



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Análisis de las características de los modelos de material
recomendados para la simulación de procesos de embutición
de chapa de acero

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

Autor: Javier Colorado Rodríguez

Tutor: Alejandro Quesada González

ENERO 2008



Índice

1. Introducción	8
1.1 Introducción	9
1.2 Estructura del proyecto	10
2. Objetivos	11
3. Conformado por deformación	13
3.1 Deformación plástica.....	14
3.1.1 Procesos de conformado por deformación	14
3.1.2 Curva de tensión-deformación.....	14
3.1.3 Parámetros de influencia del material en el conformado	16
3.1.4 Lubricación.....	19
3.1.5 Tipos de acero para conformado de chapa.....	20
3.2 Embutición	22
3.2.1 Introducción	22
3.2.2 Tipos	23
3.2.3 Tecnología de embutición	24
3.2.4 Defectos en el embutido	26
3.3 Plegado.....	28
3.3.1 Introducción	28
3.3.2 Tipos	28
3.3.3 Tecnología de plegado	29
3.4 Punzonado y cizallado	31
3.4.1 Introducción	31
3.4.2 Tipos	32
3.4.3 Tecnología de punzonado y cizallado	32
3.5 Conformado por rodillos	34
3.5.1 Introducción	34
3.5.2 Tipos	34
3.5.3 Tecnología del conformado por rodillos	35
3.6 Forja.....	37
3.6.1 Introducción	37
3.6.2 Tipos	37
3.6.3 Tecnología de forjado	38
3.7 Extrusión.....	39
3.3.1 Introducción	39
3.3.2 Tipos	39
3.3.3 Tecnología de extrusión	40
4. Análisis por el método de los elementos finitos.....	42
4.1 Análisis por el método de los elementos finitos	43
4.1.1 Historia.....	43
4.1.2 Concepto básico.....	43
4.1.3 Aplicaciones en ingeniería del análisis por elementos finitos	44



4.1.4 Descripción general del análisis por elementos finitos.....	45
4.1.5 Factores que afectan a la exactitud del análisis por elementos finitos ..	47
4.1.6 Tendencias del análisis por elementos finitos	48
4.1.7 Comparación entre métodos implícito y explícito	49
4.2 Ansys Ls-Dyna	51
4.2.1 Presentación del programa.....	51
4.3 Otro software	53
4.3.1 Pam-Stamp	53
4.3.2 Solidworks.....	53
4.3.3 Adina	53
4.3.4 Autoform	53
4.3.5 Dynaform	53
4.4 Modelos de material	54
4.4.1 Modelo rígido	54
4.4.2 Modelo cinemático plástico.....	55
4.4.3 Modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación	57
4.4.4 Modelo piecewise linear	58
4.4.5 Modelo de Johnson-Cook	60
5. Proceso de simulación.....	62
5.1 Descripción del proceso a simular.....	63
5.2 Simulación explícita	65
5.2.1 Definición del tipo de análisis	65
5.2.2 Importar la geometría	65
5.2.3 Definición de los tipos de elemento	66
5.2.4 Definición de constantes reales.....	67
5.2.5 Definición de los materiales.....	68
5.2.6 Modelado	69
5.2.7 Mallado	69
5.2.8 Crear partes	71
5.2.9 Creación de contactos	71
5.2.10 Definición de los vectores necesarios	73
5.2.11 Aplicación de cargas.....	74
5.2.12 Ajustes de la solución	76
5.2.13 Solución	76
5.2.14 Postprocesado.....	78
5.3 Análisis implícito.....	79
5.3.1 Solucionar o cargar el análisis explícito	79
5.3.2 Cambio del nombre de proyecto.....	79
5.3.3 Convertir tipos de elemento.....	79
5.3.4 Definir modelo de material.....	79
5.3.5 Desactivar la comprobación de forma de elemento	80
5.3.6 Cargar la geometría del análisis explícito.....	80
5.3.7 Quitar partes innecesarias.....	81
5.3.8 Poner restricciones	81
5.3.9 Importar las tensiones	82
5.3.10 Ajustes de la solución	82



5.3.11 Solución	83
5.3.12 Postprocesado	84
5.4 Simulación de ensayo a tracción	85
5.5 Automatización de tareas	86
6. Resultados	88
6.1 Profundidades	89
6.1.1 Profundidad de la pieza real	89
6.1.2 Profundidad de la pieza simulada	90
6.2 Modelo cinemático plástico	90
6.2.1 Parámetros utilizados	90
6.2.2 Resultado de la simulación	92
6.3 Modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación	94
6.3.1 Parámetros utilizados	94
6.3.2 Resultado de la simulación	95
6.4 Modelo piecewise linear isotropic modo I	98
6.4.1 Parámetros utilizados	98
6.4.2 Resultado de la simulación	99
6.5 Modelo piecewise linear isotropic modo II	101
6.5.1 Parámetros utilizados	101
6.5.2 Resultado de la simulación	101
6.6 Modelo piecewise linear isotropic modo III	103
6.6.1 Parámetros utilizados	103
6.6.2 Resultado de la simulación	103
6.7 Modelo de Johnson-Cook	105
6.7.1 Parámetros utilizados	105
6.7.2 Resultado de la simulación	105
7. Conclusiones	107
8. Desarrollos futuros	109
9. Bibliografía	111



Índice de tablas

Tabla 3.1: Valores de K y n para algunos materiales	17
Tabla 3.2: Valores de C y m para algunos materiales	18
Tabla 3.3: Velocidades de la prensa para embutir distintos materiales.....	23
Tabla 3.4: Diámetros del corte a medida para distintas formas.....	25
Tabla 3.5: Valor del factor e en función de la relación entre radio interior y espesor	29
Tabla 3.6: Valores de k para distintos casos.....	38
Tabla 3.7: Valores de temperatura de extrusión en caliente de distintos metales.....	41
Tabla 4.1: Aplicaciones del análisis por elementos finitos	45
Tabla 6.1: Cotas de los keypoints escaneados y resultado de profundidad media	90
Tabla 6.2: Profundidades en función del parámetro C.....	91
Tabla 6.3: Profundidades en función del parámetro P	91
Tabla 6.4: Profundidades en función del límite elástico	93
Tabla 6.5: Parámetros utilizados	93
Tabla 6.6: Profundidad con las distintas curvas	95
Tabla 6.7: Profundidad para tensiones al 90%, 100% y 110%	99
Tabla 6.8: Profundidad obtenida para valor curvas del 90 % y 110 %	100
Tabla 6.9: Parámetros Johnson-Cook para distintos aceros	105

Índice de imágenes

Imagen 3.1: Zonas de deformación de la curva tensión-deformación ingenieril.....	15
Imagen 3.2: Curva tensión-deformación real y módulo tangente	16
Imagen 3.3: Regímenes de lubricación en el conformado plástico.....	20
Imagen 3.4: Configuración de los elementos para embutido.....	22
Imagen 3.5: Detalle del corte de un utillaje con cordones de embutido	22
Imagen 3.6: Fuerzas aplicadas y tensiones provocadas en la chapa.....	23
Imagen 3.7: Formado con hule.....	24
Imagen 3.8: Ondulado tras la embutición.....	27
Imagen 3.9: Plegado en falso y plegado con golpe	28
Imagen 3.10: Estudio de la cantidad de chapa necesaria en el plegado.....	29
Imagen 3.11: Magnitudes básicas del plegado	29
Imagen 3.12: Esquema del cizallamiento en un proceso de punzonado.....	31
Imagen 3.13: Características del orificio y el recorte punzonados.....	31
Imagen 3.14: Ejemplo de lanceteado.....	32
Imagen 3.15: Ángulos de corte en punzones.....	33
Imagen 3.16: Esquema de laminación plana	35
Imagen 3.17: Pasadas necesarias para crear distintos perfiles.....	36
Imagen 3.18: Diseño de la flor para crear un tubo a partir de chapa.....	36
Imagen 3.19: Configuración típica del forjado abierto.....	37
Imagen 3.20: Forja cerrada	38
Imagen 3.21: Fases de la forja de la cabeza de un tornillo.....	38
Imagen 3.22: Esquema del proceso de extrusión directa	39
Imagen 3.23: Esquema del proceso de extrusión hidrostática	40
Imagen 3.24: Esquema del proceso de extrusión lateral	40
Imagen 3.25: Esquema del proceso de extrusión por golpe.....	40
Imagen 3.26: Constante de extrusión k, para distintos metales y temperaturas	41
Imagen 4.1: Pieza dividida en elementos tetraédricos.....	44
Imagen 4.2: Simulación de un impacto fronto-lateral	52
Imagen 5.1: Recorte de chapa	63
Imagen 5.2: Punzón	63
Imagen 5.3: Sujetachapas.....	63
Imagen 5.4: Matriz.....	64
Imagen 5.5: Chapa conformada.....	64

Imagen 5.6: Ventana en la que se elige el tipo de análisis	65
Imagen 5.7: Importación de archivo IGES	66
Imagen 5.8: Búsqueda del archivo IGES	66
Imagen 5.9: Librería de tipos de elemento	66
Imagen 5.10: Definición del número de set	67
Imagen 5.11: Ventana de definición de las constantes reales	67
Imagen 5.12: Ventana de selección de modelo de material	68
Imagen 5.13: Ventana de definición del modelo rígido	68
Imagen 5.14: Áreas que forman la chapa	69
Imagen 5.15: Ventana de aplicación de propiedades	70
Imagen 5.16: Punzón con los distintos tamaños de elemento	70
Imagen 5.17: Ventana de manejo de partes	71
Imagen 5.18: Ventana de definición de contacto	72
Imagen 5.19: Ventana de definición de partes en contacto	72
Imagen 5.20: Ventana de parámetros vectoriales	73
Imagen 5.21: Ventana de propiedades del vector	73
Imagen 5.22: Ventana de valores del vector	74
Imagen 5.23: Ventana de definición de curvas	74
Imagen 5.24: Ventana de definición de cargas	75
Imagen 5.25: Definición del tiempo de simulación	76
Imagen 5.26: Definición de número de pasos de salida	76
Imagen 5.27: Ventana de de estado del análisis al principio de éste	77
Imagen 5.28: Ventana de estado de la solución en un paso intermedio	77
Imagen 5.29: Ejemplo de datos obtenidos tras el análisis	78
Imagen 5.30: Ejemplo de representación gráfica obtenida tras el análisis	78
Imagen 5.31: Ventana de cambio de elemento	79
Imagen 5.32: Definición del modelo elástico de material	80
Imagen 5.33: Modelos de material para el análisis implícito	80
Imagen 5.34: Ventana de carga de geometría	81
Imagen 5.35: Situación de los apoyos y grados de libertad restringidos	81
Imagen 5.36: Ventana de importación de tensiones	82
Imagen 5.37: Ventana de opciones de análisis implícito	83
Imagen 5.38: Evolución de los criterios de convergencia	84
Imagen 6.1: Vista lateral de la pieza con cota para profundidad final	89



Imagen 6.2: Vista superior con keypoints utilizados	89
Imagen 6.3: Vista superior con nodos utilizados.....	90
Imagen 6.4: Límite elástico respecto a velocidad de deformación	94
Imagen 6.5: Curvas del límite elástico 80% y 90%	95
Imagen 6.6: Curva del módulo tangente en función de la velocidad de deformación	96
Imagen 6.7: Curva del módulo elástico en función de la velocidad de deformación	97
Imagen 6.8: Curva de tensión respecto deformación plástica	98
Imagen 6.9: Curvas de tensión respecto a deformación plástica	99
Imagen 6.10: Curva que escala tensión en función de la velocidad de deformación	101
Imagen 6.11: Curvas de tensión frente a deformación plástica	103
Imagen 6.12: Chapa deformada resultado de la simulación	106



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El mundo industrial lleva años haciendo gran uso de las piezas de chapa embutida, estas piezas otorgan numerosas ventajas. Principalmente resultan piezas con gran productividad por la automatización, cada vez mayor, de los procesos de producción. Por otra parte mediante chapa embutida se pueden realizar piezas con una gran resistencia para una aplicación concreta, con un peso bastante reducido, debido a su construcción a partir de chapas delgadas; como ejemplo en la industria del automóvil es muy común la realización de partes por este procedimiento, ya que en este campo la reducción del coste de producción y del peso del vehículo son dos objetivos que se plantean en el proceso de diseño.

Desde principios de los años noventa se ha ido extendiendo lentamente en la industria del conformado plástico de metales la simulación mediante elementos finitos. Mediante las simulaciones se consiguen numerosas ventajas que contribuyen a la obtención de una mejor rentabilidad del proceso industrial, lo que tiene gran importancia en una industria con una amplia competencia y escasa diferenciación de producto.

Las ventajas que se obtienen en el uso de estas simulaciones difieren según la empresa en la que se apliquen. En una empresa que se dedique a la fabricación sin implicarse en el diseño se obtendrán ventajas gracias a que puede utilizarse como herramienta para acortar el tiempo de preparación del utillaje y los parámetros para el comienzo de una serie de piezas, y optimizar el coste de material. Se pueden valorar los parámetros de la prensa, el recorte de chapa necesario con una gran precisión, así como la recuperación que sufrirá el material para realizar cambios en el proceso y ajustarse a las tolerancias requeridas por el cliente.

En una empresa dedicada al diseño de las piezas, la simulación del proceso de embutición otorga ventajas importantes en la etapa de diseño de la pieza permitiendo la aplicación de la ingeniería concurrente valorando su fabricabilidad con gran precisión antes de su paso a la producción, donde los cambios en la geometría de la pieza ya son muy complicados. También es posible realizar fácilmente cambios en el material de las piezas para valorar un cambio de material utilizado que puede ofrecer ventajas en algún aspecto del producto o de la producción como puede ser la disponibilidad, el coste, su facilidad de embutición, o el peso.

En un proceso de embutición se producen grandes deformaciones en el material a alta velocidad, luego es importante la elección de un modelo de material adecuado en una simulación del proceso por elementos finitos. Los modelos utilizados son modelos complejos que admiten grandes deformaciones en el material y altas velocidades de deformación.

La simulación de los procesos de embutición tiene un alto potencial en la industria, como se ha explicado, pero para su realización es necesaria la aplicación de herramientas informáticas, como Ansys Ls-Dyna, correctamente. Para ello es necesario conocer los parámetros que definen los distintos modelos de material y las ventajas y desventajas que ofrecen cada uno de estos modelos.

En este proyecto de fin de carrera se realizará la simulación de un proceso de embutición, con distintos modelos de material, sobre los que se realizaran cambios para obtener la mayor información posible de su comportamiento.

El modelo de pieza sobre el que se va a trabajar es el soporte de la rueda de repuesto de un vehículo de la marca Mercedes, modelo Vito. En concreto se trabaja sobre la primera etapa de embutición de las cinco necesarias en la fabricación de la pieza. Se dispone de la medición de la geometría de la pieza tras la primera etapa.

1.2 Estructura del proyecto

Este proyecto está estructurado en nueve capítulos en los que se clasifican los temas tratados como se relata a continuación.

En este primer capítulo se realiza una breve introducción al tema del proyecto y se explica el motivo de su realización. Además se realiza un esquema del texto completo.

El capítulo segundo está ocupado por los objetivos que persigue la realización de este proyecto, así como los conocimientos necesarios para realizarlo.

A continuación, en el capítulo tercero se habla del proceso industrial que se pretende simular, el conformado por deformación, con especial hincapié en la embutición, por ser éste el proceso concreto que se simula. Este capítulo ayuda a la comprensión de las variables del proceso de embutición de chapa.

Como cuarto capítulo se sitúa un apartado dedicado a la simulación mediante elementos finitos, al programa utilizado, Ansys Ls-Dyna, y a los modelos de material utilizados. Primero se realiza una introducción sobre el método de cálculo de elementos finitos. A continuación se explican algunos aspectos del programa utilizado y se expone una reseña sobre otro software que puede utilizarse para el mismo fin. Después se realiza una explicación de los modelos de material que se han utilizado en las distintas simulaciones, incluyendo sus características y los parámetros que los definen.

En el quinto capítulo se presenta el problema que se pretende simular y se realiza una explicación del proceso seguido para realizar las distintas simulaciones del proceso de embutición y la simulación de un ensayo de tracción, para obtener algunos parámetros necesarios.

El sexto capítulo contiene los resultados obtenidos con las simulaciones, clasificados según el modelo de material utilizado, al aplicar los parámetros iniciales y posteriormente observar la variación del resultado en función de la variación de éstos.

Seguidamente se encuentra el séptimo capítulo, en el que se exponen las conclusiones obtenidas de los resultados obtenidos.

En octavo lugar se sitúa el capítulo en el que se exponen líneas de trabajo a partir de los resultados obtenidos en este proyecto y de los temas tratados en él.

Por último se encuentra la bibliografía, en la que se citan todos los textos que han ayudado a la realización de este proyecto.



2. OBJETIVOS

En este proyecto de fin de carrera se persigue el objetivo de realizar y estudiar la simulación de un proceso de conformado plástico mediante la herramienta computacional Ansys Ls-Dyna, en concreto de un proceso de embutición, tomando como principal característica de la pieza embutida su profundidad y utilizando distintos modelos de material. La consecución de este objetivo principal conlleva etapas intermedias o pequeños objetivos que es necesario completar durante la realización de este proyecto:

- Aprender y tomar destreza en el manejo del programa Ansys Ls-Dyna, con el que se realizan las simulaciones.
- Tener un conocimiento de los procesos de conformado plástico de metales, principalmente de acero.
- Comprender las geometrías y movimientos de los elementos involucrados en el proceso (matriz, punzón, sujetachapa y chapa).
- Ajuste de los parámetros de la simulación del modelo cinemático plástico al comportamiento de la embutición real.
- Obtener curvas de tensión-deformación del material a distintas velocidades de deformación a partir del modelo cinemático plástico ajustado, para aplicarlas a los demás modelos de material utilizados.
- Realizar simulaciones con los distintos modelos de material, partiendo de los datos obtenidos del modelo ajustado y realizando ligeras variaciones en los distintos parámetros.
- Observar el efecto sobre la profundidad de la pieza de las variaciones en los distintos parámetros de los modelos de material.



3. CONFORMADO POR DEFORMACIÓN

La información utilizada en la redacción de este capítulo ha sido extraída en su mayoría de [26], [31], [32] y [44]. Se ha obtenido información sobre el comportamiento del acero con la velocidad de deformación de [7], [9], [12], [14], [22], [30] y [39]; además de las fuentes principales ya nombradas. En menor medida se han obtenido algunos detalles o aclaraciones de [4], [15] y [16].

3.1 Deformación plástica

3.1.1 Procesos de conformado por deformación

El conformado por deformación se produce por la modificación permanente de la forma de un sólido aplicando, mediante herramientas y útiles adecuados, tensiones superiores al límite elástico del material, a temperaturas inferiores a las de fusión.

Los procesos de conformado por deformación se pueden dividir en dos grupos:

- Procesos de deformación volumétrica. Los procesos de deformación volumétrica se caracterizan por deformaciones significativas y cambios de forma, la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término volumétrico describe a las partes de trabajo que tienen esta baja relación de área volumen. La forma del trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares. En este grupo se incluyen: la extrusión, la forja y el laminado.

- Procesos de deformación de chapa. Los procesos de trabajo con láminas metálicas son operaciones de formado o preformado de láminas de metal, tiras y rollos. La relación entre el área superficial y el volumen del material inicial es alta; por lo que esta relación es un medio útil para diferenciar la deformación volumétrica de los procesos con láminas metálicas. En este grupo se incluyen: el plegado, la embutición y el corte.

El conformado por deformación plástica presenta ventajas como la rapidez de deformación, permitir grandes deformaciones, se ahorra material respecto a procesos como el mecanizado y en algunas ocasiones se pueden mejorar las propiedades del material en cierto sentido, como puede ser con la forja. También presenta ciertas limitaciones, como la forma que se pueden obtener, limitada por los procesos y materiales, limitación en cuanto a acabado debido al proceso y la limitación de la potencia necesaria, no por la potencia en sí sino por el coste que conlleva la maquinaria necesaria para realizar un conformado de alta potencia.

3.1.2 Curva de tensión-deformación

La curva de tensión frente a deformación del material proporciona numerosos datos sobre el comportamiento del material con el que se va a trabajar respecto a la deformación. Se obtiene a partir de un ensayo de esfuerzo uniaxial, normalmente de tracción. Se representa el valor de tensión, σ , que corresponde a la fuerza aplicada dividida por la sección transversal de la probeta y la deformación, ϵ . Estas curvas se pueden presentar en dos formatos, en función de la interpretación de la tensión y de la deformación:

- Curva de tensión deformación ingenieril. La tensión se valora con el área transversal inicial de la probeta. La deformación se calcula como la diferencia entre la longitud inicial y la final dividido entre la longitud inicial.

- Curva de tensión-deformación real. La tensión se define utilizando el área transversal de la probeta en cada punto, pues ésta disminuye conforme se estira la probeta. La deformación se

define como la integral del diferencial de deformación dividido entre la longitud inicial, lo que resulta en el logaritmo neperiano de la longitud en cada punto entre la longitud inicial.

Para el análisis de las distintas zonas de deformación es más útil la curva ingenieril. En la Imagen 3.1 se puede ver una curva tensión-deformación ingenieril, en la que se indican algunos puntos y zonas de interés.

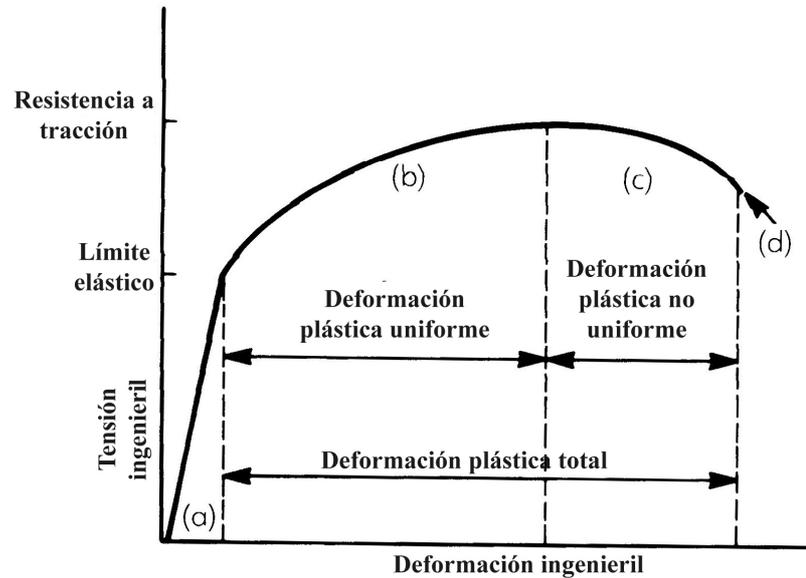


Imagen 3.1: Zonas de deformación de la curva tensión-deformación ingenieril [44].

En esta curva se pueden ver las tres regiones de trabajo del material, que se describen a continuación:

- Zona de deformación elástica. En este rango de deformaciones la relación entre la tensión y la deformación es lineal, la pendiente es el módulo elástico E , y las deformaciones son de carácter elástico. Tras deformar el material en esta zona y cesar la carga, la deformación vuelve a cero, sin quedar ninguna deformación permanente.

- Zona de deformación plástica uniforme. Con tensiones por encima de un determinado punto, denominado límite elástico, se rompe la proporcionalidad entre tensión y deformación y se entra en la zona de deformación plástica del metal. En la zona plástica se produce una deformación que permanece tras la recuperación de la parte elástica de la deformación. En la zona uniforme la deformación es igual a lo largo de la probeta. Durante la deformación de esta zona se produce la evolución de dos variables en sentido contrario; por una parte el material se endurece por deformación y se necesita mayor tensión para continuar deformando la probeta, por otro lado el área transversal va disminuyendo por la conservación de volumen, por lo que la tensión necesaria decrece, a este efecto se le denomina ablandamiento geométrico. Cuando el endurecimiento por deformación y el ablandamiento geométrico se equilibran, se llega al punto de resistencia a tracción del material, esto es la máxima tensión que soporta la probeta y punto donde acaba la zona de deformación uniforme.

- Zona de deformación plástica no uniforme. Tras el punto de resistencia a tracción, para continuar deformando la probeta no se aumenta la tensión, sino que se reduce, esto es debido a que alguna sección es ligeramente más débil que las otras y la tensión necesaria para su deformación

es menor, así se forma lo que se denomina estricción difusa. Al continuar aun más el alargamiento la estricción se hace visible en una zona muy localizada, estricción localizada, la deformación se concentra solamente en esta parte de la probeta hasta llegar al valor del límite de rotura y la separación en dos de la probeta.

La curva tensión-deformación real, contiene como información útil los valores reales de tensión que soporta el material durante su deformación. Además se obtiene un parámetro que puede ser de gran utilidad como el módulo tangente, este valor se toma para el valor de la pendiente de la tangente al punto del límite elástico en la curva real, como se ve en la Imagen 3.2. Es de importancia por la descripción que realiza de la zona plástica de deformación simplificada similar a la que realiza el módulo de Young en la zona elástica, y es aplicada ampliamente a modelos de simulación.

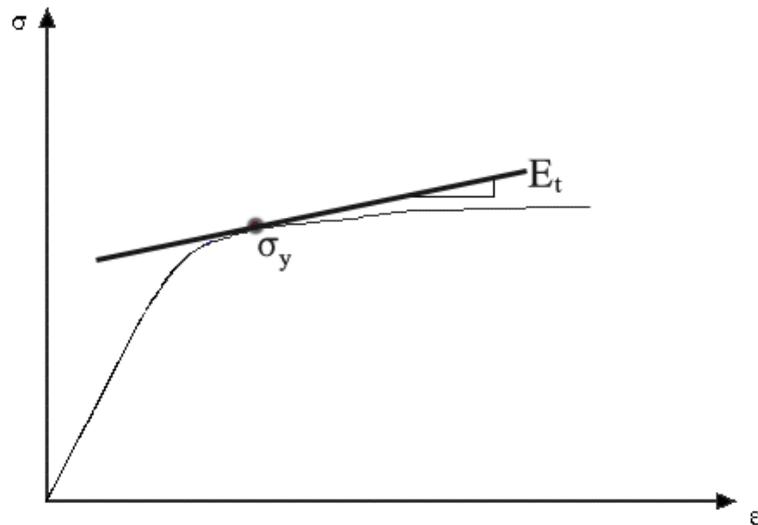


Imagen 3.2: Curva tensión-deformación real y módulo tangente.

3.1.3 Parámetros de influencia del material en el conformado

Los materiales que se utilizan para elaborar piezas a partir del conformado por deformación, normalmente metales, tienen un conjunto de propiedades que varían de unos a otros y son importantes para la realización del trabajo de conformado.

La valoración en conjunto de la idoneidad de un material para el conformado plástico se denomina conformabilidad, que valora la aptitud del material para estirarse y adaptarse a formas complejas en el conformado. A su vez hay que tener en cuenta el proceso en el que se vaya a utilizar el material, pues no todos tienen los mismos requerimientos de propiedades del material. Por esta razón hay que valorar todos los distintos aspectos del comportamiento del material.

A continuación se presentan los distintos parámetros y características del material que definen su capacidad y comportamiento en el proceso de conformado.

- Límite elástico. Como se ha visto en el apartado anterior, este valor de tensión es el que marca el inicio de la zona de deformación plástica. Normalmente no aparece tan claro como en la Imagen 3.2, por lo que se calcula trazando una paralela a la recta elástica por la deformación del 0,2 % y el punto donde corta esta línea se considera el valor del límite elástico. Es importante para conocer las fuerzas necesarias en el conformado y las deformaciones tras la recuperación. El valor de este parámetro varía enormemente entre distintos materiales, incluso dentro de los aceros hay una gran variabilidad debida a los aleantes. Los valores típicos en conformado de acero están entre 140 MPa y 350 MPa.

- Deformación en el límite elástico. Este valor indica la mínima deformación posible en conformado plástico. Este parámetro también es fundamental para analizar el fenómeno de recuperación tras la deformación.
- Resistencia a tracción. Este valor determina, en la curva ingenieril, la tensión máxima que puede soportar el material antes de producirse deformaciones no uniformes. Hay que tenerlo en cuenta para saber en que zona de deformación plástica se encuentra el proceso. A pesar de que las deformaciones no son uniformes tras este punto, en conformado por deformación se supera a menudo para producir deformaciones mayores.
- Límite de rotura. Es la tensión máxima que puede aguantar el material antes de romperse. Este parámetro es fundamental para regular el proceso de conformado de forma que las tensiones no superen este valor que provoca la inutilización del producto.
- Alargamiento total. Es la deformación plástica total hasta el límite de rotura. Relacionado con el concepto anterior se toma como característica importante el alargamiento total del metal de trabajo, teniendo en cuenta ambas zonas de deformación plástica, lo que nos permite saber realmente hasta que punto se puede trabajar el material sin sufrir rotura.
- Límite de cizalladura. Es el valor máximo de tensión cortante que soporta el material antes de la rotura. Este parámetro es importante en dos sentidos, por una parte para los procesos de punzonado y corte se persigue conseguir ese valor en una línea concreta por la que se quiere realizar el corte, por otra parte en los procesos que no persiguen el corte se debe evitar llegar a este esfuerzo cortante para no producir rotura del producto.
- Endurecimiento por deformación. Al deformarse el metal, se endurece en la dirección de deformación, por la orientación de los cristales del material. Este endurecimiento puede expresarse para tensión uniaxial según la siguiente expresión,

$$\sigma = K\varepsilon^n \qquad \text{Expresión 3.1}$$

Donde K, es el coeficiente de resistencia que indica el valor real de la tensión para una deformación unitaria, y n es el factor de endurecimiento por deformación. El valor de n, varía entre 0 y 1, y es importante en el trabajo de deformación plástica, pues da una idea de la ductilidad del material, siendo 0 en el caso de comportamiento perfectamente plástico y 1 para comportamiento totalmente elástico. Para aceros bajos en carbono el valor de n está en torno a 0,22, siendo mayor para los aceros recocidos (en torno a 0,26) y menor en los aceros trabajados en frío (por debajo de 0,20). A continuación, en la Tabla 3.1, se pueden ver los valores de K y n para algunos metales.

Material	K [MPa]	n
Aluminio 1100-O	180	0,20
Bronce fosforoso (recocido)	720	0,46
Cobre (recocido)	315	0,54
Acero 1020 (recocido)	530	0,26
Acero 1045 (laminado en caliente)	965	0,14
Acero inoxidable AISI 304 (recocido)	1275	0,45

Tabla 3.1: Valores de K y n para algunos materiales [31].

- Endurecimiento con la velocidad de deformación. En los procesos de conformado plástico se suele trabajar a gran velocidad, luego las deformaciones que sufre el metal también se producen a velocidades bastante mayores a las de los ensayos habituales de caracterización del material. La mayoría de los materiales presentan un endurecimiento al aumentar la velocidad de

deformación, no es así en todos los casos, pero sí en el acero que es el metal más utilizado. La relación entre la tensión y la velocidad de deformación puede expresarse mediante una relación análoga a la que se utiliza para el endurecimiento por deformación.

$$\sigma = C\dot{\epsilon}^m \quad \text{Expresión 3.2}$$

Donde C es el coeficiente de resistencia que indica la tensión para velocidad de deformación unitaria y m es el factor de sensibilidad a la velocidad de deformación. La sensibilidad de un material a la velocidad de deformación normalmente crece con la temperatura. A continuación, en la Tabla 3.2, se pueden ver los valores de C y m para algunos metales a distintas temperaturas.

Material	T [°C]	C [MPa]	m
Aluminio	200-500	82-14	0,07-0,23
Bronce	200-800	415-14	0,02-0,3
Cobre	300-900	240-20	0,06-0,17
Acero bajo C	900-1200	165-48	0,08-0,22
Acero medio C	900-1200	160-48	0,07-0,24
Acero inoxidable	600-1200	415-35	0,02-0,4

Tabla 3.2: Valores de C y m para algunos materiales [31].

- Relación de deformación plástica. Este parámetro se refiere al material de conformado en forma de chapa. Cuando se deforma una chapa por encima del límite elástico, se contrae en dos dimensiones, el ancho y el espesor. La relación entre estas dos deformaciones reales es la relación de deformación plástica, r.

$$r = \frac{\bar{\epsilon}_w}{\bar{\epsilon}_t} \quad \text{Expresión 3.3}$$

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad \text{Expresión 3.4}$$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad \text{Expresión 3.5}$$

Este parámetro se mide para distintos ángulos con respecto a la dirección de laminación, para obtener información acerca de la anisotropía plástica de la chapa; este efecto es producido por la forma de fabricación de la chapa, en rodillos de laminación, que provocan una orientación de los granos del metal en la dirección de laminación. El valor utilizado normalmente es un valor medio obtenido de la medición a 0°, 90° y 45° (siendo la dirección de laminación 0°), como se ve en la Expresión 3.4. Este parámetro está normalmente relacionado con la embutibilidad, cuanto mayor es r_m mayor es la profundidad que se puede conseguir en la embutición sin problemas, en general para embuticiones profundas se necesitan valores de r_m superiores a 1,8. Relacionado con este parámetro también se utiliza la variación de la relación de deformación, Δr , que indica la anisotropía en el plano de la chapa y provoca el ondulado.

- Influencia de la temperatura. La temperatura influye de forma importante en el comportamiento del material, como se ha visto determina en gran medida el comportamiento del material frente a la velocidad de deformación. En general se puede decir que disminuyen el límite elástico, el módulo elástico, el valor del factor n y la tensión de rotura; y aumenta la ductilidad y tenacidad del material. En resumen, generalmente, al aumentar la temperatura del metal con el que se está trabajando se consigue un conformado con menos posibles defectos y menor potencia en la maquinaria, presentando el inconveniente de trabajar con metales a menudo a temperaturas muy altas que requieren medidas especiales para su manejo, tanto en el utillaje como para los operarios.

Hay que tener cuidado porque estas propiedades se dan en general pero no siempre, en algunas aleaciones se pueden encontrar los efectos contrarios a los descritos al aumentar la temperatura. En las aleaciones hay que estudiar los ciclos de cambio de temperatura, ya que estos pueden afectar a la microestructura del metal, afectando de forma muy importante a sus propiedades. Cabe destacar que sólo se habla del calentamiento de la pieza porque no tiene ningún sentido su enfriamiento, ya que esto no trae propiedades beneficiosas al conformado plástico, porque fragiliza el metal.

3.1.4 Lubricación

La fricción y la lubricación tienen gran importancia en la mayoría de los trabajos de conformado plástico. Una lubricación efectiva da como resultado sistemas con un bajo nivel de fricción que reduce las cargas impuestas a las herramientas y al metal a trabajar. Esto puede eliminar problemas con el utillaje, fallos en la pieza o permitir una reducción en el número de pasos necesarios para un determinado proceso. Las fuerzas menores implican una menor deformación en el utillaje y permiten mejorar la precisión dimensional del producto.

La lubricación es una variable de gran importancia en procesos de conformado de chapa, ya que controla la fricción entre el molde y la chapa. Los lubricantes se utilizan para reducir la transferencia de material entre los elementos, regular el acabado de la superficie y controlar la fuerza que empuja la chapa para darle forma. La fricción puede influir en la distribución de deformaciones de la pieza, debilitando alguna zona de la pieza.

Una de las funciones principales de la lubricación es permitir el flujo de metal de forma controlada. Los requisitos de flujo de metal en cada aplicación varían enormemente y deben ser estudiados caso por caso con sus condiciones específicas. Un mismo lubricante puede dar resultados distintos en cada juego de utillaje. Actualmente los lubricantes se tienen en cuenta junto a los sujetachapas y los cordones de embutido (que se explicarán en el apartado de embutido), para dar una solución conjunta que prevenga la aparición de arrugas y grietas.

La rugosidad de la superficie de la chapa y las propiedades del material interactúan con la viscosidad del lubricante de forma compleja cambiando la fricción. Efectos similares a los del lubricado se pueden conseguir variando la rugosidad superficial de la chapa. Las superficies con una rugosidad alta dificultarán el flujo del material a través del utillaje, y forzando deformaciones altas en la zona central del punzón. Por otro lado una superficie demasiado lisa permite poco control del metal y puede fluir demasiado rápido al molde, provocando defectos en el producto. Cada problema relacionado con la rugosidad superficial debe ser estudiado por separado.

La lubricación en el conformado plástico presenta cuatro regímenes de lubricación que se describen a continuación y se pueden observar en la Imagen3.3:

- Lubricación de película gruesa. En este modo el espesor de la película de lubricante es grande comparado con el tamaño de las moléculas del lubricante y la rugosidad superficial de ambas superficies.
- Lubricación de película fina. El espesor de la película es del mismo orden de magnitud que las rugosidades de ambas superficies, pero mucho mayor que el tamaño de las moléculas del lubricante.
- Lubricación mixta. En este régimen el espesor es muy pequeño y en algunos puntos se produce contacto entre los metales, en la superficie de éstos se crea una película de material que ha reaccionado con el lubricante. Así la carga es soportada en parte por el contacto directo y en parte por la fina película de lubricante que queda.

- Lubricación límite. En este tipo de lubricación toda la carga es soportada por el contacto sólido-sólido, en concreto por la película formada sobre ambas superficies de productos de reacción, fruto de la reacción con los aditivos del lubricante.

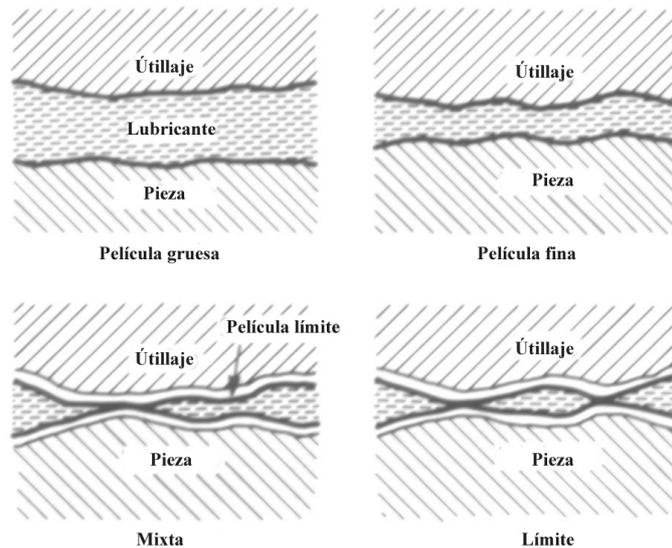


Imagen 3.3: Regímenes de lubricación en el conformado plástico [44].

No todos los procesos de conformado requieren de lubricación, por ejemplo en el plegado es raro el uso de lubricación, mientras en el caso de la embutición profunda se usa siempre algún tipo de lubricante.

3.1.5 Tipos de acero para conformado de chapa

En el mercado existen numerosos tipos de acero en forma de chapa que pueden ser utilizados para el conformado plástico.

- Aceros bajos en carbono. Muy usado en la industria del automóvil, tienen un límite elástico entre 172 y 241 MPa. Se pueden conformar fácilmente y permiten la soldadura con técnicas de producción en serie. Tienen una combinación de resistencia, rigidez, y fabricabilidad que permite que incluso piezas de bajo coste cumplan con las especificaciones. Se presenta en chapas de desde 0,36 mm de espesor para chapas trabajadas en frío y de desde 12,7 mm para chapa trabajada en caliente.

- Aceros de alta resistencia. Aunque los aceros bajos en carbono dan buenos resultados, algunas piezas necesitan en su diseño mayor resistencia. Presentan un límite elástico entre 241 y 552 MPa. Ofrecen las mismas ventajas en cuanto a aplicación para la producción que los aceros bajos en carbono. Para operaciones de estirado se pierde un 20-60% de conformabilidad respecto a los aceros bajos en carbono, y para embutición y doblado sólo se pierde un 10-30%, además al aumentar el límite elástico se pierde conformabilidad en general. La presentación de la chapa depende del límite elástico, al aumentar éste aumenta el espesor mínimo que se ofrece.

- Aceros de alta resistencia y baja aleación (microaleados). Este tipo de acero cuenta con un porcentaje bajo en carbono y pequeños porcentajes de Vanadio, Niobio y Titanio. Los niveles bajos de carbono favorecen la conformabilidad del acero y la soldabilidad de éste. Con este tipo de acero se puede conseguir un límite elástico cerca de 1000 MPa, la desventaja respecto a los aceros

sin aleantes adicionales con resistencia similar es que la deformación que permiten es menor, sin embargo presentan ventajas como la mejor soldabilidad. Es importante tener en cuenta que, debido al alto límite elástico de estos aceros, la recuperación es muy significativa y debe ser tomada en cuenta en el diseño del utillaje.

- Aceros de muy alta resistencia. Estos aceros deben usarse cuando la resistencia de la pieza acabada sea fundamental en el diseño. También presentan buena soldabilidad y el rango de valores del límite elástico va desde los 586 a 965 MPa. También se pueden conseguir aceros martensíticos con bajo porcentaje de carbono, con límites elásticos a partir de 1379 MPa, para aplicaciones muy concretas, pues este tipo de acero resulta frágil y difícil de trabajar.

Es importante destacar que no sólo se utiliza el acero para el conformado plástico, sino que se utilizan numerosos metales, que según las aplicaciones pueden ser más convenientes por su coste, conformabilidad o características de la pieza acabada. Después de los distintos aceros, el metal más utilizado en conformado plástico es el Aluminio y sus aleaciones, principalmente por presentar un buen comportamiento mecánico con una densidad poco más de un tercio de la densidad del acero.

3.2 Embutición

3.2.1 Introducción

La embutición consiste en el conformado de una chapa plana transformándola en un cuerpo hueco, normalmente no desarrollable de mayor o menor profundidad.

En un proceso de embutición intervienen, normalmente cuatro componentes: la matriz, el sujetachapas, el punzón y la chapa, comúnmente con forma de disco. La matriz y el punzón dan la forma deseada a la chapa que se está trabajando, mientras el sujetachapas ejerce presión sobre la parte de chapa no embutida para regular el flujo de material arrastrado por el punzón y en ocasiones ayudar a la expulsión de la chapa embutida. La situación de los componentes mencionados se presenta en la Imagen 3.4.

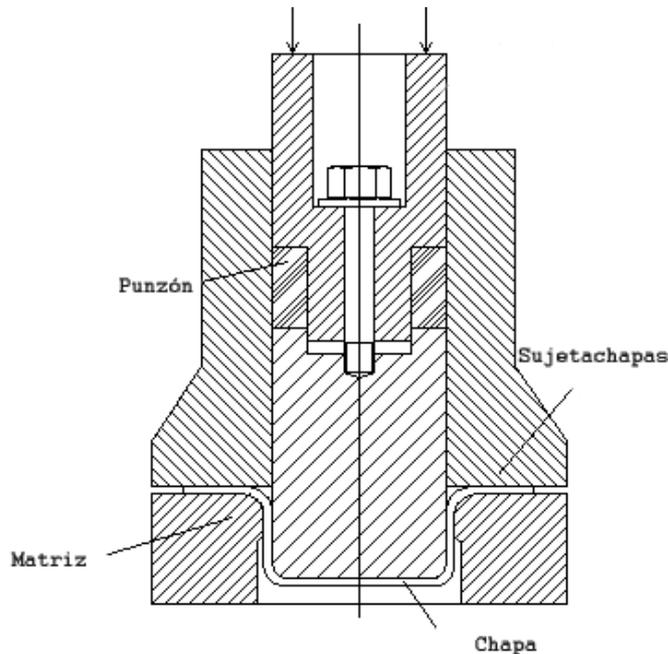


Imagen 3.4: Configuración de los elementos para embutido [44].

En el sujetachapas se utilizan en ocasiones unos resaltes, llamados cordones de embutido, que corresponden con huecos iguales de la matriz y sirven para regular el flujo de chapa, realizando una curva en ella como se ve en la imagen 3.5.

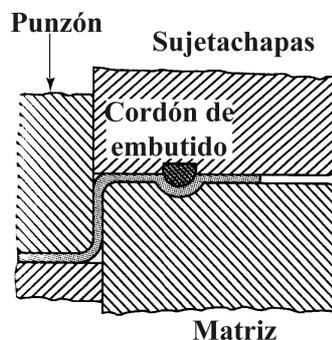


Imagen 3.5: Detalle del corte de un utilaje con cordones de embutido [26].

El metal utilizado en la embutición debe tener una combinación de resistencia y ductilidad, que por una parte le permitan aguantar los grandes esfuerzos a los que se ve sometido y por otra fluir a través del molde tomando la forma deseada. En la embutición se desarrollan a menudo grandes velocidades de deformación para elevar la productividad del proceso. Es muy importante tener en cuenta la velocidad pues el material se rigidizará y agrietará si se utilizan velocidades muy altas. A continuación, en la Tabla 3.3, se pueden ver valores típicos de velocidad de la prensa para distintos materiales.

Material	Velocidad de la prensa [m/min]
Aluminio	46 - 54
Bronce	53 - 61
Cobre	38 - 46
Acero	5,5 - 15
Acero inoxidable	9 - 12
Zinc	38 - 46

Tabla 3.3: Velocidades de la prensa para embutir distintos materiales [44].

En un proceso de embutición se aplican distintas fuerzas, que provocan tensiones en la chapa que originan su deformación. En la Imagen 3.6 se pueden ver las fuerzas aplicadas por las distintas partes de utillaje y las tensiones radiales y circunferenciales (se presenta el caso típico de un disco).

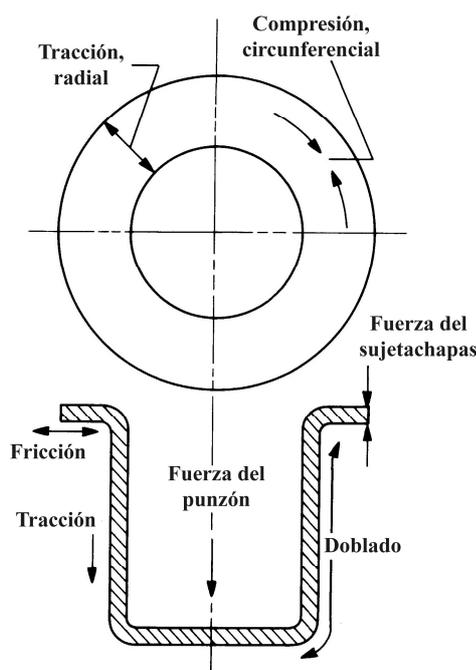


Imagen 3.6: Fuerzas aplicadas y tensiones provocadas en la chapa [44].

3.2.2 Tipos

Existen varios tipos de embutido de chapa, diferenciados por los útiles empleados en cada uno de ellos y con diferencias en el proceso que hacen preferente su uso según la aplicación.

- Embutido profundo. Esta forma de conformado es la que se presenta en la Imagen 3.4, es la forma más convencional, en ella el espesor de la chapa es aproximadamente igual antes y después del proceso. Aunque se añada el adjetivo profundo, designa a procesos con poca

profundidad de embutición. En este método se utiliza sujetachapas y útiles mecanizados, normalmente en acero, para dar forma a la chapa.

- Embutido sin sujetachapas. Este método de embutido resulta más costosa y sencilla que el embutido profundo, pero presenta limitaciones por el riesgo que implica la no utilización de un sujetachapas que impida la formación de arrugas. Para piezas embutidas cilíndricas la condición que se suele tomar viene dada por la siguiente expresión donde h es la altura del cilindro, s el espesor de la chapa y d el diámetro del cilindro.

$$h \leq 0,3\sqrt[3]{d^2} \sqrt{s}$$

Expresión 3.6

- Embutido con estirado de pared o planchado. En esta forma de embutido no se cumple la hipótesis de espesor de chapa constante durante el proceso. Este proceso interesa cuando se crean piezas que necesiten un espesor mayor en el fondo que en los laterales. Se suele realizar haciendo pasar las paredes por un intersticio menor que su espesor. Implica fuerzas mayores que el embutido profundo, ya que la deformación creada es mayor.

- Formado con hule. En este método sustituye la matriz rígida con la forma de la pieza por una pieza con gran flexibilidad y con forma plana, denominada hule, y construida normalmente de poliuretano. El hule presenta debajo una cavidad para permitir su descenso cuando baja el punzón, que contiene la forma de la pieza. Se puede ver en la Imagen 3.7 un ejemplo de este método.

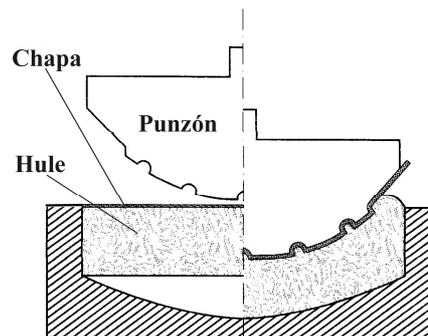


Imagen 3.7: Formado con hule [26].

Una variedad de esta forma de conformado es el hidroformado, en el que el hule se sustituye por una cavidad cubierta con una lamina de poliuretano llena de fluido a una determinada presión.

3.2.3 Tecnología de embutición

En el proceso de embutido es básico el uso del escalonamiento, pues así se consigue llegar a profundidades de embutición mayores y formas mucho más complejas. En general se considera la regla de que la embutición puede presentar problemas cuando la profundidad es mayor que el radio de la forma a embutir. La relación de embutición ($\beta_0 = D/d$), que relaciona el diámetro del disco (D) con el diámetro del punzón (d), presenta un límite en función de la resistencia del material, el espesor de la chapa, la presión del sujetachapas y la fricción (presencia de lubricante y materiales). El límite de embutición se puede calcular para relaciones d/s (siendo s el espesor de la chapa) entre 25 y 600 mediante las siguientes expresiones.

Para materiales fácilmente embutibles:

$$\beta_{0\max} = 2,15 - 0,001 \frac{d}{s}$$

Expresión 3.7

Para materiales normalmente embutibles:

$$\beta_{0\max} = 2 - 0,0011 \frac{d}{s} \quad \text{Expresión 3.8}$$

Los materiales fácilmente embutibles se denominan así porque están orientados a la utilización en estos procesos, mientras los normalmente embutibles son los materiales ordinarios.

Con estos límites definidos, si se da el caso de superarlos para conseguir la forma deseada, será necesario realizar estirados sucesivos, en los que se recomienda que la relación de embutición este en valores entre 1,2 y 1,33.

Antes de comenzar la embutición, se debe realizar el recorte de la forma de chapa que se va a embutir y que depende de la forma que se vaya a obtener. Para calcular la forma necesaria se asume la hipótesis de que el espesor de la chapa no cambia y a partir de ahí se traza la forma del material necesario. El recorte de chapa necesario resulta muy complejo de calcular en caso de que la pieza no tenga una forma sencilla, a menudo el recorte necesario se calcula en la industria realizando una aproximación y refinando la forma mediante ensayos. Para piezas de revolución el cálculo es más sencillo, ya que la forma del recorte se sabe que es un disco y sólo hay que hallar el área del cuerpo embutido y buscar el radio del círculo equivalente. En el caso de recipientes cilíndricos el cálculo resulta muy sencillo si se usa la siguiente fórmula aproximada: $D = 1,1 (h + d)$; siendo h la altura del recipiente y d el diámetro de éste. Para algunas piezas de revolución se dan las expresiones del diámetro equivalente del disco a medida en tablas, como en la Tabla 3.4.

	$\sqrt{d^2 + 4dh}$		$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4d_1h}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$		$1.414 \sqrt{d_1^2 + f(d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(d_1 h_1 + d_2 h_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2s(d_1 + d_2)}$
	$1.414d$		$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$

Tabla 3.4: Diámetros del corte a medida para distintas formas [44].

La fuerza de embutido puede calcularse para los embutidos de una única etapa mediante la siguiente expresión.

$$F_{\max} = \pi ds \frac{K_{fm}}{\eta_f} \ln \beta^* \quad \text{Expresión 3.9}$$

Donde K_{fm} es la resistencia media a la deformación al máximo de fuerza, β^* la relación de embutición al máximo de fuerza y η_f rendimiento de embutición, dependiente del rozamiento y β . Esta expresión resulta difícil de aplicar pues los tres parámetros mencionados dependen del material y la relación de embutición; así se simplifica la expresión en función de la resistencia a tracción, σ_B y el cociente $n = \sigma / \sigma_B$, donde σ es la tensión de deformación representada por los tres factores que se pretenden evitar. El factor n se puede obtener de gráficas en función del material y la relación de embutición, y se puede obtener también de forma aproximada a partir de la Expresión 3.11

$$F_{\max} = n \pi ds \sigma_B \quad \text{Expresión 3.10}$$

$$n = 1,2 \frac{\beta_0 - 1}{\beta_{0\max} - 1} \quad \text{Expresión 3.11}$$

Para obtener el trabajo de la prensa se multiplica la fuerza máxima por el recorrido, aplicando un factor corrector entre 0,5 y 0,8, en función de la chapa utilizada.

En el embutido hay que tener en cuenta consideraciones sobre el utillaje que influyen en el proceso. El radio de redondeo de las aristas debe tener valores no excesivamente pequeños, por que se producen esfuerzos de estiramiento excesivos, y no demasiado grandes porque no se podría sujetar la chapa al final del embutido. Como orientación se utiliza para la matriz un radio de redondeo entre 5 y 10 veces el espesor de la chapa; para el punzón se recomienda un redondeo entre 0,1 y 0,3 veces el diámetro del punzón.

La anchura del intersticio entre el punzón y la matriz se debe ser un poco más pequeña que el espesor para evitar arrugamientos. Se toma como orientación la siguiente expresión.

$$w = s \sqrt{\frac{D}{d}} \quad \text{Expresión 3.12}$$

3.2.4 Defectos en el embutido

En el proceso de embutido pueden aparecer numerosos defectos que hay que corregir para obtener la calidad requerida.

- Agujeros o grietas. Pueden aparecer en cualquier punto de la pieza y suelen estar ocasionados por poros o elementos extraños, se pueden evitar mejorando la limpieza del entorno.
- Espesor irregular de chapa. Este defecto indica un desgaste en el utillaje de embutición, luego la solución esta en su sustitución.
- Desgarre del fondo de la pieza. La solución esta en aumentar el radio de redondeo en las aristas de punzón y matriz, pues éste es el origen del problema.
- Rotura del fondo. Originado por una relación de embutición muy grande que se soluciona reduciendo la relación de embutición y realizando otra posterior embutición. Otra forma de corregir el problema sería cambiar la chapa utilizada, bien en el material o en el espesor.

- Bordes ondulados. En algunas ocasiones al embutir la pieza se obtienen unos bordes ondulados, llamados orejas, con la forma que aparece en la Imagen 3.8. Esta ondulación esta ocasionada por la anisotropía plana de la chapa originada por su proceso de fabricación típico, el laminado, que hace que las características de la chapa no sean iguales en todas las direcciones, por tanto depende del valor Δr de la chapa, si éste es cero no aparecerá este defecto.

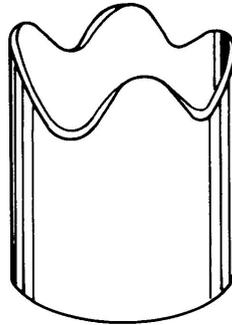


Imagen 3.8: Ondulado tras la embutición [44].

- Forma abombada. Si se pretende que la pieza tenga paredes rectas y resultan abombadas, significa que el intersticio es demasiado ancho y se debe cambiar la matriz o el punzón para reducir este intersticio.

- Formación de pliegues y arrugas. Se pueden producir en el ala o en las paredes. En ambos casos puede producirse por una fuerza insuficiente del sujetachapas, en cuyo caso se debe aumentar la fuerza del éste, teniendo en cuenta que aumentará la fricción. Si se produce en las paredes, el origen puede ser una anchura de intersticio demasiado grande y habrá que reducirla sustituyendo alguno de los elementos del utillaje.

3.3 Plegado

3.3.1 Introducción

El plegado es un proceso de conformado de chapa que tiene como fin crear dobleces en la chapa de manera que se forme un cierto ángulo, o crear una cierta forma al doblarla, como puede ser un reborde, una U, realizar un ondulado, etc.

Para la realización de los pliegues pueden usarse dos métodos ligeramente distintos en cuanto a la forma de deformar la chapa y la maquinaria utilizada.

- Plegado. Se utiliza una matriz rectilínea con la forma de plegado deseada, normalmente en forma de V, y un punzón con una arista redondeada con un determinado radio.
- Doblado. Con este método la chapa se sujeta con un pisador y un punzón obliga a doblarse a la chapa hasta el ángulo deseado.

Dentro del doblado también se puede incluir el doblado de tubos y barras. El caso de los tubos requiere un cuidado especial por el cambio de espesor producido durante el doblado.

3.3.2 Tipos

El plegado se puede realizar principalmente como plegado en falso o plegado con golpe. Un tercer modo que se presenta es el plegado de chapas gruesas.

- Plegado en falso. El punzón realiza el plegado sin penetrar en la chapa. Se puede realizar a fondo, el punzón para cuando la chapa toca el fondo de la matriz y la precisión angular obtenida es de $\pm 30'$. Otra forma es el plegado con parada o al aire, el punzón para al llegar a una profundidad con la que se obtendrá el ángulo deseado, sin que la chapa llegue al fondo de la matriz y una precisión angular de $\pm 1^\circ$. Se pueden observar ambos modos en la Imagen 3.9.

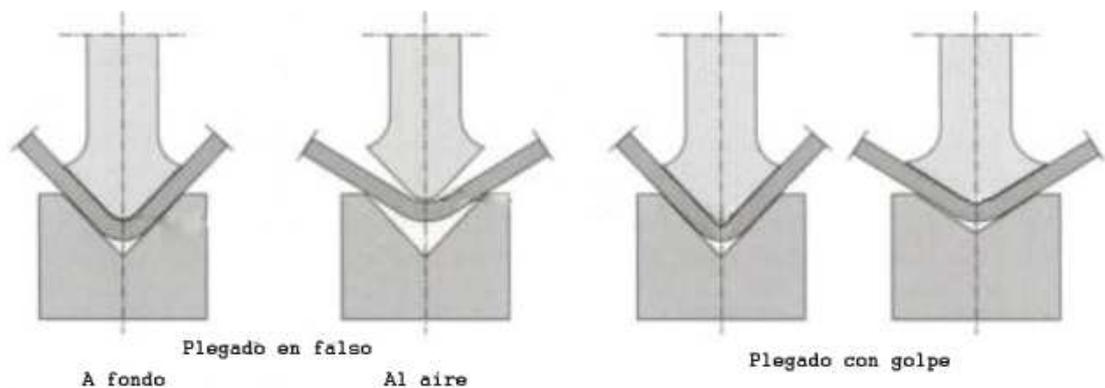


Imagen 3.9: Plegado en falso y plegado con golpe [32].

- Plegado con golpe. La chapa sufre una disminución del espesor de forma local en el pliegue, disminuye la recuperación y se consigue una precisión angular de $\pm 15'$. Se utiliza normalmente en espesores menores de 2 mm, porque la fuerza necesaria es muy elevada, llegando a ser 4 o 5 veces mayor que en el plegado en falso. En la Imagen 3.9 se puede ver un ejemplo de plegado con golpe.

- Plegado de chapa gruesa. Cuando se necesita plegar chapas con un espesor mayor de 10 mm, se necesita el uso de matrices de distinto tipo. Con este tipo de plegado se utilizan

punzones con radios de punta más grandes para no penetrar la chapa debido a las grandes fuerzas implicadas. La matriz también se modifica, presentando un fondo con un radio de curvatura mayor y en algunos casos rodillos en los bordes para facilitar el flujo de material.

3.3.3 Tecnología de plegado

Como primer paso del plegado es necesario trazar la cantidad de material necesario. Para ello se puede estudiar la longitud de plegado considerando que la fibra neutra está en el centro de la chapa, aplicando posteriormente un factor de corrección. De un estudio sencillo del arco formado en el plegado, como el de la Imagen 3.10, se obtiene la siguiente expresión de la longitud de doblado.

$$l_b = \alpha \left(r_i + \frac{s}{2} e \right)$$

Expresión 3.13

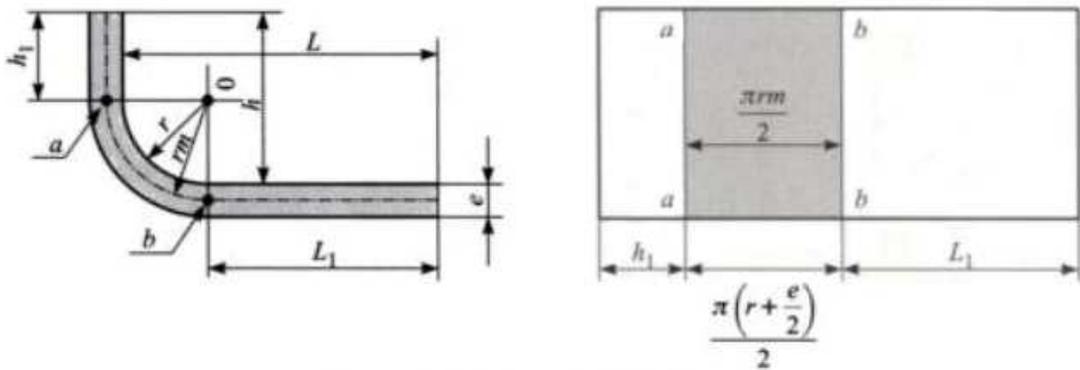


Imagen 3.10: Estudio de la cantidad de chapa necesaria en el plegado [32].

Donde α es el ángulo de doblado en radianes, r_i el radio interior de la chapa, s el espesor y e el factor de corrección anteriormente mencionado, que se presenta en la siguiente tabla.

r_i/s	5	3	2	1,2	0,8	0,5
e	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

Tabla 3.5: Valor del factor e en función de la relación entre radio interior y espesor.

El radio interior de plegado debe ser siempre el mayor posible sin que interfiera con las especificaciones de la pieza para evitar la concentración de tensiones. Por esta razón existe un radio mínimo que se calcula de forma aproximada mediante la Expresión 3.14. En la Imagen 3.11 se puede ver la situación del plegado.

$$r_{i \min} = s \left(0,0085 \frac{\sigma_B}{\delta} + 0,5 \right)$$

Expresión 3.14

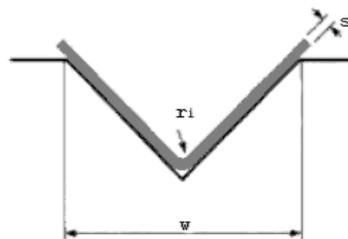


Imagen 3.11: Magnitudes básicas del plegado.

Donde s es el espesor en mm, σ_B la resistencia a tracción en kg/mm^2 y δ el alargamiento a la rotura. Se debe cumplir que el radio del punzón sea menor que el radio interior mínimo. El ancho de la

abertura (w) se define en función del radio interior mínimo, siendo entre 5 y 8 veces éste, aunque en la práctica se utilice la siguiente relación en función del espesor.

$$s \leq 3 \rightarrow w = 6 \text{ a } 8 \text{ veces } s$$

$$s > 3 \rightarrow w = 8 \text{ a } 12 \text{ veces } s$$

Por otra parte hay un radio máximo, que se define para la línea media y que garantiza la deformación permanente de la chapa, en función del módulo de elasticidad, E , el límite de fluencia σ_F y el espesor.

$$\rho_{\max} = \frac{Es}{2\sigma_F} \quad \text{Expresión 3.15}$$

En el plegado que no estampa la arista, en falso, tras la retirada del punzón se produce la recuperación del material y el ángulo de plegado se abre y se obtiene un ángulo y radio distinto al deseado. Se puede calcular el radio de plegado necesario para obtener el radio requerido ρ^* .

$$\frac{\rho}{\rho^*} = 1 - \frac{2\rho \sigma_b}{s E} \quad \text{Expresión 3.16}$$

Siendo ρ el radio necesario de plegado y σ_b la tensión de doblado, que puede obtenerse en función del material a partir de la resistencia a la deformación. La relación ρ/ρ^* se presenta en gráficas en función del material y los parámetros del plegado.

Al realizar un proceso de plegado se debe realizar la comprobación de que los útiles son capaces de soportar la fuerza máxima que se genera durante el proceso y que la máquina puede generar esta fuerza. Para calcular el valor máximo de la fuerza en el proceso se usa la siguiente expresión.

$$F_{\max} = k \frac{\sigma_B L S^2}{v} \quad \text{Expresión 3.17}$$

Con L la longitud del pliegue, v la abertura de la matriz y k un factor con valor 1,2-1,3 para plegado con macho y 0,7-0,8 para doblado. Para obtener este valor también es posible el uso de tablas con valores orientativos.

Si se conoce el valor de la fuerza a lo largo de la carrera de plegado se puede integrar el valor del trabajo realizado, pero esos datos no suelen ser conocidos y se usa la siguiente expresión simplificada para hallar el trabajo de plegado, A ,

$$A = \chi F_{\max} h \quad \text{Expresión 3.18}$$

Donde h es la carrera de plegado y χ es un coeficiente corrector para reflejar la no linealidad del trabajo a lo largo de la carrera.

3.4 Punzonado y cizallado

3.4.1 Introducción

Estos dos procesos se caracterizan por sobrepasar la deformación plástica del material hasta producir su rotura por cizallamiento en una zona. El material de entrada al proceso está siempre en forma de chapa. Los principios para ambos procesos son exactamente los mismos.

La configuración de los elementos que intervienen en el proceso es similar a la de un proceso de embutido, con la diferencia de que el intersticio entre punzón y matriz es muy pequeño para producir el corte de la chapa. A menudo se utilizan también sujetachapas.

En la Imagen 3.12 se presenta el esquema de un proceso de punzonado.

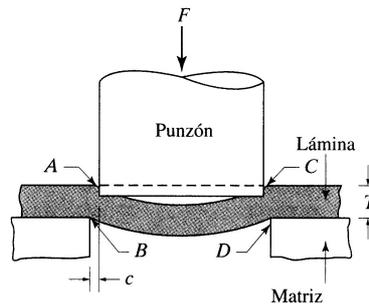


Imagen 3.12: Esquema del cizallamiento en un proceso de punzonado [26].

El corte de la chapa comienza con las grietas en los bordes superior e inferior de la pieza (puntos A, B, C y D de la Imagen 3.12). Las grietas finalmente se encuentran entre sí y dan lugar a la separación del material.

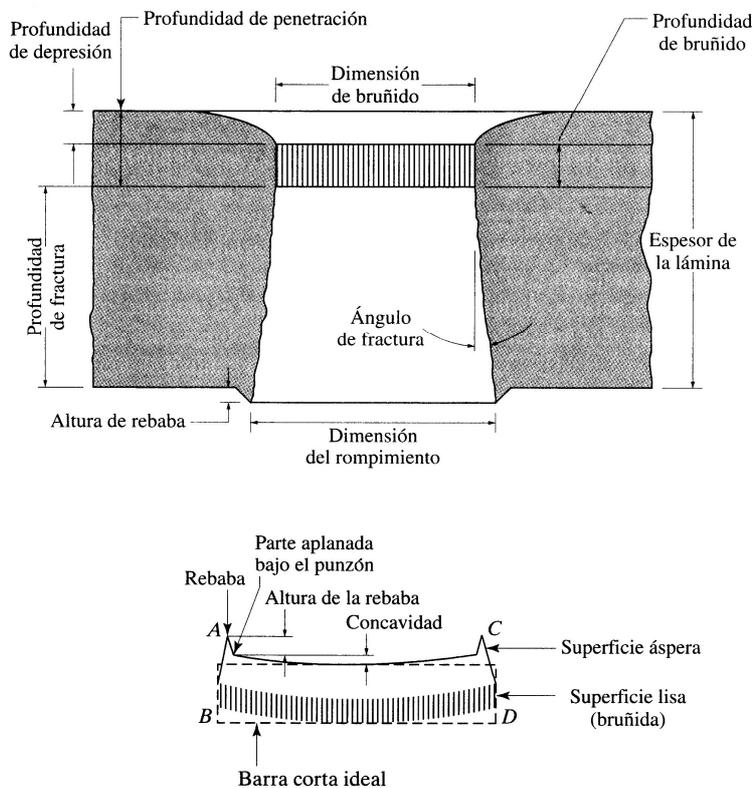


Imagen 3.13: Características del orificio y el recorte punzonados [26].

En la Imagen 3.13 se pueden ver las distintas zonas que quedan en la zona de corte tras el punzonado. Se observan principalmente dos zonas, las superficies de fractura y las superficies bruñidas; las primeras quedan con un acabado tosco y se deben al avance de las grietas antes mencionadas y las segundas tienen un acabado liso y brillante debido al rozamiento con el punzón. La holgura, c , es un aspecto decisivo para el acabado del punzonado, valores de holgura altos dan bordes más burdos y pueden necesitar operaciones posteriores de acabado que encarecen el proceso.

La rebaba o filo aparece en la zona inferior de la lámina y en la parte superior de la pieza cortada. Es importante tener en cuenta este efecto ya que puede afectar a procesos posteriores en los que se utilice la pieza obtenida.

3.4.2 Tipos

Los tipos de corte por cizallamiento son dos:

- Cizallado. En este proceso se utiliza el efecto de cizalladura para realizar cortes en chapas en forma de línea recta, con un sistema formado por dos hojas, una fija y otra móvil. Existen dos tipos de cizallado, diferenciados por la longitud de las cuchillas: de cuchillas cortas, longitud inferior a 300 mm, y cuchillas largas, con una longitud de cuchillas que puede llegar a los 5 metros.

- Punzonado. Con el punzonado se hace uso del cizallamiento para recortar formas en la chapa, bien para crear huecos en ésta o para obtener la forma recortada como pieza o material de trabajo para otro proceso. Como tipos de punzonado se puede citar el perforado, destinado a hacer orificios en una lámina o el lanceteado que combina la realización de un corte con el doblado de una parte de la chapa, como se ve en la Imagen 3.14.

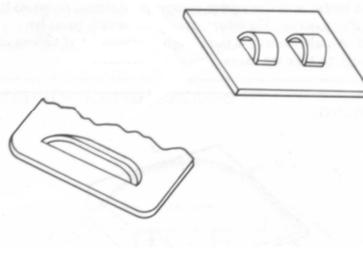


Imagen 3.14: Ejemplo de lanceteado [44].

3.4.3 Tecnología de punzonado y cizallado

Como paso esencial en el diseño de un proceso de punzonado o cizallado es necesario calcular la fuerza necesaria para producir el corte de la chapa. Como hay que provocar una tensión cortante de un valor al menos el de la resistencia a cizallamiento, σ_d , en el área del borde de corte, se multiplican estos dos parámetros para conseguir la fuerza total. El área será el producto del perímetro o longitud de corte, P , por el espesor de la chapa, e .

$$F = \sigma_d A = \sigma_d P e \quad \text{Expresión 3.19}$$

La resistencia al cizallamiento se puede aproximar con el valor de la mitad de la resistencia a tracción de la chapa.

Dada una geometría de corte se puede calcular el máximo espesor de chapa que se puede cortar, limitado por la resistencia del punzón, teniendo en cuenta que la fuerza de corte no produzca en la superficie del punzón una tensión que provoque su fallo. Como ejemplo de este cálculo se muestra el que se realiza en el caso de una geometría circular, definida por su diámetro d .

Por la resistencia ofrecida por la chapa se tiene:

$$F \geq \pi d e \sigma_d \quad \text{Expresión 3.19}$$

Por la resistencia del punzón, aplicando una resistencia, σ_{punz} , que ofrezca seguridad:

$$F \leq \frac{\pi d^2}{4} \sigma_{\text{pun}} \quad \text{Expresión 3.20}$$

El diámetro máximo del punzón será:

$$e \leq \frac{d \sigma_{\text{pun}}}{4 \sigma_d} \quad \text{Expresión 3.21}$$

Con valores típicos de tensión se obtiene un espesor límite de $d/1,6$.

El valor del trabajo de punzonado se obtiene de multiplicar la fuerza de punzonado por el espesor de la chapa y aplicar un factor de irregularidad del trabajo realizado que varía entre 0,5 y 0,8.

Para conseguir punzonados de varias piezas en un sólo ciclo de la prensa, cuando estos exceden los límites de fuerza se utiliza el punzonado escalonado, en este modo se colocan los punzones con distinta longitud de forma que trabajan uno detrás de otro y no a la vez. También se utiliza comúnmente la forma de los punzones o la matriz para hacer más progresivo el corte, como se ve en la Imagen 3.15.



Imagen 3.15: Ángulos de corte en punzones [26].

La velocidad del punzón influye decisivamente en el acabado de las piezas punzonadas, presentándose mejores acabados, con menos rebabas, a velocidades de trabajo altas. Estas velocidades pueden llegar a los 10 o 12 m/s.

El corte de chapas de gran grosor implica grandes fuerzas, por lo que es más probable que se produzca alguna desviación en el punzón al realizar el corte; para evitarlo se utilizan punzonados previos de tamaño mucho menor que a través de un tetón en el punzón principal guían a éste para evitar errores.

Es muy útil en la realización de muchas piezas por punzonado utilizar el punzonado con matrices compuestas, en este tipo de matrices se realizan distintos cortes en la chapa en un mismo ciclo de la prensa para varias fases de fabricación de la pieza.

3.5 Conformado por rodillos

3.5.1 Introducción

Con una orientación a la formación de chapas y perfiles continuos de gran longitud, el proceso de laminación es utilizado ampliamente para la fabricación de formatos metálicos utilizados posteriormente para la realización de montajes, como pueden ser los perfiles para construcción, y trabajos de conformado plástico de acabado, como es el caso de las chapas utilizadas para distintos procesos de conformado de chapa.

El proceso de conformado por rodillos consiste en la realización de pasadas sucesivas, en uno o dos sentidos, de una pieza de partida de metal, lingote o chapa, a través de distintos rodillos que progresivamente le dan forma hasta conseguir el espesor de chapa o perfil requerido.

Es un proceso a gran escala que permite la producción de piezas aun ritmo de unos 30-55 m/min de media. Presenta la ventaja de no necesitar traslado de material durante el proceso, solo cargar al inicio la chapa o lingote y retirar la pieza acabada al final del proceso. Los rodillos de laminación con un uso adecuado pueden llegar a tener una vida muy larga, en torno a los 900000 metros de producto.

3.5.2 Tipos

Se pueden clasificar los procesos de conformado por rodillos según tres criterios distintos, la temperatura, la situación del corte de la pieza en el proceso y el producto obtenido.

Existen dos tipos de proceso de conformado por rodillos en cuanto al corte de la pieza, método precortado y postcortado.

- Método precortado. La pieza a obtener se corta antes de comenzar la formación de la sección en el tren de laminación. Se utiliza principalmente para la realización de poco volumen de producción y con perfiles que no permiten un corte fácil por su geometría, por ejemplo porque queden alas largas que pueden deformarse al producirse el corte.

- Método postcortado. El material entra de forma continua en los rodillos de laminación y se corta tras formarse la pieza acabada. Es un método más eficiente, más productivo, más consistente y con menos problemas que el anterior. Permite realizar tareas complementarias como el recortado, doblado, marcado, etc. antes de realizar el acabado y corte de la pieza.

En cuanto a la temperatura de laminación se distinguen los procesos en caliente y en frío.

- Laminación en caliente. La laminación en caliente se realiza con el metal a temperaturas entre los 800 y 1250 °C. Permite realizar mejor perfiles con grandes deformaciones, y formas más complejas. Puede requerir varias fases de desbastado, afinado y acabado. El acabado es tosco y las tolerancias de fabricación son amplias. Los rodillos de laminación no están refrigerados.

- Laminación en frío. Este tipo de laminación se realiza a temperatura ambiente. Es apropiado para la realización de formas simples. El acabado superficial es bueno y las tolerancias son muy ajustadas, menores a 0,1 mm. Se utilizan, en la fase final, cilindros refrigerados con agua.

Los productos obtenidos se pueden dividir en chapas y perfiles.

- Chapas. Son las formas más simples obtenidas en trenes de laminación. Se utilizan como material de entrada para otros procesos de conformado, como la embutición. Las chapas de

acero tienen una clasificación que las divide según su aplicación posterior; por ejemplo a construcción corresponde T y a automoción Z. También se clasifican según el grado de embutición en frío; E para embutición ordinaria y ES para embutición especial. Estos códigos se unen formando la denominación completa; por ejemplo chapa de automoción para embutición ordinaria ZE. Se presentan en numerosos formatos normalizados.

- Perfiles. Son las formas, mas o menos complejas, que se obtienen en trenes de laminación distintas a las chapas con una sección bidimensional. Un ejemplo muy claro de este tipo son los perfiles de acero normalizados para construcción. La laminación de estos perfiles puede hacerse a partir de llantones (bloques de metal) o a partir de chapas; en el primer caso el trabajo suele realizarse en caliente y se consiguen piezas más robustas, mientras con la utilización de chapas se realiza normalmente en frío y las piezas no suelen tener un uso estructural.

3.5.3 Tecnología del conformado por rodillos

El proceso de conformado por rodillos consiste en que el material tratado pase a través de unos rodillos que giran en sentido opuesto entre sí y presentan una separación inferior o forma distinta de la que tiene el formato de entrada. Así, mediante la aplicación de una presión por parte de los rodillos y su giro, se obliga a pasar al material por el hueco que hay entre ellos, forzándole a tomar la forma de éste como se ve en la Imagen 3.16.

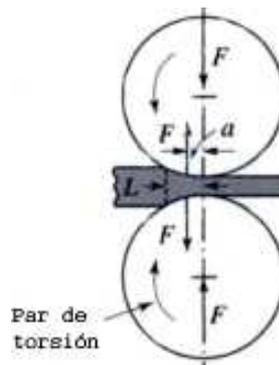


Imagen 3.16: Esquema de laminación plana [31].

Los parámetros a tener en cuenta son la velocidad de entrada del material, velocidad de salida, la fuerza aplicada por los rodillos y el momento torsor de éstos para impulsar el material.

Las velocidades de entrada y salida del material a los rodillos son importantes, pues significa que se tiene fricción en prácticamente toda la superficie de los rodillos y ésta es la que determinará el par resistente que se debe vencer con los rodillos. Por otra parte la energía disipada por fricción aumenta la temperatura del material, y en el trabajo en frío, se intenta evitar mediante el uso de refrigerantes o lubricantes que reduzcan la fricción. Este aspecto toma gran importancia cuando se trata de un proceso de laminación de chapa fina, pues en estos procesos la reducción del espesor del material inicial es muy grande y supone una velocidad al final del proceso de más de 100 km/h.

La disposición de los rodillos debe estar acorde con el material que se va a tratar y la deformación que se va a realizar, teniendo en cuenta el grado de deformación que se produce y las posibilidades de fuerza aplicada en cada paso. Para la fabricación de chapa sólo se debe tener en cuenta la disminución del espesor realizada, pero en la elaboración de perfiles se debe dar la forma progresivamente, como se ve en las Imágenes 3.17 y 3.18, para no romper o debilitar el material, y minimizar el desgaste de los rodillos. En el caso de conformado de un perfil a partir de chapa se realiza lo que se llama diseño de la flor, que aparece en la Imagen 3.18 y consiste en el desarrollo de las distintas etapas de deformación para conseguir la forma final.

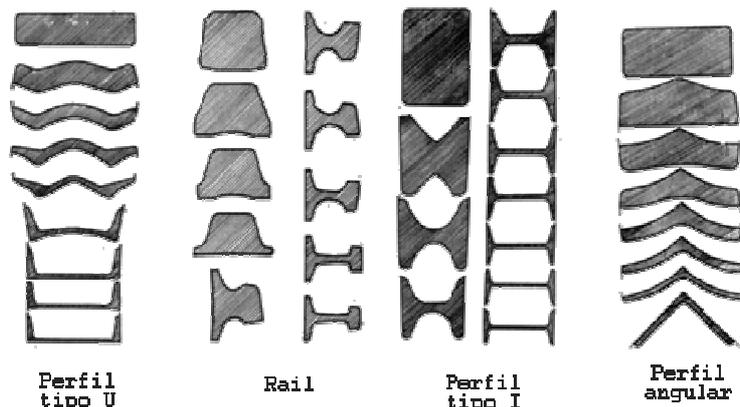


Imagen 3.17: Pasadas necesarias para crear distintos perfiles [26].



Imagen 3.18: Diseño de la flor para crear un tubo a partir de chapa [44].

Como ejemplo de cálculo de los límites y la fuerza necesaria de los rodillos se presenta el caso de laminado plano, que corresponde al laminado de chapas y es el caso más sencillo. La situación se puede ver en la Imagen 3.16.

La fuerza de fricción se opondrá al movimiento del metal a través de los rodillos. Esta fricción es necesaria para la deformación del metal pero supone gasto de energía y puede dañar la superficie del producto. La relación de espesores a la entrada y a la salida máxima debe cumplir la siguiente relación,

$$h_0 - h_f = \mu^2 R \quad \text{Expresión 3.22}$$

Donde h_0 y h_f son los espesores a la entrada y a la salida del rodillo, μ es el coeficiente de rozamiento y R el radio de los rodillos. Según indica esta ecuación a mayor radio y mayor coeficiente de rozamiento se puede conseguir una mayor diferencia de espesores.

Para el cálculo de la fuerza se hace la suposición realizada en la Imagen 3.17, en la que la fuerza del rodillo F es perpendicular al plano de la chapa, esta hipótesis es válida, ya que el arco de contacto suele ser muy pequeño comparado con el radio del rodillo. Siendo F la fuerza ejercida por el rodillo, L la longitud de contacto entre el rodillo y la tira, ω el ancho de la tira y el esfuerzo promedio en la tira en el espacio de laminación Y_{medio} .

$$F = L\omega Y_{\text{medio}} \quad \text{Expresión 3.23}$$

La potencia necesaria por rodillo se puede calcular suponiendo que F actúa a la mitad del arco de contacto; $a=L/2$. Así siendo el par por rodillo el producto F por a , la potencia se obtiene,

$$P = \frac{2\pi FLN}{60000} \quad \text{Expresión 3.24}$$

Con F en Newton, L en metros y N , la velocidad angular del rodillo, en rpm.

3.6 Forja

3.6.1 Introducción

En el forjado se conforma la pieza a través de fuerzas sucesivas de compresión aplicadas con diversas matrices y herramientas, normalmente con el metal a alta temperatura para permitir su conformación sin producirse la rotura y con valores de fuerza razonables.

Se pueden realizar operaciones sencillas de forjado a mano, con maceta y yunque, como hacen los herreros tradicionales, pero los procesos de fabricación habituales utilizan prensas de gran potencia. Normalmente se producen piezas discretas mediante forjado, aunque en ocasiones se utiliza para la elaboración de piezas de gran longitud, como en el caso de reducción de espesor por golpeo de una barra metálica continua.

Presenta la ventaja respecto a procesos de mecanizado o fundición, de que las fibras del material (orientación de los granos que provocan direcciones con mayor resistencia) se orientan siguiendo la forma de la pieza y otorgándole resistencia adicional en algunas direcciones que pueden dirigirse a través del proceso de forja.

La disposición de los elementos en la forja es básicamente la situación de las dos partes de la matriz (o dados) enfrentadas y con el material de trabajo en el centro. A continuación en la Imagen 3.19 se muestra la configuración típica.

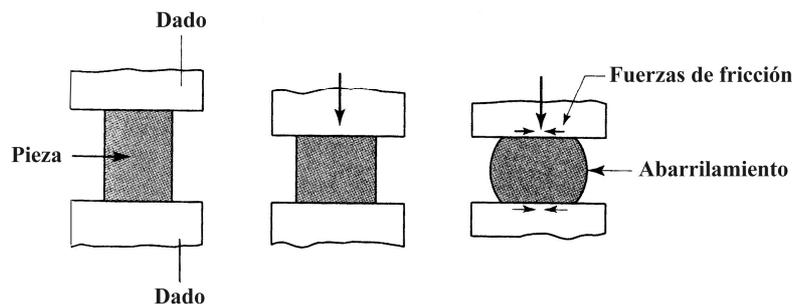


Imagen 3.19: Configuración típica del forjado abierto [26].

3.6.2 Tipos

Existen principalmente dos tipos de procesos de forja en función de los dados utilizados.

- Forja abierta. Es el proceso más sencillo de forjado, en él se utilizan dados planos o con alguna forma sencilla que golpean a la pieza situada entre ellos. En la Imagen 3.19 aparece un ejemplo de forja abierta. Tiene utilidad en caso de realizar series pequeñas de piezas, para aproximar la geometría que posteriormente se va a terminar en forja cerrada o para el forjado de piezas de gran tamaño que resultan muy difíciles de trabajar en matrices cerradas.

- Forja cerrada o estampación. Se utilizan matrices que al cerrarse contienen la forma en negativo de la pieza a fabricar. Mediante sucesivos golpes al metal se consigue aproximar la forma hasta conseguir exactamente la geometría deseada, quedando normalmente una rebaba en la zona donde se unen los dos moldes. Da buenos resultados para trabajar con piezas de geometría compleja ya que se fuerza al material a adaptarse a la forma de la matriz mediante golpes sucesivos, consiguiéndose una buena precisión. También este proceso es apto para el desarrollo de un proceso en serie. En la Imagen 3.20 se puede ver un ejemplo de forja cerrada.

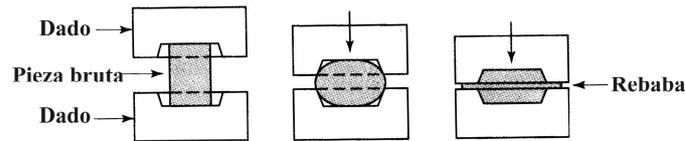


Imagen 3.20: Forja cerrada [26].

3.6.3 Tecnología de forjado

Un aspecto muy importante en el forjado es la temperatura del metal al trabajarlo. Se suele considerar, para el acero, una zona segura de forjado la de temperatura 200 °C por debajo de la temperatura de fusión. En aceros aleados suele tomarse un margen mayor de entre 50 y 70 °C más. Es muy importante que la temperatura de la pieza sea uniforme para evitar fallos en el producto.

En el forjado cerrado, forjar la geometría partiendo de una forma de metal básica, como puede ser un prisma, puede resultar difícil, por lo que se aproxima la forma de la pieza mediante pasos intermedios, bien en forja abierta o en otros moldes de forja cerrada. En la Imagen 3.21 se puede ver la evolución de la fabricación de la cabeza de un tornillo.

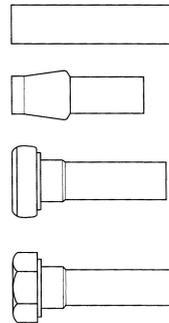


Imagen 3.21: Fases de la forja de la cabeza de un tornillo [44].

La fuerza de forjado se puede calcular, de distinta forma para ambos tipos de forja.

- Fuerza de forjado en forja abierta. Se toma el caso de una pieza cilíndrica.

$$F = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\mu r}{3h} \right) \quad \text{Expresión 3.25}$$

Siendo Y_f es el esfuerzo de fluencia del material, μ es el coeficiente de fricción y r y h son el radio y la altura de la pieza trabajada.

- Fuerza de forjado en forja cerrada. Se puede calcular de forma genérica mediante:

$$F = k Y_f A \quad \text{Expresión 3.26}$$

Donde A es el área proyectada de la pieza incluyendo la rebaba y k es un factor multiplicativo que depende de la geometría de la pieza, en la Tabla 3.6 se pueden ver los valores de este factor.

Situación	k
Formas sencillas, sin rebaba	3-5
Formas sencillas, con rebaba	5-8
Formas complejas, con rebaba	8-12

Tabla 3.6: Valores de k para distintos casos [26].

3.7 Extrusión

3.7.1 Introducción

En el proceso de extrusión, una preforma de metal (puede ser una palanquilla o barra) es forzada a pasar por una matriz, que posee la forma aproximada del perfil que se desea obtener. Se puede producir prácticamente cualquier perfil sólido o hueco. Al no cambiar la geometría de la matriz en todo el proceso la sección de la pieza es constante en toda la longitud. En la Imagen 3.22 se muestra el proceso de extrusión directa y las partes que lo componen.

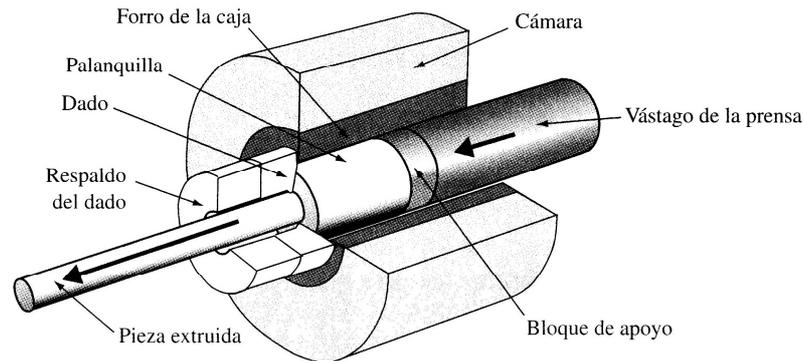


Imagen 3.22: Esquema del proceso de extrusión directa [26].

Con este proceso se consiguen buenos acabados superficiales y tolerancias dimensionales, además de una buena resistencia mecánica, por producirse orientación de las fibras del metal.

En frío se consiguen calidades superficiales elevadas pero se requiere elevada potencia. La pieza resultante resulta con un endurecimiento elevado en la dirección de extrusión, aproximando en gran medida el valor del límite elástico al valor de tensión de rotura.

El estirado puede considerarse un tipo de extrusión, en el que en lugar de empujar el metal a través de la boquilla, se tira de él. Este proceso se suele utilizar para reducir el calibre de alambres.

3.7.2 Tipos

Existen cinco tipos principales de extrusión que se presentan a continuación.

- Extrusión directa. En este caso el metal se introduce en la cámara y se empuja directamente a través de un émbolo que fuerza al metal a tomar la forma de la boquilla. Es la forma de extrusión mostrada en la Imagen 3.22.

- Extrusión indirecta. La configuración es similar a la de la extrusión directa con la diferencia de que el movimiento no lo realiza el émbolo sino la cámara que contiene el metal y la boquilla. Así en este modo el metal se mueve en dirección contraria a la cámara.

- Extrusión hidrostática. Este tipo es prácticamente idéntico al proceso de extrusión directa, con la diferencia de que el material de trabajo es más pequeño que la cámara y el émbolo no tiene contacto directo con el metal, sino que el hueco que queda en la cámara se llena de fluido que transmite una presión uniforme a la pieza, como aparece en la Imagen 3.23. La ventaja que se obtiene con este método, al aplicarse una presión hidrostática al material, es que se aumenta la ductilidad y permite mayor relación de extrusión. Los problemas que plantean son derivados de añadir fluido al proceso, pues hay que manipularlo y contenerlo en la cámara a altas presiones.

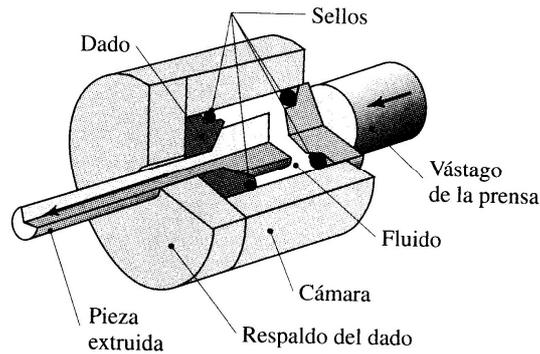


Imagen 3.23: Esquema del proceso de extrusión hidrostática [26].

- Extrusión lateral. La situación de los elementos es igual que en la extrusión directa pero la dirección de avance del émbolo está perpendicular a la dirección de salida del material por la boquilla, como se ve en la Imagen 3.24.

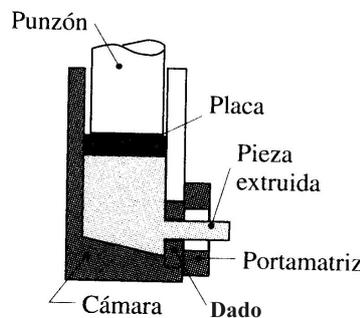


Imagen 3.24: Esquema del proceso de extrusión lateral [26].

- Extrusión por golpe. En este tipo de extrusión la presión es aplicada sobre el material en un solo golpe. Sirve para producir piezas discontinuas. Un caso particular es la extrusión por golpe inversa, en la que se impacta un disco de metal para obtener un tubo, cuyas paredes ascienden por el elemento golpeador. En la Imagen 3.25 se muestra un ejemplo de este último método.

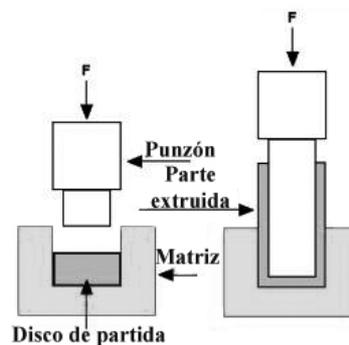


Imagen 3.25: Esquema del proceso de extrusión por golpe [4].

3.7.3 Tecnología de extrusión

Hay tres variables geométricas de gran importancia en el proceso de extrusión. El ángulo de matriz, que es el ángulo respecto a la horizontal de la pared de transición entre la cámara y la boquilla. La relación de extrusión, que es la relación entre el área de la sección de partida, A_0 , y el

área de la sección final que sale de la boquilla, A_f . Por último se tiene en cuenta el factor de forma que divide el perímetro de la forma obtenida entre el área transversal de ésta.

Para el cálculo de la fuerza de extrusión se utiliza el parámetro k , constante de extrusión, que depende del material empleado y de la temperatura. Se encuentra en gráficas como la Imagen 3.26.

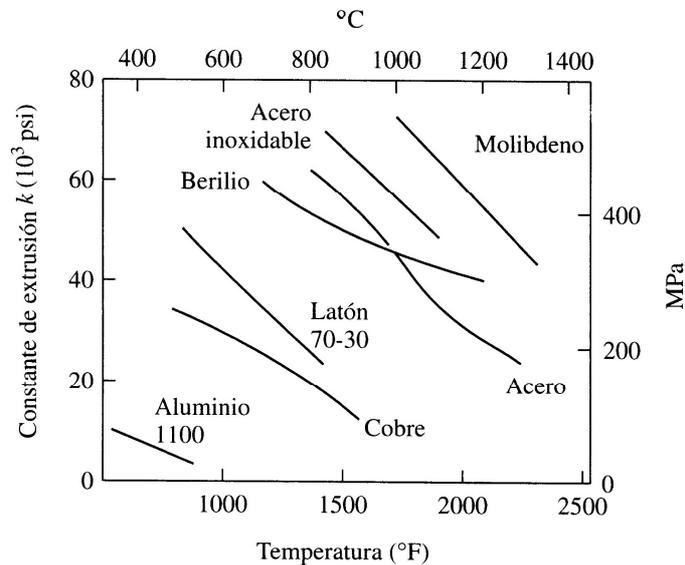


Imagen 3.26: Constante de extrusión k , para distintos metales y temperaturas [26].

Para calcular la fuerza de extrusión intervienen únicamente las áreas transversales de la palanquilla, A_0 , y de la pieza obtenida, A_f , y la constante de extrusión, k .

$$F = A_0 \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad \text{Expresión 3.27}$$

Por tanto el trabajo de extrusión se obtendrá de multiplicar esta fuerza por el recorrido realizado por el punzón.

La extrusión se suele realizar en presencia de lubricantes que deben, además de lubricar el contacto metal-matriz, deben aislar a la matriz de las altas temperaturas del material de trabajo. Para temperaturas inferiores a los 1000°C se utilizan: lubricantes grasos, grafito, molibdeno, mica, talco, bentonita, asfaltos y plásticos. En el caso de temperaturas de trabajo por encima de los 1000°C se utiliza vidrio en casquillos o en forma de lana, basalto y polvo de cristal.

En cuanto a la temperatura de la extrusión en caliente, el valor depende del material y del proceso concreto, a continuación se pueden ver valores típicos para distintos materiales en la Tabla 3.7.

Material	Temperatura de extrusión [$^{\circ}\text{C}$]
Aleaciones de plomo	90-260
Aleaciones de magnesio	340-430
Aleaciones de aluminio	340-510
Aleaciones de cobre	650-1100
Aleaciones de titanio	870-1040
Aleaciones de níquel	1100-1260
Aceros	1100-1260

Tabla 3.7: Valores de temperatura de extrusión en caliente de distintos metales [31].



4. ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

4.1 Análisis por el método de los elementos finitos

Este apartado ha sido redactado en base a la información obtenida principalmente de la referencia [36] y de las referencias [10], [18], [19], [25], [27], [28], [29], [35] y [46].

4.1.1 Historia

Aunque el nombre de análisis de métodos numéricos sea reciente, el concepto proviene de algunos siglos atrás. Como ejemplo, los antiguos matemáticos hallaron la longitud de la circunferencia aproximando a través del perímetro de sucesivos polígonos. Cada lado de estos polígonos sería lo que hoy denominamos elemento finito, y al aumentar el número de elementos se consiguieron soluciones cada vez más precisas.

Más recientemente una aproximación similar a los elementos finitos fue sugerida por Courant en 1943, usando funciones continuas definidas a tramos aplicadas sobre una región triangular. Las ideas del análisis por elementos finitos como las conocemos actualmente fueron presentadas en un artículo de los autores Turner, Clough, Martin, y Topp. En este artículo se aplica el análisis por elementos finitos simples (barras articuladas y placas triangulares con cargas en el plano) en el análisis de la estructura de un avión, este estudio se considera una contribución clave al desarrollo del análisis por elementos finitos.

El desarrollo de las computadoras proporcionó una forma rápida de realizar el gran número de cálculos necesarios para el análisis por elementos finitos e hicieron práctico el uso de este método. Junto al desarrollo de computadoras de alta velocidad la aplicación del análisis por elementos finitos progresó a una velocidad asombrosa. En el libro de Przemieniecki se presenta el análisis por elementos finitos para solucionar problemas de análisis de tensiones. Zienkiewicz y Cheung presentaron una visión global del método y su aplicabilidad a cualquier campo.

4.1.2 Concepto básico

El objetivo principal del análisis por elementos finitos es encontrar la solución de problemas complicados sustituyéndolos por uno más simple. Al sustituir el problema real por uno más simple para encontrar una solución, solo seremos capaces de tener una solución aproximada del problema y no una solución exacta. Las herramientas matemáticas disponibles no son suficientes para encontrar la solución exacta en la mayoría de los problemas que se presentan en la realidad. En ausencia de otro método mejor para encontrar, incluso una solución aproximada de un problema dado, debemos optar por el análisis por métodos numéricos. Además, en el análisis por elementos finitos, normalmente es posible mejorar o refinar la solución aproximada obtenida mejorando algún aspecto del análisis o empleando un mayor tiempo de cálculo.

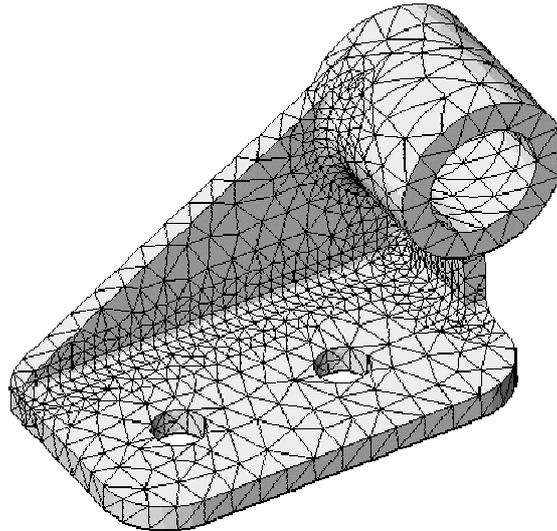


Imagen 4.1: Pieza dividida en elementos tetraédricos [2].

En el análisis por elementos finitos, el objeto del problema se considera formado por un gran número de pequeñas regiones interconectadas que son llamadas elementos finitos. En cada elemento se asume una solución aproximada y las condiciones de equilibrio de toda la estructura son obtenidas de las soluciones de todos sus elementos, así se obtendrá una solución aproximada de los desplazamientos y las tensiones. En la Imagen 4.1 se puede ver una pieza dividida en elementos o mallada.

Aunque su aplicación más extensa ha sido tradicionalmente el campo de la mecánica estructural, se ha aplicado satisfactoriamente a otros muchos problemas de ingeniería, como conducción de calor, dinámica de fluidos, y campos electromagnéticos. Estas aplicaciones se comenzaron a utilizar principalmente en problemas con condiciones de contorno complicadas.

Los problemas de condición de contorno son aquellos en los que se busca la solución en una región a partir de las condiciones de las fronteras de ésta. Hay tres principales tipos de problemas de condición de contorno aplicables al análisis por elementos finitos:

- Problemas de equilibrio independiente del tiempo, en el caso de mecánica de sólidos se buscan los desplazamientos y tensiones de un estado estático sometido a carga, así como en un problema de fluidos se buscan la velocidad y presión de un fluido dadas unas condiciones de contorno con independencia del tiempo.
- Problemas de valores propios, el tiempo no aparece explícitamente. Se buscan, en mecánica estructural los modos propios de vibración de las estructuras, y en mecánica de fluidos la estabilidad del flujo laminar, y problemas de resonancia si se trata de un problema de un circuito eléctrico.
- Problemas de propagación o transitorios, estos problemas dependen del tiempo como en el caso de una estructura sometida a cargas variables, o en el campo de la transferencia de calor el proceso de calentamiento o enfriamiento al iniciar o cesar la acción de una fuente de calor.

4.1.3 Aplicaciones en ingeniería del análisis por elementos finitos

A continuación se presentan en la Tabla 4.1 algunas aplicaciones en distintos campos de la ingeniería de los tres tipos de problema.

Área de estudio	Problemas de equilibrio	Problemas de valor propio	Problemas de propagación
Estructuras de ingeniería civil	Análisis estático de celosías, techos de chapa, muros, puentes y estructuras de hormigón pretensado.	Frecuencias naturales de las estructuras y estabilidad.	Propagación de ondas de tensión, respuesta ante cargas cíclicas.
Estructuras aeroespaciales	Análisis estático de alas, fuselajes, aletas y misiles.	Frecuencias naturales y estabilidad de aviones, naves o misiles.	Respuesta de un avión ante cargas aleatorias, respuesta dinámica ante cargas periódicas.
Conducción de calor	Distribución estática de temperatura en sólidos y fluidos.	—	Flujo de calor transitorio, motores de combustión interna, álabes de turbina y estructuras de construcción.
Geomecánica	Análisis de excavaciones, interacción entre suelo y estructura.	Frecuencias naturales y modos de sistemas de presas y problemas en la interacción estructura-suelo.	Problemas de la interacción estructura-suelo dependientes del tiempo y propagación de ondas en el suelo y las rocas.
Hidrodinámica	Análisis de flujos potenciales, flujo externo, flujo viscoso, análisis de estructuras hidráulicas y presas.	Periodos naturales de lagos, bahías, comportamientos de líquidos en contenedores rígidos y flexibles.	Análisis de flujo transitorio y propagación de ondas. Dinámica de gases enrarecidos y flujo magneto-hidrodinámico.
Ingeniería nuclear	Análisis de vasos nucleares de presión y estructuras de contención; distribución de temperaturas estática.	Frecuencias naturales y estabilidad de las estructuras de contención; distribución del flujo de neutrones.	Respuesta de las estructuras de contención ante cargas dinámicas; distribución de temperaturas transitoria.
Ingeniería biomédica	Análisis de tensiones en ojos, huesos y dientes; capacidad de carga de implantes y mecánica de válvulas coronarias.	—	Análisis de impacto en el cráneo, dinámica de las estructuras anatómicas.
Diseño mecánico	Problemas de concentración de tensiones, pistones, materiales compuestos, uniones, engranajes.	Frecuencias naturales y estabilidad de uniones, engranajes y herramientas.	Problemas de fractura y agrietamiento bajo cargas dinámicas.
Maquinas eléctricas y electromagnetismo	Análisis estático de maquinas sincrónicas y de inducción, pérdidas en el núcleo de maquinas magnéticas.	—	Comportamiento transitorio de elementos electromagnéticos como motores o actuadores; magnetodinámica.

Tabla 4.1: Aplicaciones del análisis por elementos finitos [36].

4.1.4 Descripción general del análisis por elementos finitos

En el análisis por elementos finitos el continuo se representa como una unión de subdivisiones llamadas elementos finitos que se consideran interconectados por ciertos puntos llamados nodos. Los nodos se sitúan normalmente en la frontera del elemento, donde se consideran unidos a los elementos adyacentes; poseen en principio los seis grados de libertad en el espacio, que determinan los esfuerzos que pueden transmitir, y que pueden ser restringidos a través de las condiciones de contorno. Aunque el valor de la variable (presión, temperatura, tensión, o velocidad) dentro del continuo no es conocido, se asume que la variación dentro del elemento finito puede ser aproximada por una función simple. Estas funciones (funciones de forma o modelos de interpolación) se definen a partir de los valores de las variables en los nodos y deben contar con las siguientes propiedades:

- Derivabilidad
- Integrabilidad
- Semejanza con las leyes de distribución de desplazamientos, manteniendo la continuidad que mantienen los desplazamientos de un continuo real.
- Condición de polinomio completo, en caso de ser esta la forma escogida para que la función se aproxime a la solución real hasta el término n-ésimo.

Cuando las ecuaciones de equilibrio para todo el objeto se escriben, las nuevas incógnitas serán los valores de las variables en los nodos. Resolviendo estas ecuaciones, normalmente en forma de ecuaciones matriciales, los valores de las variables en los nodos serán conocidos y por tanto los valores aproximados en el interior de los elementos también a través de todo el objeto de estudio.

La solución de un problema general por elementos finitos siempre sigue un proceso ordenado paso a paso. El proceso se puede describir según los siguientes pasos para un problema estructural:

- Paso 1: Discretización de la estructura. El primer paso consiste en la división de la estructura en elementos. Los elementos son los bloques constructivos básicos de los modelos de elementos finitos, define la interrelación entre los grados de libertad de un nodo y los del siguiente. Pueden ser líneas (barras y vigas), áreas (placas y membranas 2D o 3D) o sólidos ("bricks" o tetraedros). El tipo de elemento, en cuanto a su forma, va directamente relacionado con la geometría del problema, cada tipo de elemento tiene ventajas para una geometría, así dentro de los elementos tipo área, con cuadriláteros podremos simplificar la discretización de una chapa plana, pero será más conveniente utilizar elementos axisimétricos si se quiere discretizar un objeto de revolución. El tamaño y número de elementos van directamente relacionados y tienen gran influencia en la precisión de la solución, aunque no se puede conseguir la solución exacta aunque se aumente en gran medida el número de elementos.

- Paso 2: Selección del un modelo de interpolación. Aunque no se pueda predecir exactamente el desplazamiento de una estructura compleja bajo un cierto estado de carga, se asume una posible solución en los elementos para aproximar la solución desconocida. La solución asumida debe ser simple desde el punto de vista computacional, pero también satisfacer algunos requerimientos de convergencia. En general el modelo de interpolación tomado es polinómico.

- Paso 3: Obtención de las matrices de rigidez de los elementos y los vectores de cargas. A partir del modelo de interpolación asumido, se obtienen la matriz de rigidez de elemento $[K^{(e)}]$ y el vector de cargas $\vec{F}^{(e)}$, del elemento e usando condiciones de equilibrio u otro principio de variación razonable.

- Paso 4: Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos para obtener las ecuaciones generales de equilibrio. Las matrices de rigidez y vectores de carga de todos los elementos han de ser ensambladas de forma que se obtengan las ecuaciones de equilibrio generales formuladas como

$$[K]\vec{u} = \vec{F} \qquad \text{Expresión 4.1}$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez ensamblada, \vec{F} el vector de las fuerzas nodales de toda la estructura y \vec{u} el vector de desplazamientos nodales.

- Paso 5: Solución de los desplazamientos nodales desconocidos. Las ecuaciones de equilibrio general deben ser modificadas para cumplir las condiciones de contorno del problema. Tras incorporar estas condiciones el equilibrio general puede expresarse como

$$[K]\bar{u} = \bar{F} \quad \text{Expresión 4.2}$$

Para problemas lineales, el vector \bar{u} puede solucionarse de forma sencilla. Para problemas no lineales, la solución debe ser obtenida en una secuencia de pasos que implican en los que se modifican la matriz de rigidez y/o el vector de cargas.

- Paso 6: Computación de las deformaciones y tensiones. Conocido el vector de desplazamientos nodales, se pueden obtener las deformaciones y las tensiones que sufre el objeto de estudio a través de las ecuaciones necesarias de mecánica de sólidos.

En las herramientas de software actuales el análisis por elementos finitos está dividido en tres partes que ocultan los pasos anteriormente descritos, y proporcionan una mayor sencillez de aplicación a un determinado modelo mediante la semiautomatización o automatización de las tareas descritas en cada paso. Las etapas mencionadas se explican a continuación:

- Preproceso: en primer lugar se ha de generar el modelo de elementos finitos que se va a estudiar, normalmente se admite como geometría de entrada un modelo CAD realizado con otro software. Puede ser un modelo en una, dos o tres dimensiones, según las características del problema. Este modelo debe representar los aspectos fundamentales del modelo real para el análisis. Con el modelo importado se realiza el mallado que divide éste en numerosos elementos y creándose los nodos en los que se calcularán características como los desplazamientos. También se aplican las propiedades de los elementos de los distintos objetos que entren en el análisis, y las cargas y restricciones de éstos.

- Análisis: en esta etapa se procede a solucionar las ecuaciones de los nodos mediante la potencia de cálculo del procesador del computador utilizado.

- Postproceso: por último se procede a la obtención de los resultados deseados de la solución, mediante herramientas adecuadas para la visualización gráfica de la solución o la obtención de datos como desplazamientos, tensiones, velocidades o flujos de calor.

4.1.5 Factores que afectan a la exactitud del análisis por elementos finitos

La exactitud de la solución obtenida mediante un análisis por elementos finitos viene determinada, por un lado por las hipótesis realizadas (factores comunes a todos los modelos de cálculo), y por otro por factores propios del modelo de elementos finitos.

- Hipótesis de modelización del objeto: al modelizar el objeto se obvian algunos aspectos de su entorno o se realizan simplificaciones.

- Hipótesis sobre la geometría: es muy común simplificar la geometría de un objeto al estudiarlo mediante elementos finitos, pues así se ahorra mucho tiempo de cálculo, pero también se quitan detalles que afectan en mayor o menor medida a la solución obtenida.

- Hipótesis sobre aplicación de cargas y restricciones: simplificando las cargas y restricciones del modelo se facilita el cálculo de la solución, pero se introducen errores en el cálculo.

- Hipótesis sobre las características del material: en muchas ocasiones no se dispone de un modelo de material que defina bien las propiedades del material estudiado y se realizan cálculos con cierto grado de error añadido.
- Tipo de elementos utilizados: es importante elegir un tipo de elemento que se ajuste a la geometría y propiedades del objeto estudiado.
- Tamaño de los elementos: es fundamental elegir bien este parámetro pues con escasez de elementos nos encontraremos con una solución muy pobre o incluso irreal, mientras que con demasiados elementos se derrochará tiempo de computación.

4.1.6 Tendencias del análisis por elementos finitos

Actualmente en la industria, en prácticamente todos los campos, esta creciendo el uso del análisis por elementos finitos, debido al desarrollo de computadores potentes y a bajo precio, y al desarrollo de paquetes de software de manejo más sencillo.

Una de las tendencias en el uso del análisis por elementos finitos es la aplicación de la simulación a procesos dinámicos. De esta forma se obtienen datos más realistas de numerosos estados de carga y es fundamental si lo que se trata de simular es el comportamiento de un fluido. Anteriormente predominaba el análisis estático, que es válido para un gran número de aplicaciones, pero en algunas era usado por la dificultad y tiempo de cálculo que conllevaba un análisis dinámico.

Otra tendencia es la simulación de elementos ensamblados, es decir, no simular los elementos aislados de un conjunto y aplicar las cargas transmitidas como condiciones de contorno, sino simular todo el conjunto obteniendo un resultado más realista y la sencillez de tener que realizar una sola simulación. Este método es útil en múltiples casos, por ejemplo en la simulación de procesos industriales. El uso del ensamblaje requiere que el software utilizado disponga de los recursos para simular distintos tipos de unión y contacto entre las piezas.

En las aplicaciones de dinámica de fluidos (en gran medida aerodinámica) se está incrementando el uso del análisis por elementos finitos en sustitución parcial de las pruebas de modelos en entornos simulados (túnel de viento). Para la realización de simulaciones precisas y rápidas de dinámica de fluidos mediante elementos finitos, es necesario disponer de ordenadores de gran potencia con un coste muy alto, pero que actualmente supone un ahorro al usarse en lugar de las pruebas de prototipos; que suponen la construcción de distintos modelos y probarlos en condiciones simuladas, lo que significa un coste más elevado.

En la industria eléctrica el uso de los elementos finitos también se está acrecentando, usándose para calcular y optimizar los campos magnéticos en las partes de los motores eléctricos y así aumentar su eficiencia o reducir su tamaño.

Una de las aplicaciones en las que se trabaja actualmente es la simulación de los crash-test que se realizan con distintos vehículos (coches, autobuses, trenes, aviones...) y suponen un ensayo destructivo con el consiguiente coste que imposibilita un gran número de repeticiones en estas pruebas. Mediante la simulación por elementos finitos es posible, si se cuenta con el modelo adecuado, simular tantas veces como se quiera con un coste menor y posibilitar la mejor detección de aspectos a mejorar para incrementar la seguridad de los ocupantes del vehículo en caso de accidente. Estas simulaciones implican la realización de modelos de elementos finitos de seres humanos, aspecto que resulta difícil por la complejidad y variabilidad de la geometría del cuerpo humano.

4.1.7 Comparación entre métodos implícito y explícito

En el desarrollo de la solución de un problema se puede optar por dos métodos diferentes, de tiempo implícito y de tiempo explícito. A continuación se explican las diferencias entre los dos métodos y para que tipo de problemas son apropiados.

- Método de tiempo implícito (implícito): Este método es adecuado para obtener la solución en problemas que traten situaciones estáticas (como puede ser el análisis de una estructura ante cargas permanentes o semipermanentes) o cuasiestáticas, donde los elementos no sufren grandes aceleraciones (como es el caso de un proceso de deformación a baja velocidad). En este método las aceleraciones se calculan como aceleraciones medias y los desplazamientos en $t+\Delta t$:

$$\bar{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} = [\mathbf{K}]^{-1} \mathbf{F}_{t+\Delta t} \quad \text{Expresión 4.3}$$

En problemas lineales este método es siempre estable si la matriz de rigidez $[\mathbf{K}]$ es lineal y se pueden tomar pasos temporales largos que acortan el tiempo de cálculo.

En problemas no lineales la solución se obtiene mediante una serie de aproximaciones lineales. La solución es más compleja al requerirse la inversión de la matriz de rigidez no lineal, los pasos temporales deben ser pequeños para llegar a una convergencia que, aun así no esta garantizada.

- Método de tiempo explícito (explícito): Con el método explícito se pueden obtener soluciones a problemas dinámicos, con grandes desplazamientos y velocidades, como puede ser un impacto o un proceso de mecanizado a alta velocidad. Las aceleraciones se obtienen en el tiempo t , utilizando el método de la diferencia central:

$$\bar{\mathbf{a}}_t = [\mathbf{M}]^{-1} \left([\mathbf{F}_t^{\text{ext}}] - [\mathbf{F}_t^{\text{int}}] \right) \quad \text{Expresión 4.4}$$

Donde $[\mathbf{F}_t^{\text{ext}}]$ es el vector de fuerza externa aplicada y $[\mathbf{F}_t^{\text{int}}]$ es el vector de fuerza interna dado por:

$$\mathbf{F}^{\text{int}} = \Sigma \left(\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_n d\Omega + \mathbf{F}^{\text{hg}} \right) + \mathbf{F}^{\text{cont}} \quad \text{Expresión 4.5}$$

\mathbf{F}^{cont} es la fuerza en el contacto y \mathbf{F}^{hg} es la fuerza de resistencia a *hourglassing*. Esta última fuerza puede ser aplicada artificialmente para evitar modos de deformación irreales en el objeto que dan resultados incorrectos.

Las velocidades y desplazamientos son evaluados como se muestra a continuación.

$$\bar{\mathbf{V}}_{t+\Delta t/2} = \bar{\mathbf{V}}_{t-\Delta t/2} + \bar{\mathbf{a}}_t \Delta t_t \quad \text{Expresión 4.6}$$

$$\bar{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} = \bar{\mathbf{U}}_t + \bar{\mathbf{V}}_{t+\Delta t/2} \Delta t_{t+\Delta t/2} \quad \text{Expresión 4.7}$$

$$\text{Donde } \Delta t_{t+\Delta t/2} = 0,5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t})$$

La geometría del objeto estudiado se actualiza añadiendo desplazamientos incrementales a la posición inicial $\bar{\mathbf{X}}_0$

$$\bar{\mathbf{X}}_{t+\Delta t} = \bar{\mathbf{X}}_0 + \bar{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} \quad \text{Expresión 4.8}$$

En este método, para problemas no lineales se tiene la ventaja de que no es necesaria la inversión de la matriz de rigidez, las no linealidades se incluyen en el vector de fuerza interna; por este motivo la mayoría del tiempo de computación se emplea en el cálculo de estas fuerzas. Para mantener la estabilidad es necesario que el paso temporal sea muy pequeño, marcándose un paso

temporal crítico relacionado con la frecuencia natural del objeto según la Expresión 4.9. Este paso temporal tan pequeño implica que este análisis sea adecuado en caso de sucesos de corta duración.

$$\Delta t^{\text{crit}} = \frac{2}{\omega_{\text{max}}} \quad \text{Expresión 4.9}$$

Donde ω_{max} es la mayor frecuencia natural circular del objeto, dependiente de la longitud característica del elemento, su rigidez y densidad.

4.2 Ansys Ls-Dyna

La información que se presenta en este apartado se ha obtenido de [2], [3] y [24].

4.2.1 Presentación del programa

Ansys Ls-Dyna será el software utilizado para realizar las simulaciones necesarias en el desarrollo del presente proyecto de fin de carrera.

Ansys Ls-Dyna combina el programa explícito de elementos finitos de Ls-Dyna con el potente pre y postprocesador del programa Ansys. Mediante el método explícito que usa Ls-Dyna se obtienen soluciones rápidas para problemas de corta duración, grandes deformaciones dinámicas, problemas cuasiestáticos con grandes deformaciones y múltiples no linealidades; junto con complejos problemas de impacto o contacto.

En principio Ansys y Ls-Dyna no estaban unidos en un mismo software de análisis. Ansys se desarrolló como una herramienta de análisis por elementos finitos de código implícito. Dispone una gran reputación en el mundo de la ingeniería por ser uno de los líderes del mercado en este tipo de software y por haber unido bajo un mismo software posibilidades de análisis en diversos campos de la ingeniería. Por otra parte Ls-Dyna comenzó llamándose Dyna3D, como proyecto militar estadounidense desarrollado por John O. Hallquist en 1976, por lo que tras su desarrollo se distribuyó su código gratuitamente. Tras años de desarrollo, su creador se traslada a una compañía privada (Livermore Software Technology Corporation) y cesa la distribución gratuita de versiones de Dyna3D, pasando al actual nombre Ls-Dyna.

La integración de ambos programas permite la creación de la geometría con Ansys y su posterior uso en un análisis de Ls-Dyna. También se permite la transferencia de resultados entre ambos, haciendo posible que se realicen análisis con gran utilidad combinando soluciones explícitas e implícitas. Las soluciones *implícito a explícito* permiten simular problemas dinámicos en los que se ven involucrados elementos con una pretensión que es mejor calcular mediante el método implícito. En el caso contrario de solución explícito a implícito se pueden simular problemas en los que tras una situación dinámica se produce una situación cuasiestática, como puede ser la recuperación de una pieza tras un impacto. Otra ventaja es el uso del postprocesador de Ansys que ofrece una forma sencilla de obtener los datos de la solución, tanto numérica como gráficamente.

Las aplicaciones de este software son numerosas, entre ellas se destacan las siguientes:

- Crash-test en automóviles y seguridad de los ocupantes: Ls-Dyna es ampliamente utilizado por la industria del automóvil para analizar el diseño de los vehículos. Se puede predecir el comportamiento del vehículo en una colisión, así como los efectos sobre los ocupantes. Para esta aplicación este software cuenta con aplicaciones específicas como: cinturones de seguridad, pretensores, acelerómetros, airbag, modelos de dummy Hybrid III. En la Imagen 4.2 hay un ejemplo.

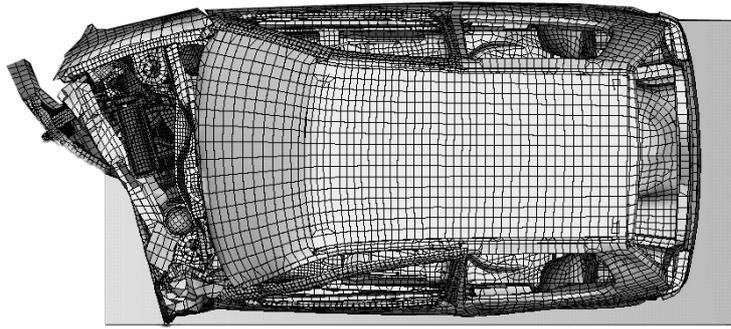


Imagen 4.2: Simulación de un impacto fronto-lateral [2].

- Procesos de conformado de chapa: es una de las aplicaciones más extendidas de este software. Ls-Dyna predice las tensiones y deformaciones que sufre el metal en el proceso y determina si se producirá fallo en la chapa. Soporta la definición de un mallado adaptativo que se refine durante el análisis donde sea necesario, incrementando la precisión y ahorrando tiempo de cálculo. Entre los procesos que se pueden simular están: estampado, hidroconformado, forja, embutición profunda, procesos con varias etapas.

- Industria aeroespacial: Ls-dyna tiene un gran uso en este campo en aplicaciones desde el estudio de la contención de los álabes de las turbinas (minimizar los daños producidos a la aeronave en caso de rotura de un álabes), al estudio de fallo estructural, pasando por el estudio de los daños producidos por el impacto de aves.

- Otras aplicaciones: Ls-Dyna se utiliza en muchos otros análisis, como: test de caída, conformado de cristal, moldeo y conformado de plásticos, mecanizado, ingeniería sísmica, equipamiento deportivo...

4.3 Otro software

La información de los distintos programas se ha obtenido de la distintas páginas Web de sus comercializadores; [1], [5], [17], [37] y [42]

En el mercado existen otros productos de software de elementos finitos que puede ser utilizado para la realización del análisis de un proceso de embutición de chapa. Algunos de ellos están enfocados únicamente a la simulación, diseño y mejora del proceso de conformado de chapa, lo que implica ciertas ventajas si su uso va a ser únicamente ese, pero son totalmente inútiles si se pretende realizar un análisis de otro proceso dinámico.

4.3.1 Pam-stamp

Este software se compone de distintas herramientas que permiten el diseño completo de un proceso de embutición de chapa. Pam-diemaker ayuda a generar la geometría de la matriz y el recorte de chapa necesario a partir del modelo CAD de la pieza deseada. Pam-quickstamp y Pam-autostamp, simulan el proceso, pero en el primer caso se realiza más rápidamente y con menos precisión, como herramienta para una visualización de errores.

4.3.2 Solidworks

Solidworks es, en principio, una herramienta de diseño asistido por computador pero da la opción de añadir módulos que permiten el cálculo de problemas dinámicos. El problema que presenta este software es que el código está más orientado a realizar análisis dinámicos de piezas y análisis de tensiones por separado.

4.3.3 Adina

Se basa en un código de análisis por elementos finitos explícito. Mediante esta herramienta se pueden realizar simulaciones de problemas dinámicos, problemas estructurales no lineales o simulaciones de problemas de flujo de líquidos interaccionando con estructuras, así como problemas que impliquen el acoplamiento de ecuaciones de transferencia de calor y comportamiento mecánico. La empresa creadora del programa lo indica para su uso en simulación de embutición, permitiendo un análisis estático para la recuperación.

4.3.4 Autoform

Al igual que Pam-stamp, este software proporciona herramientas dirigidas al diseño y optimización de procesos de conformado de chapa. En concreto Autoform proporciona herramientas que permiten el estudio del proceso de fabricación de una pieza embutida antes de que este diseñada finalmente, proporcionando un resultado que informa de los problemas que pueden aparecer en su producción. La ventaja que presenta este software es un manejo sencillo, debido a la concentración en un solo tipo de estudio dinámico.

4.3.5 Dynaform

Este software esta orientado a la simulación de procesos de estampación y embutición. Cuenta con solucionador en modo implícito y explícito. Presenta facilidades derivadas de su propósito único, es decir la solución de un mismo tipo de problemas, y se hace más sencillo el mallado y la definición de componentes.

4.4 Modelos de material

En este apartado se ha empleado la información que se presenta principalmente en las referencias [3] y [24]. Sobre el tema del endurecimiento cinemático y plástico se puede obtener más información de [11] y [41]; también se puede ampliar la información sobre el modelo de Johnson-Cook en las referencias [8], [13], [20], [21] y [43].

Ansys Ls-Dyna ofrece la posibilidad de utilizar más de cien modelos de material para muy diversas aplicaciones. Para el desarrollo de las simulaciones que se realizan en este proyecto se han seleccionado los modelos que permitan su uso con elementos tipo placa, tengan sensibilidad a la velocidad de deformación y estén preparados para simular metales en régimen plástico.

Estas características son necesarias pues los elementos tipo placa serán los elegidos por la geometría del problema que permite su uso y simplifican el cálculo, la sensibilidad a la velocidad de deformación es fundamental pues la velocidad en la simulación hará trabajar el material a velocidades a las que cambian sus características, y evidentemente debe poder definirse un metal pues el objeto de trabajo es una chapa metálica.

Es importante tener en cuenta que las unidades empleadas en los parámetros introducidos en los modelos deben estar en unidades acorde con las unidades de longitud utilizadas para definir la geometría del problema y las unidades utilizadas al definir las cargas aplicadas.

Todos los modelos requieren tres valores básicos para caracterizar el comportamiento de cualquier material:

- ρ : Densidad
- E: Módulo de Young
- ν : Coeficiente de Poisson

4.4.1 Modelo rígido

Este modelo ha sido utilizado en el análisis pero no cumple las características antes mencionadas, esto es porque dichas características se refieren a los modelos necesarios para la chapa que se va a deformar en el proceso de conformado. El modelo rígido ha sido utilizado para el resto de las partes que intervienen en la simulación; punzón, matriz y sujeta-chapas.

El modelo rígido proporciona la opción de transformar una parte formada por elementos tipo viga, placa o sólidos, en partes rígidas. Esta aproximación es válida en casos como este en el que se trata la matricería como rígida, pues estos elementos están fabricados en piezas robustas que no sufren apenas deformación durante su trabajo; también se usa este modelo, por ejemplo, en el diseño de sistemas de retención de ocupantes, donde en ciertos análisis el ocupante puede ser tratado como cuerpo rígido.

Los elementos a los que se asigna el modelo rígido son obviados en el análisis, sus datos históricos no se guardan. Así los elementos clasificados como rígidos consumen muy poca carga de computación en el momento de calcular la solución, reduciendo el tiempo de cálculo y ofreciendo resultados realistas si la hipótesis es adecuada al problema.

El modelo rígido ofrece dos alternativas para la definición de las propiedades de inercia del objeto en cuestión. Por un lado el cálculo directo a partir de la geometría y el dato de densidad introducido y por otro asignar una inercia que se corresponda con la realidad si la geometría definida no se corresponde con la real y esta propiedad es importante.

Aun tratándose de un cuerpo cuyas deformaciones sean nulas, la definición correcta de los parámetros de módulo de Young, E, y el coeficiente de Poisson, ν , es importante pues estos datos se utilizan para el cálculo de las reacciones en el contacto, si es que este se produce con una pieza deformable.

4.4.2 Modelo cinemático plástico

Este modelo simula el comportamiento del material como una curva tensión-deformación bilineal que varía en su límite elástico con a la velocidad de deformación.

El modelo permite la definición del endurecimiento como isotrópico (valor de parámetro de endurecimiento 1) o como cinemático (valor del parámetro de endurecimiento 0). En el primer caso el endurecimiento se produce porque la superficie de plastificación definida por las tensiones principales máximas crece en su radio pero mantiene su centro y en el caso cinemático se mueve el centro manteniéndose el radio. La condición de plastificación se define como:

$$\phi = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0 \quad \text{Expresión 4.10}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \xi_{ij} &= s_{ij} - \alpha_{ij} \\ \sigma_y &= \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}} \end{aligned} \quad \text{Expresión 4.11}$$

El co-rotacional de α_{ij} es:

$$\alpha_{ij}^{\nabla} = (1 - \beta) \frac{2}{3} E_p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad \text{Expresión 4.12}$$

Así:

$$\alpha_{ij}^{n+1} = \alpha_{ij}^n + \left(\alpha_{ij}^{\nabla n+1/2} + \alpha_{ik}^n \Omega_{kj}^{n+1/2} + \alpha_{jk}^n \Omega_{ki}^{n+1/2} \right) \Delta t^{+1/2} \quad \text{Expresión 4.13}$$

La velocidad de deformación se tiene en cuenta a partir del modelo de dependencia de Cowper Symonds:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{\text{eff}}^p) \quad \text{Expresión 4.14}$$

donde P y C son constantes definidas y $\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación definida como:

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} \quad \text{Expresión 4.15}$$

El valor actual del radio de la superficie de plastificación σ_y es la suma del límite elástico inicial, σ_0 , más el crecimiento producido por $\beta E_p \varepsilon_{\text{eff}}^p$, donde E_p es el módulo plástico de endurecimiento,

$$E_p = \frac{E_t E}{E_t + E} \quad \text{Expresión 4.16}$$

Y $\varepsilon_{\text{eff}}^p$ es la deformación plástica efectiva,

$$\varepsilon_{\text{eff}}^p = \int \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p} dt \quad \text{Expresión 4.17}$$

La deformación plástica es la diferencia entre la deformación total y la deformación elástica.

En la implementación del modelo, las tensiones desviadoras se actualizan elásticamente,

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij}^n + C_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \quad \text{Expresión 4.18}$$

Donde: σ_{ij}^* : Es el nuevo tensor de tensiones

σ_{ij}^n : Es el tensor de tensiones del anterior paso temporal

C_{ijkl} : Es la matriz del módulo elástico tangente

$\Delta \varepsilon_{kl}$: Es el tensor de deformaciones incremental

Si la función de plastificación se satisface no se realiza ninguna operación más. Si la función de plastificación es violada se computa un incremento de la deformación plástica y se actualiza el centro de la superficie de plastificación.

Siendo s_{ij}^* la tensión desviadora elástica en el estado n+1,

$$s_{ij}^* = \sigma_{ij}^* - \frac{1}{3} \sigma_{kk}^* \quad \text{Expresión 4.19}$$

$$Y \quad \xi_{ij}^* = s_{ij}^* - \alpha_{ij} \quad \text{Expresión 4.20}$$

Se define la función de plastificación como:

$$\phi = \frac{3}{2} \xi_{ij}^* \xi_{ij}^* - \sigma_y^2 = \Lambda^2 - \sigma_y^2 \begin{cases} \leq 0 & \text{para carga elástica o neutra} \\ > 0 & \text{para endurecimiento plástico} \end{cases} \quad \text{Expresión 4.21}$$

Para endurecimiento plástico se tiene:

$$\varepsilon_{\text{eff}}^{p^{n+1}} = \varepsilon_{\text{eff}}^{p^n} + \frac{\Lambda - \sigma_y}{3G + E_p} = \varepsilon_{\text{eff}}^{p^n} + \Delta \varepsilon_{\text{eff}}^p \quad \text{Expresión 4.22}$$

se escalan las tensiones desviadoras,

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^* - \frac{3G \Delta \varepsilon_{\text{eff}}^p}{\Lambda} \xi_{ij}^* \quad \text{Expresión 4.23}$$

y se actualiza el centro,

$$\alpha_{ij}^{n+1} = \alpha_{ij}^n + \frac{(1-\beta) E_p \Delta \varepsilon_{\text{eff}}^p}{\Lambda} \xi_{ij}^* \quad \text{Expresión 4.24}$$

La rotura se puede determinar mediante una deformación máxima a la que el modelo detectará el fallo del material.

Las entradas para este modelo son:

- σ_y : Límite elástico del material
- E_{tan} : Módulo tangente
- β : Parámetro de endurecimiento
- C: Parámetro del modelo de Cowper-Symonds
- P: Parámetro del modelo de Cowper-Symonds

- ε_F : Deformación de rotura

4.4.3 Modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación

En este modelo se utiliza una curva que define la tensión del límite elástico en función de la velocidad de deformación efectiva ($\dot{\bar{\varepsilon}}$) donde:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}'_{ij} \dot{\varepsilon}'_{ij}} \quad \text{Expresión 4.25}$$

$\dot{\varepsilon}'_{ij}$ corresponde a la componente desviadora. El límite elástico se define como:

$$\sigma_y = \sigma_0(\dot{\bar{\varepsilon}}) + E_p \bar{\varepsilon}^p \quad \text{Expresión 4.26}$$

Donde $\bar{\varepsilon}^p$ es la deformación plástica efectiva y E_p viene dado en función del módulo de elástico, E , y del módulo tangente, E_t , según:

$$E_p = \frac{E E_t}{E - E_t} \quad \text{Expresión 4.27}$$

Ambos valores, módulo elástico y módulo tangente, pueden definirse según curvas en función de la velocidad de deformación. En caso de que las entradas correspondientes a estas curvas tengan valor cero, se toman los valores constantes definidos.

Todas las curvas definidas para este modelo deben tener el mismo número de valores correspondientes a las mismas velocidades de deformación, para permitir la interpolación vectorizada que incrementa la velocidad de cálculo del modelo.

Este modelo permite fijar un criterio de rotura. Uno de los modos de rotura es definir un límite en función de la velocidad de deformación utilizando una curva, de forma que si un elemento llega al límite que fije la velocidad de deformación actual, se elimina. Otro criterio que utiliza este modelo, para elementos tipo placa, es el de deformación excesiva; el paso temporal de la solución se reduce cuando se incrementa la distorsión de los elementos, así en este modo se fija un paso temporal mínimo de forma que los elementos a los que les corresponda un paso temporal por debajo del crítico se eliminan. Se interpreta en este segundo modo que los elementos fuertemente distorsionados indican que el material ha fallado y ya no soportan esfuerzo. Los elementos eliminados desaparecen del análisis y no intervienen en ningún aspecto, aumentando el paso temporal al mínimo de los elementos que aún se encuentran en el análisis.

Las entradas para este modelo son:

- LCID1: Número de la curva que define el límite elástico frente a la velocidad de deformación efectiva.
- E_{tan} : Módulo tangente, en caso de querer que sea constante.
- LCID2: Número de la curva que define el módulo elástico frente a la velocidad de deformación efectiva.
- LCID3: Número de la curva que define el módulo tangente frente a la velocidad de deformación efectiva.

- LCID4: Número de la curva que define la tensión de Von Mises de fallo frente a la velocidad de deformación efectiva.

- Mn Time: Paso temporal crítico para la eliminación automática de elementos tipo placa por distorsión.

4.4.4 Modelo piecewise linear

Este modelo permite la definición del comportamiento del material mediante los mismos parámetros que el modelo cinemático plástico, pero lo propio de este modelo es su definición a partir de la curva tensión verdadera frente a deformación plástica efectiva junto con otros parámetros y curvas.

La determinación de las tensiones desviadoras que satisfacen la función de plastificación:

$$\Phi = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0 \quad \text{Expresión 4.28}$$

Donde:

$$\sigma_y = \beta \left[\sigma_0 + f_h(\epsilon_{eff}^p) \right] \quad \text{Expresión 4.29}$$

Donde la función de endurecimiento $f_h(\epsilon_{eff}^p)$ se puede especificar opcionalmente en forma de tabla. En caso contrario, se asume un endurecimiento lineal de la forma:

$$f_h(\epsilon_{eff}^p) = E_p(\epsilon_{eff}^p) \quad \text{Expresión 4.30}$$

Donde E_p y ϵ_{eff}^p se dan en las expresiones 4.16 y 4.17 respectivamente. El parámetro β tiene en cuenta el efecto de la velocidad de deformación. Para mayor generalidad, se puede definir una tabla que relacione la deformación plástica con la tensión de fluencia para varios niveles de velocidad de deformación.

En la implementación de este modelo, las tensiones desviadoras se actualizan elásticamente, se verifica la función de fluencia y, si se satisface, se aceptan las tensiones desviadoras. Si no se satisface, se calcula un incremento para la deformación plástica:

$$\Delta \epsilon_{eff}^p = \frac{\left(\frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \right)^{1/2} - \sigma_y}{3G + E_p} \quad \text{Expresión 4.31}$$

G es el módulo de elasticidad en cortadura y E_p es el módulo de endurecimiento plástico. El estado de tensión desviadora de prueba s_{ij}^* se escala:

$$s_{ij}^{n+1} = \frac{\sigma_y}{\left(\frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \right)^{1/2}} s_{ij}^* \quad \text{Expresión 4.32}$$

Para elementos tipo placa es posible aplicar las ecuaciones anteriores, pero añadiendo un bucle de iteración para el incremento de deformación normal, hasta que la componente de la tensión normal en la superficie media del elemento llegue a cero.

El efecto de la velocidad de deformación se puede considerar de tres formas:

- Se puede tener en cuenta modificando la curva de tensión frente a deformación plástica efectiva con el modelo de Cowper-Symonds, de forma similar a como se utiliza en el modelo cinemático plástico. Para ello es necesario definir los parámetros del modelo de Cowper-Symonds del material. Se escala el límite elástico con el factor:

$$\lambda = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \quad \text{Expresión 4.33}$$

- Otra forma es tener en cuenta la velocidad de deformación mediante la definición de una curva que asigne la escala a aplicar al límite elástico del material para distintas velocidades de deformación.

- Por último se dispone de un modo en el que no es necesaria la definición de la curva de tensión frente a deformación plástica efectiva. En este caso se definen directamente las curvas de tensión frente a deformación plástica efectiva para hasta diez velocidades de deformación. A partir de estas curvas se realiza una interpolación para las velocidades intermedias no definidas directamente.

Las entradas para este modelo son:

- σ_y : Límite elástico
- E_{tan} : Módulo tangente
- ϵ_f : Deformación plástica efectiva en el fallo
- C: Parámetro del modelo de Cowper-Symonds
- P: Parámetro del modelo de Cowper-Symonds
- LCID1: Número de la curva que define la tensión verdadera total frente a la deformación plástica efectiva.
- LCID2: Número de la curva que define la escala que se aplica al límite elástico frente a la velocidad de deformación.
- Rate1 – Rate10: Velocidades de deformación de las respectivas curvas de tensión frente a deformación plástica efectiva.
- LCID3 – LCID12: Número de las curvas de tensión frente a deformación plástica efectiva a las distintas velocidades de deformación correspondientes.

Es importante tener en cuenta que la numeración de las velocidades de deformación comienza en 1, mientras la de las curvas comienza en 3, así la velocidad 1 corresponde a la curva 3, la velocidad 2 a la curva 4 y así sucesivamente.

Si se pone como entrada la curva LCID1, el límite elástico y el módulo tangente serán ignorados. Si se define la entrada de LCID2, los valores de los parámetros de velocidad de deformación C y P serán ignorados. Si no los valores de C, P, LCID2, y Rate1 tienen valor cero, la dependencia con la velocidad es ignorada.

4.4.5 Modelo de Johnson-Cook

Este modelo es también nombrado como modelo viscoplástico. Es un modelo sensible a la velocidad de deformación y a la temperatura, de forma adiabática pues no asume conducción de calor. Es un modelo apropiado en problemas con variaciones grandes de la velocidad de deformación y temperaturas que afecten al comportamiento plástico del material provocando un ablandamiento de éste. Se puede utilizar en elementos tipo placa y en elementos sólidos, en este caso se necesita definir una ecuación de estado.

Este modelo expresa el límite elástico como:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^{p^n}) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad \text{Expresión 4.34}$$

Donde: A, B, C, n y m son parámetros que definen el modelo según el material

$$\bar{\epsilon}^p = \text{Deformación plástica efectiva}$$

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0}$$

$$T^* = \frac{T - T_{\text{ambiente}}}{T_{\text{fusion}} - T_{\text{ambiente}}}$$

Las constantes que intervienen en el modelo están definidas para numerosos materiales en base a distintos estudios, algunos de los materiales fueron definidos por los creadores del modelo Johnson y Cook.

Este modelo permite también el estudio de la rotura según:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad \text{Expresión 4.35}$$

Donde σ^* es la relación de la presión dividida entre la tensión plástica.

$$\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{\text{eff}}} \quad \text{Expresión 4.36}$$

La rotura se produce al llegar a la condición:

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon^f} = 1 \quad \text{Expresión 4.37}$$

Las entradas para este modelo son:

- A: Parámetro del modelo con unidades de tensión que suele ser el valor del límite elástico del material.
- B: Parámetro del modelo con unidades de tensión relacionado con el endurecimiento por deformación plástica.
- n: Parámetro del modelo sin unidades que está relacionado con el endurecimiento por deformación plástica.
- C: Parámetro del modelo sin unidades relacionado con el endurecimiento con la velocidad de deformación.

- m : Parámetro del modelo sin unidades relacionado con la sensibilidad a la temperatura del material.
- T_{melt} : Temperatura de fusión del material.
- T_{room} : Temperatura ambiente.
- $\dot{\epsilon}^*$: Velocidad de deformación plástica efectiva.
- CP: Calor específico.
- Limite de presión.
- D_1 - D_5 : Parámetros para el análisis de la rotura.



5. PROCESO DE SIMULACIÓN

Para redactar este capítulo se han utilizado las referencias [3], [24], [33], [34] y [40].

5.1 Descripción del proceso a simular

Se va a simular la primera de cinco etapas de un proceso de embutición de una pieza correspondiente al sistema de sujeción de la rueda de repuesto de un vehículo de la marca Mercedes, modelo Vito.

El corte de la chapa del que se parte es el que aparece en la Imagen 5.1, el espesor de la chapa es de 2 mm.

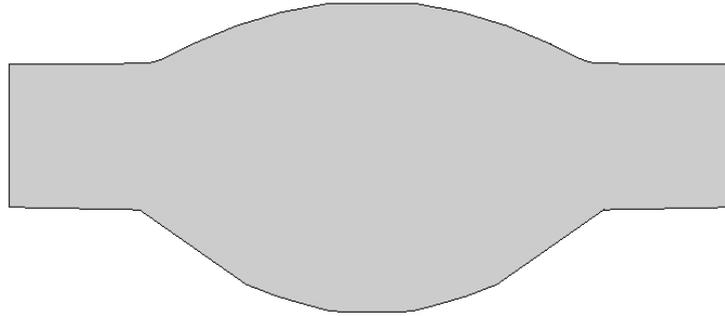


Imagen 5.1: Recorte de chapa.

Sobre esta chapa se realiza la embutición utilizando el punzón que aparece en la Imagen 5.2, descendiendo a una velocidad de 80 mm/s. Para que se desarrolle adecuadamente se utiliza un sujetachapas, Imagen 5.3, que aplica una fuerza de 90000 N (9 toneladas métricas). La chapa se apoya sobre una matriz que contribuye con el punzón a aplicar la forma final de la chapa, ésta aparece en la Imagen 5.4.

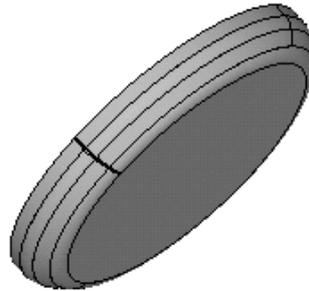


Imagen 5.2: Punzón.

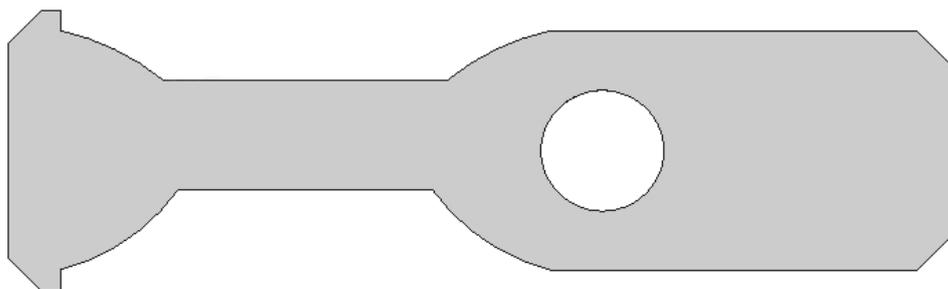


Imagen 5.3: Sujetachapas.

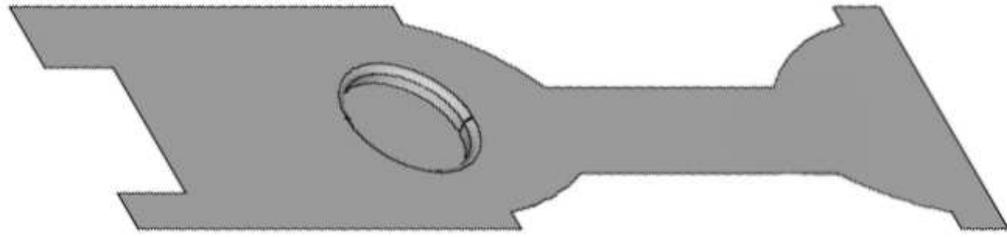


Imagen 5.4: Matriz.

Tras el descenso del punzón hasta la profundidad correspondiente al contacto de la chapa con el fondo de la matriz, se retira el punzón y se obtiene la geometría final de esta primera etapa de la embutición, que aparece en la Imagen 5.5.



Imagen 5.5: Chapa conformada.

5.2 Simulación explícita

A continuación se van a explicar los pasos seguidos para obtener una simulación en modo explícito del proceso de embutición de chapa.

5.2.1 Definición del tipo de análisis

En este paso se define el tipo de análisis que vamos a realizar de los distintos modos que nos ofrece el programa en la ventana que aparece en la Imagen 5.6.

Preferences

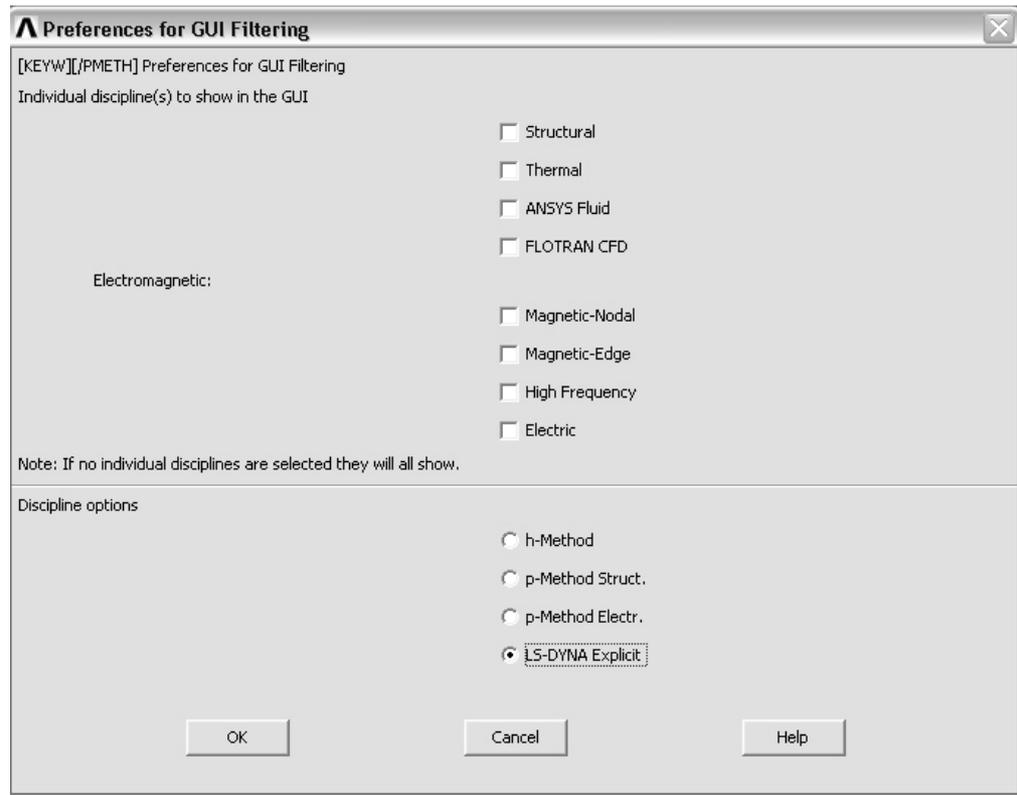


Imagen 5.6: Ventana en la que se elige el tipo de análisis.

En “Discipline options” se elige el análisis de tipo explícito de Ls-Dyna, como aparece marcado en la Imagen 5.6, automáticamente se seleccionará la casilla “Structural”, si se desea que se presenten otros aspectos se deben marcar las casillas correspondientes.

5.2.2 Importar la geometría

El primer paso consiste en disponer de una geometría del problema con los distintos cuerpos que intervienen en el análisis, colocados en sus posiciones iniciales. Normalmente dicha geometría se importa, pero también es posible crearla con el preprocesador de Ansys, aunque normalmente más costoso. En este caso se ha importado desde una geometría en formato IGES. Los pasos necesarios se ilustran en las Imágenes 5.7 y 5.8.

File > Import > IGES



Imagen 5.7: Importación de archivo IGES.

Ok

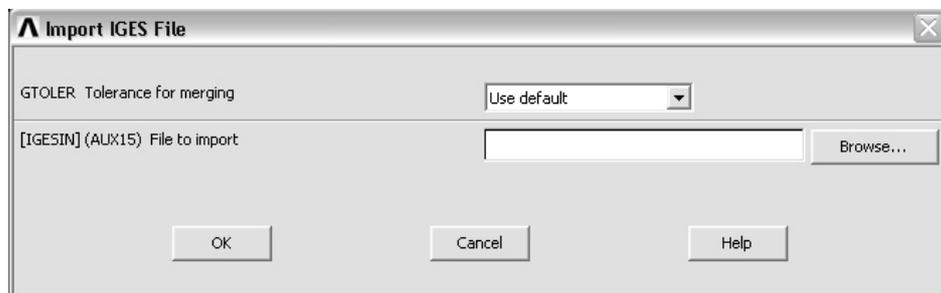


Imagen 5.8: Búsqueda del archivo IGES.

Mediante el botón “**Browse**” buscar la geometría deseada y pulsar “**OK**” de nuevo. La geometría de la parte en cuestión ya está cargada. Si cada parte está en un archivo distinto habrá que cargarlas una a una.

5.2.3 Definición de los tipos de elemento

Es necesario añadir al análisis los tipos de elemento que se van a utilizar. En este caso sólo se utilizarán elementos tipo placa Thin Shell163, usados en los análisis dinámicos de Ls-Dyna.

Preprocessor > Element type > Add/Edit/Delete > Add...

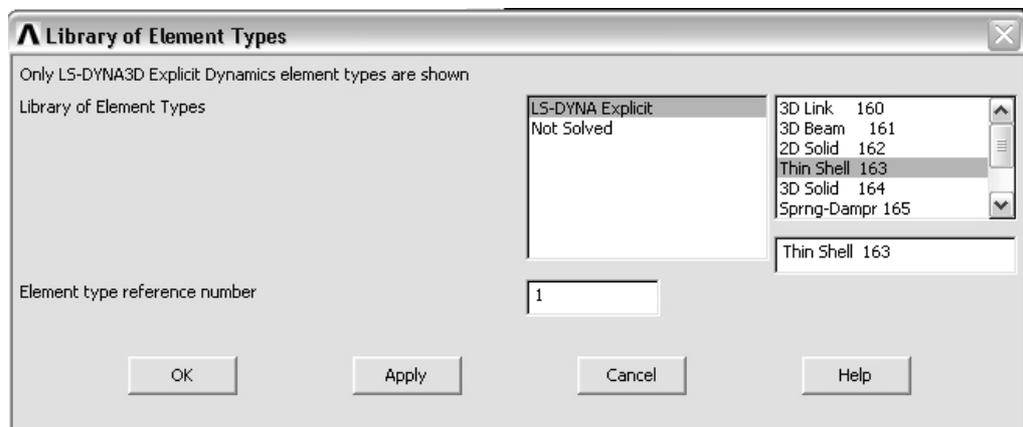


Imagen 5.9: Librería de tipos de elemento.

Se selecciona según aparece en la Imagen 5.9

5.2.4 Definición de constantes reales

Las “real constants” son parámetros del material que influyen en el cálculo del proceso dinámico. En este caso se crearan dos sets de constantes reales, uno para las partes que se trataran como rígidas y otro para la chapa que sufrirá deformación.

Preprocessor > Real constants > Add... > Ok (teniendo seleccionado el tipo de elemento deseado, en este caso sólo debe estar Thin Shell163)

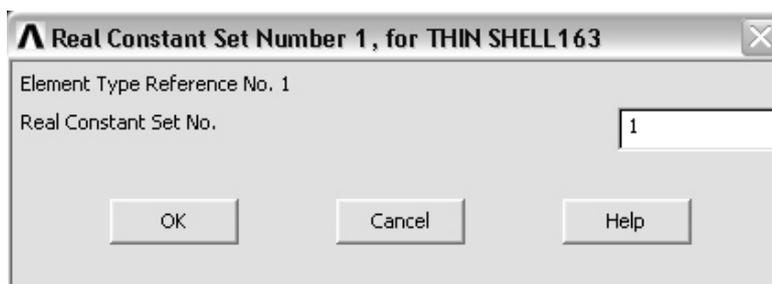


Imagen 5.10: Definición del número de set.

Colocar el número correspondiente de set de constantes (en la ventana que aparece en la Imagen 5.10) > **Ok**

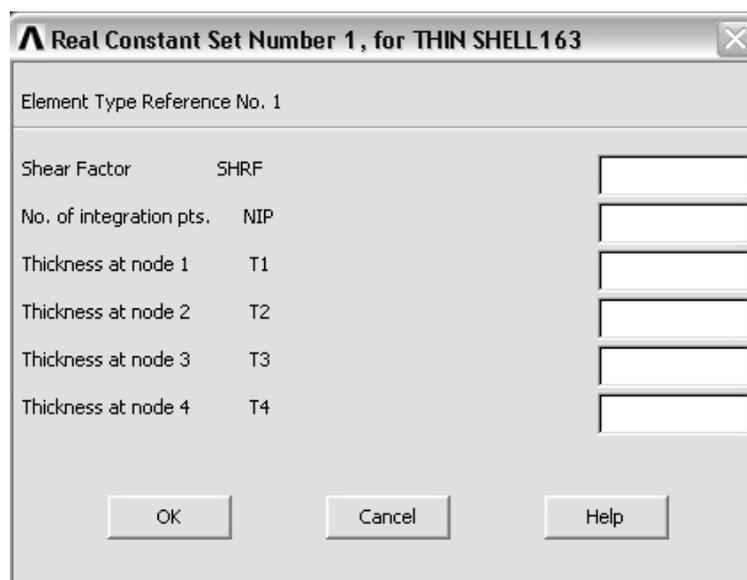


Imagen 5.11: Ventana de definición de las constantes reales.

Como ya se ha indicado, se crearán dos sets de constantes. El primero de ellos será el del elemento deformable, la chapa. Para este set se indicará un valor de “shear factor” (Factor de cortante) de 5/6 (0,83333), como se recomienda en el manual de Ls-Dyna para los elementos deformables formados por elementos Thin Shell. El número de puntos de integración (NIP) indica el número de puntos que se calcularan a lo largo del espesor del elemento; el valor recomendado para simular comportamiento plástico es 5, este será el valor elegido. El espesor (thickness) en todos los nodos será, en este problema, de 2 mm.

Para el set de constantes reales correspondientes a los elementos rígidos, se dejan con valor cero los campos correspondientes al factor de cortante y del número de puntos de integración, pues no serán necesarios para los cálculos que se realizará con las partes rígidas. El valor del espesor se

fijará con un valor de 0,001 mm; este valor tan bajo se utiliza para reducir la alteración de la geometría.

5.2.5 Definición de los materiales

En este paso se definen los materiales de las partes que intervienen en el análisis. Es necesaria la definición de un material distinto para cada una de las partes, es decir, para cada uno de los cuerpos que van a tener un movimiento o características independientes. Así aunque tres de los cuerpos que intervienen tendrán el modelo de material rígido, se definirán tres modelos distintos, aprovechando para fijar restricciones distintas.

Preprocessor > Material Props > Material Models

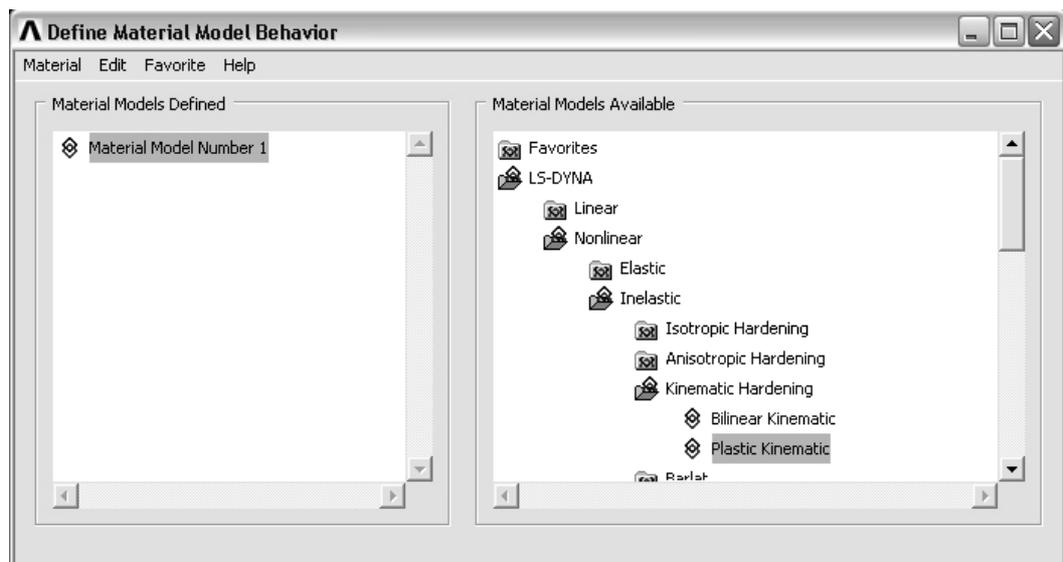


Imagen 5.12: Ventana de selección de modelo de material.

En la Imagen 5.12 se puede ver la ventana en la que se selecciona el modelo de material que se va a aplicar. Cada uno de los modelos de material deformables se define de igual forma mediante la introducción de los distintos parámetros explicados en el apartado 4.4.

El modelo de material rígido presenta la ventana que se ve en la imagen 5.13.

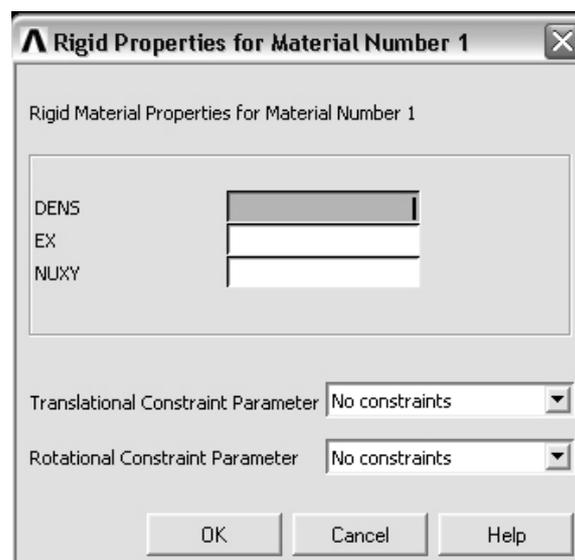


Imagen 5.13: Ventana de definición del modelo rígido.

El modelo de material rígido se define mediante los tres parámetros básicos del material (densidad, módulo elástico y coeficiente de Poisson), pero además permite la introducción de restricciones a todos los elementos a los que se aplique este modelo. Las restricciones posibles son traslacionales (primer menú desplegable) en uno, dos o los tres ejes y rotacionales (segundo menú desplegable) en uno dos o los tres ejes.

En este problema se ha aplicado una restricción de todos los grados de libertad para la matriz, y para el sujetachapas y el punzón todos los grados de libertad excepto la traslación en el eje z.

5.2.6 Modelado

Este paso solo servirá para realizar algunos ajustes en la geometría, pues la geometría ha sido importada de un archivo. Se realizara una división del área correspondiente a la chapa, para mejorar el mallado posterior, situando un área en forma de anillo en la zona donde se produce una mayor deformación, como se ve en la Imagen 5.14.

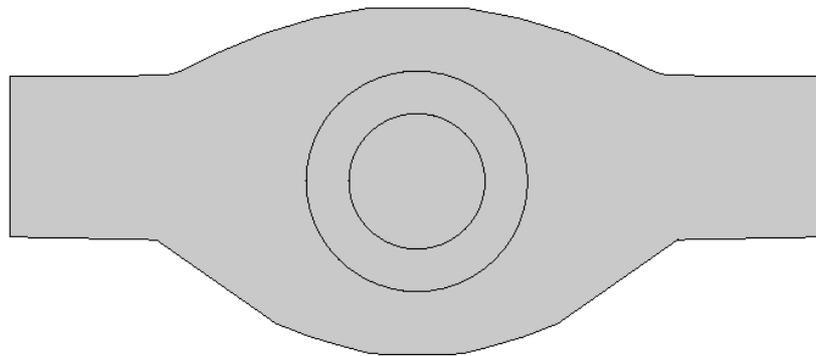


Imagen 5.14: Áreas que forman la chapa.

Los radios de los círculos son 43 y 70 mm dado que el radio de la zona plana del punzón es de 42 mm y la zona exterior 53 mm, se calcula que esta será la zona con mayor deformación, a través de algunos ensayos de tanteo. Para realizar esta separación de áreas se utilizan las herramientas del preprocesador de Ansys.

5.2.7 Mallado

Para proceder al análisis del problema es necesario dividir las partes en elementos y aplicar a estos las propiedades adecuadas.

Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked areas

Tras estos pasos se selecciona el área o grupo de áreas que conforman una de las partes y aparecerá la ventana que aparece en la Imagen 5.15. En esta ventana se define el tipo de elemento, el set de constantes reales y el modelo de material que queremos aplicar a las áreas seleccionadas. En este caso sólo hay un tipo de elemento definido y dos sets de constantes. El modelo de material hay que aplicarlo con cuidado para no aplicar a dos partes el mismo, pues esto dará problemas.

Esta definición de propiedades se debe hacer para cada una de las partes, aplicando los parámetros adecuados para cada una de ellas.

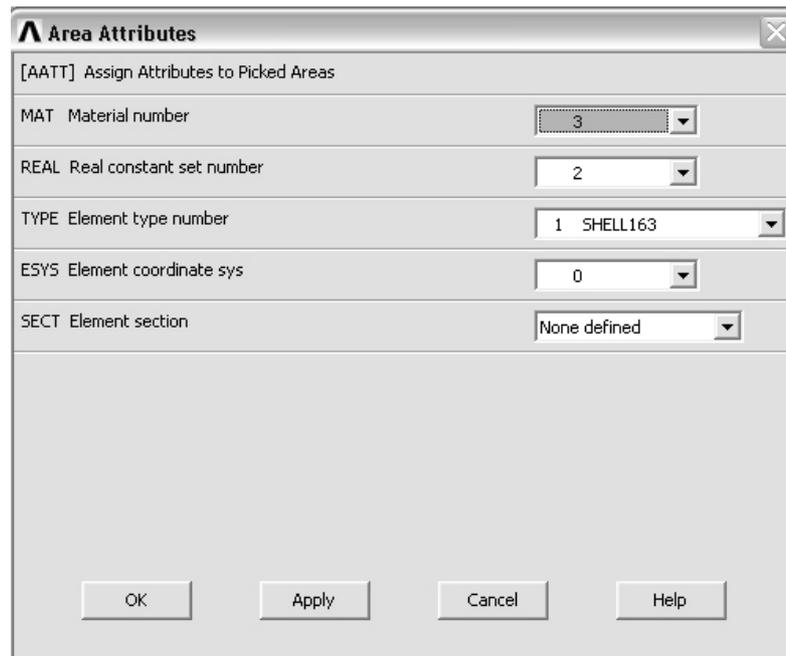


Imagen 5.15: Ventana de aplicación de propiedades.

El tamaño de elemento se puede dejar a elección del programa automáticamente, pero para ahorrar tiempo de cálculo reduciendo el número de elementos en zonas sin importancia, y para mejorar la precisión refinando zonas importantes, se puede definir el tamaño de elemento manualmente.

Preprocessor > Meshing > Size Controls > Manual Size > Areas > Picked Areas

Tras esta secuencia se seleccionan las áreas a las que se va a asignar el tamaño de elemento y tras aceptar esta selección aparece la ventana en la que daremos el tamaño de elemento, teniendo en cuenta las unidades utilizadas. Por ejemplo en áreas muy pequeñas del punzón se ha aplicado un tamaño de elemento de 0,5 mm, pues eran áreas curvas que influían en la geometría de la chapa deformada, en las grandes áreas curvas el tamaño es de 2 mm, mientras en la zona plana es necesaria menor precisión y los elementos son más grandes; como se ve en la Imagen 5.16.

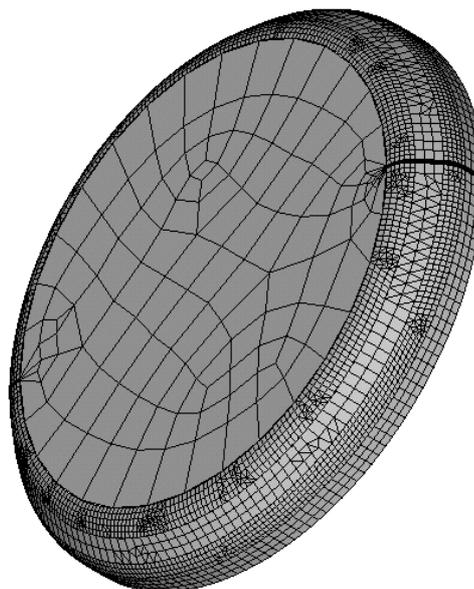


Imagen 5.16: Punzón con los distintos tamaños de elemento.

Esta misma técnica se ha aplicado a las demás partes, especialmente en la chapa con el anillo central mallado más fino que el resto de la chapa.

Como último paso del mallado hay que realizar el propio mallado, siguiendo los pasos que se presentan a continuación,

Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free

Tras esto seleccionamos todas las áreas de las distintas partes que ya tienen sus propiedades aplicadas a las áreas, y aceptamos la selección; así se dividirán en elementos todas las áreas.

5.2.8 Crear partes

Para realizar un análisis en Ls-Dyna es necesario crear partes, a estas se les aplicaran las fuerzas y desplazamientos necesarios para el análisis. Se creará una parte con el conjunto de elementos que compartan el mismo número de material.

Preprocessor > LS-DYNA Options > Parts Options

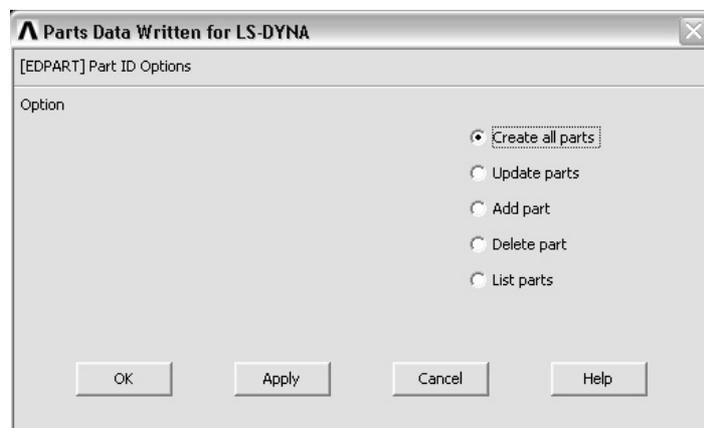


Imagen 5.17: Ventana de manejo de partes.

En la ventana que aparece en la Imagen 5.17 podemos realizar distintas operaciones con las partes. En esta fase se seleccionará "Create all parts". Tras aceptar aparecerá una lista con las partes creadas y los números de material correspondientes, es importante guardar esta lista para la aplicación de fuerzas y desplazamientos posteriormente, ya que no son iguales siempre el número de material y el número de parte. De todas formas se puede volver a esa lista repitiendo este paso pero marcando la opción "List parts".

5.2.9 Creación de contactos

Para que las distintas partes transmitan fuerzas y movimientos entre unas y otras es necesaria la preparación de los contactos que van a producirse durante el análisis, para permitir su detección y simulación.

Preprocessor > LS-DYNA Options > Contact > Define Contact

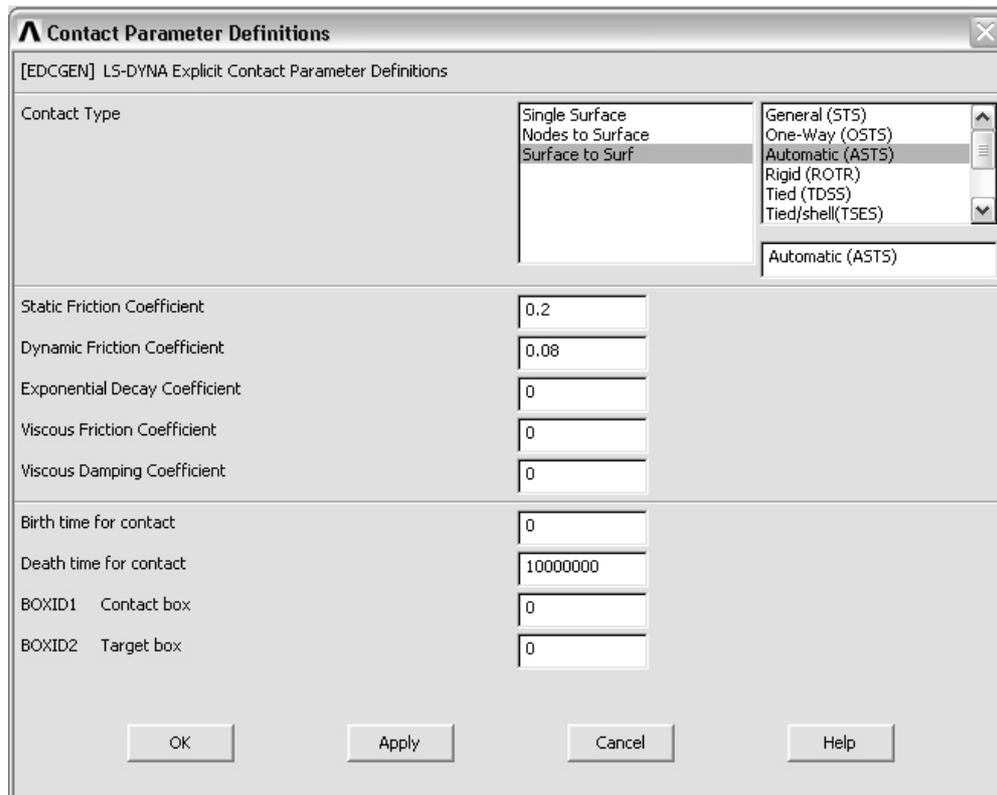


Imagen 5.18: Ventana de definición de contacto.

En este caso se utiliza el modo de contacto superficie a superficie (Surface to Surf) y dentro de este modo el automático, seleccionado como se indica en la Imagen 5.18, además en esta ventana se asignan los valores de rozamiento estático y dinámico.

Al pulsar OK aparece una nueva ventana (Imagen 5.19) en la que se definen las dos partes involucradas en el contacto. En total habrá que definir tres contactos situando como objetivo la chapa en los tres casos y como contactantes las otras tres partes.

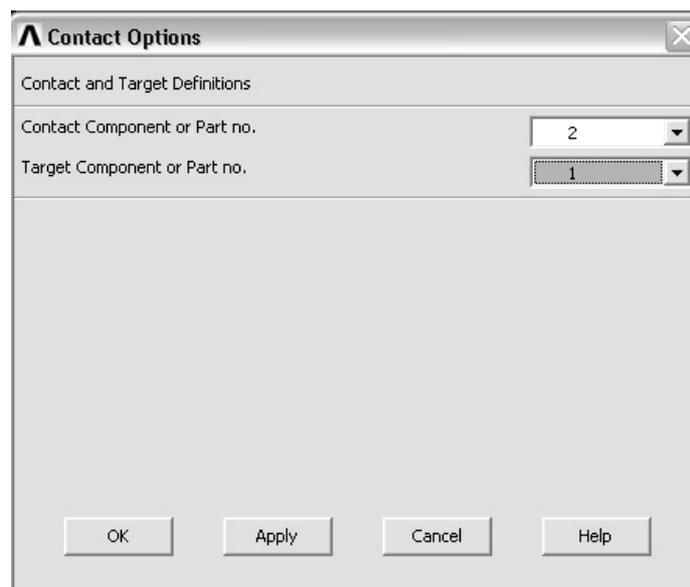


Imagen 5.19: Ventana de definición de partes en contacto.

5.2.10 Definición de los vectores necesarios

Para la aplicación de cargas sobre las partes es necesario crear los vectores que las definen.

Parameters > Array parameters > Define/Edit

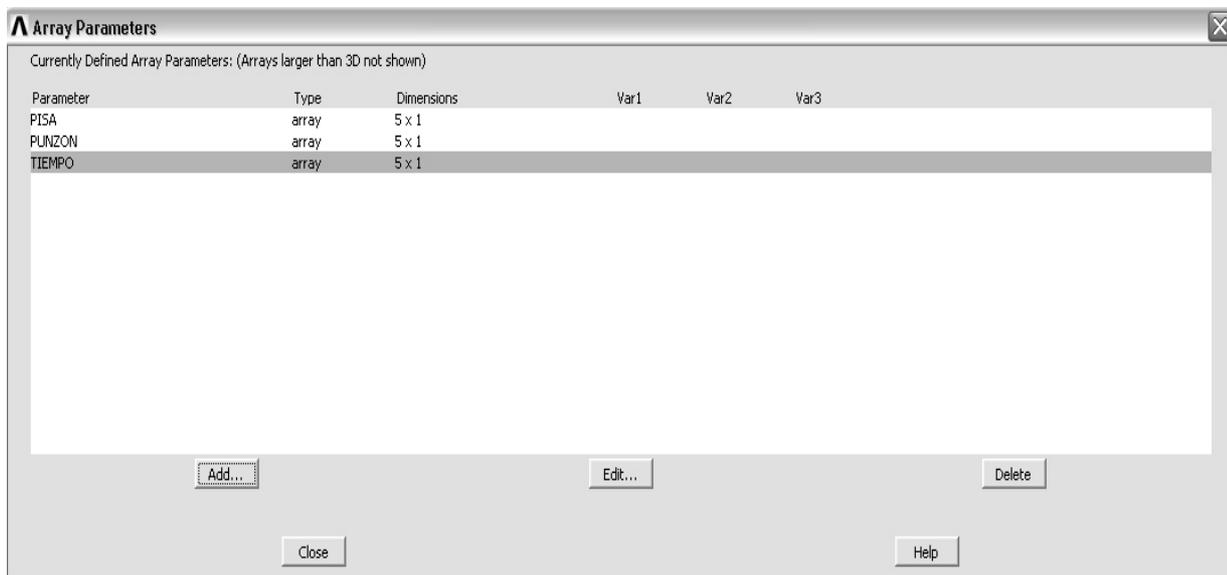


Imagen 5.20: Ventana de parámetros vectoriales.

Tras pulsar el botón “Add...” de la ventana que aparece en la Imagen 5.20 aparece una ventana en la que damos las propiedades del vector, tamaño y nombre (Imagen 5.21). Posteriormente tras aceptar estas propiedades se pulsa el botón “Edit...” con lo que aparecerá la ventana de valores del vector que se puede ver en la Imagen 5.22.

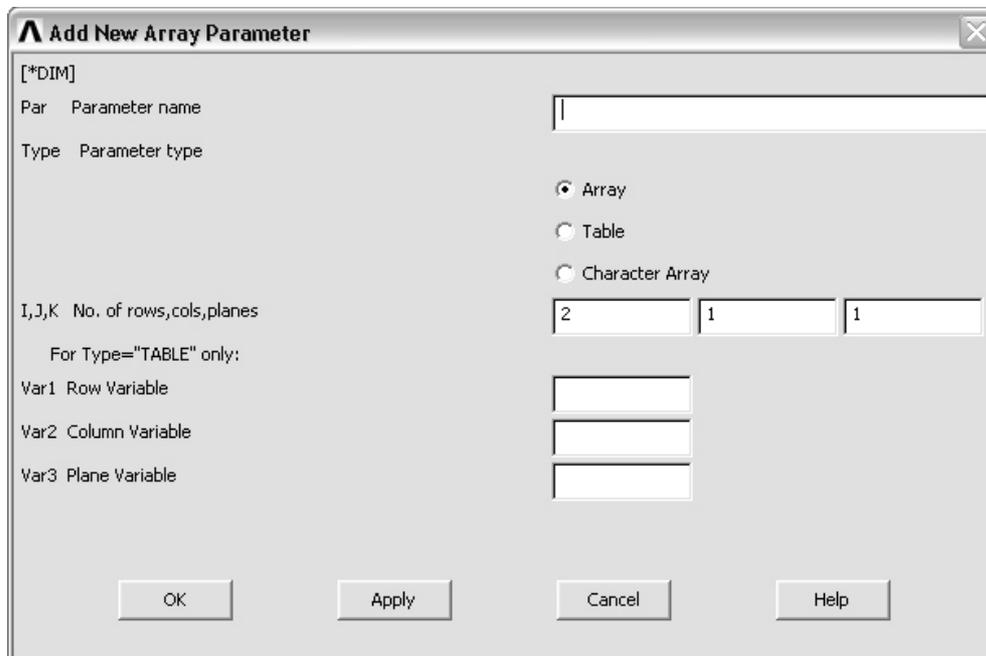


Imagen 5.21: Ventana de propiedades del vector.

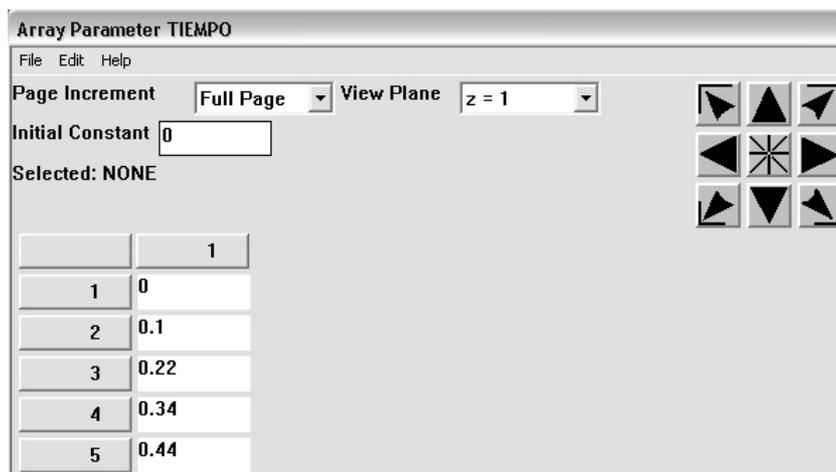


Imagen 5.22: Ventana de valores del vector.

En esta simulación se han definido tres vectores para las cargas: el de posición para el punzón, el de fuerza para el sujetachapas y el de tiempo que sirve como referencia para los otros dos. Además, en los análisis completamente explícitos, se ha definido otro vector de posición para el sujetachapas y poder simular su desplazamiento hacia arriba al subir el punzón. Los datos se han señalado para que la velocidad del punzón sea de 80 mm/s.

Para los modelos de material que utilizan curvas, éstas se definen a partir de vectores, por lo que es necesaria su definición de esta misma forma; posteriormente se aplican organizan en curvas de la siguiente forma.

Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Curve Options > Add Curve

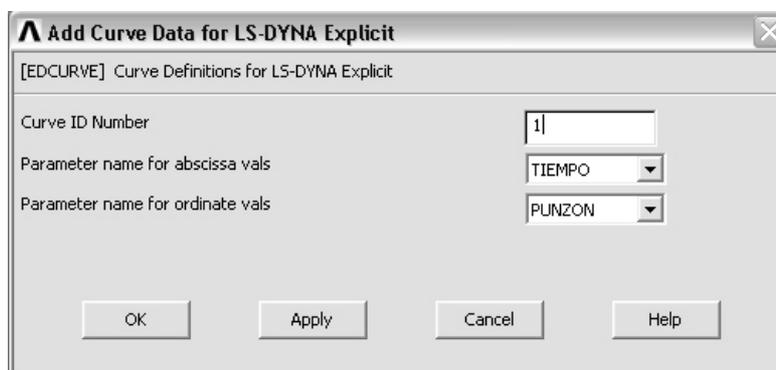


Imagen 5.23: Ventana de definición de curvas.

En la ventana de la Imagen 5.23 se indica el número que queremos asignar a la curva, el vector que define las abscisas y el vector que contiene los valores de la ordenada.

5.2.11 Aplicación de cargas

El análisis necesita los movimientos, fuerzas o momentos que harán que se ponga en movimiento el sistema y se pueda estudiar su comportamiento.

Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Specify Loads

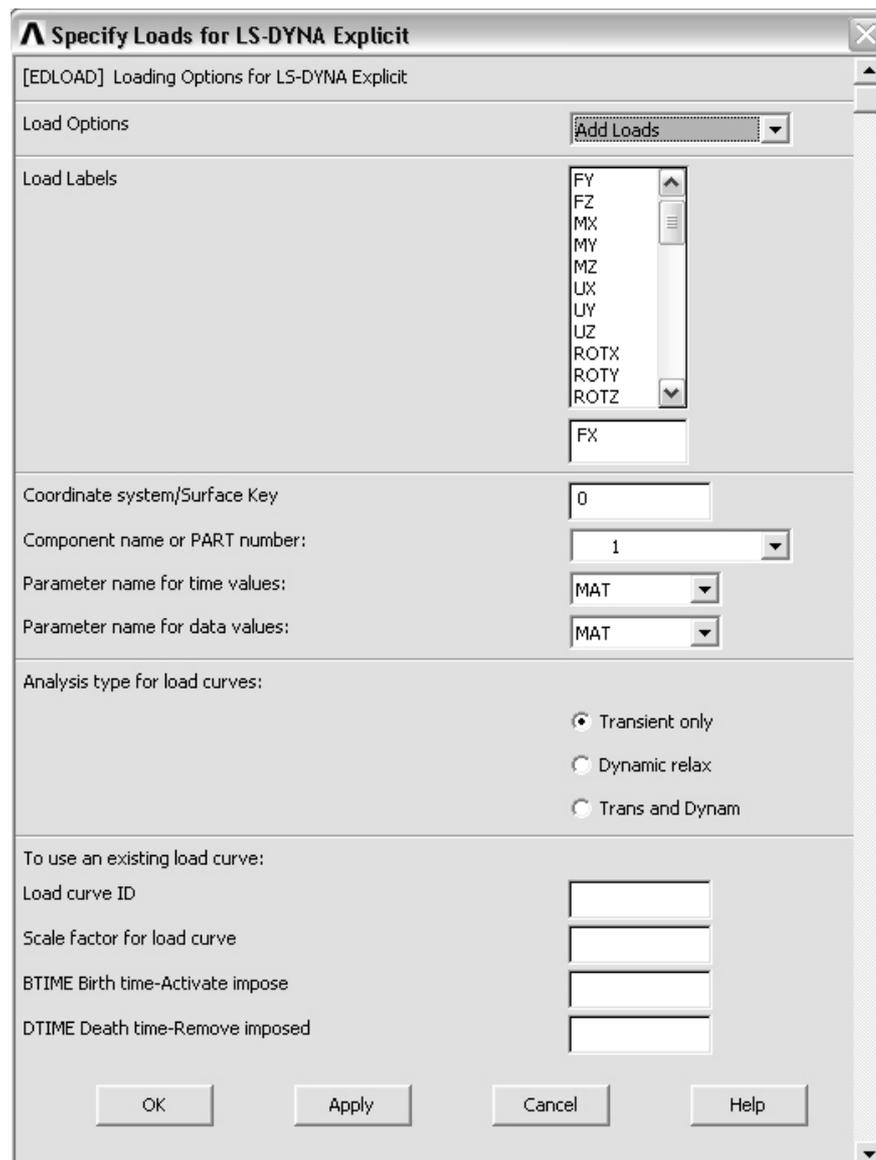


Imagen 5.24: Ventana de definición de cargas.

En la Imagen 5.24 se puede ver la ventana en la que se definen las cargas que se van a aplicar a las partes. En el primer menú desplegable se puede elegir si lo que vamos a hacer va a ser aplicar, eliminar o listar las cargas en una determinada parte. En la lista que aparece posteriormente se debe elegir cual va a ser esa carga; pueden ser: Fuerza (F), momento (M), velocidad (V), desplazamiento (U), rotación (ROT), aceleración nodal (A), aceleración de cuerpos (ACL), velocidades angulares (OMG) y temperatura (TEMP). En el caso de cuerpos con material asignado rígido, deben elegirse los tipos de carga que lleven delante las letras RB (Rigid body), por ejemplo RBUX, RBAZ...El siguiente campo es para introducir un cambio en el sistema de coordenadas. Después aparece un menú desplegable en la que se debe elegir la parte (o componente nodal, que necesita ser definida con anterioridad) que va a cargarse, el número debe ser el de la parte en cuestión, no el del material correspondiente. A continuación aparecen dos menús desplegables en los que hay seleccionar los vectores que definen la carga que se quiere aplicar, uno de tiempo y otro de carga. También se permite la aplicación de una curva creada anteriormente (Load curve ID).

5.2.12 Ajustes de la solución

Antes de comenzar la solución es necesario introducir el tiempo de solución y los pasos temporales a la salida.

El tiempo de solución es el tiempo en el que transcurre la acción simulada. Para definirlo se debe seguir la siguiente ruta e introducir el tiempo que durará la simulación en la ventana de la Imagen 5.25. Los vectores de carga definidos deben estarlo para un tiempo más largo que el de la solución y así evitar errores.

Solution > Time Controls > Solution Time



Imagen 5.25: Definición del tiempo de simulación.

El número de pasos a la salida es importante porque indica el número de datos que se grabarán durante la simulación para después poderlos analizar en el postprocesador, si son demasiados el tamaño de los archivos será excesivo y si se utilizan pocos pasos temporales, puede haber escasez de datos. Se cambian según la siguiente ruta, en la ventana que aparece en la Imagen 5.26.

Solution > Output Controls > File Output Freq > Number of Steps

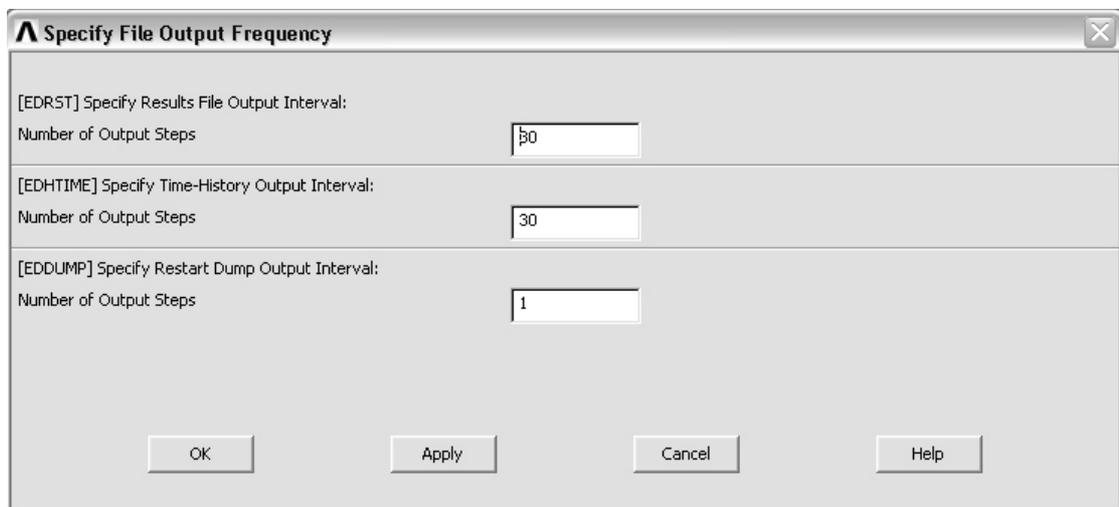


Imagen 5.26: Definición de número de pasos de salida.

En el primer campo se señalan el número de pasos que se guardarán para el postprocesador general y en el segundo campo los pasos temporales que se guardarán para el postprocesador histórico (Time-History).

5.2.13 Solución

Tras todos los pasos anteriores se pasa finalmente a la solución de la simulación.

Solution > Solve > Ok

Comienza la solución y se señala un tiempo previsto de finalización exageradamente alto como se ve en la Imagen 5.27, este valor no es realista; para obtener una previsión más correcta y otros datos del análisis en distintos pasos temporales se puede utilizar la combinación de teclas Ctrl+2 que proporciona la opción de introducir un “sense switch”, para esta aplicación el texto que hay que escribir es: sw2, y obtendremos la pantalla que aparece en la Imagen 5.28 y continuará el análisis. Si en su lugar se introduce sw1, lo que ocurrirá será que termina el análisis en el paso temporal en el que se encuentre.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
bigger then scale the penalty of the offending surface.

initialization completed
dt of cycle      1 is controlled by shell      element    18168

time.....          0.00000E+00
time step.....     3.06511E-06
kinetic energy..... 0.00000E+00
internal energy..... 1.00000E-20
spring and damper energy..... 1.00000E-20
hourglass energy .. 0.00000E+00
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 0.00000E+00
external work..... 0.00000E+00
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
total energy.....  1.00000E-20
total energy / initial energy.. 1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy. 1.00000E+00
global x velocity..... 0.00000E+00
global y velocity..... 0.00000E+00
global z velocity..... 0.00000E+00
cpu time per zone cycle.....      68240 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 68240 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 5322 nanoseconds

estimated total cpu time      =      71776 sec (      19 hrs 56 mins)
estimated cpu time to complete =      71775 sec (      19 hrs 56 mins)
estimated total clock time    =      5598 sec (       1 hrs 33 mins)
estimated clock time to complete =      5598 sec (       1 hrs 33 mins)
1 t 0.00000E+00 dt 3.07E-06 flush i/o buffers
1 t 0.00000E+00 dt 3.07E-06 write ANSYS result file
    
```

Imagen 5.27: Ventana de de estado del análisis al principio de éste.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
.enter sense switch:sw2
dt of cycle      6772 is controlled by shell      element    18168

time.....          2.07537E-02
time step.....     3.06509E-06
kinetic energy..... 1.66969E+04
internal energy..... 1.04143E+05
spring and damper energy..... 1.00000E-20
hourglass energy .. 2.76215E+01
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 7.87822E+02
external work.....  1.21652E+05
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
total energy.....  1.21656E+05
total energy / initial energy.. 1.00003E+00
energy ratio w/o eroded energy. 1.00003E+00
global x velocity..... 3.28762E-01
global y velocity..... 2.61794E-02
global z velocity..... -4.25404E+01
cpu time per zone cycle.....      68240 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 1249 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 1248 nanoseconds

estimated total cpu time      =      1314 sec (       0 hrs 21 mins)
estimated cpu time to complete =      1190 sec (       0 hrs 19 mins)
estimated total clock time    =      1311 sec (       0 hrs 21 mins)
estimated clock time to complete =      1188 sec (       0 hrs 19 mins)
7178 t 2.1998E-02 dt 3.06E-06 write ANSYS result file
    
```

Imagen 5.28: Ventana de estado de la solución en un paso intermedio.

5.2.14 Postprocesado

Tras obtener la solución, se extraen los datos del análisis en el postprocesador general de Ansys. Primero es necesario leer los datos de la solución,

General Postproc > Read results > (set elegido)

Tras esto se pueden obtener distintas representaciones de la solución, numéricas, como en la Imagen 5.29, sobre datos de tensiones, velocidades, desplazamientos..., mediante el menú “List Results”; y gráficas (Imagen 5.30), como puede ser: la deformada, representaciones gráficas de tensiones, desplazamientos, limite de rotura..., mediante el menú “Plot Results”.

PRNSOL Command

File

PRINT U NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 32
TIME= 0.22000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	UX	UY	UZ	USUM
19124	-0.92468E-01	1.2617	-16.525	16.574
19125	1.6681	0.13901	-16.565	16.649
19126	0.23163E-01	1.2404	-16.514	16.561
19127	0.14481	1.2335	-16.523	16.570
19128	0.26938	1.2178	-16.515	16.562
19129	0.37878	1.1978	-16.511	16.559
19130	0.49551	1.1823	-16.519	16.569
19131	0.62717	1.1521	-16.493	16.545
19132	0.73712	1.1342	-16.518	16.574
19133	0.87247	1.1186	-16.530	16.591
19134	0.97369	1.0767	-16.530	16.594
19135	1.0941	1.0356	-16.503	16.571
19136	1.1757	0.96059	-16.455	16.525
19137	1.2793	0.90911	-16.460	16.534
19138	1.3692	0.82561	-16.490	16.567
19139	1.4554	0.74811	-16.468	16.549
19140	1.5120	0.66162	-16.457	16.539
19141	1.5781	0.57336	-16.508	16.593
19142	1.6225	0.45604	-16.509	16.595
19143	1.6539	0.35122	-16.531	16.617
19144	1.6786	0.24685	-16.575	16.662
19145	-1.9453	0.13864	-16.475	16.590
19146	-1.9710	0.26915	-16.483	16.603
19147	-1.9611	0.38781	-16.452	16.573
19148	-1.9407	0.51342	-16.429	16.551

Imagen 5.29: Ejemplo de datos obtenidos tras el análisis.

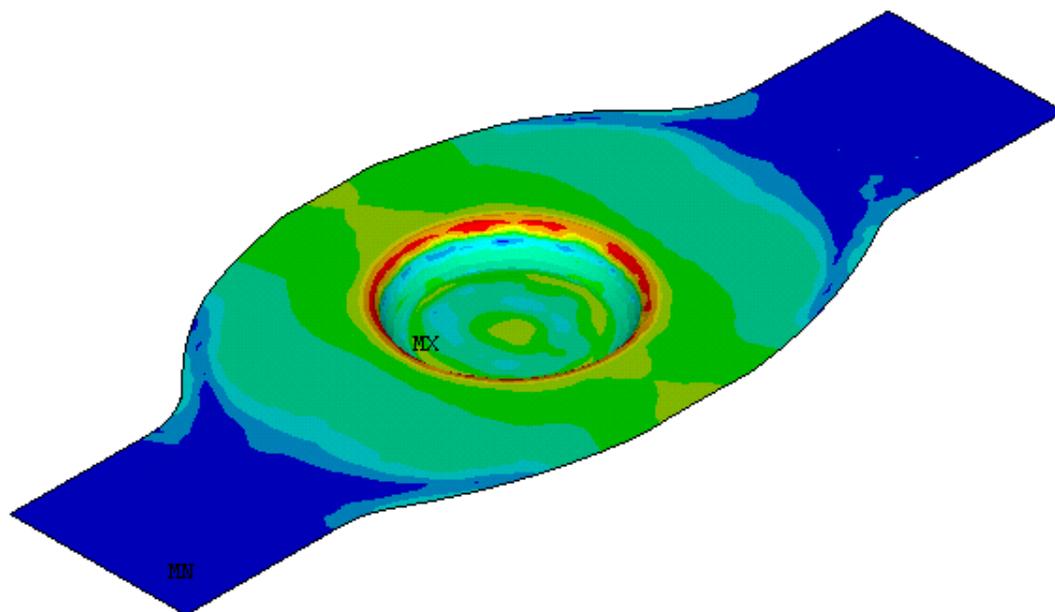


Imagen 5.30: Ejemplo de representación gráfica obtenida tras el análisis.

5.3 Análisis implícito

En algunos análisis se ha realizado un análisis en dos fases; la primera parte de deformación de la chapa en modo explícito y la segunda, correspondiente a la recuperación, en modo implícito.

5.3.1 Solucionar o cargar el análisis explícito

En primer lugar es necesario realizar la solución de la parte explícita del análisis, pues es a partir de los datos de ésta como se simula la parte implícita. La carga del archivo de la solución explícita puede realizarse mediante:

File > Resume from... > Buscar archivo *.db

5.3.2 Cambio del nombre del proyecto

Es necesario cambiar el nombre del proyecto (Jobname) porque este nombre es que utiliza Ansys para guardar los archivos datos de la solución y se podría sobrescribir al proceder a la solución implícita y perderse los datos.

File > Change Jobname... > Escribir nuevo nombre

5.3.3 Convertir tipos de elemento

Los elementos utilizados en el análisis explícito no pueden utilizarse para un análisis implícito. La mayoría de los elementos explícitos tienen un elemento correspondiente para el análisis implícito. Así los elementos Thin Shell163 explícitos se transforman en elementos Shell181 implícitos.

Preprocessor > Element Type > Switch Elem Type

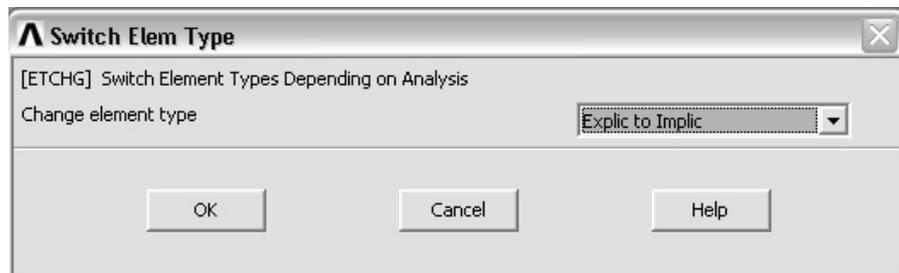


Imagen 5.31: Ventana de cambio de elemento.

En la ventana que aparece (Imagen 5.31) se selecciona en el menú desplegable “Explic to Implic”. Esta herramienta permite otros cambios de tipo de elemento como: térmico a estructural, magnético a térmico, térmico a explícito o implícito a explícito.

5.3.4 Definir modelo de material

Para el análisis implícito de la recuperación se utiliza un modelo de material elástico para la pieza de estudio, la chapa. Para definirlo correctamente es necesario borrar el modelo actual y volver a definir un modelo con el mismo número pero con características elásticas puras (linear isotropic). En las Imágenes 5.32 y 5.33 se ve como queda definido el material de la chapa (1).

Preprocessor > Material Props > Material Models

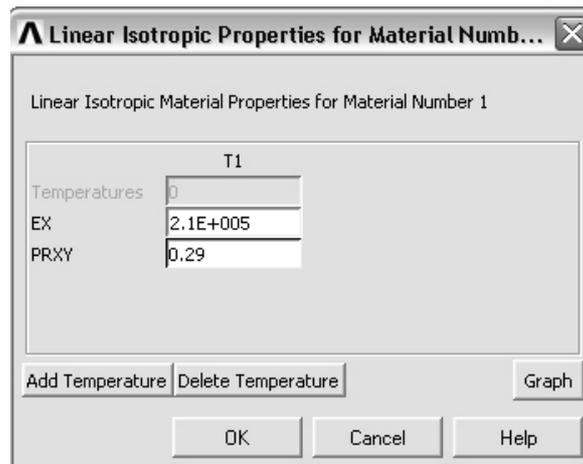


Imagen 5.32: Definición del modelo elástico de material.

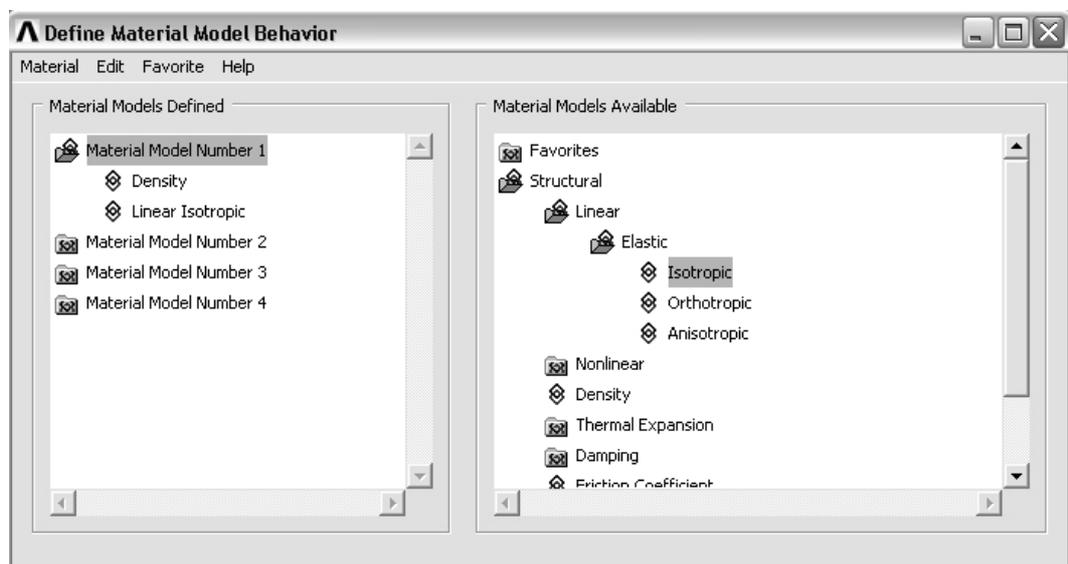


Imagen 5.33: Modelos de material para el análisis implícito.

5.3.5 Desactivar la comprobación de forma de elemento

Hay que desactivar esta opción del preprocesador para que no de fallo al cargar la geometría deformada del siguiente paso.

Preprocessor > Checking Controls > Shape Checking > Off

5.3.6 Cargar la geometría del análisis explícito

Es necesario partir de la geometría del último paso de la simulación explícita para realizar el análisis de recuperación. El factor de escala debe estar en 1 y los campos que indican el paso y subpaso que se cargan debe estar indicado como el último (LAST, como se ve en la Imagen 5.34), ya que el análisis explícito termina cuando el punzón está situado en la posición más baja, justo antes de iniciar el retroceso.

Preprocessor > Modeling > Update Geom.

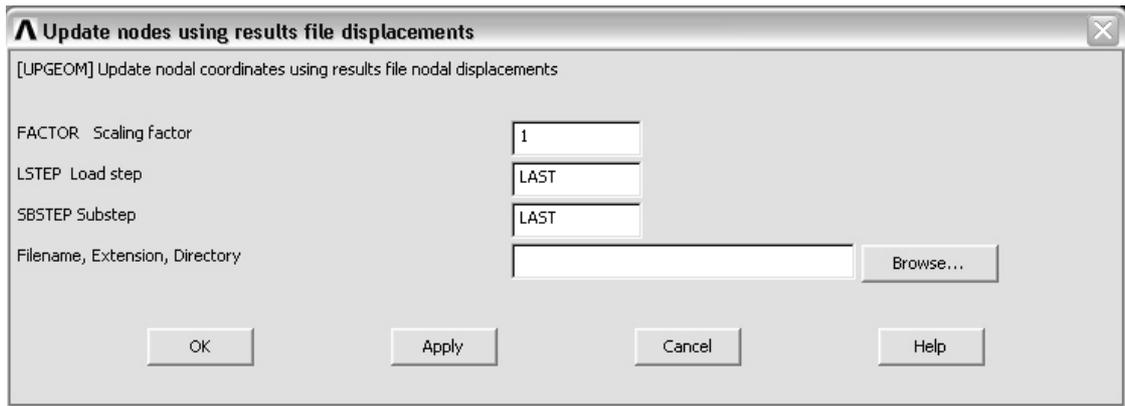


Imagen 5.34: Ventana de carga de geometría.

Mediante el botón “Browse” se busca el archivo de historia de la solución *.rst correspondiente al análisis explícito.

5.3.7 Quitar partes innecesarias

Se deben quitar todos los elementos que no formen parte del análisis implícito. En este caso se deja sólo la chapa seleccionándola mediante el modelo de material con la herramienta de selección.

Select > Entities... > Elements > By attributes

5.3.8 Poner restricciones

El cuerpo de estudio está libre y dispone de sus seis grados de libertad globales, si se ejecutara así la simulación la chapa se movería sin dar resultados útiles. Es necesario poner restricciones para que no se produzca traslación global del objeto. En este caso se han colocado seis restricciones al movimiento vertical (z) en la superficie superior de la chapa, intentando mantener la simetría, ya que este detalle favorece una solución correcta. Además para restringir el movimiento en el plano xy se ha colocado una restricción en el centro de la chapa que anula los movimientos en los ejes x e y. La situación aproximada de los apoyos introducidos es la que se puede ver en la Imagen 5.35. Al seguir los pasos que se indican a continuación aparece la ventana de selección para elegir los nodos a los que se va a restringir el movimiento y posteriormente, tras aceptar la selección, otra ventana donde se indican los grados de libertad que quedarán eliminados para el nodo elegido.

Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes

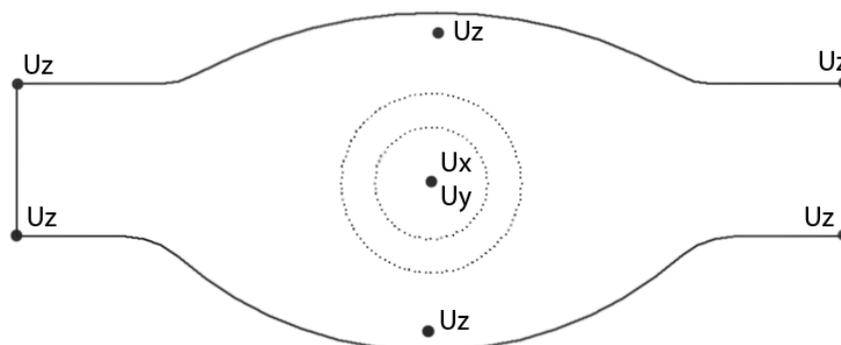


Imagen 5.35: Situación de los apoyos y grados de libertad restringidos.

Para no interferir en el análisis, los apoyos no deben ejercer reacciones importantes con respecto a las tensiones que se van a manejar en el análisis. Con esta configuración de apoyos, durante el análisis implícito, el valor máximo de fuerza de reacción en un nodo no superó los 2 N. Al aplicar las cargas introducidas por las reacciones, sin cargar las tensiones del análisis explícito, se obtuvieron desplazamientos inferiores a 10^{-3} mm. Estas dos pruebas indican que esta configuración es válida para el análisis.

5.3.9 Importar las tensiones

Como carga en el análisis implícito que se va a realizar, están únicamente las tensiones producidas durante el proceso de deformación de la chapa. Estas tensiones se cargan de forma similar a como se ha hecho en el caso de la geometría. Es necesario asegurarse de igual forma que se cargan las tensiones correspondientes al último paso (Imagen 5.36). De la misma forma que con la geometría se busca mediante el botón “Browse” el archivo de historia *.rst.

Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Other > Import Stress

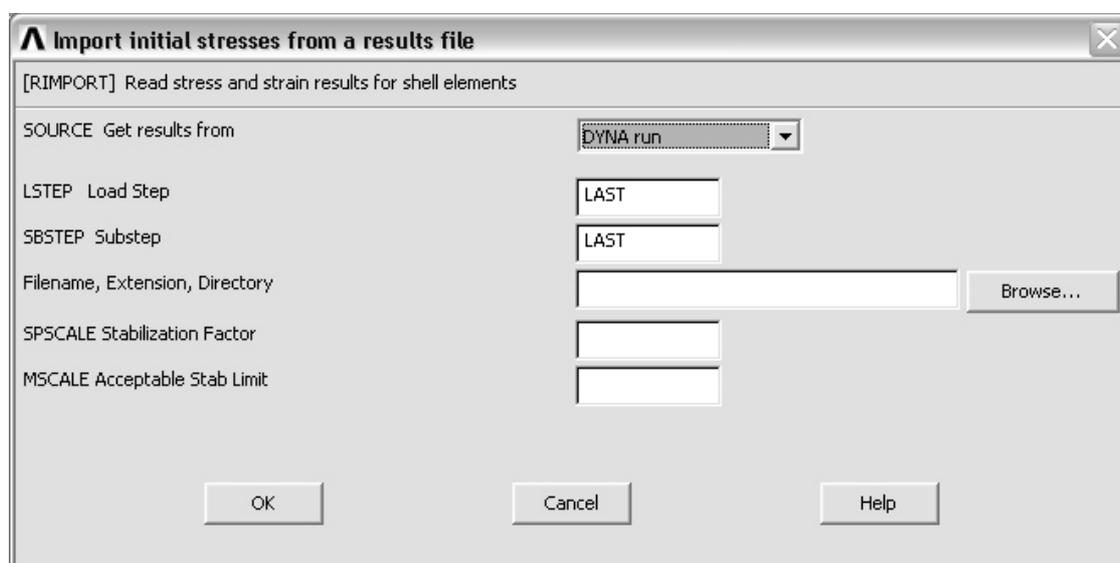


Imagen 5.36: Ventana de importación de tensiones.

5.3.10 Ajustes de la solución

Para que el cálculo se desarrolle correctamente hay que señalar el modo de solución correcto. En el caso del análisis de la recuperación elástica, es de esperar que haya unos desplazamientos relativamente grandes, para que se calculen correctamente es necesario señalar este aspecto al solucionador de Ansys.

Solution > Analysis Type > Sol'n Controls

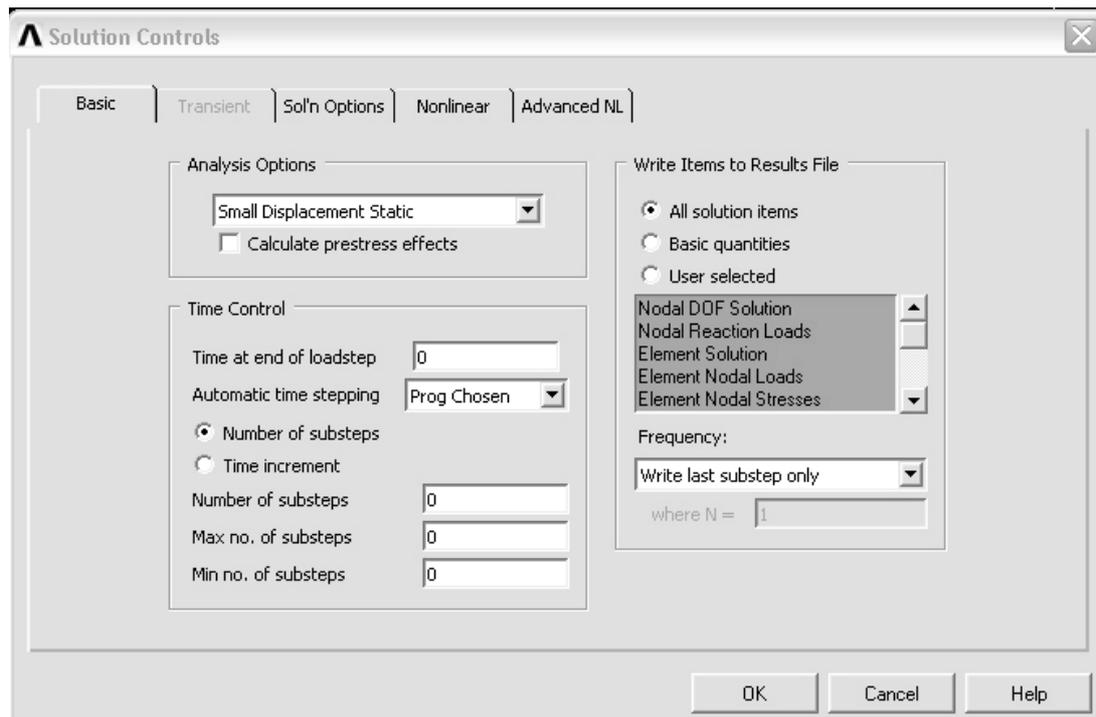


Imagen 5.37: Ventana de opciones de análisis implícito.

Tras seguir esta ruta, aparece la ventana de opciones de la solución (Imagen 5.37), en la que se modificará el menú desplegable que aparece bajo el título “Analysis Options” cambiando a “Large Displacement Static” ya que queremos una solución para un estado cuasi-estático con desplazamientos relativamente grandes.

5.3.11 Solución

En este paso se procede al cálculo de la solución. La solución de un análisis implícito es, normalmente, más corta que la de un análisis explícito, ya que sólo se analiza una situación de equilibrio y no las que van ocurriendo a lo largo del tiempo. El análisis implícito tiene que llegar a converger, esto es que los residuos (variación entre iteraciones) que se generan en la solución sean más pequeños que el criterio de convergencia que señala el programa. La progresión de los residuos se presenta en un gráfico como el que aparece en la Imagen 5.38. Cuando los criterios F L2 y M L2 bajan del valor 10^{-1} . Estos criterios evalúan la convergencia mediante la raíz cuadrada de la suma de los balances de fuerza y momento en cada grado de libertad. Es necesario que los criterios F CRIT y M CRIT se mantengan aproximadamente estables.

Solution > Solve > Current LS

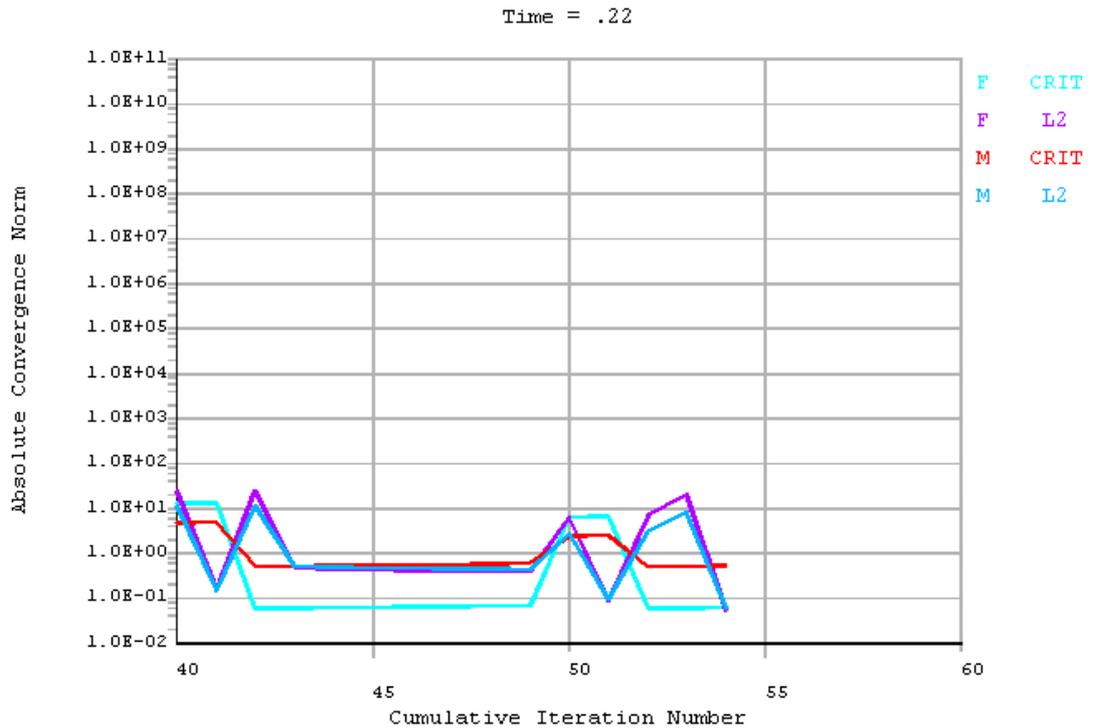


Imagen 5.38: Evolución de los criterios de convergencia.

5.3.12 Postprocesado

Al igual que en análisis implícito, tras finalizar la solución, se pueden obtener los distintos datos y gráficos que se pretende obtener tras realizar la simulación. La diferencia es que en este caso no hay distintos sets de datos para distintos pasos temporales, pues el análisis es estático y no tiene pasos temporales. El único set de datos de la solución del que se dispone esta escrito para la solución final.

Los pasos para la obtención de los resultados son los mismos que aparecen descritos en el punto 5.3.14.

5.4 Simulación de ensayo a tracción

Algunos modelos de material aplicados necesitan como parámetros de entrada curvas que definen el comportamiento del material ante las distintas sollicitaciones. Para estos modelos, además de representar la tensión aplicada frente a la deformación (o deformación plástica), es importante obtener la dependencia con la velocidad de deformación.

Para obtener las curvas mencionadas, se ha realizado una simulación de ensayo de tracción utilizando Ansys Ls-Dyna con el modelo de material cinemático plástico ajustado previamente al resultado obtenido con la pieza real.

La simulación se ha realizado en modo explícito, pues es un proceso dinámico en el que interesa la obtención de resultados de distintos pasos temporales, pues esos puntos darán la curva que se pretende obtener.

La simulación sigue básicamente los pasos descritos para el caso explícito del proceso de embutición, con la diferencia de que en este caso se ha creado la geometría. Como probeta se ha utilizado una placa de 1 mm de espesor, 5 mm de ancho y 30 mm de largo. Los elementos utilizados han sido Thin Shell163 igual que en el modelo de embutición. Las restricciones aplicadas han sido a los grados de libertad perpendiculares a la superficie, pues no debe haber movimientos en este sentido y agiliza el cálculo. Se ha sometido a una carga de desplazamiento en sentido longitudinal sobre uno de los lados cortos y en el opuesto se ha restringido el movimiento en este sentido.

En todos los casos se ha producido un desplazamiento de 0,5 mm, y se han obtenido las curvas a distintas velocidades variando el vector de tiempo de la carga y el tiempo de solución. Para definir correctamente la curva se ha señalado antes de realizar la solución que se guarden 100 pasos temporales para el postprocesador histórico, pues para obtener la curva será muy útil el uso de este postprocesador.

En función del tiempo indicado se han realizado las simulaciones a distintas velocidades de deformación, un total de doce, con los siguientes valores: $4 \cdot 10^{-4}$ 1/s, $2 \cdot 10^{-3}$ 1/s, $4 \cdot 10^{-3}$ 1/s, $1 \cdot 10^{-2}$ 1/s, $2 \cdot 10^{-2}$ 1/s, $4 \cdot 10^{-2}$ 1/s, $8 \cdot 10^{-2}$ 1/s, $2 \cdot 10^{-1}$ 1/s, $4 \cdot 10^{-1}$ 1/s, 2 1/s, 4 1/s, 8 1/s.

Tras obtener la solución, en este caso no se ha utilizado el postprocesador general sino el histórico (TimeHist Postpro). Con este postprocesador se obtienen series de datos correspondientes a los sucesivos pasos temporales guardados. En este caso los datos de interés son la tensión, la deformación elástica y la deformación plástica. Se obtienen siguiendo los siguientes pasos:

- Se pulsa el botón con un símbolo + en verde.
- Aparece una lista igual a la que se ve en el postprocesador general, donde seleccionamos el dato que nos interese.
- A continuación se indica el nodo para el que se van a obtener los datos, en este caso un nodo de la zona central de la probeta, y se asigna un nombre a la serie.
- Por último se pulsa el botón donde aparece una lista,  , para obtener el archivo de texto con la serie de datos seleccionada.

Una vez obtenidos los archivos de datos para las distintas velocidades, se han sumado las deformaciones y enfrentado con la tensión para obtener las curvas en Microsoft Excel.

5.5 Automatización de tareas

Ansys permite la realización de tareas introduciendo los pasos mediante parámetros más básicos. Este aspecto proviene del origen del programa, pero desde que implantaron un entorno gráfico, éste es el que traduce lo que hacemos en él a estas órdenes básicas.

Para insertar órdenes una a una se emplea la barra de texto que aparece en la parte superior, pero este aspecto no es muy útil. La utilidad que presentan actualmente las órdenes a través de texto es el poder reunir una serie de tareas rutinarias en un archivo de texto que podemos cargar desde:

File > Read input from...

Y que éstas se ejecuten de forma automática sin necesitar de intervención, nada más que para analizar algunos mensajes de aviso que pueden aparecer, ahorrando mucho tiempo.

Una forma de redactar estos conjuntos de órdenes es mirar el manual de Ansys Ls-Dyna para órdenes por texto. Esta forma puede resultar bastante costosa si no se tiene costumbre de utilizar Ansys Ls-Dyna con órdenes por texto. El entorno gráfico habitual, como se ha dicho, traduce a comandos textuales las órdenes que ejecutamos en éste, es decir, escribe las órdenes en forma de texto, y se puede acceder a todo el conjunto de ordenes escritas mediante la ruta:

List > Files > Log File...

En este documento aparecen todas las órdenes ejecutadas en el programa. Para realizar el texto para automatizar tareas, lo que se debe hacer es realizar la tarea que queremos ejecutar gran número de veces y tomar del "Log File" (Archivo de registro) el texto que podemos cargar una y otra vez. Para saber cual es el texto que corresponde al proceso que se quiere repetir, se debe mirar antes de empezar el archivo de registro y apuntar las últimas órdenes escritas, para saber donde empieza la rutina que se quiere guardar. Tras realizar la tarea rutinaria se volverá al archivo de registro y se copiará el texto tras el punto que se había marcado anteriormente, después se pegará en un documento de texto simple, al que se le dará el nombre deseado y ya estará listo para su uso como entrada del programa para realizar una serie de tareas.

En el desarrollo de las simulaciones de este proyecto se ha utilizado este método para la selección de los nodos tras cada simulación para tomar los datos de desplazamiento, pues en todas las simulaciones se elegían los mismos nodos y su selección era bastante pesada. Con el sencillo texto que aparece a continuación se seleccionan de forma prácticamente instantánea los dieciséis nodos que se utilizan en la media de la profundidad.

```
FLST, 5, 16, 1, ORDE, 16
FITEM, 5, 19324
FITEM, 5, 19327
FITEM, 5, 19330
FITEM, 5, 19381
FITEM, 5, 19387
FITEM, 5, 19438
FITEM, 5, 19441
FITEM, 5, 19444
FITEM, 5, 19994
FITEM, 5, 20025
FITEM, 5, 20070
FITEM, 5, 20077
FITEM, 5, 20206
FITEM, 5, 22057
FITEM, 5, 22082
FITEM, 5, 22211
NSEL, S, , , P51X
```

También se utilizó otra rutina que ahorra mucho más trabajo, esta es la que realiza los pasos necesarios para el análisis implícito excepto ejecutar la solución. Resulta mucho más sencillo y rápido realizarlo de esta forma sin tener que cargar la geometría, aplicar cargas y cargar las tensiones, además de la realización de todos los demás pasos. Al aplicarse las mismas cargas, en los mismos nodos en todos los casos este paso no presenta problemas, igual que en el caso de la definición del material de la chapa, pero sí presentan problemas los pasos en los que hay que cargar datos de la solución explícita. La solución de este problema está en cambiar el nombre del archivo *.rst que se va a cargar para cada simulación en el texto de la rutina. Así para realizar la simulación implícita se siguen los siguientes pasos (Como ejemplo los archivos de la solución explícita se denominarán con el nombre Explicito):

- Cargar el archivo Explicito.db (mediante **File > Resume From...**)
- Cambiar el nombre del proyecto (mediante **File > Change Jobname...**)
- Colocar en el texto de la rutina el nombre del archivo de la solución explícita (en este caso Explicito, en negrita) en los lugares donde está puesto en la rutina que aparece a continuación, que ha sido utilizada y a continuación cargarla mediante **File > Read input from...**

```
!*
/PREP7
ETCHG,ETI
!*
!*
MPDE,ALL,1
TBDE,ALL,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7.8e-6
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,210000
MPDATA,PRXY,1,,0.29
SHPP,OFF
!*
UPGEOM,1, LAST, LAST, 'Explicito', 'rst', ' '
!*
ESEL,S,MAT,,1
FLST,2,6,1,ORDE,6
FITEM,2,19565
FITEM,2,-19566
FITEM,2,19673
FITEM,2,19694
FITEM,2,21224
FITEM,2,21902
!*
/GO
D,P51X,,0,,,,,UZ,,,,,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,19384
!*
/GO
D,P51X,,0,,,,,UX,UY,,,,,
RIMPORT,DYNA,STRESS,ELEM, LAST, LAST, 'Explicito', 'rst', ' ', , ,
!*
FINISH
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
```

- Ejecutar la solución (mediante **Solution > Solve > Current Ls**)



6. RESULTADOS

6.1 Profundidades

6.1.1 Profundidad de la pieza real

Para ajustar los parámetros del modelo es necesaria una referencia del modelo real. En este caso la magnitud más característica del proceso es la profundidad que se obtiene en la geometría final, indicada en la Imagen 6.1, medida desde el plano superior de la pieza al plano inferior que resulta del proceso de deformación plástica.

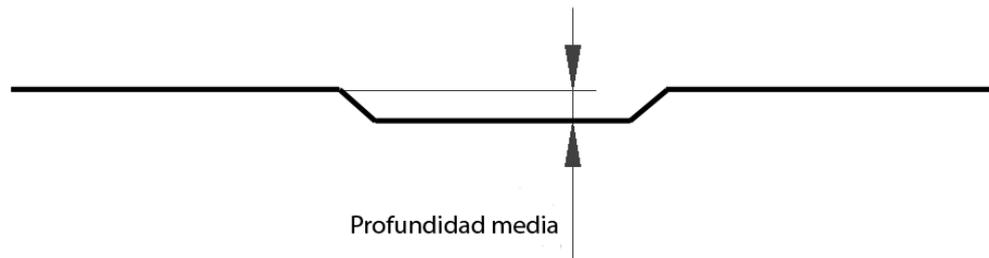


Imagen 6.1: Vista lateral de la pieza con cota para profundidad final.

El escaneo de la pieza se ha realizado sobre la línea central longitudinal de la pieza. Los puntos escaneados que corresponden al plano superior no tienen exactamente la misma cota vertical (z) puesto que se trata de una pieza real, lo mismo ocurre con el plano inferior. Por esta razón se debe realizar una media de la diferencia de cotas en algunos puntos de ambas superficies y hallar una profundidad media. En la Imagen 6.2 se pueden ver los puntos del escaneo seleccionados y a continuación la Tabla 6.1 en la que se presenta la profundidad media. Los círculos concéntricos de puntos son los dos bordes que quedan en la deformada de la pieza tras la embutición, así se observa que se han tomado seis puntos en el fondo de la pieza y otros seis, tres a cada lado, en la superficie.

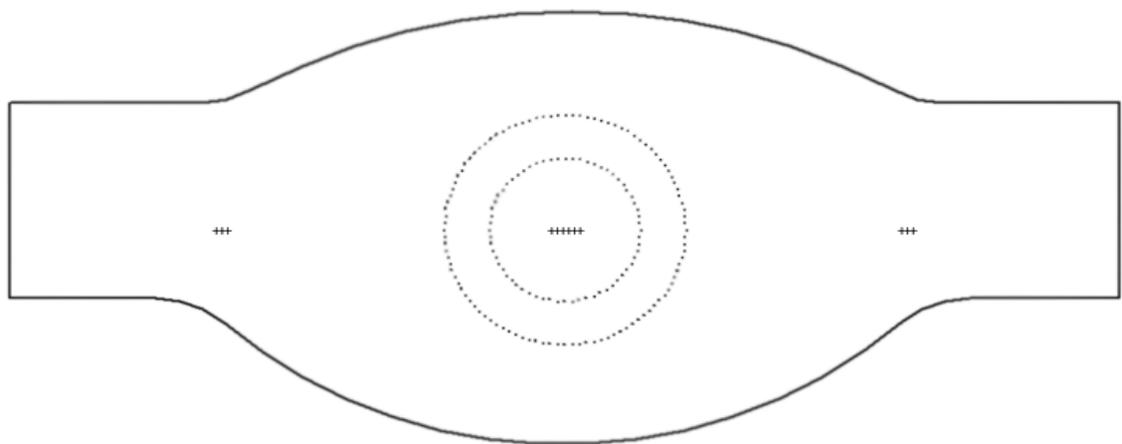


Imagen 6.2: Vista superior con keypoints utilizados.

Centro [mm]		Superficie [mm]		Diferencia [mm]
Keypoint 619	18,0815	Keypoint 565	2,2335	15,8479
Keypoint 620	18,0765	Keypoint 566	2,2420	15,8345
Keypoint 621	18,0695	Keypoint 567	2,2515	15,818
Keypoint 622	18,0805	Keypoint 697	2,1561	15,9244
Keypoint 623	18,0815	Keypoint 698	2,1556	15,9259
Keypoint 624	18,0875	Keypoint 699	2,1545	15,9329
Media				15,8806

Tabla 6.1: Cotas de los keypoints escaneados y resultado de profundidad media.

6.1.2 Profundidad de la pieza simulada

Para la comparación con los resultados de la simulación en Ansys Ls-Dyna, hay que realizar un promedio de las diferencias de unos determinados puntos, situados aproximadamente en la misma posición que los escogidos en la pieza real. Al utilizarse el mismo mallado para todas las simulaciones, los nodos que se muestran en la Imagen 6.3 serán los que se utilicen en todos los modelos de material.

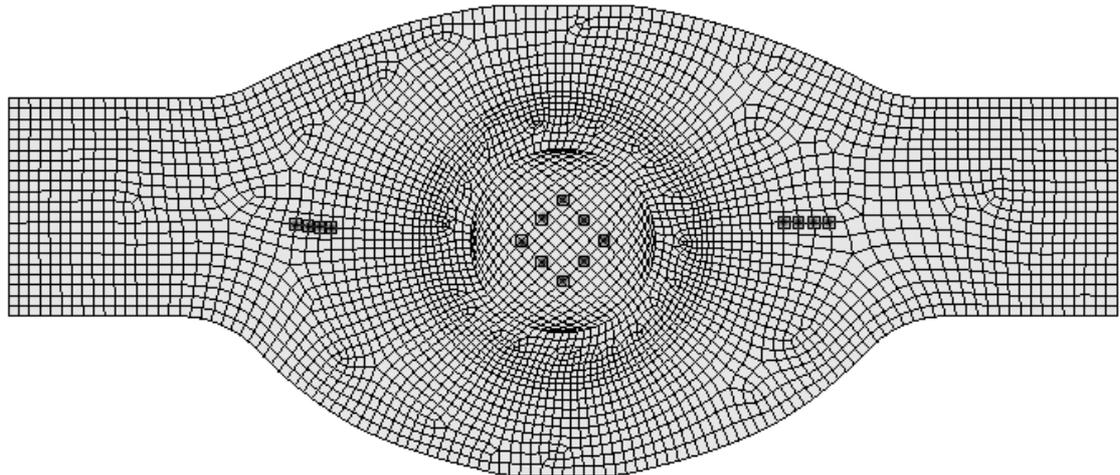


Imagen 6.3: Vista superior con nodos utilizados.

6.2 Modelo cinemático plástico

6.2.1 Parámetros utilizados

Los parámetros básicos del material: densidad, modulo elástico y modulo de Poisson; se conservaran constantes con valores típicos de un acero, pues no se espera que el acero utilizado en la pieza real sea muy distinto en cuanto a estas propiedades.

$$\text{Densidad} = 7800 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Modulo elástico} = 210000 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulo de Poisson} = 0.29$$

Los restantes parámetros definen el comportamiento plástico del material. Por un lado se encuentran los parámetros que definen la curva tensión-deformación, el límite elástico y el módulo tangente, que serán los parámetros más útiles para el ajuste del modelo. Por otro lado están los parámetros del modelo de Cowper-Symonds, que definen el comportamiento del material en función de la velocidad de deformación.

Los parámetros correspondientes a la velocidad de deformación se han mantenido constantes, con los valores indicados en el ejemplo de parámetros de acero 1018 que se presenta en el manual de Ls-Dyna.

$$C = 40 \text{ s}^{-1}$$

$$P = 5$$

Variando estos dos parámetros se puede cambiar el comportamiento respecto a la velocidad de deformación del material, con un crecimiento en la zona elástica conforme aumenta la velocidad de deformación. Este modelo simula el endurecimiento del material con la velocidad de deformación elevando el límite elástico al aumentarse la velocidad de deformación. Para variar los parámetros del modelo de Cowper-Symonds hay que tener en cuenta que cada uno de ellos produce un efecto distinto. Al incrementar el parámetro C disminuye el límite elástico y al incrementar el parámetro P aumenta el límite elástico para una velocidad de deformación dada.

Estas variaciones se pueden observar en las pruebas realizadas variando los parámetros cuyos resultados se muestran en las tablas 6.2 y 6.3.

Parámetro C [s ⁻¹]	Parámetro P []	Profundidad [mm]
10	5	15,8407
40	5	15,8805
100	5	15,9192

Tabla 6.2: Profundidades en función del parámetro C.

Parámetro C [s ⁻¹]	Parámetro P []	Profundidad [mm]
40	3	15,8974
40	5	15,8805
40	7	15,8325

Tabla 6.3: Profundidades en función del parámetro P.

Si se comparan los resultados para una variación de un 250% del parámetro C (C=40, C=100) con el resultado de una variación de un 233% del parámetro P (P=3, P=7), se observa que en el primer caso la diferencia de profundidad es de 0,0387 mm mientras en el segundo la variación es mayor, de 0,0649 mm. Estos datos indican una diferencia de la solución, en el caso de variar P, 1,7 veces la diferencia obtenida con un porcentaje similar de variación del parámetro C. Es importante

indicar que dada la no linealidad de este modelo de sensibilidad a la velocidad, no se conservará esta relación en cualquier rango de valores de P y C. La diferencia de sensibilidad del modelo a uno y otro parámetro proviene de la posición de éstos en la fórmula de Cowper-Symonds; el parámetro P se sitúa en el denominador del exponente, lo que le provoca que su variación afecte de manera significativa al valor del límite elástico, el cual repercutirá en la profundidad final obtenida.

El parámetro de endurecimiento, β , tiene relación con el tipo de endurecimiento que sufre el material al deformarse plásticamente. El endurecimiento puede ser de dos tipos: cinemático o isotrópico. La diferencia entre ambos modos se encuentra en el modo de interpretar la plastificación en base a la superficie de plastificación definida por las tensiones principales. En el caso cinemático, correspondiente al valor de β igual a cero, cuando la tensión supera el criterio de plastificación tras la descarga, la superficie de plastificación mantiene su radio pero mueve su centro. Por el contrario en el caso isotrópico, con valor de β igual a uno, el centro de la superficie de plastificación se mantiene pero su radio aumenta en función de la deformación plástica. El efecto de este parámetro es notable cuando la simulación cuenta con varios pasos, es decir se plastifica varias veces el material. Se realizó una prueba con el modelo con el parámetro de endurecimiento igual a cero y otra con el parámetro de endurecimiento igual a 0,3 [23], que será el valor que se tome para el resto de simulaciones; el resultado de la comparación fue que no había ninguna diferencia en el resultado de la profundidad, resultado esperado pues el material solo plastifica una vez en este proceso.

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p) \quad \text{Expresión 6.1}$$

$$E_p = \frac{E_t E}{E_t + E} \quad \text{Expresión 6.2}$$

Por otra parte también se ha observado que el parámetro β tiene poca influencia en la fórmula del modelo de Cowper-Symonds (Expresión 6.1) si el valor del módulo plástico de endurecimiento (Expresión 6.2) no es lo suficientemente grande como para que el termino dependiente de β sea del orden de magnitud del límite elástico inicial; a su vez el módulo plástico de endurecimiento depende principalmente del valor del módulo tangente, luego se puede decir que la dependencia de la influencia del parámetro β esta ligada al valor del modulo tangente, con un módulo tangente bajo tendrá poca influencia, mientras que con un módulo tangente alto su influencia será importante. En este caso el modulo tangente es bastante bajo en comparación con el límite elástico luego la influencia si se volviera a plastificar sería baja.

El módulo tangente influye en la recuperación del material, pues con mayor módulo tangente las tensiones serán mayores y por tanto la recuperación elástica será mayor. Tras algunas simulaciones con distintos valores de este parámetro se ha observado que módulos tangentes mayores de 25000 MPa provocaban arrugamientos en la chapa visibles en la deformada. También se observó que con módulos tangentes mayores de 3000 MPa las tensiones crecen hacia valores no admisibles para el acero que se esta tratando, por encima de 1000 MPa. Se escogió un valor del módulo tangente de 2000 MPa que ha dado buen resultado en las simulaciones, tanto por las tensiones alcanzadas como por la recuperación obtenida.

6.2.2 Resultado de la simulación

Mediante distintas simulaciones se ha ajustado el valor del límite elástico, pues es el parámetro con el que mejor se puede variar la recuperación del material para adaptarla a los resultados obtenidos para la profundidad tras el conformado. A mayor limite elástico se obtiene una deformación plástica menor con la consiguiente mayor recuperación elástica y por tanto una

profundidad de embutición final inferior a lo deseado. Por otra parte reduciendo el límite elástico se consigue justamente un efecto contrario. A continuación en la Tabla 6.4 se pueden ver los distintos valores que toma la profundidad media con algunos valores del límite elástico.

Límite elástico [MPa]	Profundidad [mm]
220	15,92
230	15,8982
237	15,8805
245	15,8383
250	15,8246

Tabla 6.4: Profundidades en función del límite elástico.

Como se puede ver, el valor de límite elástico con el que se obtiene un ajuste con muy poco error, del orden de 10^{-4} mm, respecto al resultado de la profundidad real es 237 MPa.

En la tabla 6.5 se resumen los parámetros que definen completamente el modelo de material con el mejor ajuste.

Parámetro	Valor
Densidad	$7,8 \cdot 10^{-6}$ Kg/mm ³
Módulo elástico	210000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,29
Límite elástico	237 Mpa
Parámetro de endurecimiento β	0,3
Parámetro C de Cowper-Symonds	40 s ⁻¹
Parámetro P de Cowper-Symonds	5

Tabla 6.5: Parámetros utilizados.

Todas las simulaciones que se realizaron para ajustar estos parámetros están realizadas mediante un procedimiento *explícito a implícito*, es decir la solución se compone de dos partes, una primera parte en modo explícito para el proceso dinámico de descenso del punzón y una segunda parte en modo implícito en la que se calcula la recuperación elástica de la pieza.

Un modo más sencillo de conseguir una solución, aunque más largo en tiempo de cálculo y menos preciso, es realizar una simulación del proceso completo en modo explícito. Para obtener una idea de la diferencia de resultado obtenida con ambos procedimientos, se ha realizado una simulación completa en modo explícito con los mismos parámetros del material. La profundidad media obtenida de este modo es 15,5826 mm, lo que significa una diferencia de un 1,9% con el modelo real y la simulación con el procedimiento *explícito a implícito*.

6.3 Modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación

6.3.1 Parámetros utilizados

Para este modelo, como para los restantes, se utilizarán datos del material a partir de el ajuste obtenido para el modelo cinemático plástico.

Los tres primeros parámetros que definen propiedades básicas del material: densidad, módulo elástico y coeficiente de Poisson; son iguales que en el caso anterior.

La dependencia con la velocidad de deformación en este modelo se indica mediante distintas curvas que definen el comportamiento del material en cualquier situación. La primera de ellas indica el límite elástico del material respecto a la velocidad de deformación, cumpliendo la misma función que el modelo de Cowper-Symonds en el modelo cinemático plástico. Para esta simulación se ha obtenido la curva de varios ensayos de tracción simulados en Ansys Ls-Dyna con distintas velocidades de deformación. El resultado de la curva se puede ver en la Imagen 6.4.

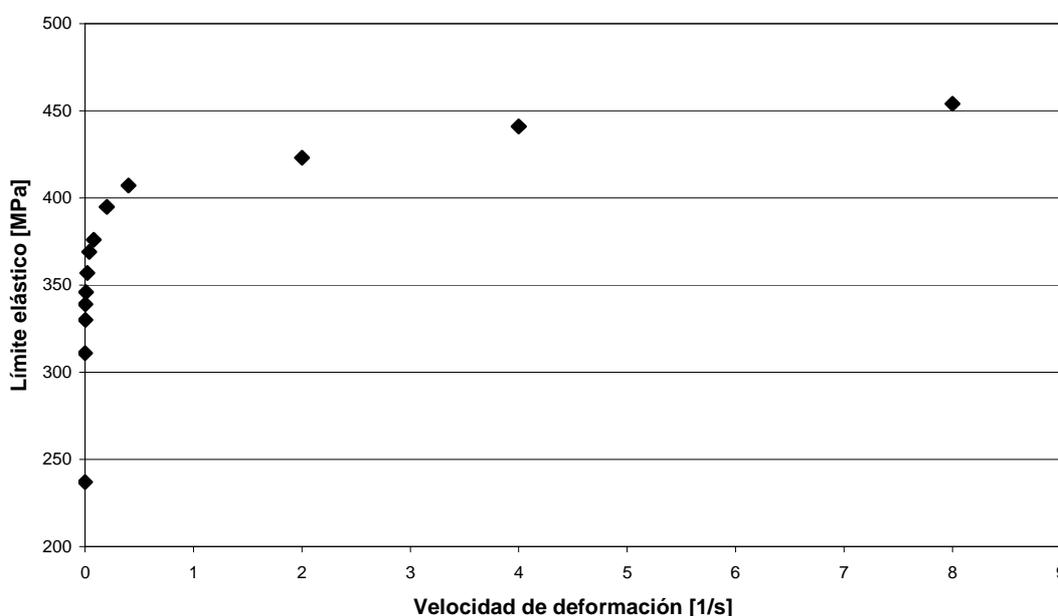


Imagen 6.4: Límite elástico respecto a velocidad de deformación.

Las otras dos curvas que definen el comportamiento del modelo de material expresan la dependencia del módulo elástico y del módulo tangente con la velocidad de deformación. Estas curvas pueden ser de gran utilidad si se conoce el comportamiento del material en base a ensayos reales, pues se conseguirá definir el material de forma muy precisa. En el caso de esta simulación, al obtenerse los datos de un modelo en el que los módulos elástico y tangente no tienen dependencia con la velocidad de deformación, el uso de estas curvas se puede evitar ya que el módulo elástico constante ya está definido en los parámetros iniciales, y el modelo presenta un campo en el que podemos asignar un módulo tangente constante. En este caso se ha asignado el valor de módulo tangente 2000 Mpa constante, al igual que en el primer modelo. Se han realizado simulaciones con curvas que varían estos parámetros para comprobar su funcionamiento.

6.3.2 Resultado de la simulación

Mediante un procedimiento *explícito a implícito* se ha simulado el proceso de conformado con el modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación y los parámetros mencionados, dando como resultado una profundidad media de 15,7132 mm, una diferencia de un 1,1% respecto de la simulación con el modelo cinemático plástico. En este resultado se observó que la parte implícita del análisis no convergió, es decir no llegó a una solución completa, pero se observó que los residuos F L2 y M L2 eran cercanos a 10^{-1} , que es el criterio de convergencia, y la tendencia observada en estos residuos, de las soluciones no convergidas, era claramente descendente de forma lineal. Para intentar solucionar este error se intentó utilizar el factor de estabilización [24], con distintos valores de multiplicación de la rigidez para estabilizar el cálculo y favorecer la convergencia; no se consiguió una convergencia en ninguno de los casos. Se usaran los resultados no convergidos pues se ha observado que la deformada es perfectamente válida y si se observa la profundidad media obtenida (en cualquiera de los casos de no convergencia), el valor no dista mucho del obtenido en soluciones que han convergido y por tanto el error es pequeño.

Para observar el comportamiento del modelo ante las variaciones se realizaron cambios en el parámetro principal del modelo, la curva límite elástico frente a velocidad de deformación. Estos cambios consisten en la variación de los límites elásticos de la curva reduciéndolos en un porcentaje, manteniendo el valor para velocidad de deformación cero, como se muestra en la Imagen 6.5.

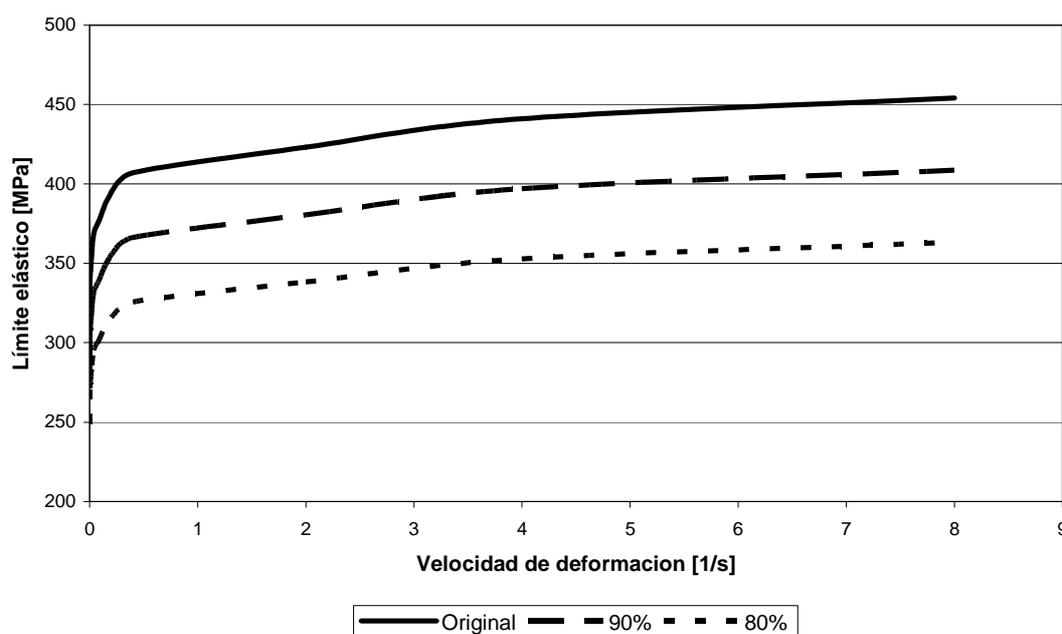


Imagen 6.5: Curvas del límite elástico 80% y 90%.

Se observa con estos cambios pequeñas variaciones en el resultado de la profundidad final de la pieza, como se muestra en la Tabla 6.6. Cuanto mayor es el aplanamiento de la curva, la recuperación es menor, se consigue el mismo efecto que se describía para el modelo cinemático plástico al reducir el límite elástico.

Factor multiplicador del límite elástico	Profundidad [mm]
0,8	15,7871
0,9	15,6797
1	15,7132

Tabla 6.6: Profundidad con las distintas curvas.

Un efecto interesante observado es que, en los casos mencionados en la Tabla 6.6, la parte implícita de la simulación si converge, esto explica la incoherencia de que la curva al 90% de un resultado con una recuperación mayor que la obtenida con la curva inicial. A su vez da una idea de que el error cometido al no converger la solución es pequeño, en torno a 0,1 mm si se tiene en cuenta la tendencia de las que si han convergido.

En otra simulación se ha aplicado una curva para simular la variación del módulo tangente con la velocidad de deformación. No se han podido obtener referencias de la variación de este parámetro en un acero, pero se ha observado en curvas a alta velocidad de deformación que el modulo tangente crece bastante poco con la velocidad de deformación. En este caso se aplica la curva que se ve en la Imagen 6.6. La evolución se ha considerado de ese tipo por que se ha observado que otros parámetros evolucionan de ese modo.

0.0004	2000.0
0.002	2339.3
0.004	2500.0
0.01	2625.0
0.02	2821.4
0.04	3035.7
0.08	3160.7
0.2	3500.0
0.4	3714.3
2	4000.0
4	4321.4
8	4553.6

Imagen 6.6: Curva del módulo tangente en función de la velocidad de deformación.

El resultado que se ha obtenido con esta curva aplicada al modelo ha sido bastante ajustado al resultado obtenido con el modelo cinemático plástico, con un resultado de profundidad tras la recuperación de 15,8474 mm.

La curva de variación del modulo elástico se ha aplicado pese a tener referencias de pruebas realizadas en aceros a velocidades de 2000 deformaciones/segundo en las que varia muy poco, por lo que se espera poca variación en esta simulación. El módulo elástico decrece con la velocidad de deformación, según lo observado en estas mismas pruebas, por ello se ha realizado una curva en la que el módulo elástico varia muy poco en sentido descendente, siguiendo la misma dependencia con la velocidad de deformación que las curvas anteriores, como se puede ver en la Imagen 6.7.

El resultado de profundidad tras la simulación obtenido ha sido de 15,7132 mm, resultado cercano a los obtenidos con otros modelos, lo que nos indica que acepta correctamente la curva en la simulación.

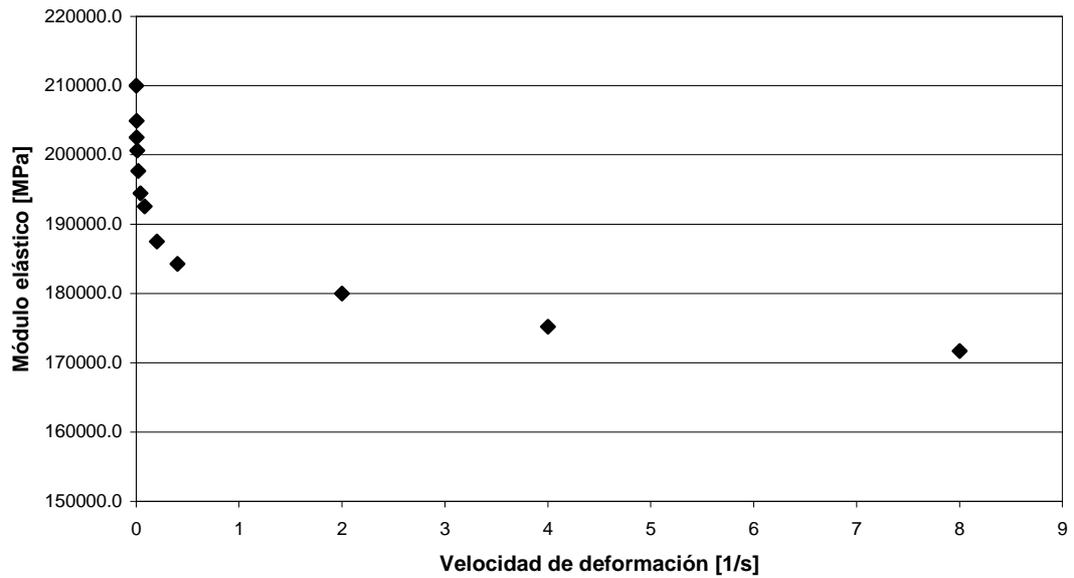


Imagen 6.7: Curva del módulo elástico en función de la velocidad de deformación.

Al igual que en el caso del modelo cinemático plástico, se ha realizado una simulación completa en modo explícito con la curva obtenida del modelo ajustado. El resultado de la profundidad es 15,4973 mm, es decir un 2,5% respecto a la pieza real y un 0,5 % respecto a la solución completamente explícita del modelo cinemático plástico ajustado.

6.4 Modelo piecewise linear isotropic modo I

El modelo de material piecewise linear permite definir el material de tres formas distintas, validas igualmente para todos los casos, pero cada una de ellas puede resultar más favorable en función de los datos del material de los que se disponga. Los tres modos se nombraran como I, II y III.

6.4.1 Parámetros utilizados

Para esta primera definición del modelo de material se utilizan tan solo dos parámetros y una curva, además de los tres parámetros básicos del material (densidad, módulo elástico y coeficiente de Poisson).

Los dos parámetros escalares que hay que definir son los correspondientes al modelo de Cowper-Symonds de límite elástico dependiente de la velocidad de deformación. Para esta simulación se han mantenido los mismos valores que para el modelo original ($C=40 \text{ s}^{-1}$; $P=5$).

La curva necesaria es una que defina la tensión en el material en función de la deformación plástica sufrida. Esta curva se intentó obtener de una simulación de ensayo de tracción en Ansys Ls-Dyna con el modelo ajustado cinemático plástico, pero para que la velocidad de deformación no influyera (la curva necesaria es la del caso estático) el tiempo de simulación resultó demasiado largo y aumentar el paso temporal hubiera disminuido la precisión; se decidió el uso de la curva teórica estática, es decir, la curva con límite elástico 237 MPa y un modulo tangente de 2000 MPa. La curva obtenida se puede ver en la Imagen 6.8.

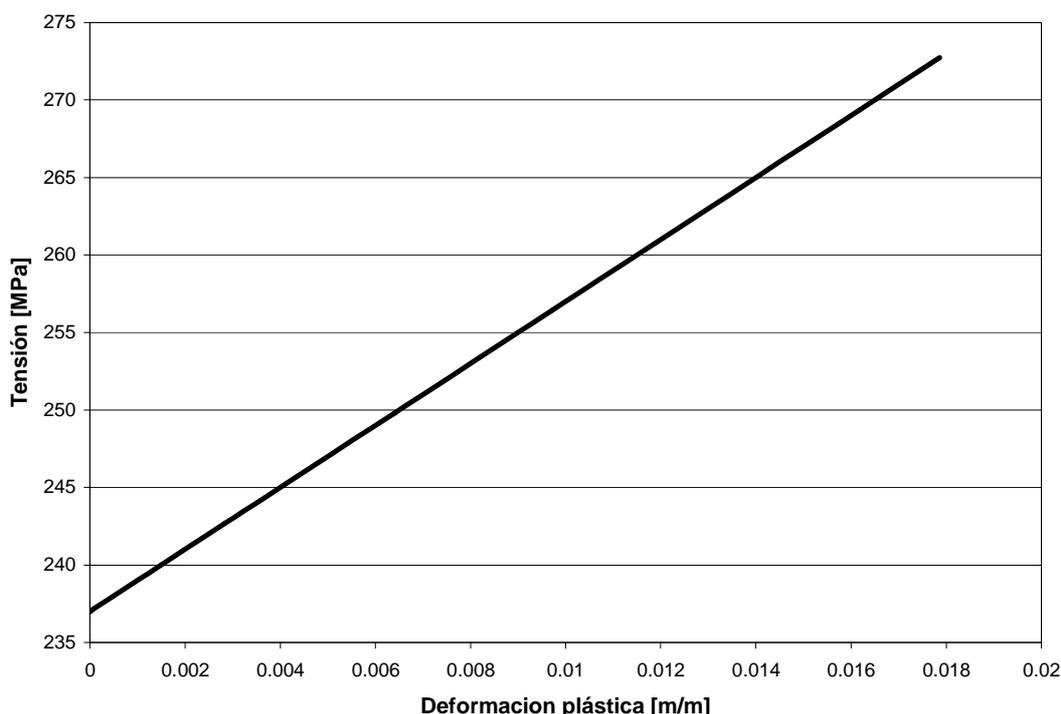


Imagen 6.8: Curva de tensión respecto deformación plástica.

La curva cumple la función de definir el comportamiento a baja velocidad de deformación del material, al igual que se hacia en el modelo cinemático plástico con los parámetros de límite elástico y módulo tangente.

Esta curva es más sencilla de aplicar en el caso de disponer de muestras del material y poder realizar ensayos de tracción con los que definir una curva real, así esta curva puede obtenerse

experimentalmente de un ensayo a baja velocidad de deformación, para un resultado más ajustado a la realidad.

6.4.2 Resultado de la simulación

La simulación con el procedimiento *explícito a implícito* ha presentado el mismo problema que la simulación con el modelo de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación, la parte implícita de la simulación no converge, por lo que ya se sabe que se ha cometido un error adicional. El resultado de profundidad con esta simulación es de 15,8888 mm, es decir una diferencia de un 0,05% con la pieza real.

Para variar el resultado con este modelo se pueden modificar los parámetros del modelo de Cowper-Symonds al igual que en el modelo cinemático plástico. Por otra parte también se puede modificar la curva por dos métodos, uno modificando los valores de tensión de la curva y otro cambiando los valores de deformación plástica. Al reducir el valor de la tensión para los mismos valores de deformación plástica se consigue una reducción en la recuperación, por el contrario si se aumentan los valores tensión aumenta la recuperación. En los datos que se presentan en la Tabla 6.7 se puede observar este efecto, utilizando las curvas que se muestran en la Imagen 6.9.

Factor multiplicador de la tensión	Profundidad [mm]
0,9	15,9108
1	15,8888
1,1	15,8484

Tabla 6.7: Profundidad para tensiones al 90%, 100% y 110%.

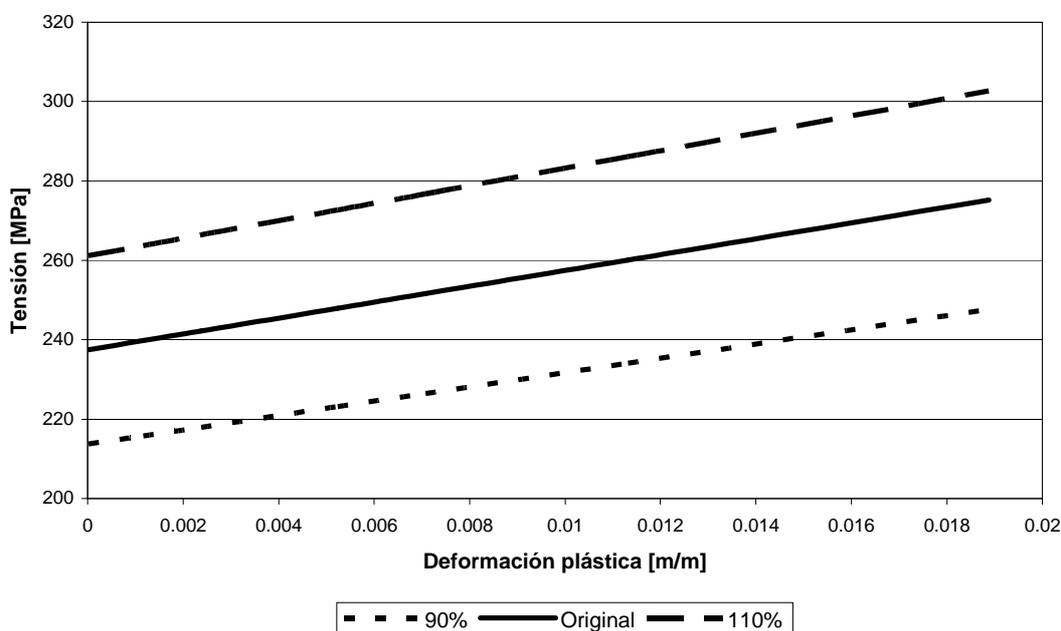


Imagen 6.9: Curvas de tensión respecto a deformación plástica.

El otro modo de variar el comportamiento del material a través de la curva es cambiar las deformaciones. Si se aumentan las deformaciones plásticas manteniendo la tensión se traduce en una menor recuperación, pues para un valor dado de deformación la tensión es menor y por tanto la

recuperación elástica es menor. En la Tabla 6.8 se ven dos resultados con los valores de deformación plástica cambiados por encima y por debajo del normal.

Factor multiplicador de la deformación	Profundidad [mm]
0,95	15,9088
1	15,8888
1,05	15,8653

Tabla 6.8: Profundidad obtenida para valor curvas del 95 % y 105 %.

La simulación completamente explícita ha dado como resultado 15,4837 mm una diferencia respecto a la pieza real de un 2,6 % y respecto al resultado explícito del primer modelo un 0,6 %.

6.5 Modelo piecewise linear isotropic modo II

6.5.1 Parámetros utilizados

Los parámetros específicos de este modelo son: la curva de tensión frente a deformación plástica y la curva que escala ésta con respecto a la velocidad de deformación. La primera curva se trata exactamente de la misma que se ha utilizado en el modelo anterior.

La segunda curva cumple la misma función que el modelo de Cowper-Symonds en el modo anterior, elevando las tensiones para una misma deformación al incrementarse la velocidad de deformación. Se ha obtenido el límite elástico de las distintas curvas, obtenidas en la simulación de ensayo de tracción en Ansys Ls-Dyna con el modelo cinemático plástico, utilizando el valor que deja una deformación plástica del 0,2%, trazando una recta paralela a la zona elástica en el diagrama tensión-deformación por este valor de deformación hasta la intersección con la curva, en ese punto se toma el valor del límite elástico. Con los valores de límite elástico para cada velocidad de deformación, se dividen éstos entre el límite elástico del material en la curva estática (237 MPa), y éstos valores son los que forman la curva utilizada que se muestra en la Imagen 6.10.

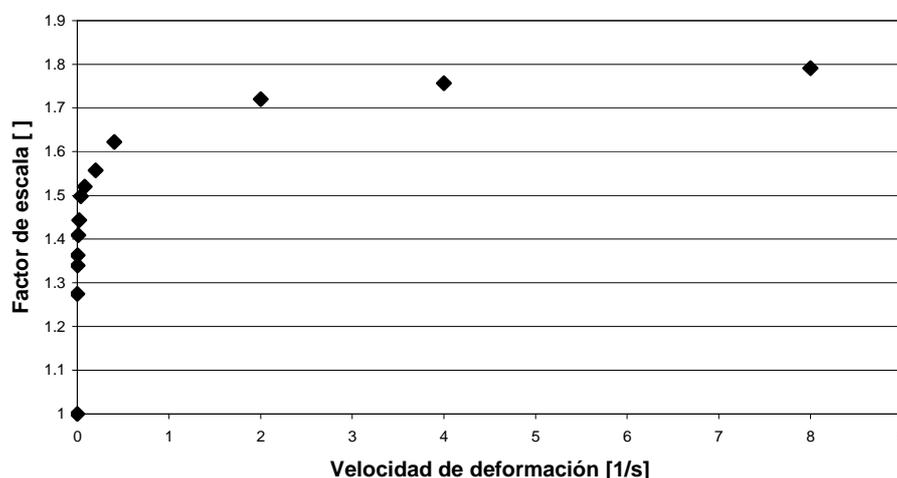


Imagen 6.10: Curva que escala tensión en función de la velocidad de deformación.

6.5.2 Resultado de la simulación

En este caso el procedimiento *explícito a implícito* no ha presentado ningún problema, la parte implícita ha convergido correctamente, por lo que se espera un error solo debido al cambio de modelo utilizado.

El resultado de esta simulación ha sido una profundidad de 15,9838 mm. Se observa una recuperación menor, pero la diferencia en profundidad es un 0,65 % respecto a la pieza real, lo que es bastante poco.

Las dos opciones que se presentan para modificar este resultado son por una parte, igual que en el modo I del modelo, variar la curva de tensión frente a deformación plástica y por otra parte modificar la dependencia con la velocidad mediante la curva que escala la primera. Con esta segunda opción si aumentamos los valores de la curva, el incremento de la tensión con la velocidad será mayor y se conseguirá una recuperación mayor al obtenerse tensiones más altas. El efecto contrario se obtiene reduciendo los factores que escalan la curva.



Una simulación del proceso totalmente explícita ha dado como resultado una profundidad de 15,4132 mm, una diferencia de un 3 % con el modelo real y un 1.1 % respecto a la simulación explícita del modelo cinemático plástico.

6.6 Modelo piecewise linear modo III

6.6.1 Parámetros utilizados

En este modo aparte de los parámetros básicos, el resto del modelo se define mediante curvas de tensión frente a deformación plástica efectiva a distintas velocidades de deformación. El máximo que permite el modelo es de diez curvas, las tensiones para velocidades intermedias se interpolan a partir de las definidas. En la Imagen 6.11 se pueden ver las curvas utilizadas. Las velocidades de deformación simuladas en el ensayo van desde 0.0004 s^{-1} a 8 s^{-1} , al observarse que las velocidades de deformación se encuentran en este rango, con una velocidad de deformación máxima de $1,92 \text{ s}^{-1}$.

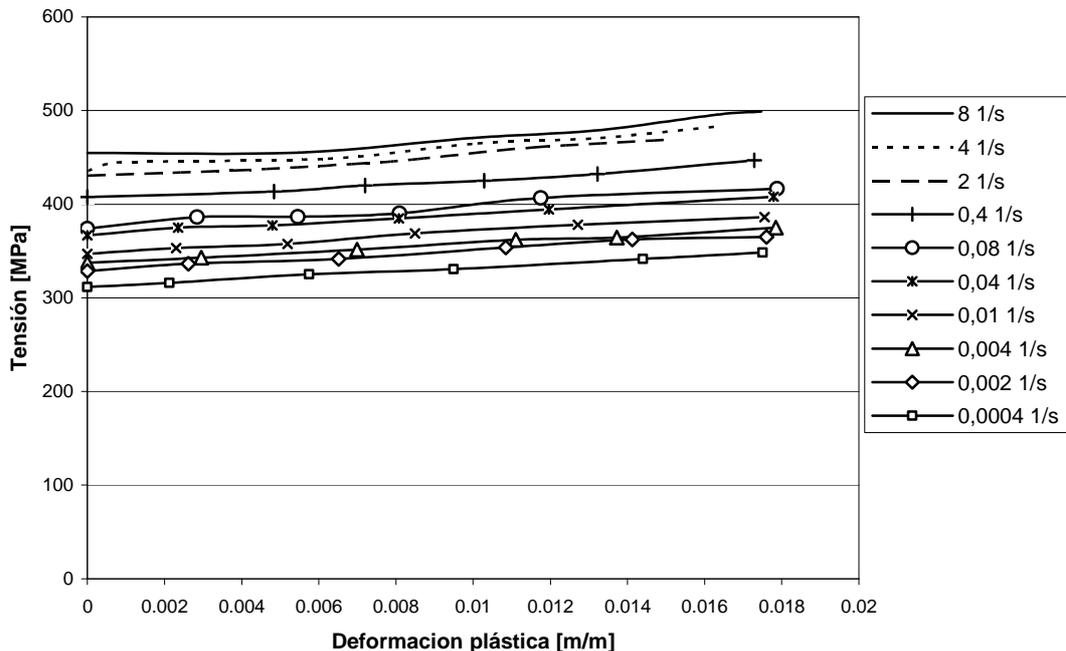


Imagen 6.11: Curvas de tensión frente a deformación plástica.

Con este modo es muy sencillo trasladar datos experimentales al modelo, simplemente hay que crear en Ansys Ls-Dyna las curvas obtenidas en el ensayo y relacionarlas, al definir el modelo, con su correspondiente velocidad de deformación.

6.6.2 Resultados de la simulación

Tras realizar la simulación con el procedimiento *explícito a implícito* y las curvas obtenidas de las simulaciones de ensayo de tracción se obtiene una profundidad de 15,8791 mm, es decir un resultado prácticamente igual al real y al obtenido con el modelo cinemático plástico, con un error de 10^{-3} mm.

Si con este modelo se quiere modificar la recuperación, resulta bastante complicado pues para ser coherente hay que variar los valores de diez curvas; aunque por otra parte resulta más intuitivo el efecto de los cambios, pues se están modificando las curvas de tensión frente a deformación plástica que dan una idea del efecto sobre la recuperación a las distintas velocidades. Si hacemos crecer las tensiones de las curvas se tendrá una recuperación mayor y viceversa.



Este modelo permite también que se aplique a un material con distinta dependencia de la velocidad de deformación, pues se definen curvas específicas para distintas velocidades de deformación.

La simulación completamente explícita da un resultado 15,7659 mm, es la más cercana, de las simulaciones completamente explícitas, a la pieza real, con un error de un 0,73 %.

6.7 Modelo de Johnson-Cook

6.7.1 Parámetros utilizados

Este último modelo de material es ampliamente utilizado en la simulación mediante elementos finitos en ingeniería, porque permite que se defina un modelo, que tiene en cuenta la velocidad de deformación y la temperatura, con pocos parámetros que se encuentran documentados para un gran número de materiales.

Aparte de los tres parámetros básicos del material el modelo se define principalmente por los parámetros A, B, C, n y m, que se sitúan en la Expresión 6.3, fórmula que define el modelo.

$$\sigma_y = \left(A + B\bar{\epsilon}^p \right) \left(1 + C \ln \dot{\epsilon}^* \right) \left(1 - T^{*m} \right) \quad \text{Expresión 6.3}$$

Donde: $\bar{\epsilon}^p$ = Deformación plástica efectiva

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0}$$

$$T^* = \frac{T - T_{\text{ambiente}}}{T_{\text{fusion}} - T_{\text{ambiente}}}$$

Como orientación para la realización de esta simulación se parte de parámetros obtenidos para algunos aceros de [13] y [43], como se observa en la Tabla 6.9.

Material	A [MPa]	B [MPa]	n	C	m
VascoMax 300	2070	1980	0.416	0.006	1.425
VascoMax 1080	514	2860	0.612	0.031	0.89
Acero suave	217	234	0.693	0.076	--
DP590	430	824	0.51	0.017	--

Tabla 6.9: Parámetros Johnson-Cook para distintos aceros.

6.7.1 Resultados de la simulación

Con los parámetros presentados se han realizado simulaciones de las que no se han podido obtener datos útiles pues, en unos casos la simulación explicita no llegaba a termino por error de velocidades y deformaciones fuera de rango, y en otros casos el resultado fue que la chapa se arrugaba de forma similar a como lo haría una chapa real sin sujeta-chapas, como se puede observar en la Imagen 6.12.

Se han encontrado indicios de que el fallo se produce por un endurecimiento por deformación demasiado alto, ya que en los primeros pasos, cuando el punzón apenas ha tocado la chapa las tensiones crecen exageradamente y comienza el arrugamiento. Tras distintas variaciones en todos los parámetros del modelo no se ha mejorado el resultado, también se ha intentado refinando más el mallado y ralentizando la velocidad del punzón. Otra opción que se valoró fue que el paso temporal de cálculo fuera más grande de lo necesario para que el modelo pudiera comportarse de forma razonable, ante esto se redujo el paso temporal, primero a un 60 % y más tarde a un 30%, obteniendo resultados no validos igual que anteriormente.

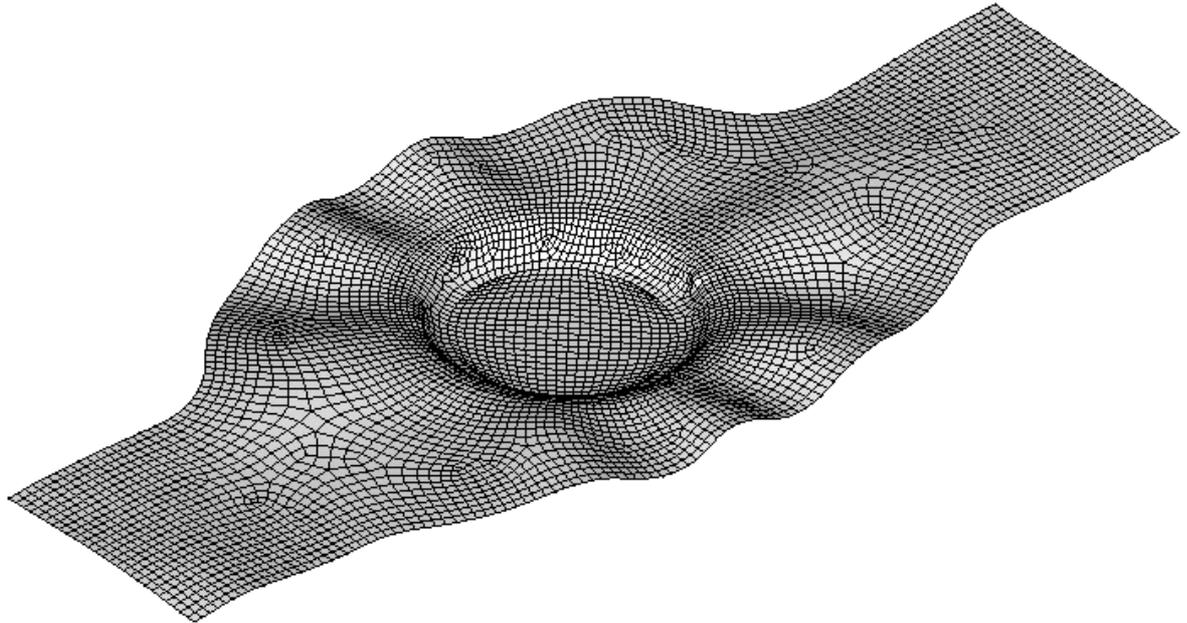


Imagen 6.12: Chapa deformada resultado de la simulación.

El origen del fallo puede encontrarse en la orientación del modelo a grandes cambios en la velocidad de deformación del material, en este caso se llega a unas dos deformaciones por segundo, pero en otros problemas para los que está preparado el modelo las velocidades de deformación ascienden al orden de 10^3 deformaciones por segundo.

Por las razones explicadas para este modelo no se han podido obtener valores de profundidad comparables con los demás modelos y con la pieza real.



7. CONCLUSIONES

Tras la obtención de los resultados necesarios para este proyecto, se extraen distintas conclusiones, algunas de las cuales ya han sido parcialmente expresadas en el desarrollo del capítulo de resultados.

En primer lugar se han obtenido suficientes resultados válidos de casi todos los modelos simulados como para evidenciar que la simulación de un proceso de embutición de chapa es factible mediante el software Ansys Ls-Dyna.

Del modelo de material de Johnson-Cook no se ha podido obtener ningún resultado válido, pues la simulación no finalizaba o daba resultados que no eran coherentes con la realidad, probablemente por una orientación del modelo a otras aplicaciones.

En los modelos estudiados se han realizado variaciones en los parámetros que los definen para obtener información sobre el comportamiento de la simulación al realizar estas variaciones. Como resultado se han caracterizado los parámetros y se ha dado una orientación para su variación en caso de realizar el ajuste de uno de estos modelos a un material real o porque se presente la necesidad de realizar retoques en una simulación de un material conocido.

Con todos los modelos de material válidos, se han obtenido resultados de la profundidad de la embutición final que difieren del resultado de la embutición real en menos de 0,5 mm (dándose este resultado en simulaciones completamente explícitas), teniendo en cuenta que los parámetros de los modelos de material han sido ajustados sin conocer las propiedades del acero que se utilizó en la embutición real. Se han obtenido resultados con error muy pequeño, inferior al que se esperaba en un principio por las condiciones de la simulación, de aproximadamente un milímetro.

Por los resultados obtenidos se puede afirmar que las hipótesis realizadas, matricería totalmente rígida y carrera del punzón a velocidad uniforme, son válidas, pues el error cometido es suficientemente pequeño como para esperar que provenga del modelo de material o, incluso del mallado.

En las simulaciones realizadas se ha comprobado la validez del método de cálculo *explícito a implícito* utilizado, obteniéndose resultados de profundidad bastante buenos, y deformaciones en el proceso de recuperación muy coherentes. La ventaja que ha presentado este método es la velocidad de cálculo, pues el proceso de recuperaciones mucho más rápido de calcular con código implícito que con el método explícito. En este sentido se recomienda el uso del método *explícito a implícito* para la simulación de procesos de embutición en Ansys Ls-Dyna, aunque no es posible su uso en embuticiones con varias etapas.

Todos los modelos son más fáciles de aplicar a una simulación si se pueden obtener datos del comportamiento del material, especialmente curvas de tensión-deformación a distintas velocidades de deformación que pueden aplicarse en los modelos de plasticidad dependiente de la velocidad de deformación y en los distintos modos del modelo piecewise linear. En el modelo cinemático plástico son necesarios datos más concretos como el límite elástico y los parámetros de Cowper-Symonds para el material; éstos últimos pueden ser más difíciles de encontrar o calcular para un material dado.



8. DESARROLLOS FUTUROS

En base al desarrollo del proyecto y los resultados obtenidos se pueden apuntar unas líneas sobre las que se puede trabajar para desarrollar aspectos de la simulación con Ansys Ls-Dyna de un proceso de embutición.

- Trabajo con los modelos utilizados, realizando una simulación más realista que utilice, en lugar de una velocidad de desplazamiento constante en el punzón, una velocidad variable como en una prensa mecánica real. En este sentido sería necesario conocer los parámetros de la prensa.
- Utilización del modelo de Johnson-Cook, del que en este trabajo no se han podido obtener resultados, y del cual se pueden esperar resultados más realistas que con el modelo cinemático plástico, por sus características de variación con la velocidad de deformación y con la temperatura.
- Comparación de los resultados obtenidos con Ansys Ls-Dyna, con los resultados que se podrían obtener de otros programas de simulación dinámica o simulación específica para embutición.
- Obtener curvas tensión-deformación de muestras del material a distintas velocidades de deformación para ser aplicadas a los modelos que permiten la definición de curvas, y así tener un resultado con un comportamiento lo más similar posible al material real.
- Realizar la simulación de los siguientes pasos del proceso de embutición que llevan a la geometría final de la pieza.
- Probar la validez de la hipótesis del uso de la chapa modelada con áreas y mallada con elementos tipo placa, realizando las mismas simulaciones con la misma geometría y modelando la chapa como sólido 3D con elementos tipo "brick".
- Análisis de otros métodos de conformado plástico en simulaciones con el programa Ansys Ls-Dyna para estudiar el comportamiento de los parámetros de influencia de estos procesos con respecto a los parámetros de los modelos de material.
- Realización de una pieza completa con Ansys Ls-Dyna, y posteriormente valorar su resistencia en el uso que se espera de ella con este mismo software; por ejemplo simular la embutición de un panel de un automóvil y simular su resistencia ante distintos impactos.



9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *The ADINA system*. [En línea]. <<http://www.adina.com/products.shtml>>
- [2] *ANSYS LS-DYNA* [En línea]. <<http://www.ansys.com/products/lsdyna.asp>>
- [3] *ANSYS LS-Dyna 71 Training manual 2nd Edition*. Ansys Inc., 2004.
- [4] *Apuntes de conformación por deformación plástica*. Universidad nacional de educación a distancia, 2007.
- [5] *Autoform software* [En línea]. <<http://www.autoform.com/spanish/products/index.html>>
- [6] AVILÉS, R. *Análisis dinámico mediante elementos finitos*. Universidad del País Vasco, 1995.
- [7] BARTON, D. C. *Determination of the high strain rate fracture properties of ductile materials using a combined experimental/numerical approach*. International Journal of Impact Engineering, Vol. 30, 2004, p. 1147–1159.
- [8] BOUTHINETTE, C. *Dynamic Fracture of a Tungsten Plate* [En línea]. <<http://www.jwave.vt.edu/crcd/archives/StProjs98/cbouthie/assignment2.html>>
- [9] BOYER, H. E. *Atlas of stress-strain curves*. ASM International, 1987.
- [10] CALVENTE, J. *Caracterización del error cinemático de transmisiones de tipo Harmonic Drive por el método de elementos finitos*. Tutores: Omar José Lara, Cristina Castejón. Proyecto de Fin de Carrera (I.T.I. Mecánica) presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [11] *Chapter 8: Nonlinear Structural Analysis* [En línea]. <http://mechanika.fsid.cvut.cz/old/pme/examples/ansys55/html/guide_55/g-str/GSTR8.htm>
- [12] CHIOU, Su-Tang [et al.]. *Strain rate effects on the mechanical properties of a Fe–Mn–Al alloy under dynamic impact deformations*. Materials Science and Engineering, Vol. 392, 2005, p. 156–162.
- [13] CINNAMON, J. D. [et al.]. *Johnson-Cook Strength Model Constants for VascoMax 300 and 1080 Steels*. 14th American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, 2005.
- [14] D'HAYER, R. *Strength and toughness sensitivity to strain rate of modern structural steels*. Office for Official Publications of the European Communities, 2000.
- [15] DE PABLO, A. *Modelo de plegado de chapa a temperatura ambiente por elementos finitos*. Tutor: José Canteli Fernández. Proyecto de Fin de Carrera (I.T.I. Mecánica) presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [16] ESPINOSA, M. *Introducción a los procesos de fabricación*. UNED, 2000.
- [17] *eta/DYNAFORM* [En línea]. <http://www.eta.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1&Itemid=27>

- [18] *Finite element analysis* [En línea]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_analysis>
- [19] *Finite element method* [En línea]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method>
- [20] *Finite element simulation of high speed machining* [En línea].
<<http://coewww.rutgers.edu/~ie/MARL/research01.htm>>.
- [21] FLORENCE, A. L. [et al.]. *Dynamic plastic buckling of copper cylindrical shells*. International Journal of Solids Structures, Vol. 27, 1991, p. 89-103.
- [22] GÁLVEZ, F. [et al.]. *Influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de alambres de acero trefilados*. Anales de mecánica de la fractura, Vol. 18, 2001, p. 185-189.
- [23] GARCÍA, C. M. [et al.]. *Simulación numérica y validación experimental del proceso de embutición profunda: Aplicación a un caso industrial*. Mecánica computacional, Vol. 22, 2003, p. 2422-2436.
- [24] HALLQUIST, J. O. *LS-DYNA Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [25] JUDS, M. A. *Trends in finite element analysis*. Eaton Corporation, Innovation Centre.
- [26] KALPAKJIAN, S., SCHMID, R. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, 2002.
- [27] KOBAYASHI, S. [et al.]. *Metal forming and the finite-element method*. Oxford University Press US, 1989.
- [28] LEÓN, O. *Modelos Constitutivos para la simulación de la compactación en el proceso de Pulvimetalurgia*.
- [29] LI, K. P. [et al.]. *Stamping Simulation in Pentium PC & Linux Environment*. Society of Automotive Engineers, 2003.
- [30] MARTÍN, N. [et al.]. *Relación entre ductilidad y los endurecimientos por deformación y por cambio en la velocidad de deformación en un Al 4N*. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, 2002, p. 505-511.
- [31] MIGUÉLEZ, M. H [et al.]. *Apuntes de Tecnología Mecánica*. Universidad Carlos III de Madrid, 2006.
- [32] MIGUÉLEZ, M. H [et al.]. *Problemas resueltos de tecnología de fabricación*. Thomson Paraninfo, 2005.
- [33] MORESTIN, F. [et al.]. *Elasto plastic formulation using a kinematic hardening model for springback analysis in sheet metal forming*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 56, 1996, p. 619-630.
- [34] NARASIMHAM, N., LOVELL, M. *Predicting springback in sheet metal forming: an explicit to implicit sequential solution procedure*. Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 33, 1999, p. 29-42.

- [35] OUDJENE, M. [et al.]. *Towards the three-dimensional FE analysis of rapid prototyping tools for sheet metal stamping process*. Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 43, 2007, p. 611–619.
- [36] OWEN, D. R. J., HINTON, E. *Finite elements in plasticity, theory and practice*. Pineridge Press, 1980.
- [37] PAM STAMP 2G [En línea].
<http://www.esi-group.com/SimulationSoftware/Stamping_simulation/index_html>
- [38] PARENTE, M. P. L. *Sheet metal forming simulation using EAS solid-shell finite elements*. Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 42, 2006, p. 1137–1149.
- [39] RODRÍGUEZ A. [et al.]. *Sensibilidad a la velocidad de deformación de aceros laminados en caliente*. Jornadas SAM – CONAMET – AAS, 2001, p. 421-428.
- [40] SÁNCHEZ, M. *Simulación de un proceso de embutición mediante Ls-Dyna*. Tutor: Alejandro Quesada González. Proyecto de Fin de Carrera (I.T.I. Mecánica) presentado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [41] *Small Strain, Rate Independent Plasticity* [En línea].
<http://www.engin.brown.edu/courses/En175/Notes/Plastic_material/Plastic_material.htm>
- [42] *SolidWorks Products* [En línea]. <<http://www.solidworks.com/pages/products/products.html>>
- [43] VEDANTAM, K. [et al.]. *Johnson-Cook Strength Models for Mild and DP 590 Steels*. American Institute of Physics Conference Proceedings, Vol. 845, 2002, p. 775-778.
- [44] WICK, C. [et al.]. *Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians (V.II Forming)*. Society of Manufacturing Engineers, 1983-1992.
- [45] ZIENKIEWICZ, O.C. *El método de los elementos finitos*. CIMNE, 2004.