

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE LA SIMULACIÓN DE LA EMBUTICIÓN DE UNA PIEZA DEL AUTOMÓVIL

Alumno: Gaviña, Ventosa, Jon

Directora: Ortega, Rodríguez, Naiara

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 25, 6, 2019

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de fin de grado es diseñar la primera embutición de una pieza característica del automóvil, el pilar B. Partiendo del modelo en CAD de la pieza en cuestión, se simulará la operación de embutición mediante el software Pam-Stamp. El estudio de los resultados alcanzados en las múltiples simulaciones realizadas permitirá, no sólo diseñar las herramientas de una forma óptima, sino también deducir la magnitud exacta de las variables críticas que orbitan alrededor del proceso.

ABSTRACT

The aim of this end-of-degree project is to design the first deep drawing process of an automobile's representative piece, the B pillar. After having achieved the part geometry on a CAD system, the forming work will be simulated using the Pam-Stamp software. The analysis of the results obtained within the simulations will lead not only to an optimum tool design, but also to a precise estimate of the magnitude of the critical parameters involved in the process.

LABURPENA

Gradu amaierako lan honen helburua automobilaren pieza erakusgarri baten lehenengo embutizio prozesua diseinatzea da, B pilarea. Pieza honen CAD ereduari oinarrituta, embutizio lana simulatuko da Pam-Stamp software erabiliz. Simulazioetan lortu izan diren emaitzak aztertuz, erremintaren diseinu optimoa lortuko da, baita embutizio-aldagi kritikoei dagozkien balioa ere.

PALABRAS CLAVE

Embutición

Pam-Stamp

Chapa

Pilar B

Troquel

KEY WORDS

Deep drawing

Pam-Stamp

Sheet metal

B pillar

Die

GAKO HITZAK

Embutizioa

Pam-Stamp

Xafla

B pilarea

Trokela

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	CONTEXTO.....	2
2.1	SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR DEL AUTOMOVIL.....	2
2.1.1	NIVEL MUNDIAL.....	2
2.1.2	NIVEL EUROPEO.....	3
2.1.3	NIVEL NACIONAL	3
2.1.4	NIVEL LOCAL.....	4
2.2	EL CONFORMADO DE CHAPA EN EL AUTOMÓVIL.....	5
2.3	APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN EL CONFORMADO DE CHAPA.....	7
3	ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	8
3.1	VARIABLES CRÍTICAS	9
4	BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	11
5	OBJETIVOS.....	12
6	ALTERNATIVAS	14
6.1	PROGRAMAS DE SIMULACIÓN.....	14
6.2	MATERIALES DE CHAPA	16
6.3	TIPOS DE PRENSA	17
7	INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CRÍTICAS EN LA EMBUTICIÓN	18
7.1	FORMA DEL ADDENDUM.....	21
7.1.1	ARCO	22
7.1.2	SPLINE.....	23
7.1.3	STANDARD	24
7.1.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	25
7.2	MATERIAL DE CHAPA.....	26
7.2.1	ALUMINIO AL995	27
7.2.2	ACERO DE ALTO LÍMITE ELÁSTICO DP800	28
7.2.3	ACERO AL CARBONO AP04.....	29
7.2.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	30
7.3	ESPESOR DE CHAPA	31
7.3.1	e= 0,5mm.....	31
7.3.2	e= 0,7mm.....	32
7.3.3	e= 0,85mm.....	33
7.3.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	34
7.4	FRICCIÓN.....	35
7.4.1	f= 0,05	35
7.4.2	f= 0,12	36

7.4.3	$f = 0,20$	37
7.4.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	38
7.5	FRENOS	39
7.5.1	$R1 = 2,67\text{mm}$	41
7.5.2	$R1 = 0,85\text{mm}$	42
7.5.3	$R1 = 0,32\text{mm}$	43
7.5.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	44
7.6	FUERZA DEL PISADOR.....	45
7.6.1	$F = 25\text{N}$	45
7.6.2	$F = 50\text{N}$	47
7.6.3	$F = 100\text{N}$	49
7.6.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	51
8	DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS.....	52
8.1	DIAGRAMA DE GANTT.....	53
9	ANÁLISIS DE COSTES.....	54
10	CONCLUSIONES	56
11	BIBLIOGRAFÍA.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:	Partes del vehículo obtenidas por conformado de chapa	5
Ilustración 2:	Pilar B	6
Ilustración 3:	Modelo CAD del pilar B (vista isométrica)	6
Ilustración 4:	Modelo CAD del pilar B (plano XY)	6
Ilustración 5:	Ejemplo de embutición	8
Ilustración 6:	Parámetros de embutición.....	10
Ilustración 7:	Fuerza y deformación en función del tiempo. A) Caso cuasiestático B) Caso dinámico.	14
Ilustración 8:	Diagrama FLD genérico.....	18
Ilustración 9:	Zonas de deformación en el FLD.....	19
Ilustración 10:	Zona de no fallo en la chapa.....	20
Ilustración 11:	Espacio libre entre la cavidad y el área plana superior de la matriz	21
Ilustración 12:	Posibles geometrías del addendum	21
Ilustración 13:	Addendum tipo arco (plano XZ)	22
Ilustración 14:	Pieza final con addendum tipo arco (plano YZ)	22
Ilustración 15:	Estado tensional con addendum tipo arco (FLD).....	22
Ilustración 16:	Addendum tipo spline (plano XZ)	23
Ilustración 17:	Pieza final con addendum tipo spline (plano YZ).....	23
Ilustración 18:	Estado tensional con addendum tipo spline (FLD)	23
Ilustración 19:	Addendum tipo standard (plano XZ)	24

Ilustración 20: Pieza final con addendum tipo standard (plano YZ)	24
Ilustración 21: Estado tensional con addendum tipo standard (FLD)	24
Ilustración 22: Lista de materiales seleccionables en Pam-Stamp	26
Ilustración 23: Estado tensional del aluminio Al995 (vista isométrica)	27
Ilustración 24: Estado tensional del aluminio Al995 (FLD).....	27
Ilustración 25: Springback máximo del aluminio Al995.....	27
Ilustración 26: Estado tensional del acero de alto límite elástico DP800 (vista isométrica)	28
Ilustración 27: Estado tensional del acero de alto límite elástico DP800 (FLD).....	28
Ilustración 28: Springback máximo del acero de alto límite elástico DP800.....	28
Ilustración 29: Estado tensional del acero de al carbono AP04 (vista isométrica).....	29
Ilustración 30: Estado tensional del acero al carbono AP04 (FLD)	29
Ilustración 31: Springback máximo del acero al carbono AP04	29
Ilustración 32: Estado tensional con 0,5mm de espesor (vista isométrica)	31
Ilustración 33: Estado tensional con 0,5mm de espesor (FLD).....	31
Ilustración 34: Estado tensional con 0,7mm de espesor (vista isométrica)	32
Ilustración 35: Estado tensional con 0,7mm de espesor (FLD).....	32
Ilustración 36: Estado tensional con 0,85mm de espesor (vista isométrica)	33
Ilustración 37: Estado tensional con 0,85mm de espesor (FLD).....	33
Ilustración 38: Estado tensional con $f=0,05$ (vista isométrica)	35
Ilustración 39: Estado tensional con $f=0,05$ (FLD).....	35
Ilustración 40: Estado tensional con $f=0,12$ (vista isométrica)	36
Ilustración 41: Estado tensional con $f=0,12$ (FLD).....	36
Ilustración 42: Estado tensional con $f=0,20$ (vista isométrica)	37
Ilustración 43: Estado tensional con $f=0,20$ (FLD).....	37
Ilustración 44: Zonas críticas de arrugas	39
Ilustración 45: Frenos adicionales	39
Ilustración 46: Posibles geometrías del freno.....	40
Ilustración 47: Gráfica representativa de un freno cualquiera.....	40
Ilustración 48: Gráfica representativa del freno de $R1=2,67\text{mm}$	41
Ilustración 49: Estado tensional con freno de $R1=2,67\text{mm}$ (plano YX)	41
Ilustración 50: Gráfica representativa del freno de $R1=0,85\text{mm}$	42
Ilustración 51: Estado tensional con freno de $R1=0,85\text{mm}$ (plano YX)	42
Ilustración 52: Gráfica representativa del freno de $R1=0,32\text{mm}$	43
Ilustración 53: Estado tensional con freno de $R1=0,32\text{mm}$ (plano YZ)	43
Ilustración 54: Estado tensional con $F=25\text{N}$ (vista isométrica).....	45
Ilustración 55: Zona de rotura con $F=25\text{N}$	45
Ilustración 56: Estado tensional con $F=25\text{N}$ (FLD)	46
Ilustración 57: Estado tensional con $F=50\text{N}$ (vista isométrica).....	47
Ilustración 58: Zona de rotura con $F=50\text{N}$	47
Ilustración 59: Zona de rotura con $F=50\text{N}$	47

Ilustración 60: Estado tensional con F=50N (FLD)	48
Ilustración 61: Estado tensional con F=100N (vista isométrica).....	49
Ilustración 62: Zona de rotura con F=100N.....	49
Ilustración 63: Zona de rotura con F=100N.....	49
Ilustración 64: Estado tensional con F=100N (FLD)	50
Ilustración 65: Diagrama de Gantt	53
Ilustración 66: Análisis de costes.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros utilizados en las simulaciones numéricas	15
Tabla 2: Programas de simulación	16
Tabla 3: Materiales de chapa	16
Tabla 4: Diferencias entre prensa hidráulica y mecánica	17
Tabla 5: Tipos de prensa.....	17
Tabla 6: Código de colores.....	19
Tabla 8: Materiales asignados a cada grupo	26
Tabla 9: Horas internas	54
Tabla 10: Amortizaciones.....	54
Tabla 11: Resultados de las simulaciones	56

ACRÓNIMOS

FLD: Diagrama Límite de Conformado

FLC: Curva Límite de Conformado

MEF: Método de los Elementos Finitos

1 INTRODUCCIÓN

Este documento contiene el estudio de la simulación de la embutición de una pieza representativa del automóvil convencional mediante el software Pam-Stamp.

En una primera parte se presenta el contexto del trabajo, donde se hablará fundamentalmente de la situación actual del sector de la automoción. Acto seguido, se realizará un análisis de la operación de embutición como punto de partida para identificar las variables críticas que participan en el proceso. También se fijarán los objetivos del trabajo y los beneficios, técnicos y económicos, que éste aporta.

A continuación, se estudiarán distintas alternativas que han aparecido en una fase previa a las simulaciones. En efecto, las tablas de ponderación serán una herramienta clave para decidir acerca del conveniente programa de simulación, material de chapa y tipo de prensa.

El núcleo del trabajo se concentra en el punto 6, donde se evaluará la influencia de las variables críticas en la operación de embutición. De acuerdo con las simulaciones realizadas en Pam-Stamp para diferentes valores de las citadas variables, se comentarán los resultados alcanzados en lo que a estados tensionales y deformación de la chapa se refiere.

El documento cuenta también con una descripción de las tareas necesarias para la realización de este TFG. Todas ellas quedarán recogidas en un diagrama de Gantt donde se ilustrará el orden en que se irán ejecutando y su correspondiente duración.

Finalmente, se mostrarán los costes involucrados en este trabajo con objeto de valorar la viabilidad económica de simular la embutición de la pieza antes de su directa fabricación en planta.

2 CONTEXTO

2.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR DEL AUTOMOVIL

Este documento se enmarca dentro del sector automovilístico. En las siguientes líneas se tratará de describir su situación actual, al mismo tiempo que se comentarán las tendencias que se seguirán en los próximos años. La extensión de este diagnóstico abarcará tanto el ámbito mundial como el europeo, echando la vista también a lo que acontece en España y País Vasco.

2.1.1 NIVEL MUNDIAL

De acuerdo con la Organización Internacional de Fabricantes OICA, una de cada seis personas dispone de un automóvil. Con estos datos en la mano se deduce la buena marcha de la automoción a escala mundial, que ha evolucionado muy positivamente desde la entrada del nuevo siglo. De hecho, el parque móvil mundial no ha cesado en su crecimiento y de los 892 millones de vehículos registrados en 2005 se han alcanzado los 1.450 millones de unidades en 2017. La clave del éxito reside en la motorización masiva que se está produciendo en países que reúnen las siguientes características: economías emergentes, poblaciones gigantes y tasas reducidas de vehículos por habitante; tal es el caso de Rusia, India, Brasil y China. En cuanto a esta última, conviene apuntar que la potencia asiática es considerada el garaje planetario por tratarse no sólo del mayor productor sino también del mayor mercado mundial del automóvil, alcanzando en ambos casos cifras de 29 millones de nuevos autos en 2017. En segundo plano quedan Europa y EEUU con sus 22.1 y 11.1 millones de vehículos fabricados, respectivamente, y sus cerca de 18 millones de ventas. Al margen de estos datos y poniendo el foco ahora sobre las marcas, cabe destacar el dominio del grupo Volkswagen, Toyota y la alianza Renault-Nissan-Mitsubishi, superando todas ellas las 10 millones de matriculaciones. Llegados a este punto resulta interesante apuntar las dos grandes líneas que se están siguiendo en la industria automotriz: el auge de los SUV y la caída del diésel. Por una parte, la polivalencia en el uso que ofrecen los SUV parece estar convenciendo por igual a conductores estadounidenses, europeos y asiáticos, por este motivo concentraron un tercio de las ventas el pasado año. Por otra, los escándalos de emisiones y las políticas restrictivas anunciadas por el Viejo Continente han motivado la disminución en un 10% en la demanda global de vehículos de gasóleo en la última década. Paralelamente, el automóvil de gasolina está en su máximo apogeo constituyendo un 52% de los pedidos computados en 2017. Siguiendo esta línea, los modelos de energías alternativas también se han beneficiado del declive del diésel y ya suponen cerca de un 5% de la contabilidad mundial. Si bien el futuro del sector está garantizado en lo económico,

resulta difícil determinar cómo será capaz de digerir la sociedad toda esta espiral de crecimiento del automóvil. No debemos olvidar que esta última irá de la mano de un incremento del tráfico en las ciudades, traduciéndose en un significativo impacto ambiental y una mayor siniestralidad vial.

2.1.2 NIVEL EUROPEO

En el marco europeo ya se han tomado algunas medidas al respecto. La Unión Europea selló un acuerdo en octubre de 2018 por el que se comprometía a reducir las emisiones de dióxido de carbono de coches y furgonetas en un 35% en 2030. A pesar de que los grandes fabricantes del continente comparten esta voluntad por la electrificación, una amplia mayoría pronostica una bajada en este sector que acostumbraba a la estabilidad. Desde ACEA, asociación de constructores europeos del automóvil, reconocen disponer de la tecnología suficiente para desarrollar el vehículo eléctrico, al mismo tiempo que denuncian una falta de infraestructura en forma de 'electrolineras' que les permita encontrar potenciales conductores para dar salida a estos nuevos modelos. Sin embargo, la industria automovilística de Europa no sólo encontrará barreras a su producción en la polución sino también en la política exterior. Para ser exactos, el presidente estadounidense, Donald Trump, ha insinuado que impondrá aranceles del 20% a los coches que los 28 estados miembros venden a EEUU. De materializarse esta decisión, se prevén consecuencias dramáticas para Europa. Según informaciones del 2017, al menos un 29% de las exportaciones de los fabricantes europeos tenían destino norteamericano, lo que supone una cuantía de 38.000 millones de euros. La implantación de esta medida pone en riesgo, por tanto, casi un tercio de las exportaciones de automóviles. En la nómina de afectados destacan Alemania y Reino Unido, primer y cuarto países productores de vehículos de la UE (el ranking lo completan España, segundo, y Francia, tercero).

2.1.3 NIVEL NACIONAL

A nivel nacional, el sector de la automoción presume de gozar de una buena salud, pero no es inmune a las noticias que llegan desde Europa. Algunos datos macroeconómicos revelan que se trata de un sector estratégico, ya que genera 300.000 puestos de trabajos directos y 2.000.000 indirectos; por estos motivos, supone un 10% del PIB. El éxito de las 17 factorías que constituyen la industria automovilística española se basa en la competitividad. De hecho, es en este país donde se fabrican 43 modelos, 20 de ellos en exclusiva mundial. Entre estos últimos destaca el Volkswagen Polo, tercer auto más vendido en toda Europa, fabricado en Landaben (Navarra). El carácter exportador del sector, donde el 85% de los 2.840.000 automóviles fabricados traspasan nuestras fronteras, es sinónimo de gran

dependencia de los mercados exteriores, siendo Alemania, Francia y Reino Unido los principales clientes. Consecuentemente, el referéndum de salida de la Unión Europea del Reino Unido, la inestabilidad de Turquía o el frenazo de las exportaciones a Alemania debido a la paralización de algunas líneas de montaje para adecuarlas a nuevos modelos, contribuyeron a una caída del 1,5% de la producción en 2017 tras cinco años de fuertes subidas. Asimismo, es alarmante el envejecimiento del parque circulante español, ya que la edad media de los turismos alcanza los doce años. Por contra, se siguen matriculando autos y el pasado año fueron más de un millón el número de coches nuevos que circulaban por nuestras carreteras. Entre los modelos más vendidos figuraban los siguientes: Volkswagen Golf, Volkswagen Polo, Ford Fiesta y Nissan Qashqai. En el top 25 también tienen sitio algunos vehículos fabricados en España; por ejemplo, Opel Corsa, Renault Captur, Opel Mokka y Renault Megane.

2.1.4 NIVEL LOCAL

La situación en el País Vasco está siendo tremendamente próspera. Encadena nueve ejercicios consecutivos de incremento continuo, convirtiéndose en un pilar de vital importancia dentro del tejido empresarial nacional. Sin ir más lejos, en 2018 logró 20.000 millones de facturación, lo que supone casi el 50% del total del sector de componentes de automoción en el Estado y el 25% del PIB vasco. En palabras del presidente del clúster de automoción del País Vasco Acicae, Jose Esmoris, Euskadi ha sabido diversificar en los últimos años su cartera de clientes, productos y mercados, lo que le ha permitido aprovechar este momento de crecimiento económico general. Otro aspecto diferenciador de la industria vasca es su carácter innovador. De hecho, nuestras empresas dedican aproximadamente el 2,8% de su facturación al apartado I+D+i y hasta el 7% en el caso de los grupos empresariales y las multinacionales. Una tercera seña de identidad del segmento del motor vasco que explica su papel preponderante en todo el mundo, se encuentra en una eficaz y eficiente cadena de valor: aceristas, matriceros, mecanizadores, fabricantes de bienes de equipo y productores de máquina-herramienta, entre otros. También asume funciones de fabricación de carrocería, llantas, electrónica y elementos estructurales. De este modo, Euskadi participa en todas las partes del coche, proporcionando una amplia gama de productos en cualquier material y en cualquier proceso. El desarrollo de la automoción ha sido de una envergadura tal que podemos hallar en nuestra comunidad casi trescientas empresas; una concentración comparable únicamente a la existente en algunos estados federados alemanes. Entre los fabricantes a destacar se distinguen dos, Mercedes-Benz en Vitoria-Gasteiz y el Grupo Irizar localizado en Ormaiztegui, Guipúzcoa.

2.2 EL CONFORMADO DE CHAPA EN EL AUTOMÓVIL

Una vez realizado el diagnóstico del mundo del motor se intuye necesario seguir avanzando en la definición del entorno en el que se sitúa este trabajo. Para satisfacer esta necesidad, se procederá a definir las partes del vehículo estrechamente ligadas a procesos de conformado de chapa.

En la imagen adjunta se ilustran las piezas del automóvil que están sujetas a doblado, corte o embutición. Entre ellas cabría destacar las siguientes: bastidor, pilares, cárter, capot y puertas.



Ilustración 1: Partes del vehículo obtenidas por conformado de chapa

A grandes rasgos, todos estos productos se obtienen por deformación plástica del metal en prensas, utilizando herramientas complejas y caras denominadas troqueles. Es por este motivo por el que su uso está justificado en largas tiradas de producción; tal es el caso de la automoción. Además, con esta tecnología se logran formas dificultosas con excelentes acabados superficiales y piezas de alta relación rigidez/peso.

En particular, la pieza objeto de estudio en este trabajo será el pilar B de un coche convencional de gama media. Una pieza estructural, altamente expuesta a impactos, que debe garantizar la integridad de la estructura del vehículo en caso de accidente. Ha adquirido la forma final tras una secuencia de operaciones aplicadas a una chapa de acero de alto límite elástico, una aleación muy resistente pero ligeramente maleable cuando se trabaja en caliente.

Asimismo, cabe recordar que este TFG únicamente se limitará a la primera embutición del pilar B, por ello el modelo de la pieza obtenido mediante el programador gráfico CAD carece de agujeros y detalles geométricos importantes. La consecución de estos requerimientos más exigentes se abordarían en los procesos de conformado de chapa posteriores que completan la línea de producción del pilar B.



Ilustración 2: Pilar B

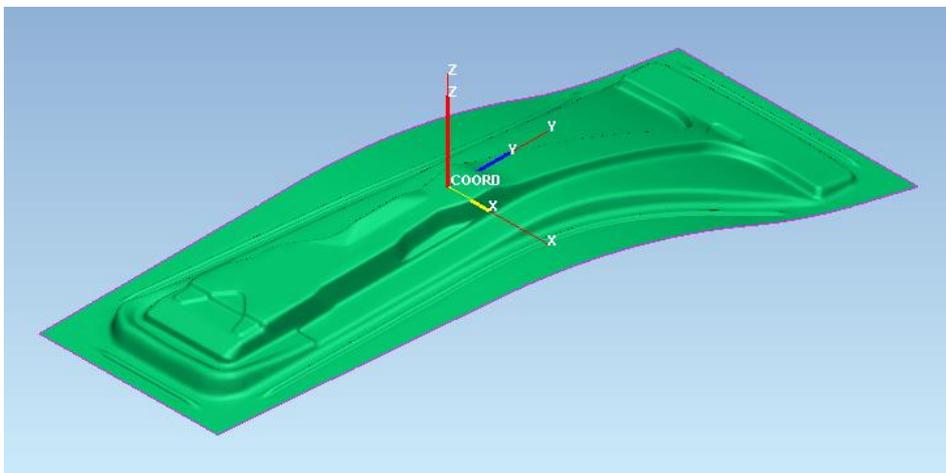


Ilustración 3: Modelo CAD del pilar B (vista isométrica)

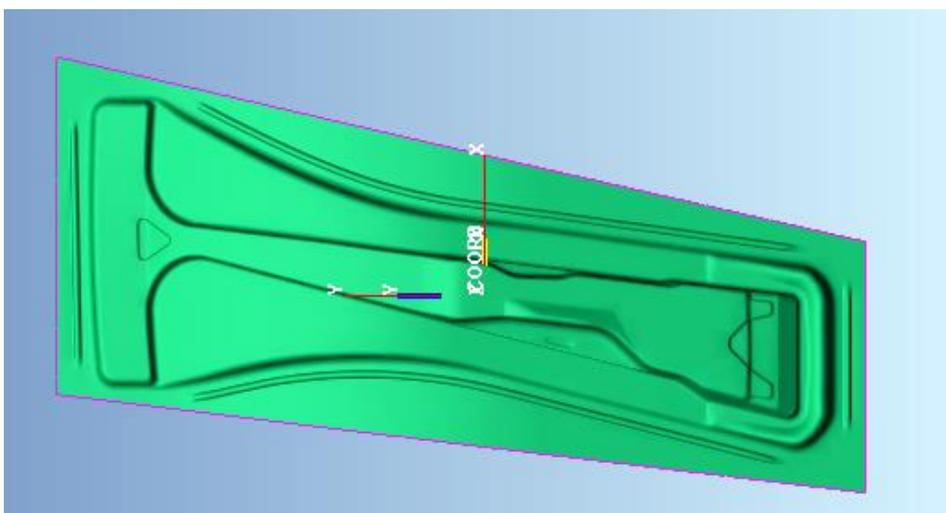


Ilustración 4: Modelo CAD del pilar B (plano XY)

2.3 APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN EL CONFORMADO DE CHAPA

Un último enfoque con el que acotar por completo el apartado contexto de este proyecto, sería abordar la importancia de la simulación por elementos finitos en el conformado de chapa. En pocas palabras, el MEF proporciona un modelo discreto a partir de un sistema continuo (superficie o volumen). La geometría original se aproxima con una malla de elementos que se conectan a través de sus nudos, de comportamiento conocido. De ahí que, el campo de desplazamientos dentro del elemento sea resultado de la interpolación de los desplazamientos de los nudos, generalmente sus vértices.

La consecuencia inmediata de la aplicación de este método es que se sustituye un problema en el que la solución es una función incógnita por otro con un número finito de incógnitas, los desplazamientos nodales. Conocidos los valores nodales, esta herramienta permite la obtención de algunas magnitudes relacionadas, las tensiones, que serán de vital importancia en los procesos de estampación.

En el mercado existe actualmente un gran abanico de programas informáticos que aplican esta técnica del mallado para la resolución de diversos problemas de ingeniería. Pam-Stamp, AutoForm, Dynaform y LS-Dyna serían los nombres a destacar en este campo.

Su extendido uso en la automoción se debe a la cada vez mayor potencia de cálculo de los ordenadores, así como a las notables mejoras en cuanto a visualización gráfica. En efecto, cualquier operación de conformado no es ejecutada en planta sin una simulación virtual previa en laboratorio mediante algunos de los softwares citados. Adicionalmente, todos estos programas constan habitualmente de tres partes para el diseño de las herramientas.

1. Preprocesador: este apartado abarca las tareas de definición de la pieza y su mallado. También se prevé imprescindible caracterizar las condiciones del entorno (ligaduras y solicitaciones), así como, el material de pieza.
2. Procesador: es el responsable de la construcción y resolución del modelo matemático conseguido en el apartado anterior.
3. Postprocesador: permite al ingeniero interpretar los resultados con el objetivo de evaluar la validez del diseño y del modelo de elementos finitos seleccionados.

3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Este apartado del TFG aportará una breve descripción de la operación embutición alrededor de la cual pivota el contenido del mismo. Se pretende así proporcionar unas nociones básicas al lector que le permitan encarar los posteriores bloques de este trabajo con garantías.

La imagen inferior ilustra intuitivamente la operación a simular.

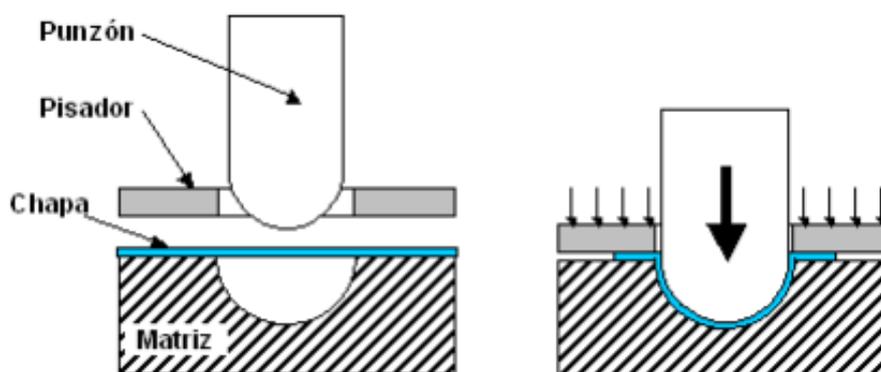


Ilustración 5: Ejemplo de embutición

Tal y como se puede observar, en el proceso de embutición el elemento pisador aprieta una chapa generalmente metálica de poco espesor (0,5-0,9mm) contra la matriz, al mismo tiempo que una prensa de tipo hidráulica o mecánica controla el movimiento constante de bajada del punzón. La cavidad así generada habrá adquirido la forma de la matriz.

Huelga destacar que la embutición ilustrada con anterioridad recibe el nombre de embutición de doble efecto. Igualmente, existe otro tipo de embutición alternativa denominada de simple efecto que se caracteriza por la ausencia de pisador, pero su uso se restringe a geometrías muy sencillas. Por tanto, se descarta esta opción para la embutición del pilar B en cuestión.

Por otra parte, atendiendo al modo de trabajo de la chapa cabe distinguir la embutición en frío de la embutición en caliente.

La embutición se realiza habitualmente en frío, a temperatura ambiente, debido a los excelentes acabados superficiales y dimensionales que se alcanzan. La invariabilidad de las propiedades mecánicas y los elevados ritmos de producción son algunas ventajas adicionales que la embutición en frío nos aporta. Por el contrario, se requieren esfuerzos elevados y los gastos en utillajes son más importantes que en caliente.

La dificultad de la embutición reside en las grandes deformaciones producidas en la chapa con estados tensionales variables y complejos. En consecuencia, un control defectuoso de la operación puede provocar la aparición de daños en la pieza: arrugas y grietas.

3.1 VARIABLES CRÍTICAS

El análisis del trabajo de embutición debe ser complementado mediante la descripción de las distintas variables que caracterizan de forma inequívoca la operación y que determinan la calidad de la misma. Éstos se pueden resumir en los siguientes seis.

- **Addendum:** superficie curva de transición entre la cavidad y el área plana superior de la matriz que pretende conseguir una fluencia progresiva del material. Para radios de curvatura grandes, la acción del pisador queda anulada, por lo que pueden generarse ondulaciones y arrugas que se convierten en pliegues a medida que avanza el proceso. Para radios de curvatura pequeños, es probable que aparezca un adelgazamiento excesivo de la chapa combinado con una importante concentración de tensiones en el addendum que se traducirá en la rotura de la pieza.
- **Juego entre punzón y matriz:** espacio libre entre punzón y matriz que tiene como finalidad la obtención de superficies embutidas perfectamente lisas. Si la magnitud de la holgura es grande, se formarán arrugas y pliegues difíciles de eliminar. Si es pequeña, en cambio, se producirá un efecto de laminación sobre el material, con una reducción del espesor de chapa que fácilmente puede acabar en rotura.
- **Fuerza del pisador:** esfuerzo que debe ejercer el pisador sobre la chapa mientras dura el trabajo de embutición. Obviamente, la formación de arrugas se verá favorecida para esfuerzos reducidos. Paralelamente, esfuerzos excesivos evitarán la fluidez del material dando lugar a la rotura del mismo.
- **Frenos:** obstáculos geométricos al flujo de material que se incluyen en el diseño de la matriz. Cumple la doble finalidad de conseguir el estiramiento óptimo de la pieza en aquellas zonas donde se prevea la presencia de arrugas y minimizar el material de chapa a emplear. La posición, la longitud, la geometría y la retención serán las variables inherentes a los frenos.
- **Lubricación:** técnica empleada en la mayoría de procesos de conformado en frío para disminuir el rozamiento existente entre la chapa y los elementos activos del utillaje. Por consiguiente, la película lubricante, de naturaleza sólida o líquida, permite reducir el desgaste de las herramientas, mejorar la fluencia del material, aumentar la calidad superficial de la pieza y rebajar los esfuerzos requeridos por la embutición.

- Springback: recuperación elástica de la pieza embutida cuando ha sido liberada de la herramienta de conformado. En consecuencia, el diseño de las herramientas debe ir encaminado a compensar estos efectos.

La siguiente imagen permite identificar algunos de los parámetros descritos.

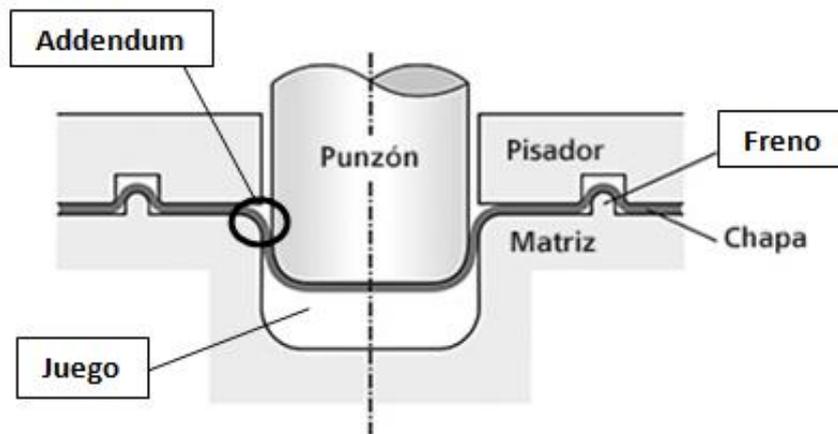


Ilustración 6: Parámetros de embutición

4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Simular la operación de embutición de una pieza del automóvil como paso previo a su fabricación presenta ventajas técnicas y económicas frente a la directa producción en planta.

Desde el punto de vista técnico, ensayar virtualmente el trabajo de embutición permite conocer el problema más en profundidad. La posibilidad de repetir tantas veces como se desee la operación proporciona al ingeniero una mayor capacidad de decisión sobre todas las variables que orbitan alrededor del problema. En otras palabras, realizar la simulación del conformado del pilar B del automóvil permite disminuir el esfuerzo experimental de puesta a punto que requiere el troquel debido a un conocimiento más detallado de este complejo proceso.

Desde el punto de vista económico, la simulación mediante el MEF ofrece la posibilidad de predecir el comportamiento de las piezas sin la necesidad de prototipos. En caso de fallo, bastará corregir errores cometidos en la fase diseño, traduciéndose en un considerable ahorro económico. De esta manera, se eliminan problemas que supondrían un retraso en el lanzamiento del producto, aumentando la calidad y la fiabilidad del mismo.

Paralelamente, este trabajo destaca por su sencillez puesto que se requieren equipos de trabajo reducidos (2-3 personas) y los recursos empleados son perfectamente asumibles por cualquier empresa del sector. De hecho, la inversión realizada para adquirir los ordenadores y las correspondientes licencias de programas de simulación está sobradamente justificada debido a los grandes volúmenes de producción de las piezas de la automoción.

5 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es diseñar la primera embutición del pilar B de un coche convencional mediante el software Pam-Stamp. La optimización y la verificación del proceso también aparecen implícitas en esta herramienta virtual, que se encuentra a disposición del alumnado en la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Para lograr esta meta final se deberán ir ejecutando una serie de objetivos parciales.

- Obtención la geometría de la pieza: modelización en el programador gráfico CAD de la pieza en cuestión. En esta labor será imprescindible recordar que Pam-Stamp únicamente admite geometrías en dos dimensiones, por lo que se prescindirá del grosor de la chapa metálica. La pieza se guardará en formato neutral (.iges).
- Obtención la geometría de las herramientas: diseño óptimo de las formas del troquel. Esta operación dará lugar a la creación del conjunto matriz-pisador-punzón. La fijación de la distancia relativa entre matriz y pisador también se incluye en este apartado.
- Obtención las propiedades de la chapa: determinación de los parámetros característicos de la chapa, esto es, dimensiones, tipo de material y fricción en el contacto con las herramientas de estampación.
- Estudio del flujo de material: diseño óptimo de radios de acuerdo y addendum que permitan una deformación progresiva del material. Paralelamente, se valorará la inclusión de frenos en las proximidades de aquellas zonas susceptibles de arrugarse. En caso afirmativo, el tipo de geometría, la posición y la fricción característica de los mismos también se considerarán variables a determinar.
- Cálculo de fuerzas: deducción de la magnitud de la fuerza que debe ejercer el pisador sobre la chapa. Esta variable tendrá una influencia capital en la consecución de la geometría objetivo en la chapa embutida.
- Ensayo virtual de preformas: análisis de la respuesta del material chapa. La simulación de la operación permitirá determinar si se ha alcanzado la deformación requerida sin la aparición de grietas ni arrugas que invaliden los cálculos de los anteriores puntos. Tampoco se admitirán reducciones de espesor de chapa superiores al 25%.

Evidentemente se requiere un gran esfuerzo experimental de prueba y error para llegar a la pieza objetivo, que será similar a la pieza final en un 80%. De hecho, la detección de fallos durante la simulación obliga a realizar modificaciones en la fase diseño y repetir el proceso. Por consiguiente, este trabajo también cumplirá la función didáctica de ilustrar la influencia

de la variación de los distintos parámetros de embutición en la correcta deformación plástica de la chapa.

6 ALTERNATIVAS

A fin de ejecutar los objetivos anteriormente definidos, han sido contempladas distintas alternativas en lo que a programa informático de simulación, material de chapa y tipo de prensa se refiere. Atendiendo a múltiples factores, serán descritas las distintas opciones valoradas en cada apartado para así justificar razonadamente el porqué de cada elección.

6.1 PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

Durante el comienzo de este estudio se barajó la posibilidad de emplear un simulador diferente a Pam-Stamp, AutoForm. En el siguiente análisis comparativo se aportarán las razones que motivaron su descarte.

La diferencia más destacable entre ambos programas es el método de integración temporal empleado. AutoForm recurre a un método temporal implícito asociado a una formulación cuasiestática, mientras que Pam-Stamp utiliza un método de integración temporal asociado a una formulación dinámica. La embutición no admite la simplificación cuasiestática en la que las deformaciones siguen la misma ley de variación de las cargas, por ello Pam-Stamp se adecúa mejor para analizar procesos como los de este TFG.

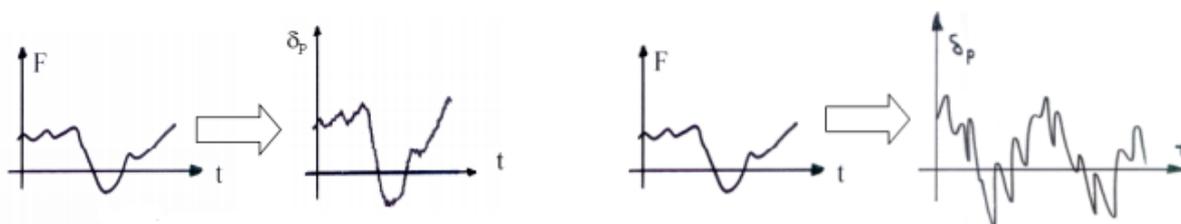


Ilustración 7: Fuerza y deformación en función del tiempo. A) Caso cuasiestático B) Caso dinámico

En cuanto a la discretización de chapa, Pam-Stamp ofrece la posibilidad de escoger entre distintos tipos de elementos finitos, pero emplea por defecto el elemento cáscara Belytschko-Tsay, que es un elemento cuadrado, es decir, tiene cuatro nodos por elemento. Por contra, AutoForm utiliza un único elemento cáscara tipo triangular, con tres nodos por elemento. Ninguno de los programas plantea problemas en lo que al mallado de la chapa a conformar se refiere, ya que las cáscaras modelizan piezas de pequeño espesor sometidas a sollicitaciones contenidas en su superficie y normales a ella. Sin embargo, se intuye mayor precisión en los resultados en Pam-Stamp por el mayor número de grados de libertad considerado.

La discretización de herramientas se ejecuta automáticamente en ambos softwares y no difiere mucho de lo comentado en el párrafo anterior. Pam-Stamp recurre a elementos

cuadrangulares y triangulares, en tanto que AutoForm se vale de elementos triangulares. Los primeros permiten un mejor control del error geométrico, los segundos facilitan la generación de las mallas automáticas de calidad. En este apartado, Pam-Stamp recomienda realizar una verificación de la malla creada para detectar y corregir elementos de pequeñas dimensiones que den lugar a problemas de contacto.

En relación al algoritmo de resolución del problema de contacto con rozamiento, Pam-Stamp permite la elección entre la estrategia *penalty* y *accurate* dependiendo de la calidad de la malla. En el supuesto de que el ingeniero califique la calidad de la malla como buena se usará el algoritmo *accurate*, el cual prohíbe la penetración de los nudos de la chapa en la herramienta. En cambio, AutoForm utiliza el tipo de contacto *penalty* donde la penetración del cuerpo deformable en el elemento rígido es limitada mediante el parámetro *max radius penetration*. Por consiguiente, el abanico de opciones que Pam-Stamp nos aporta para la resolución del problema con rozamiento se valora como una ventaja comparativa.

Este análisis finaliza con el siguiente cuadro resumen donde se incluyen los parámetros utilizados durante las simulaciones numéricas.

	PAM-STAMP	AUTOFORM
Discretización de herramienta		
Tamaño máximo de elemento	30mm	30mm
<i>Angle criteria</i>	7,5°(al menos 12 elementos en un ángulo de 90°)	11,25°(al menos 8 elementos en un ángulo de 90°)
Discretización de chapa		
Tamaño máximo de elemento inicial	Automático o al criterio del usuario	20mm
Refinamiento automático		
Ángulo máximo entre elementos	10°	22,5°
Penetración radial	No aplicable (<i>accurate</i>)	0,22mm
Nivel de refinamiento	Automático o al criterio del usuario	6
Rigidez de la herramienta	Cuerpo rígido (automático)	50 para piezas pequeñas 30 para piezas medias ≤ 10 para piezas grandes

Tabla 1: Parámetros utilizados en las simulaciones numéricas

Con estos datos en la mano se ha realizado la tabla de ponderación inferior donde se evalúan ambos simuladores atendiendo a diferentes criterios: facilidad de manejo, coste computacional y precisión de los resultados. La calificación será 1, 3 ó 5, siendo 5 la más positiva. Asimismo, se ha dotado al apartado precisión de los resultados de valor doble pues las soluciones arrojadas por el MEF deben garantizar unos mínimos de fiabilidad.

	PAM-STAMP	AUTOFORM
Facilidad de manejo	3	3
Coste computacional	1	5
Precisión de los resultados $\times 2$	$5 \times 2 = 10$	$1 \times 2 = 2$
TOTAL	14	10

Tabla 2: Programas de simulación

Al descartar AutoForm frente a Pam-Stamp se sacrifica el coste computacional para conseguir una mayor precisión de las soluciones que en última instancia es lo que se exige en este TFG.

6.2 MATERIALES DE CHAPA

Son cuatro los materiales que se han sopesado para emplearlos como chapa: acero al carbono, acero de alto límite elástico, aluminio y plástico reforzado. En función de su respuesta a las distintas necesidades del cliente se ha elaborado la siguiente tabla de ponderación que nos conduce a una interpretación unívoca del material más conveniente a emplear.

Con objeto de abordar esta tarea de forma más visual, únicamente se han considerado cinco especificaciones técnicas: ductilidad, peso, precio, resistencia a la corrosión y resistencia al impacto. La evaluación de cada una de ellas podrá tomar los valores 1, 3 y 5, donde 5 es la calificación más positiva. Además, es importante hacer notar que el apartado resistencia al impacto tiene valor doble, pues no se debe olvidar que la finalidad última del pilar B debe ser la de proteger la vida de los pasajeros en caso de accidente.

	ACERO AL CARBONO	ACERO DE ALTO LIMITE ELASICO	ALUMINIO	PLASTICO REFORZADO
Ductilidad	5	3	5	3
Peso	3	3	5	5
Precio	5	5	1	3
Resistencia a la corrosión	1	1	5	3
Resistencia al impacto $\times 2$	$3 \times 2 = 6$	$5 \times 2 = 10$	$1 \times 2 = 2$	$1 \times 2 = 2$
TOTAL	20	22	18	16

Tabla 3: Materiales de chapa

De acuerdo a nuestras posibilidades económicas, es evidente que el material más completo es el acero de alto límite elástico. A excepción de una limitada resistencia al ambiente que podrá ser fácilmente subsanable con recubrimientos protectores, cumple de manera muy positiva otros requerimientos de vital importancia. De hecho, presenta una baja densidad al mismo tiempo que ofrece una buena combinación de capacidad de deformación y resistencia mecánica.

6.3 TIPOS DE PRENSA

Los equipos encargados de aplicar presión sobre el material en los procesos de conformado se denominan prensas. En función del mecanismo empleado para el movimiento de la estampa superior se distinguen las prensas mecánicas y las prensas hidráulicas.

	PRENSA MECÁNICA	PRENSA HIDRAÚLICA
Mecanismo de accionamiento	Biela –manivela (energía almacenada en un volante de inercia)	Cilindro hidráulico servocontrolado
Fuerza y velocidad dependen de	Cinemática	Caudal y presión en el cilindro hidráulico

Tabla 4: Diferencias entre prensa hidráulica y mecánica

Si bien es cierto que las prensas mecánicas son altamente ventajosas considerando aspectos como el coste, el mantenimiento y la productividad, en esta primera embutición se seleccionará la prensa hidráulica. El motivo de esta decisión se debe a la capacidad que ésta nos ofrece para ejercer fuerzas cuya magnitud debe y realizar un control exhaustivo de la posición del conjunto punzón – pisador. Podríamos concluir que las prensas hidráulicas se limitan a tareas de preparación mientras que las prensas mecánicas se adecúan mejor a trabajos de puesta a punto.

Estas consideraciones se han concentrado en la siguiente tabla de ponderación. En ella, se ha seguido una puntuación idéntica a la de las alternativas estudiadas anteriormente.

	PRENSA MECÁNICA	PRENSA HIDRAÚLICA
Coste	5	1
Mantenimiento	5	1
Productividad	5	3
Capacidad mecánica _{x2}	3	5
Control _{x2}	1	5
TOTAL	23	25

Tabla 5: Tipos de prensa

7 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CRÍTICAS EN LA EMBUTICIÓN

En este capítulo se expondrán las distintas simulaciones realizadas de una forma didáctica. De hecho, se comentará el efecto de algunos de los conceptos que ya han aparecido en este TFG. El siguiente listado recoge el orden en que se estudiarán los mismos.

1. Forma del addendum
2. Material de chapa
3. Espesor de chapa
4. Fricción
5. Frenos
6. Fuerza del pisador

El análisis de la calidad de la embutición correspondiente a cada punto se apoyará fundamentalmente en el Diagrama Límite de Conformado, una herramienta muy utilizada para caracterizar la capacidad de conformado de una chapa metálica a nivel industrial.

El FLD consiste en una gráfica que relaciona las deformaciones principales mayor (ϵ_1) y menor (ϵ_2) según el plano de la chapa. En él se traza la curva límite de conformado que representa los valores límite de deformación necesarios para producir el fallo por rotura de la chapa.

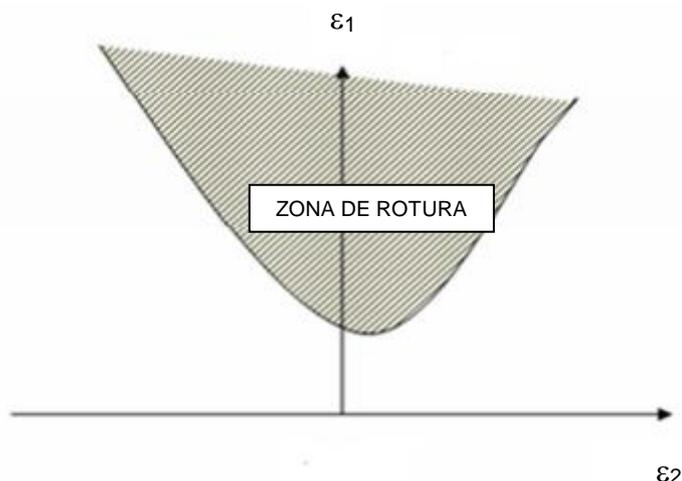


Ilustración 8: Diagrama FLD genérico

El fundamento de este diagrama tiene su origen en la conservación del volumen de la pieza embutida. En virtud de este principio, la suma de las tres deformaciones principales ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 es nula, de manera que, sólo son necesarias dos de ellas para definir por completo el estado de deformaciones.

Si llamamos β a la relación entre las dos deformaciones principales apuntadas en el diagrama, $\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$, algunos valores de β describen situaciones que son de especial interés.

- $\beta = 1 \rightarrow$ tensión biaxial
- $\beta = 0 \rightarrow$ deformación plana
- $\beta = -0,5 \rightarrow$ estado uniaxial de tensión
- $\beta = -1 \rightarrow$ cortante puro
- $\beta = -2 \rightarrow$ compresión uniaxial

En función de la ubicación de la nube de puntos respecto de la curva FLC y las rectas β previamente definidas, se distinguen distintas zonas de deformación.

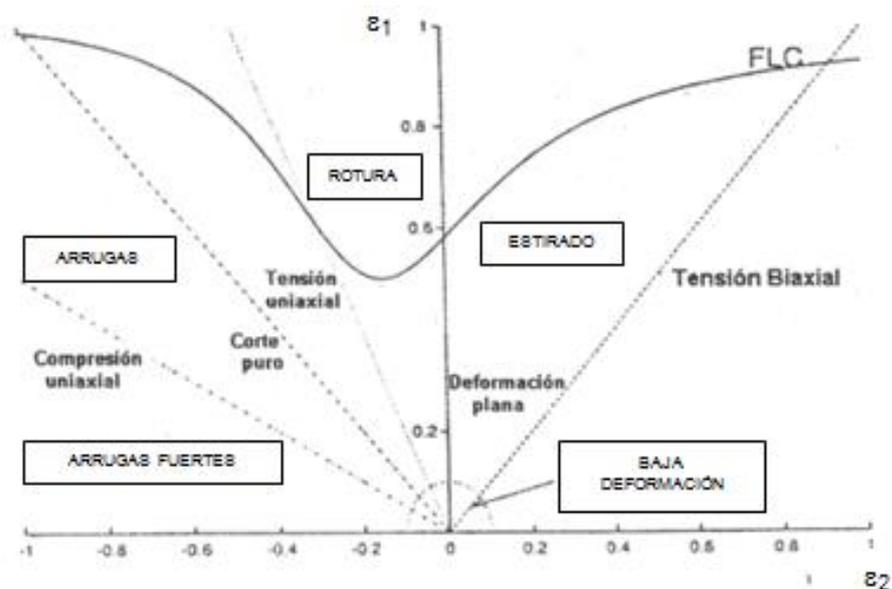


Ilustración 9: Zonas de deformación en el FLD

La gráfica FLD arrojada por Pam-Stamp permite valorar rápidamente la validez de la simulación pues se hace corresponder a cada punto de la malla un color según haya sido su respuesta a la embutición. A continuación, se definen todos los colores que pueden aparecer en el diagrama y su respectivo significado.

	Rotura
	Zona de seguridad
	Estirado
	Baja deformación
	Arruga
	Arruga fuerte

Tabla 6: Código de colores

Llegados a este punto se hace necesario resaltar que no todas las arrugas o roturas invalidarán la operación de embutición simulada, sino aquellas que se localicen en el área de chapa que se considera pilar B. Por tanto, se obviarán cualquier fallo que aparezca fuera de esta zona de interés.

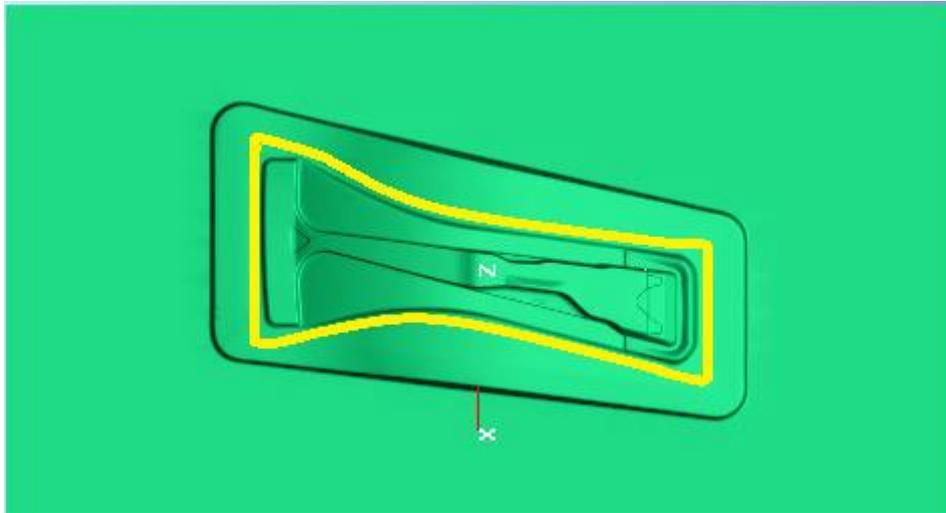


Ilustración 10: Zona de no fallo en la chapa

Con esta información en la mano, se intuye trascendental acompañar la influencia de las múltiples variables de embutición con un importante contenido fotográfico que permita visualizar los resultados, en lo que a estados tensionales y deformación de la chapa se refiere. En definitiva, se pretende conducir al lector a la mejor simulación de este proceso justificando cada una de las decisiones tomadas en el transcurso del mismo.

7.1 FORMA DEL ADDENDUM

Primeramente, se seleccionará la forma del addendum más adecuada para salvar el espacio libre entre la cavidad y el área plana superior de la matriz. La imagen inferior permite ilustrar la superficie de transición indicada en este punto.

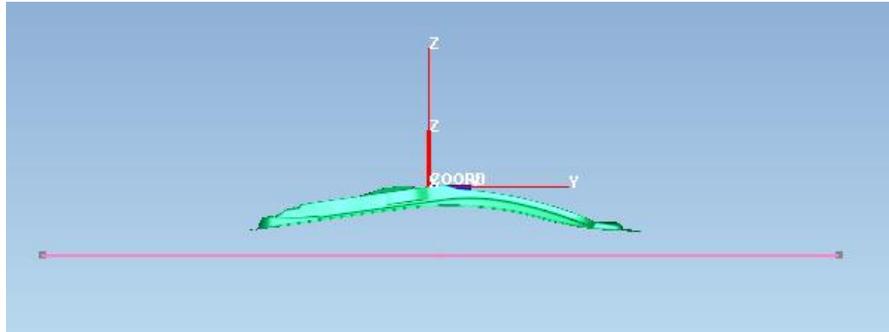


Ilustración 11: Espacio libre entre la cavidad y el área plana superior de la matriz

Pam-Stamp ofrece seis posibles soluciones para la forma del addendum. Sin embargo, únicamente se considerarán las geometrías tipo standard, arco y spline, debido a la sencillez y uniformidad de la superficie generada para la matriz. Las opciones a estudiar ocupan las posiciones primera, quinta y sexta, respectivamente, en el siguiente cuadro resumen.



Ilustración 12: Posibles geometrías del addendum

En las siguientes líneas se expondrán más detalladamente las distintas geometrías del addendum, al mismo tiempo que se aportará la figura de la pieza embutida para cada caso. Por último, se describirán los resultados alcanzados a fin de determinar el addendum idóneo.

7.1.1 ARCO

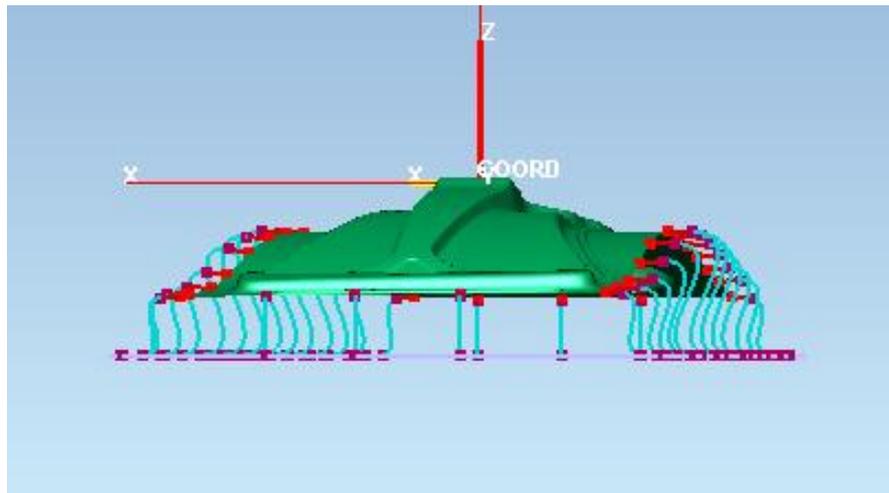


Ilustración 13: Addendum tipo arco (plano XZ)

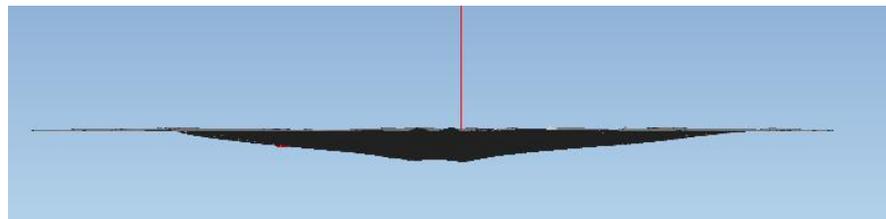


Ilustración 14: Pieza final con addendum tipo arco (plano YZ)

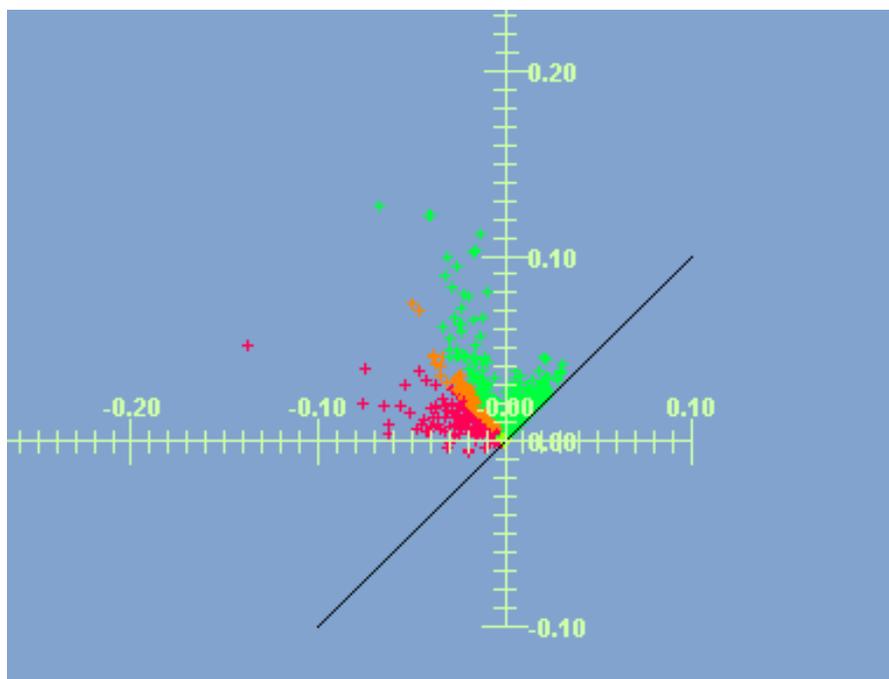


Ilustración 15: Estado tensional con addendum tipo arco (FLD)

7.1.2 SPLINE

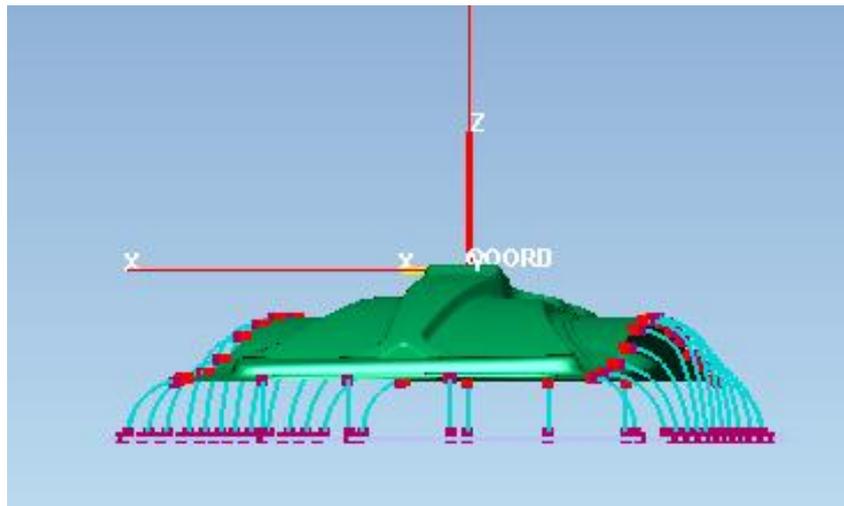


Ilustración 16: Addendum tipo spline (plano XZ)

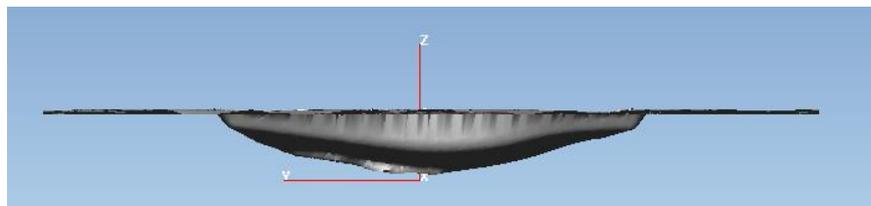


Ilustración 17: Pieza final con addendum tipo spline (plano YZ)

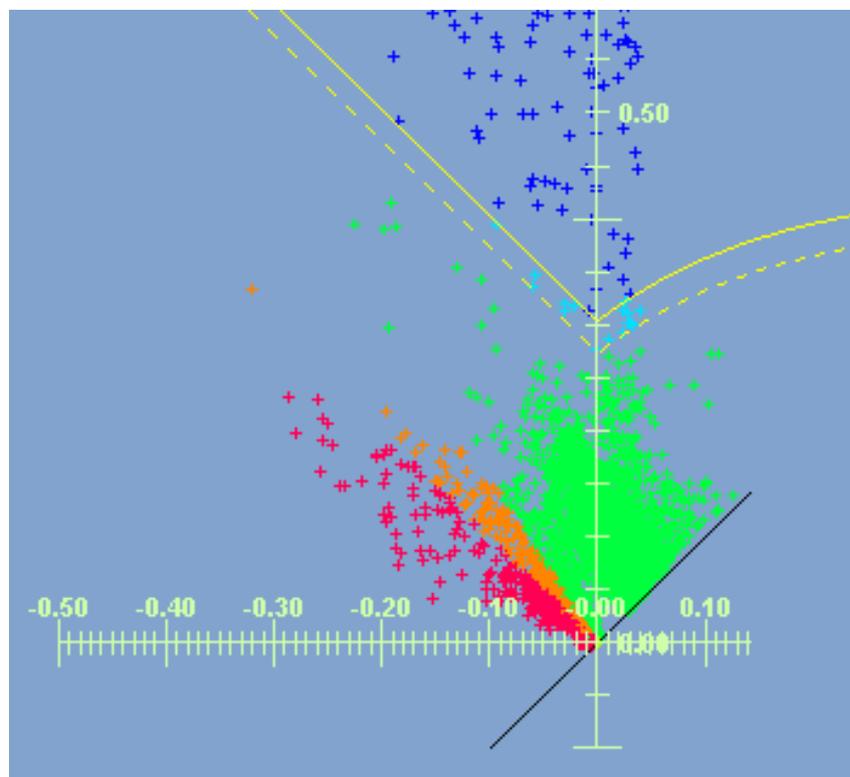


Ilustración 18: Estado tensional con addendum tipo spline (FLD)

7.1.3 STANDARD

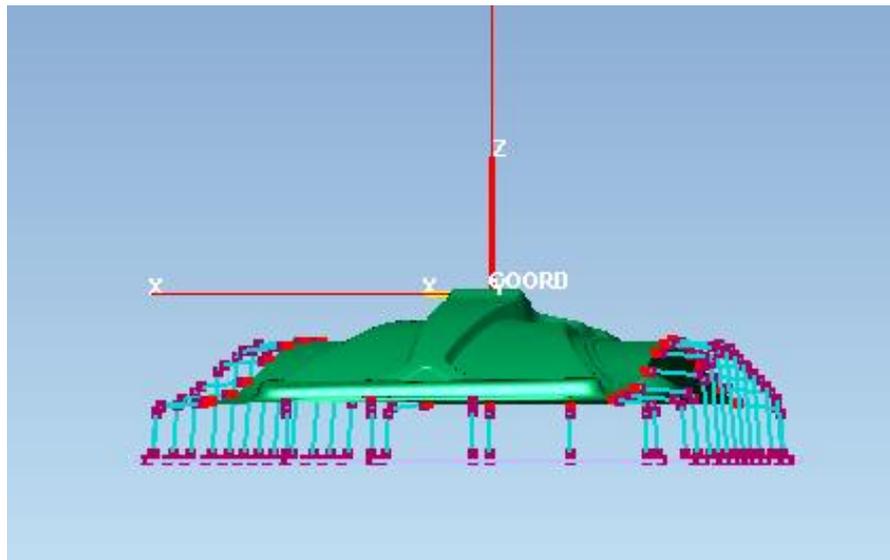


Ilustración 19: Addendum tipo standard (plano XZ)

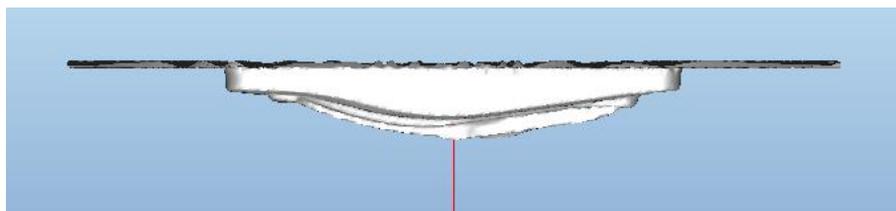


Ilustración 20: Pieza final con addendum tipo standard (plano YZ)

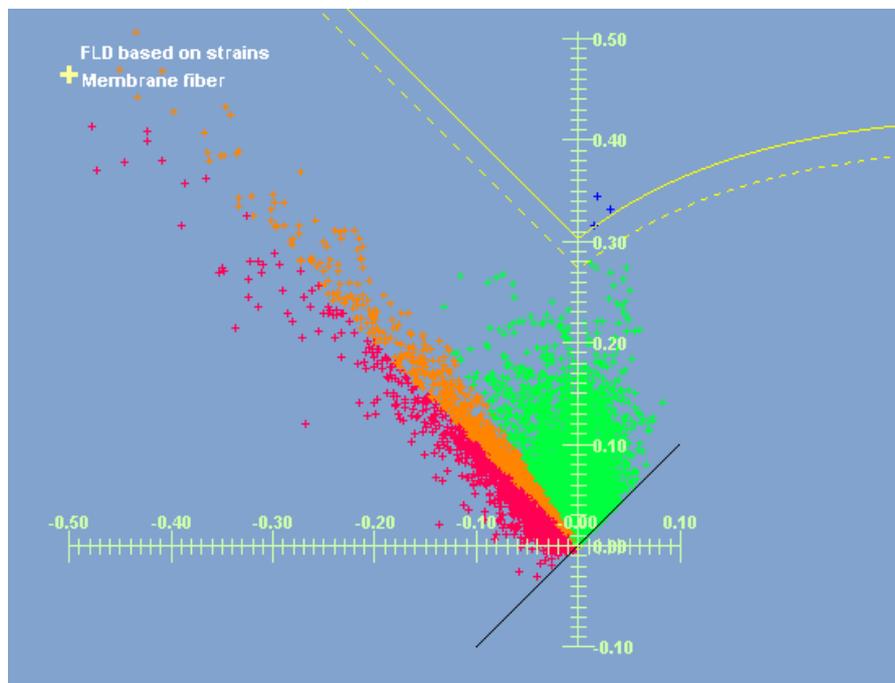


Ilustración 21: Estado tensional con addendum tipo standard (FLD)

7.1.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Atendiendo al aspecto de la pieza final es fácil determinar que el addendum tipo standard es el que mejor se adapta para el conformado del pilar B. El punzón realiza el movimiento completo de bajada ejerciendo una presión constante sobre la chapa que adquiere, a grosso modo, la forma deseada.

No ocurre lo mismo con la geometría en forma de S vertical correspondiente al addendum tipo arco, donde la deformación de la pieza parece insuficiente. Aparentemente, todo el esfuerzo de embutición se invierte en intentar esquivar las zonas cóncava y convexa de la S en cuestión.

El addendum tipo spline también se opone a la correcta embutición de la chapa. El contacto entre el addendum y el área superior de la matriz se produce a 90° y por tanto, aparece una importante concentración de tensiones sobre dicho borde. En consecuencia, el descenso del punzón va favoreciendo la rotura de esta región crítica invalidando íntegramente la operación.

7.2 MATERIAL DE CHAPA

En lo que a la elección del material de chapa se refiere, Pam-Stamp dispone de una extensa base de datos donde poder encontrar infinidad de materiales encaminados a satisfacer distintas aplicaciones. Cabe destacar el alto porcentaje de aceros de embutición seleccionables, designados según las diferentes normas existentes (UNE, DIN, AFNOR...).

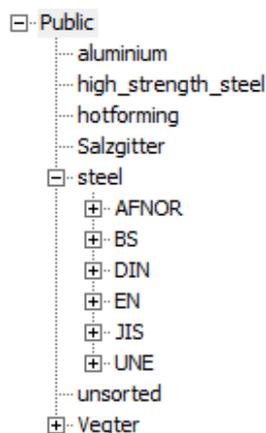


Ilustración 22: Lista de materiales seleccionables en Pam-Stamp

Con anterioridad ya se razonó la conveniencia de emplear acero de alto límite elástico frente al plástico, acero al carbono o aluminio. Así pues, este punto intentará alcanzar el mismo veredicto, esta vez, en base al estudio del estado tensional en el material deformado. El cálculo de la recuperación elástica máxima también será de ayuda para tal fin.

La tabla inferior asigna los materiales escogidos para estudiar los distintos casos. Es importante hacer notar, la ausencia de materiales tipo plástico en el listado de materiales ofertado por Pam-Stamp, razón por la cual se descarta el estudio de su comportamiento.

ALUMINIO	AI995
ACERO DE ALTO LÍMITE ELÁSTICO	DP800
ACERO AL CARBONO	AP04
PLÁSTICO REFORZADO	-

Tabla 7: Materiales asignados a cada grupo

7.2.1 ALUMINIO AL995

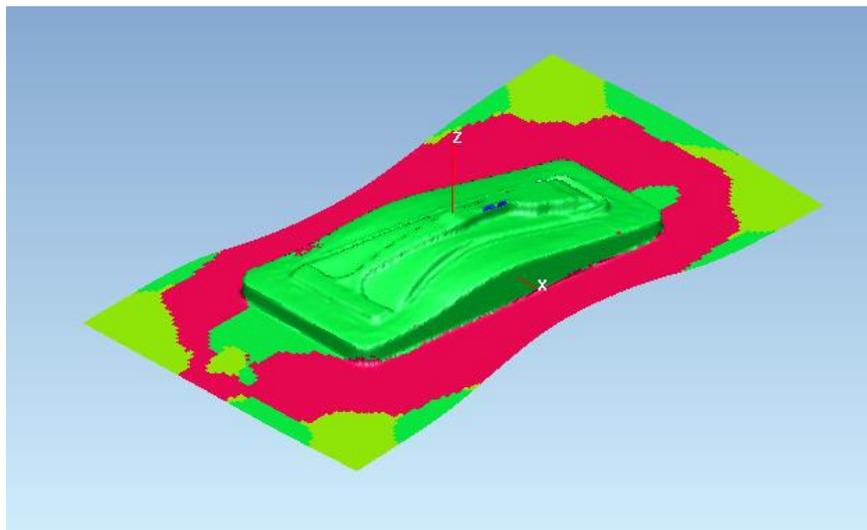


Ilustración 23: Estado tensional del aluminio Al995 (vista isométrica)

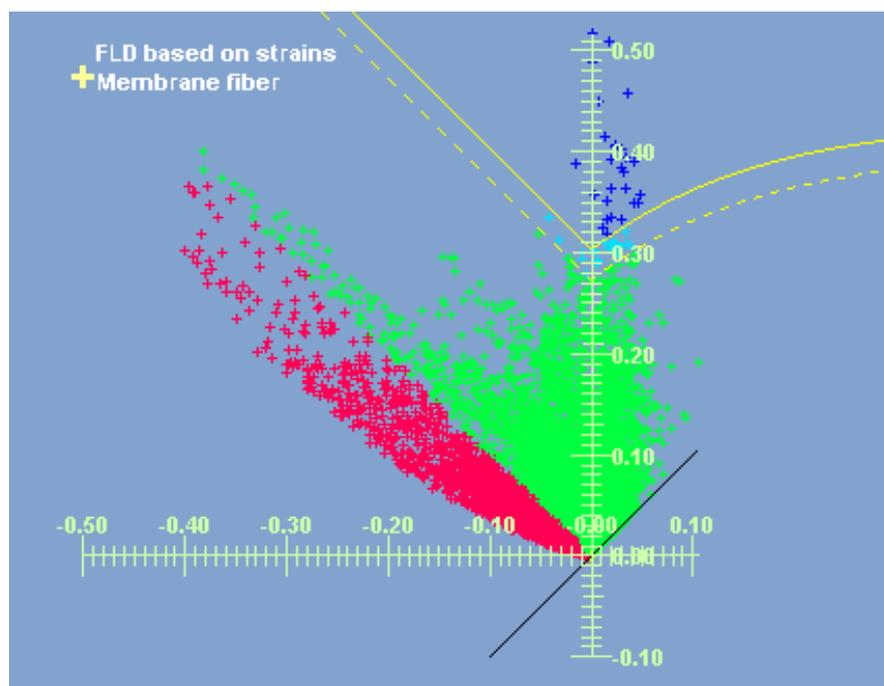


Ilustración 24: Estado tensional del aluminio Al995 (FLD)

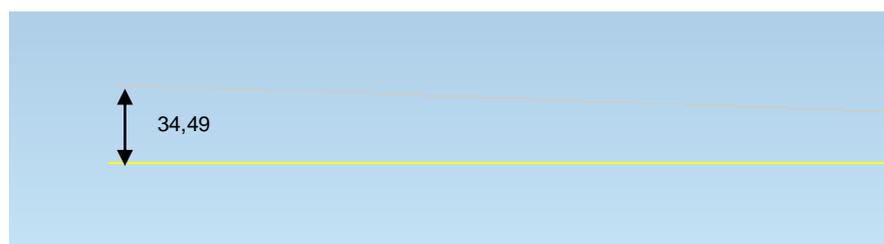


Ilustración 25: Springback máximo del aluminio Al995

7.2.2 ACERO DE ALTO LÍMITE ELÁSTICO DP800

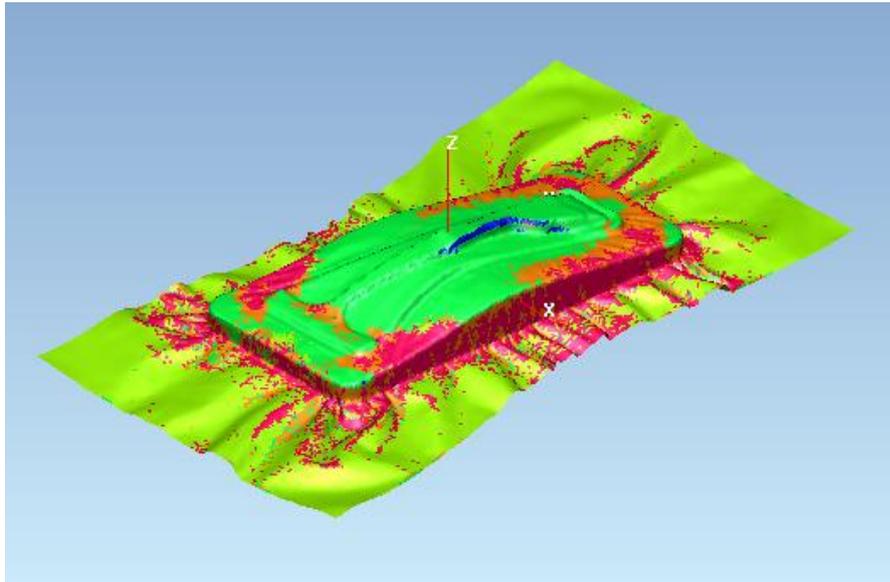


Ilustración 26: Estado tensional del acero de alto límite elástico DP800 (vista isométrica)

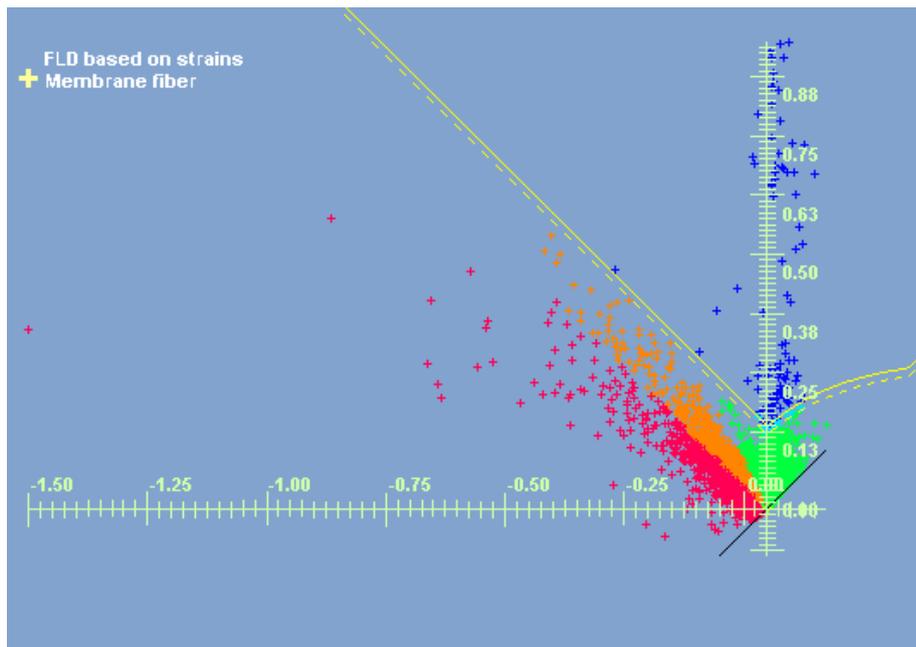


Ilustración 27: Estado tensional del acero de alto límite elástico DP800 (FLD)

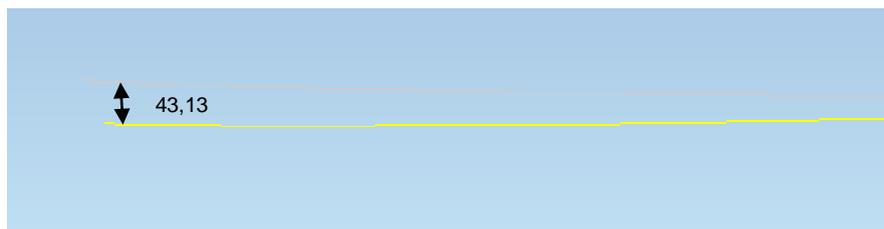


Ilustración 28: Springback máximo del acero de alto límite elástico DP800

7.2.3 ACERO AL CARBONO AP04

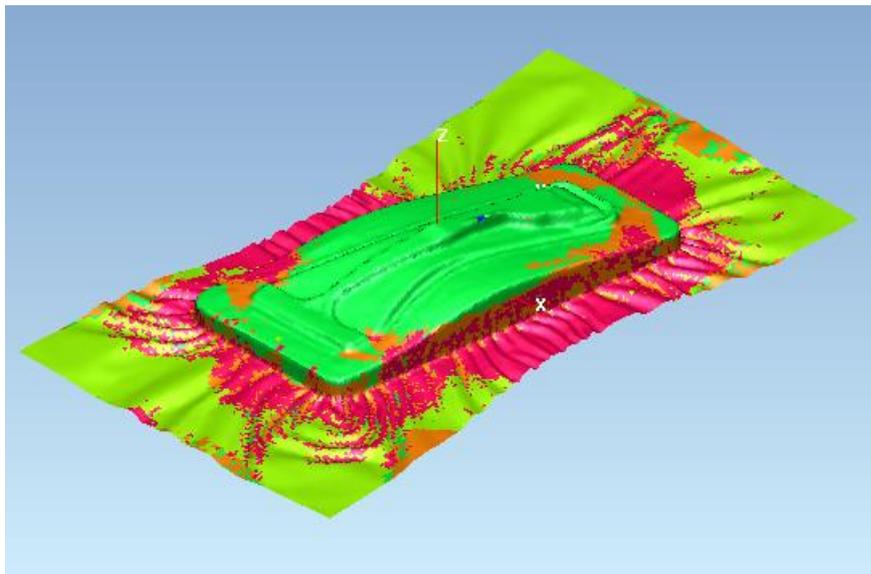


Ilustración 29: Estado tensional del acero de al carbono AP04 (vista isométrica)

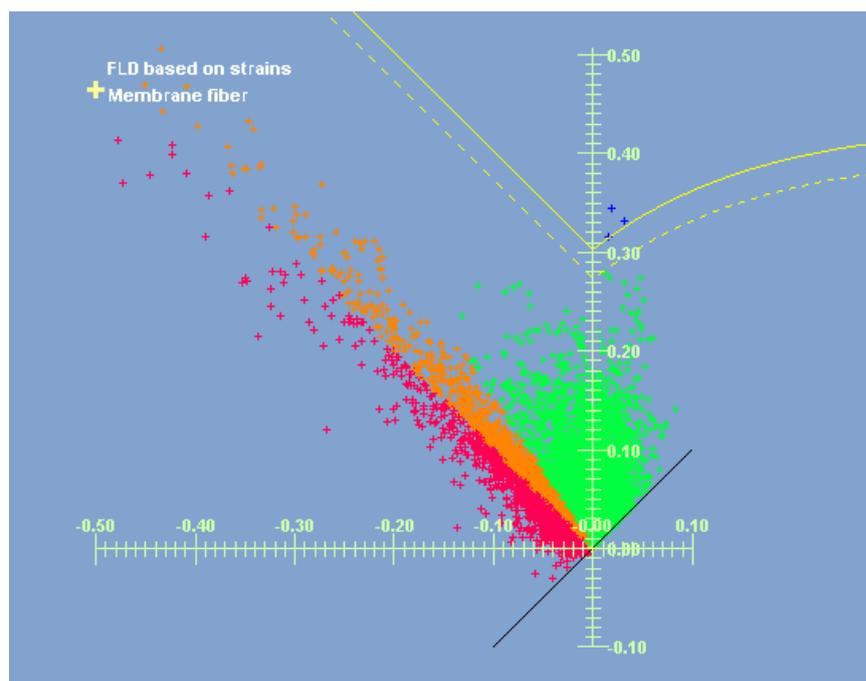


Ilustración 30: Estado tensional del acero al carbono AP04 (FLD)



Ilustración 31: Springback máximo del acero al carbono AP04

7.2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A la vista de los estados tensionales es indudable que el material más adecuado para simular la operación de embutición es el acero al carbono AP04. Obviando la existencia de ciertos pliegues y algunos nudos de la malla que han alcanzado la rotura, se puede concluir que un alto porcentaje de la pieza ha quedado perfectamente estirada.

Las simulaciones realizadas con el aluminio Al995 manifiestan una mayor área óptima debido a la ductilidad característica de este material. Por contra, su resistencia última es relativamente baja lo que justifica el gran número de roturas presentes.

El acero de alto límite elástico DP800 tampoco será válido debido a la elevada concentración de grietas que aparecen en zonas centrales del pilar B. Evidentemente, este resultado contradice lo apuntado en el punto *Alternativas* acerca de la conveniencia de utilizar un acero de alto límite elástico.

Llegados a este punto urge comentar el hecho de que todas las simulaciones realizadas en Pam-Stamp están asociadas a embuticiones en frío; de ahí que, el acero de alto límite elástico manifieste un comportamiento frágil. En la práctica, aquellas piezas estructurales del automóvil que están enormemente expuestas a impactos, se obtienen por embutición en caliente. Tal es el caso del pilar B, de manera que los resultados obtenidos para embuticiones en frío con aceros al carbono son extrapolables a los resultados obtenidos para embuticiones en caliente con aceros de alto límite elástico.

Teniendo en cuenta lo expuesto previamente y dada la finalidad didáctica de este trabajo, de aquí en adelante se tomará como material de chapa el acero al carbono AP04.

7.3 ESPESOR DE CHAPA

Otra variable adicional en la definición del material es el espesor. De forma análoga al caso anterior, la resolución de este problema se determinará examinando los estados tensionales de la pieza embutida para tres valores de espesor propuestos, 0,5mm, 0,7mm y 0,85mm.

7.3.1 $e=0,5\text{mm}$

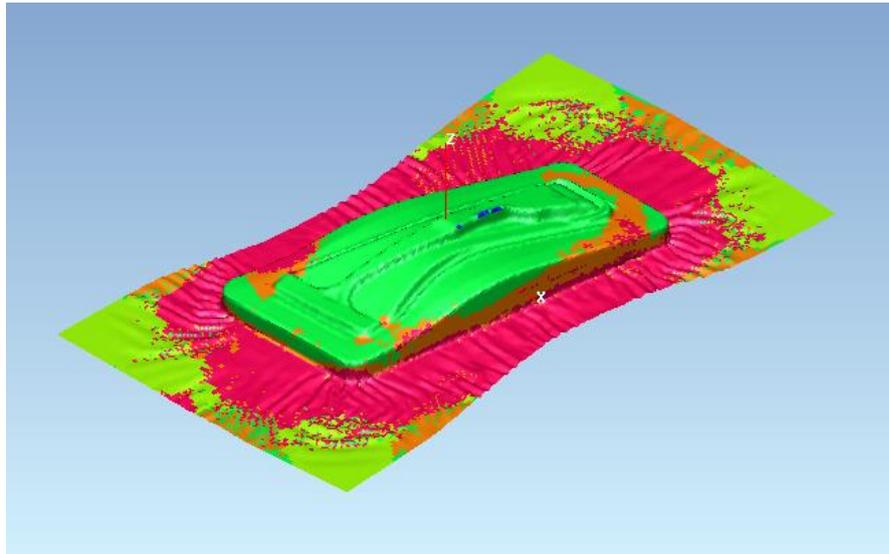


Ilustración 32: Estado tensional con 0,5mm de espesor (vista isométrica)

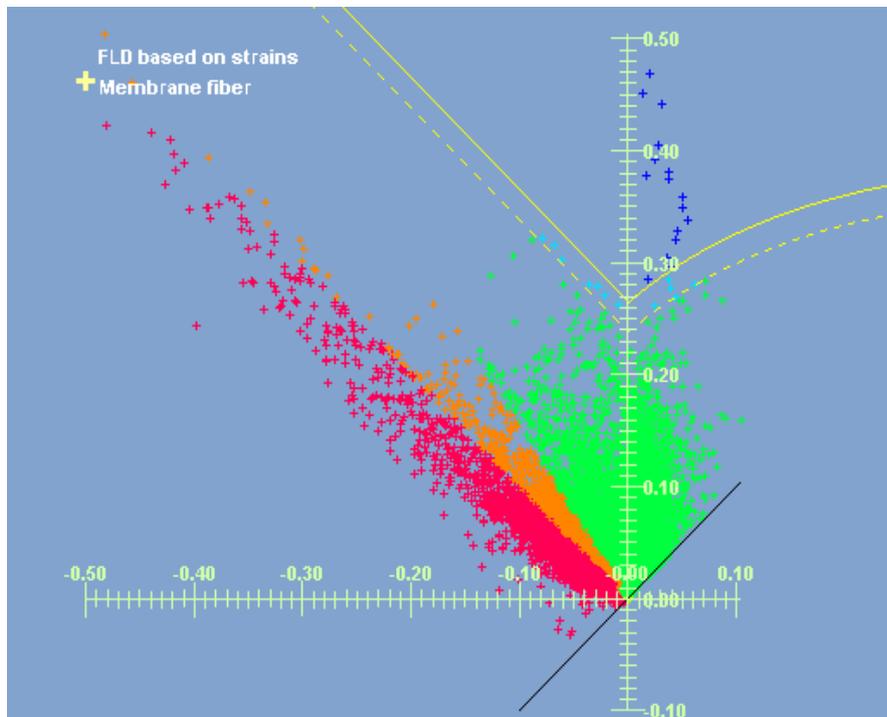


Ilustración 33: Estado tensional con 0,5mm de espesor (FLD)

7.3.2 $e = 0,7\text{mm}$

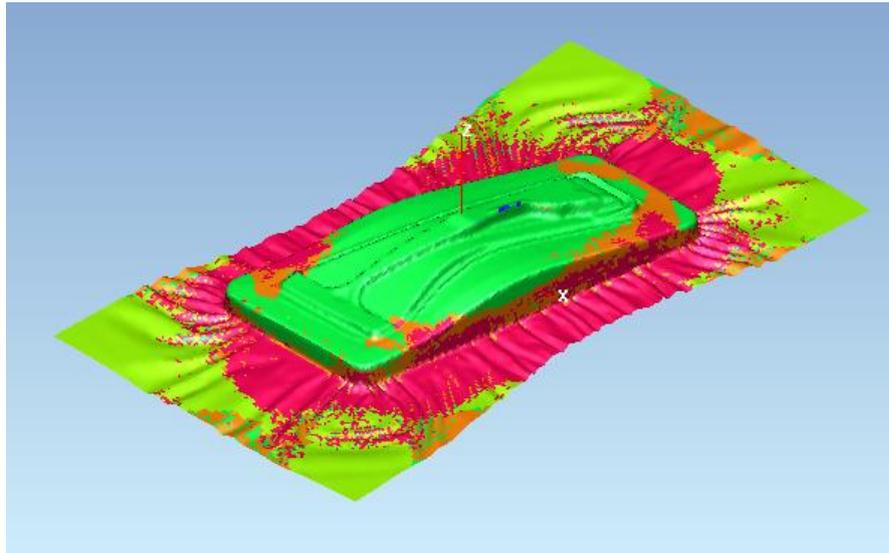


Ilustración 34: Estado tensional con 0,7mm de espesor (vista isométrica)

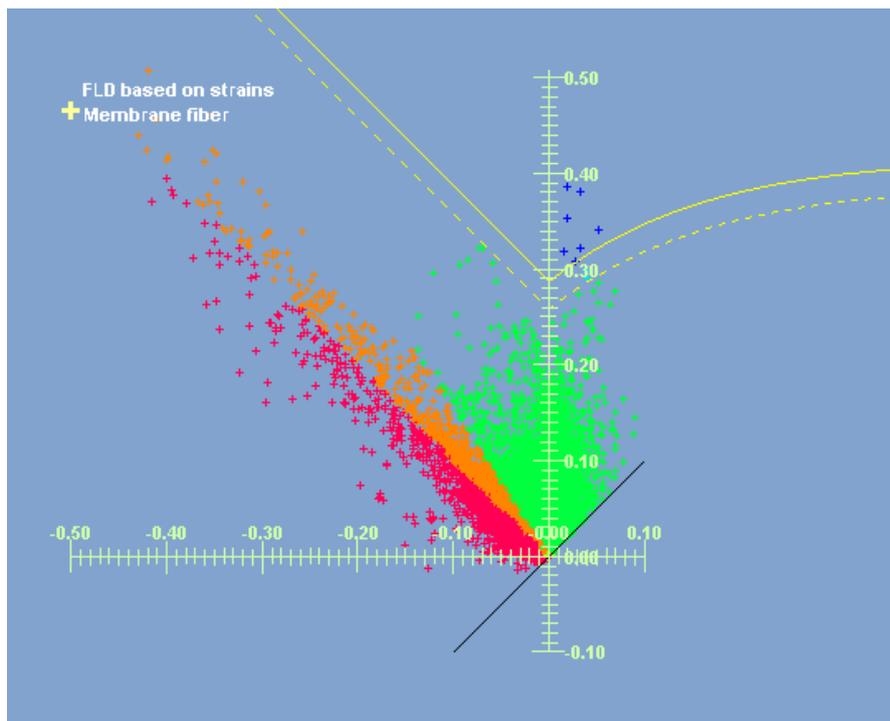


Ilustración 35: Estado tensional con 0,7mm de espesor (FLD)

7.3.3 $e= 0,85\text{mm}$

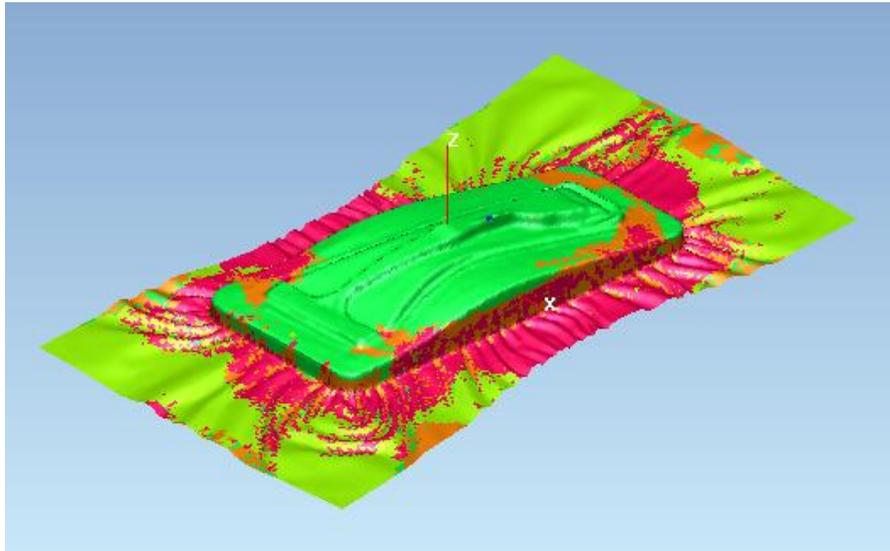


Ilustración 36: Estado tensional con 0,85mm de espesor (vista isométrica)

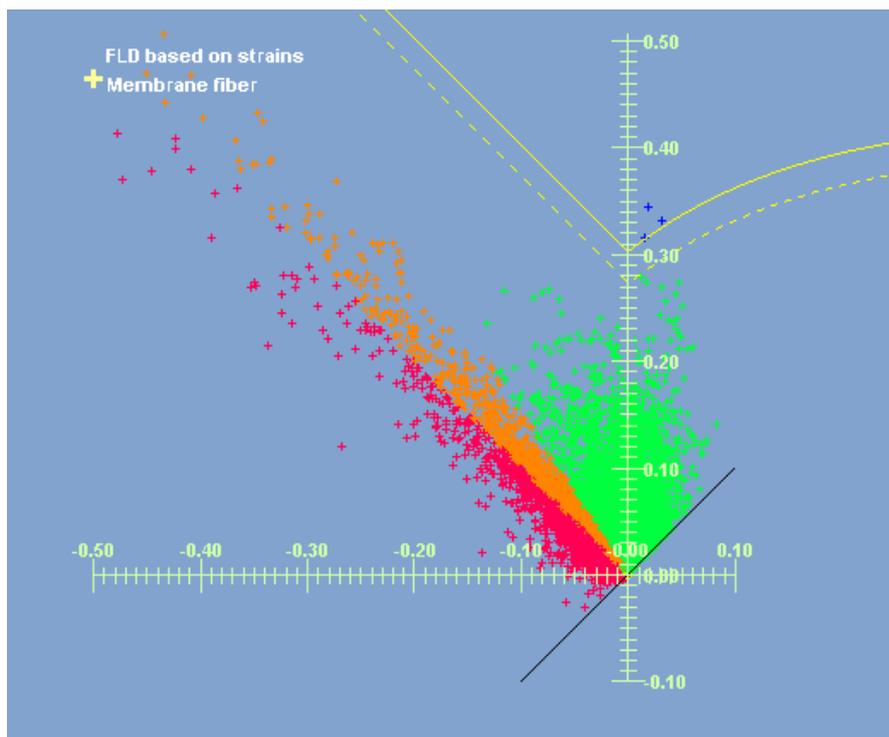


Ilustración 37: Estado tensional con 0,85mm de espesor (FLD)

7.3.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Las gráficas FLD evidencian un mejor comportamiento a medida que el espesor de la chapa va creciendo. Gran parte de los puntos de rotura alejados de la curva FLC bajan y entran en el área correspondiente al perfecto estiramiento. Paralelamente, el porcentaje de zonas arrugadas se mantiene similar en las tres simulaciones.

La realidad es que, a pesar de un significativo ahorro de peso, las chapas finas quedan débiles frente a los esfuerzos de embutición. Por este motivo, se ha descartado utilizar espesores inferiores o iguales a 0,7mm.

Obviamente chapas gruesas, cercanas al milímetro de espesor, darían mayor rigidez a la pieza. Sin embargo, estas soluciones carecerían de verosimilitud dada la escasa utilización de chapas superiores a 0,9mm en los procesos de conformado de chapa.

En conclusión, optar por un espesor de 0,85mm puede ser un valor de compromiso que por una parte reduce la aparición de roturas y por otra, permite su aplicación en planta.

7.4 FRICCIÓN

El efecto de la lubricación en el contacto entre la chapa y los elementos activos del utillaje se mide mediante el parámetro fricción. Efectivamente, este parámetro debe estar comprendido entre 0 y 1. A continuación, se evaluará el grado de influencia de la variable fricción en la operación de embutición.

7.4.1 $f=0,05$

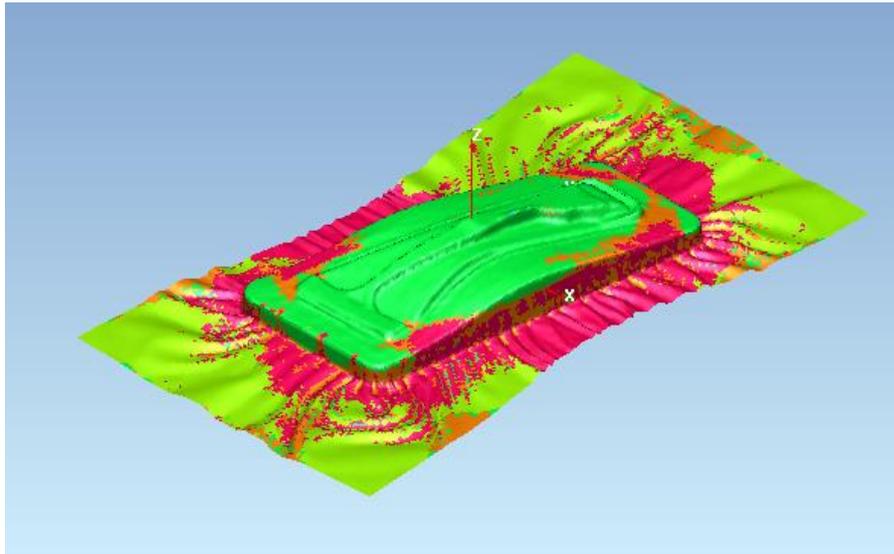


Ilustración 38: Estado tensional con $f=0,05$ (vista isométrica)

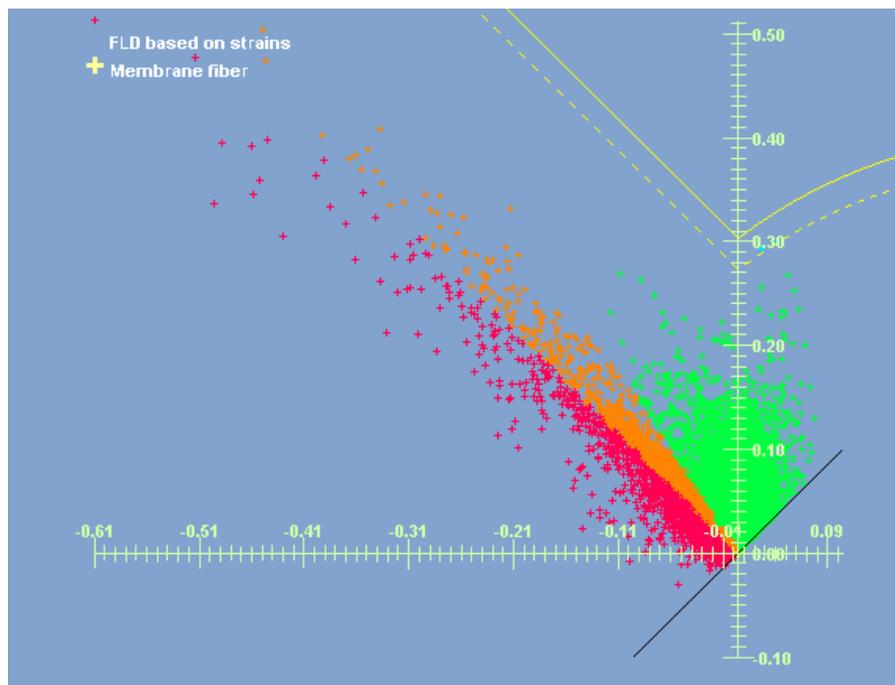


Ilustración 39: Estado tensional con $f=0,05$ (FLD)

7.4.2 $f= 0,12$

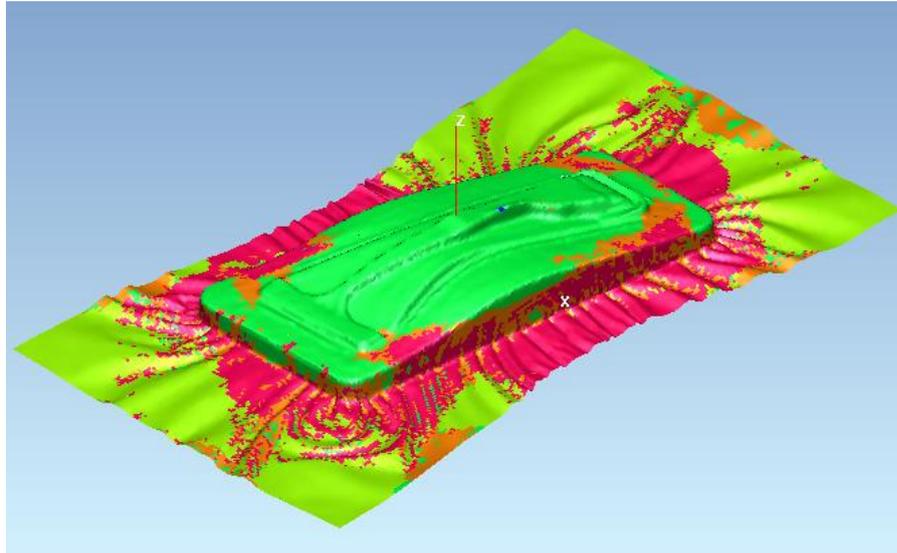


Ilustración 40: Estado tensional con $f=0,12$ (vista isométrica)

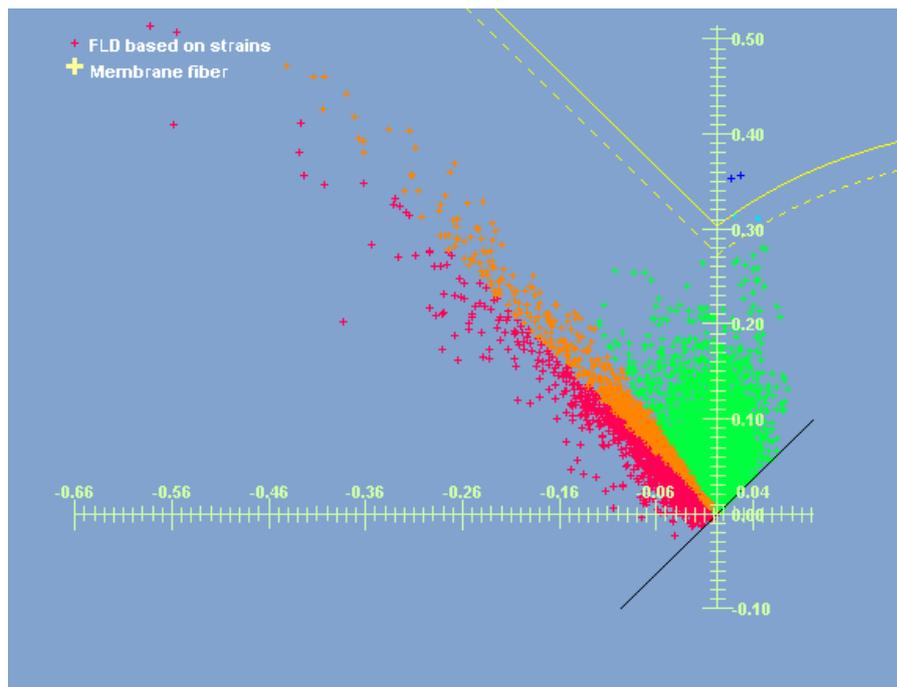


Ilustración 41: Estado tensional con $f=0,12$ (FLD)

7.4.3 $f=0,20$

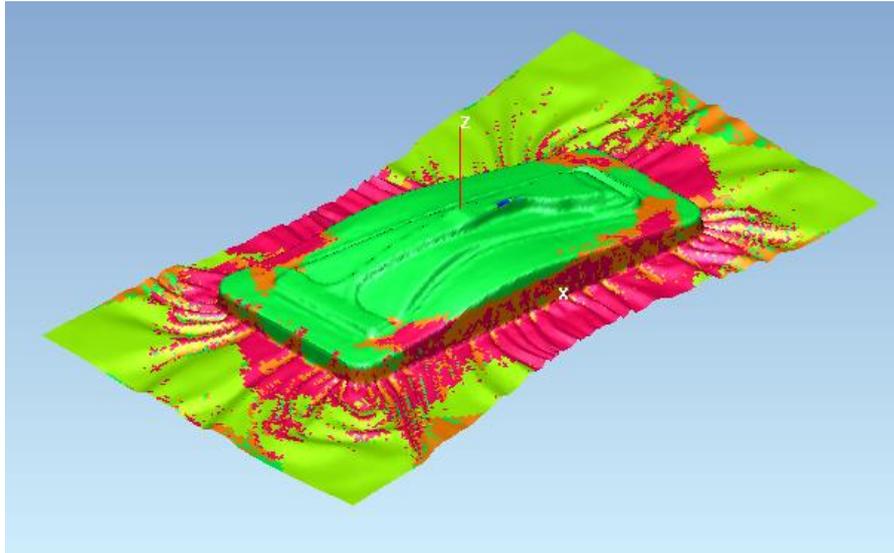


Ilustración 42: Estado tensional con $f=0,20$ (vista isométrica)

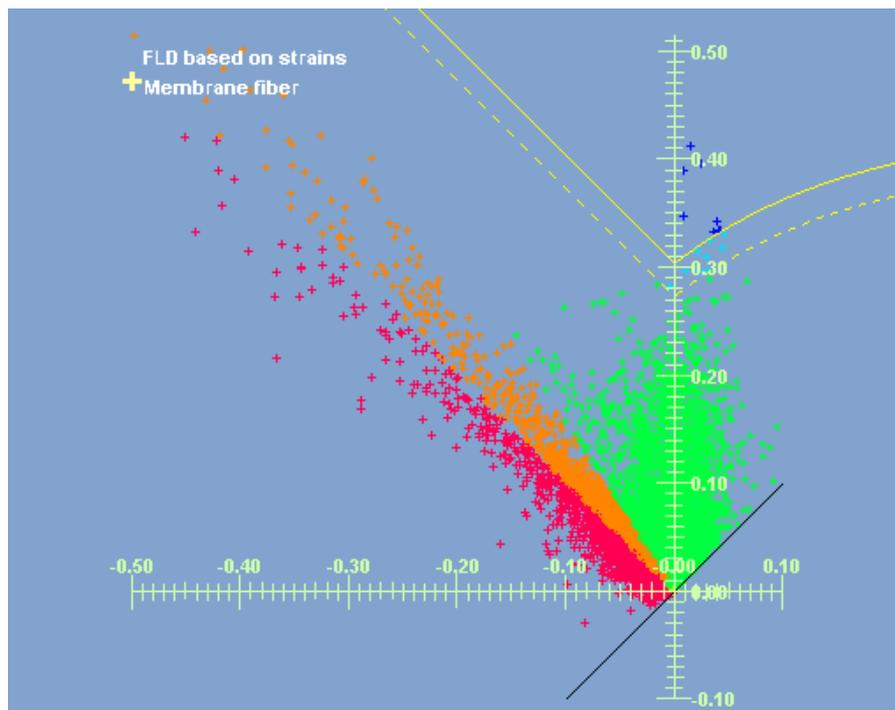


Ilustración 43: Estado tensional con $f=0,20$ (FLD)

7.4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como era de esperar un menor coeficiente de rozamiento es sinónimo de una mejor fluencia del material. De forma contraria a lo que ocurre con el espesor, valores crecientes de fricción llevan los puntos verdes cercanos a la curva FLC por encima de esta frontera, aumentando así el número de nodos de la malla que fallan por rotura. Por el contrario, no se observan diferencias significativas en lo que a las arrugas se refiere.

En principio, dada la nula existencia de roturas, decantarse por un coeficiente de fricción igual a 0,05 sería la decisión más ventajosa. No obstante, debido a la dificultad para conseguir lubricaciones tan exigentes es aconsejable definir una fricción igual a 0,12.

7.5 FRENOS

En la modelización mediante el programador gráfico CAD del pilar B ya se incluyó un freno perimetral para reducir al máximo la aparición de pliegues en el seno de la pieza embutida. Ahora bien, tal y como se ha podido observar en los apartados previos, existen algunas zonas críticas, susceptibles de arrugarse, que se ubican muy próximas al área de chapa correspondiente a lo que posteriormente será el pilar B en cuestión. De aquí se deduce el interés en introducir un nuevo conjunto de frenos para alejar estas zonas críticas del seno de la pieza embutida.

La imagen inferior es una foto representativa de las zonas críticas citadas en este punto.

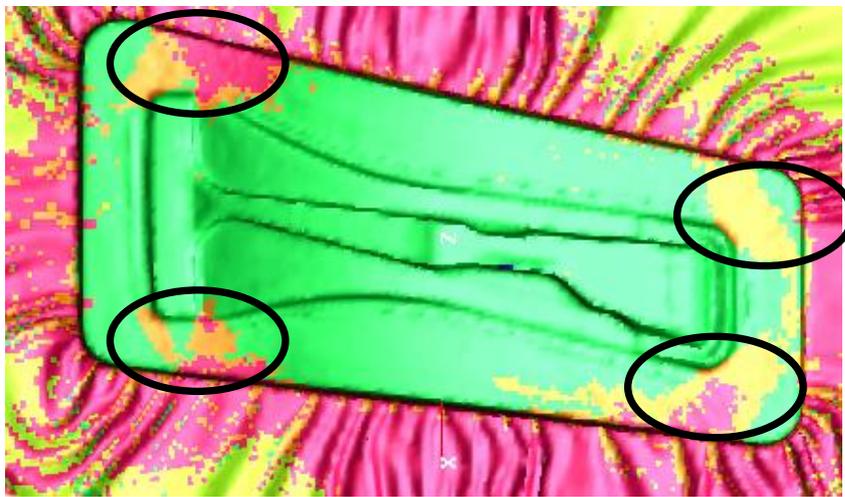


Ilustración 44: Zonas críticas de arrugas

Atendiendo a la localización de las zonas críticas, una posible solución para la disposición de los frenos adicionales sería la siguiente.

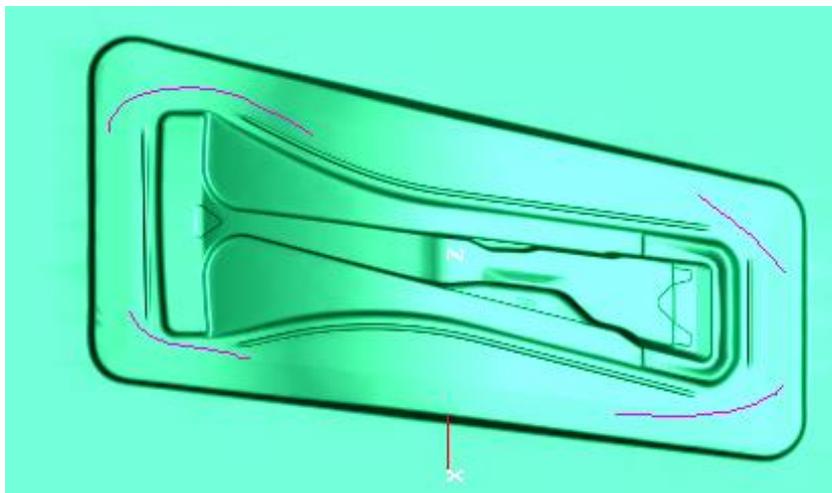


Ilustración 45: Frenos adicionales

El módulo *Drawbeads* de Pam-Stamp nos ofrece la posibilidad de efectuar esta tarea. Naturalmente, la longitud y la posición de estos nuevos obstáculos al flujo de material vienen predeterminadas por la ubicación y la extensión de las arrugas a eliminar. Igualmente, la geometría es una variable fija, pues se seleccionarán unas formas similares a las que se utilizaron para el freno perimetral inicial con el propósito de dotar a la superficie de la matriz de cierta homogeneidad. La opción a considerar ocupa la posición primera, en el siguiente cuadro resumen de las distintas geometrías seleccionables.

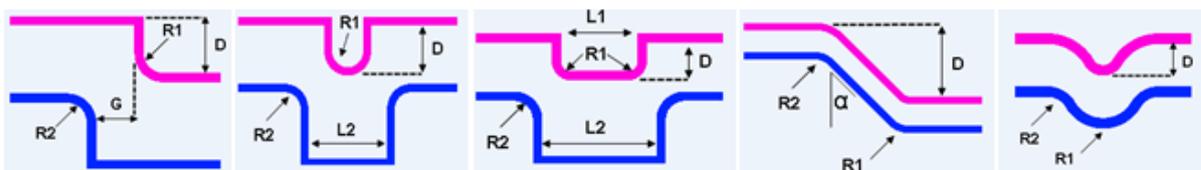


Ilustración 46: Posibles geometrías del freno

Por ende, en este apartado solamente se revisará el efecto de una mayor o menor retención característica de los frenos. En la práctica, esta propiedad se modifica desplazándonos a lo largo de la gráfica expuesta a continuación. En líneas generales, en ella se representan los valores del radio de curvatura del freno ($R1$) frente a la fuerza de fricción en dicho tramo (Fr y Fo).

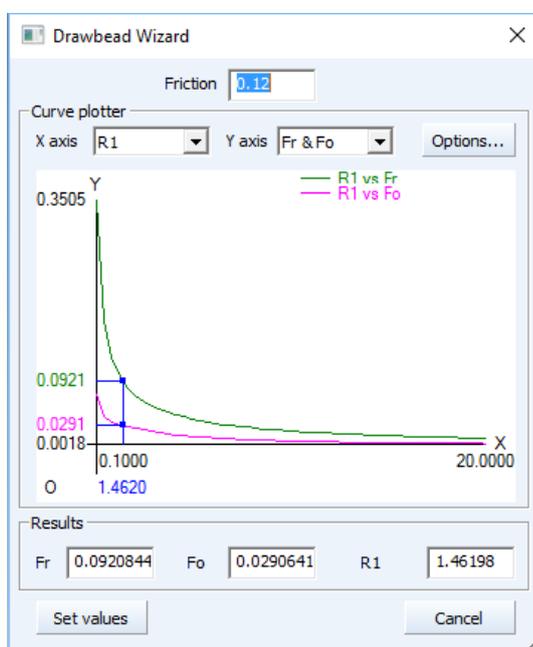


Ilustración 47: Gráfica representativa de un freno cualquiera

Dado que el radio de curvatura es un parámetro más fácil de concebir que la fuerza de fricción se ilustrarán los resultados alcanzados para distintas simulaciones con valores de $R1$ decrecientes. En otras palabras, nos desplazaremos sobre el eje X y no el eje Y.

7.5.1 R1= 2,67mm

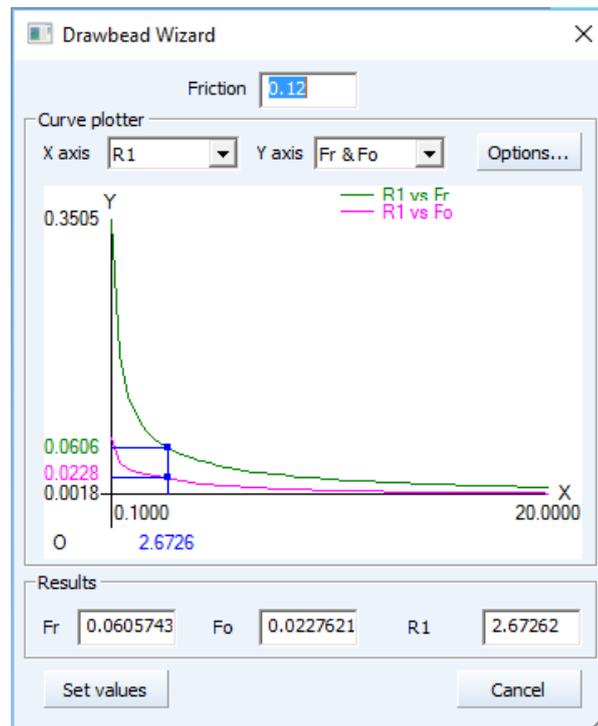


Ilustración 48: Gráfica representativa del freno de R1=2,67mm

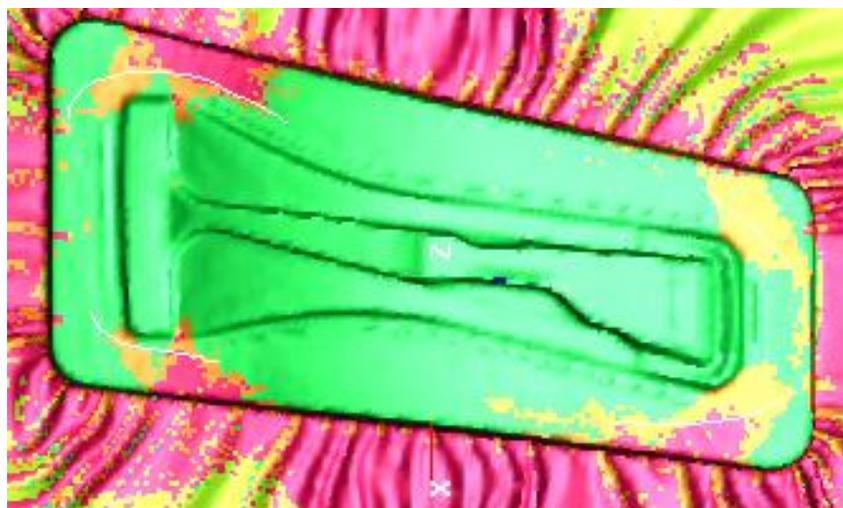


Ilustración 49: Estado tensional con freno de R1=2,67mm (plano YX)

7.5.2 R1= 0,85mm

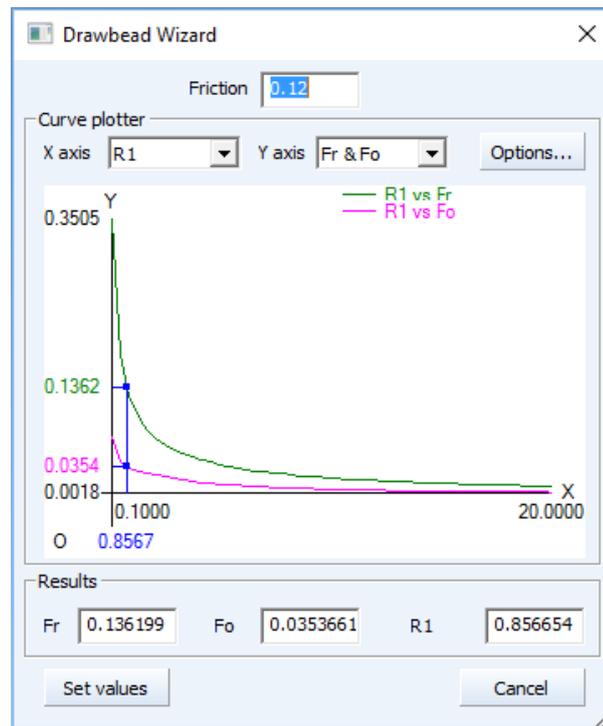


Ilustración 50: Gráfica representativa del freno de R1=0,85mm

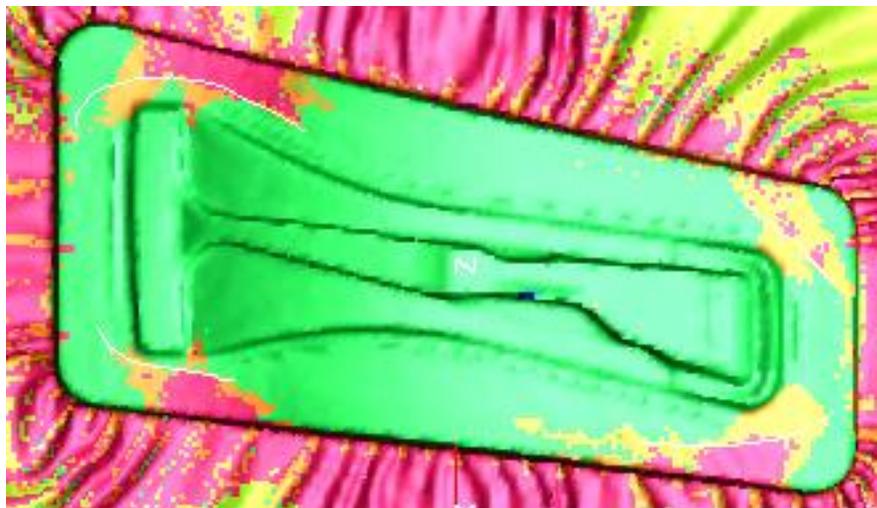


Ilustración 51: Estado tensional con freno de R1=0,85mm (plano YX)

7.5.3 R1= 0,32mm

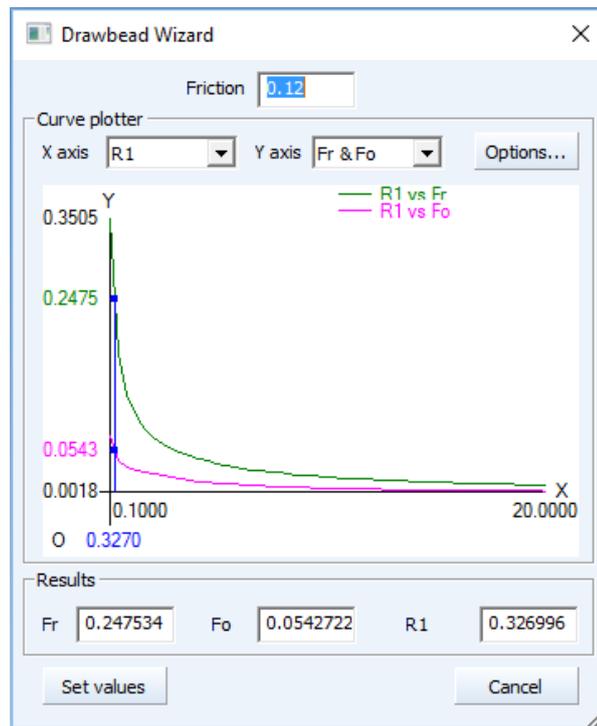


Ilustración 52: Gráfica representativa del freno de R1=0,32mm

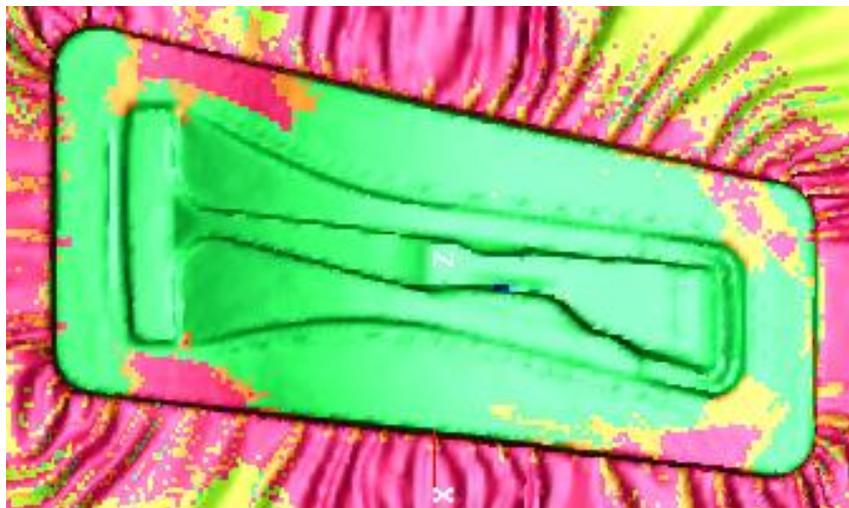


Ilustración 53: Estado tensional con freno de R1=0,32mm (plano YZ)

7.5.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Atendiendo a las imágenes que recogen los estados tensionales de la pieza embutida según el eje Z, minimizar el radio de curvatura del freno favorece la no penetración de arrugas en el pilar B. De hecho, un menor radio se traduce en un mayor obstáculo; ello obliga a la chapa a estirarse más violentamente para sortear estas zonas de la matriz. Además, en nuestra pieza objeto de estudio este mayor estiramiento de la chapa no acarrea un imaginable aumento de los puntos de rotura.

Con todos estos datos en la mano, se seleccionará un freno caracterizado por un radio de curvatura R1 igual a 0,32mm.

7.6 FUERZA DEL PISADOR

El estudio de la influencia de las variables críticas que participan en el trabajo de embutición finaliza con la fuerza del pisador. A fin de proveer a este último análisis de carácter general, se ha optado por evaluar la respuesta del material frente a tres esfuerzos ordinarios, 25N, 50N y 100N. Dada la importancia de dicho parámetro de embutición, se informa de la gran carga fotográfica adjuntada en este apartado, que hará especial hincapié en aquellas zonas tendentes a la rotura.

7.6.1 F= 25N

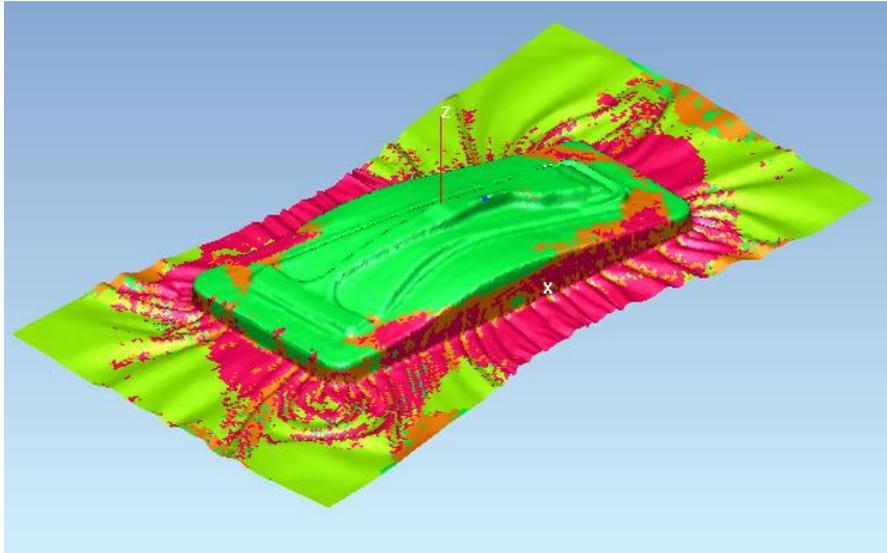


Ilustración 54: Estado tensional con F=25N (vista isométrica)

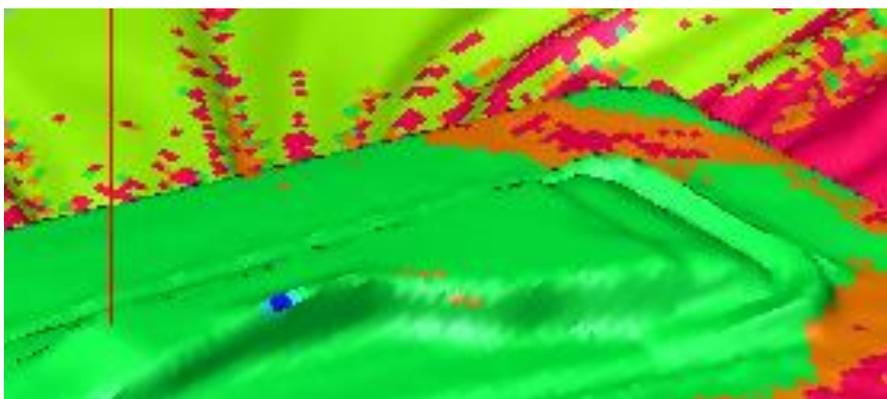


Ilustración 55: Zona de rotura con F=25N

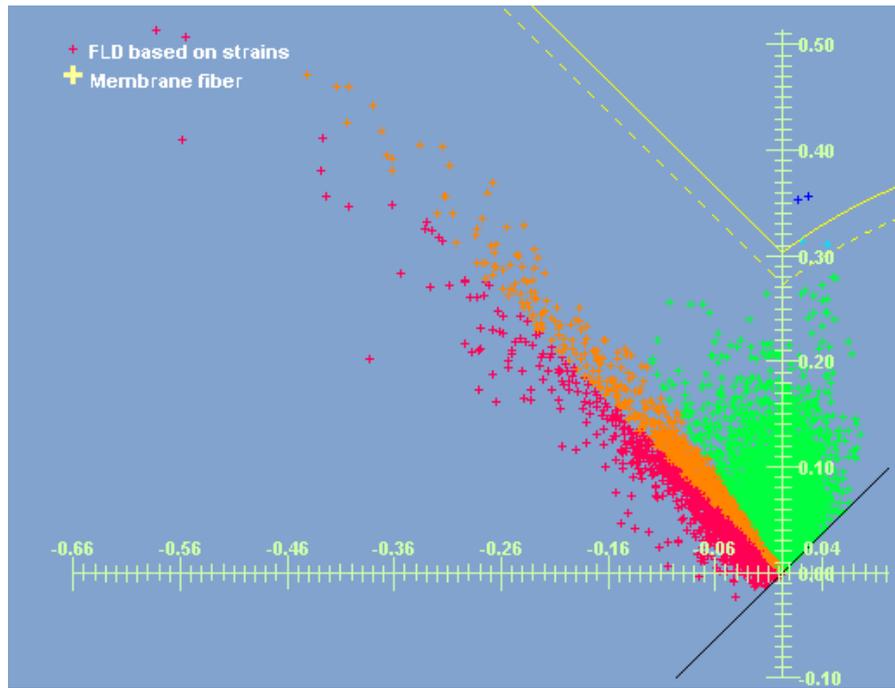


Ilustración 56: Estado tensional con F=25N (FLD)

7.6.2 F= 50N

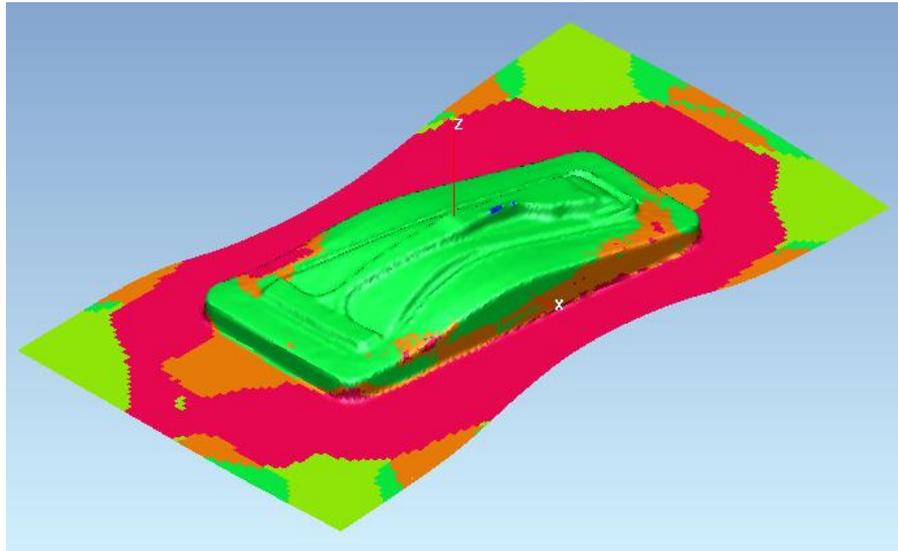


Ilustración 57: Estado tensional con F=50N (vista isométrica)

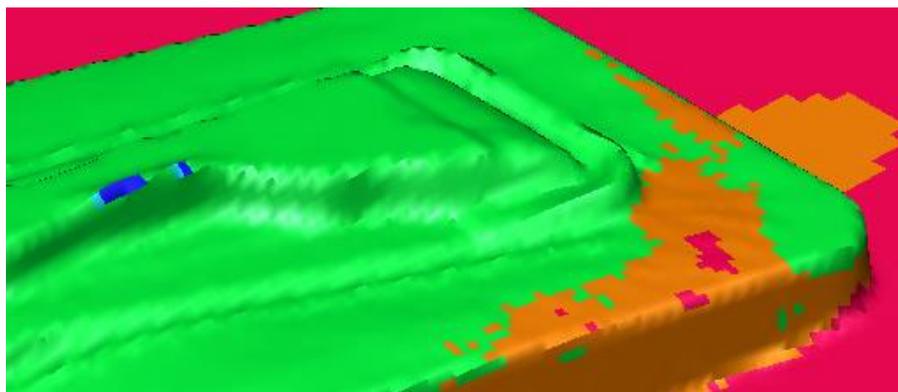


Ilustración 58: Zona de rotura con F=50N

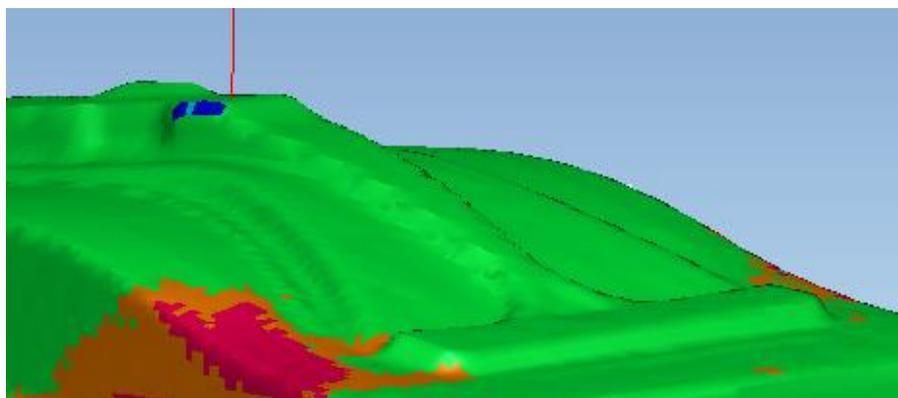


Ilustración 59: Zona de rotura con F=50N

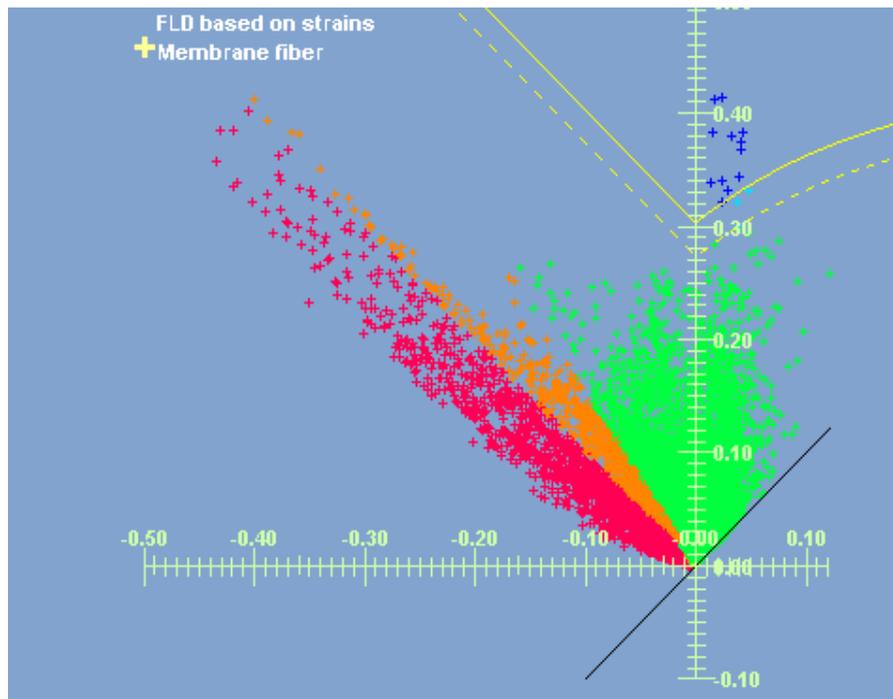


Ilustración 60: Estado tensional con F=50N (FLD)

7.6.3 F= 100N

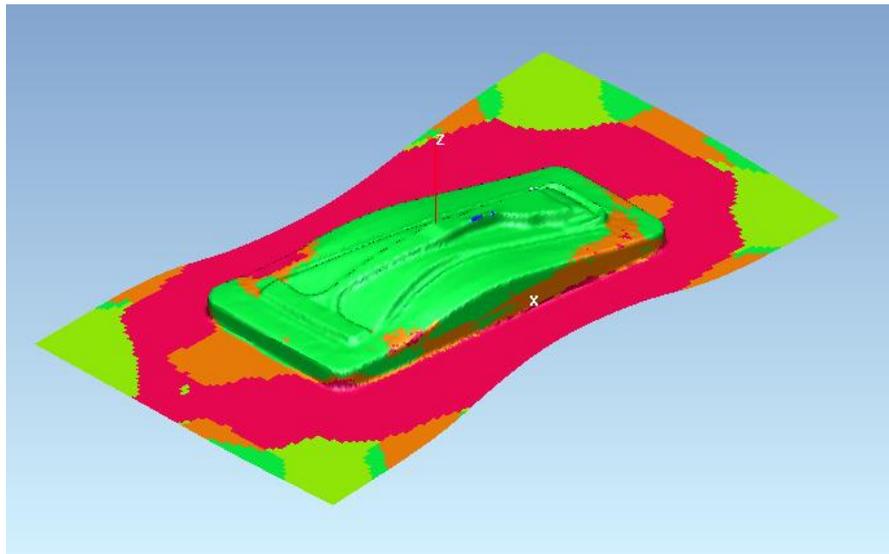


Ilustración 61: Estado tensional con F=100N (vista isométrica)

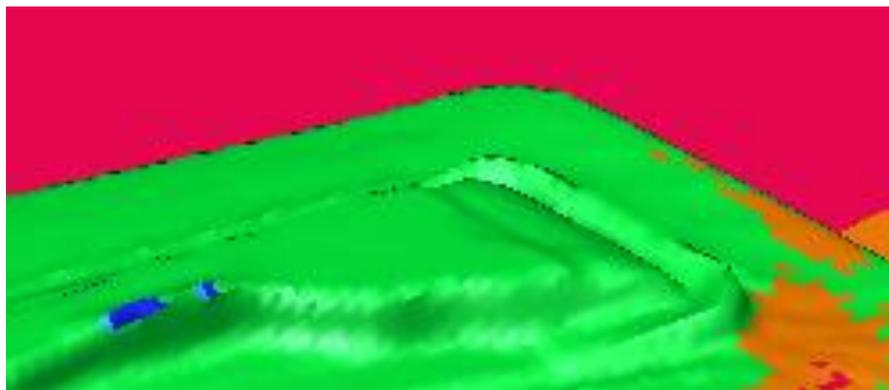


Ilustración 62: Zona de rotura con F=100N

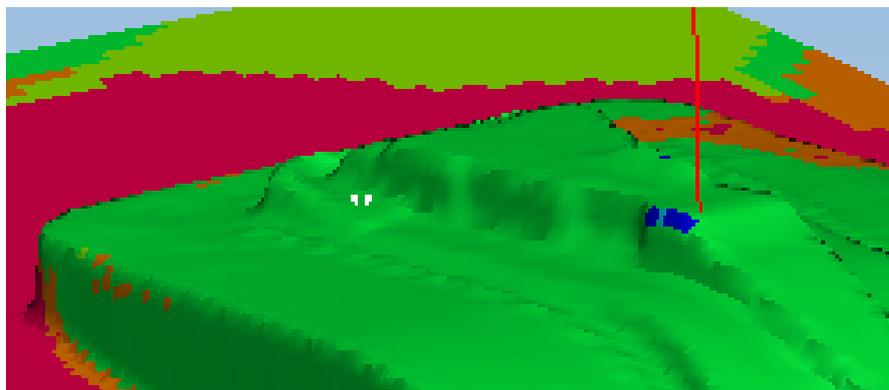


Ilustración 63: Zona de rotura con F=100N

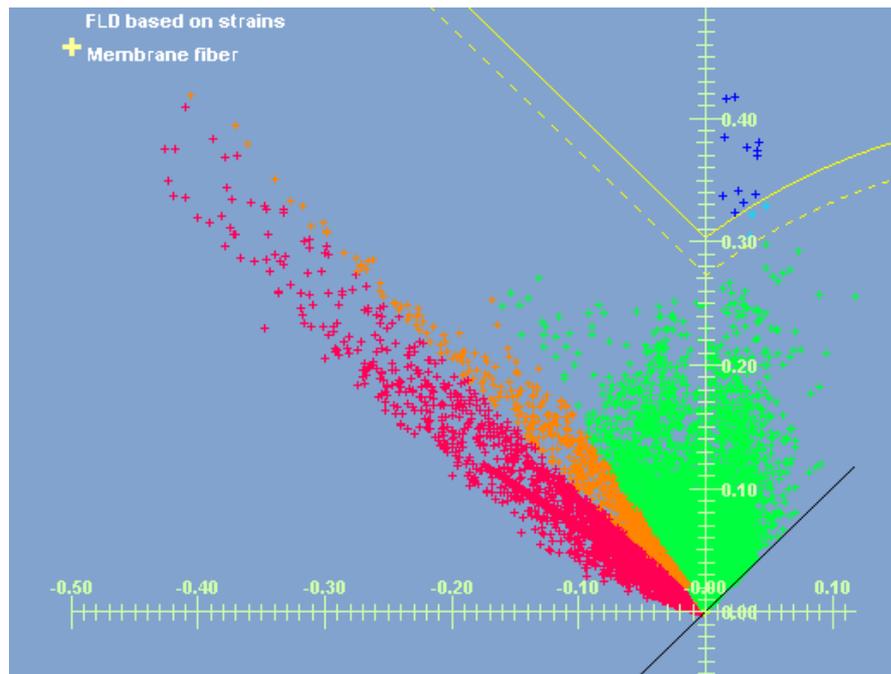


Ilustración 64: Estado tensional con F=100N (FLD)

7.6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De acuerdo con el reportaje fotográfico mostrado, valores crecientes de la fuerza de embutición tienen un efecto positivo sobre la proporción de color verde en el estado tensional de la pieza final. Asimismo, la gran diferencia entre la simulación realizada con 25N y las otras dos, 50N y 100N, reside en la prácticamente nula presencia de roturas. Esta última observación hace decantar la balanza a favor de la fuerza de 25N en lo que a esfuerzo del pisador se refiere.

8 DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS

Las tareas que constituyen el estudio de la simulación de la embutición de una pieza del automóvil se recogen en este punto.

- Selección de la pieza a simular: selección de una pieza representativa del automóvil convencional que esté estrechamente ligada a los procesos de conformado de chapa. Naturalmente, puertas o aletas satisfacen ambos requisitos, pero se ha optado por trabajar con una pieza estructural, el pilar B, debido a su relevancia en la seguridad de los ocupantes del habitáculo. Asimismo, se informa que esta primera tarea también incluye la inmediata obtención del modelo en CAD del pilar B, pues el profesorado del departamento dispone de una amplia colección de piezas ya modeladas gráficamente. El alumno invertirá tres días en seleccionar la pieza a simular.
- Diseño de las herramientas de estampación: definición de la geometría de matriz, punzón y pisador mediante el programa Pam-Stamp. Tomando como referencia el CAD de la pieza seleccionada en la tarea anterior, se reproducirán automáticamente las mismas formas para el troquel. De esta manera, el trabajo del ingeniero se limitará a generar un correcto sistema de referencia y a fijar un valor coherente para la distancia relativa entre matriz y pisador. Por el contrario, la definición del addendum óptimo se encarará en tareas posteriores. El alumno invertirá 1 día en esta fase de diseño.
- Identificación de las variables críticas en el proceso de embutición: análisis teórico de la operación embutición en su totalidad como punto de partida para detectar aquellos parámetros modificables por el ingeniero en Pam-Stamp. El alumno invertirá 2 días en esta labor formativa.
- Obtención y análisis de los resultados: tarea que consiste en simular el trabajo de embutición para diferentes valores de las variables identificadas previamente. En función de los estados tensionales y la deformación de la pieza final, se determinará la magnitud exacta de citadas variables. El alumno invertirá 40 días en realizar las simulaciones y evaluar su validez.
- Gestión de proyecto: conjunto de tareas necesarias para ejecutar tanto la redacción del TFG como las tareas citadas con anterioridad. En ese sentido han sido vitales la recopilación y búsqueda de información, la comunicación con la profesora o la formación en el programa Pam-Stamp. La gestión de proyecto abarcará la totalidad

del TFG, desde planificación hasta entrega, estimándose su duración en 65 días de trabajo.

Llegados a este punto, cabe destacar la necesaria supervisión de las tareas segunda y cuarta por parte de la tutora de este trabajo. Este control se representa en forma de hitos, los cuales se han designado según los términos validación diseño herramientas y validación resultados.

8.1 DIAGRAMA DE GANTT

La secuencia de las diferentes tareas se muestra en el siguiente diagrama de Gantt. Para una fecha de inicio igual al 25 marzo de 2019, se ha fijado una fecha de finalización igual al 26 de junio, lo que supondría un total de 60 días laborables dentro del calendario académico.

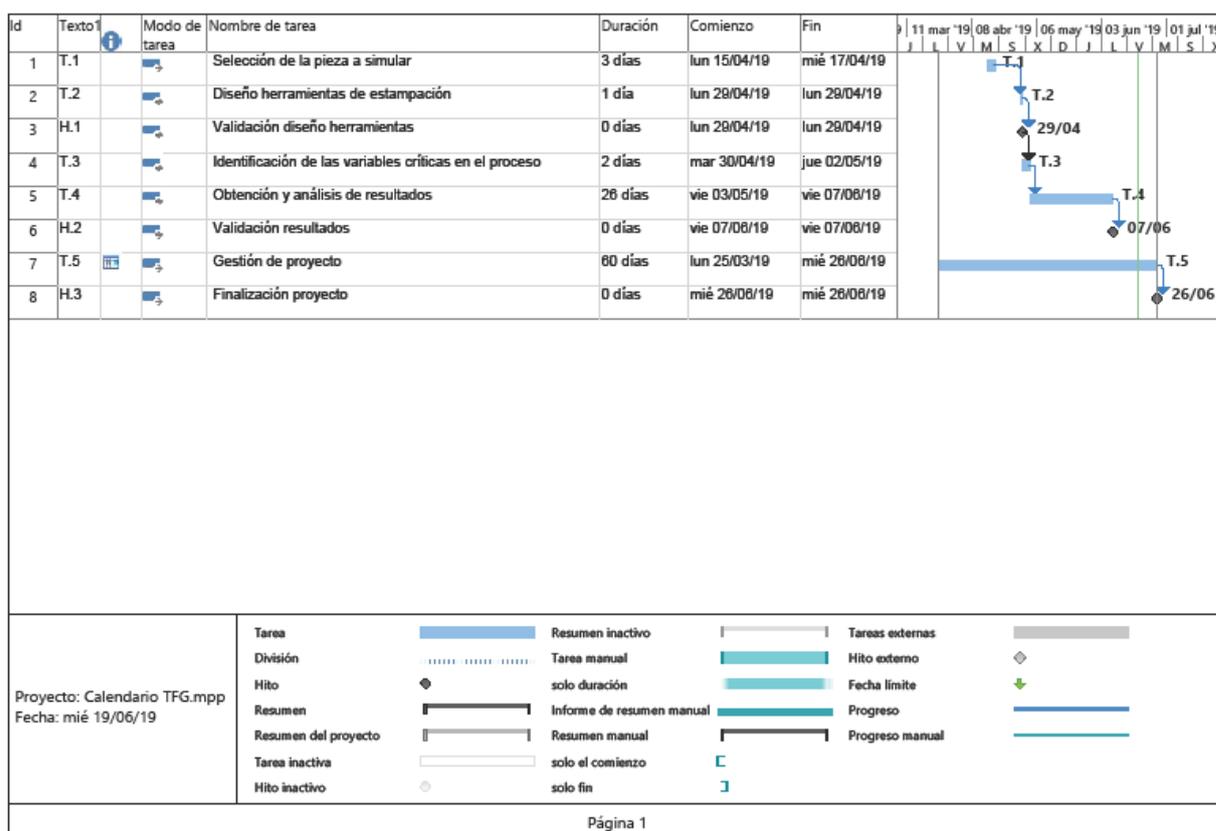


Ilustración 65: Diagrama de Gantt

9 ANÁLISIS DE COSTES

La valoración de la viabilidad económica de simular la embutición del pilar B de un automóvil se apoyará en el análisis de los costes que han aparecido en el transcurso de este trabajo.

La primera partida de costes se corresponde con las horas internas, las cuales se han dividido según los conceptos ingeniero sénior e ingeniero junior. De esta manera, se diferencia el trabajo realizado por los profesores de la universidad del tiempo invertido por el alumnado.

	Nº HORAS	TASA HORARIA (€/h)	COSTE TOTAL
Ingeniero sénior	15	40	600 €
Ingeniero junior	200	24	4.800 €
Total			5.400 €

Tabla 8: Horas internas

La segunda partida de costes se corresponde con las amortizaciones, esto es, todos aquellos recursos empleados en el TFG pero que no están exclusivamente destinados a tal fin. La vida útil de dichas unidades es mayor a la duración de este trabajo y, por consiguiente, se pueden seguir utilizando una vez finalizado el mismo.

En este trabajo, los ordenadores y las licencias de los programas serán las unidades a amortizar. Multiplicando la tasa horaria de cada unidad por el tiempo que se han utilizado en este estudio se calculará el coste de las mismas. Para la obtención de la tasa horaria, cociente entre la inversión realizada y la vida útil, se han fijado las horas laborales anuales en 1700.

	INVERSIÓN (€)	VIDA ÚTIL (años)	TIEMPO DE USO (h)	TASA HORARIA (€/h)	COSTE TOTAL
Ordenador	750	5	200	0,09	17,65 €
Licencia Office	110	1	120	0,06	7,76 €
Licencia Project	280	1	5	0,16	0,82 €
Licencia Pam-Stamp	2000	1	75	1,18	88,24 €
Total					114,47 €

Tabla 9: Amortizaciones

La suma de ambas partidas da un coste total de **5514,47€**. Esta cifra es significativamente inferior al gasto que entrañaría desechar y diseñar un nuevo troquel en caso de haber decidido ensayar la embutición directamente en planta. De hecho, si se hubiese encarado el trabajo por esta vía alternativa se habría logrado un ahorro en lo que a ordenadores y

licencias se refiere, pero con el inconveniente, entre otros, de un aumento del personal cualificado. En consecuencia, el coste total del proyecto se vería elevado dado el gran porcentaje de la partida horas internas en el montante total.

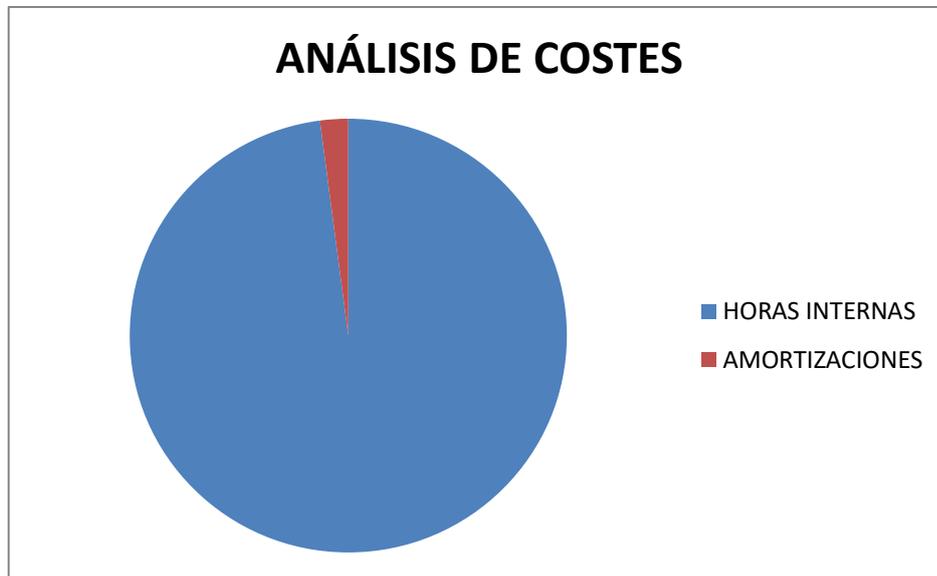


Ilustración 66: Análisis de costes

10 CONCLUSIONES

El estudio de la simulación de la embutición del pilar B del automóvil concluye con un breve resumen de las ideas más importantes que se han comentado a lo largo del mismo.

- En un contexto del sector de la automoción marcado por la prohibición del diésel y la inminente llegada del coche eléctrico, se prevén grandes cambios en las líneas de producción, y por tanto, una previsible inversión en nuevos troqueles utilizados para los procesos de conformado de chapa.
- La adaptación a estas nuevas tendencias en el mundo del motor, hace más necesario que nunca el empleo de programas de simulación. En ese sentido, el software Pam-Stamp permite diseñar las herramientas de embutición y ensayar virtualmente la operación.
- Existe un interés técnico y financiero en simular la embutición del pilar B en cuestión antes de su directa fabricación en planta. Por una parte, la posibilidad de repetir infinitas veces la operación permite conocer más en profundidad el proceso y la influencia de las variables críticas que participan en él. Por otra parte, predecir la respuesta del material de chapa sin la necesidad de realizar pruebas en prototipos supone un significativo ahorro económico.
- El análisis de la embutición desde un prisma teórico facilita la identificación de las citadas variables críticas. Se ha contabilizado un total de seis: forma del addendum, material de chapa, espesor de chapa, fricción, frenos y fuerza del pisador.
- La evaluación de los resultados obtenidos para diferentes valores de las variables críticas, permite conocer el valor óptimo de las mismas. Atendiendo a los estados tensionales de la pieza embutida, analizando la deformación de la chapa y calculando la recuperación elástica del material, se ha conseguido diseñar una correcta embutición del pilar B, sin arrugas ni roturas que invaliden la operación, para la siguiente combinación de valores.

VARIABLE CRÍTICA	Forma del addendum	Material de chapa	Espesor de chapa	Fricción	Frenos	Fuerza del pisador
VALOR ÓPTIMO	Standard	Acero al carbono AP04	e= 0,85mm	f= 0,12	R1= 2,67mm	F= 25N

Tabla 10: Resultados de las simulaciones

- El poco tiempo requerido para diseñar la primera embutición del pilar B, 60 días laborables, y los reducidos costes involucrados, 5514,47€, justifican la realización del estudio de la simulación de la embutición del pilar B antes de su fabricación en planta.

11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Merca2. *La automoción, el motor imparable de la economía español*. Septiembre 2018, España. Disponible en World Wide Net:
<https://www.merca2.es/motor-economia-espanola/>
- [2] ABC. Motor. *Radiografía de la automoción en España 2018*. Junio 2018, España. Disponible en World Wide Net:
https://www.abc.es/motor/abci-radiografia-automocion-espana-2018-201804270112_noticia.html
- [3] El País. Motor. *Este es el último récord mundial del automóvil*. Mayo 2018, España. Disponible en World Wide Net:
<https://motor.elpais.com/actualidad/el-ultimo-record-mundial-del-automovil/>
- [4] CincoDías. Compañías. *La industria del automóvil en la UE se juega 38.000 millones de euros en aranceles*. Julio 2018, España. Disponible en World Wide Net:
https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/07/06/companias/1530873248_021546.html
- [5] BizkaiaTalent. ¿Por qué País Vasco? Apuesta de futuro. *El sector de la automoción, estratégico en la economía vasca*. Diciembre 2016, España. Disponible en World Wide Net: <https://www.bizkaiatalent.eus/pais-vasco-te-espera/apuesta-de-futuro/automocion-estrategico-economia/>
- [6] El Economista. Autonomías. Euskadi. *La automoción vasca prevé crecer un 7% en 2018*. Abril 2018, España. Disponible en World Wide Net:
https://www.eleconomista.es/pais_vasco/noticias/9081641/04/18/La-automocion-vasca-preve-crecer-un-7-en-2018.html
- [7] Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU. “Tema 6: Conformado de Chapa” en *Tecnologías de Fabricación y Tecnología de Máquinas*. Disponible en la Biblioteca de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.
- [8] Autoform. Glosario. Frenos. Consultado en mayo 2019. Disponible en World Wide Net:
<https://www.autoform.com/es/glosario/frenos/>
- [9] Instituto de Formación Profesional a Distancia. DPMCM03 – Procesos de corte y conformado. Consultado en abril 2019. Disponible en World Wide Net:
https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM03/es_PPFM_DPMCM03_Contenidos/website_41_descripcin_del_proceso.html
- [10] Autoform. Glosario. Simulación de conformado de metal. Consultado en marzo 2019. Disponible en World Wide Net:
<https://www.autoform.com/es/glosario/simulacion-de-conformado-de-metal/>

- [11] Colorado Rodríguez, Javier (2008). Análisis de las características de los modelos de material recomendados para la simulación de procesos de embutición de chapa de acero. Proyecto Final de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Madrid. Disponible en World Wide Net:
<https://core.ac.uk/download/pdf/30044571.pdf>
- [12] Dos Santos Travassos, André Felipe (2016). *Springback prediction in multi-step stamping processes*. Proyecto Final de Carrera. Universidad de Coimbra. Disponible en World Wide Net:
https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36914/1/Tese_MIEM_2016_Andre_Travassos_VFINAL_02_08_16.pdf