

## Capítulo 3. Construcción del modelo numérico

En este capítulo se detalla la construcción del modelo de elementos finitos y su puesta a punto.

Para la simulación del conformado de la chapa se ha hecho uso del software comercial de cálculo mediante elementos finitos Abaqus/Estándar en sus versiones 6.5 y 6.12.

### 1. Discusión sobre el problema

Nos encontramos con un problema que puede considerarse cuasiestático, en el que las fuerzas de inercia y amortiguamiento son despreciables frente al resto. Además de lo anterior, existe otra característica muy marcada en este problema. Se trata de la no-linealidad, esta viene desde varios puntos:

- Se producen grandes desplazamientos y deformaciones.
- El material tiene un comportamiento elasto-plástico, modelado mediante una ecuación no lineal (como se verá más adelante se usa el criterio de plastificación de Hill).
- Los contactos, con rozamiento, entre la chapa y la matriz y el punzón generan una fuerte no-linealidad.

Tanto aquellos fenómenos que ocurren a elevada velocidad, como impactos o colisiones, como aquellos que presentan grandes deformaciones, como el conformado, presentan grandes complicaciones en su análisis. La simulación de estos fenómenos en elementos finitos puede hacerse mediante dos métodos: implícito y explícito. Ambos son métodos numéricos para la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales y diferenciales parciales.

Un método implícito resuelve el estado del sistema en un tiempo posterior al actual haciendo uso de una ecuación que implica los estados del sistema tanto actual como posterior. Por su parte, un método explícito sólo hace uso del estado actual. Matemáticamente puede verse como sigue, siendo  $F$  un método explícito y  $G$  uno implícito, tenemos:

$$E(t + \Delta t) = F(E(t))$$

$$G(E(t), E(t + \Delta t)) = 0$$

Donde  $E(t)$  es el estado actual,  $E(t + \Delta t)$  es el estado futuro y  $\Delta t$  es un intervalo de tiempo pequeño.

En general los métodos explícitos requieren menor tiempo de computación que los métodos implícitos, sin embargo es frecuente que presenten el problema de no ser incondicionalmente convergentes, y requieran evaluar pasos de tiempo pequeños para que la computación sea

numéricamente estable. Por ello suelen ser usados en problemas de dinámica rápida, en los que se producen fuertes no linealidades y el empleo de intervalos de tiempo pequeños pasa a ser una necesidad. Por otro lado, los métodos implícitos pueden usar pasos de tiempo mucho más grandes ya que son estables.

En nuestro caso se ha considerado un análisis estático del problema en Abaqus/Standard (método de integración implícito).

## 2. Descripción del software Abaqus/Standard

Abaqus/Standard es parte del conjunto de programas Abaqus FEA desarrollado por una división de Dassault Systèmes. Consta de cuatro productos: Abaqus/CAE (siendo CAE el acrónimo de "Complete Abaqus Environment"), Abaqus/CFD (acrónimo de "Computational Fluid Dynamics"), Abaqus/Explicit y el mencionado Abaqus/Standard. Fue desarrollado a finales de la década de los setenta por David Hibbitt, Dr. Bengt Karlsson y P. Sorensen. Hoy en día, Abaqus se utiliza en diversos sectores industriales como el nuclear, automóvil, aeroespacial, eólico o biomedicina.

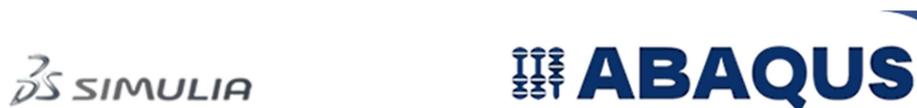


Fig. 24. Logotipos de Simulia y Abaqus respectivamente

Abaqus/CAE constituye una herramienta eficaz y muy personalizable para crear modelos de elementos finitos de forma interactiva, visualizar resultados de los análisis y la automatización de procesos mediante scripts (o subrutinas en lenguaje Python). La geometría se puede crear en el propio programa o importarse directamente a partir de los formatos CAD más comunes, o también importar directamente la malla de otro software de elementos finitos, como por ejemplo MSC.Nastran.

Abaqus/Standard permite resolver los tradicionales análisis de elementos finitos de tipo implícito tales como, análisis estáticos, dinámicos a baja velocidad (tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia), térmicos, etc. incluyendo contactos y no linealidades de material. Abaqus/Standard está integrado en Abaqus/CAE para todo el pre y postprocesado del análisis.

Abaqus permite comenzar un análisis en Abaqus /Standard y utilizar los resultados como condiciones iniciales de un análisis en Abaqus /Explicit, y viceversa.

Abaqus /Explicit fue introducido en 1991 como un solver explícito adecuado para análisis dinámicos a muy alta velocidad y análisis cuasi-estáticos, en los cuales las no linealidades son patentes, tales como contactos, grandes deformaciones, etc. Ejemplos de este tipo de aplicaciones son los análisis de impactos en el sector de la automoción, balística, test de caída

PFC: Análisis del efecto de la tensión fuera del plano en la conformabilidad de chapa metálica

libre, procesos de estampado y forja, etc. Al igual que Abaqus/Standard, Abaqus /Explicit está integrado en Abaqus /CAE para todo el pre y postprocesado del análisis.

Abaqus/CFD es un módulo que permite realizar análisis de mecánica de fluidos o CFD (Computational Fluid Dynamics) integrado en el pre y post procesador Abaqus /CAE. Es importante resaltar la capacidad que tiene de realizar simulaciones acopladas con interacción fluido-estructura tanto de tipo estructural como térmico.

Inicialmente Abaqus fue desarrollado para abordar comportamientos no lineales, como en el caso que nos ocupa. Como ya se ha comentado, dentro de la “suite”, Abaqus/Standard es apropiado para procesos estáticos o dinámicos a baja velocidad que necesitan soluciones en tensiones precisas.

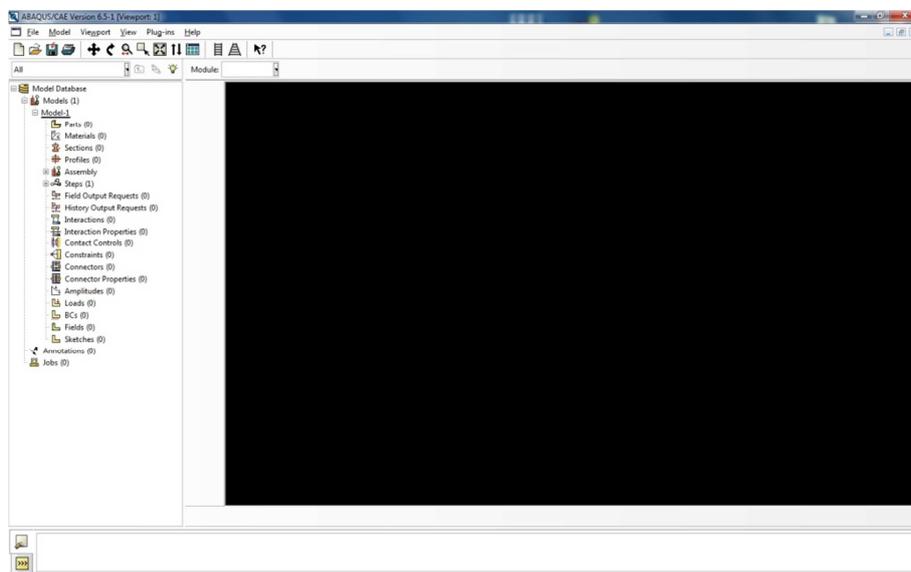


Fig. 25. Ventana de inicio de Abaqus/Standard (versión 6.5)

### 3. Elementos del modelo

Los elementos constituyentes del modelo de elementos finitos son:

- el punzón, ya sea cilíndrico o hemisférico,
- la matriz,
- la chapa o probeta, dependiendo del ensayo: biaxial, deformación plana o tracción pura.

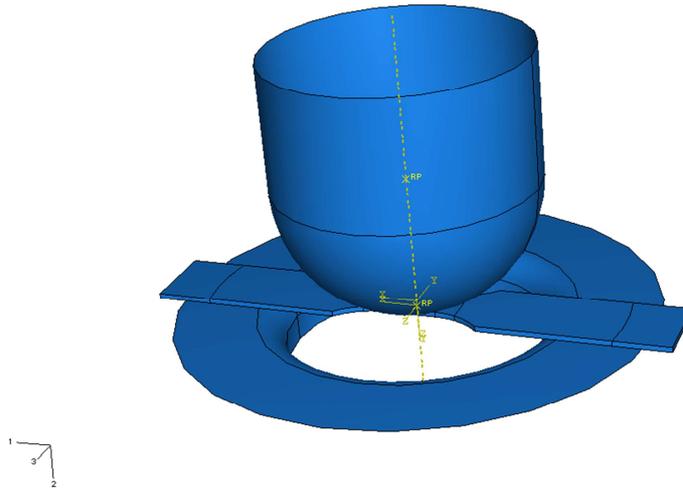


Fig. 26. Ejemplo de montaje: Punzón hemisférico de 100mm, probeta de tracción pura y matriz

### 3.1. Punzones

En el presente proyecto se han utilizado dos tipos de punzones: hemisférico y cilíndrico, de diferentes diámetros. Ambos han sido modelados como elementos infinitamente rígidos. A continuación se muestra un ejemplo de cada uno con las principales dimensiones acotadas:

- Punzón hemisférico, de diámetro 100mm y usado en los ensayos de caracterización del FLD.

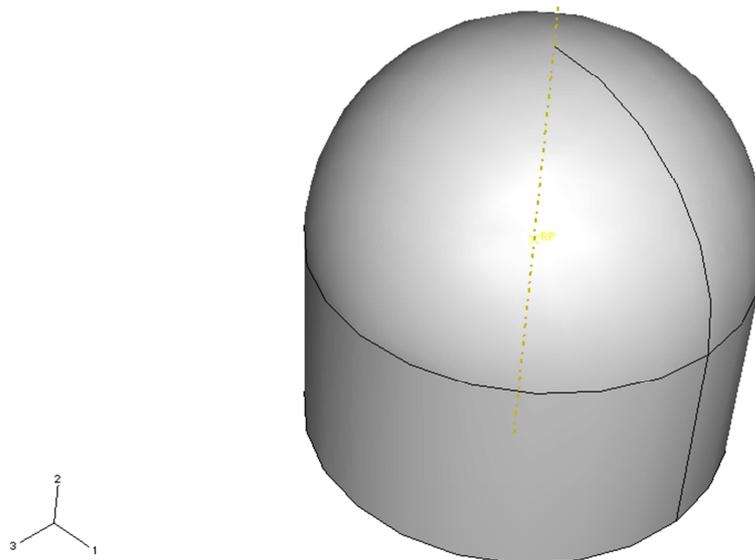


Fig. 27. Punzón hemisférico

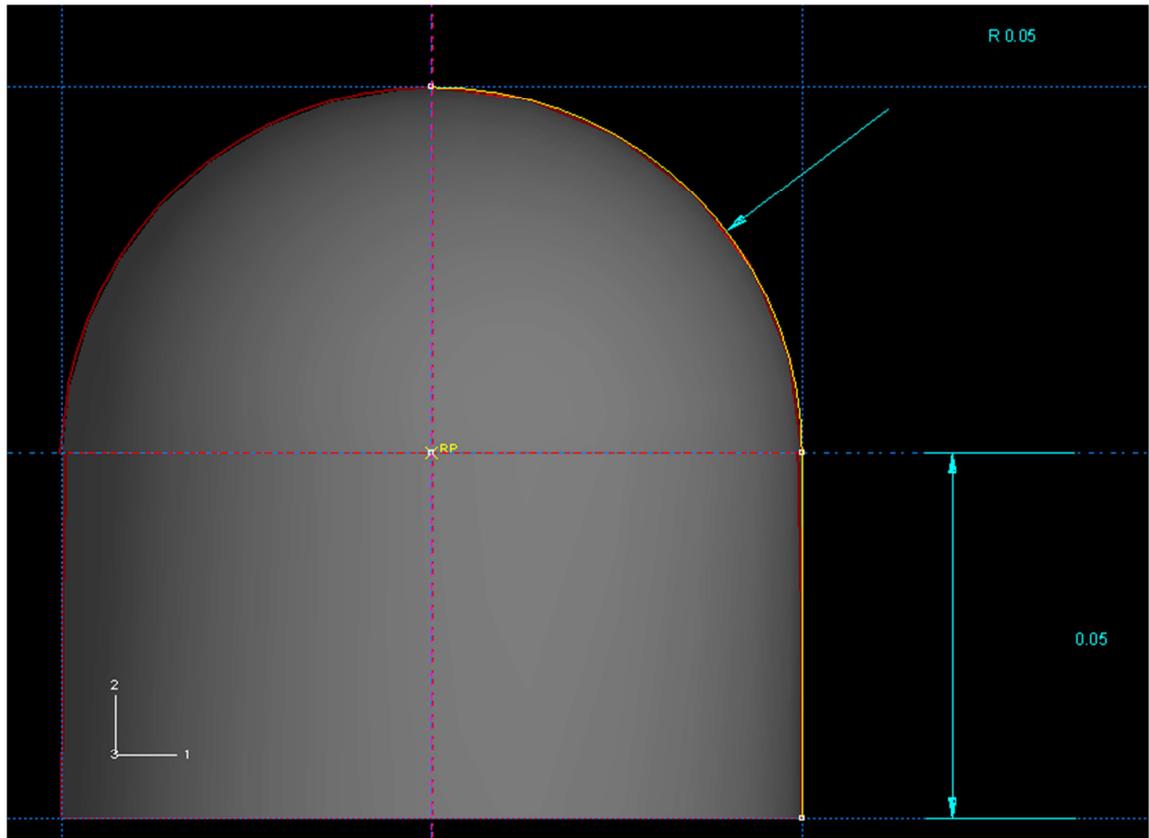


Fig. 28. Dimensiones en metros del punzón hemisférico

- Punzón cilíndrico, de varios diámetros de diámetro y 50mm de longitud.

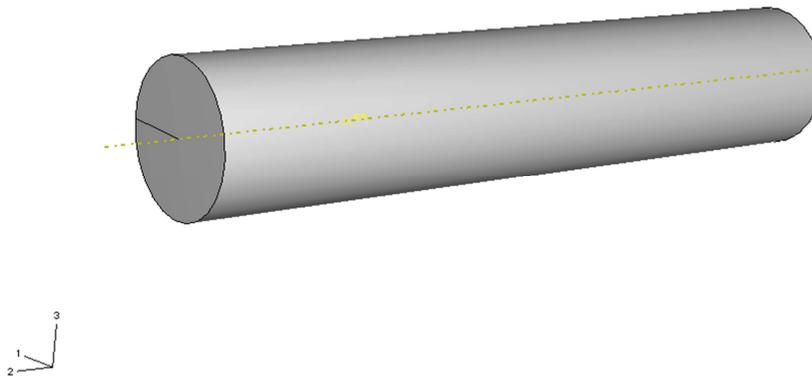


Fig. 29. Punzón cilíndrico de 10mm de diámetro

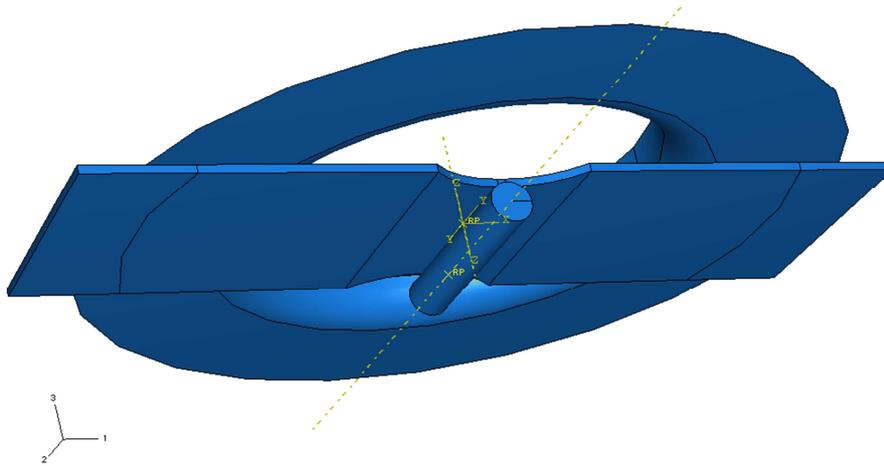


Fig. 30. Puede apreciarse como con 50mm de longitud es suficiente para abarcar la probeta de deformación plana.

### 3.2. Matriz

Al igual que los punzones, la matriz ha sido modelada como un elemento infinitamente rígido. Se ha simplificado el diseño de la matriz al no considerar el prensachapa y los cordones de estirado (draw-beads). Este efecto ha sido sustituido en el modelo por un empotramiento de la probeta en su zona exterior como se verá más adelante. En definitiva, las dimensiones de la matriz han sido las siguientes:

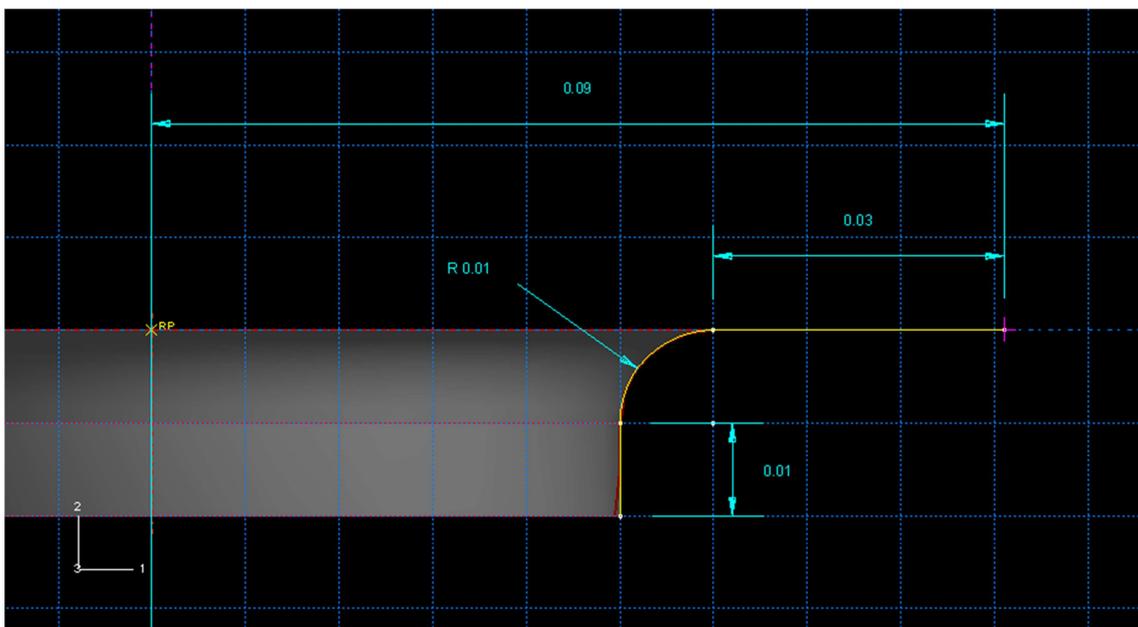


Fig. 31. Dimensiones en metros de la matriz

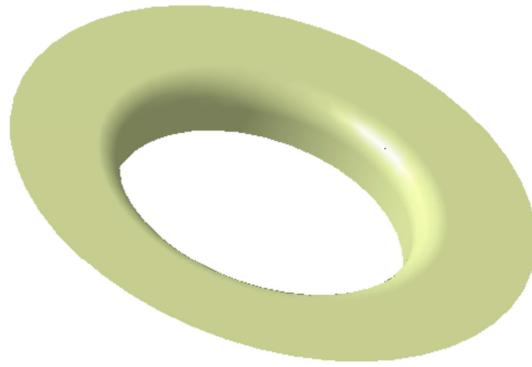


Fig. 32. Diseño de la matriz sin cordones del prensachapa

### 3.3. Probetas

Se han usado diferentes tipos de probetas en el proyecto. En los cálculos para conseguir el FLD se usaron tres: probeta de deformación plana, probeta de tracción pura y probeta biaxial. Todas las probetas tienen un espesor de 2mm. Las dimensiones de las diferentes probetas están indicadas en los siguientes gráficos:

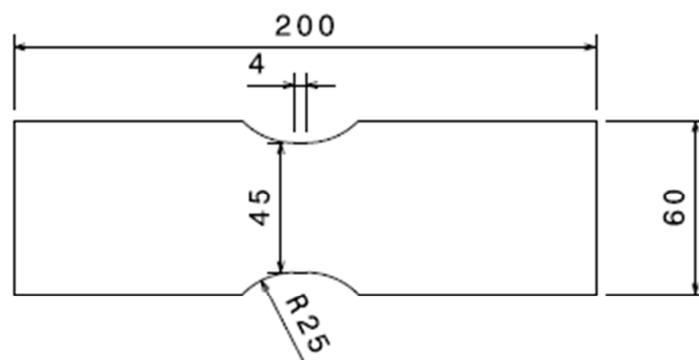


Fig. 33. Dimensiones acotadas de la probeta de deformación plana, cotas en mm.

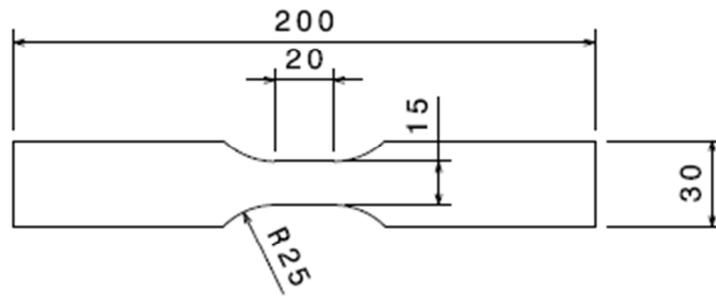


Fig. 34. Dimensiones acotadas de la probeta de tracción pura, cotas en mm.

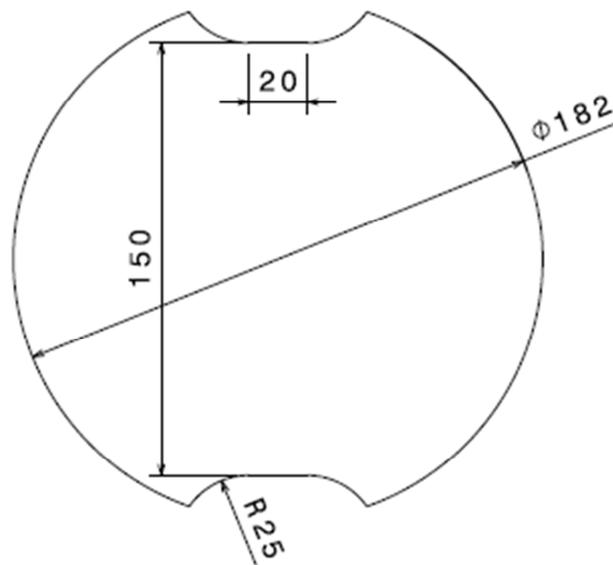


Fig. 35. Dimensiones acotadas de la probeta de zona biaxial, cotas en mm.

#### 4. Material: comportamiento y criterio de plastificación

Se ha considerado un aluminio 7075-O para el material de la chapa. Se trata de una aleación de aluminio con zinc como principal elemento aleante.

La composición química según datasheet de Alcoa es la siguiente:

Componente	% en peso	Componente	% en peso
Zn	5.1-6.1	Mn	Max 0.30
Mg	2.1-2.9	Cr	0.18-0.28
Cu	1.2-2.0	Ti	Max 0.20
Fe	Max 0.50	Otros, cada uno	Max 0.5
Si	Max 0.40	Otros, total	Max 0.15

Tabla 1. Composición química del aluminio 7075-O

Se trata de un material de gran resistencia ampliamente usado en la aeronáutica, es muy común en partes estructurales de aeronaves. La designación “-O” hace referencia a que no ha sido tratado térmicamente (temple), el material ha recibido un tratamiento de recocido completo. Se trata de la condición más suave, dúctil y maleable. En este tipo de aleaciones de aluminio las propiedades mecánicas tienen una gran dependencia de los tratamientos térmicos.

A la hora de modelarlo, se ha definido un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento, habitual en metales conformados en frío.

##### Ley de comportamiento

El comportamiento elástico del material se ha supuesto isótropo de acuerdo a la ley de Hooke. Las propiedades elásticas se han tomado de una caracterización experimental de la bibliografía (Martínez Donaire, 2012):

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$ (-)
Al 7075-0	2720	66.7e9	0.33

Tabla 2. Propiedades elásticas del aluminio 7075-O

##### Modelo de plasticidad

Para definir el comportamiento plástico se ha tomado la expresión existente en la bibliografía (Martínez Donaire, 2012) que adapta datos experimentales para el ensayo de tracción según la ley de Voce para el material en estudio:

$$\sigma_{eq}(MPa) = 226.3 - 131.9e^{-32.23\varepsilon_{eq}^p}$$

Donde  $\sigma_{eq}$  es la tensión plástica equivalente y  $\varepsilon_{eq}^p$  es la deformación plástica equivalente.

En la siguiente imagen sacada de la bibliografía se puede comprobar como la expresión antes expuesta ajusta de manera fiel los resultados experimentales (marcados con círculos):

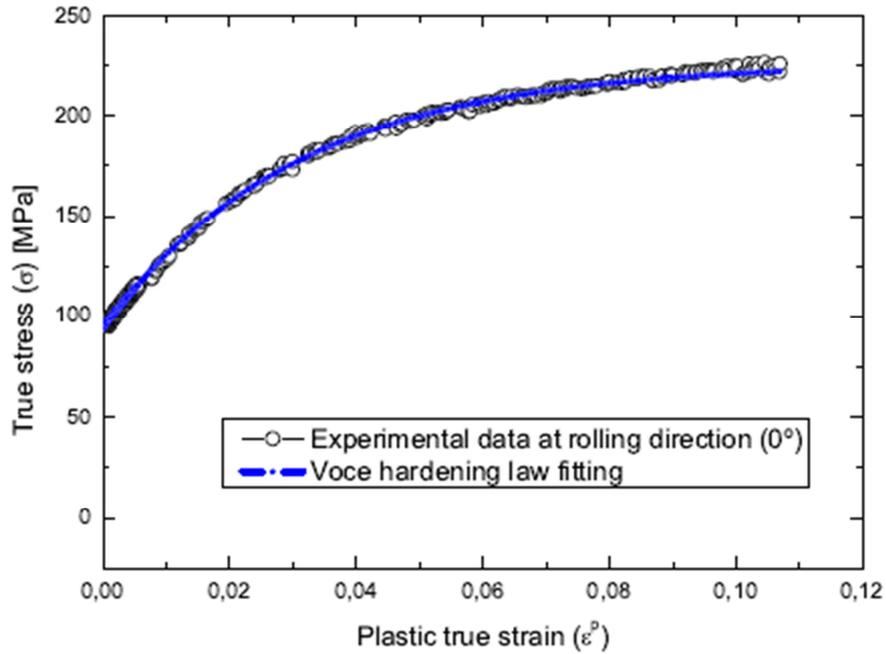


Fig. 36. Ajuste de la ley de Voce a los datos experimentales (Martínez Donaire, 2012)

Para definir este comportamiento en Abaqus, se introdujo una tabla con 16 puntos, que representados en una curva tenemos:



Fig. 37. Representación de los puntos introducidos siguiendo la ley de Voce

### Criterio de plastificación

El modelo de plastificación utilizado ha sido el criterio de Hill. Se trata de una generalización del criterio de von Mises para materiales isotrópicos. La expresión general en unos ejes cartesianos cualesquiera es:

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1$$

Donde  $F, G, H, L, M$  y  $N$  son constantes del material a determinar mediante ensayos en diferentes orientaciones. Las constantes quedan definidas como:

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right)$$

$$L = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{23}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2}$$

$$M = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2}$$

$$N = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{12}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2}$$

Donde  $\sigma^0$  es una tensión de plastificación de referencia,  $\bar{\sigma}_{ij}$  es la tensión de plastificación medida cuando se aplica una tensión  $\sigma_{ij}$  como la única no nula.  $R_{ij}$  son los ratios de tensión de plastificación anisótropos y  $\tau^0 = \frac{\sigma^0}{\sqrt{3}}$ .

Para el caso de una chapa bajo un estado de tensión plana, donde el plano está definido por los ejes "x" e "y", el criterio puede simplificarse en:

$$(H + G) \sigma_x^2 + (F + H) \sigma_y^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + 2N\tau_{xy}^2 = 1$$

Se define la tensión equivalente como aquella que para un ensayo de tracción según el eje x es igual al límite elástico en dicha dirección ( $\sigma_Y^x$ ). De modo que haciendo uso de la anterior ecuación podemos definir:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + (f + h) \sigma_y^2 - 2h\sigma_x\sigma_y + 2n\tau_{xy}^2}$$

Donde  $f = F(\sigma_Y^x)^2$ ,  $g = G(\sigma_Y^x)^2$ ,  $h = H(\sigma_Y^x)^2$ ,  $n = N(\sigma_Y^x)^2$  y además se cumple que  $h + g = 1$ . De modo que la superficie de fluencia queda como:

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_{eq} - \sigma_Y^x = 0$$

Donde  $f(\sigma_{ij})$  es el potencial plástico. Teniendo en cuenta la regla de flujo  $d\varepsilon_{ij} = \frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}$ , se pueden expresar las siguientes relaciones entre los incrementos de deformaciones y las tensiones:

$$d\varepsilon_x = \frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} [(h + g)\sigma_x - h\sigma_y]$$

$$d\varepsilon_y = \frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} [(h + f)\sigma_y - h\sigma_x]$$

$$d\varepsilon_z = -(d\varepsilon_x + d\varepsilon_y) = -\frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} [g\sigma_x - f\sigma_y]$$

$$d\gamma_{xy} = \frac{d\varepsilon_{eq}}{\sigma_{eq}} (2n\tau_{xy}^2)$$

Si recordamos que el trabajo plástico se definía como:  $dW^P = \sigma_{eq} d\varepsilon_{eq}$ , se puede extraer una expresión para el incremento de deformación plástica equivalente ( $d\varepsilon_{eq}$ ):

$$d\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{(h + f)d\varepsilon_x^2 + 2hd\varepsilon_x d\varepsilon_y + (h + g)d\varepsilon_y^2}{gh + fh + gf} + \frac{d\gamma_{xy}^2}{2n}}$$

Recapitulando tenemos que de las 6 constantes en tres dimensiones se ha llegado a 5:  $\sigma_Y^x$ ,  $h$ ,  $f$ ,  $g$  y  $n$ . La primera se obtiene directamente realizando un ensayo de tracción en dirección "x" y recordemos que tenemos la ecuación que liga a dos de ellas:  $h + g = 1$ . De modo que con tres ensayos de tracción en las orientaciones  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  podemos definir el resto de constantes.

Se define el coeficiente de anisotropía plástica ( $r$ ), también llamado coeficiente de Lankford, en una determinada dirección como la relación entre la deformación transversal ( $\varepsilon_w$ ) y la normal ( $\varepsilon_t$ ) obtenidas al ensayar una probeta de material cortada en dicha dirección:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

Se puede demostrar que el coeficiente de anisotropía plástica según una dirección que forme  $\alpha$  grados con la dirección x se expresa como:

$$r_\alpha = \frac{d\varepsilon_{(\alpha+\pi/2)}}{d\varepsilon_z} = \frac{h - (4h + g + f - 2n)\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha}{g \cos^2\alpha + f \text{sen}^2\alpha}$$

Que particularizando para  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , tenemos:

$$r_{0^\circ} = \frac{d\varepsilon_{22}}{d\varepsilon_{33}} = \frac{h}{g}; \quad r_{90^\circ} = \frac{d\varepsilon_{11}}{d\varepsilon_{33}} = \frac{h}{f}; \quad r_{45^\circ} = \frac{n}{g+f} - \frac{1}{2}$$

Si consideramos la tensión de plastificación medida cuando se aplica una tensión  $\sigma_{11}$  como la única no nula ( $\bar{\sigma}_{11}$ ) como la tensión de plastificación de referencia ( $\sigma^0 = \bar{\sigma}_{11}$ ) tenemos que el ratio  $R_{11} = 1$ .

En la ayuda de Abaqus puede verse el desarrollo que conduce a las siguientes expresiones de los siguientes ratios en función de los coeficientes de Lankford:

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90^\circ}(r_{0^\circ}+1)}{r_{0^\circ}(r_{90^\circ}+1)}}; \quad R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90^\circ}(r_{0^\circ}+1)}{r_{0^\circ}+r_{90^\circ}}}; \quad R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90^\circ}(r_{0^\circ}+1)}{(r_{0^\circ}+r_{90^\circ})(2r_{45^\circ}+1)}}$$

Si además consideramos Tensión Plana, tenemos  $R_{13} = R_{23} = 1$ .

El valor de los coeficientes de Lankford se ha tomado, como otros datos anteriores, de la bibliografía (Martínez Donaire, 2012). En ella se caracterizaron las propiedades mecánicas a tracción de la chapa en tres direcciones ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ) obteniendo los siguientes valores:

$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0,812	1,394	1,317

Resumiendo tenemos los siguientes valores de los ratios de tensión de plastificación anisótropos:

$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1$$

$$R_{22} = 1,1262$$

$$R_{33} = 1,0587$$

$$R_{12} = 0,9422$$

Los valores anteriores fueron introducidos en el modelo del material en Abaqus:

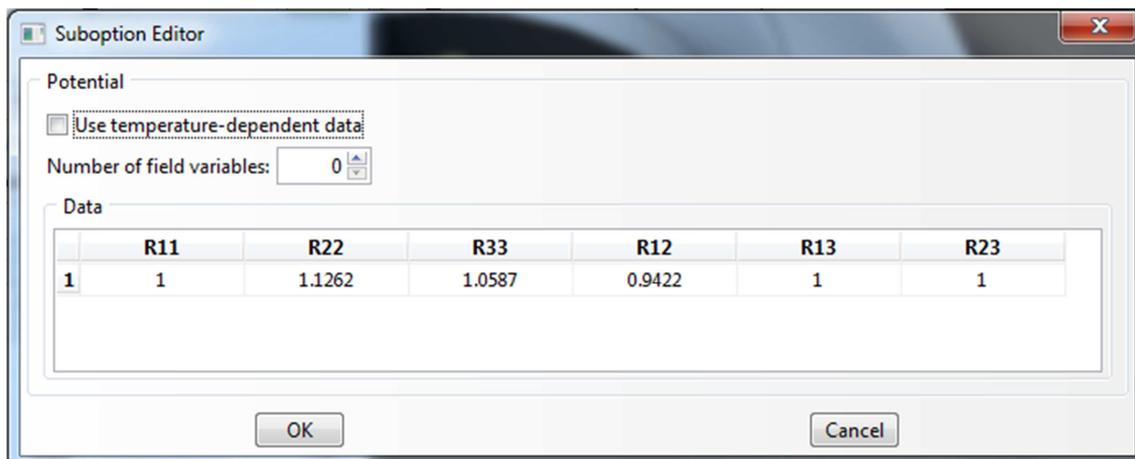


Fig. 38. Ventana de datos de Abaqus para introducir los valores de los ratios de tensión de plastificación anisótropos

Con estos datos introducidos, junto con la curva de comportamiento plástico y los datos de la zona plástica explicados previamente, tenemos definido el material en nuestro modelo.

## 5. Mallado

El mallado con elementos finitos ha hecho uso de elementos tridimensionales ya incluidos en la librería de Abaqus/Standard. La decisión de usar elementos tridimensionales en vez de elementos más sencillos, y de menor consumo computacional, en 2D (shell o solid-shell) ha permitido usar las leyes constitutivas del material sin necesidad de recurrir a hipótesis simplificadoras como la consideración de un estado de tensiones planas o la consideración de las tensiones tangenciales como despreciables.

En el presente proyecto se han usado elementos de tipo hexaédrico y de tipo cuña (*wedge*), en ambos casos activando la formulación híbrida para evitar problemas de bloqueo volumétrico. En concreto se han usado los siguientes elementos:

1. Elementos lineales de tipo cuña de 6 nodos, **C3D6H**, con formulación híbrida y dos puntos de integración en el espesor. Estos elementos se han usado en la zona central de la probeta, justo en el contacto entre el punzón y la probeta. En esta zona se da la combinación más desfavorable de los efectos de tracción y flexión.

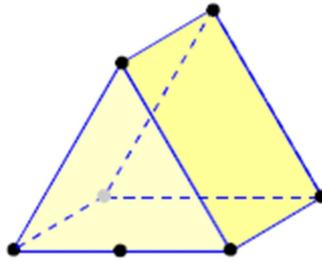


Fig. 39. Representación de un elemento tipo *wedge* de 6 nodos

2. Elementos lineales de tipo hexaédrico de 8 nodos, **C3D8RH**, de integración híbrida y reducida. La integración reducida permite evitar problemas de bloqueo volumétrico y por cortante. Este tipo de integración puede llevar a que ocurran fenómenos de *hourglassing*, es decir, que aparezcan modos de deformación espurios debido a la subintegración. Dentro de Abaqus/Standard existe la opción de aplicar una opción de *Hourglass control*. Este tipo de elemento se ha empleado para mallar la probeta al completo o el exterior de la misma si se ha usado el descrito en el punto anterior.

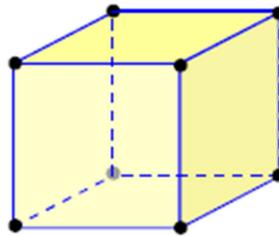


Fig. 40. Representación de un elemento tipo hexaédrico de 8 nodos

Como puede apreciarse en la siguiente imagen a modo de ejemplo, la distribución de elementos se ha hecho de manera que la densidad en la zona central sea mayor que en los extremos. Es justo en esta zona donde los efectos de tracción-flexión son más acusados y, por tanto, nos interesa calcular con mayor precisión.

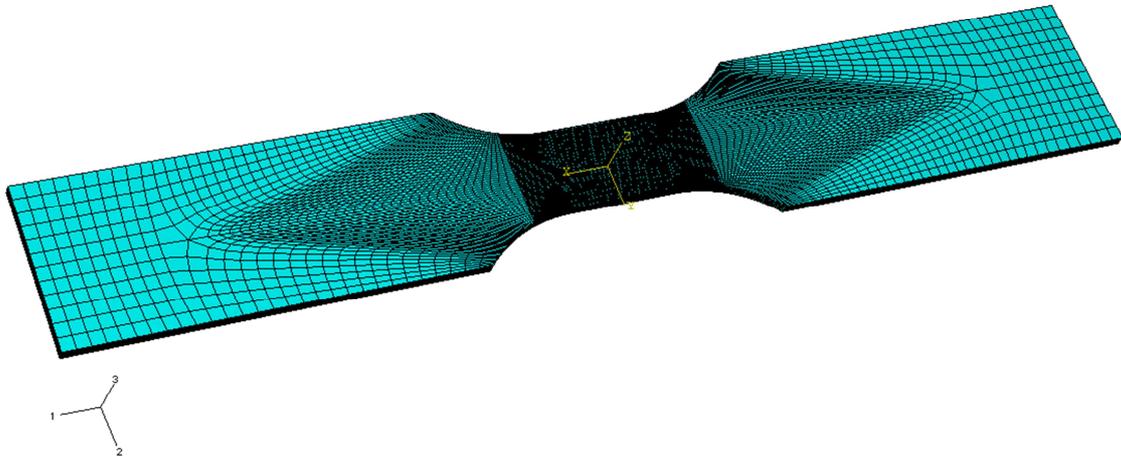


Fig. 41. Detalle de la distribución de elementos en los ensayos con la probeta de tracción pura.

Se han dispuesto varias capas de elementos en el espesor en función del diámetro del punzón empleado. Para aquellas simulaciones con el punzón hemisférico se ha hecho uso de 5 capas. En las simulaciones con punzón cilíndrico se han dispuesto 5 capas para el punzón de 10mm de diámetro y de 7 para el de 3mm. Para este último ha sido necesario el uso de más capas para capturar adecuadamente el gradiente de las diferentes variables en el espesor.

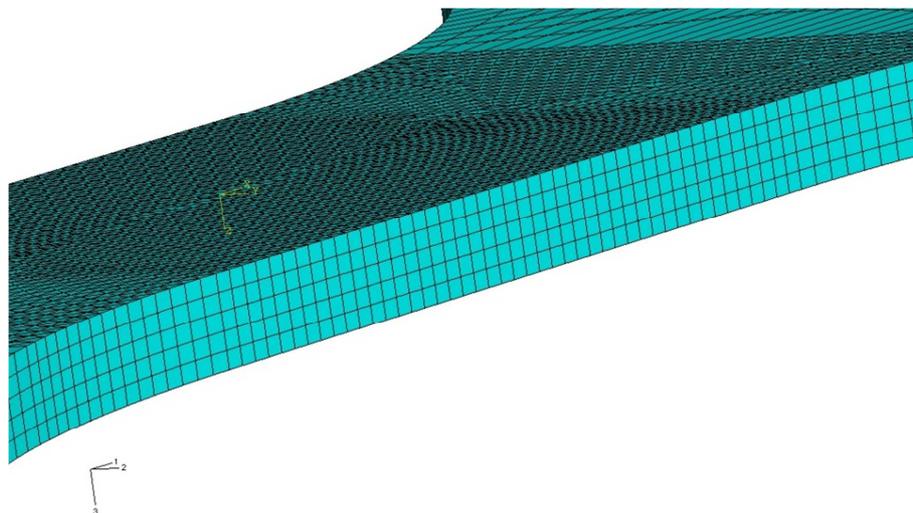


Fig. 42. Detalle de la distribución de capas de elementos (5) en el espesor

## 6. Análisis de convergencia

El tamaño, y por tanto el número, de elementos ha sido seleccionado haciendo un análisis de convergencia de la malla. Para ello, se comenzó con una malla relativamente grosera y se fue afinando usando elementos cada vez menores hasta llegar a una convergencia de los resultados tanto en deformaciones como en tensiones. Con esto se llega a un compromiso entre la fiabilidad de los resultados y el coste computacional de las simulaciones.

En las siguientes figuras se muestran las curvas deformación-desplazamiento y fuerza-desplazamiento para tres análisis diferentes realizados con elementos hexaédricos con 23644, 36288 y 51342 elementos en cada caso. Se trata de un montaje que incluye la probeta de tracción pura y el punzón hemisférico de 100mm. Puede apreciarse como las curvas se superponen hasta el 10% de deformación donde se separa los resultados de la malla menos fina. Las dos mallas más finas se mantienen juntas hasta más allá del 20% y sólo para deformaciones mucho mayores puede apreciarse una ligera diferencia. Esto ocurre pese a tener la malla más fina más de un 40% más de elementos que la intermedia. Es por ello que se consideró que el tamaño de elemento correspondiente a la malla intermedia (0.25mm) era el más adecuado.

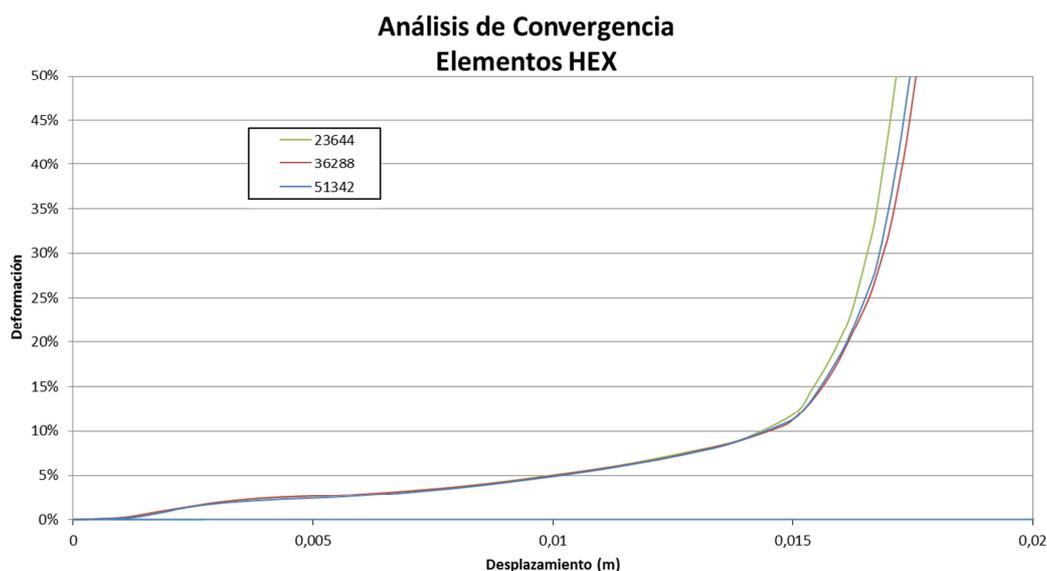


Fig. 43. Análisis de convergencia con elementos hexaédricos: deformación-desplazamiento

Con respecto a las curvas fuerza-desplazamiento vemos como la evolución hasta los valores máximos son casi idénticos. Los valores de fuerza máxima y el desplazamiento al que se consiguen en los tres casos no difieren en más de un 0.85% en valores de desplazamiento que se mueven en una horquilla de 0.3mm. De nuevo las curvas correspondientes a los casos más finos apenas presentan variación.

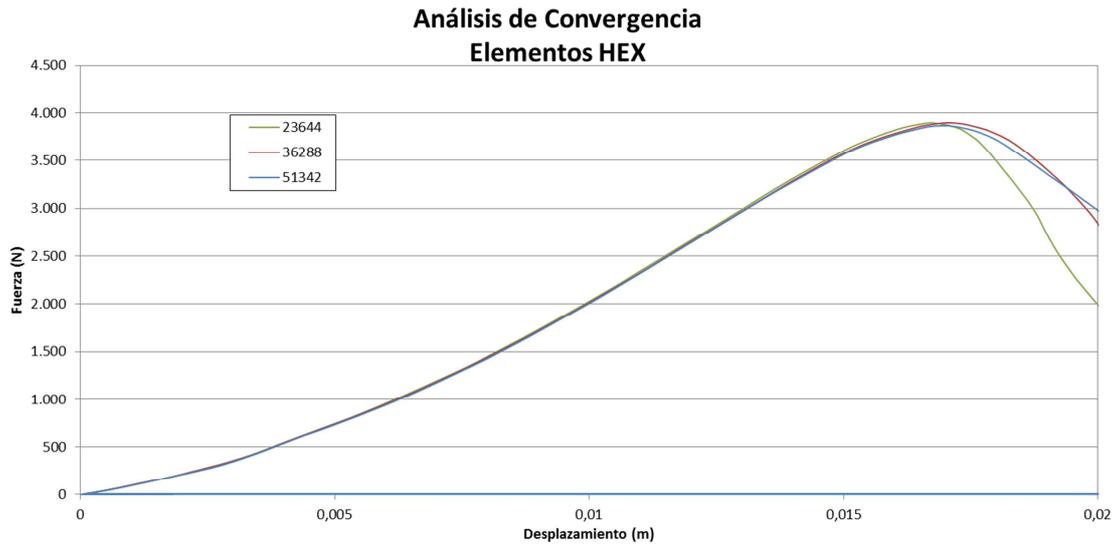


Fig. 44. Análisis de convergencia con elementos hexaédricos: fuerza-desplazamiento

A continuación se muestra una tabla con los valores antes comentados.

Nº de elementos	Fuerza Máxima (N)	Desplazamiento (mm)
23644	3893.77	16.772
36288	3895.68	17.019
51342	3865.41	17.003

Tabla 3. Fuerza máxima y desplazamiento asociado

De manera similar se procedió a realizar diversos análisis de sensibilidad usando elementos tipo wedge en la zona central de la probeta. Los resultados se compararon con los antes expuestos y se tuvo la siguiente gráfica. En ella se aprecia como las curvas de los ensayos con elementos hexaédricos exclusivamente se sitúan a la izquierda, más a la izquierda cuanto menos elementos, y las que combinan elementos hexaédricos y tipo wedge a la derecha, más a la derecha cuanto menos elementos. De lo anterior puede extraerse que existe una curva única a la que tienden ambas combinaciones de elementos. La cercanía de las curvas de 36288 elementos hexaédricos y de 78036 elementos de la combinación entre wedge y hexaédricos así lo demuestra.

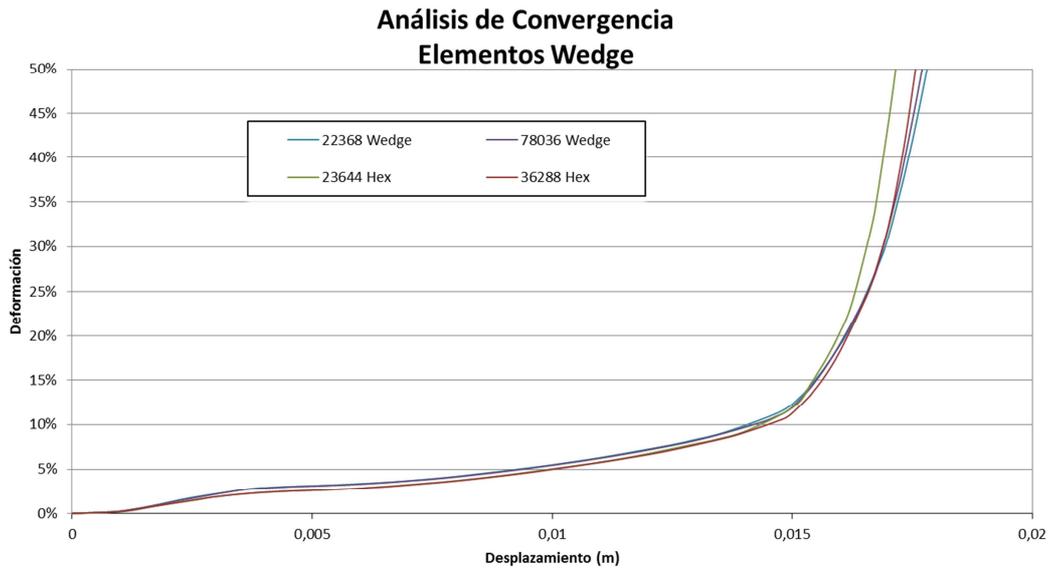


Fig. 45. Análisis de convergencia con elementos hexaédricos y wedge: deformación-desplazamiento

## 7. Contactos y rozamiento

Se han definido contactos con rozamiento entre el punzón y la probeta y entre la matriz y la probeta. En ambos casos se ha considerado un contacto impenetrable con un coeficiente de rozamiento en dirección transversal:

$$\mu = 0.05$$

Con ello se pretende simular un contacto metal-metal lubricado. Los valores encontrados en la literatura oscilan entre 0.01 y 0.1, habiéndose tomado un valor intermedio. Se ha tomado el mismo valor para todos los ensayos.

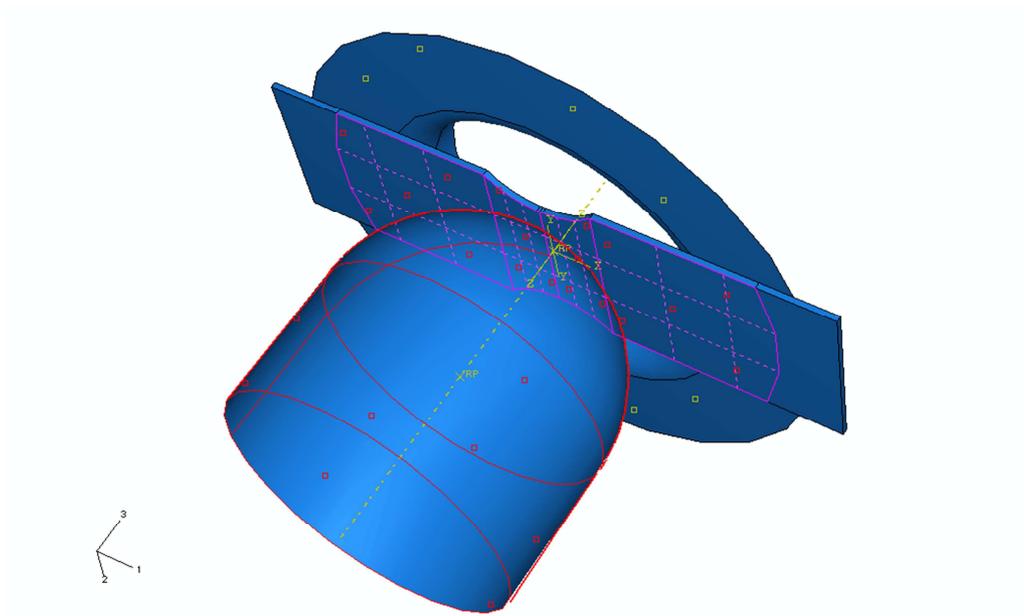


Fig. 46. Aplicación de contacto entre la superficie del punzón (en rojo) y la probeta (en morado)

## 8. Condiciones de contorno

Se han definido diversas condiciones de contorno para los diferentes elementos involucrados en el modelo:

- **Punzón.** La principal condición de contorno aplicada al punzón es un desplazamiento en dirección vertical de un par de decenas de milímetros, lo suficiente para asegurar la rotura de la probeta (deformaciones superiores a 100%, aunque los datos experimentales alcanzan máximos del 40%). En los ensayos con presión, se ha definido también un empotramiento (de desplazamientos y giros) mientras dura el step de aplicación de la presión.
- **Matriz.** La única condición de contorno aplicada en la matriz es un encastre (desplazamientos y giros nulos) durante todo el ensayo.
- **Probeta.** En el caso de la probeta se ha aplicado un empotramiento en la zona exterior de la misma para simular el efecto del prensachapa (*draw-bead*). En todas las probetas se ha tomado la misma zona, se trata de la zona más allá de 80mm desde el centro de la probeta. En la siguiente imagen puede apreciarse la zona comentada para el caso de la probeta de deformación plana:

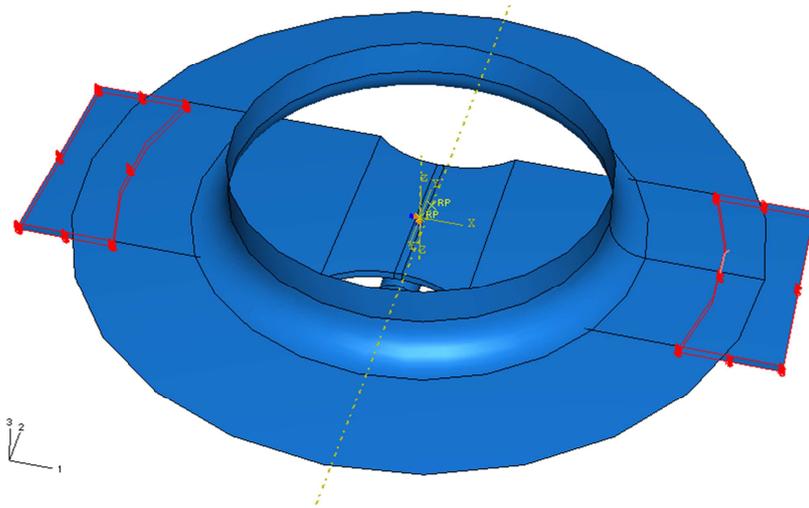


Fig. 47. Zona empotrada en el caso de la probeta de deformación plana (destacada en rojo)

## 9. Cargas

En los ensayos propiamente dichos se ha definido una carga de presión en la superficie superior de la probeta de deformación plana. Consistía en una presión de valor constante en la franja central (20mm de ancho).

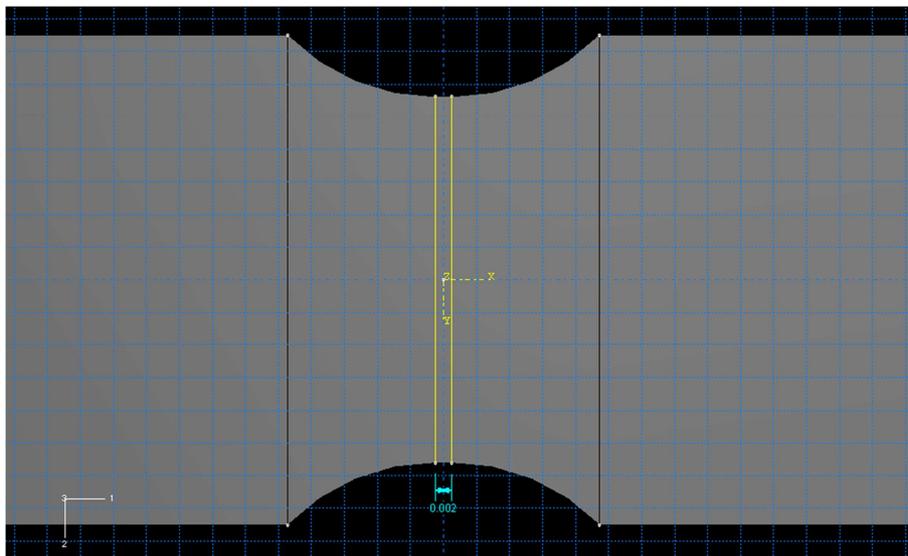


Fig. 48. Zona de aplicación de la presión en la probeta de deformación plana

El valor de la presión mencionada ha variado en los diferentes ensayos pero siempre se ha mantenido en el orden de magnitud de decenas de MPa. Los diferentes valores se detallan en el capítulo dedicado a los Análisis.

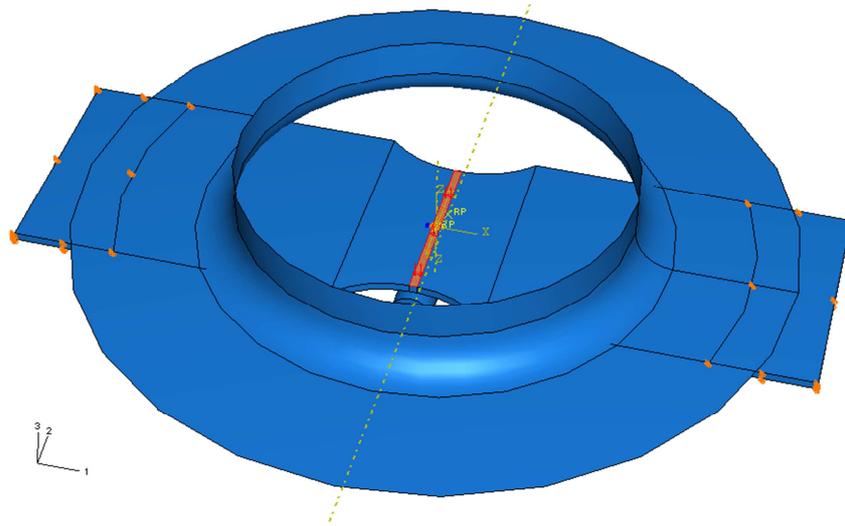


Fig. 49. Zona de aplicación de la presión en el montaje (área destacada en naranja)