One-step.

Puede apreciarse que en 13 de los 15 experimentos el script ha asignado el material correcto, correspondiendo con el estado de deformación real dentro de los 26 materiales disponibles. En particular en los experimentos 3, 5 y 15 el script ha asignado uno inmediatamente próximo según la Tabla 5.9, debido a que su estado de deformación se encontraba en el límite entre ambos materiales. Hay que hacer notar que esa desviación se debe a la aproximación que ofrecen los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de One-step.



Tabla 5.22. *Correlación numérico-experimental de los valores de los materiales asignados por los scripts.*

Nº EXP.	ANCHO(mm) / PROF. (mm)	MATERIAL ASIGNADO	MATERIAL ESTADO DEFORMACIÓN REAL
1	20 / 6	1/2	1
2	80 / 6	2	2
3	20 / 12	12	6
4	80 / 12	7	7
5	20 / 18	22	21
6	80 / 18	12	12
7	100 / 12	10	10
8	100 / 17	15	15
9	100 / 21	20	20
10	40 / 6	2	0/1/2
11	60 / 6	2	0/2
12	40 / 12	7	6/7
13	60 / 12	7	7
14	40 / 18	17	Punto medio 11/12/16/17
15	60 / 18	17	12



5.8. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA. SIMULACIÓN ENSAYO TRACCIÓN UNIAXIAL

Como paso final de la metodología presentada a lo largo de esta Tesis, se ha realizado la simulación del ensayo de tracción uniaxial empleando probetas “extraídas” de los modelos de simulación de embuticiones Marciniak, tras haber asignado a estos los diferentes materiales por zonas en función de su estado de deformación.

Esta extracción de probetas para simular se ha llevado a cabo superponiendo la geometría de la probeta normalizada del ensayo de tracción uniaxial, sobre el modelo de probeta Marciniak, en la misma zona en la que se cortaron las probetas uniaxiales reales en las muestras embutidas. De esta manera se podrá correlar la curva tensión-deformación obtenida de cada simulación, con la medida en el ensayo real para esas mismas condiciones. Dado que no se puede “cortar” exactamente la geometría de una probeta normalizada de tracción uniaxial, partiendo del modelo de elementos finitos de la probeta Marciniak, se ha realizado un modelo de elementos finitos de la probeta de tracción uniaxial y se le han asignado las mismas secciones, por zonas, que le corresponderían si se hubiese extraído de la probeta embutida. En las Figuras 5.87 a 5.89 se muestra el proceso seguido para la obtención de la probeta de tracción uniaxial partiendo del modelo de elementos finitos de la Marciniak.

Dado que, obviamente, la malla de la probeta embutida está deformada y no se corresponde exactamente con la probeta de tracción, en la Figura 5.89 se muestra cómo, en el modelo de una probeta perfectamente mallada (b), se asignan las mismas secciones (material más espesor) al mismo número de elementos que se han obtenido en la Marciniak (a). La zona de las mordazas es indiferente y puede asignarse aproximadamente, al ser considerada empotrada durante la simulación.

Posteriormente, se ha procedido a realizar las simulaciones del ensayo de tracción uniaxial para cada una de las probetas



extraídas-asignadas de cada una de las probetas Marciniak con sus materiales asignados completamente. En las Figuras 5.90 a 5.94 se muestran las correlaciones de las curvas tensión-deformación experimentales con las correspondientes a los modelos simulados.

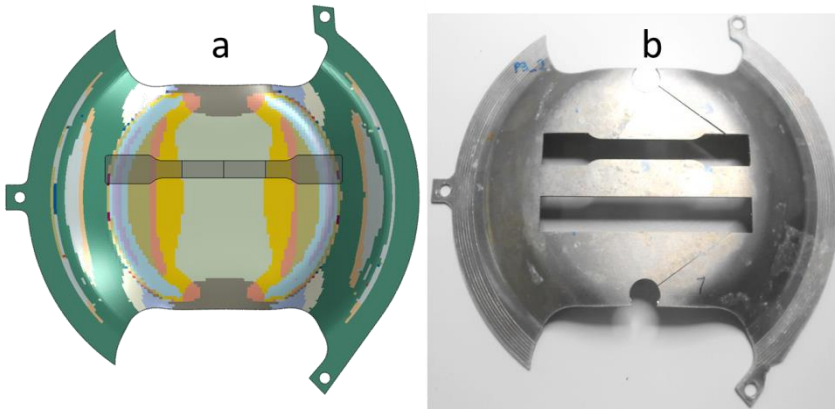


Figura 5.87. *Probeta 6: zona de extracción de la probeta de tracción uniaxial. a) modelo de elementos finitos, b) probeta real.*

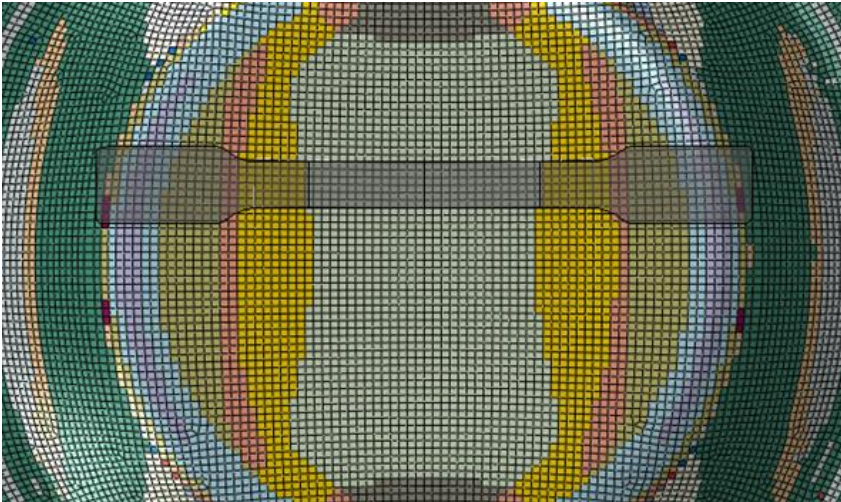


Figura 5.88. *Modelo de elementos finitos de la zona de interés a extraer de la probeta Marciniak.*

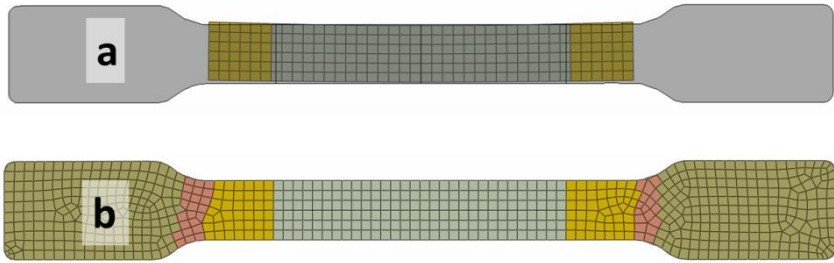
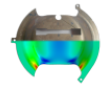


Figura 5.89. a) Modelo de elementos finitos parcial directamente extraído de la probeta de embutición, b) Modelo de elementos finitos de la probeta Marciniak con los materiales asignados por zonas.

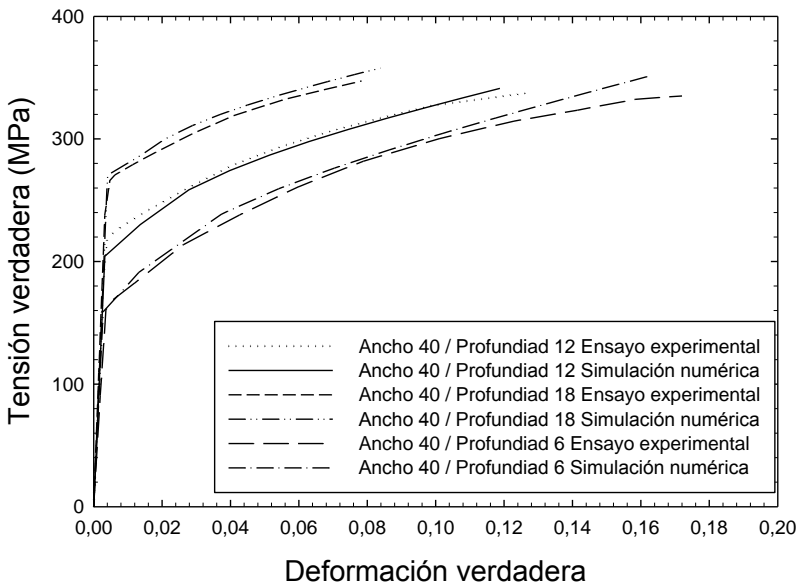


Figura 5.90. Correlación numérico-experimental en probetas uniaxiales extraídas de Marciniak de ancho 40mm.

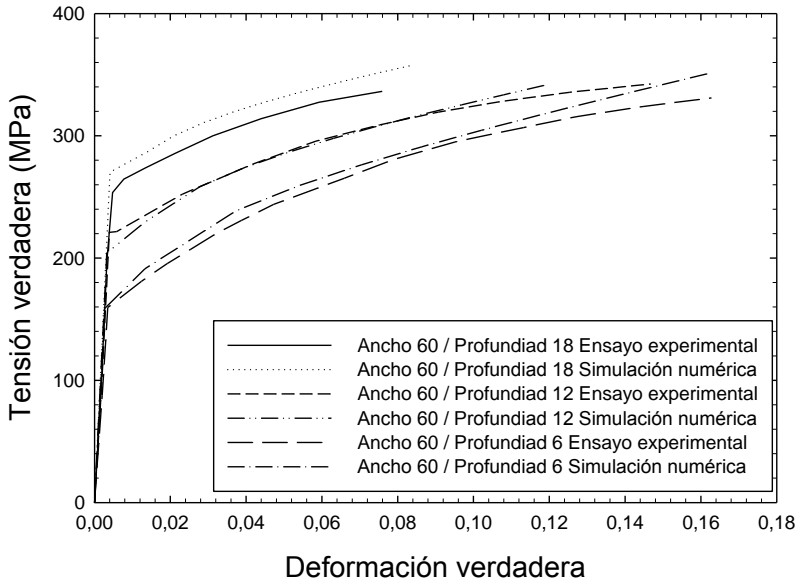


Figura 5.91 Correlación numérico-experimental en probetas uniaxiales extraídas de Marciniak de ancho 60mm.

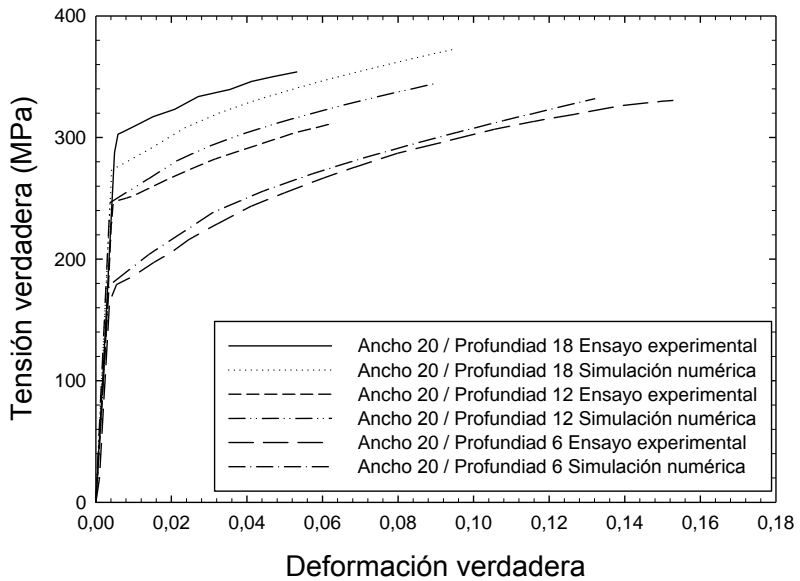


Figura 5.92. Correlación numérico-experimental en probetas uniaxiales extraídas de Marciniak de ancho 20mm.

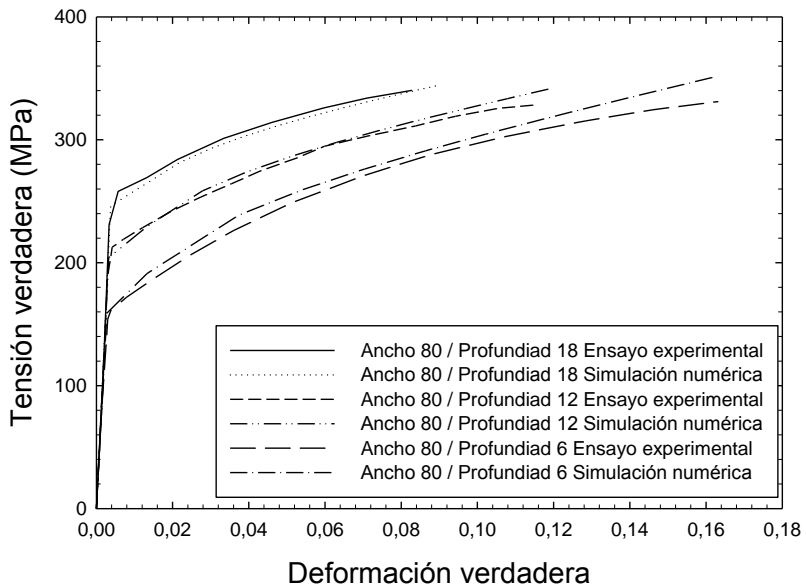
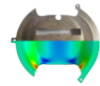


Figura 5.93. Correlación numérico-experimental en probetas uniaxiales extraídas de Marciniak de ancho 80mm.

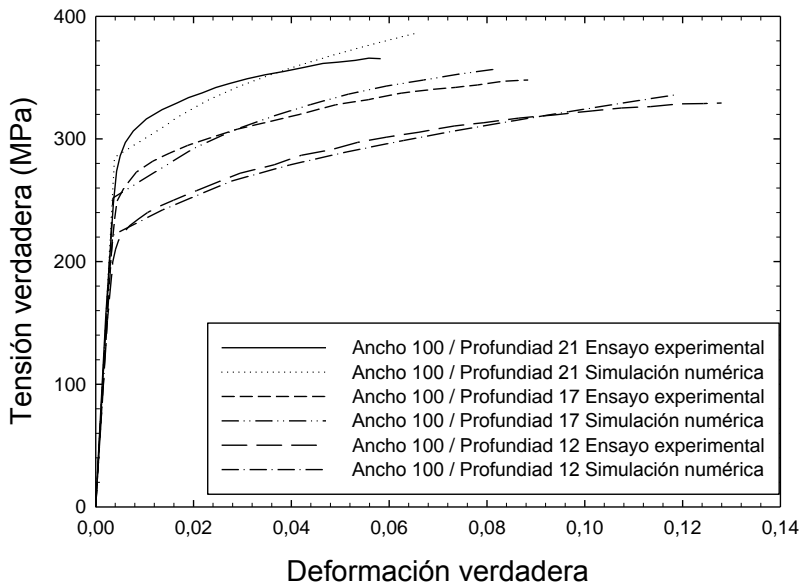


Figura 5.94. Correlación numérico-experimental en probetas uniaxiales extraídas de Marciniak de ancho 100mm.



Puede comprobarse a simple vista en las Figuras anteriores que la correlación obtenida es satisfactoria, ofreciendo unos resultados en términos de tensión-deformación realmente similares entre el ensayo de tracción uniaxial de probetas extraídas de las muestras Marciniak embutidas y sus correspondientes simulaciones. Si bien las conclusiones finales se describirán en el capítulo siguiente, cabe destacar ahora que las pequeñas diferencias en algunos de los casos, como el de probetas de ancho 60mm y profundidad 18mm , se explica debido a que por la proximidad de su estado de deformación a dos rangos de material, la asignación mediante los scripts no asigna exactamente el material real si no uno próximo. Por tanto la causa principal de esta diferencia es debida al diferente espesor asignado y no tanto al resto de variables elasto-plásticas, resultando en una curva tensión-deformación algo diferente.

Con esta validación final puede darse por concluido el presente capítulo en el que se han ido recogiendo y analizando los resultados de cada una de las etapas en las que se ha dividido la metodología desarrollada.

Finalmente, el siguiente capítulo recoge las diferentes conclusiones obtenidas en base al trabajo desarrollado, así como las posibles líneas de investigación con las que continuar investigando en el ámbito de la presente Tesis.



CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1. CONCLUSIONES

Tal y como se ha descrito al inicio de la presente Tesis, este trabajo tiene como motivación y objetivo principal el controlar y definir la manera óptima de transferir los resultados de la deformación, producida durante la simulación del proceso de estampado, hacia los programas de simulación estructural para poder así tenerla en cuenta al realizar las simulaciones de los casos de carga a que esté sometido ese componente estampado.

Este objetivo se ha traducido además en la definición de una metodología de trabajo, aplicable a nivel industrial, con la que enfrentarse a la estimación mediante simulación de la rigidez estructural de componentes estampados.

Las principales conclusiones obtenidas se presentan a lo largo de este capítulo y se han agrupado en función de su relación con las técnicas experimentales, las simulaciones numéricas y la metodología. El capítulo concluye con el trabajo futuro en el campo de aplicación de la presente Tesis.

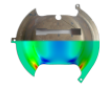
6.1.1. De las técnicas experimentales

- El utillaje que se ha diseñado para la realización de los ensayos Marciniak permite realizar, de manera controlada, la embutición para cualquier geometría de probeta de hueso de perro y para cualquier profundidad. Se podría incluso emplear para llevar cualquiera de las geometrías de probeta hasta rotura para la evaluación de la curva de límite de conformado si fuese necesario.
- El método de la rejilla de control, para la determinación de las deformaciones menor y mayor, se ha mostrado suficientemente exacto dado que la zona central de las



probetas Marciniak presenta estados prácticamente uniformes de deformación en todo el área de la rejilla.

- La técnica de evaluación de las deformaciones mediante el sistema ARAMIS®, empleado para las probetas biaxiales, se ha mostrado como la técnica de evaluación más rápida una vez puesto a punto el sistema de adquisición. Si bien su preparación es laboriosa y requiere de una gran formación particular en este sistema, ofrece un gran rendimiento para baterías de ensayos realizadas en la misma sesión de medición. Requiere de una planificación previa adecuada para que todos los ensayos Marciniak se realicen seguidos con el mismo montaje experimental. Para ensayos espaciados en el tiempo o fuera de planificación, el montaje puede penalizar esa productividad.
- La técnica de evaluación de las deformaciones mediante el empleo del sistema TRITOP® muestra carencias debido a las limitaciones de emplear pegatinas en probetas sometidas a grandes deformaciones o en probetas con poco espacio disponible. Los pisadores del utillaje de ensayo despegaron todas las referencias fijas y las probetas Marciniak más estrechas mostraron dos tipos de problemáticas: por un lado despegues de las pegatinas de referencia y, por otro, interferencias entre las partes blancas centrales y los anillos exteriores negros, impidiendo al sistema tomar las referencias correctamente.
- La técnica de evaluación de las deformaciones mediante el empleo del sistema METROLOG XG® ha ofrecido unos buenos resultados de medida y una gran flexibilidad en la definición de referencias fijas y posterior captura de las coordenadas de cada punto de control de la rejilla, tanto para las muestra sin deformar como las ya embutidas. Este sistema necesita también de una gran preparación sobre el funcionamiento de la herramienta en particular y, por lo tanto de una buena planificación de ensayos para aprovechar su limitada disponibilidad. A su favor, que para mediciones de ensayos fuera de planificación, el montaje y la toma de



referencias se realiza de manera rápida. Requiere de una hoja Excel de apoyo para calcular las deformaciones en función de las coordenadas medidas de cada punto de control planteado. Esta hoja Excel sería necesario revisarla en caso de plantearse rejillas con otra definición pero el medio de medida valdría igualmente.

- El diseño de experimentos mediante superficies de respuesta se ha mostrado suficientemente exacto para, con un número relativamente bajo de experimentos y mediante la adecuada selección de los parámetros elasto-plásticos, obtener estos mismos parámetros para definir el comportamiento del material bajo cualquier estado de deformación dentro del rango de valores β y ε_f fijados para el estudio.

6.1.2. De las simulaciones numéricas

- Las simulaciones de embutición realizadas con el programa ABAQUS® han ofrecido unos valores de deformación con un alto nivel de correlación frente a los valores de deformación y desplazamiento medidos en los ensayos reales equivalentes. Para estas se ha observado la necesidad de calibrar adecuadamente los modelos en base al coeficiente de fricción entre piezas en contacto, mostrándose crucial para una buena inter-relación simulación-ensayo. Además es trascendental la introducción, dentro de la carta de material, de los parámetros de Lankford, mediante los coeficientes del potencial plástico de Hill, para capturar de manera adecuada la deformación durante el proceso de embutición.
- Con respecto a las simulaciones de embutición inversas, realizadas con el programa ALTAIR HyperForm®, si bien este programa permite también realizar simulaciones incrementales, multi-etapa, con todo tipo de detalles referentes al material y al proceso, para esta Tesis se ha empleado un módulo, denominado One-step, que ha permitido, mediante el método inverso, obtener resultados de la embutición muy



rápidamente. Realizando la comparación entre los estados de deformación, β y ε_I , obtenidos de las simulaciones de ABAQUS® con los de HyperForm®, donde se ha comprobado un alto nivel de correlación para todos los casos estudiados. Esto permite validar la utilización de este programa para abordar otro tipo de geometrías de estudio futuras, sin necesidad de elaborar una complicada simulación incremental y ganándose tiempo de respuesta tanto desde el punto de vista de preparación y definición del modelo de elementos finitos como del tiempo de cálculo.

- Respecto a los ficheros de salida desde HyperForm®, como ya se ha descrito en el Capítulo 5, ha de escogerse el formato LsDyna ya que HyperForm® aún no incluye todos los datos de deformación completos en su fichero de salida por defecto.
- Desde el punto de vista del mapeado de resultados de la simulación de embutición sobre el modelo estructural, el programa de ALTAIR, Results Mapper® se ha presentado como una precisa herramienta para pasar los resultados de deformación requeridos entre mallas diferentes de la misma pieza y, sobre todo, ofreciendo la posibilidad de escribir un fichero de salida que incluya los datos de ε_{II} y ε_I , ordenados con su respectivo elemento, para poder ser usado como entrada en los scripts diseñados. Este programa acepta además ficheros de resultados de embutición en varios formatos comerciales con la limitación de tener que realizar el paso intermedio descrito en el Capítulo 5, consistente en escribir un fichero de resultados sólo con el resultado de deformación preciso (mayor o menor) para así asegurar el mapeado del valor necesario, ya que Results Mapper® no permite desde su interfaz, la elección de cualquiera de los resultados leídos desde el fichero de resultados de embutición. Lo positivo de este paso intermedio es que puede realizarse con otra herramienta incluida en el mismo paquete ALTAIR HyperWorks®, llamada HvTrans.



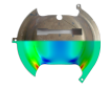
6.1.3. De la metodología

- Se ha completado un procedimiento para tener en cuenta, durante las simulaciones estructurales de piezas metálicas embutidas, el efecto de la deformación remanente, sufrida durante el proceso de embutición, sobre las propiedades del material. Este procedimiento se aplicará para la simulación, mediante el programa de cálculo por elementos finitos ABAQUS®, de los diferentes casos de carga a los que se ve sometido un componente metálico de un automóvil obtenido por embutición.
- Se ha desarrollado una metodología que combina los ensayos físicos de tracción uniaxial y los de definición del límite de conformado, con simulaciones de elementos finitos de embutición y estructurales mediante el programa ABAQUS®, de embutición inversa mediante la herramienta One-step dentro del programa ALTAIR HyperForm® y de mapeado de resultados mediante Results Mapper dentro del paquete ALTAIR HyperWorks®.
- Con el objetivo de apoyar la metodología desarrollada se han llevado a cabo ensayos de tracción uniaxial, tanto del material virgen según se ha recibido del proveedor, para obtener el comportamiento real inicial sin deformar, como de las zonas planas más profundas de cada una de las probetas Marciniak ensayadas, para conocer las propiedades del material según varíe su estado de deformación. Dichas probetas Marciniak se han ensayado de acuerdo al método definido en la norma UNE-EN ISO 12004-2 sin llegar a alcanzar el límite de conformado del material.
- Para poder realizar una predicción de propiedades elasto-plásticas del material para todos los estados de deformación, β y ε_I , dentro del rango de estudio, se ha realizado un diseño de experimentos con un número de ensayos Marciniak establecido y se han obtenido así las superficies de respuesta que definen, para cada parámetro elasto-plástico, su valor en función del



estado de deformación dentro del citado rango de estudio.

- Con los datos de material obtenidos de los ensayos de tracción uniaxial en condiciones de suministro, se han realizado las simulaciones de embutición de todos los casos ensayados físicamente. Se ha correlacionado la deformación en la zona de máxima profundidad de embutición, β y ε_I , y el valor de la fuerza del punzón de los ensayos experimentales con los de las simulaciones por elementos finitos.
- Con el objetivo de que, en futuros trabajos a realizar sobre geometrías más complicadas, en las que una simulación incremental de embutición sea inabordable por el tiempo disponible, se han realizado simulaciones inversas de embutición. Estas se han mostrado como suficientemente exactas, desde el punto de vista del estado de deformación generado en la zona de estudio, como para que efectivamente sean una alternativa válida en las primeras etapas de desarrollo del componente metálico embutido. Para ello se ha empleado el programa HyperForm® mediante su herramienta One-step, con la precaución de solicitar la salida de datos en formato LsDyna, la cual contiene toda la información necesaria relativa al estado de deformación.
- Una vez se dispone de este fichero con todos los elementos del modelo estructural y su estado de deformación correspondiente, mediante scripts programados *ad-hoc*, se han creado los materiales definidos en el diseño de experimentos, por rangos de β y ε_I , y sus secciones correspondientes en ABAQUS. Se asigna cada material a cada grupo de elementos que compartan ese mismo rango de estado de deformación. El empleo de esta asignación de materiales, directamente disponibles en el modelo estructural, evita el uso de subrutinas que, corriendo por detrás del software estructural, realicen asignaciones particulares de exactamente cada material definido en el diseño de experimentos para cada estado exacto de deformación,



alargando sobremanera el tiempo de cálculo en tanto en cuanto más elementos tenga dicho modelo.

- Finalmente se dispone de un modelo de simulación estructural con diferentes secciones (materiales y espesores) asignadas a cada zona de la pieza con diferentes estados de deformación. Para validar la metodología se han realizado simulaciones de tracción uniaxial de probetas con las mismas condiciones de pre-deformación que la probeta Marciniak de las que se extrajeron las mismas probetas reales. Finalmente los resultados de estas simulaciones de tracción uniaxial han arrojado valores muy similares a los ensayos experimentales, no solo para los ensayos definidos en el diseño de experimentos sino también para otros ensayos con geometrías Marciniak intermedias, realizados explícitamente para la validación del modelo y de la metodología.

Con todo esto, para afrontar futuras situaciones en las que se hace necesario tener en cuenta el estado de deformación sufrido durante el proceso de embutición, en componentes de automoción metálicos, para obtener una mejor calidad de los resultados de las simulaciones de elementos finitos de los diferentes casos de carga estructural a los que se ve sometido dicho componente, se presenta a continuación la metodología definitiva a aplicar para tal fin:

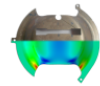
- Ensayar probetas de tracción uniaxial en dirección longitudinal, transversal y a 45 grados extraídas de la placa de material en condiciones de suministro. Extraer la curva tensión-deformación, los parámetros elasto-plásticos y los coeficientes de Lankford.
- Realizar simulación inversa de la geometría objetivo para definir los rangos de deformación de interés, sobre todo para definir el límite de deformación superior, estando por debajo de la curva de límite de conformado. Introducir las propiedades del material obtenidas del paso anterior. Reproducir lo mejor posible las condiciones de pisado y rozamiento entre piezas.



- Plantear el diseño de experimentos, en los términos descritos en la presente Tesis, para definir las profundidades y geometrías Marciniak que permitan cubrir el mayor rango de deformación necesario.
- Ensayar, con el utillaje de embutición diseñado, las diferentes geometrías Marciniak y profundidades definidas por el diseño de experimentos.
- Decidir el número de materiales para cubrir todo el rango de deformación de la pieza embutida. Cuantos más materiales, más aproximado será el estado de deformación empleado en la simulación estructural, pero más tiempo lleva la asignación de materiales por parte del script.
- Modificar los scripts en función de los resultados del diseño de experimentos, de los rangos de deformación y del número de materiales escogido.
- Realizar la malla de la pieza objetivo para su simulación estructural y mapear sobre ella los resultados de deformación provenientes de la simulación inversa. Asegurar que se obtiene la salida de los dos ficheros que contienen en la primera columna el número del elemento de la malla estructural y en la segunda, el valor de ε_{II} o ε_I correspondiente a ese elemento tras el mapeado.
- Lanzar los scripts desde ABAQUS, con la malla estructural ya generada, para que estos creen los materiales necesarios y realicen la asignación de las diferentes secciones según el estado de deformación de cada elemento.
- A partir de aquí, cualquier caso de carga estático que se simule con este modelo, tendrá en cuenta la afectación del proceso de embutición sobre el cambio de las propiedades del material.

6.2. TRABAJO FUTURO

A tenor de los resultados extraídos en la presente Tesis, la metodología desarrollada representa una herramienta útil para la estimación de la variación de las propiedades de un material metálico durante el proceso de embutición y la posibilidad de



tener esta afectación en cuenta durante las simulaciones por elementos finitos, de los casos de carga estructural a los que ha de someterse dicho componente, debido a los requerimientos mecánicos, tanto impuestos por el fabricante del vehículo como por el propio desarrollador del componente.

Como posibles líneas de trabajo futuro, para seguir ahondando en la mejora y optimización de la presente metodología, se plantean las siguientes acciones:

- Evaluación de los parámetros de Lankford a diferentes niveles de deformación y estimar, bien un valor medio más exacto o su introducción como otra variable del diseño de experimentos.
- Estudiar la afectación de la temperatura en procesos de estampación en caliente, como los componentes estampados de aleaciones de magnesio.
- Ampliar las profundidades de embutición para llevar el material a rotura y definir la curva de límite de conformado, es decir, aumentar la ε_I .
- Aumentar el rango de materiales a asignar para conseguir mejor definición de las zonas con diferente estado de deformación. Evaluar la posibilidad del empleo de subrutinas que, empleando directamente la función de respuesta de cada variable del modelo, realicen asignaciones particulares de propiedades para cada caso de deformación de manera exacta.
- Integrar el espesor dentro del diseño de experimentos, como otra variable más en función del estado de deformación en lugar de estimarlo mediante la resistencia de materiales y las condiciones de isovolumen.
- Implementar criterios de rotura para los diferentes materiales para que el modelo estructural sea, no sólo capaz de reproducir el estado de deformación proveniente del proceso sino también las zonas de estricción localizada o rotura.
- Respecto a los métodos de medida de la deformación, se hace necesario evaluar, para el sistema TRITOP, el empleo de marcas pintadas, no susceptibles de



despegarse pero con contraste suficiente para ser detectadas por el sistema de adquisición de imágenes. Además se ha detectado que habría de emplearse, al menos para las probetas Marciniak, algún tipo de cuna o sistema que mantenga las referencias fijas externas.

- En cuanto a las rejillas para el control de la deformación, se plantea el uso de la imprimación mediante ataque químico que no dañe el material, de círculos con dos diámetros perpendiculares en su interior, provenientes de una plantilla con exactamente el mismo diámetro inicial y que coincidan con las direcciones L y T de laminación.



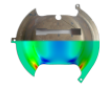
CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. E. Totten, K. Funatani, L. Xie. Handbook of Metallurgical Process Design. CRC Press. (2004) 215-248.
- [2] W.F. Hosford, R. Caddell: Metal forming: Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press. (2007) 245-275.
- [3] S. Basak et al. Prediction of formability of bi-axial pre-strained dual phase steel sheets using stress-based forming limit diagram. Advances in Material Forming and Joining. 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference. AIMTDR (2014) 167-182.
- [4] K. Chang. Product Manufacturing and Cost Estimating using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series. Academic Press (2013) 133-189.
- [5] T. Altan, A. E. Tekkaya. Sheet Metal Forming: Fundamentals. ASM International (2012).
- [6] D. Banabic, H.J. Bunge, K. Pöhlandt, A. E. Tekkaya. Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits. Springer Science & Business Media (2000).
- [7] Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu. Mechanics of sheet metal forming. Butterwoth-Heinemann (2002).
- [8] Z. Marciniak and K. Kuczynski. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metals. International.Journal of Mechanics Sciences 9 (1967) 609-620.
- [9] S.S. Hecker. Simple technique for determining forming limit curves. Sheet Metal Industries 52 (1975) 671-675.



- [10] UNE-EN ISO 12004-2. Materiales metálicos. Chapas y bandas. Determinación de las curvas límite de conformado. Parte 2: determinación de las curvas límite en laboratorio.
- [11] E. Mestres. Coupling simulations: A simple way to increase results accuracy (2012).
<http://insider.altairhyperworks.com/coupling-simulations/>
- [12] R. Sohmshtetty. Mapping Forming Effects to Structural Models ASP-390. Ford Motor Company (2012).
- [13] A. D. Santos, A. Reis , J.F. Duarte, P. Teixeira, A. B. Rocha, M.C. Oliveira, J.L. Alves, L. Menezes. A benchmark for validation of numerical results in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology 11 (2004) 155–156.
- [14] A. Aydemir, J.H.P. de Vree, W.A.M. Brekelmans, M.G.D. Geers, W.H. Sillekens, R.J. Werkhoven. An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes. Journal of Materials Processing Technology 159 (2005) 303–310.
- [15] N. Biba, A. Lishny, O. Sadykhov, S. Stebounov. Cost effective implementation of forging simulation. Journal of materials processing technology 113 (2001) 34-39.
- [16] F. Campana, L. Cortese, F. Placidi. FEM evaluation of springback after sheet metal forming: application to high strength steels of a combined isotropic hardening model. 1st International Conference on Super High Strength Steels, 2–4 (2005).
- [17] J. Mackerle. Finite element analyses and simulations of sheet metal forming processes. Engineering Computations 21 (2004) 891-940.
- [18] S. Stebounov, N. Biba, K. Andreeva. Flow stress data for the needs of forging modelling. Proceedings of 16th International Forging Congress (1999).



- [19] W. Schmitt, O. Benevolenski, T. Walde, A. Krasowsky. Material characterization for simulation of sheet metal forming. International Conference on computational plasticity (2005).
- [20] R. L. Plauta, A. F. Padilha, N.B. Limab, C. Herreras, A. Ferreira, L. H. Yoshimurae. Medium carbon steel deep drawing: A study on the evolution of mechanical properties, texture and simulations, from cold rolling to the end product. Materials Science and Engineering A 499 (2009) 337–341.
- [21] K. Mattiasson, M. Sigvant, M. Larsson. Methods for forming limit prediction in ductile metal sheets. Proceedings of IDDRG (2006) 1-9.
- [22] W. Liu, Y. Yang. Multi-objective optimization of an auto panel drawing die face design by mesh morphing. Computer-Aided Design 39 (2007) 863–869.
- [23] N. Biba, S. Stebunov, A. Lishny, A. Vlasov. New approach to 3D finite-element simulation of material flow and its application to bulk metal forming. 7th International Conference on Technology of Plasticity (2002) 829-834.
- [24] D. Bigot, J. Roelandt, H. Kebir. Numerical method coupling finite elements and boundary elements to model forming process tools. Journal of materials processing technology 209 (2009) 3226–3235.
- [25] C. Arwidson. Numerical Simulation of Sheet Metal Forming for High Strenght Steels. Luleå University of Technology. Licenciate Thesis (2008).
- [26] T. de Souza, B. Rolfe. Multivariate modelling of variability in sheet metal forming. Journal of materials processing technology 203 (2008) 1–12.
- [27] H.M. Jiang, S.H. Li, H. Wua, X.P. Chena. Numerical simulation and experimental verification in the use of tailor-welded blanks in the multi-stage stamping process. Journal of Materials Processing Technology 151 (2004) 316–320.



[28] N. Biba, A. Lishny, S. Stebunov, A. Vlasov. Optimal design of assembled and pre-stressed dies by means of numerical simulation. The 8th International Conference on Metal Forming (2000) 127-131.

[29] W. Kubli, J. Reissner. Optimization of sheet-metal forming processes using special-purpose program AUTOFORM. Journal of Materials Processing Technology 50 (1995) 292-30.

[30] N. Biba, S.A. Stebounov, S.V. Smirnov. Prediction of cold forming failures with Qform. New Developments in Forging (2001).

[31] L. Wei , Y. Yuying, X. Zhongwen, Z. Lihong. Springback control of sheet metal forming based on the response-surface method and multi-objective genetic algorithm. Materials Science and Engineering A 499 (2009) 325–328.

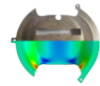
[32] M.B. Silva, R.M.S.O. Baptista, P.A.F. Martins. Stamping of automotive components: a numerical and experimental investigation. Journal of Materials Processing Technology 155-156 (2004) 1489–1496.

[33] S.A. Asgari, M. Pereira, B.F. Rolfe, M. Dingle, P.D. Hodgson. Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis. Journal of materials processing technology 203 (2008) 129–136.

[34] R. Sturt, P. Richardson, A. Knight, T. Dutton. Residual effects of metal forming: their effect on crash results. Ove Arup & Partners International Ltd. United Kingdom. Paper No. 285. <http://www.nhtsa.gov/Research/>

[35] N. Vallino. Coupling between stamping results and crash simulation. European Hyperworks Technology Conference (2010)

[36] C. Wagener. Car body lightweight design requirements for Finite Element Analysis. 5th European Hyperworks Technology Conference (2011).



[37] A. Towse, K. Branson, A. Chapple, C. Coomber. Virtual chassis development helping to overcome cost squeeze. The Altair technology conference (2004).

[38] W. WuRong, G. BiMeng, W. XiCheng, W. DaZhi, D. HanBin. An engineering approach to improve the accuracy of one-step simulation for vehicle forming-to-crashworthiness integrated evaluation. Science China-Technological Sciences. Springer (2012).

[39] L. Fu, X. Dong, P. Wang. Study on one-step simulation for the bending process of extruded profiles. The international journal of Advanced Manufacturing Technology 43 (2009) 1069–1080.

[40] D. Ting, L. Yuqi, Z. Zhibing, L. Zhigang. Fast FE analysis system for sheet metal stamping—FASTAMP. Journal of Materials Processing Technology 187–188 (2007) 402–406.

[41] B.T. Tang, Z. Zhao, X.Y. Lu, Z.Q. Wang, X.W. Zhao, S.Y. Chen. Fast thickness prediction and blank design in sheet metal forming based on an enhanced inverse analysis method. International Journal of Mechanical Sciences 49 (2007) 1018–1028.

[42] Y.Q. Guo, H. Naceur, K. Debray, F. Bogard. Initial solution estimation to speed up inverse approach in stamping modeling. Engineering-Computations.
<http://www.emeraldinsight.com/0264-4401.htm>

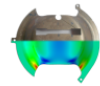
[43] The Aluminum Association.
<http://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>

[44] ASTM. E 8M Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 3.01.

[45] W.F. Hosford, R. Caddell: Metal forming: Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press (2007).



- [46] ASTM E517-00. Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal (2006).
- [47] W. J. Thomas. T. Altan. S. Kaya. Sheet Forming of Aluminum Alloys. Physical Metallurgy and Process. Volume 1. Handbook of Aluminum. CRC Press. (2003) 837-880.
- [48] S. Semiatin. Stretch Forming. Metals Handbook, 14: Forming and Forging. American Society of Metals (1988) 575-590.
- [49] Volvo's Rapid Strategy aims at 20-month vehicle development. <http://articles.sae.org/13621/>
- [50] S. Johansson, D. Sätterman. Simulation Driven Product Development. Master of Science. Thesis in the Master Degree. Program Supply Chain Management. Chalmers University of Technology (2012).
- [51] C. Hirsch. Numerical Computation of Internal and External Flows. Butterworth-Heinemann (2007).
- [52] Abaqus 6.12 Documentation. Dassault Systèmes (2014).
- [53] A.I.Khuri, J.A. Cornell. Response surfaces. Design and analyses. Statistics: Textbooks and monographs 81. Marcel Dekker (1987).
- [54] R. O. Kuehl. Diseño de experimentos. International Thomson (2001).
- [551] D. C. Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica (1991).
- [56] STATGRAPHICS Centurion XVII. Software para el análisis de datos con amplia gama de procedimientos estadísticos disponibles. <http://www.statgraphics.net/>



[57] Altair Hyperworks @ “HF-5100: Result Mapping Using Process Manager”.

[http://www.altairhyperworks.com/\(S\(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd\)\)/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result_mapping_using_process_manager_hf_5100.htm](http://www.altairhyperworks.com/(S(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd))/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result_mapping_using_process_manager_hf_5100.htm)

[58] Altair Hyperworks @ HyperMesh.

http://www.altairhyperworks.com/HWTemp3Product.aspx?product_id=7&item_name=New%20Features.

[59] Altair Hyperworks @ “Radioss One-step. HF-1000: One step Stamping Simulation”.

[http://www.altairhyperworks.com/\(S\(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd\)\)/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result_mapping_using_process_manager_hf_5100.htm](http://www.altairhyperworks.com/(S(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd))/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result_mapping_using_process_manager_hf_5100.htm)

[60] R. Hill. A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proc. Roy. Soc. 193A (1948) 197-281.

[61] Dr. L. Kessler, Dr. J. Gerlach, T. Beler, I. Heinle, A. Lipp, Dr. H. Grass. Challenges in Material Model Selection for Forming Simulation. Great Design in Steel Seminar (2012) www.autosteel.org.





SCRIPT CREACIÓN MATERIALES

```
# -*- coding: mbcs -*-
#####
#-----SCRIPT CREACIÓN DE MATERIALES-----
#-----ENRIQUE CUIRIEL SANZ-----
#-----TESIS DOCTORAL-----
#-----UNIVERSIDAD DE BURGOS-----
#-----OCTUBRE 2015-----
#####
#
#
# from driverUtils import executeOnCaeGraphicsStartup
# executeOnCaeGraphicsStartup()
# : Executing "onCaeGraphicsStartup()" in the site directory ...
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
#-----

nombre = "A80_P6" # Poner el nombre del modelo

x = 0
while x<26:

    # Lectura del fichero de propiedades elastoplásticas
    myDataFile = open('Mat_%d.txt' % (x), 'r')
    myDataLines = myDataFile.readlines()
    myPointsList = [eval(dataLine) for dataLine in myDataLines]

    E = myPointsList[0]
    L = myPointsList[1]
    T = myPointsList[2]
    D = myPointsList[3]
    K = myPointsList[4]
    n = myPointsList[5]
    esp = myPointsList[6]

    # Creación de Materiales
    mdb.models['%s' % (nombre)].Material(name='Material-%d' % (x))
    mdb.models['%s' % (nombre)].materials['Material-%d' % (x)].
    Elastic(table=((E, 0.3), ))
    mdb.models['%s' % (nombre)].materials['Material-%d' % (x)].
    Plastic(table=((K*((0.002+(L/E)**n)*(1+(0.002+(L/E))))), 0.0),
              ((K*(0.01)**n)*(1+0.01), log(1+0.01)),
              ((K*(2*D/10)**n)*(1+2*D/10), log(1+2*D/10)),
              ((K*(3*D/10)**n)*(1+3*D/10), log(1+3*D/10)),
              ((K*(4*D/10)**n)*(1+4*D/10), log(1+4*D/10)),
              ((K*(5*D/10)**n)*(1+5*D/10), log(1+5*D/10)),
              ((K*(6*D/10)**n)*(1+6*D/10), log(1+6*D/10)),
              ((K*(7*D/10)**n)*(1+7*D/10), log(1+7*D/10)),
              ((K*(8*D/10)**n)*(1+8*D/10), log(1+8*D/10)),
              ((K*(9*D/10)**n)*(1+9*D/10), log(1+9*D/10)),
              ((K*(D)**n)*(1+D), log(1+D))))

    # Creación de Secciones
    mdb.models['%s' % (nombre)].HomogeneousShellSection(name='Section-%d' % (x),
    preIntegrate=OFF, material='Material-%d' % (x), thicknessType=UNIFORM,
    thickness=esp, thicknessField='', idealization=NO_IDEALIZATION,
    poissonDefinition=DEFAULT, thicknessModulus=None, temperature=GRADIENT,
    useDensity=OFF, integrationRule=SIMPSON, numIntPts=5)

    x=x+1
```





SCRIPT ASIGNACIÓN MATERIALES

```
# -*- coding: mbc8 -*-
#####
#-----SCRIPT ASIGNACION DE MATERIALES-----
#-----ENRIQUE CUIEL SANZ-----
#-----TESIS DOCTORAL-----
#-----UNIVERSIDAD DE BURGOS-----
#-----OCTUBRE 2015-----
#####
#
#
# from driverUtils import executeOnCaeGraphicsStartup
# executeOnCaeGraphicsStartup()
#: Executing "onCaeGraphicsStartup()" in the site directory ...
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
#-----

model = "A80_P6" # Poner el nombre del Modelo
part = "A80_P6" # Poner el nombre del Part

# Rangos de variación de la deformación principal máxima
e1_0 = 0.01
e1_1 = 0.04
e1_2 = 0.08
e1_3 = 0.12
e1_4 = 0.16

# Rangos de variación del coeficiente beta
b_0 = -0.45
b_1 = -0.25
b_2 = 0.0
b_3 = 0.8

# Creación de ficheros para la agrupación de elementos
i = 0
while i<26:

    DataFile = open('Material_%d.txt' % (i), 'a')
    DataFile.writelines('%6.0f' % (i))
    DataFile.close()

    i=i+1

# Lectura del número de elementos del modelo
myDataFile1 = open('%s_MAJOR.dat' % (model), 'r')
myDataLines1 = myDataFile1.readlines()
myPointsList1 = [eval(dataLine) for dataLine in myDataLines1]
filas = len(myPointsList1)

# Agrupación de elementos en función de e1 y beta
# La variable n1 es el label de cada elemento
# La variable e1 es la deformación principal máxima
# La variable e2 es la deformación principal mínima
# La variable beta es ratio e2/e1
x = 0
while x<filas:

    xy1=myPointsList1[x]
    n1=xy1[0]
    e1=xy1[1]
    myDataFile2 = open('%s_MINOR.dat' % (model), 'r')
    myDataLines2 = myDataFile2.readlines()
    myPointsList2 = [eval(dataLine) for dataLine in myDataLines2]
    xy2=myPointsList2[x]
    e2=xy2[1]
    beta=e2/e1
```



```
if (e1 < e1_0):
    DataFile = open('Material_0.txt', 'a')
    DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
    DataFile.close()

elif (e1_0 <= e1 < e1_1):
    if (beta < b_0):
        DataFile = open('Material_1.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_0 <= beta < b_1):
        DataFile = open('Material_2.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_1 <= beta < b_2):
        DataFile = open('Material_3.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_2 <= beta < b_3):
        DataFile = open('Material_4.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_3 <= beta):
        DataFile = open('Material_5.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

elif (e1_1 <= e1 < e1_2):
    if (beta < b_0):
        DataFile = open('Material_6.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_0 <= beta < b_1):
        DataFile = open('Material_7.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_1 <= beta < b_2):
        DataFile = open('Material_8.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_2 <= beta < b_3):
        DataFile = open('Material_9.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_3 <= beta):
        DataFile = open('Material_10.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()
```




```
elif (e1_2 <= e1 < e1_3):
    if (beta < b_0):
        DataFile = open('Material_11.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_0 <= beta < b_1):
        DataFile = open('Material_12.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_1 <= beta < b_2):
        DataFile = open('Material_13.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_2 <= beta < b_3):
        DataFile = open('Material_14.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_3 <= beta):
        DataFile = open('Material_15.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

elif (e1_3 <= e1 < e1_4):
    if (beta < b_0):
        DataFile = open('Material_16.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_0 <= beta < b_1):
        DataFile = open('Material_17.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_1 <= beta < b_2):
        DataFile = open('Material_18.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_2 <= beta < b_3):
        DataFile = open('Material_19.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_3 <= beta):
        DataFile = open('Material_20.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()
```



```
elif (e1_4 <= e1):
    if (beta < b_0):
        DataFile = open('Material_21.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_0 <= beta < b_1):
        DataFile = open('Material_22.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_1 <= beta < b_2):
        DataFile = open('Material_23.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_2 <= beta < b_3):
        DataFile = open('Material_24.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

    elif (b_3 <= beta):
        DataFile = open('Material_25.txt', 'a')
        DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
        DataFile.close()

else :
    DataFile = open('Material_0.txt', 'a')
    DataFile.writelines('\n%6.0f' % (n1))
    DataFile.close()

x=x+1

# Asignación de secciones a cada grupo de elementos
x = 0
while x<26:

    myDataFile = open('Material_%d.txt' % (x), 'r')
    myDataLines = myDataFile.readlines()
    myPointsList = [eval(dataLine) for dataLine in
myDataLines]
    filas = len(myPointsList)

    if (filas < 2):
        myDataFile.close()

    else :
        del myPointsList[0]
        p = mdb.models['%s' % (model)].
parts['%s' % (part)]
        p.SetFromElementLabels
(name='SET_%d' % (x), elementLabels=myPointsList)
        myDataFile.close()

        p = mdb.models['%s' % (model)].
parts['%s' % (part)]
        region = p.sets['SET_%d' % (x)]
        p = mdb.models['%s' % (model)].parts['%s' % (part)]
        p.SectionAssignment(region=region,
-----
SectionName='Section-%d' % (x), offset=0.0,
offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
thicknessAssignment=FROM_SECTION)

x=x+1
```