

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DEL TROQUEL EMBUTIDOR Y
SIMULACIÓN DEL PROCESO DE
EMBUTICIÓN***

DOCUMENTO 3- CÁLCULOS Y SIMULACIÓN

Alumno/Alumna: Calvo, Vicandi, Xabier

Director/Directora (1): Lobato, Gonzalez, Roberto

Curso: <2018-2019>

Fecha: <Lunes, 18, Febrero, 2019>

ÍNDICE

Documento 3: Cálculos y simulación

	<u>PÁG.</u>
3.1.- Introducción	2
3.2.- Preparación de la matriz para la embutición	3
3.3.- Diagramas FLD y curvas FLC	5
3.4.- Material de la chapa	7
3.5.- Cálculos iniciales	9
3.6.- Preparación de la simulación	12
3.7.- Análisis de los resultados	13
3.8.- Resultados de la simulación	20
3.8.1- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 100 KN</i>	24
3.8.2- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 500 KN</i>	29
3.8.3- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 500 KN y freno uniforme con una fuerza de 0,05 KN/mm</i>	31
3.8.4- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 800 KN y freno uniforme con una fuerza de 0,05 KN/mm</i>	34
3.8.5- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 1200 KN y freno uniforme con una fuerza de 0,05 KN/mm</i>	36
3.8.6- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 900 KN y freno uniforme con una fuerza de 0,05 KN/mm</i>	38
3.8.7- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 800 KN y freno no uniforme</i>	40
3.8.8- <i>Embutición con una fuerza de pisado de 800 KN y freno no uniforme ampliado</i>	45
3.9.- Elección de la prensa	50
3.10.- Elección del cojín de prensa	53

3.1. INTRODUCCIÓN

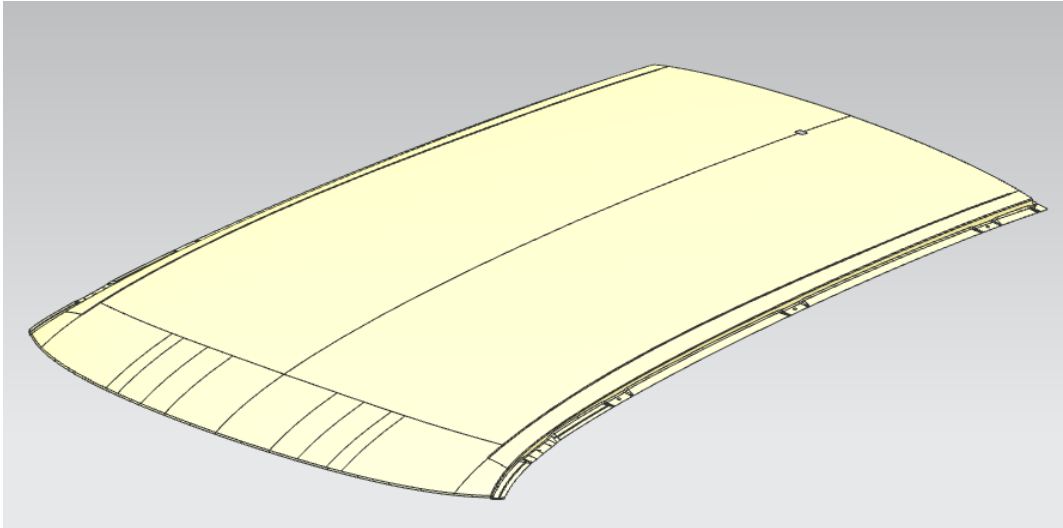
En este documento se expondrá el proceso de preparación de la pieza desde que el cliente la envía hasta que sea apta para su embutición, la importancia de elegir el material adecuado de la chapa según la forma de la pieza y la explicación del comportamiento que tiene éste en este tipo de proceso y se mostrarán y explicarán los resultados y gráficas arrojadas por el programa de simulación en las diferentes pruebas realizadas.

El objetivo final no es otro que, el de obtener la mejor pieza acabada, por lo que, se han llevado a cabo muchas simulaciones en las que se ha jugado con las variables que intervienen en el proceso de embutición para entender el proceso y la manera en la que embute esta pieza.

El programa de simulación también ofrece unos resultados para una buena elección de la prensa necesaria para la embutición de la pieza, por lo tanto, se harán los cálculos correspondientes para obtener un tonelaje de la prensa correcto.

3.2. PREPARACIÓN DE LA MATRIZ PARA LA EMBUTICIÓN

El cliente envía la pieza de la siguiente imagen, la cual, es la pieza final después de pasar por diferentes troqueles con diversas funciones, como el embutido y el cortado, para que se diseñen los troqueles en la empresa con el objetivo de producirla.



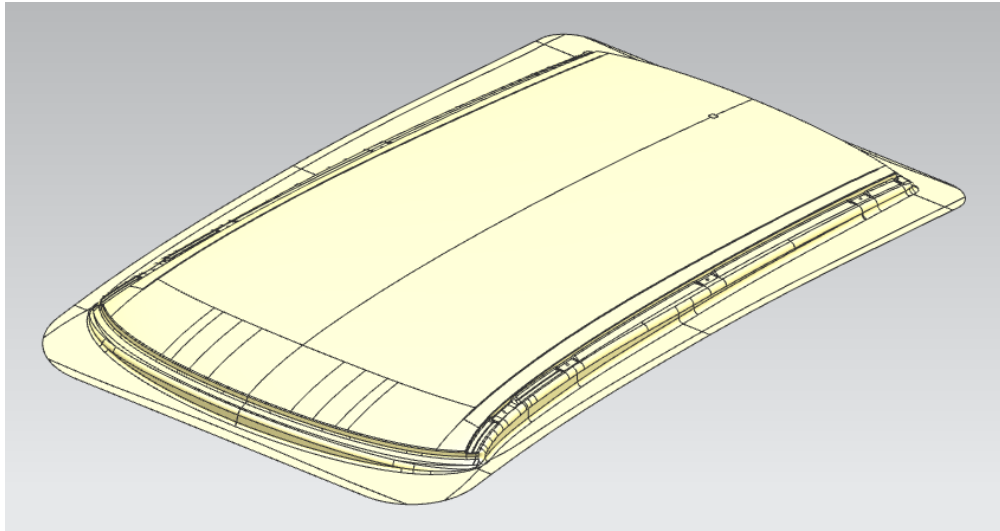
3.1. Imagen: Pieza final

La transformación de la pieza se ejecuta en el software de CAD NX 10 para su posterior cambio de formato compatible con el software de simulación PAM-STAMP 2G 2012.1.

Como el primer proceso de fabricación de la pieza es la embutición de la chapa, que es en lo que se centra este proyecto, se procede a rellenar todos los agujeros que contiene, ya que para realizar la embutición se parte del desarrollo de chapa plana cortado con anterioridad por otro troquel.

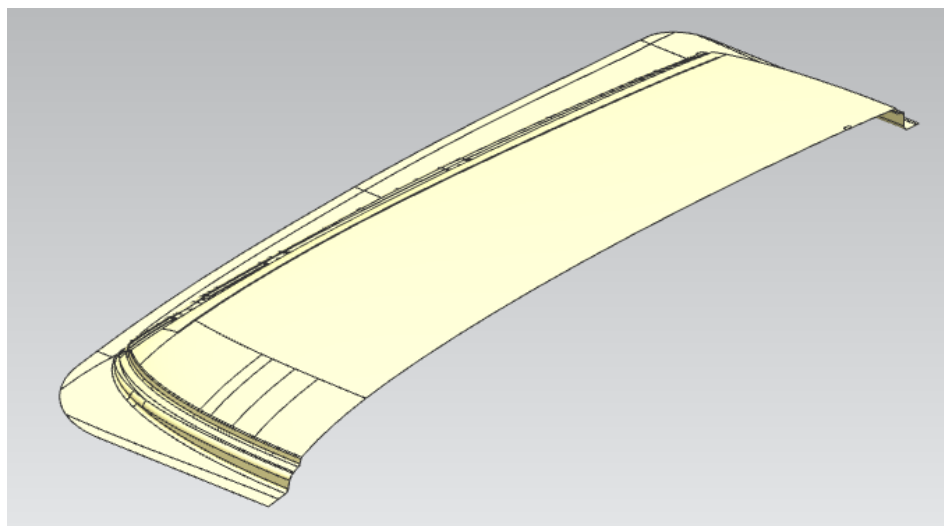
Lo siguiente que se le añade a la pieza es material por todo su perímetro para que sirva de entrada de chapa, de tal forma que, la embutición se realice sin problemas. Para ello, se le asigna unos radios generosos en la zona añadida consiguiendo que fluya el material de manera adecuada. Además, de esta forma, se incluye una superficie de pisado, la cual, se calcula con el pensamiento de incluir unos frenos en la matriz, por lo tanto, debe de ser lo suficientemente grande como para que las marcas que hacen éstos sobre la chapa no se introduzcan dentro de la pieza a fabricar.

En la siguiente imagen se muestra como queda la matriz preparada para el proceso de simulación mediante software y su posterior diseño del troquel embutidor.



3.2. Imagen: Matriz

Sin embargo, como partimos de una matriz simétrica conviene hacer las simulaciones con una mitad de la matriz, y establecer un plano de simetría. De esta manera se reducirá el coste computacional significativamente sin perder precisión de resultados. Por esa razón, la superficie que importaremos en el programa de simulación será la siguiente:



3.3. Imagen: Superficie a importar en PAM-STAMP

3.3. DIAGRAMAS FLD Y CURVAS FLC

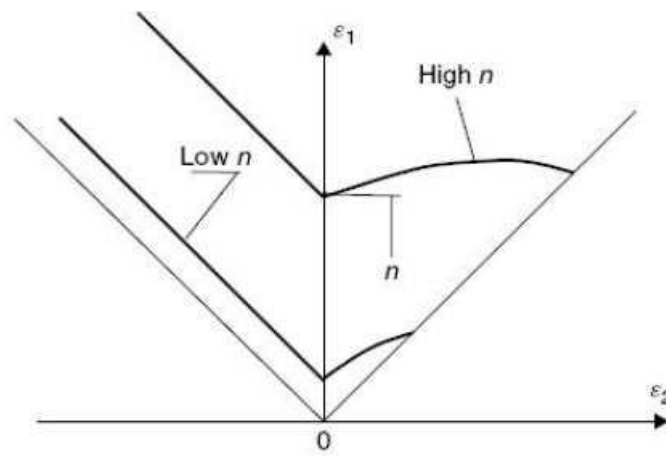
Los diagramas FLD (Forming Limit Diagram) constituyen un mapa de deformaciones que muestra el inicio de la estricción localizada para diferentes caminos de deformación. Su uso está ampliamente generalizado, tanto a efectos comparativos entre distintas calidades de aceros, como para su utilización como criterio de fallo en la simulación en elementos finitos del conformado de componentes estructurales. Su elaboración experimental es muy delicada, por lo que, necesita de amplia experiencia y de un número elevado de ensayos.

Estos diagramas indican las deformaciones existentes en diferentes condiciones de tensión y/o deformación, desde un estado de tensión uniaxial, situado en la zona izquierda del diagrama, a un estado de deformación biaxial ubicado en la zona derecha. En este diagrama se dibuja una curva FLC (Forming Limit Curve), la cual, indica cuando el material empieza a sufrir la estricción y, por tanto, su posterior rotura. Las curvas FLC se pueden obtener a partir de cálculos teóricos mediante propiedades mecánicas del material y se comparan con las obtenidas en ensayos de estirado.

Los materiales metálicos pueden ser deformados sólo hasta un cierto nivel antes de que aparezca un adelgazamiento o estricción y su posterior rotura, de forma que, dependerá de la combinación de las deformaciones impuestas. En el caso del conformado de chapas metálicas (productos planos), las deformaciones se suelen medir en el plano de la chapa, dado que, las variaciones en el espesor son difíciles de medir con precisión. Por lo tanto, cuando se habla de la relación de las deformaciones se hace referencia a la mayor y menor que se producen en el plano de la chapa. El nivel más bajo de deformaciones sin que la pieza adelgace o rompa se presenta para un estado de deformación plana, o sea, cuando la menor de las deformaciones es cero.

Durante el proceso de conformado, el material puede adelgazarse o incluso aumentar de espesor en determinadas zonas. En lugar de medir dicho adelgazamiento directamente, éste se puede determinar a través de una malla aplicada sobre la superficie de la chapa, considerando durante la deformación, que el volumen se mantendrá constante.

La conformabilidad de las chapas metálicas está influenciada por algunos factores físicos, de los cuales, unos de los más importantes son el coeficiente de endurecimiento n , la sensibilidad a la velocidad de deformación m , anisotropía plástica R , el desarrollo de daño estructural, la deformación en el plano y fuera del plano y el camino de deformación. Generalmente, las curvas FLC de los aceros tienen esencialmente la misma forma. Las diferencias suelen ser en su posición vertical en el diagrama, la cual, está determinada por el coeficiente de endurecimiento por deformación y el espesor del material. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente la forma de una curva FLC para un material con un valor elevado de n y otro con un valor pequeño de n .



3.4. Imagen: Diagrama FLD y curva FLC

3.4. MATERIAL DE LA CHAPA

Es de gran importancia elegir bien el material de la chapa que se va a utilizar para la embutición, ya sea por parte del cliente o por parte del proyectista, ya que puede facilitar mucho el diseño del troquel e incluso ahorrarse una segunda embutición con un segundo troquel para poder llegar a la pieza final. Para ello, hay que tener en cuenta la textura cristalográfica del acero laminado, ya que al realizar estas embuticiones a muy baja velocidad se consigue que los cristales de la chapa, los cuales presentan una alta simetría, se desplacen unos respecto de los otros, pero siempre manteniendo en contacto sus caras.

La anisotropía plástica en los metales presenta una fuerte dependencia con respecto al desarrollo de textura en los procesos de transformación, ya sea por procesos tales como solidificación, deformación, recristalización o transformaciones de fase. Consecuentemente, la respuesta mecánica del material queda fuertemente condicionada por la textura cristalográfica y morfológica desarrollada durante estos procesos de transformación, en particular referidos a procesos de laminación de chapa en frío. El comportamiento anisotrópico de productos planos puede caracterizarse por medio del coeficiente de Lankford o coeficiente de anisotropía R, el cual representa la capacidad del material para acomodar la deformación plástica en el plano de la chapa. En general, las propiedades de embutibilidad del material se describen a través del conocimiento de estos coeficientes, específicamente del valor de R a 0° (R0), 45° (R45) y 90° (R90) de inclinación respecto de la dirección de laminado original de la chapa. Valores de anisotropía plástica planar lo más pequeños posibles y valores de anisotropía plástica normal elevados constituyen, en general, un buen indicador de alta formabilidad. El coeficiente de anisotropía plástica normal está asociado a una buena embutibilidad, mientras que, la anisotropía plástica planar describe la tendencia del material a la formación de orejado en procesos de embutido.

Es por todo esto y debido a la complejidad de embutido de la pieza del proyecto, además de que se han realizado varias simulaciones con diversos materiales como se expondrá en el apartado correspondiente, se ha llegado a la conclusión de que el material escogido para esta pieza debe ser el acero IF18 adquirido de la biblioteca de materiales que lleva adjunta el software de simulación PAM-STAMP.

No obstante, para localizar mejor el material de la chapa se expone las equivalencias de los aceros entre las distintas normas existentes:

EN 10130		EU 130	DIN 1623/1	NF A 36-401	BS 1449/1	ASTM A 1008-01	JIS G3141-96
DC01	10330	FeP01	St12	C	CR4	CS	-
DC03	10347	FeP03	RR St13	E	CR2	DS	SPCC
DC04	10338	FeP04	St14	ES	CR1	DDS	SPCD
DC05	10312	FeP05	St15	SES	-	-	SPCE
DC06	10873	FeP06	IF18	-	-	EDDS	SPCE
DC07	10898	-	-	-	-	-	-

3.1. Tabla: Equivalencias aceros

Las propiedades mecánicas del material elegido se pueden obtener de la siguiente tabla:

Grade	Material number	Yield strength $R_e^{1)}$ MPa	Tensile strength R_m MPa	Elongation $A_{80}^{2)}$ % min.	r_{90} min.	n_{90} min.
Low-carbon, non-alloy steels for direct cold forming (EN 10 130)						
DC 01	1.0330	140–280	270–410	28	–	–
DC 03	1.0347	140–240	270–370	34	1.30	–
DC 04	1.0338	140–210	270–350	38	1.60	0.18
DC 05	1.0312	140–180	270–330	40	1.90	0.20
DC 06	1.0873	120–170	270–330	41	2.10	0.22
DC 07	1.0898	100–150	250–310	44	2.50	0.23

3.2. Tabla: Propiedades mecánicas

Se puede apreciar como el acero seleccionado contiene unos coeficientes de endurecimiento n_{90} y de anisotropía plástica normal r_{90} elevados que garantiza una buena embutibilidad requerida para este tipo de pieza.

3.5. CÁLCULOS INICIALES

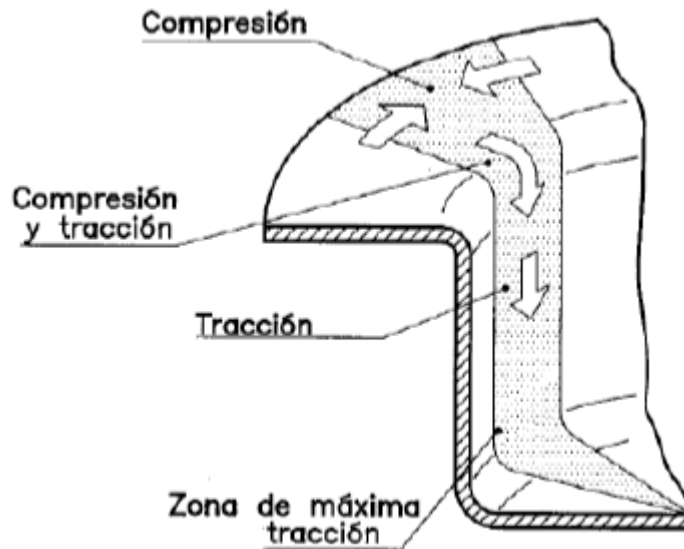
Ciertamente, no se requiere un gran número de cálculos iniciales para comenzar la simulación, ya que será el propio software PAM-STAMP el que realice un tedioso proceso de cálculo mediante elementos finitos, que tardará unas cuantas horas debido a la geometría de la pieza.

El único dato inicial que se pide para poder hacer la simulación en PAM-STAMP es la fuerza ejercida por el pisador y su desplazamiento, pero éste último bastará con darle una distancia suficiente para que, en el instante en el cual la matriz haga contacto con el pisador, la chapa no esté tocando con el punzón en ningún punto. Si se introdujera un freno también habría que tener en cuenta la fuerza resistente ejercida por éste.

A partir de la fuerza del pisador y mediante la cinemática del movimiento de los diferentes elementos, el propio software se encarga de proporcionar todas las variables del proceso de embutición, ya sean fuerzas de contacto, presiones, tensiones, energía, etc. Es por ello que, únicamente, se hará un precálculo de la fuerza necesaria en el pisador de forma aproximada.

No se exige gran precisión para dicho precálculo, ya que, tal y como se verá posteriormente, la fuerza del pisador se irá ajustando en función de los resultados obtenidos en las simulaciones.

Para calcular la fuerza necesaria del pisador, primero hay que calcular la fuerza de corte máxima que resiste el material de la chapa, ya que la fuerza del pisador suele estimarse un diez por ciento menos que la fuerza de corte. En este caso, se ha hecho una estimación del perímetro de la chapa que sufre embutición, es decir, las partes que sufren las siguientes fuerzas:



3.5. Imagen: Fuerzas embutición

Para el cálculo de la máxima fuerza cortante admisible se utilizará la siguiente expresión, que servirá solamente como punto de partida:

$$F_c = P_{ch} \cdot e_{ch} \cdot \tau_{adm\ mat}$$

F_c = Fuerza de corte (N).

P_{ch} = Perímetro del desarrollo de chapa (mm).

e_{ch} = Espesor de la chapa (mm).

$\tau_{adm\ mat}$ = Tensión cortante admisible del material de la chapa (N/mm²).

Los datos que se tienen son los siguientes:

$$P_{ch} = 950\ mm.$$

$$e_{ch} = 0,7\ mm.$$

$$\tau_{adm\ mat} = 165\ N/mm^2.$$

$$n_{90} = 0,22$$

$$r_{90} = 2,10$$

La fuerza de corte obtenida es:

$$F_c = 108,85 \text{ kN}$$

Por lo tanto, la fuerza de pisado es la siguiente:

$$F_p = 0,9 \cdot F_c = 0,9 \cdot 108,85 = 97,9 \text{ kN} \approx 100 \text{ kN}$$

Se ha definido de forma aproximada la fuerza que debe ejercer el pisador (unos 100 KN), pero tal y como se comprobará posteriormente en las simulaciones, este valor será insuficiente, ya que se observará la formación de arrugas en la pieza y, por lo tanto, habrá que aumentar su valor para que desaparezcan. El problema de aumentar la fuerza del pisador es que la chapa se romperá por alguna zona, considerando la necesidad entonces, de introducir uno o varios frenos y su correspondiente fuerza resistente, con lo cual, habrá que realizar varias simulaciones para llegar a un valor adecuado, tanto de fuerza del pisador, como de fuerza de frenos y conseguir una pieza final válida.

No es necesario realizar ningún otro cálculo inicial, ya que la fuerza del pisador es la única variable que hay que introducir en PAM-STAMP para que pueda comenzar la simulación, además de la variable, ya comentada, del desplazamiento del pisador. También, se tendrá en cuenta el valor de las fuerzas ejercidas por el freno cuando éste se incluya en las simulaciones.

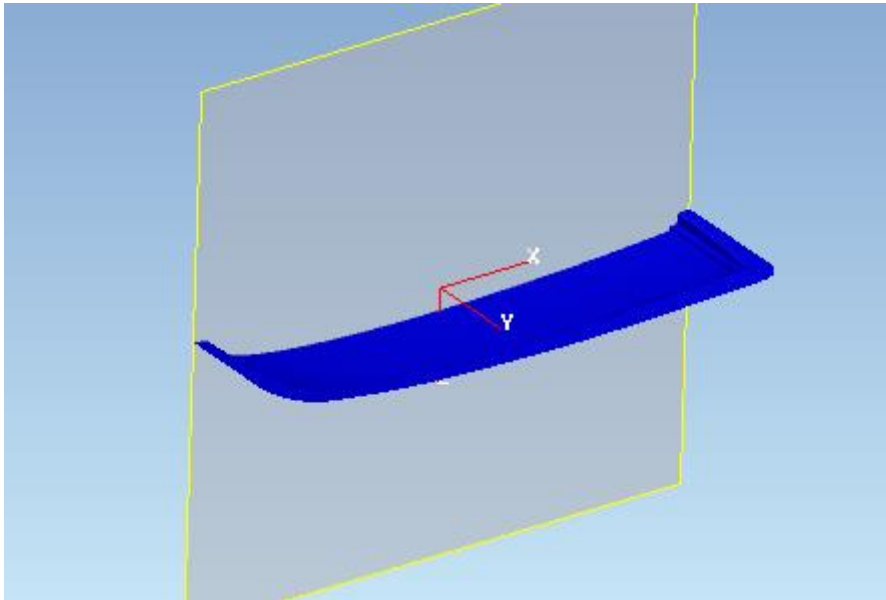
Todas las demás magnitudes las calculará el programa automáticamente basándose en las condiciones cinemáticas del proceso, las propiedades del material de la chapa escogido, el espesor y la geometría de ésta, etc. Es por ello que, en los siguientes apartados se comienza a analizar las diferentes simulaciones realizadas.

3.6. PREPARACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Antes de proceder a exponer las simulaciones realizadas, en las que únicamente se mostrarán y se analizarán los resultados, hay que comentar el modo, por el cual, se ha conseguido llegar a obtener dicho estudio.

El módulo seleccionado ha sido AutoStamp.

Como se explica en el apartado 3.2, la matriz que se importará en PAM-STAMP será la mitad y se utilizará un plano de simetría para el cálculo de toda la pieza.



3.6. Imagen: Plano de simetría

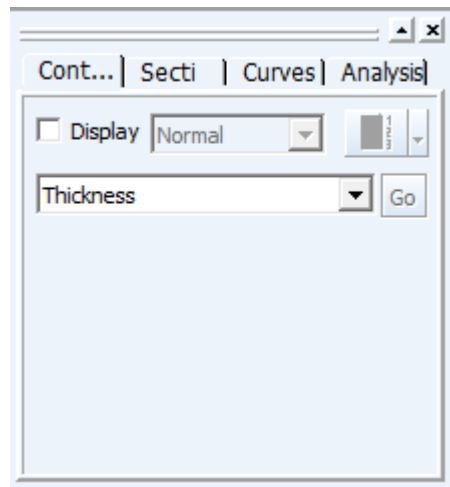
Para la definición del material de la chapa se utilizó la biblioteca de PAM-STAMP y la opción Autokeeler para generar la curva FLC.

En todo momento se han elegido opciones de prensa de simple efecto. Y se han tenido en cuenta las fases Gravity, Holding, y Stamping del simulador. Auto Stamp realiza una simulación de la embutición de forma exhaustiva y también lenta (en comparación a otros módulos del programa). Se utiliza cuando se necesita validar completamente la pieza.

3.7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para la obtención de las gráficas que se van a analizar en los siguientes apartados de este documento se explican, a continuación, los pasos a seguir dentro del programa de simulación PAM-STAMP con una fuerza de pisador ejemplo.

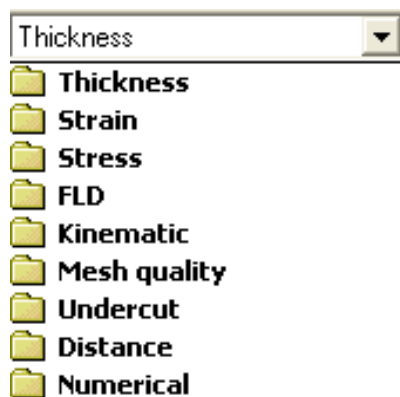
Las herramientas del análisis de los resultados de la simulación se encuentran en el siguiente menú del PAM-STAMP:



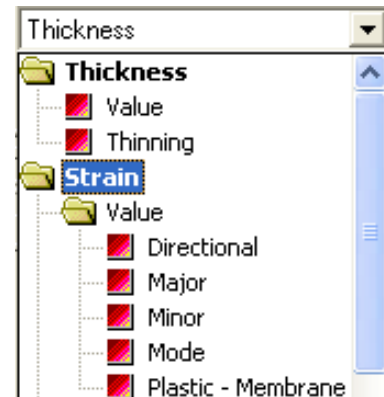
3.7. Imagen: Menú análisis de resultados

Existen diferentes apartados, según los cuales, permiten analizar la chapa de diferentes maneras, tales como, espesor, tensión, deformación, etc (3.8. Imagen) y dentro de cada uno de ellos hay diferentes particularizaciones (3.9. Imagen).

Basta con seleccionar la representación que más interese y activar la casilla Display para que aparezca reflejado el análisis sobre la chapa embutida.



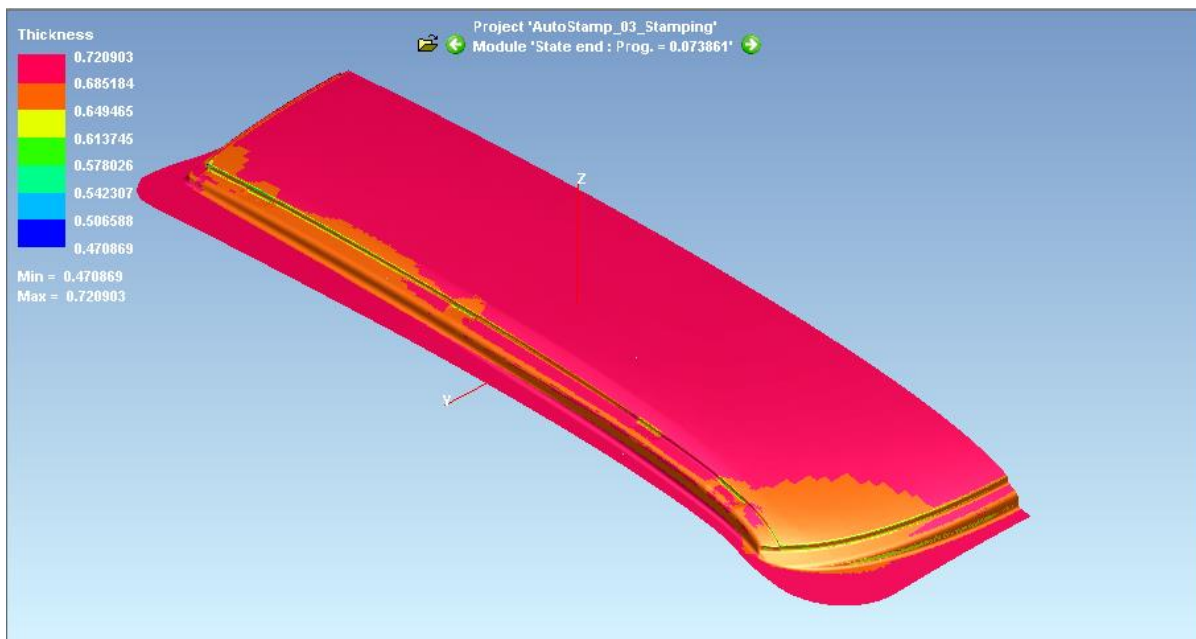
3.8. Imagen: Menú resultados opciones



3.9. Imagen: Menú resultados ampliado

Los apartados de mayor importancia a la hora de dar el visto bueno a la pieza final son los correspondientes al espesor y la deformación, aunque los demás apartados, como los relativos a las tensiones, son de gran ayuda para profundizar en el origen y causalidad de los resultados finales.

Empezando con el análisis, los primeros resultados se aprecian a simple vista dentro del apartado thickness, donde es posible observar como la chapa adelgaza o engorda su espesor dependiendo de la zona de la pieza, como se puede observar en la siguiente imagen.

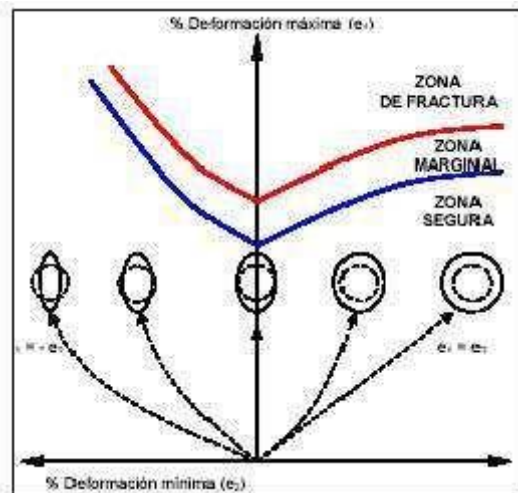


3.10. Imagen: Ejemplo de visualización del apartado de espesores

Una vez analizado el espesor, se procederá al análisis de la deformación sufrida durante la operación de embutición. Para ello, se estudiarán las gráficas FLD, las cuales serán calculadas por el programa mediante la herramienta Autokeeler.

FLD (Forming Limit Diagram) son las siglas de Diagrama Límite de Deformación y, tal y como indica su nombre, es un diagrama donde se representan las deformaciones principales máximas frente a las mínimas. Cada punto es la representación de un elemento de la pieza. Según la situación de cada punto se pueden reconocer zonas de posibles arrugas en la pieza, zonas de roturas, zonas seguras o zonas con grandes estiramientos.

Para que el Diagrama Límite de Deformación tenga sentido debe definirse previamente la curva FLC (Forming Limit Curve), que es la Curva Límite de Deformación característica de cada material. Esta curva no deja de ser una representación de la deformabilidad del material que indica las deformaciones máximas admisibles. En este caso se hará mediante la opción Autokeeler tal y como se ha explicado anteriormente.

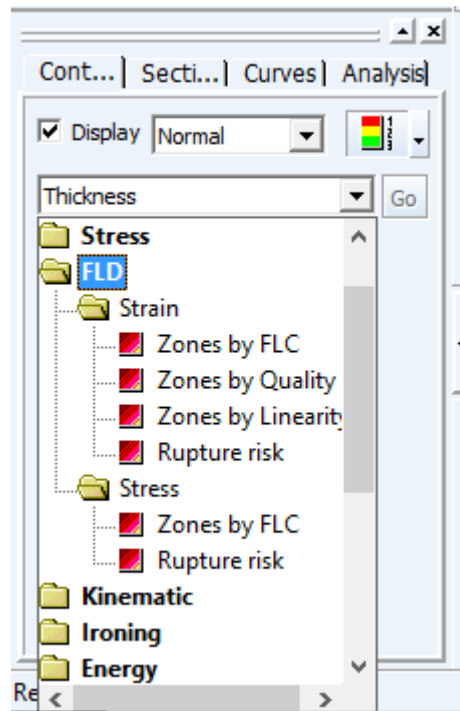


3.11. Imagen: Representación de la FLC

Según se observa en la figura de arriba, en el diagrama se representan las deformaciones máximas y mínimas y se comparan con la curva FLC definida. La propia curva FLC divide al diagrama en varias zonas: marginal, de fractura y segura.

De esta forma todos aquellos puntos situados por encima de la línea roja estarían en una zona de rotura, zona que hay que evitar a toda costa.

Ahora bien, a la hora de analizar dicho diagrama, PAM-STAMP presenta varias opciones. las cuales, se muestran en la siguiente imagen.



3.12. Imagen: Opciones FLD

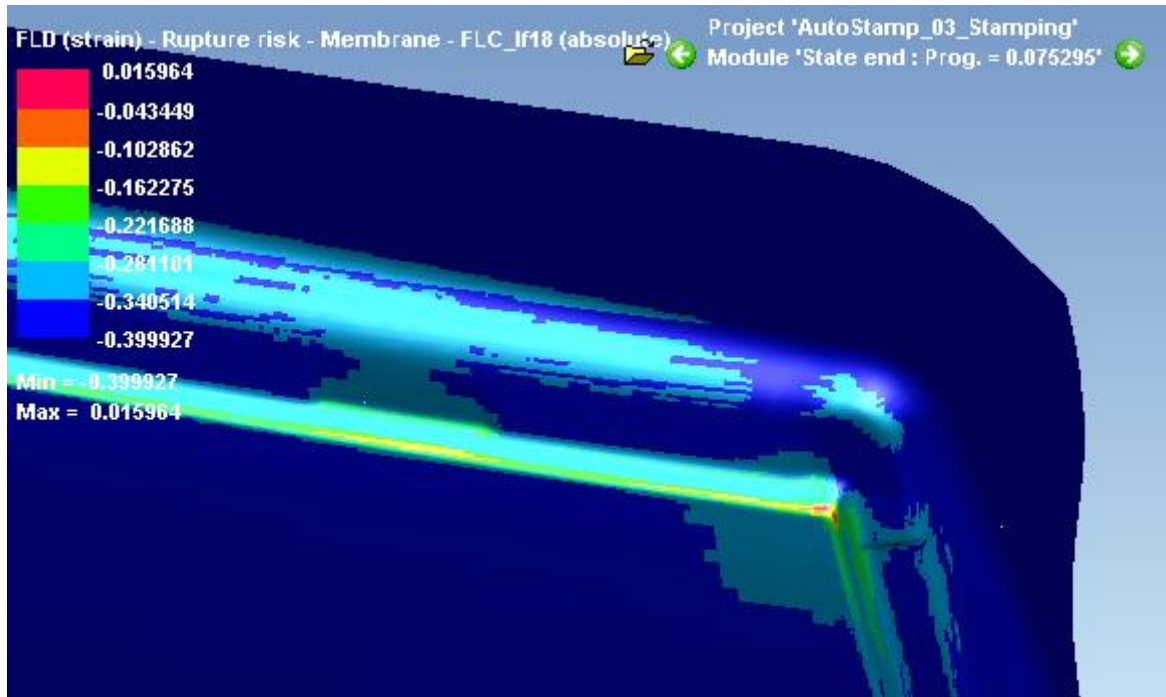
Como ya se ha dicho, el apartado de mayor relevancia para la validación es el de las deformaciones, por lo que, se analizarán los apartados de FLD Strain.

En el primero de ellos, zones by FLC, el programa sólo distingue dos zonas, aquellas por encima y por debajo de la curva FLC, es decir, distingue entre rotura (por encima) y no rotura (por debajo), tal y como se muestra a continuación en la 3.13. Imagen.



3.13. Imagen: Zones by FLD

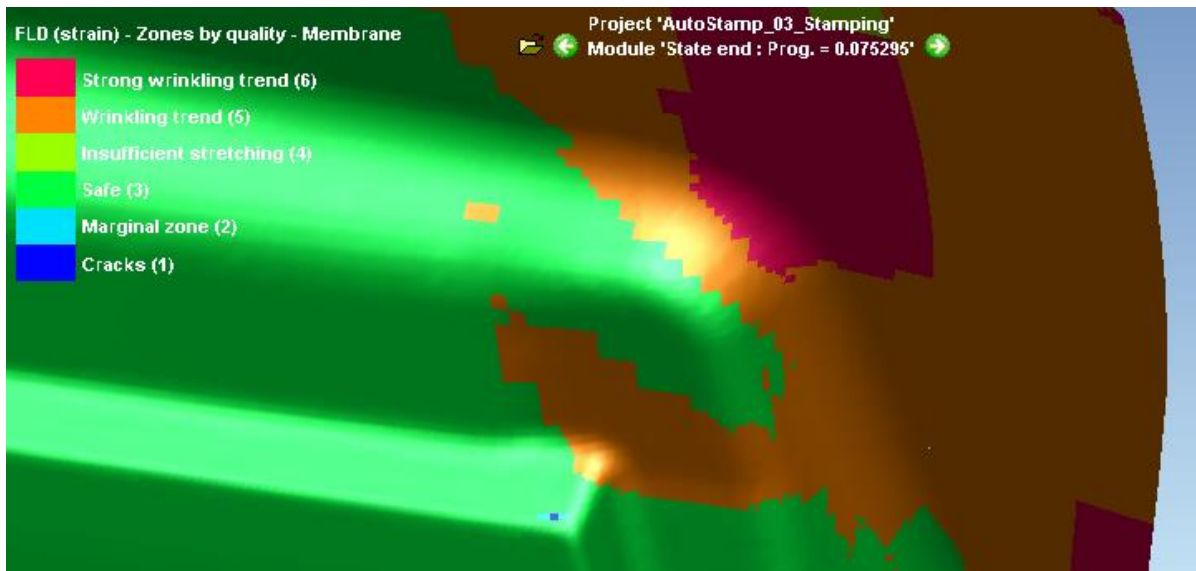
El tercer apartado, Rupture risk, analiza el riesgo de rotura, para ello, simplemente cuantifica la distancia perpendicular entre cada uno de los puntos y la curva FLC. A menor distancia implica que el punto está muy próximo a la curva potencialmente de rotura si el valor es negativo y si es positivo señal que ya se ha producido la rotura, tal y como se aprecia en la 3.14. Imagen.



3.14. Imagen: Rupture Risk

Estas dos representaciones no dejan de mostrar los mismos resultados, pero de distinta forma.

No obstante, existe una tercera gráfica que es la más interesante de las tres, ya que aporta más información, como la tendencia a la formación de arrugas, estrechamientos insuficientes, roturas.... Esta gráfica la denomina FLD zones by Quality y muestra una información más detallada de los resultados, como se puede observar en la siguiente imagen que se adjunta.



3.15. Imagen: Zones by Quality

Como puede observarse, la pieza se divide en diferentes zonas cuya representación se explica a continuación:

- Zona roja (Strong wrinkling trend): las zonas coloreadas en rosa indican la fuerte tendencia a la creación de arrugas, es casi seguro que aparezcan arrugas en dicha zona. Por lo tanto, habrá que evitar que aparezcan estas zonas en la pieza válida, no teniendo importancia que aparezcan en la zona de pisado de la chapa.
- Zona naranja (Wrinkling trend): en estas zonas existe una tendencia a la formación de arrugas, lo cual, no implica que vayan a aparecer, sólo que existe la tendencia. Algo de este color puede existir en la pieza, pero cuanto menos mejor.
- Zona verde claro (Insufficient stretching): las zonas en verde claro han sufrido un adelgazamiento insuficiente, el material no ha fluido bien. Hay que tener especial cuidado con el adelgazamiento del material para no superar los porcentajes mínimos permitidos.
- Zona verde (safe): indica que las partes marcadas en dicho color se han conformado correctamente, por lo que, será el tono predominante en la pieza válida.

- Zona azul claro (Marginal zone): indica las partes de la pieza donde existe una clara tendencia a la rotura, de manera que, no se deberá visualizar ninguna región pintada de este color.

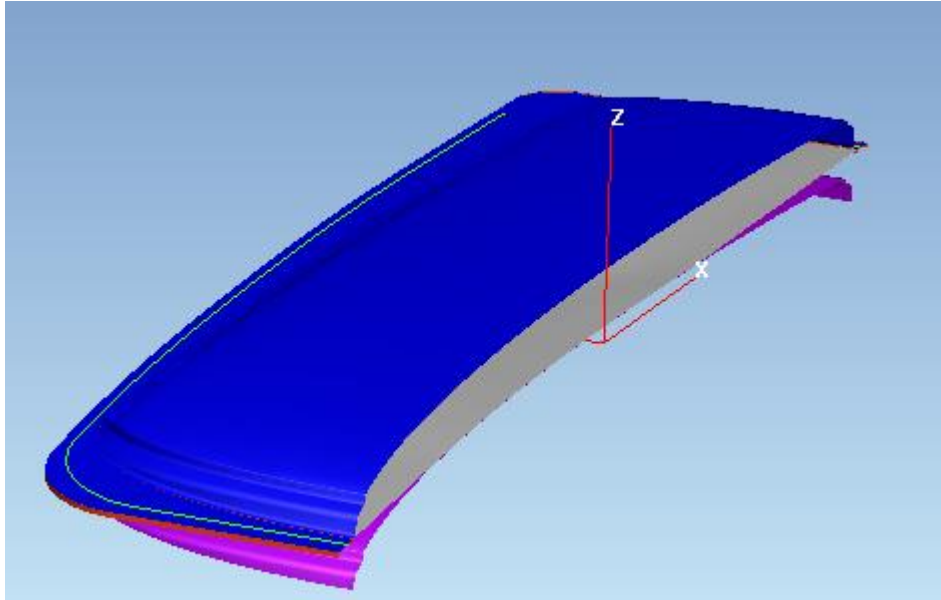
- Zona azul oscuro (Cracks): en estas zonas, la rotura está asegurada. Por muy pequeña que sea la rotura en cualquier zona de la pieza, ya sea zona de pisado o no, la configuración para esa simulación será automáticamente desechada, ya que la pieza no es válida.

Con el análisis de las gráficas de espesor y FLD puede darse el visto bueno a una pieza. En este ejemplo, la pieza no sería válida, ya que existen unas zonas de rotura dentro del diseño de la pieza final, además de varios sectores donde casi seguro se crearán arrugas. Por lo tanto, habrá que hacer más pruebas de simulación hasta que desaparezcan.

Las demás representaciones, como es el caso de las gráficas según las tensiones, sirven para profundizar más en los resultados, analizando, por ejemplo, el origen de las arrugas en función del estado tensional de los elementos, etc.

3.8. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

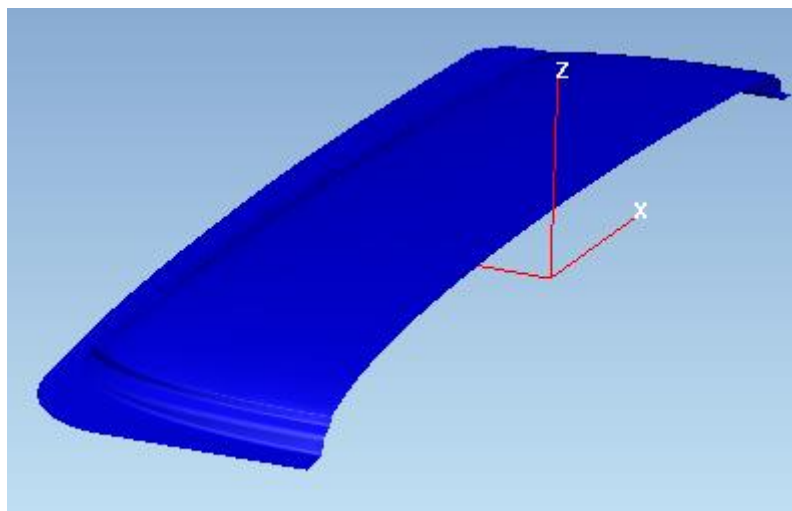
Siguiendo los pasos correspondientes se crean aquellos elementos del troquel necesarios para realizar la simulación de la embutición llegando a la siguiente configuración.



3.16. Imagen: Componentes troquel en PAMP-STAMP

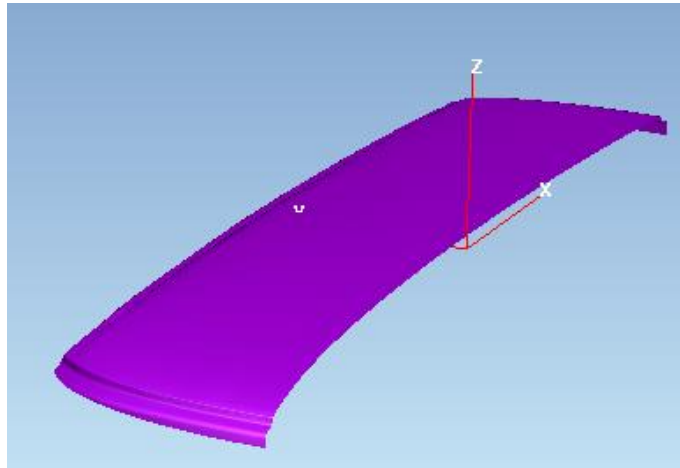
Se pueden observar los distintos elementos del útil que intervienen en el proceso:

✓ Matriz:



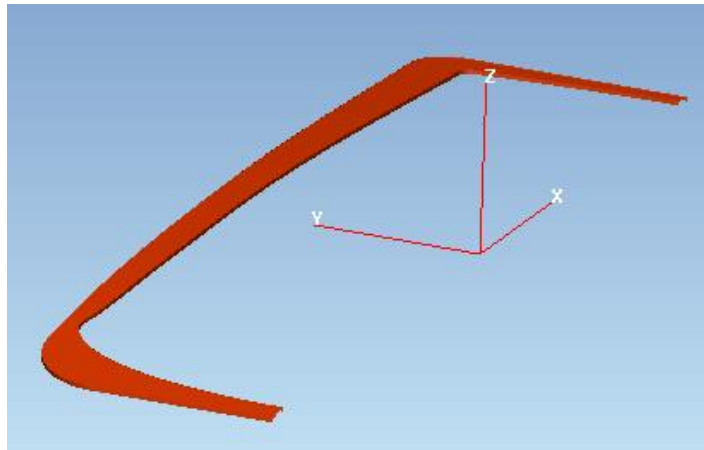
3.17. Imagen: Matriz

✓ Punzón



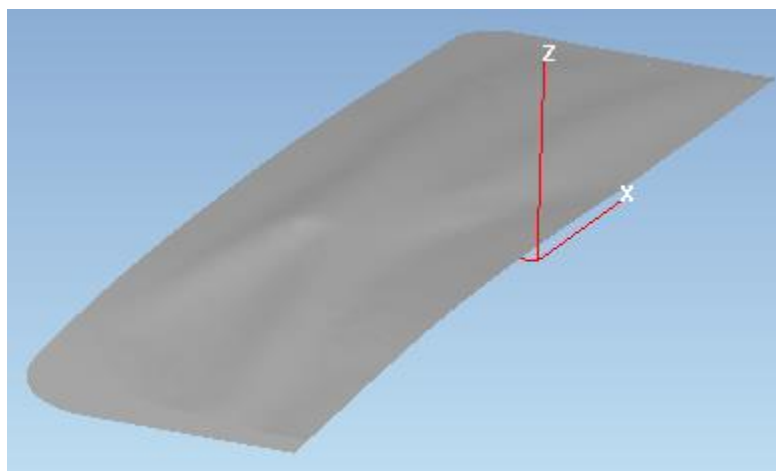
3.18. Imagen: Punzón

✓ Pisador



3.19. Imagen: Pisador

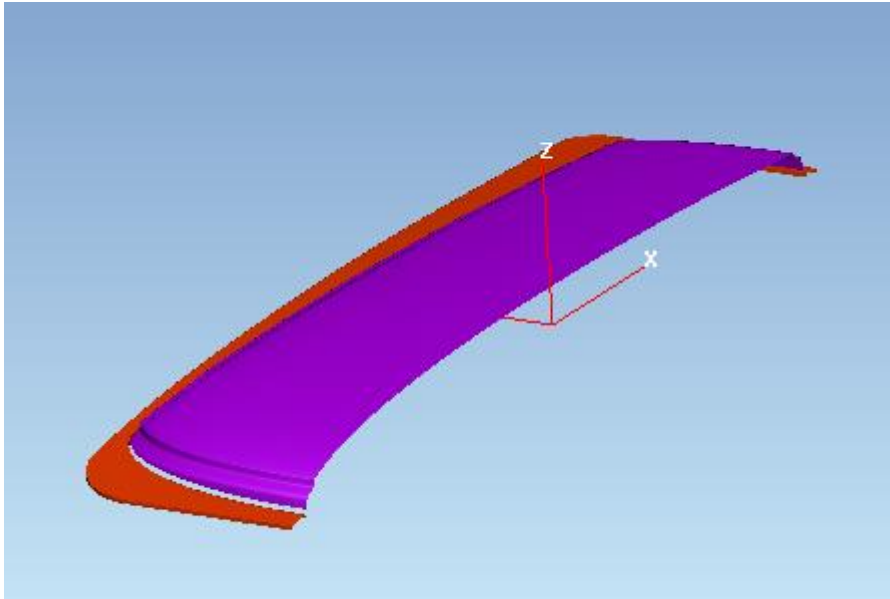
✓ Chapa



3.20. Imagen: Chapa

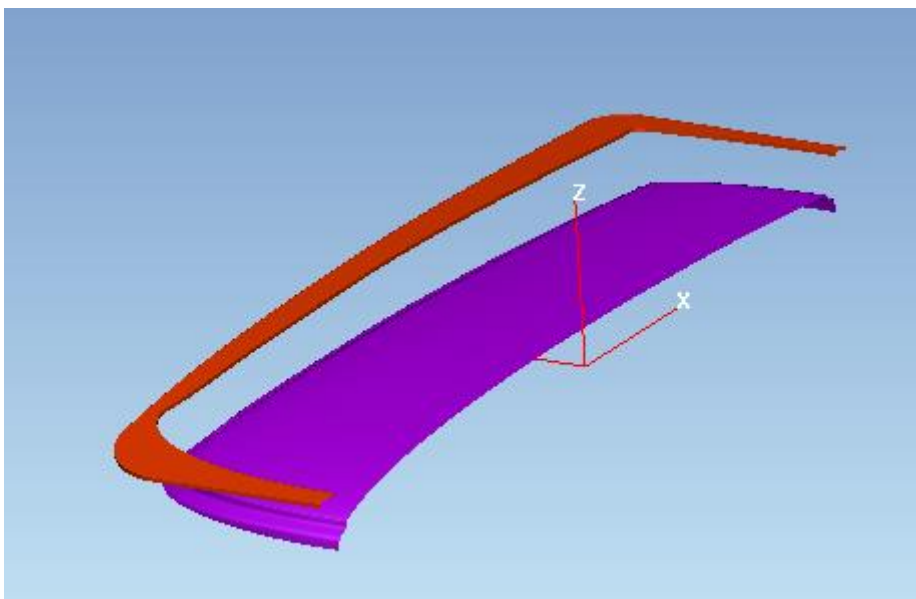
Con el fin de entender mejor el movimiento del troquel en su modo de trabajo de simple efecto se exponen unas imágenes en las que se detalla el paso a paso:

- ✓ La matriz irá amarrada en la parte superior de la prensa y en la parte inferior se amarrará el punzón y se colocará el pisador. Primero, como el movimiento del troquel empieza en la parte inferior, se muestra el posicionamiento de los elementos en dicha parte.



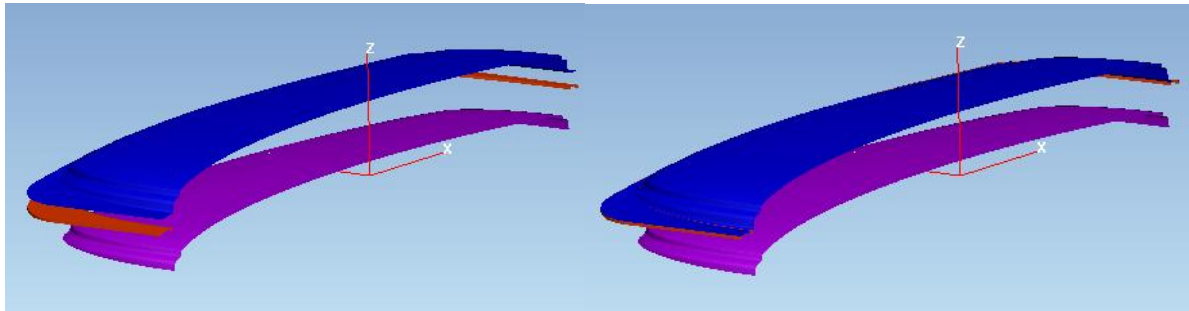
3.21. Imagen: Primer paso

- ✓ Segundo, se observa como el pisador asciende hasta alcanzar su máximo desplazamiento.



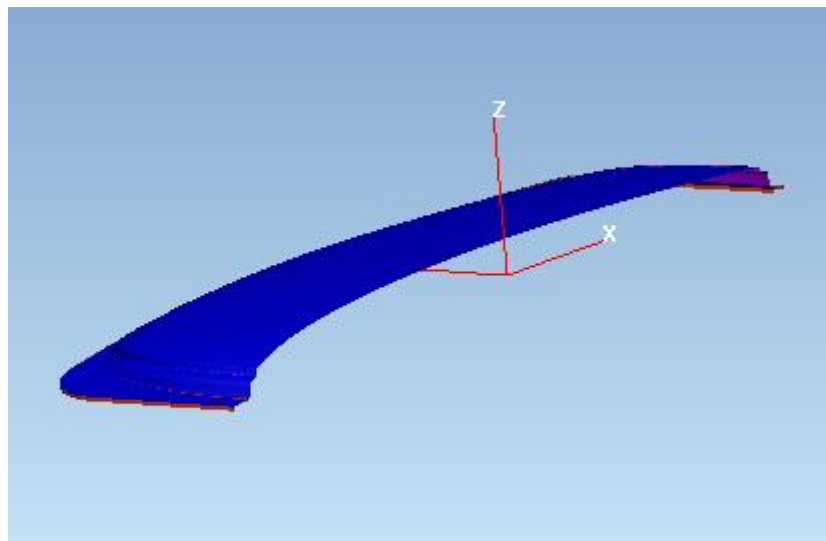
3.22. Imagen: Segundo paso

- ✓ En el siguiente paso, la matriz descende hasta entrar en contacto con el pisador ejerciendo la presión seleccionada sobre la chapa.



3.23. Imagen: Tercer paso A

- ✓ Por último, tanto la matriz, como el pisador descenden conjuntamente hasta su punto máximo, en el cual, el punzón penetra en la matriz embutiendo la chapa como se desea. Para poder mostrar esto en la imagen se corta el útil por la mitad y se percibe el punzón dentro de la matriz. Además, se ha añadido la chapa para que se note que se respeta el hueco de ésta entre la matriz y el punzón.



3.24. Imagen: Cuarto y último paso

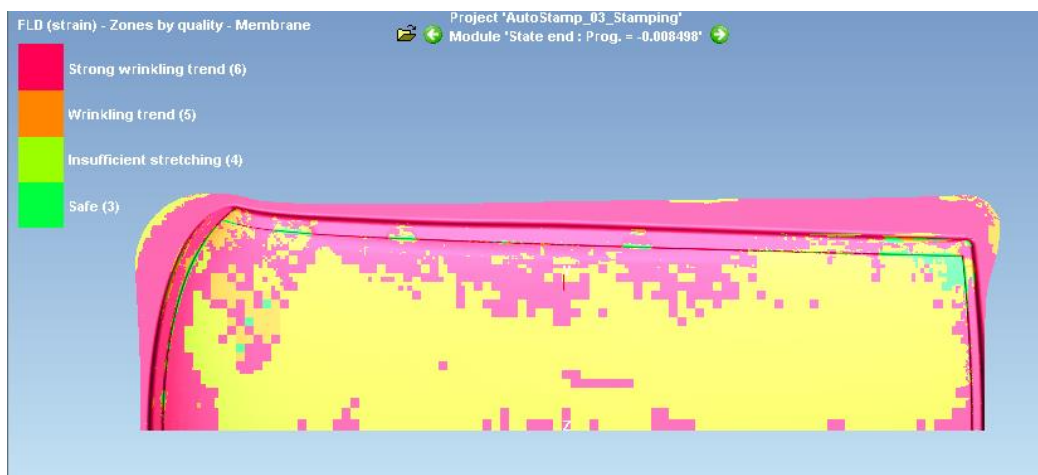
3.8.1. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 100 KN

Una vez descritos los elementos que componen el troquel en la simulación y su modo de trabajar se comienza a realizar varias simulaciones para estudiar el conformado de la chapa.

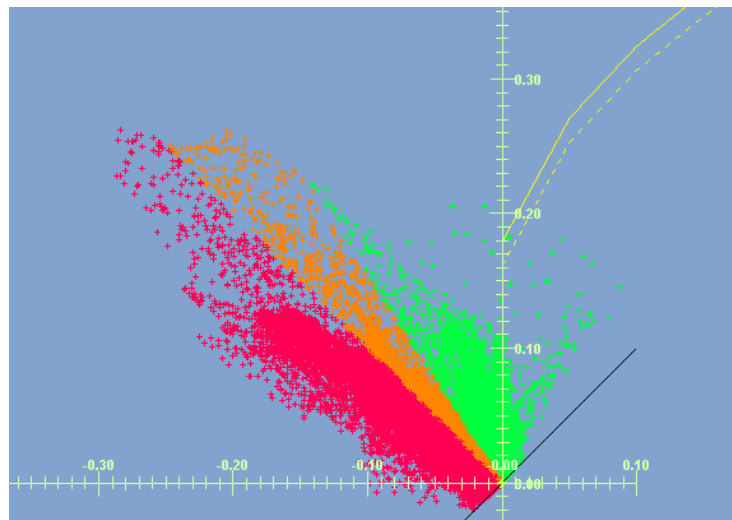
Como se ha explicado anteriormente, es muy importante una adecuada elección del material de la chapa para una buena embutición. Por ello, se han hecho varias simulaciones con distintos materiales estudiando el comportamiento de la chapa y tratando demostrar que, los factores que influyen en la embutición son los explicados en la teoría sobre el coeficiente de endurecimiento y de anisotropía. Para poder apreciar esto se adjuntarán tres de todas las simulaciones realizadas con diferentes aceros. Por consiguiente, se va a mostrar una simulación con el acero DC04, otra con el acero DC05 y otra con el acero escogido DC06 (IF18).

Para la comparación del comportamiento frente a la embutición de los anteriores materiales, se establecerá una fuerza de pisado de 100kN como se ha calculado en el apartado 3.5.

- Acero DC04



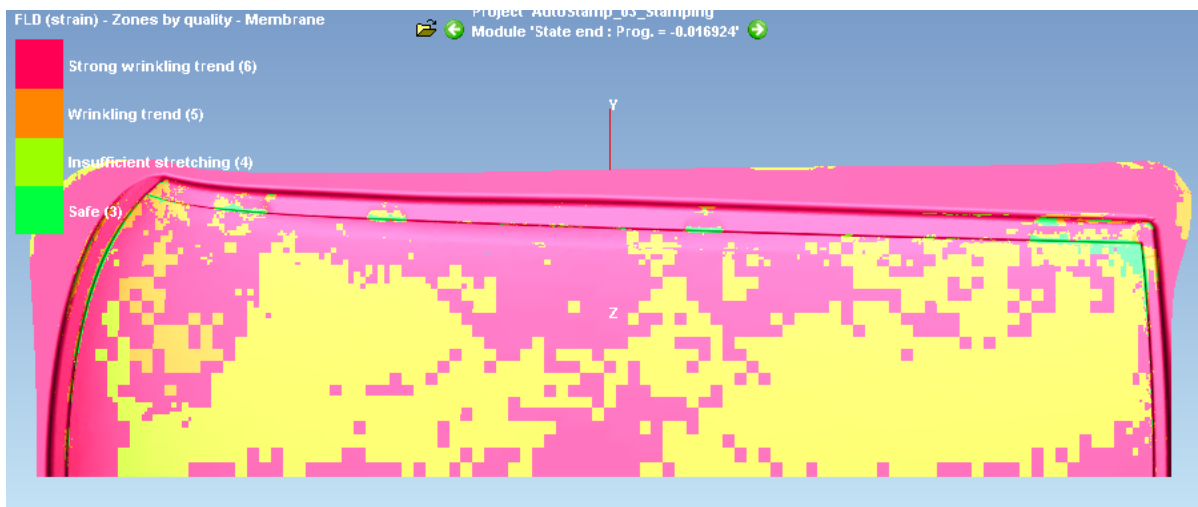
3.25. Imagen: Simulación con Acero DC04



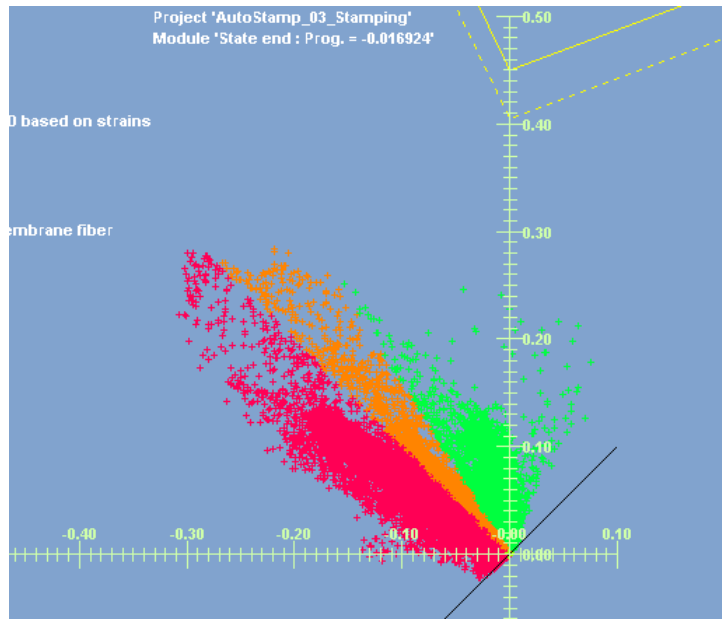
3.26. Imagen: Simulación con Acero DC04

Como se puede apreciar en la anterior imagen, la opción Autokeeler que forma la línea FLC no consigue completarla, y por tanto deberíamos introducir los datos de la FLC a mano. Sin embargo, con la poca información que tenemos podemos descartar este material como se explicará más tarde, por lo que no será necesario introducir esos datos.

- Acero DC05

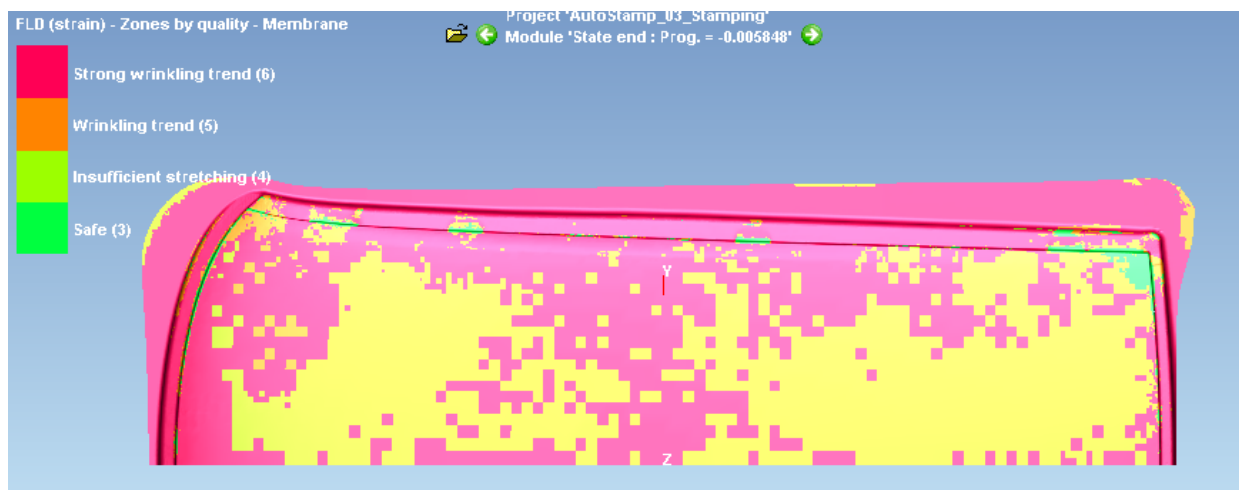


3.27. Imagen: Simulación con Acero DC05

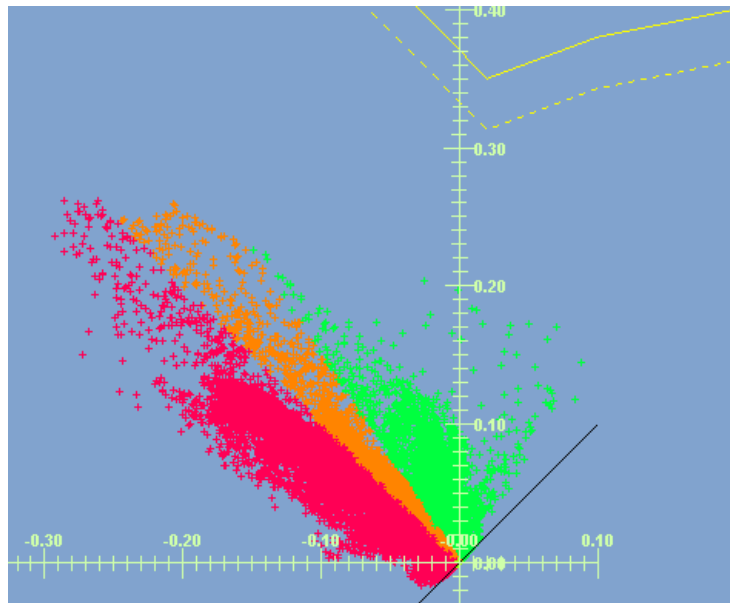


3.28. Imagen: Simulación con Acero DC05

- Acero IF18/DC06



3.29. Imagen: Simulación con Acero DC06

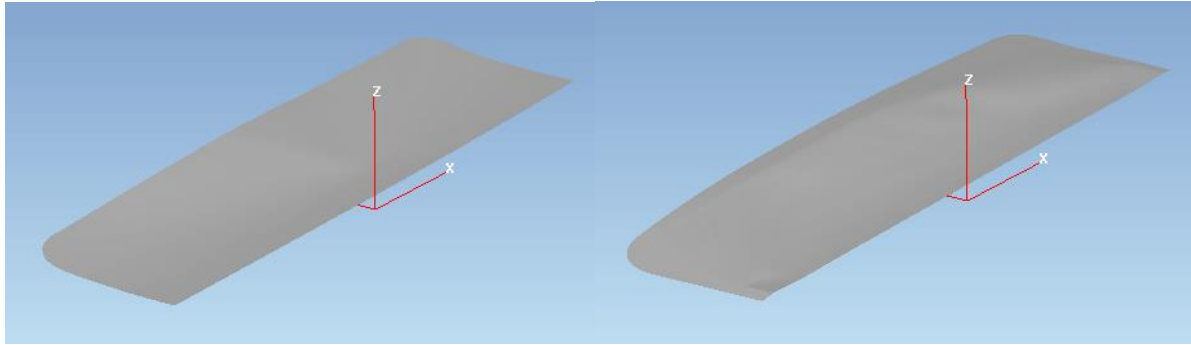


3.30. Imagen: Simulación con Acero DC06

En estas primeras simulaciones de elección de material, lo que interesa y lo más importante es que existan las menores zonas de rotura posibles coloreadas en color azul, las cuales, no pueden aparecer ni un punto en toda la pieza para que sea válida, ya sea zona de pisado o no. Las zonas de arruga coloreadas en color rosa y el espesor se analizarán, posteriormente, con otros métodos para lograr su desaparición. Sin embargo, no encontramos ningún elemento que alcance la rotura, aunque sí podemos apreciar que el acero DC04 la superaría en caso de tener una FLC completa. Descartando éste, no encontramos grandes diferencias en las embuticiones del DC05 y IF18. Comparando las gráficas FLD no encontramos gran diferencia, pero basándonos en lo relatado en el apartado 3.4 y teniendo en cuenta que es más frecuente trabajar con el acero IF18 (por lo que en planta resultará más familiar), se ha optado por elegir este acero.

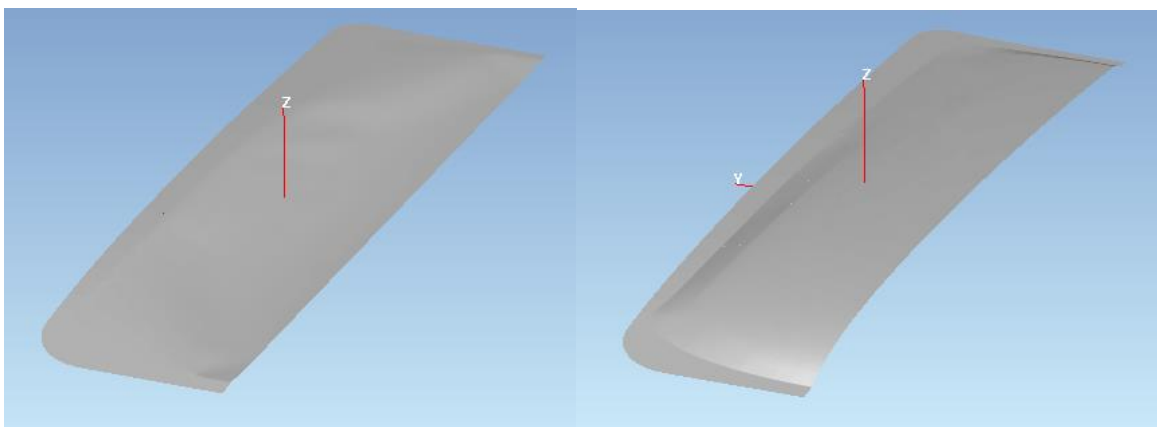
En la siguiente página se muestra en dos partes la progresión de la chapa en el proceso de embutición.

- Pisado:

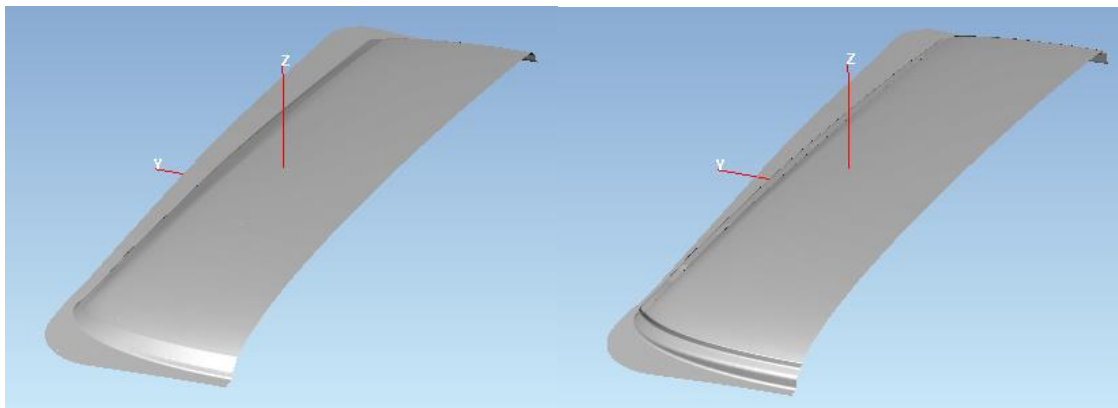


3.31. Imagen: Progresión durante pisado.

- Punzonado:



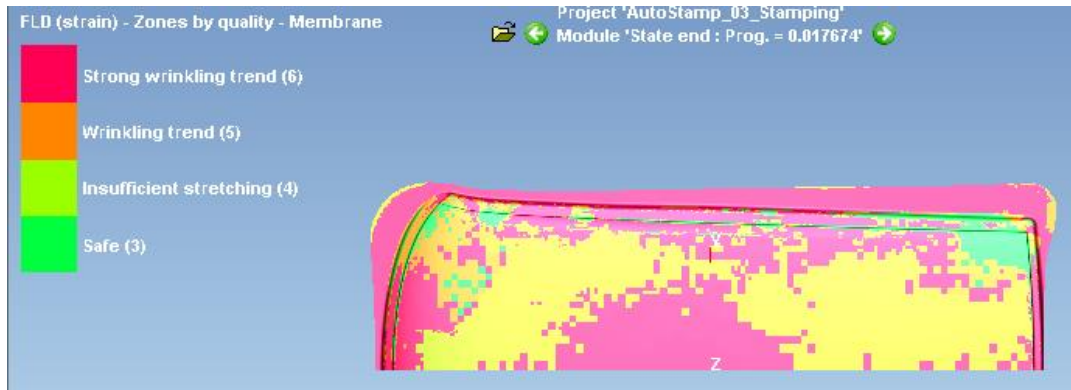
3.32. Imagen: Progresión durante punzonado A.



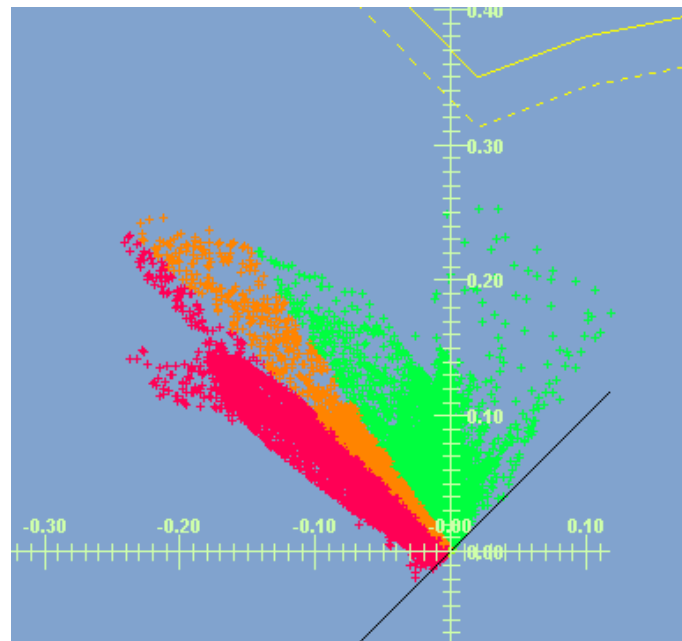
3.33. Imagen: Progresión durante punzonado B.

3.8.2. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 500 KN

Una vez escogido el material de la chapa y siguiendo con la configuración anterior hay que procurar disminuir las zonas de arrugas. Por consiguiente, se realiza una nueva simulación aumentando la fuerza del pisador y provocando así un mayor estiramiento de la chapa.



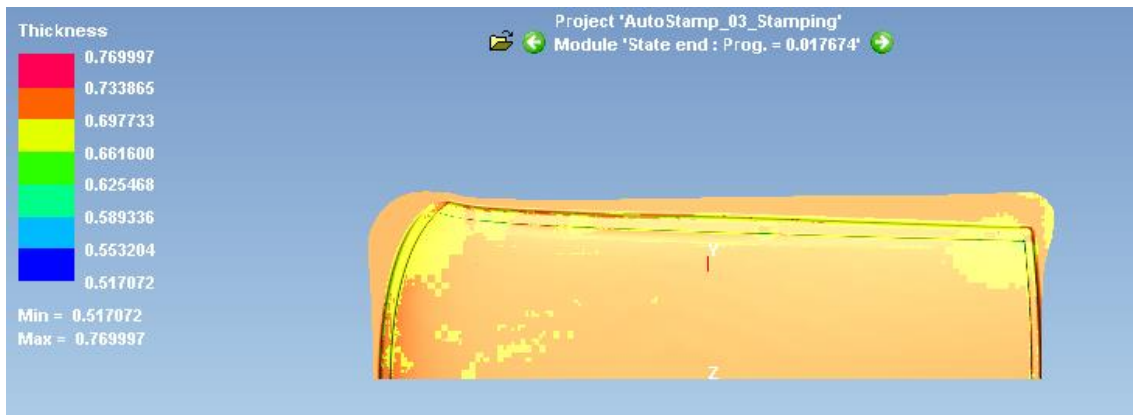
3.34. Imagen: FLD con 500KN (A)



3.35. Imagen: FLD con 500KN (B)

Analizando las gráficas no encontramos mucha mejoría en las zonas de arrugas, pero sí que observamos que empezamos a acercarnos a la zona marginal. Por eso, intentaremos solventar el problema de las arrugas provocando un mayor estiramiento mediante el uso de frenos y no aumentado la fuerza del pisador.

Efectuando la gráfica de los espesores de la pieza se obtiene el siguiente resultado:



3.36. Imagen: Espesor con 500KN (A)



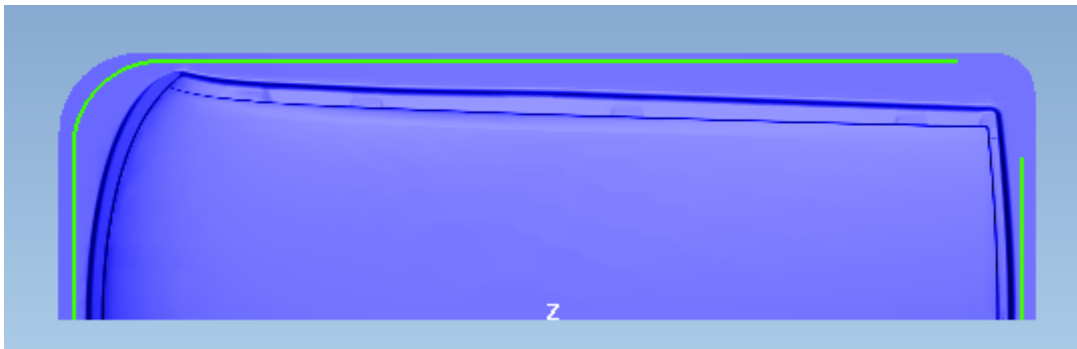
3.37. Imagen: Espesor con 500KN (B)

Para poder dar como válido el espesor de la pieza no debe de adelgazar la chapa más de un 25% en su mayoría y no más de un 40% en puntos críticos. En este caso, la zona de crítica coloreada de azul ha disminuido el grosor un 26% y 6% en el resto de la pieza, luego es aceptable.

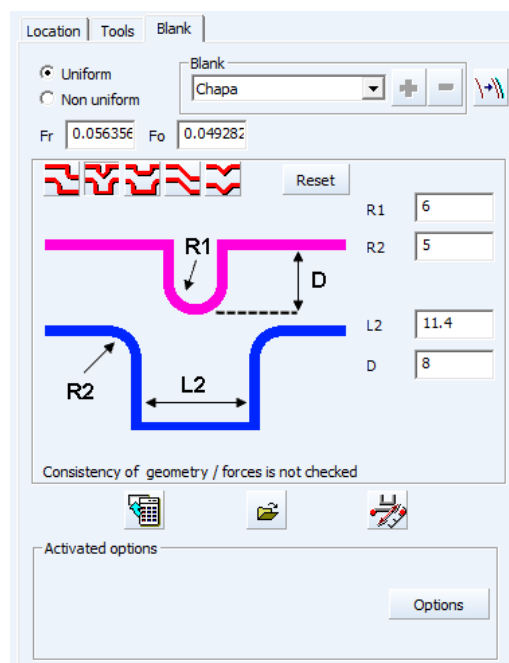
Por lo tanto, esta configuración se podría dar por válida en cuanto al grosor se refiere, pero debido a la gran aparición de zonas de arruga dentro de la pieza tiene que ser descartada y pasar a la siguiente.

3.8.3. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 500 KN Y FRENO UNIFORME CON UNA FUERZA DE 0,05 KN/mm

Como con una fuerza de pisado mayor existen puntos de rotura y con una menor aparecen zonas de arruga dentro de la pieza, la solución que permite este tipo de útiles es incluir frenos para que la chapa fluya mejor en todas las zonas y evitar así, la formación de arrugas. En este caso, se opta por un freno uniforme con poca fuerza resistente al deslizamiento de la chapa por todo el contorno de la matriz y pisador. Cabe recordar que, para lograr aumentar o reducir la fuerza resistente del freno lo que se hace es subir o bajar la altura de éste según lo que se necesite. En la siguiente imagen se muestra la matriz con la forma en la que se ha diseñado el freno en color amarillo para esta nueva simulación.

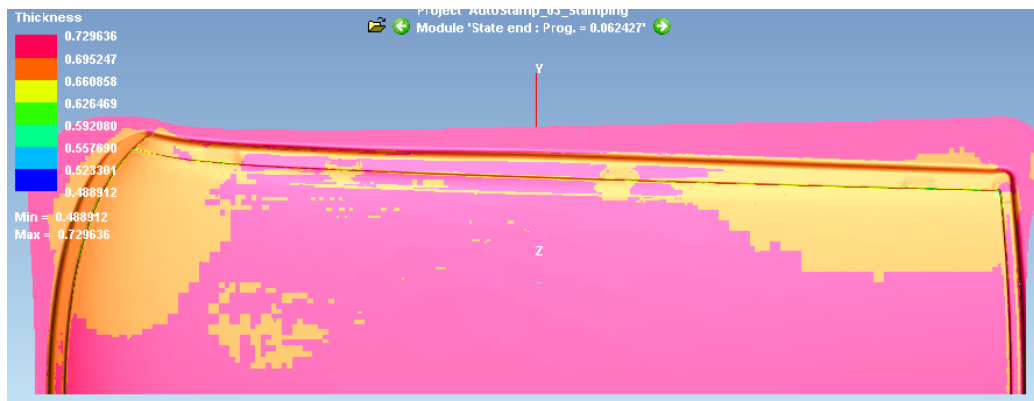


3.38. Imagen: Diseño de los frenos

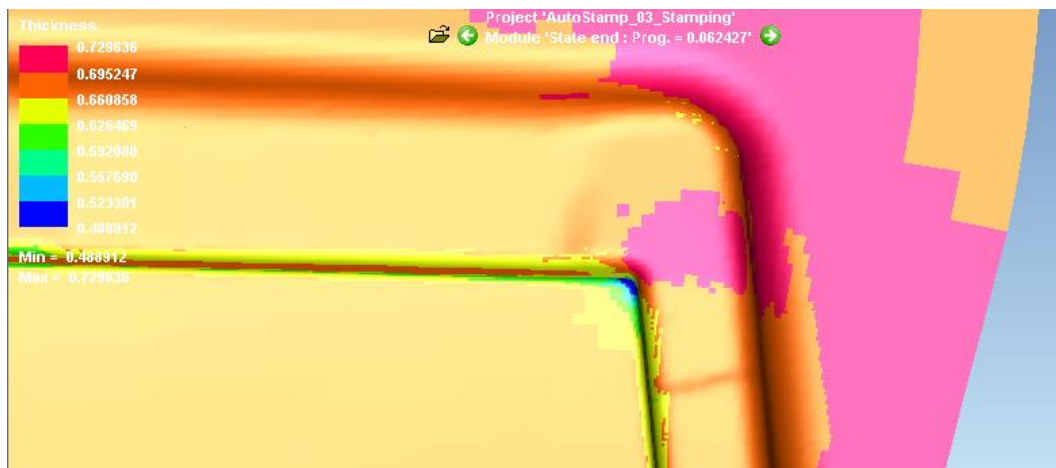


3.39. Imagen: Geometría de los frenos

Una vez dibujado el freno y definidos sus parámetros se procede a realizar la simulación cuyos resultados se muestran a continuación.



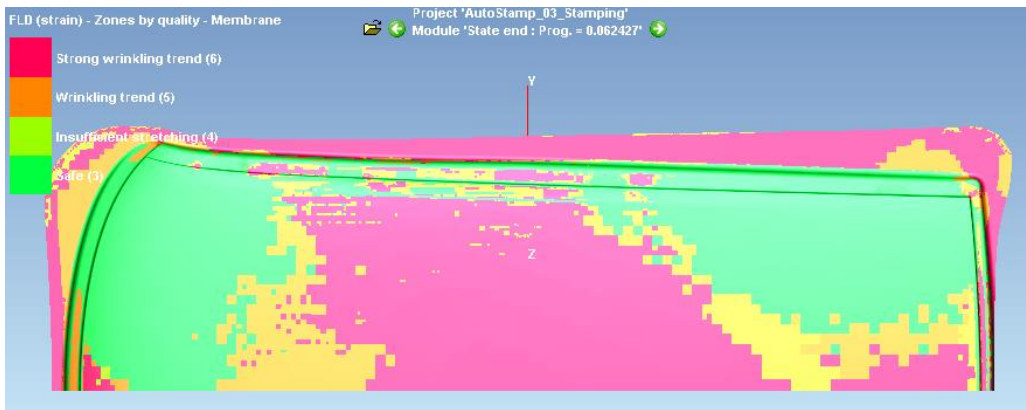
3.40. Imagen: Espesor con 500KN y frenos (A)



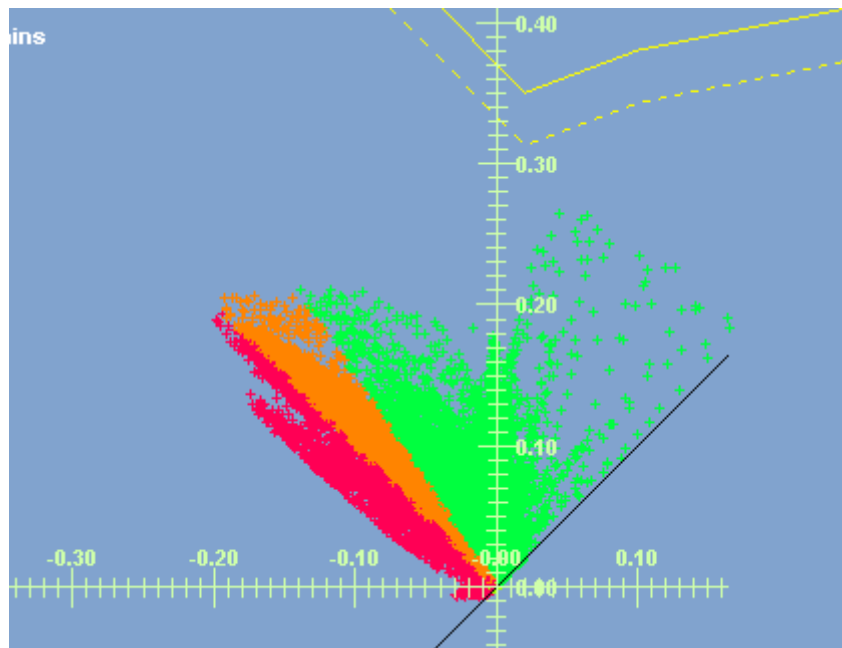
3.41. Imagen: Espesor con 500KN y frenos (B)

En cuanto al espesor de la pieza se observa como la chapa no a fluido uniformemente de manera que, el color predominante es el rosa donde aumenta el grosor un 4%, pero se reduce el espesor de la zona crítica en un 30%. Podemos aceptar esta gráfica teniendo en cuenta que en las zonas de doblado el espesor se reduce ligeramente un 6%. Teniendo en cuenta que el material ha tenido que sufrir un estiramiento en la dirección del doblado podemos suponer que la rigidez de la pieza ha aumentado en esa dirección y no será tan deformable.

Ejecutando la figura y la gráfica FLD de las arrugas y roturas de la pieza se obtiene el resultado que se muestra en la siguiente página:



3.42. Imagen: FLD con 500KN y frenos (A)



3.43. Imagen: FLD con 500KN y frenos (B)

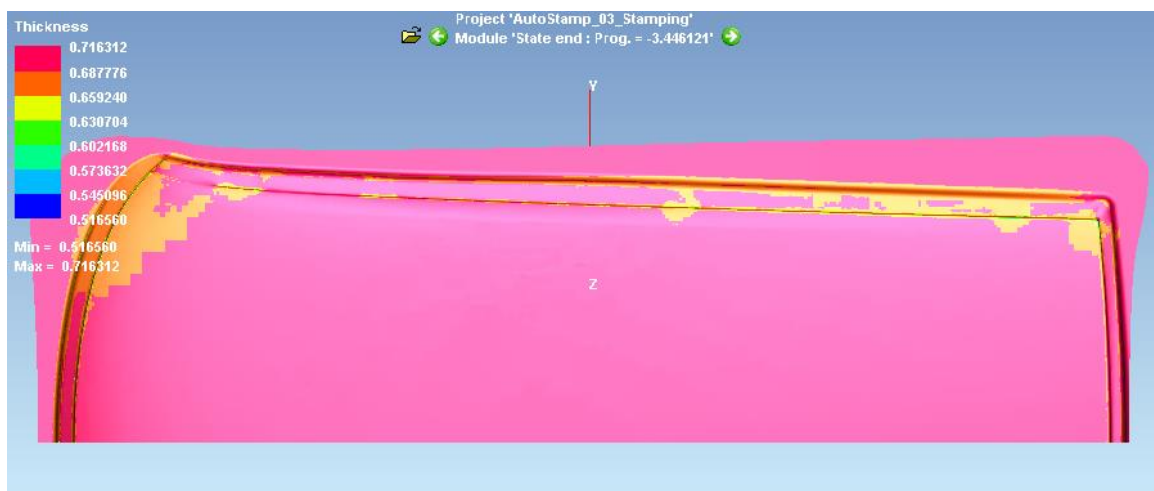
Podemos apreciar bastante mejoría en cuanto a las zonas de arrugas, las cuales disminuyen notablemente dando paso a áreas verdes. Sin embargo, en la gráfica FLD no hemos visto un acercamiento excesivo a la zona marginal, y tenemos margen de aumento de fuerza de pisado para disminuir aún más las arrugas dentro de la pieza sin tener áreas marginales.

Dicho todo esto la configuración hay que desecharla debido a las inmensas zonas de arrugas en la pieza.

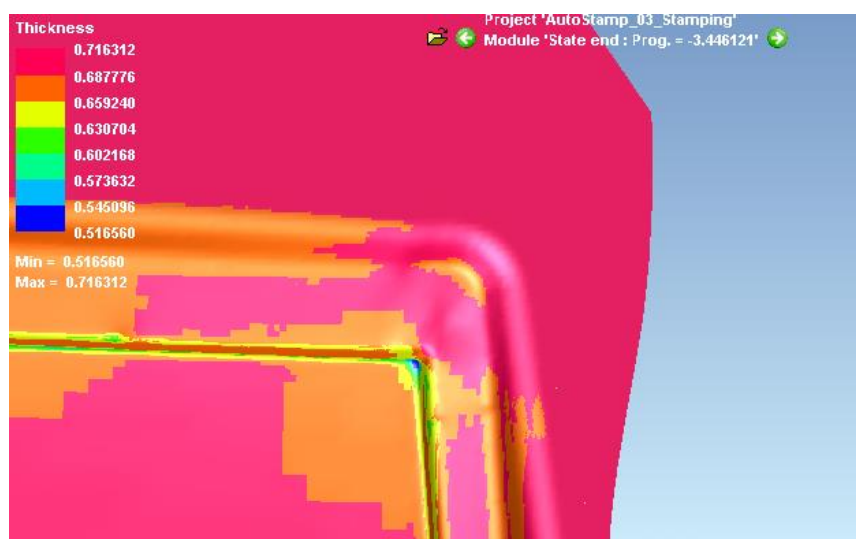
3.8.4. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 800 KN Y FRENO UNIFORME CON UNA FUERZA DE 0,05 KN/mm

Con el objetivo de eliminar las zonas de arruga y tendencia a ésta, se ha aumentado la fuerza que ejercerá el pisador sobre la chapa, y se ejecutará la simulación con el mismo diseño de frenos.

La gráfica de espesores no ha variado con notoriedad. El estrechamiento de la zona crítica ronda el 26% del espesor inicial de la chapa, y el aumento de espesor general es de un 3%. Sin embargo, al igual que en el caso anterior encontramos un ligero estrechamiento (7%) en las zonas de doblado aportando rigidez a la pieza, y validando el espesor logrado del material.

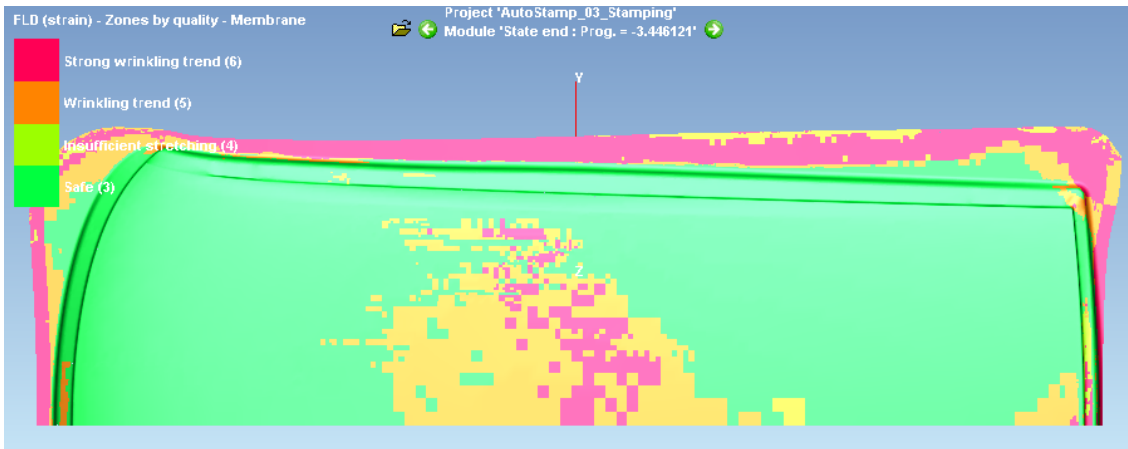


3.44. Imagen: Espesor con 800KN y frenos (A)

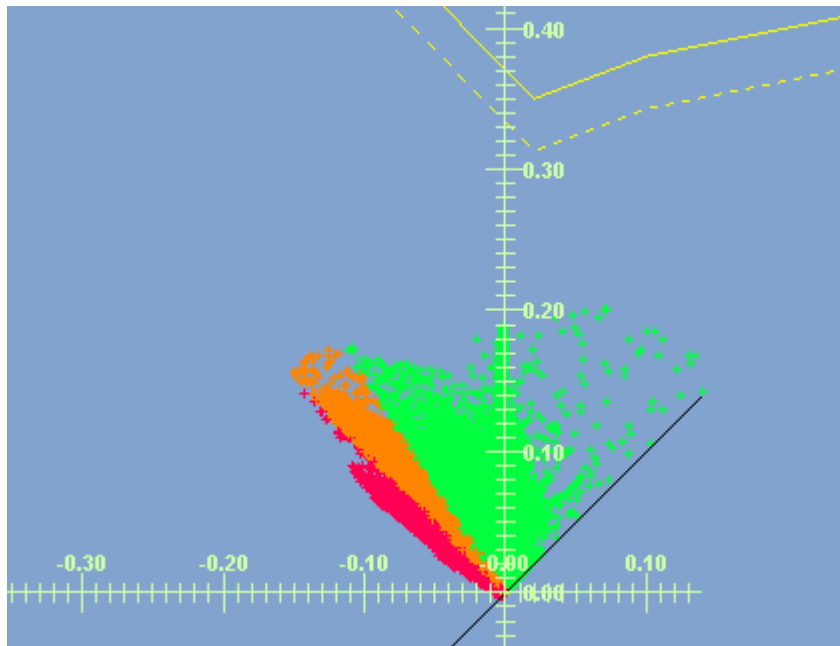


3.45. Imagen: Espesor con 800KN y frenos (B)

Al exportar la figura y la gráfica FLD de las arrugas y roturas de la pieza, el software arroja los siguientes resultados:



3.46. Imagen: FLD con 800KN y frenos (A)



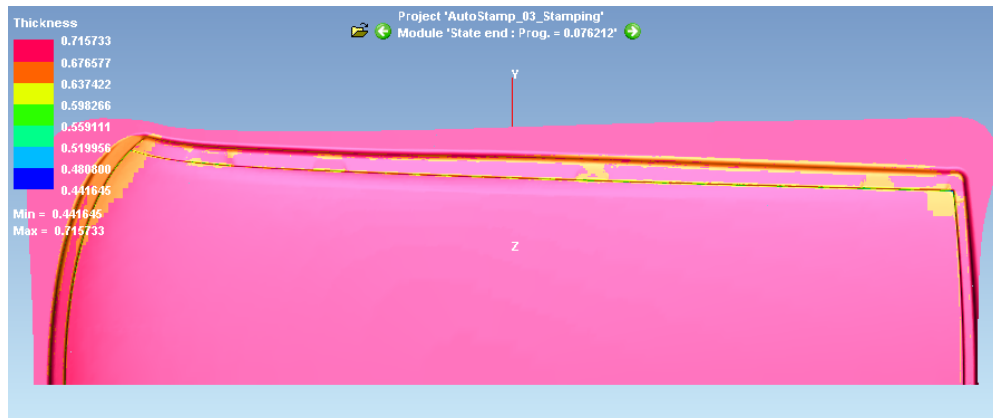
3.47. Imagen: FLD con 800KN y frenos (B)

Aunque se observa una gran mejoría en las zonas de arruga y tendencia a ésta, no es lo suficiente dado que existe una gran zona en el interior de la pieza, por lo que procedemos a aumentar aún más la fuerza de pisado, a expensas de no encontrar áreas de rotura.

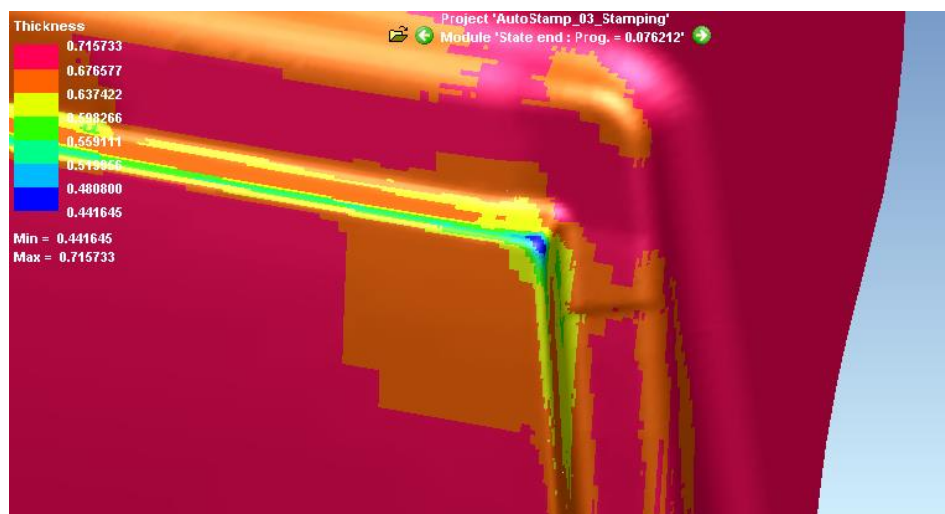
3.8.5. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 1200 KN Y FRENO UNIFORME CON UNA FUERZA DE 0,05 KN/mm

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, se ha optado por aumentar la fuerza de pisado notablemente y buscar así la fuerza correcta de manera iterativa acercándonos poco a poco a un mejor resultado.

El apartado de estudio de espesores arroja los siguientes resultados:



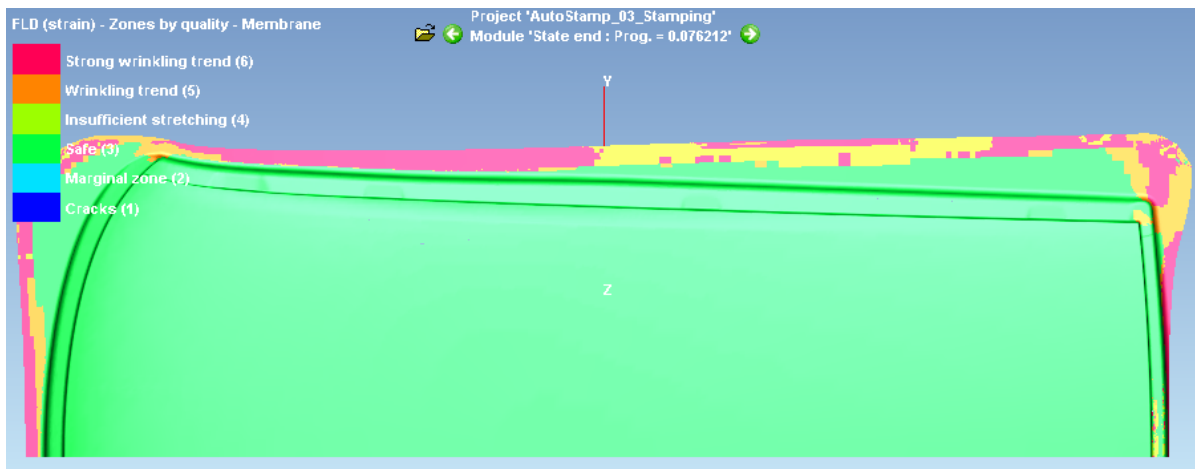
3.48. Imagen: Espesor con 1200KN y frenos (A)



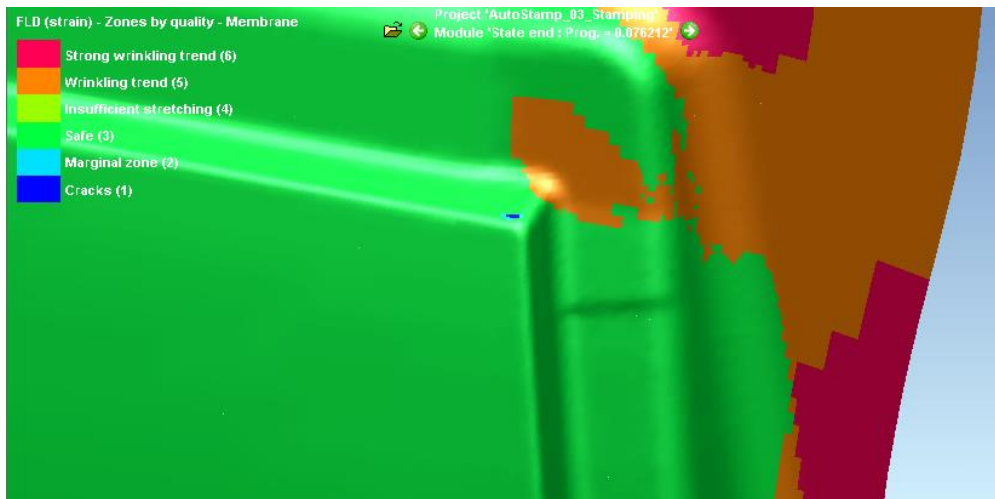
3.49. Imagen: Espesor con 1200KN y frenos (B)

Esta vez la gráfica de espesores varía bastante frente a la anterior simulación, sobre todo en el estrechamiento que sufre la zona crítica (42%). Tal y como se ha comentado anteriormente, el espesor de la zona crítica no puede reducirse más del 40% inicial, por lo que podríamos dar ya la simulación por concluida. Sin embargo, es interesante analizar los resultados del apartado FLD, y poder hacernos una idea del comportamiento de la pieza para cuantificar mejor la reducción de la fuerza del pisador.

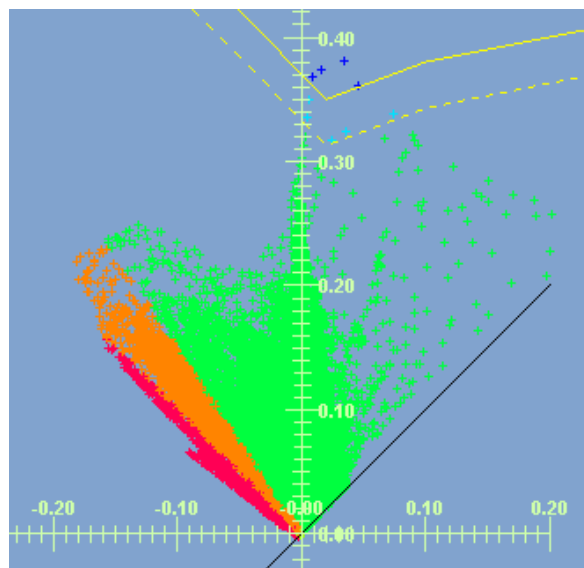
El apartado FLD arroja los siguientes resultados en los que podremos observar una zona de rotura:



3.50. Imagen: FLD con 1200KN y frenos (A)



3.51. Imagen: FLD con 1200KN y frenos (B)

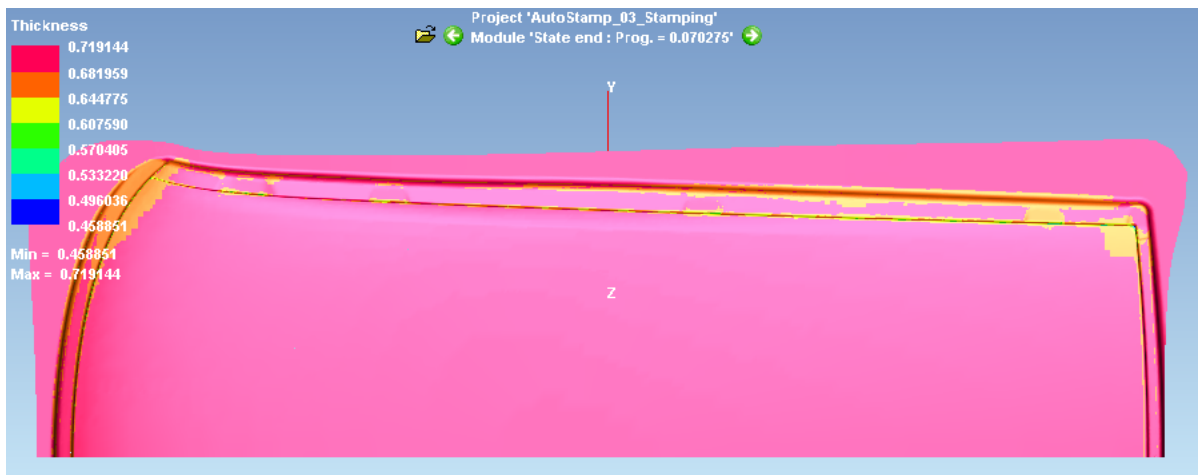


3.52. Imagen: FLD con 1200KN y frenos (C)

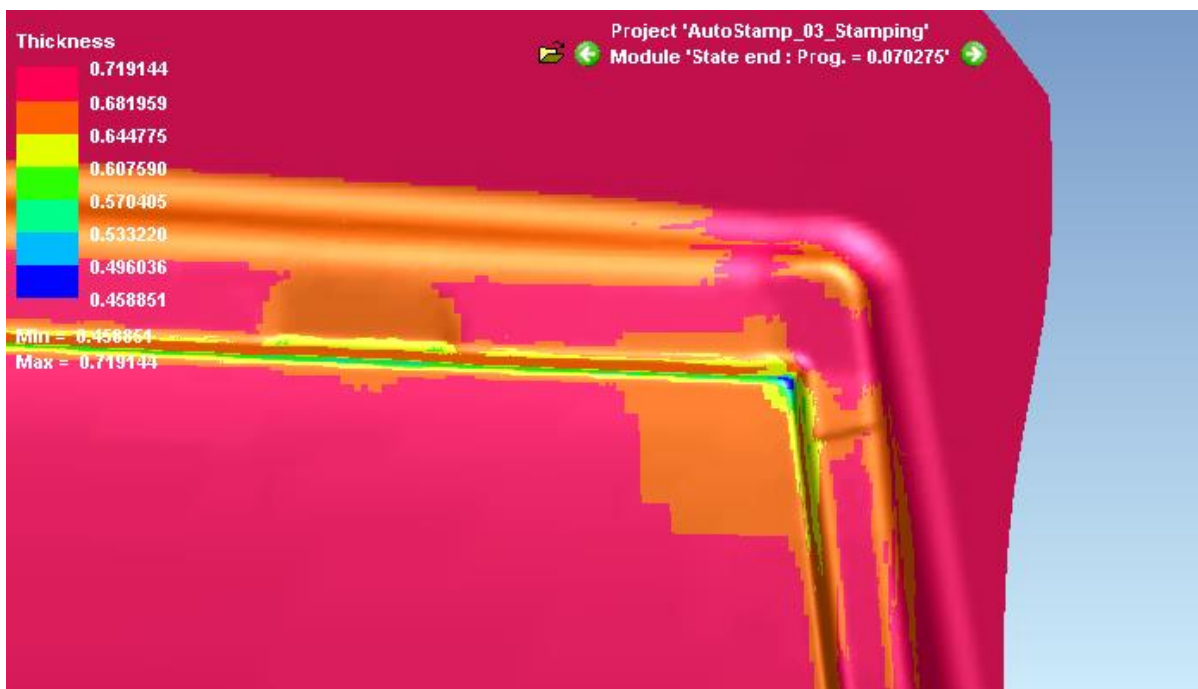
Obviamente esta simulación no podrá darse por válida, y se deberá considerar un nuevo diseño de frenos probablemente. Sin embargo, se hará una última prueba con una fuerza de pisador intermedia entre las últimas dos simulaciones antes de diseñar una nueva geometría de frenado.

3.8.6. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 900 KN Y FRENO UNIFORME CON UNA FUERZA DE 0,05 KN/mm

Se ha decidido ejercer una fuerza de pisado de 900 KN y ver el comportamiento de la chapa esta vez para deducir la fuerza de pisador con la que se analizarán los nuevos frenos.

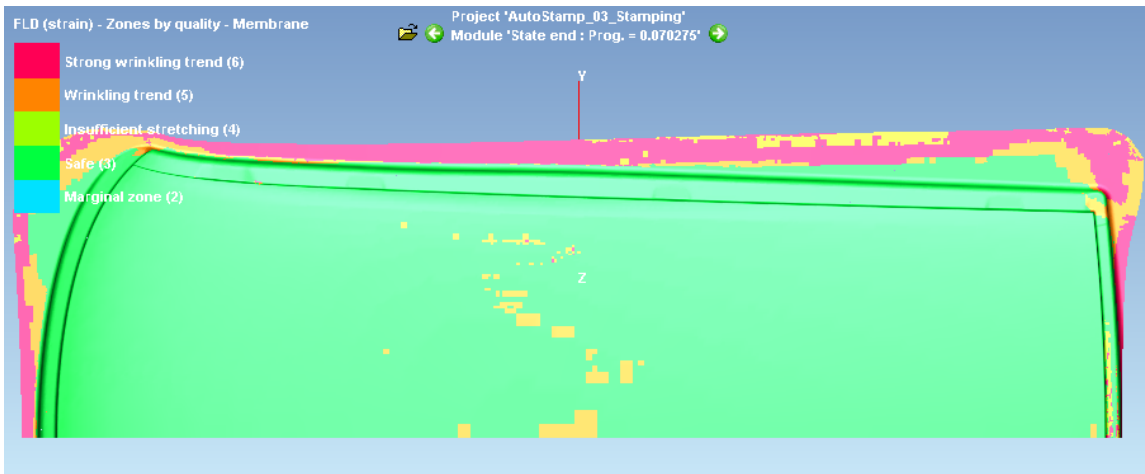


3.53. Imagen: Espesor con 900KN y frenos (A)

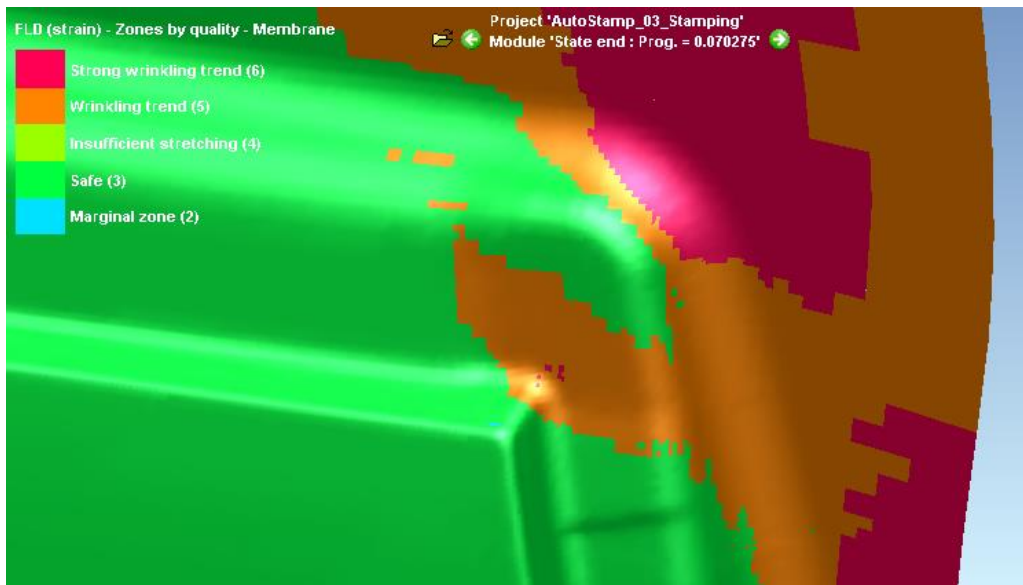


3.54. Imagen: Espesor con 900KN y frenos (B)

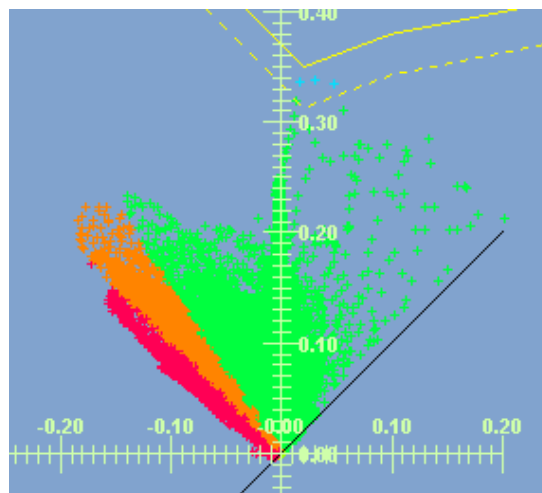
El espesor se reduce de manera aceptable en la zona crítica (34%), ligeramente en las zonas de doblado (9%) y aumentado en el resto de la superficie en torno a un 1-2%. Sin analizar el FLD de la chapa podríamos dar la gráfica de espesores por válida.



3.55. Imagen: FLD con 900KN y frenos (A)



3.56. Imagen: FLD con 900KN y frenos (B)



3.57. Imagen: FLD con 900KN y frenos (C)

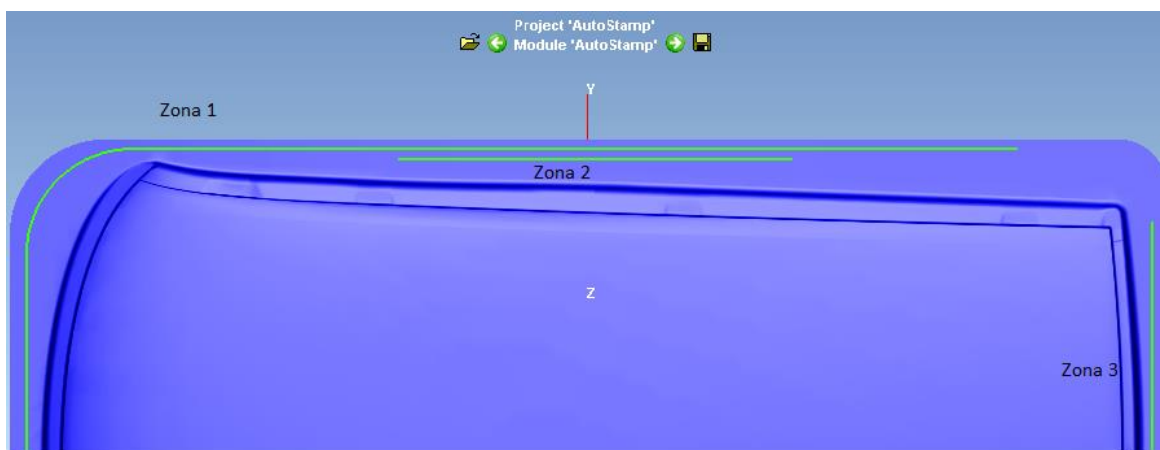
En cuanto al FLD no podemos darla por válida por varios motivos. El primero y más evidente es la aparición de arrugas y tendencia a éstas en el interior de la pieza (en su zona visible), aparte de tener una ligera zona marginal en la que podría darse una rotura a la hora de fabricar la pieza.

Como no podemos dar la simulación por válida se diseñarán los frenos en busca de eliminar las arrugas en la zona central de la pieza y disminuirlas en la zona de doblado trasera (al no ser visible no se requiere su desaparición total, aunque es preferible). Además, se reducirá la fuerza del pisador en busca de eliminar la zona marginal de la zona crítica.

3.8.7. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 800 KN Y FRENO NO UNIFORME

Como se ha explicado en el anterior apartado, el diseño de los frenos se modificará en busca de eliminar las zonas de arruga de la parte central y reducir las de la parte trasera.

Para las arrugas de la zona central se ha añadido una nueva línea de frenos con una penetración ligeramente mayor a la anteriormente usada. Para la zona trasera se ha aumentado notablemente la penetración y se ha alargado ligeramente para reducir la tendencia a arrugas que se formaba cerca del punto crítico.



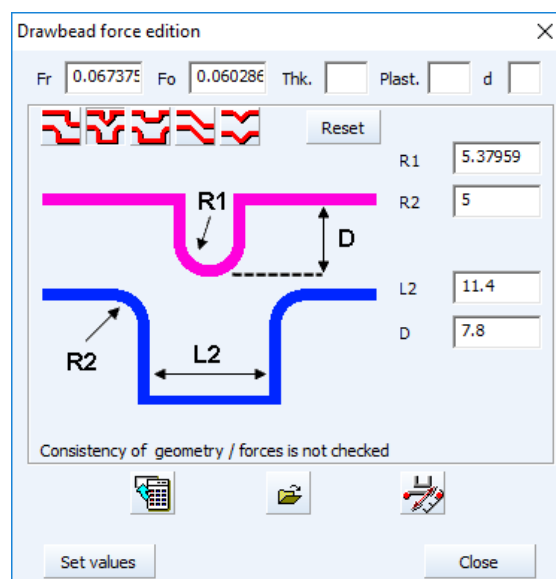
3.58. Imagen: Diseño de frenos no uniformes

Por tanto, podremos diferenciar 3 diferentes zonas. En la siguiente imagen se verán 4 zonas diferentes por la imposibilidad de incluir en una sola zona la línea curva de frenado (el programa sólo permite una selección rectangular), pero analizaremos las dos primeras como una.

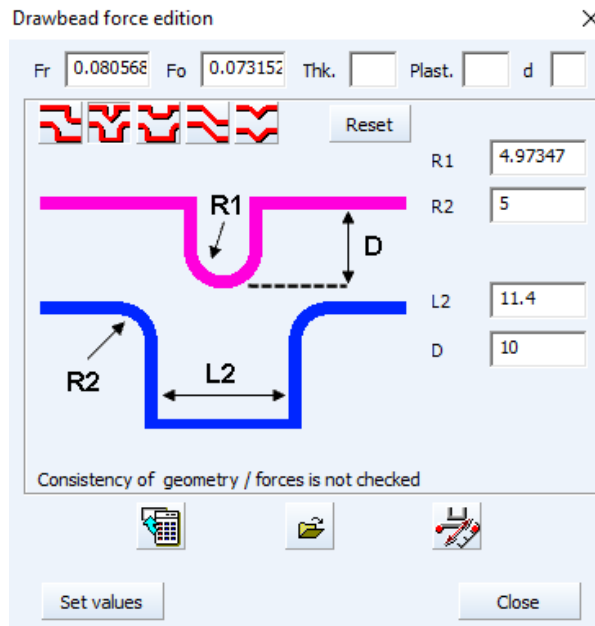
Segment	Fr	Fo	Thick	Strain	d
Zone Pin 2:Pin 1	0.0673752	0.0602868	Zona 1		
Zone Pin 1:Pin 3	0.0673752	0.0602868	Zona 1		
Zone Pin 6:Pin 8	0.0805681	0.0731528	Zona 3		
Zone Pin 5:Pin 4	0.0673752	0.0602868	Zona 2		

3.59. Imagen: Fuerzas de los frenos por zonas

Como puede apreciarse la zona 1 y 2 ejercer la misma fuerza, y por tanto tienen la misma geometría (ligeramente más profunda que en las simulaciones anteriores). Sin embargo, la fuerza en la zona 3 se ha aumentado notablemente. Las geometrías son las siguientes:

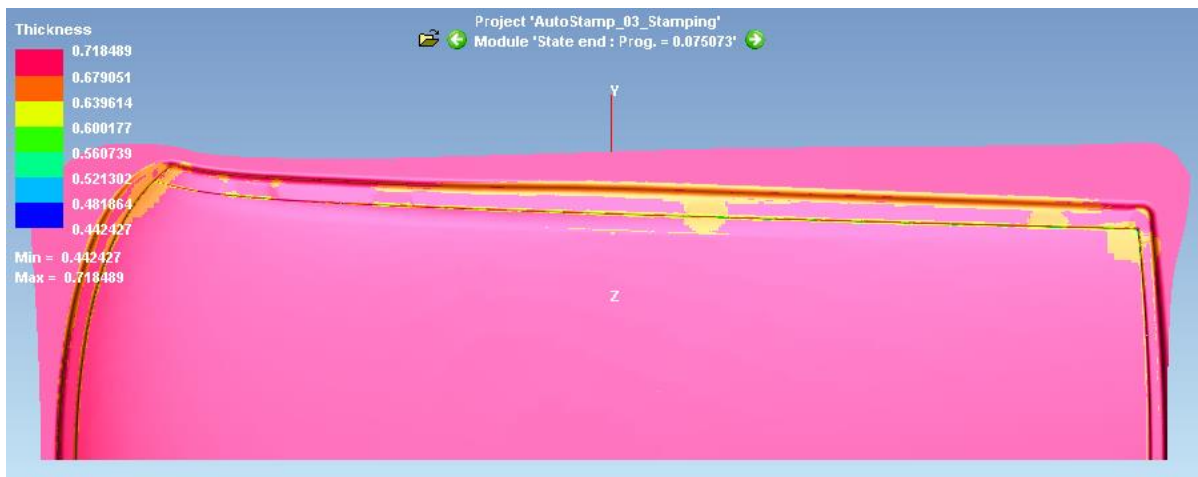


3.60. Imagen: Geometría frenos zonas 1 y 2

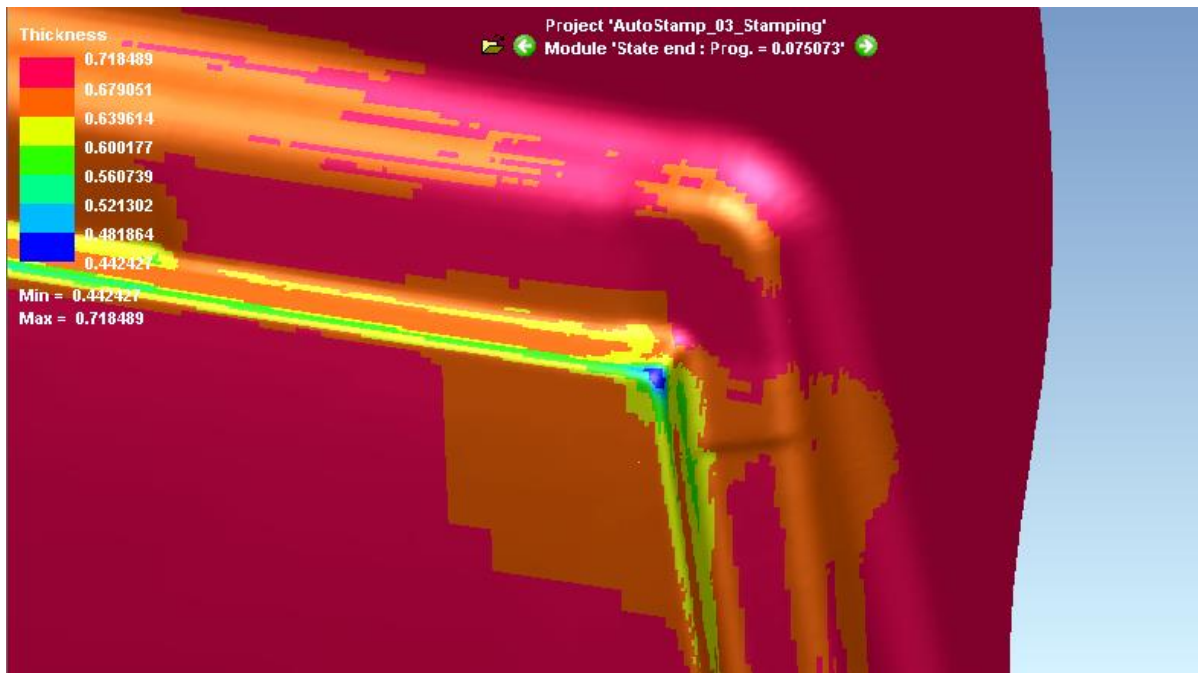


3.61. Imagen: Geometría frenos zona 3

Una vez introducidos los parámetros necesarios podemos correr la simulación, y se logran los siguientes resultados:

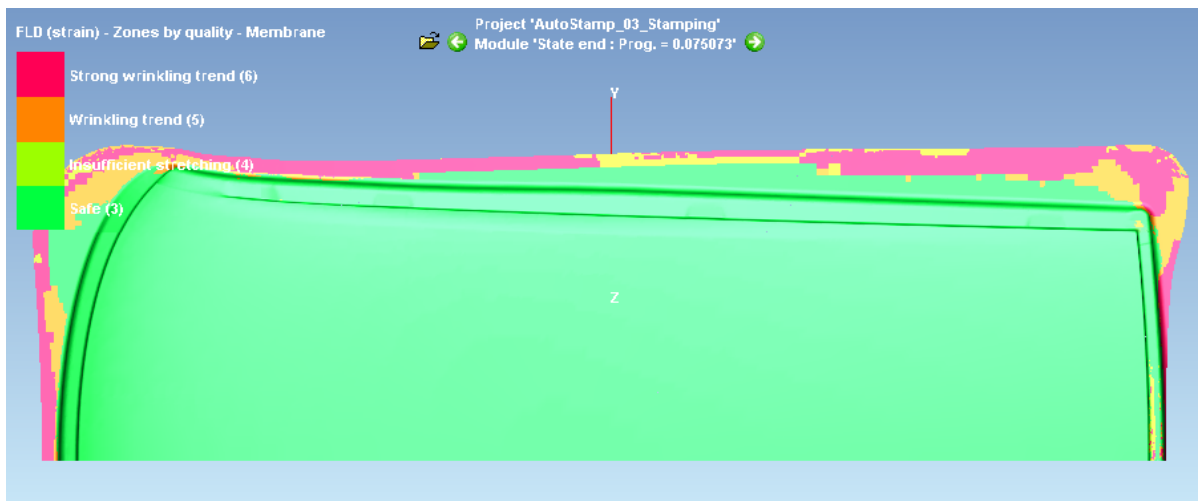


3.62. Imagen: Espesor con 800 KN y frenos no uniformes (A)

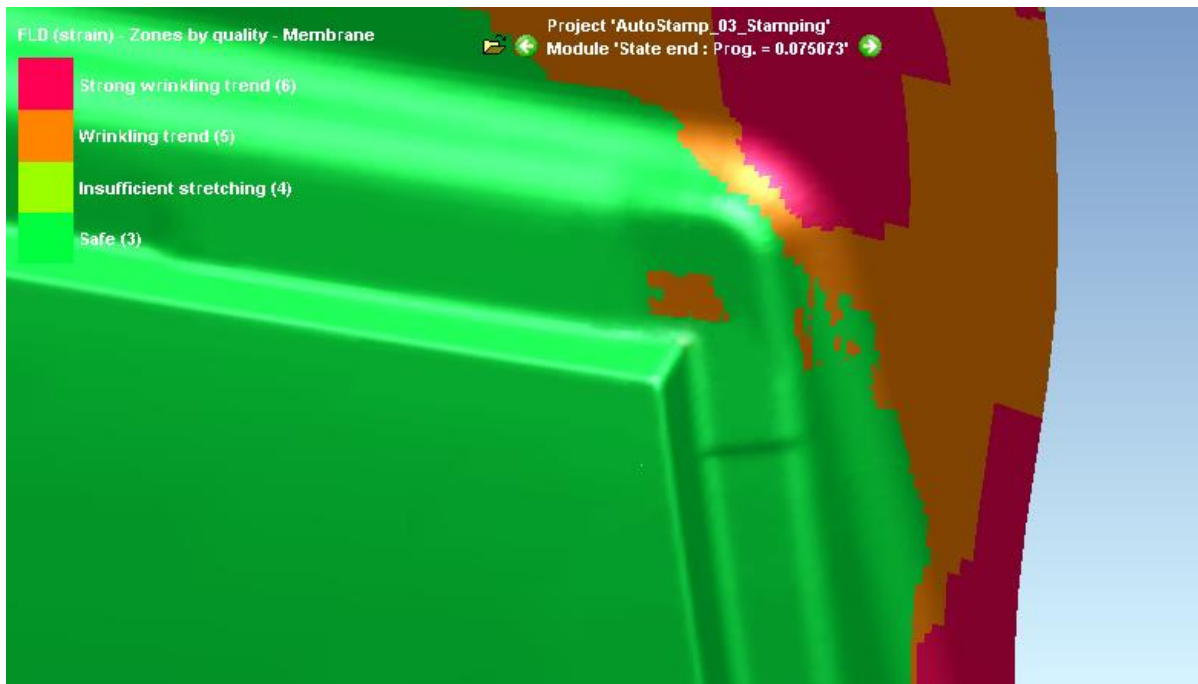


3.63. Imagen: Espesor con 800 KN y frenos no uniformes (B)

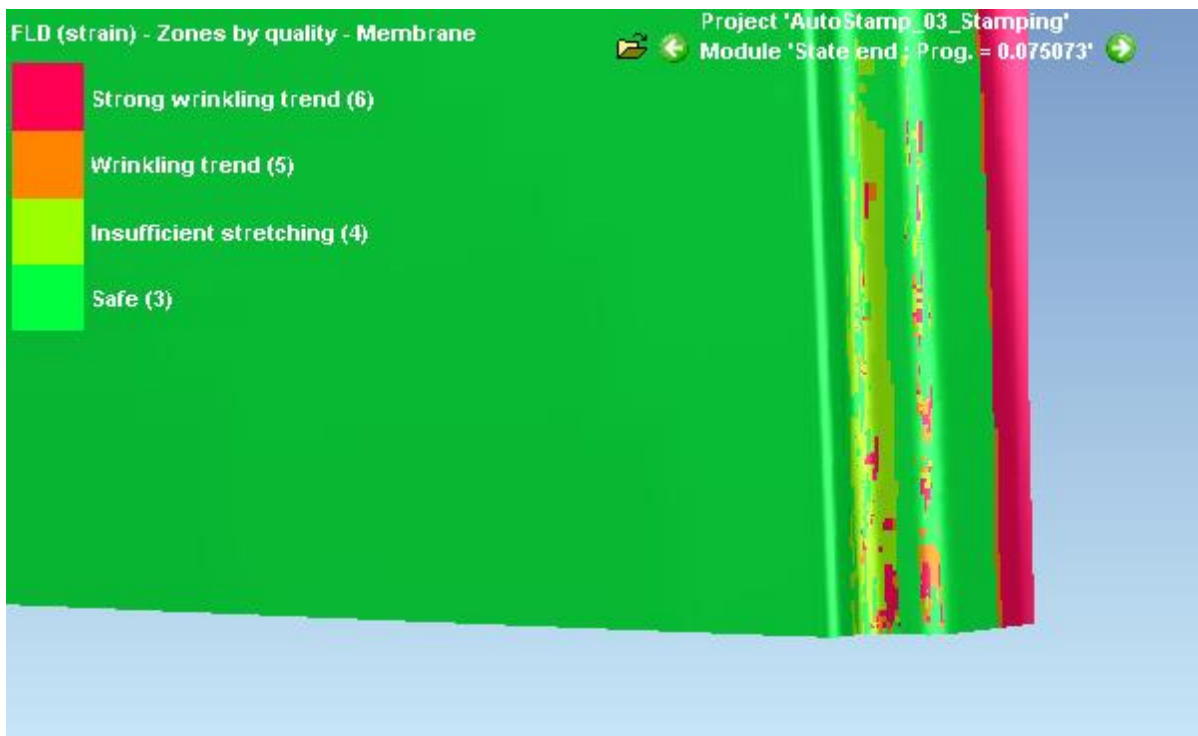
Los resultados obtenidos del apartado de espesores son aceptables puesto que la zona crítica se reduce en un 37%, las zonas de doblado un 8% y en general aumenta un 2,5%.



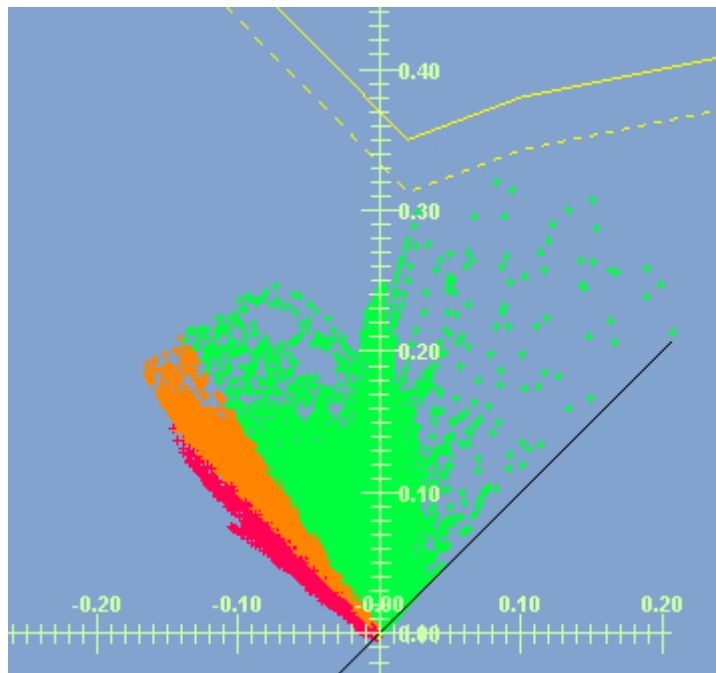
3.64. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes (A)



3.65. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes (B)



3.66. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes (C)



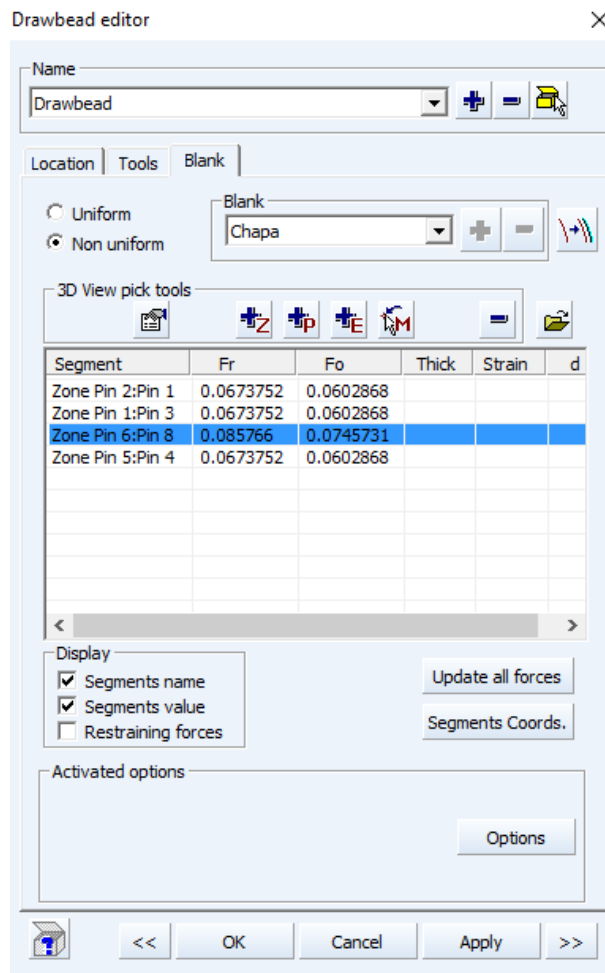
3.67. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes (D)

La gráfica FLD ha mejorado como lo esperado, pero no lo suficiente en la zona trasera del techo. Seguimos encontrando zonas de arrugas y de tendencia a esta, y aunque sea una parte oculta en el tejado y éste no sufra esfuerzos excesivos, conviene reducir su presencia para una mejor imagen del producto de cara al cliente.

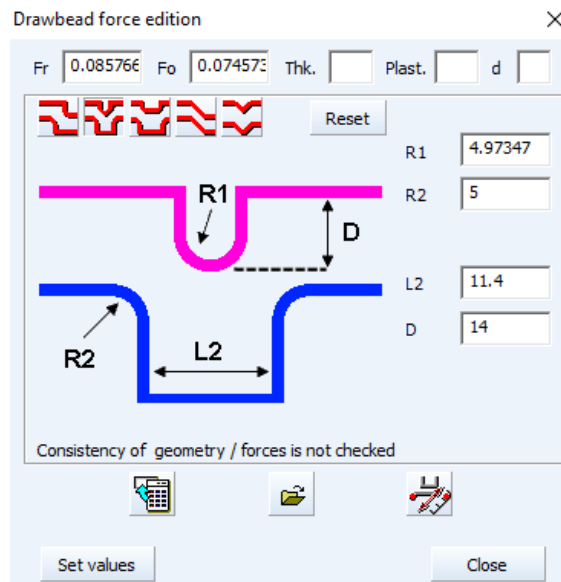
3.8.8. EMBUTICIÓN CON UNA FUERZA DE PISADO DE 800 KN Y FRENO NO UNIFORME AMPLIADO

Esta vez la única diferencia que se introducirá será la de aumentar la penetración en la zona cercana a la arruga. No se esperan resultados inmensamente mejores, pero tampoco se requieren.

Las fuerzas de las zonas quedarán como se muestra en la imagen 3.68 y la geometría puede apreciarse en la imagen 3.69.

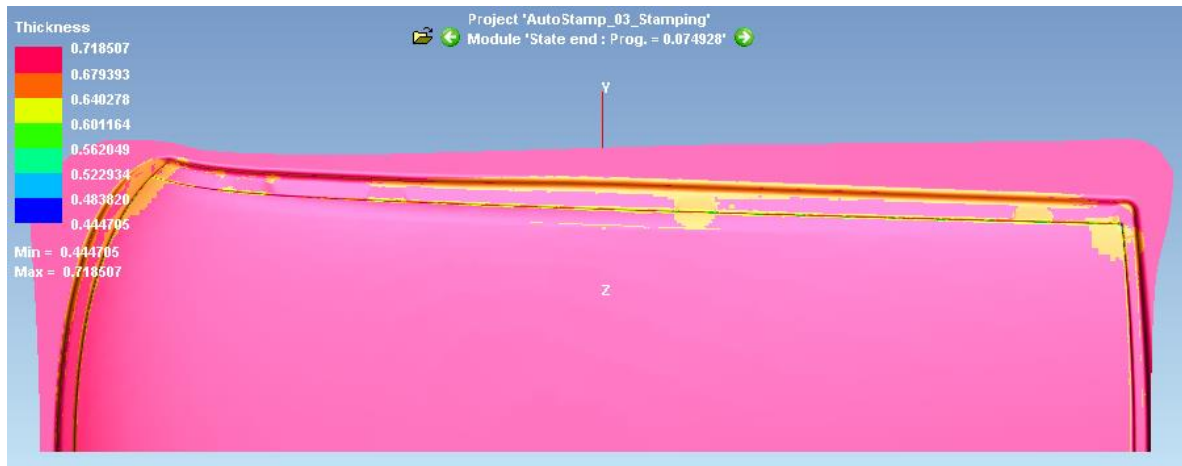


3.68. Imagen: Fuerzas de los frenos

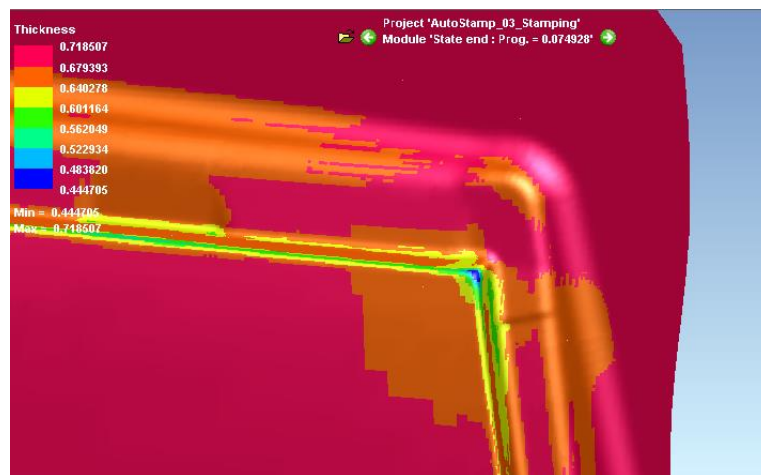


3.69. Imagen: Geometría de la zona 3

Los resultados arrojados son los siguientes:

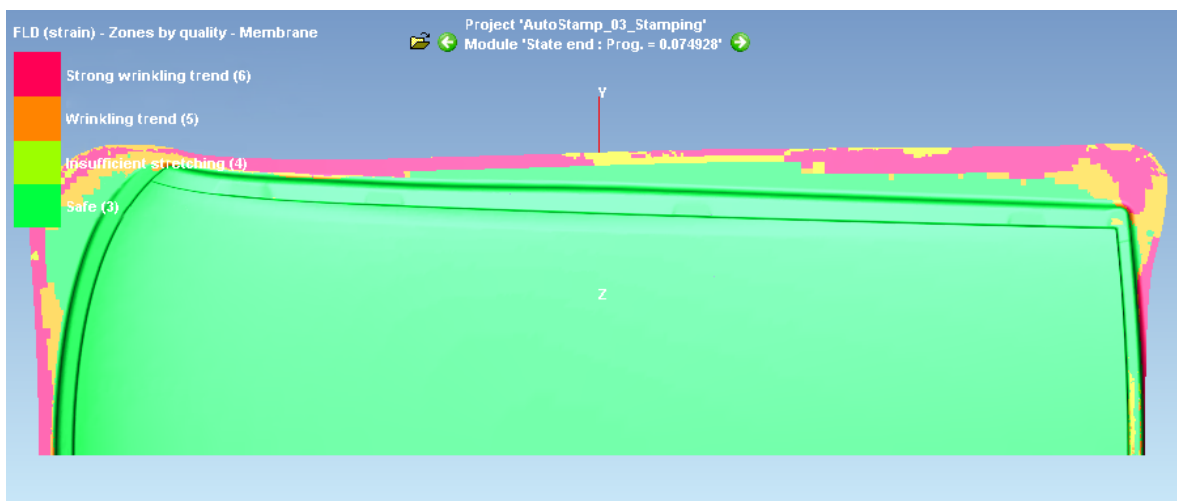


3.70. Imagen: Espesor con 800 KN y frenos no uniformes ampliados (A)

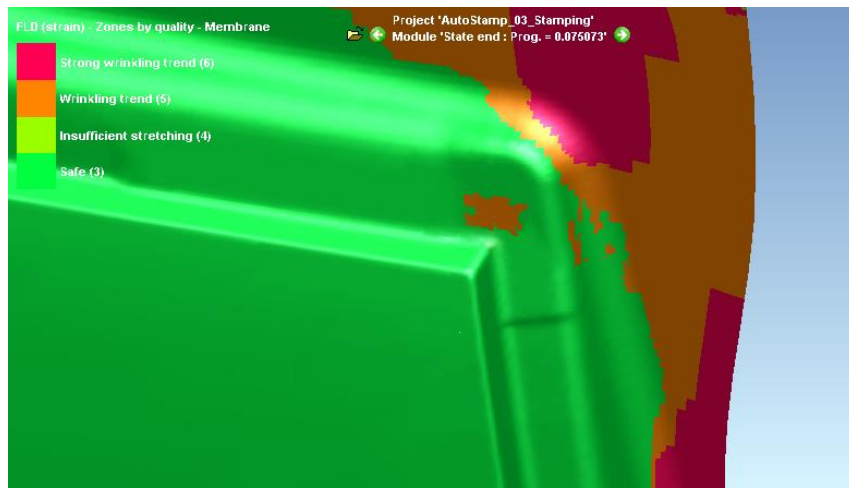


3.71. Imagen: Espesor con 800 KN y frenos no uniformes ampliados (B)

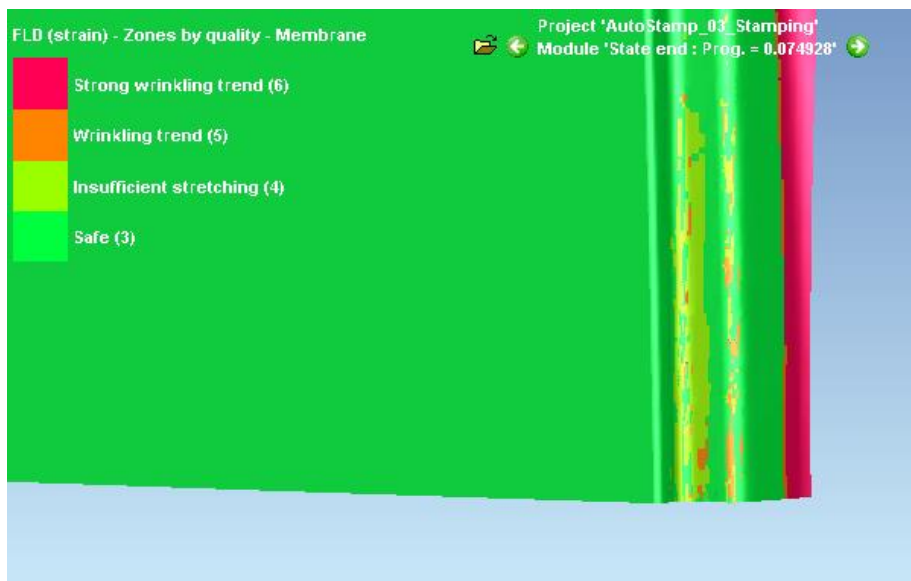
Los resultados obtenidos del apartado de espesores son aceptables puesto que la zona crítica se reduce en un 37%, las zonas de doblado un 4% y en general aumenta un 1%.



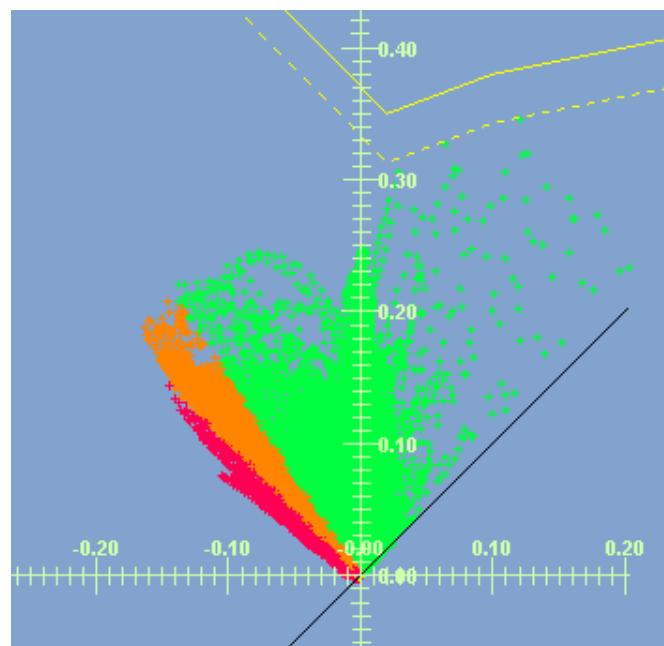
3.72. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes ampliados (A)



3.73. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes ampliados (B)



3.74. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes ampliados (C)



3.75. Imagen: FLD con 800 KN y frenos no uniformes ampliados (D)

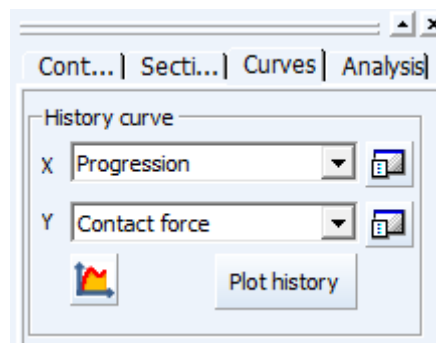
Como podemos observar en los apartados FLD anteriores, la zona de fuerte tendencia a arruga se ha eliminado en toda la pieza, y no tenemos riesgo de rotura. Como la gráfica FLD y el espesor son aceptables, podemos dar por válida la simulación, los parámetros introducidos, y elegir la prensa y el cojín necesarios.

3.9. ELECCIÓN DE LA PRENSA

Otra cosa importante que hay que analizar a la hora de trabajar con estos útiles es el tonelaje que debe ejercer la prensa, para que el troquel realice el trabajo adecuadamente. Para ello, sirve de gran utilidad otra de las muchas herramientas de análisis de las que dispone el software PAM-STAMP, en concreto, la pestaña Curves del menú análisis.

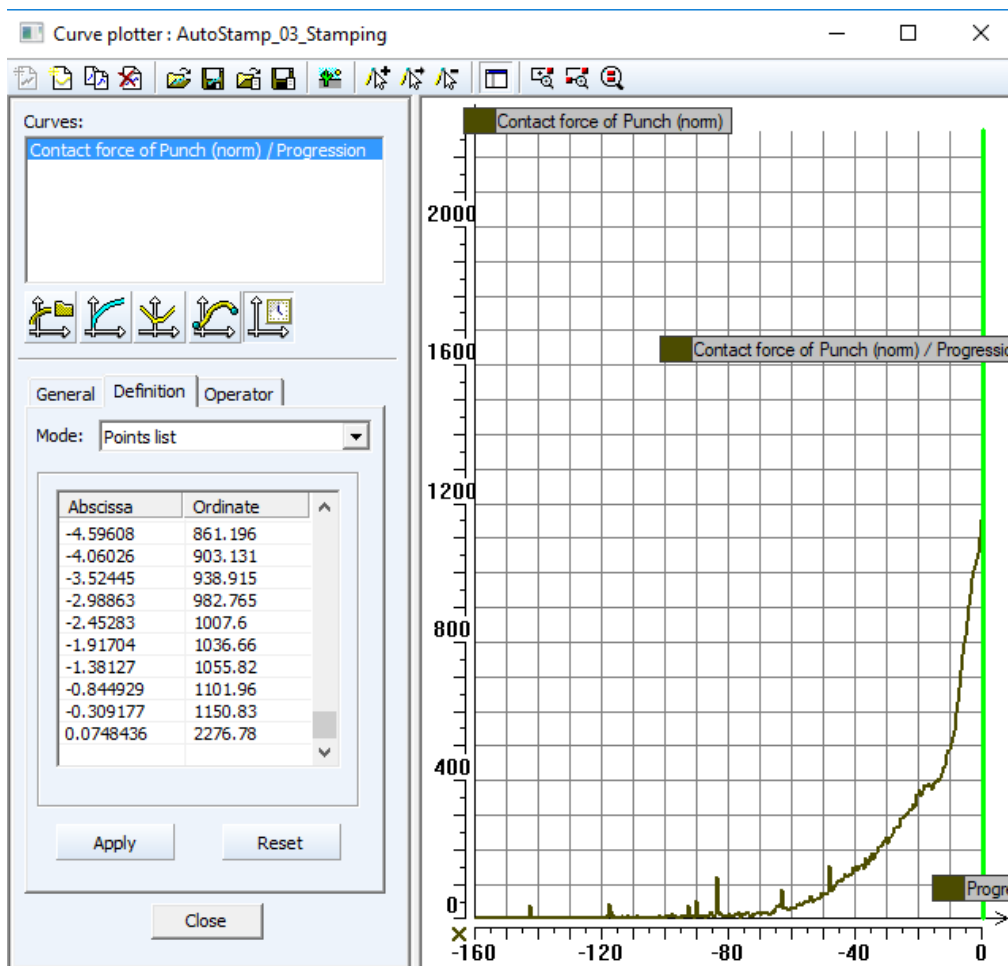
Dicho submenú permite el análisis mediante gráficas de los resultados obtenidos, es decir, permite relacionar dos variables (ejes X e Y). Desplegando el menú en cada una de las coordenadas permite escoger la variable que se va a mostrar.

En este caso, la variable que interesa para la elección de la prensa será la fuerza de contacto en el punzón, es decir, sabiendo la fuerza máxima que se ejerce en el punzón se obtiene, automáticamente, la fuerza necesaria de la prensa. Para ello, se relacionarán las variables carrera del punzón y fuerza de contacto del mismo, para lo cual, en el eje X se elige la opción Progression y en el eje Y, dentro de Objects→Contact force se selecciona la opción Punzón.



3.76. Imagen: Menú de elección de parámetros

La gráfica que arroja el software para este troquel es la que se muestra a continuación:



3.77. Imagen: Gráfica Progresión/Fuerza de contacto

Analizando los resultados de la gráfica se observa como a medida que el punzón va conformando la chapa, la fuerza que se ejerce es mayor. Existe un punto crítico cuando el troquel está casi cerrado, en $X = -0,309177$, donde la fuerza aplicada es de 1150,83 KN. Entre ese punto y el último, $X = 0,0748436$, la fuerza ejercida aumenta hasta llegar a los 2276,78 KN.

Ahora bien, según fuentes consultadas del soporte técnico del software, para una adecuada elección de la prensa, basta con fijarse en el punto último punto negativo, ya que el último dato positivo refleja la fuerza que se ejerce una vez que el troquel está cerrado, es decir, cuando ya se ha realizado la embutición.

Una vez aclarado esto, se toma como referencia el último punto negativo de la gráfica, cuyo valor es de 1150,83 KN. Esta es la fuerza que se debe ejercer en el punzón para llevar a cabo una correcta embutición. No obstante, a dicho valor habrá que añadirle la fuerza del pisador, siempre y cuando, éste venga accionado por la propia

prensa y no por un cojín neumático independiente.

En este caso, se ha optado por un trabajo en simple efecto, en el cual, la matriz situada arriba se encarga de ejercer la fuerza sobre el punzón y el pisador. Por tanto, será la prensa, únicamente, la que se acupe de accionar la matriz y la que deberá aportar, tanto la fuerza necesaria en el punzón, como en el pisador. Por consiguiente, para fijar el tonelaje mínimo necesario de la prensa accionadora se deberá sumar ambos valores (pisado y embutición) dando lugar a lo siguiente:

Fuerza necesaria en la prensa = Fuerza pisado + fuerza embutición

$$F_{prensa} = 800 \text{ KN} + 1150,83 \text{ KN} \quad F_{prensa} = 1950,83 \text{ KN}$$

$$\text{Pasando dicho valor a Tn} \quad F_{prensa} = 1950,83 \text{ Tn}$$

Dejando un pequeño margen de maniobra la prensa a seleccionar será aquella capaz de desarrollar una fuerza de 2000Tn.

3.10. ELECCIÓN DEL COJÍN DE PRENSA

Como se ha explicado en anteriores apartados el cojín de prensa será el encargado de ejercer la fuerza sobre el pisador. Como en él recae la sujeción del pisador además de la fuerza que ejercerá contra la chapa, el resultante de las fuerzas es la siguiente:

$$\mathbf{Fuerza\ necesaria\ del\ cojín = Fuerza\ pisado + Peso\ pisador}$$

$$\mathbf{F_{cojín} = 800\ KN + 42,2\ KN \quad F_{cojín} = 842,2\ KN}$$

$$\mathbf{Pasando\ dicho\ valor\ a\ Tn \quad F_{cojín} = 842,2\ Tn}$$

Dejando un pequeño margen de maniobra al cojín a seleccionar será aquel capaz de desarrollar una fuerza de 1000Tn.