



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2016 / 2017

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE ESTAMPACIÓN DE UNA PIEZA DE CHASIS DE AUTOMÓVIL

DOCUMENTO 3: MEMORIA

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE NAHIKARI

APELLIDOS GARAYO BLÁZQUEZ

FDO.:

FECHA: 7-09-2017

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE ROBERTO

APELLIDOS LOBATO GONZÁLEZ

DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA: 7-09-2017

DOCUMENTO 3: MEMORIA

3.1. Índice de la memoria

ÍNDICE DE CONTENIDO

3.2. Definición de términos básicos	9
3.2.1. Definiciones	9
3.2.2. Abreviaturas	10
3.3. Descripción del problema.....	11
3.3.1. Introducción	11
3.3.2. Geometría de la pieza bajo estudio	13
3.3.3. Objetivos	16
3.3.4. Alcance.....	16
3.3.5. Aspectos prácticos.....	17
3.4. Antecedentes	18
3.5. Estudio de alternativas.....	18
3.6. Solución adoptada	19
3.6.1. Marco teórico	19
3.6.1.1. Estampación de chapa	19
3.6.1.2. Caracterización de material.....	22
3.6.2. Marco metodológico	30
3.6.3. Técnicas y métodos	32
3.6.3.1. Proceso de conformado	32
3.6.3.2. Configuración del modelo de simulación	36
3.6.3.3. Configuración de la carta de material	49
3.6.3.4. Parámetros para el análisis de robustez de proceso	59
3.6.4. Procesamiento de datos	66
3.7. Resultados y conclusiones.....	68

3.7.1. Resultado de factibilidad en condiciones nominales.....	68
3.7.2. Resultados de factibilidad bajo análisis de robustez de proceso	69
3.7.3. Conclusiones del estudio	84
3.8. Propuesta técnica	85
3.9. Valoraciones generales y líneas futuras	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de localización del chasis.....	11
Figura 2. Componentes circundantes a un brazo inferior de control	11
Figura 3. Relación resistencia-conformabilidad de distintas familias de aceros	12
Figura 4. Vista isométrica posterior del brazo inferior de control bajo estudio	13
Figura 5. Vista isométrica lateral del brazo inferior de control bajo estudio.....	13
Figura 6. Vista isométrica frontal del brazo inferior de control bajo estudio.....	14
Figura 7. Espesor de la pieza	14
Figura 8. Puntos de anclaje de la pieza	15
Figura 9. Zona del abocardado	15
Figura 10. Zona del “Tokyo-bay”	16
Figura 11. Abocardado	20
Figura 12. Componentes principales en una prensa de doble efecto	20
Figura 13. Línea de prensas	21
Figura 14. Prensa transfer	21
Figura 15. Desarrollo de una pieza en un troquel progresivo	22
Figura 16. Esquemático de la deformación de un sólido bajo una carga.....	23
Figura 17. Curva de tensión-deformación	24
Figura 18. Estadios durante el ensayo de tracción.....	25
Figura 19. Representación de Bulge test	26
Figura 20. Laminación de chapa.....	27
Figura 21. Diagrama de conformabilidad	28
Figura 22. Regiones de diagrama de conformabilidad	28
Figura 23. Ensayo con punzón semiesférico	29
Figura 24. Diferentes probetas para caracterizar la FLC	29
Figura 25. Diagrama general del estudio	30
Figura 26. Proceso de conformado de la pieza	32
Figura 27. Proceso transfer	33
Figura 28. Herramientas y malla de OP20 - Estampado.....	33
Figura 29. Herramientas y malla de OP30/40 – Corte I/II.....	34
Figura 30. Herramientas y malla de OP50 - Abocardado.....	34
Figura 31. Herramientas y malla de OP60 - Doblado.....	35
Figura 32. Herramientas y malla de OP70 - Corte	35
Figura 33. Visualización general PAM-STAMP	36
Figura 34. Importación de geometrías y curvas a PAM-STAMP.....	36

Figura 35. Creación de operaciones en PAM-STAMP.....	37
Figura 36. Configurador del modelo en PAM-STAMP	37
Figura 37. Configurador de herramientas en PAM-STAMP	38
Figura 38. Configuración de <i>inverse</i> en PAM-STAMP	39
Figura 39. Resultado de perfil de cálculo <i>inverse</i> en PAM-STAMP.....	39
Figura 40. Configuración de formato en PAM-STAMP	40
Figura 41. Mallado del formato inicial de la pieza	41
Figura 42. Configuración de cortes adicionales al formato en PAM-STAMP.....	41
Figura 43. Elección de material en PAM-STAMP.....	42
Figura 44. Configuración de atributos en PAM-STAMP	43
Figura 45. Atributos para punzón en OP20-Estampado	43
Figura 46. Atributos para matriz en OP20-Estampado.....	44
Figura 47. Atributos para pilotos localizadores en OP20-Estampado	44
Figura 48. Atributos para formato	44
Figura 49. Atributos generales.....	45
Figura 50. Atributos para <i>springback</i> de chapa	45
Figura 51. Atributos para configuración de corte de chapa en OP30/40.....	46
Figura 52. Configuración detallada del corte en OP30/40.....	46
Figura 53. Atributos para pisador en OP50-Pisado	47
Figura 54. Comprobación de errores en PAM-STAMP	47
Figura 55. Configuración de cálculo en PAM-STAMP	48
Figura 56. Designación según estándar para aceros Complex Phase	49
Figura 57. Propiedades mecánicas aceros Complex Phase.....	49
Figura 58. Curvas de tensión-deformación ingenieril y real	50
Figura 59. Región plástica de la curva de tensión-deformación real.....	50
Figura 60. Módulo elástico del material	51
Figura 61. Características elásticas del material CP800	51
Figura 62. Curvas de endurecimiento según modelos matemáticos.....	52
Figura 63. Detalle de curvas de endurecimiento según modelos matemáticos	53
Figura 64. Valores de parámetros de modelos matemáticos de endurecimiento.....	53
Figura 65. Comparativa entre modelos Krupkowsky y Hockett-Sherby.....	54
Figura 66. Introducción de modelo de endurecimiento elegido en PAM-STAMP ...	54
Figura 67. Introducción de variables del modelo en PAM-STAMP	55
Figura 68. Visualización de la curva de endurecimiento modelizada	55

Figura 69. Introducción de valores de anisotropía y tensión de fluencia en PAM-STAMP	56
Figura 70. Diagrama y valores de FLC.....	56
Figura 71. Creación de nueva FLC en PAM-STAMP	57
Figura 72. Visualización de la FLC en PAM-STAMP.....	57
Figura 73. Resultado final de carta de material en PAM-STAMP	58
Figura 74. Rango garantizado de las propiedades mecánicas para aceros Complex Phase	60
Figura 75. Curvas de máximo y mínimo endurecimiento	60
Figura 76. Reducción del espesor del formato en PAM-STAMP	61
Figura 77. Actualización del criterio de parada para reducción de espesor en PAM-STAMP	62
Figura 78. Configuración de coeficiente de fricción en PAM-STAMP	63
Figura 79. Variación de coeficiente de fricción en atributos de PAM-STAMP.....	63
Figura 80. Contornos de formato para variaciones de simulación PRO_BLK_MIN	64
Figura 81. Líneas de corte para variaciones de simulación PRO_CORT_MAX	65
Figura 82. Criterio de fallo FLC empleado.....	66
Figura 86. Resultados simulación nominal.....	68
Figura 87. Resultados simulación MAT_ENDUR_MAX.....	69
Figura 88. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN	70
Figura 89. Resultados simulación MAT_ESP_MIN	71
Figura 90. Resultados simulación PRO_LUB_MAX.....	72
Figura 91. Resultados simulación PRO_LUB_MIN	72
Figura 92. Resultados simulación PRO_BLK_MIN_1	73
Figura 93. Resultados simulación PRO_BLK_MIN_05	73
Figura 94. Resultados simulación PRO_BLK_MIN_025	74
Figura 95. Resultados simulación PRO_CORT_MAX_1	75
Figura 96. Resultados simulación PRO_CORT_MAX_05	75
Figura 97. Resultados simulación PRO_CORT_MAX_025	76
Figura 98. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_BLK_MIN_05.....	78
Figura 99. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_BLK_MIN_025.....	79
Figura 100. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_CORT_MAX_05	80
Figura 101. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_CORT_MAX_025	80
Figura 102. Resultados simulación 3ª COMBINADA	81
Figura 103. Resultados simulación 4ª COMBINADA	82

Figura 104. Diagrama resumen de valoración de criterio fallo FLC 84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Error de modelos matemáticos respecto a la curva de tensión experimental	53
Tabla 2. Valores de anisotropía y tensión de fluencia para las direcciones de laminación a 0°/45°/90°	55
Tabla 3. Puntos definidos para creación de FLC en PAM-STAMP	57
Tabla 4. Parámetros utilizados en análisis de robustez.....	59
Tabla 5. Codificación de simulaciones independientes de robustez.....	69
Tabla 6. Codificación de simulaciones de robustez combinadas.....	78
Tabla 7. Valores de espesor y FLD de las simulaciones de robustez	76
Tabla 8. Valores de espesor y FLD de las simulaciones de robustez a combinar	77
Tabla 9. Valores de espesor y FLD de las simulaciones de robustez combinadas	83

3.2. Definición de términos básicos

3.2.1. Definiciones

Estampación de chapa: Proceso de transformación en el cual se deforma una chapa mediante un molde o troquel para obtener una geometría determinada.

Chasis: Grupo de componentes del automóvil que sirven de conexión entre las ruedas y la estructura central.

Brazo inferior de control: Componente de chasis situado en el eje delantero del vehículo y que forma parte del tipo de suspensión McPherson, soportando la mangueta de la rueda por la parte inferior.

Conformabilidad: Capacidad del material para ser deformado sin que se dé el fallo.

Fallo: El fallo en la pieza durante el conformado se puede dar mediante grietas, arrugas, estricción localizada...

Diagrama límite de conformado: Método de predicción de fallo durante el conformado ampliamente utilizado en aplicaciones industriales propuesto por Keeler (1965) y Goodwin (1968).

Factibilidad de proceso: Cualidad de un proceso que indica la capacidad de éste para tener como resultado un producto acorde a los estándares de calidad y criterios de fallo.

Robustez de proceso: Cualidad del proceso para conseguir resultados consistentes ante la variabilidad de parámetros de entorno influyentes en éste.

Factores de ruido: Variables o parámetros, que de algún modo son difíciles de controlar, y que influyen sobre la estabilidad de un proceso.

Deformación: Distorsión en la geometría inicial de un cuerpo por causa de cargas externas.

Tensión: Relación entre la carga y la sección transversal de un cuerpo sometido a una deformación.

Módulo de Young: Define la relación entre la tensión y la deformación en el rango elástico del material.

Springback: Término anglosajón para referirse a la recuperación elástica del material tras sufrir una deformación plástica.

Laminación de chapa: Proceso de transformación metálica, en el que se obtiene una bobina por la reducción de espesor de una placa mediante una serie de trenes de rodillos.

Dirección de laminación: Se denomina dirección de laminación a la dirección paralela al borde de bobina.

Modelo de endurecimiento: Define cómo se endurece un material por acritud, es decir, el endurecimiento del material al deformarse en frío.

Ensayo de tracción: Ensayo de caracterización mecánica en el que se somete a una probeta normalizada a una tracción uniaxial.

Bulge test: Ensayo de tracción biaxial empleado para la determinación de la curva de endurecimiento.

3.2.2. Abreviaturas

LCA: Brazo inferior de control (*Lower Control Arm*)

AHSS: Aceros avanzados de alta resistencia (*Advanced High Strength Steels*)

FLC: Curva límite de conformado (*Forming Limit Curve*)

FLD: Diagrama límite de conformado (*Forming Limit Diagram*)

CAD: Diseño asistido por ordenador (*Computer Aided Design*)

σ : Tensión

F: Fuerza

A: Área

E: Módulo de Young

ϵ : Deformación unitaria

ν : Coeficiente de Poisson

ρ : Densidad

$r_{0,45,90}$: Coeficientes de Lankford o anisotropía

ω : Anchura

l: Longitud

$R_{p0.2}$, **YS: Tensión de fluencia**

R_m , **UTS: Resistencia mecánica**

n: Coeficiente de endurecimiento

K: Constante de endurecimiento

3.3. Descripción del problema

En los siguientes apartados se hace una presentación del ámbito del estudio, además de presentar los objetivos y alcance del mismo. También se muestran los aspectos prácticos de los resultados obtenidos.

3.3.1. Introducción

El estudio presentado en este documento detalla el análisis de factibilidad del proceso de estampación en frío de un componente de chasis de automóvil, concretamente un brazo inferior de control, el cual forma parte del sistema de suspensión del eje delantero. En la siguiente figura se muestra un esquemático de la localización del chasis en el automóvil.



Figura 1. Esquema de localización del chasis (Fuente: <https://www.subaru.ca/>)

El brazo inferior de control, denominado *Lower Control Arm* (LCA) en inglés, es un componente clave en suspensiones tipo McPherson. Su función es la de unir a la estructura central del chasis, el conjunto mangueta-muelle-amortiguador. En la figura inferior se muestra un ejemplo de brazo inferior de control y los puntos de unión con los componentes colindantes.

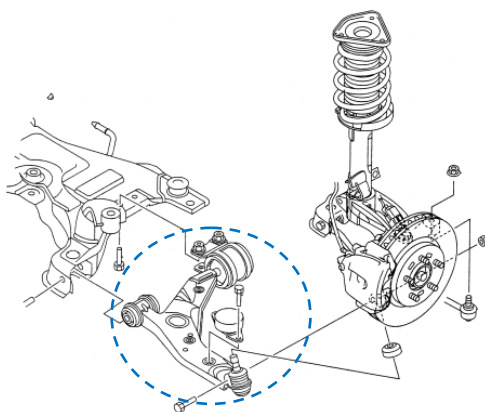


Figura 2. Componentes circundantes a un brazo inferior de control (Fuente: <http://www.autozone.com/>)

Uno de los grandes desafíos de la industria de automoción es adecuarse a las normativas y regulaciones cada vez más estrictas en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero. Entre las distintas líneas de trabajo, una de ellas es lograr el

aligeramiento en los componentes estructurales del vehículo. Esta estrategia consiste en conjugar materiales con propiedades mecánicas cada vez más altas con una reducción en el espesor de los componentes.

En el caso concreto de este estudio, se ha considerado un acero avanzado de alta resistencia o *Advanced High Strength Steel* (AHSS), laminado en caliente, el CP800, el cual es ampliamente utilizado en componentes de chasis. Pertenece a la familia de aceros de fase compuesta o *Complex Phase*, constituidos por las fases metalúrgicas ferrita, bainita y martensita.

Como se observa en la siguiente figura, la familia Complex Phase, comúnmente denominada con las siglas CP, se sitúa en niveles de resistencia mecánica entre los 800 y 1000 MPa, con niveles de elongación inferiores al 10%.

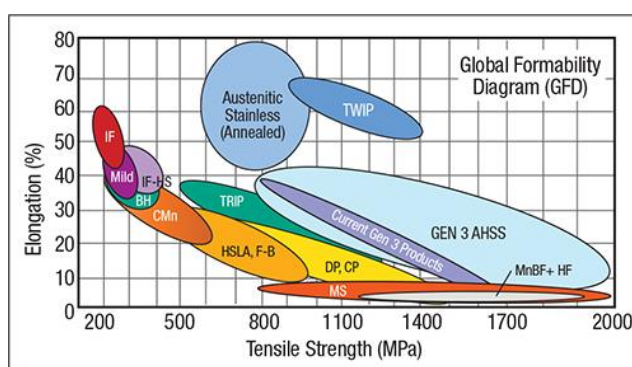


Figura 3. Relación resistencia-conformabilidad de distintas familias de aceros (Fuente: <http://www.metalfformingmagazine.com/>)

Una gran mayoría de componentes estructurales de chasis se fabrican por estampación de chapa. Es el caso del brazo inferior de control. En apartados posteriores de este documento se muestra detalladamente el proceso para la pieza bajo estudio.

Como se ha introducido anteriormente, los aceros avanzados de alta resistencia ofrecen propiedades mecánicas elevadas. Sin embargo, la fabricación de los componentes por estampación con estos materiales presenta más dificultades, porque su conformabilidad es inferior a los aceros convencionales. Por ello, se vuelve fundamental estudiar y validar la factibilidad de la pieza antes de dar luz verde a la fabricación de los troqueles de estampación.

Sin embargo, de cara a la producción serie de estos componentes, podría ocurrir que validar la factibilidad en condiciones nominales no sea suficiente. Factores relacionados con el material, como la variabilidad de las propiedades mecánicas, y con parámetros propios del proceso, como las condiciones de lubricación y desviaciones en los contornos de corte, pueden causar roturas inesperadas. Por ello, la manera de adoptar un margen de seguridad óptimo, sin sobredimensionar en exceso las piezas y procesos, es llevar a cabo un análisis de robustez. Esto consiste en identificar los parámetros influyentes en la factibilidad de la pieza, y estudiar las situaciones más adversas, con el objetivo de establecer planes de acción que aseguren un proceso seguro.

3.3.2. Geometría de la pieza bajo estudio

En el presente apartado se muestra la geometría del brazo inferior de control que se ha empleado para este estudio. Cómo se ha introducido en el apartado anterior, se trata de un componente de chapa de acero CP800. El espesor típico de estas piezas con este material es de 3,4mm.

En las siguientes figuras se muestran diferentes vistas del modelo CAD construido en CATIA. Para más detalle en cuanto a las dimensiones, se puede consultar el plano de la pieza adjunto en el Documento 5: Anexos.

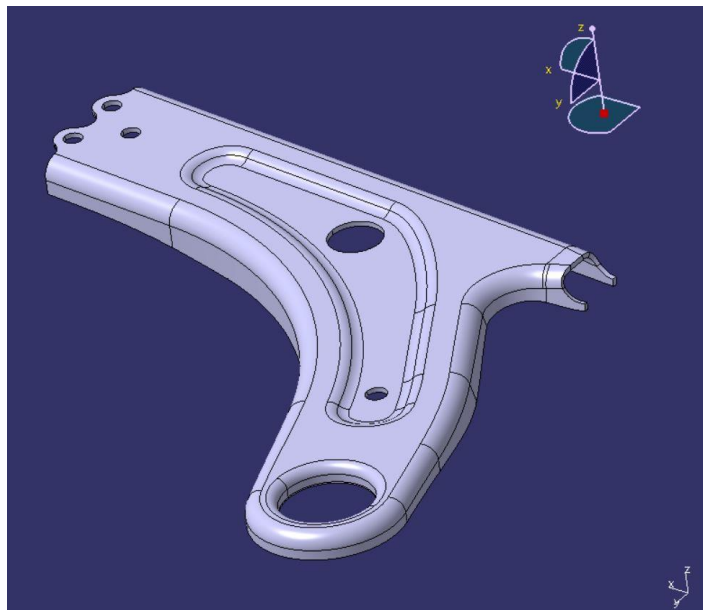


Figura 4. Vista isométrica posterior del brazo inferior de control bajo estudio (Fuente: Captura de CATIA)

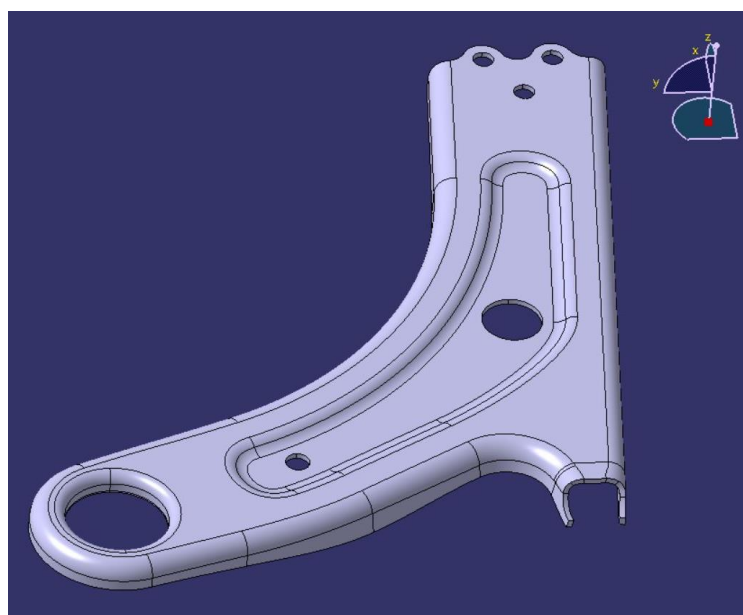


Figura 5. Vista isométrica lateral del brazo inferior de control bajo estudio (Fuente: Captura de CATIA)

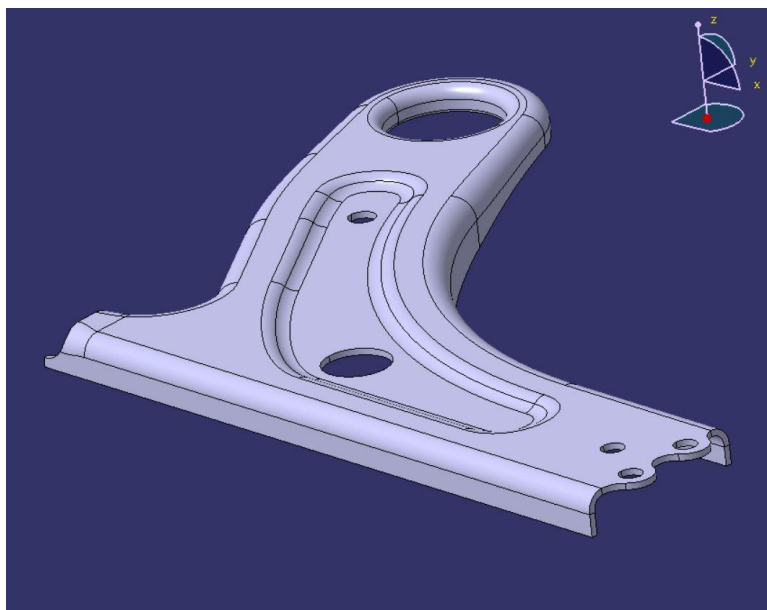


Figura 6. Vista isométrica frontal del brazo inferior de control bajo estudio (Fuente: Captura de CATIA)

El espesor nominal de la pieza es de 3,4mm, que corresponde con el espesor del material previo a la estampación. Sin embargo, por efecto del proceso de conformado, hay ciertas zonas de la pieza que sufren un adelgazamiento, mientras que otras sufren un aumento del espesor por causa de la acumulación de material. Esas zonas con adelgazamiento localizado son las más problemáticas para la factibilidad de la pieza. Como ya se detallará más adelante en el estudio, uno de los criterios de fallo empleado será precisamente un límite de adelgazamiento.

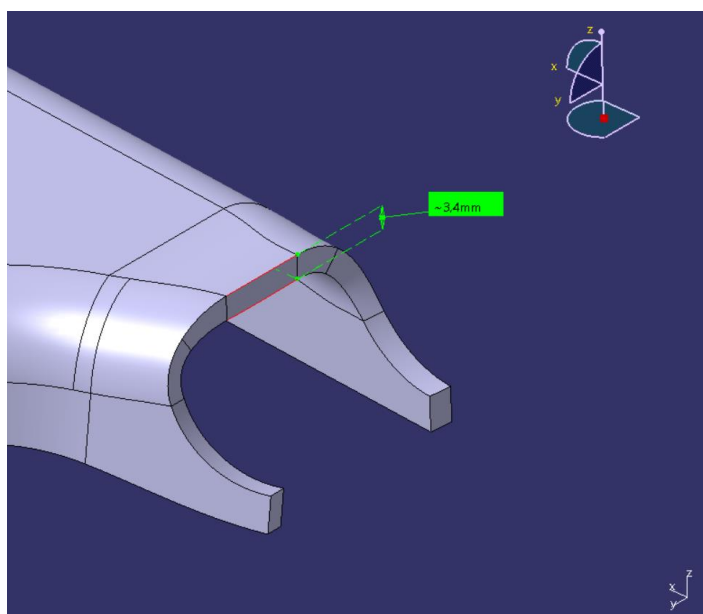


Figura 7. Espesor de la pieza (Fuente: Captura de CATIA)

Como ya se especifica en la Figura 2, el brazo inferior de control sirve de nexo entre la estructura central del chasis y el subconjunto que soporta la rueda del vehículo. En la siguiente figura se muestran las superficies equivalentes a los anclajes o uniones de la pieza con los elementos colindantes. Los tres orificios dispuestos en patrón triangular corresponden con la unión al sistema de la rueda, mientras que los otros dos anclajes están asociados a la estructura central.

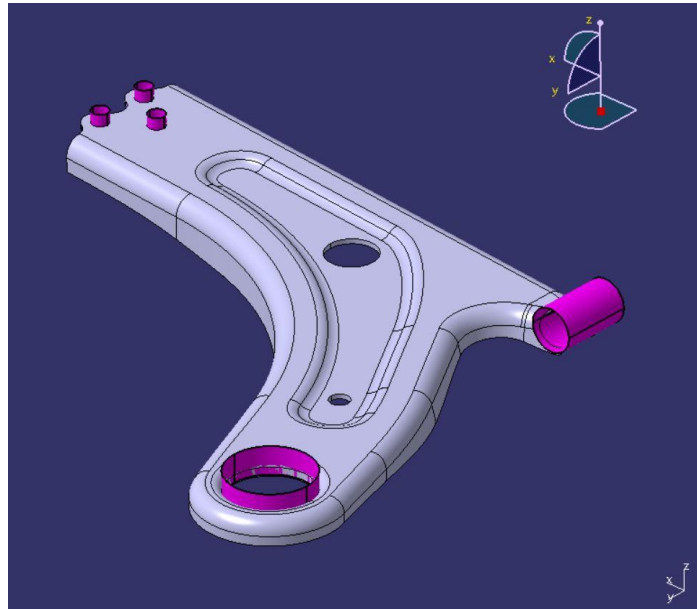


Figura 8. Puntos de anclaje de la pieza (Fuente: Captura de CATIA)

Las dos zonas más críticas en cuanto a la factibilidad son la zona del abocardado y la zona comúnmente denominada *Tokyo-bay*. En las siguientes figuras se puede apreciar una vista en detalle de ambas. Es en el caso del *Tokyo-bay* donde se registra el mayor nivel de adelgazamiento, siendo el punto más crítico a monitorizar durante el desarrollo del estudio presentado en este documento.

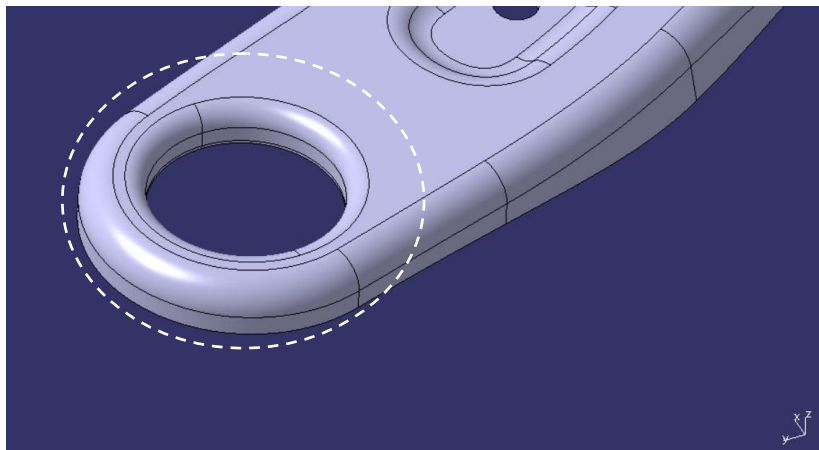


Figura 9. Zona del abocardado (Fuente: Captura de CATIA)

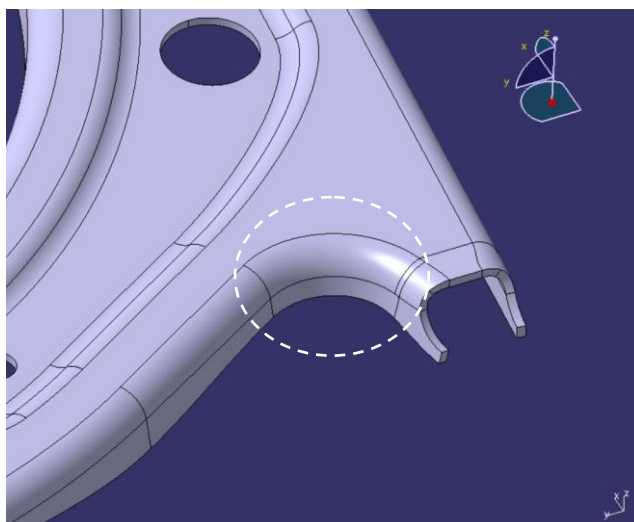


Figura 10. Zona del “Tokyo-bay” (Fuente: Captura de CATIA)

3.3.3. Objetivos

A continuación se enumeran los objetivos principales y secundarios de este estudio:

1. Validar la factibilidad del proceso de estampación de la pieza anteriormente mostrada en condiciones nominales.
2. Validar la robustez de proceso.
 - a. Identificar los factores influyentes más relevantes.
 - b. Obtener los márgenes admisibles de los diferentes factores.
 - c. Establecer acciones preventivas que permitan una mayor estabilidad de proceso de cara a producción en serie.

3.3.4. Alcance

El alcance de las tareas del estudio se muestra a continuación:

Se define el CAD de la geometría de la pieza en CATIA.

El análisis se limita al proceso *transfer*. El proceso de obtención del formato inicial o *blanking* no considerado, por tratarse exclusivamente de operaciones de corte.

El modelado en CATIA del CAD de las herramientas del proceso se limita a las superficies de contacto con la chapa, sin definir la estructura del troquel.

La definición del formato inicial se realiza en CATIA teniendo como referencia el resultado del cálculo *inverse* realizado previamente en PAM-STAMP.

El modelo de simulación del proceso *transfer* se implementa en PAM-STAMP.

Los criterios de fallo empleados para el postproceso de los resultados son el nivel de adelgazamiento y diagrama límite de conformabilidad o FLD.

Se muestran los resultados de la simulación del proceso en condiciones nominales y se valida la factibilidad.

Para el análisis de robustez, se identifican los parámetros influyentes, se implementan en el modelo de simulación, se concluye el nivel de robustez del proceso.

3.3.5. Aspectos prácticos

Es preciso remarcar que las conclusiones que se dan en este estudio, además de permitir valorar entre si la pieza es o no factible con el proceso definido, ayudan a asegurar una mayor estabilidad en el proceso durante la producción serie.

La confirmación de la factibilidad llevaría a dar luz verde al lanzamiento del diseño y fabricación de los troqueles para la estampación de esta pieza, sea a nivel de prototipo o a nivel de producción serie.

Por otro lado, el análisis de la robustez permite conocer bajo que ventanas es admisible que varíen los parámetros de proceso para producir piezas aceptables. Así, se pueden definir y aplicar pautas de control o mantenimiento en el proceso.

3.4. Antecedentes

Hoy en día, tanto los grandes fabricantes de automóviles, como sus proveedores, utilizan ampliamente la simulación para comprobar la factibilidad y robustez de los procesos de producción que pretenden industrializar. Esto es debido principalmente a que de esta manera se logra un mayor nivel de calidad en las piezas, asegurando el nivel deseado de productividad, reduciendo de costes, relacionado directamente con el aumento de beneficios.

Así mismo, mediante el empleo de simulación de proceso, también se reduce el número de iteraciones durante el periodo de diseño, fabricación y ajuste de los troqueles, consiguiendo reducir tiempos y costes.

En el caso de piezas de recubrimiento exterior de automóvil, en el que el *springback* es uno de los mayores enemigos para conseguir producir piezas dentro de tolerancias, el análisis de la robustez del proceso es ya habitual a la hora de llevar a cabo compensaciones en los troqueles.

En el presente estudio, se pretende trasladar el estudio de la robustez al ámbito de piezas de chasis, teniendo como objetivo la valoración de la factibilidad referente a la aparición de grietas durante el proceso, y no al *springback*.

3.5. Estudio de alternativas

Como se ha introducido en el apartado anterior, el estudio de la factibilidad y robustez de proceso mediante simulación permite evitar el tradicional enfoque de prueba y error mediante prototipos, ahorrando tiempo y coste. Sin embargo, hoy en día, la fase de validación en prototipos no está totalmente erradicada. Es muy habitual realizar una serie de iteraciones mediante simulación hasta lograr una posible solución, para en ese punto validar esa solución mediante prototipos.

Para la simulación de procesos de estampación existen hoy en día diferentes software, como pueden ser PAM-STAMP, AutoForm, LS-Dyna... Para este estudio, se ha seleccionado PAM-STAMP. Una de las principales razones es la posibilidad de configuración del modelo que proporciona, además del contrastado motor de cálculo para piezas de chapa de alto espesor comparado por ejemplo con AutoForm, más indicado para chapas de espesor reducido.

3.6. Solución adoptada

En los siguientes apartados se presentan los conceptos de trasfondo teórico necesarios para entender el procesamiento de información, se explica la metodología seguida para desarrollar el estudio, se especifican detalladamente aspectos como el proceso de estampación propuesto, la configuración del modelo de simulación y cómo se afronta el análisis de robustez.

3.6.1. Marco teórico

El presente apartado está dividido en dos partes: Una primera parte en la que se presentan aspectos básicos sobre estampación, y una segunda parte sobre lo necesario para poder configurar correctamente una carta de material para llevar a cabo una simulación, además de conceptos relacionados con los criterios de fallo que se emplean para procesar los resultados obtenidos de las simulaciones.

3.6.1.1. Estampación de chapa

El proceso de estampación o conformado de chapa, es un proceso de fabricación que conlleva deformación elástica y plástica de chapa de acero por medio de una prensa. Es necesario puntualizar que a diferencia de lo que ocurre en la forja, la deformación en la estampación no se consigue por medio de la compresión del material a través de su espesor, sino de hacer que la chapa reproduzca la forma descrita por los moldes o también llamados troqueles que están instalados en la prensa.

Las operaciones más comunes en el proceso de conformado de chapa son las siguientes:

- Corte de formatos (*Blanking*): Consiste en obtener formatos de chapa planos a partir de bobinas, para poder ser utilizados en operaciones posteriores.
- Estampación (*Stamping*): Consiste en hacer que la chapa adquiera la forma definida por los troqueles superior e inferior. Puede realizarse sin pisador o con pisador que evite arrugas en operaciones de embutición más profundas.
- Corte (*Trimming*): Cuando es necesario cortar material de la pieza que se está conformando, se pueden emplear troqueles de corte fijos a la mesa, o se puede hacer un corte a carro, el cual permite realizar un corte perpendicular o en ángulo a la dirección de carrera de la prensa.
- Punzonado (*Piercing*): En este caso lo que se realiza es un corte de un contorno cerrado mediante un punzón y una matriz.
- Doblado (*Bending*): Como el propio nombre indica, consiste en curvar el material a lo largo de una línea. A continuación se muestra el mecanismo de doblado de una chapa visto en sección.
- Calibrado (*Restriking*): Cuando las tolerancias de la pieza son reducidas, para evitar la distorsión de la pieza por el *springback*, es necesario realizar una operación de calibrado, consolidando el material en su posición final. Esta operación puede realizarse mediante troqueles fijos a las mesas de la prensa o mediante carros.

- Abocardados o extrusión de cuellos (*Plunging*): Esta operación consiste en el desarrollo de un cuello de material partiendo de un orificio existente. En componentes de chasis de automóvil es una operación muy común porque para el ensamblaje de los componentes a la estructura se utilizan elementos como bujes y rótulas, los cuales van insertados por apriete en los cuellos realizados con esta operación. Se muestra un ejemplo a continuación.

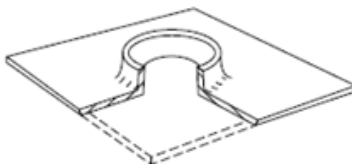


Figura 11. Abocardado

Para suministrar la potencia necesaria por los troqueles en la fabricación de las piezas se emplean prensas. Una prensa es una máquina mecánica de compresión utilizada para el conformado de chapa metálica. Está compuesta por dos mesas en las que se montan los utillajes correspondientes para realizar las operaciones sobre la chapa, y su objetivo es aportar la potencia necesaria para realizar las operaciones. Los utillajes, también llamados troqueles, son las herramientas que provocan que la chapa adquiera la forma deseada.

En la siguiente figura se muestra una prensa de doble efecto, en la que detallan sus componentes principales. La diferencia entre una prensa de doble efecto frente a una de simple efecto es que la de doble efecto puede controlar independientemente el pisador que sujeta la chapa y el punzón superior, y la de simple efecto emplea un sistema de amortiguamiento hidráulico para hacer uso del pisador, ya que tanto el punzón y el pisador están accionados por la misma fuente.

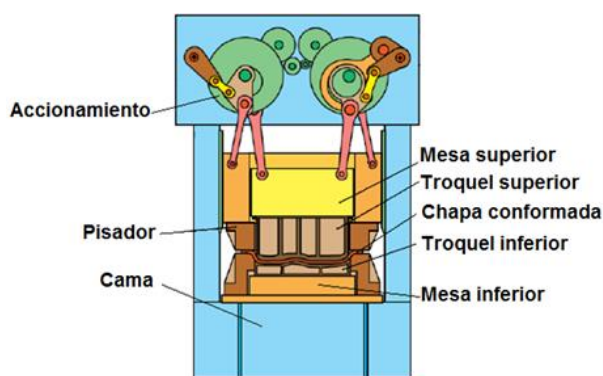


Figura 12. Componentes principales en una prensa de doble efecto

Las prensas pueden ser de diferente tipo y disponerse en distintas configuraciones en función de la aplicación. A continuación se realiza una clasificación sencilla:

- Tándem (Línea de prensas): Cuando un número de prensas en las que se hace una operación en cada una se disponen en línea con un sistema de transferización normalmente por robot, se dice que es una línea tándem. La chapa se alimenta a la primera prensa de la línea ya precortada. Se utiliza para piezas grandes.

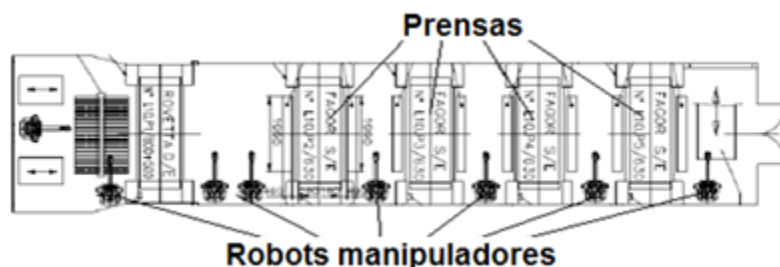


Figura 13. Línea de prensas

- Transfer: Se denomina transfer a esa prensa en la que todas las operaciones de conformado de una pieza se realizan dentro de la misma prensa. La manipulación de material de una operación a otra se realiza mediante un sistema automatizado de transferización. Al igual que en las prensas Tándem, la chapa se alimenta precortada a la primera operación.
- Transfer Combi: Se trata de la misma tipología que la anterior, pero en vez de alimentarse los formatos de chapa precortados, se alimenta la chapa directamente de la bobina, con lo que la primera o primeras operaciones deberán ser para realizar el precorte.



Figura 14. Prensa transfer

- Prensa de troquel progresivo: Al igual que en una prensa Transfer, todas las operaciones se realizan en la misma prensa, pero la transferización entre operaciones, en vez de realizarse con un sistema externo automatizado, se lleva a cabo utilizando la propia chapa como esqueleto de sujeción, y no desprendiéndose la pieza de él hasta la última operación. Para entonces, a la pieza ya se le han realizado todas las operaciones necesarias. Esta variante es una solución atractiva para piezas estampadas de tamaño pequeño.

Debajo se muestra un ejemplo de cómo va desarrollándose la pieza a medida que avanzan las operaciones dentro del troquel progresivo.



Figura 15. Desarrollo de una pieza en un troquel progresivo

3.6.1.2. Caracterización de material

Cuando el objetivo es estudiar la factibilidad de una pieza estampada y la robustez del proceso empleado para ello, uno de los aspectos fundamentales es la correcta caracterización de material y posterior modelización en el software de simulación. En gran medida de la correcta caracterización de las variables depende su semejanza con un proceso real. De lo contrario, diferirán los resultados en la simulación y la realidad.

Una carta de material para simular un proceso de estampación en frío requiere de la siguiente información:

- a) Propiedades elásticas
- b) Propiedades de endurecimiento
- c) Criterio de fluencia (anisotropía)
- d) Criterios de conformabilidad

Antes de explicar las particularidades de cada uno de los puntos enumerados, cabe destacar brevemente el ensayo de tracción, del cual se obtienen de manera sencilla la gran mayoría de la información necesaria para cubrir las necesidades arriba expuestas.

➤ ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción es un básico test de esfuerzo a través del cual se caracteriza el comportamiento estático de un material, con el que es posible conocer la relación entre tensión y deformación experimentalmente.

En los ensayos de tracción (o compresión) la tensión del esfuerzo σ , se mide como la fuerza F actuando por unidad de área A :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

En el caso de un elemento de sección constante, bajo el efecto de una fuerza externa F aplicada en los extremos, siendo la dirección de las fuerzas paralelas al eje de la pieza, como se puede observar en la Figura 11, si el sólido se corta por una

sección transversal, se encuentra un único esfuerzo interno, el esfuerzo normal N , de valor F . El sentido del mismo esfuerzo estará dirigido hacia fuera.

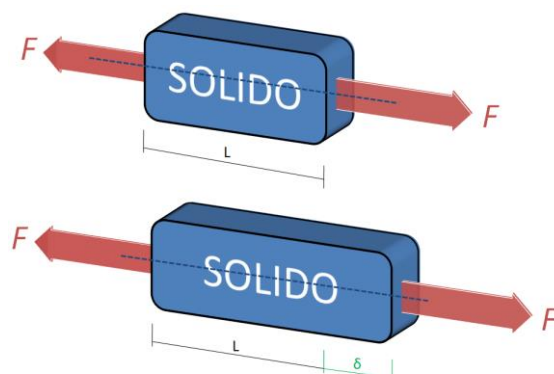


Figura 16. Esquemático de la deformación de un sólido bajo una carga

Suponiendo que el efecto de este esfuerzo interno se reparte de manera uniforme a lo largo de toda la superficie, en cualquiera de los puntos de la sección habrá la siguiente tensión normal:

$$F = \int_A \sigma \cdot dA = \sigma \cdot \int_A dA = \sigma \cdot A \rightarrow \sigma = \frac{F}{A} [Pa]$$

El esfuerzo interno se repartirá uniformemente a lo largo de toda la superficie de la sección siempre que la fuerza externa F esté aplicada en el centro de gravedad de la sección de la pieza.

Los esfuerzos de tracción causan en la pieza una elongación δ perpendicular a su propia dirección, también se crearan contracciones perpendiculares a las otras dos caras del prisma.

Se utiliza la Ley de Hooke para definir la relación entre la tensión normal y la deformación unitaria del sólido para el caso simple de tracción uniaxial. Para representar la deformación unitaria se utilizará el símbolo ε y E para el módulo elástico lineal (también conocido como módulo de Young).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Entre la elongación y las contracciones del sólido existe una proporción que se conserva. Esto sucede debido a que el volumen del sólido se mantiene constante. Esta constante que define esta proporcionalidad se llama Coeficiente de Poisson, ν .

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}}$$

a) COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DEL MATERIAL

Los cuerpos bajo acción de las fuerzas externas se deforman, y una vez desaparecida la fuerza, recuperan parcial o totalmente su forma y tamaño inicial. Esto se debe a las deformaciones elásticas y plásticas de las que se compone cualquier deformación introducida en un material.

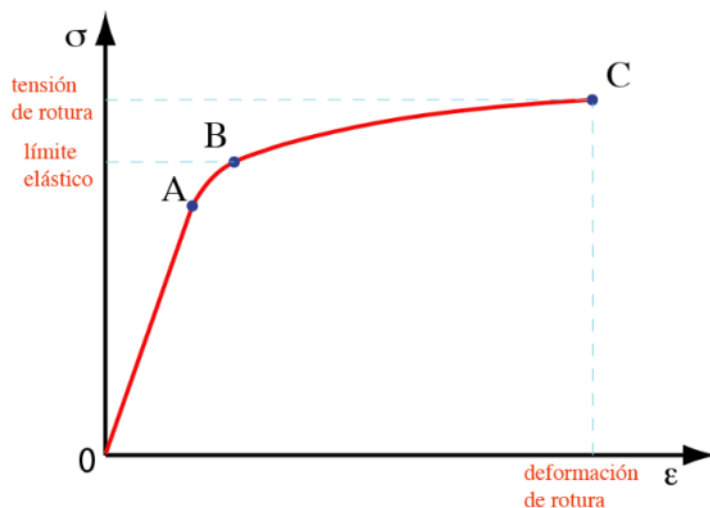


Figura 17. Curva de tensión-deformación (Fuente: www.ehu.es/es/web/ztf-fct/)

Como se puede observar en la Figura 12, hasta el punto A, la tensión es lineal con la deformación. Mediante ensayos se confirma que cuando desaparece la tensión, el cuerpo vuelve a su forma original y no queda deformado.

Es decir, las tensiones introducidas en el material se liberan buscando un equilibrio. A este fenómeno se le denomina recuperación elástica o *springback*. Dependiendo de las propiedades del material, estos presentan diferentes niveles diferentes de recuperación elástica.

Por lo tanto, hasta el límite de fluencia uniaxial, la relación entre la deformación y la tensión del material es lineal, y está relacionada con el módulo de Young, cumpliéndose la Ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

donde σ es la tensión en MPa, E es el módulo de Young en MPa, y ε es la deformación unitaria en mm/mm.

Sin embargo, la curva de tensión-deformación del ensayo de tracción tiene sus limitaciones; mediante este ensayo solo se podrán obtener las tensiones y deformaciones ingenieriles del material. La tensión ingenieril se basa en la sección inicial de la probeta en lugar de la actual, de modo que subestima el estado de tensiones real. En cuanto a la deformación ingenieril, no es una medida

representativa de la deformación real ya que se basa en la longitud inicial, y por lo tanto sobreestima el estado de deformaciones reales.

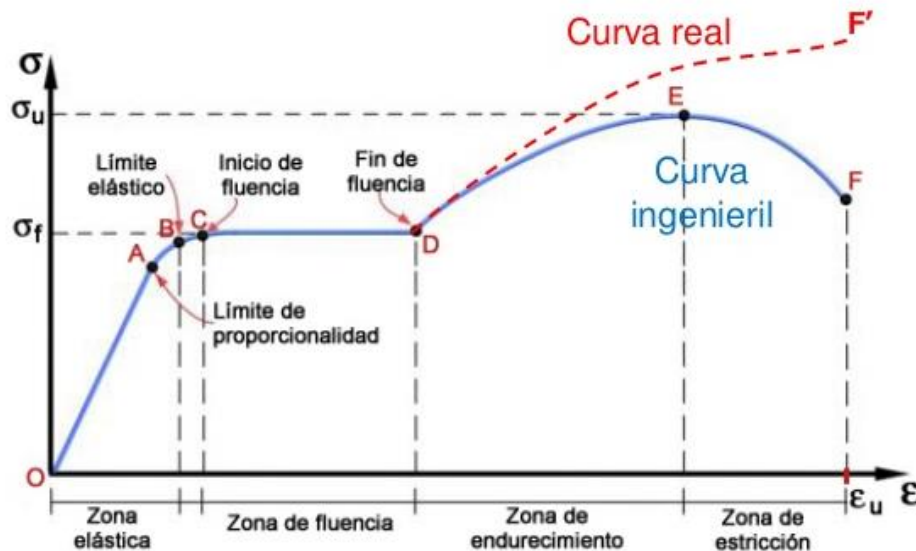


Figura 18. Estadios durante el ensayo de tracción (Fuente: <https://es.slideshare.net/WilmerTenTen/>)

En la Figura 13 se puede apreciar cómo ambas curvas difieren a partir de superar la tensión de fluencia. Esto se debe a la reducción de la sección de la probeta. Por lo tanto:

$$\sigma_{REAL} = \frac{F}{A}$$

donde A es la sección instantánea de la probeta en mm^2 .

Mediante las fórmulas que se muestran a continuación, se puede convertir la curva de tensión-deformación ingenieril en real:

$$\sigma_{REAL} = \sigma_{INGENIERIL} \cdot (1 + \epsilon_{INGENIERIL})$$

$$\epsilon_{REAL} = \ln(1 + \epsilon_{INGENIERIL})$$

b) CURVA DE ENDURECIMIENTO

El modelo de endurecimiento sirve para conocer cómo se endurece el material por acritud (al deformarse en frío). Durante la estampación, la chapa puede verse sometida localmente a diversos modos de deformación. Debido a que

la tensión equivalente en el material puede ser muy elevada en algunos casos, no se pueden obtener mediante el ensayo de tracción estos valores necesarios para el software de simulación.

Sí es posible conseguir datos de un rango de deformaciones mayor mediante el Bulge test. Es un ensayo biaxial empleado como alternativa para la obtención de la curva de tensión-deformación verdadera. Sin embargo, son más difíciles de llevar a cabo e interpretar.

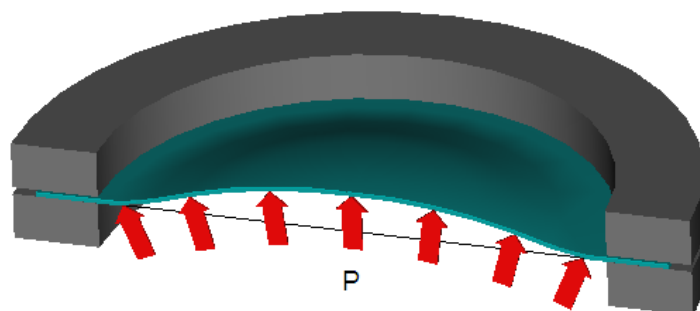


Figura 19. Representación de Bulge test (Fuente: <https://www.intechopen.com/books/>)

De ahí la necesidad de extrapolar la curva para adaptarla a mayores niveles en otros modos de deformación. Por ello, existen diferentes modelos matemáticos capaces de extender (extrapolar) la curva de tensión-deformación hasta valores superiores. Por ejemplo: Power-law, Kinematic, Swift, Krupkowsky... También existen otros modelos matemáticos que combinan dos o más modelos con el fin de poder asemejarse lo máximo a la curva real, Swift-Voce, Swift-Hockett/Sherby etc.

Los distintos modelos matemáticos contienen variedad de constantes diferentes como el coeficiente de endurecimiento (n) que define el endurecimiento del material o la constante de endurecimiento (k) que define el nivel de tensiones del material.

Los procesos de embutición están basados en el flujo del material y su adelgazamiento. Si al adelgazarse el material se endurece, la debilidad del material es pequeña y es capaz de arrastrar al material vecino. Si el material no se endurece, se genera una zona de debilidad que a su vez produce la rotura del material.

Cabe a destacar que un coeficiente de endurecimiento de valor elevado supone que el material tendrá una mejor conformabilidad.

c) CRITERIO DE FLUENCIA

La superficie de fluencia permite predecir los valores de las combinaciones de tensiones, en múltiples direcciones, a las que un elemento se deformará plásticamente en un estado plano de tensión.

Para que no difieran los resultados experimentales de los de la simulación es imprescindible definir correctamente la superficie de fluencia. De esta manera las tensiones y el *springback* que se predigan en la simulación serán más fiables.

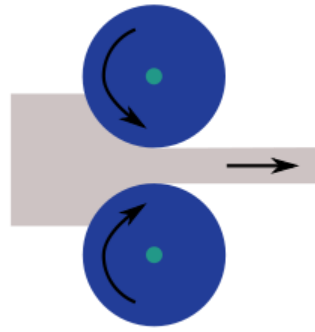


Figura 20. Laminación de chapa (<https://es.wikipedia.org/wiki/Laminación>)

El comportamiento plástico de las chapas laminadas puede variar en función de la dirección de laminación debido a que el material utilizado se considera un material anisótropo, es decir, que las propiedades del mismo varían en función de la dirección. Esto está directamente relacionado con el coeficiente de Lankford, también llamado coeficiente de anisotropía.

$$r = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{33}}$$

donde r es el coeficiente de anisotropía, ε_{22} es el adelgazamiento en anchura del material en mm/mm, y ε_{33} es el adelgazamiento en espesor del material en mm/mm.

Para realizar el cálculo del coeficiente de anisotropía se realiza un ensayo de tracción al material en el que se graba en todo momento la deformación en anchura y deformación longitudinal. Por conservación de volumen, cuando se estira un material en una dirección, debe reducir sus dimensiones en las otras dos.

$$\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0$$

$$r = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}} \rightarrow r = -\frac{\ln \frac{\omega}{\omega_0}}{\ln \frac{l_0 \cdot \omega_0}{l \cdot \omega}}$$

donde ω y l son la anchura y longitud instantánea de la zona calibrada, y ω_0 y l_0 son la anchura y longitud iniciales.

La situación ideal ocurre cuando el estrechamiento es mayor que el adelgazamiento, es decir, cuando el coeficiente de anisotropía es mayor a 1. Cuanto mayor sea el valor de anisotropía mayor será la capacidad del material para deformarse sin adelgazarse.

d) CRITERIOS DE CONFORMABILIDAD

La conformabilidad es la capacidad de un material para ser deformado mediante procesos como la embutición, flexión, laminación, etc. La conformabilidad es mayor cuanto menor sea el límite elástico y cuanto mayor sea la capacidad para estar en condiciones de deformación plástica sin fractura.

El diagrama de conformabilidad o Forming Limit Diagram (FLD) es el principal criterio de fallo utilizado en la industria para predecir el fallo por estricción de los materiales de chapa embutida. Se utiliza a efectos comparativos entre distintas calidades de aceros o criterio de fallo en simulación de elementos finitos de conformado de componentes estructurales.

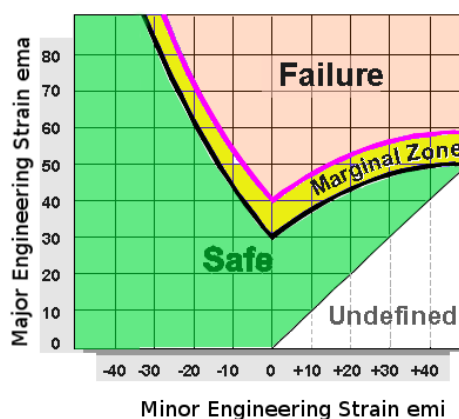


Figura 21. Diagrama de conformabilidad (Fuente: <http://www.autoform.com/blog/>)

La curva límite de conformabilidad o Forming Limit Curve (FLC) define la zona del diagrama FLD bajo la cual las deformaciones no generan la rotura del material. Por lo tanto si la combinación de deformaciones (Eps_1 y Eps_2) da un punto por encima de esta curva FLC, es posible que dicha combinación llegara a romper el material. En el caso de que los puntos se aproximasen mucho a la curva, existiría el riesgo de estricción localizada o incluso de fractura.

El material tiene diferentes modos de deformación. En la Figura 17 se muestran representadas diferentes zonas del diagrama.

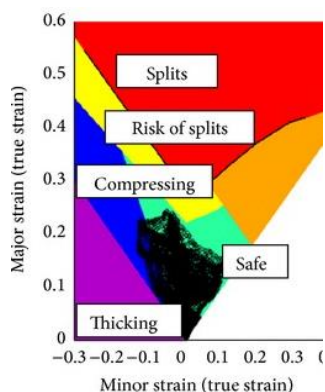


Figura 22. Regiones de diagrama de conformabilidad (Fuente: <https://www.researchgate.net/>)

La estricción ocurre cuando se deforma un material justo antes de su rotura. Durante ese periodo de tiempo aparece una inestabilidad plástica debido a la reducción de la sección del material en una zona.

La FLC se calcula mediante ensayos, deformando una probeta con un punzón semiesférico. Antes de realizar la deformación, se graban un patrón de círculos sobre la superficie de la chapa, que posteriormente tras el conformado se convierten en elipses. El eje mayor y el eje menor de dichas elipses suponen las direcciones principales de las deformaciones Eps1 y la Eps2. Estimando la deformación justo antes de la rotura, es posible determinar la curva FLC. Existen diferentes sistemas para determinar la deformación de la malla de círculos: manualmente, a través de bandas de medida o microscopio; o de forma automática, gracias a sistemas automáticos de medida de deformaciones a través de las imágenes de la pieza.

Los ensayos de obtención de FLC pueden ser de tipo Nakajima (con punzón semiesférico) o Marciniak (con punzón plano).

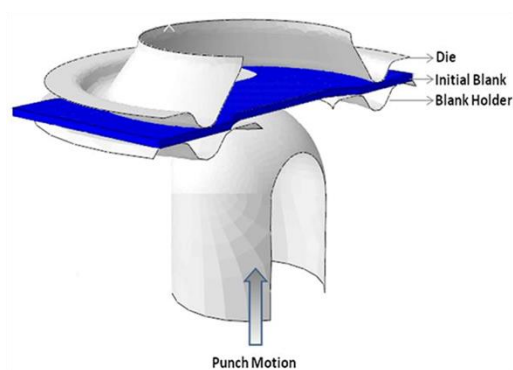


Figura 23. Ensayo con punzón semiesférico (Fuente: <http://materialstechnology.asmedigitalcollection.asme.org/>)

Para conseguir un mayor número de puntos para crear la curva FLC, se deforman probetas malladas a diferentes anchuras.

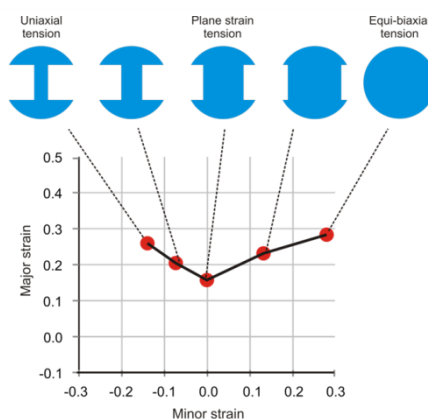


Figura 24. Diferentes probetas para caracterizar la FLC (Fuente: <http://www.autoform.com/blog/>)

3.6.2. Marco metodológico

Presentados los aspectos teóricos, se da paso a explicar el procedimiento o flujo de actividades seguido para completar el estudio. En la Figura 20 se muestra un diagrama de bloques que engloba todos los pasos realizados. Debajo, se realizará una descripción breve de cada uno de ellos.

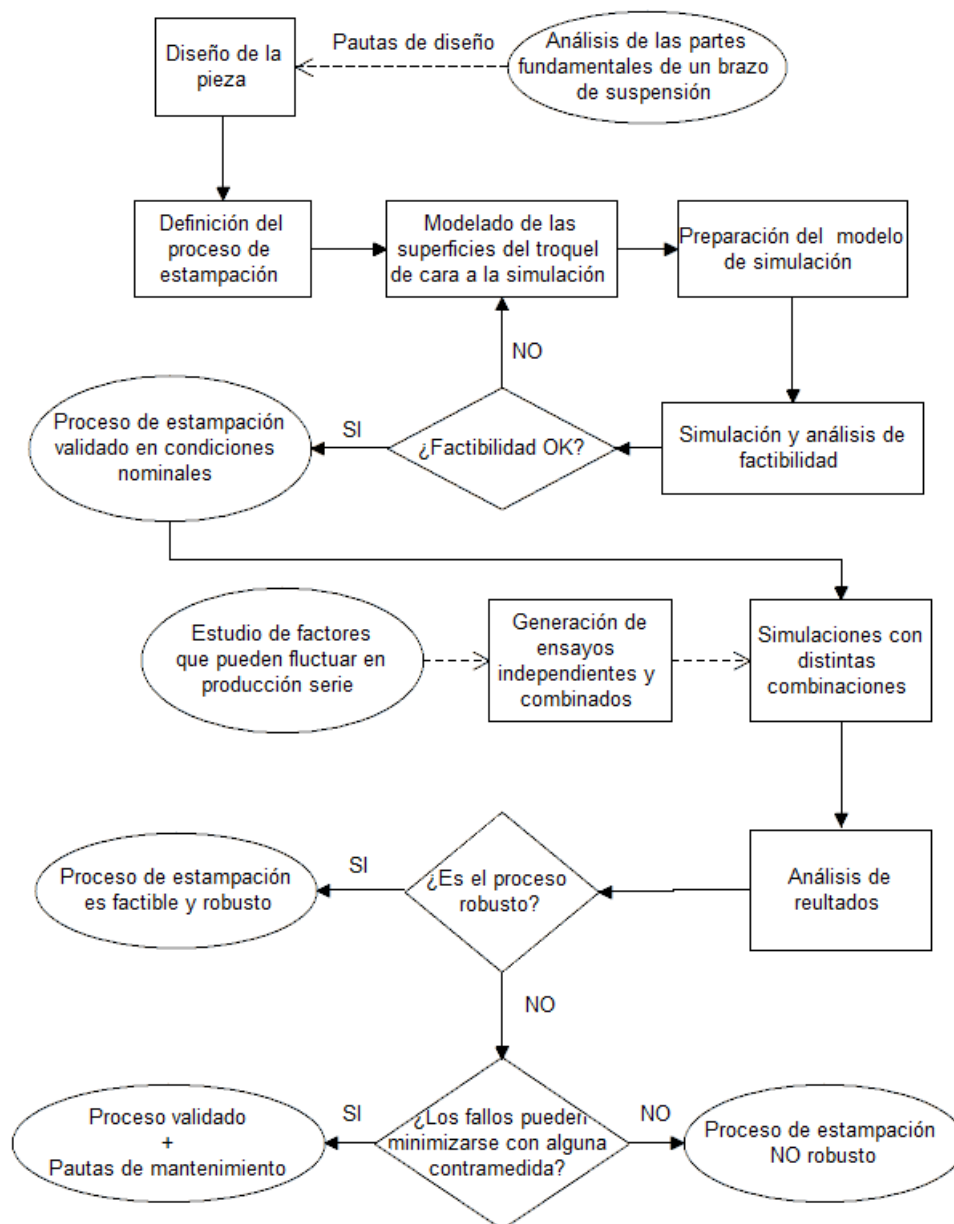


Figura 25. Diagrama general del estudio

En primer lugar, con el objetivo de generar la geometría CAD de la pieza que se emplea en el estudio, se ha hecho un análisis de la tipología de este tipo de piezas, puntos de anclaje existentes, espesores y materiales típicos, elementos circundantes que confinan a esta pieza...

Siguiente, se define el proceso de estampación requerido para llegar a conseguir esta pieza, y se construyen las superficies del troquel de cara a la simulación. Al igual que para la generación de la pieza, para ese modelado se emplea CATIA.

A continuación de la tarea anterior, se configura el modelo de simulación en PAM-STAMP, de manera que se pueda reproducir el proceso ya definido con las superficies del troquel. Son necesarias varias iteraciones de simulación y modelado de superficies ajustando profundidades de embutición y radios de tacos hasta conseguir la factibilidad de la pieza.

Tras validar el proceso en condiciones nominales, se procede al estudio de robustez de proceso. En él, lo primero se identifican los factores que puedan fluctuar durante la producción en serie de la pieza y tener un efecto negativo sobre la factibilidad. Después, tras definir un plan de simulaciones con distintas combinaciones, se llevan a cabo los cálculos y se analizan los resultados de todas ellas.

Finalmente, en función de lo obtenido, se valora la robustez del proceso y se definen posibles pautas de control a realizar en las ventanas de fluctuación de los parámetros más influyentes del proceso.

3.6.3. Técnicas y métodos

En los siguientes puntos de este apartado, se dan a conocer el proceso de estampación definido para la pieza bajo estudio, las particularidades en la configuración del modelo de simulación en PAM-STAMP, el proceso de adquisición de datos de material para la configuración de la carta de material, y los factores de proceso para el estudio de la robustez además de explicar cómo se ha modelizado su efecto.

3.6.3.1. Proceso de conformado

Para la obtención de la pieza bajo estudio, como la chapa es provista en formato de bobina serán necesarios dos subprocesos. En primer lugar, tras el devanado de la bobina, gracias a una prensa de corte, se obtienen los formatos planos. A este proceso se le denomina *blanking*. En segundo lugar, partiendo de los formatos preparados por la primera prensa, se conforma la pieza en una segunda prensa mediante distintas operaciones de forma y corte, hasta obtener la forma final. Este segundo proceso, se denomina *transfer*. En la Figura 26 se puede observar el flujo descrito.

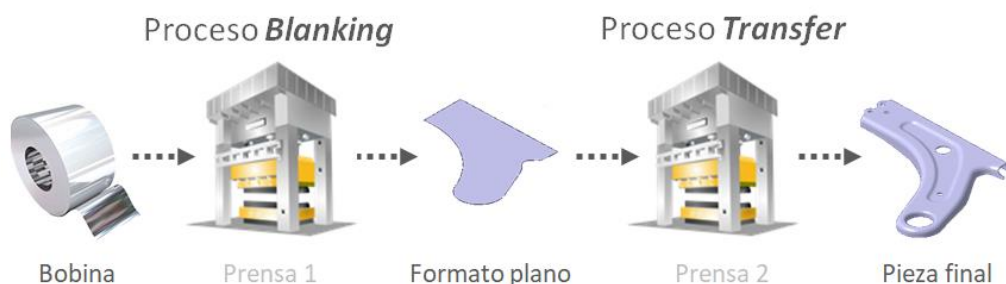


Figura 26. Proceso de conformado de la pieza

Como se especifica en el alcance del estudio, el análisis de factibilidad se centra en el proceso *transfer*. Como se puede apreciar en la Figura 27, se plantean 6 operaciones independientes. Se enumeran a continuación:

- 1) OP20 – Estampado
- 2) OP30 – Corte I
- 3) OP40 – Corte II
- 4) OP50 – Abocardado
- 5) OP60 – Doblado
- 6) OP70 - Corte

Proceso *Transfer* (Desglose operaciones)

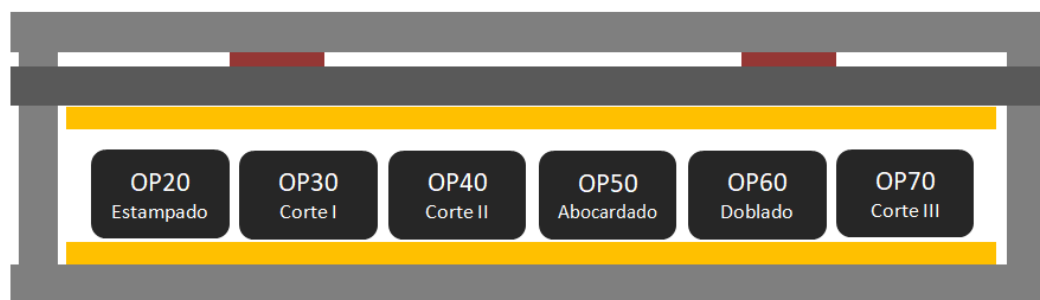


Figura 27. Proceso transfer

En las siguientes figuras, se presentan los detalles de cada una de las operaciones. En la esquina superior izquierda se muestra el CAD fuente de la superficie del troquel en contacto con la chapa, que se importa a PAM-STAMP y sirve para generar la malla de las herramientas correspondientes. Éstas se muestran en la esquina inferior izquierda. En la esquina superior derecha se puede apreciar el resultado esperado tras la operación correspondiente. Esta geometría es solamente orientativa y se ha generado en CATIA a modo didáctico para que el lector entienda de manera clara qué es lo que se pretende en cada operación del proceso. Finalmente, en la esquina inferior derecha, se muestra la malla de la chapa tras cada operación simulada en PAM-STAMP a partir de las herramientas generadas.

La primera operación, OP20 – Estampado, consiste en conformar la chapa mediante una estampa-contrastampa, es decir, sin pisador, y con la ayuda de dos pilotos de centrado.

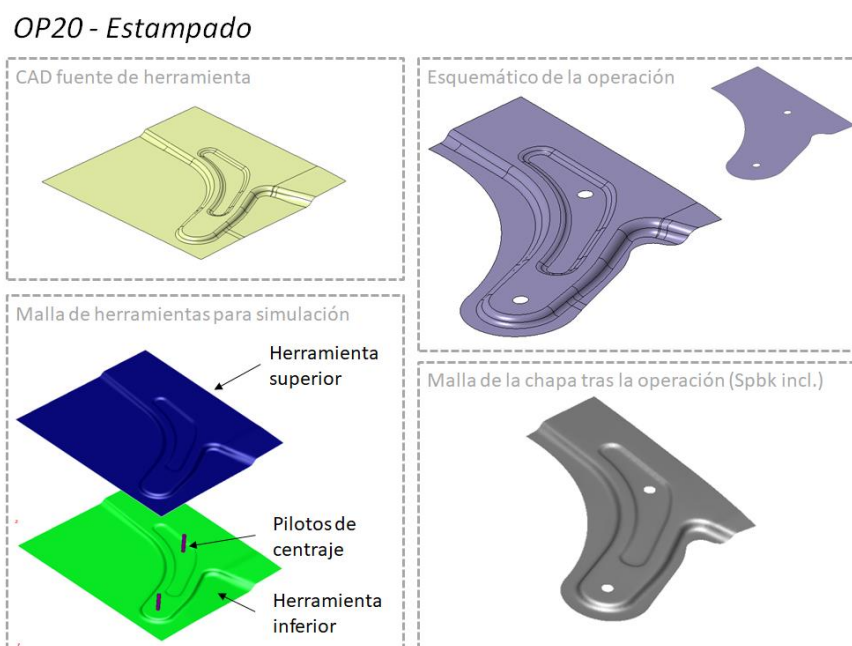


Figura 28. Herramientas y malla de OP20 - Estampado

La segunda y tercera operación, OP30/40 – Corte I/II, que se agrupan en una sola por simplicidad a la hora de realizar la simulación, consta de un pisado para revertir la distorsión por el *springback* tras la OP20, y de un corte y punzonado.

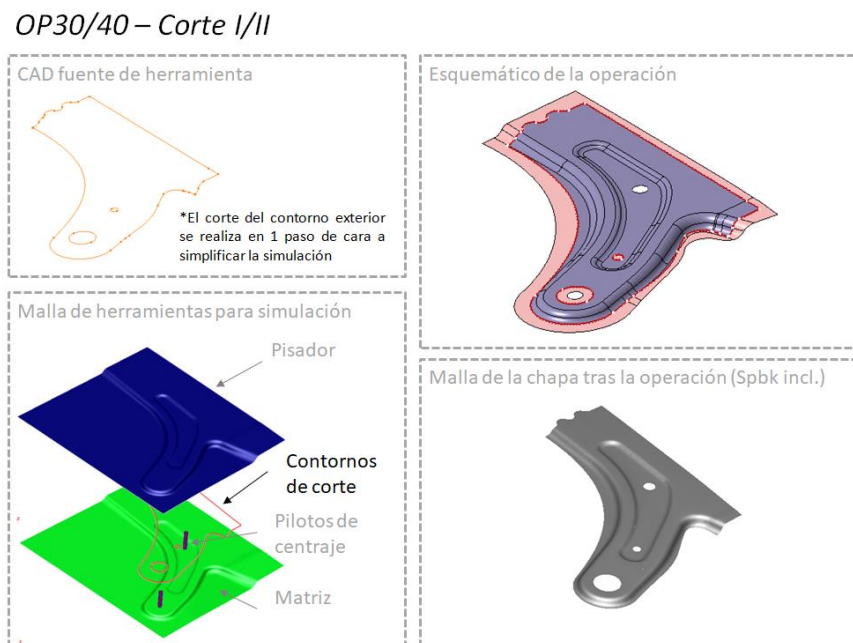


Figura 29. Herramientas y malla de OP30/40 – Corte I/II

La cuarta operación, OP50 – Abocardado, sirve únicamente para doblar el cuello de la parte posterior del brazo. Antes del doblado, tiene una etapa de pisado.

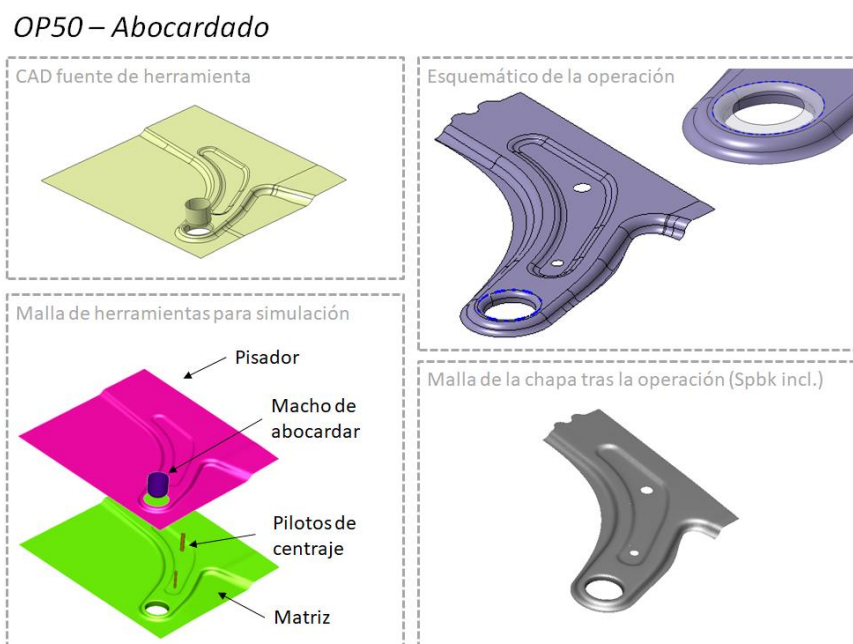


Figura 30. Herramientas y malla de OP50 - Abocardado

En la quinta operación, OP60 – Doblado, se pliegan las alas exteriores de la pieza. En este instante, toda la forma de la pieza está lograda.

OP60 – Doblado



Figura 31. Herramientas y malla de OP60 - Doblado

Por último, en la sexta operación, OP70 – Corte, se cortan y punzonan las zonas que quedan pendientes tras la consecución de la forma final en la OP60.

OP70 – Corte



Figura 32. Herramientas y malla de OP70 - Corte

3.6.3.2. Configuración del modelo de simulación

El objetivo de esta sección es mostrar los detalles más relevantes de la configuración del modelo de simulación del proceso en PAM-STAMP.

La primera figura mostrada, presenta la vista general de la interfaz de usuario, en la que están todos los comandos para preprocesar, calcular y postprocesar el modelo.

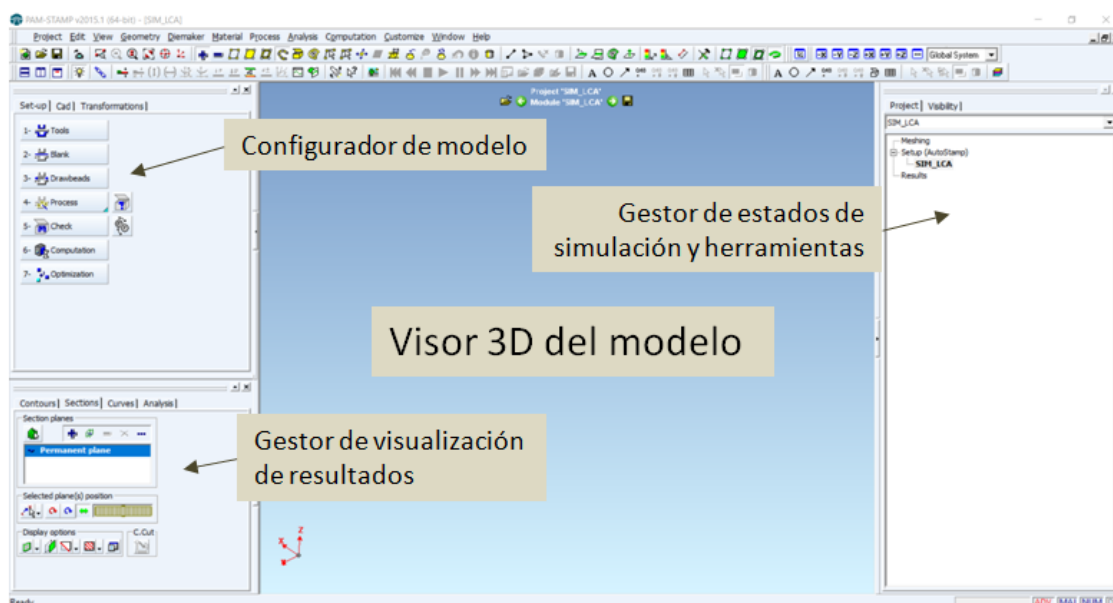


Figura 33. Visualización general PAM-STAMP

Como ya se ha introducido anteriormente, la geometría de las herramientas de cada operación se han generado en CATIA, para después importarse a PAM-STAMP a través del comando mostrado en la Figura 34.

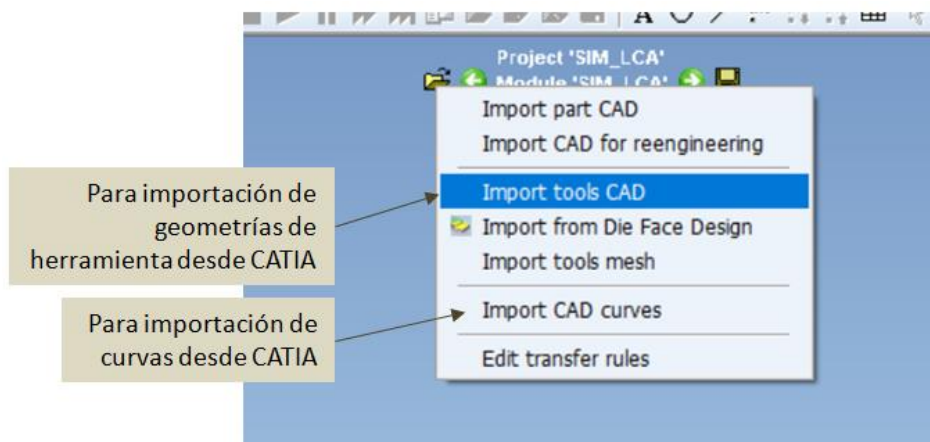


Figura 34. Importación de geometrías y curvas a PAM-STAMP

Mediante el gestor de operaciones mostrado en la Figura 35, se han generado las operaciones planteadas para el proceso. De esta manera se pueden tener ordenadas las distintas mallas de herramientas y configurar de manera ordenada la simulación.

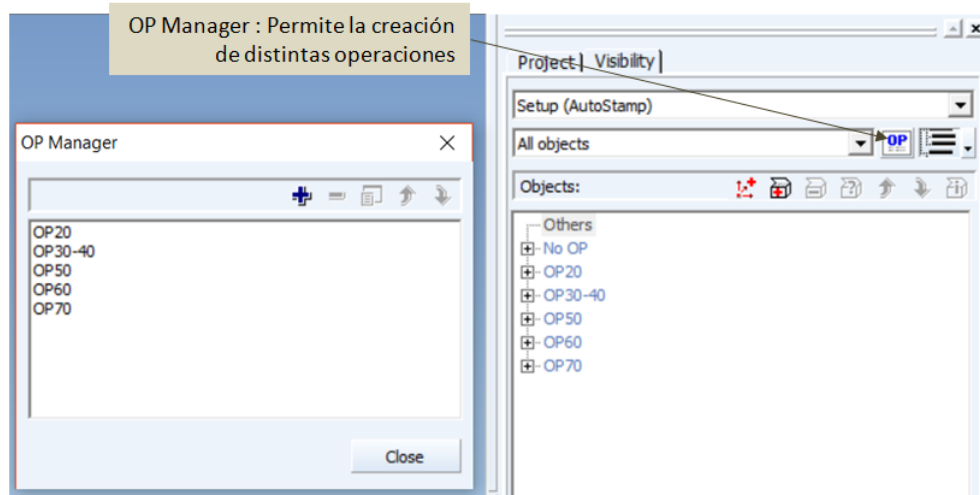


Figura 35. Creación de operaciones en PAM-STAMP

La paleta de configuración del modelo permite generar herramientas y el formato inicial de chapa, configurar los atributos de cada una de los objetos para definir condiciones de contorno, refinamiento, cargas... En primer lugar se configuran las herramientas de todas las operaciones definidas.

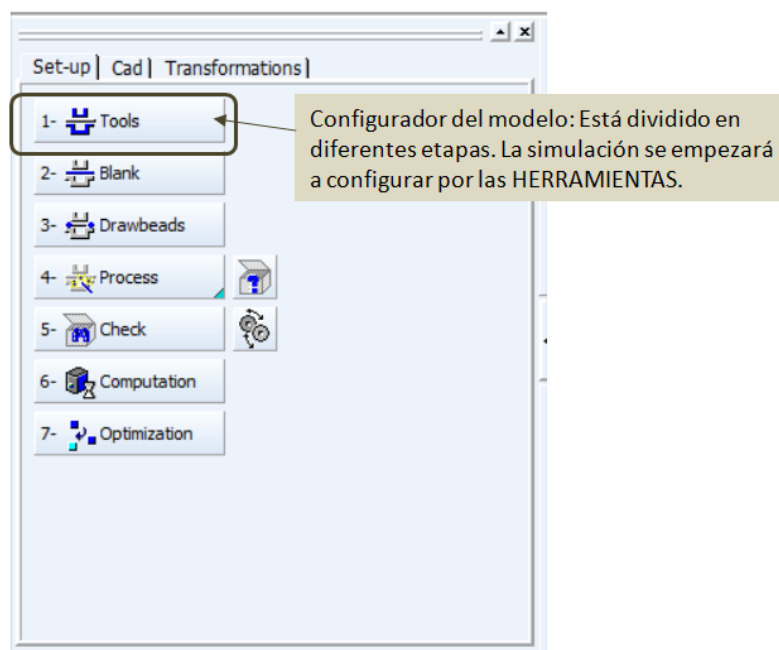


Figura 36. Configurador del modelo en PAM-STAMP

En la Figura 37, se muestra el caso concreto para la primera operación, en la que hay 2 herramientas además de los pilotos de centraje. Se asigna la malla de la geometría importada al objeto correspondiente.

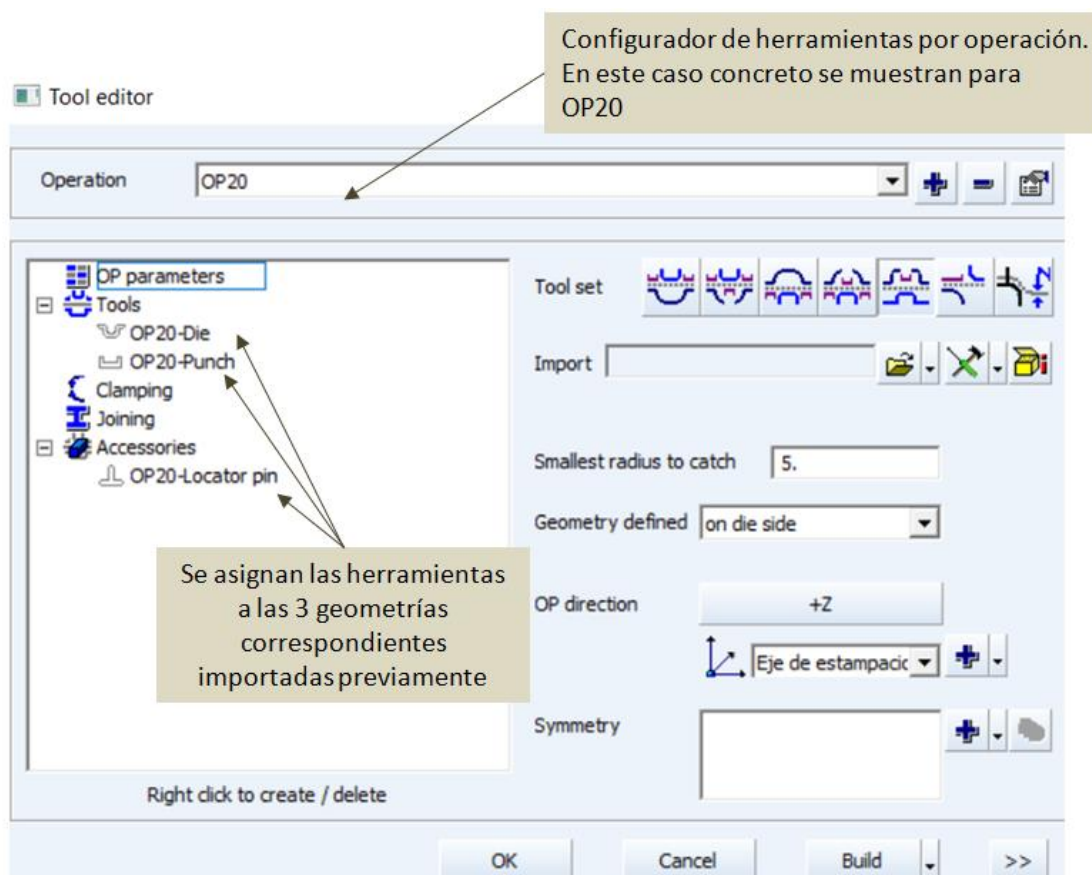


Figura 37. Configurador de herramientas en PAM-STAMP

Adicionalmente, se pueden configurar características como la dirección de estampación en cada operación o parámetros para el criterio de refinamiento.

Para la generación del formato inicial de chapa, es necesario generar un cálculo *inverse* independiente a este modelo. A través de él, es posible obtener una estimación del formato inicial partiendo únicamente de la geometría final de la pieza. Este tipo de cálculo supone el conformado en una operación únicamente, realizando un simple desdoble de alas o aplanado de embutidos interiores. Por lo tanto, será necesario adoptar un exceso de material respecto al resultado del cálculo *inverse*. Sin embargo, permite obtener una referencia rápida de las formas generales necesarias.

En la Figura 38 se muestra la manera de obtener el contorno del formato tras calcular el *inverse*, y en la Figura 39 se muestra la comparativa entre el contorno de esa primera estimación y el resultado final del formato inicial tras las iteraciones necesarias para hacer factible el cálculo en condiciones nominales.

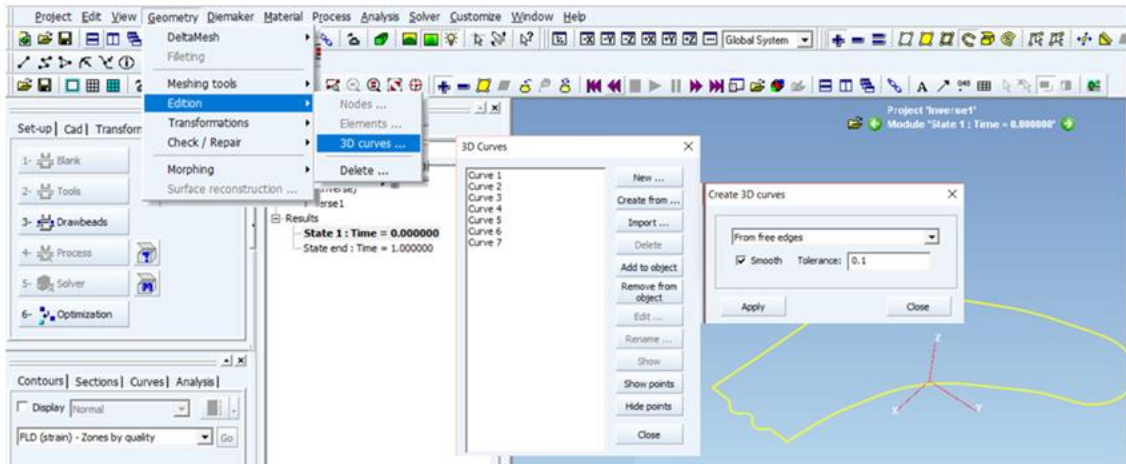


Figura 38. Configuración de *inverse* en PAM-STAMP

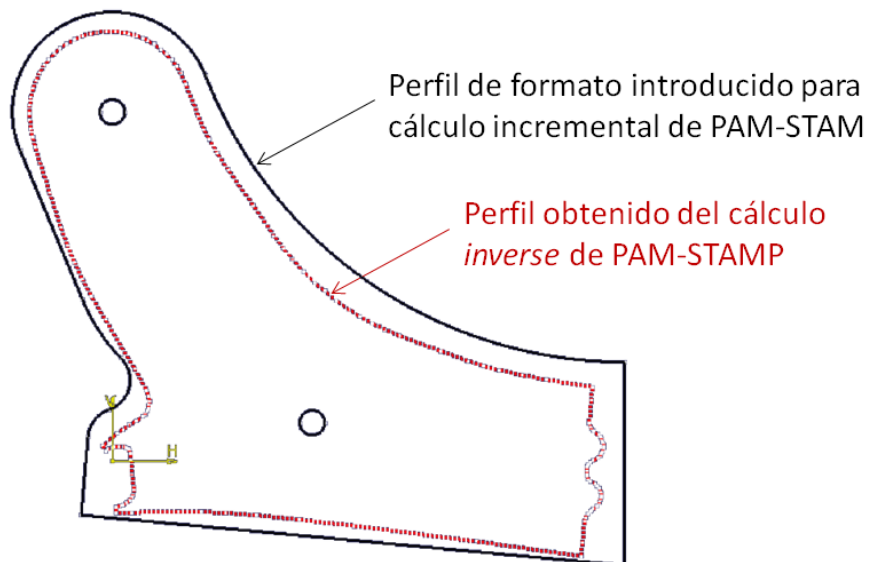


Figura 39. Resultado de perfil de cálculo *inverse* en PAM-STAMP

Una vez está listo el contorno del formato inicial de chapa, se procede a importarlo a PAM-STAMP desde CATIA, y mediante el configurador del formato, se genera la malla inicial del formato siguiendo los parámetros de mallado que se especifican en la Figura 40. Básicamente se trata del tamaño de malla de referencia (6,25mm) y una primera etapa de refinamiento en el borde de la chapa.

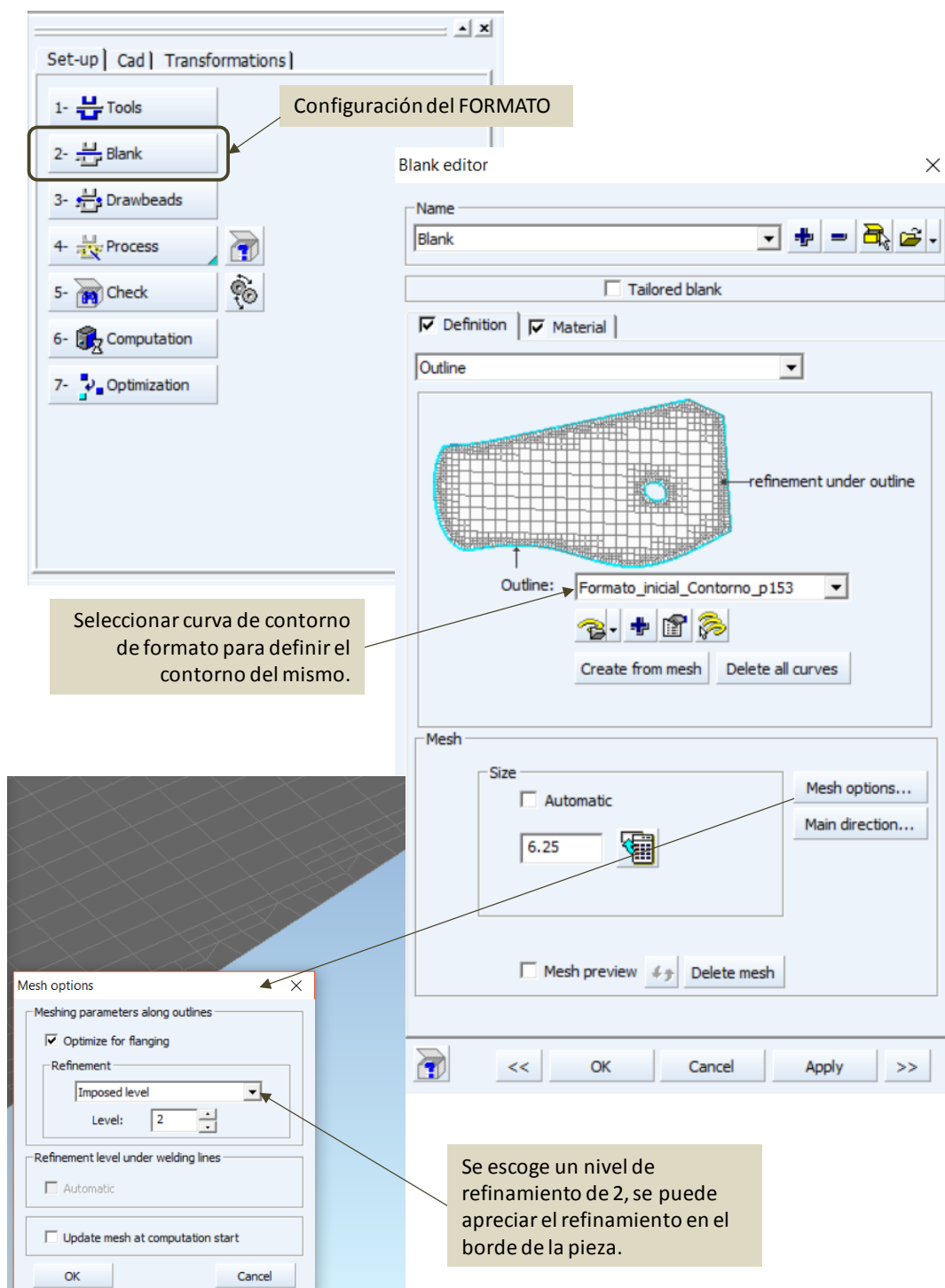


Figura 40. Configuración de formato en PAM-STAMP

En la Figura 41 se muestra el formato inicial tras el mallado con el gestor de formato. Sin embargo, necesitará una preparación adicional para estar listo para el cálculo. Se explica tras la figura.

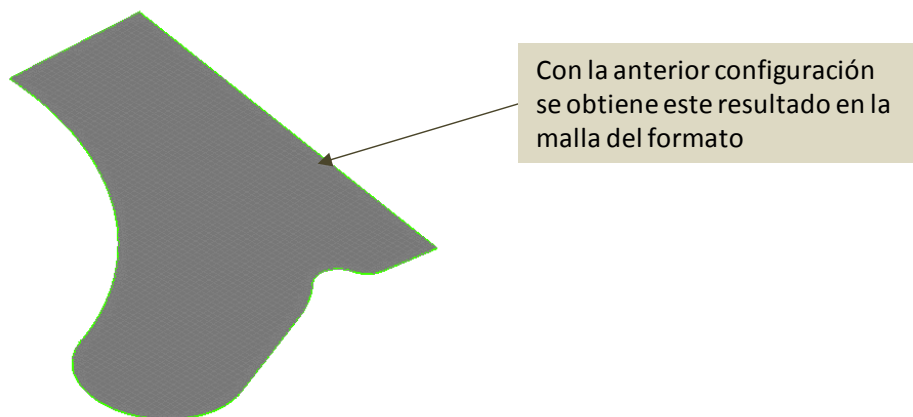


Figura 41. Mallado del formato inicial de la pieza

En los orificios necesarios para alojar los pilotos de centraje, el refinamiento delo borde de nivel 2 no es suficiente porque no discretiza correctamente la circunferencia y tiene un error cordal inadmisible para realizar correctamente el contacto. Por ello, se ha definido un corte adicional al formato ya generado, configurando un nivel adicional en el criterio de refinamiento del borde.

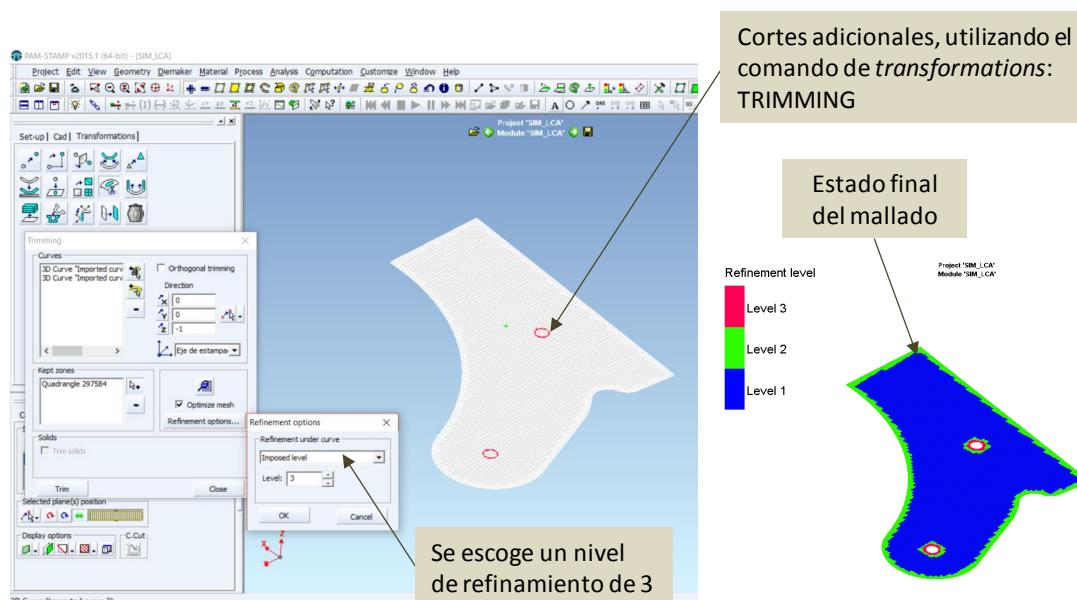


Figura 42. Configuración de cortes adicionales al formato en PAM-STAMP

La elección del material se realiza en el gestor de formato, además de configurar el espesor de chapa deseado.

La configuración de la carta de material es una de las tareas importantes de este estudio, por lo que se explica detalladamente cómo se ha completado en el siguiente apartado (3.5.3.3. Configuración de la carta de material) En la Figura 43 se muestra solamente la manera de importarlo para asignar las propiedades y modelos a la malla del formato inicial.

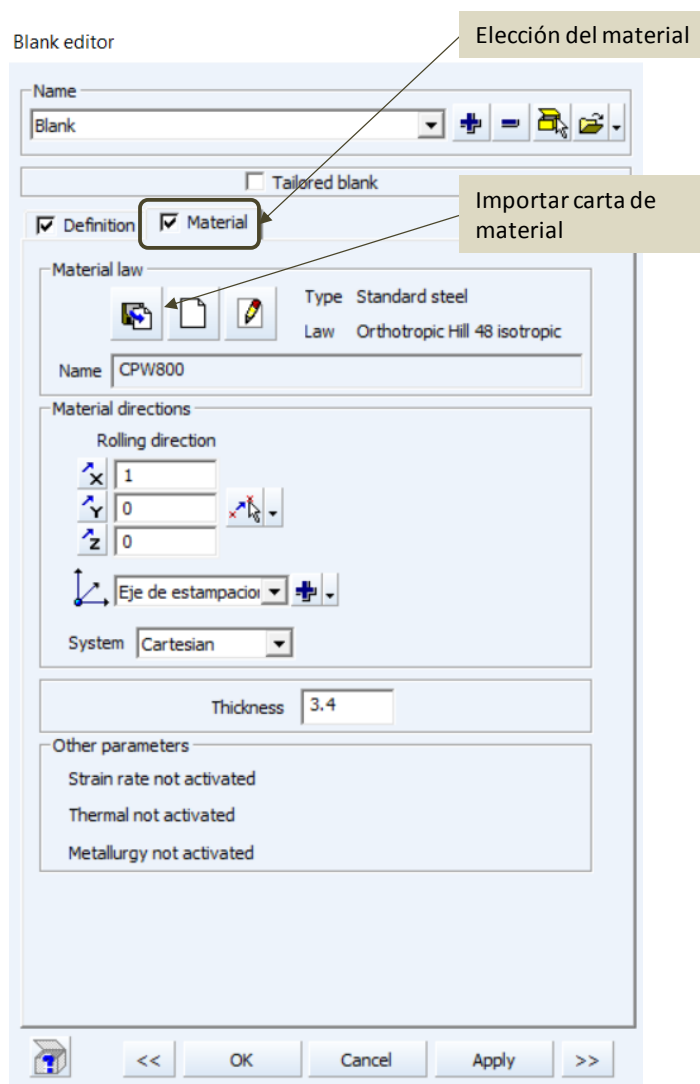


Figura 43. Elección de material en PAM-STAMP

Una vez configuradas las herramientas de todos los procesos y el formato inicial de chapa, es necesario asignar condiciones de contorno, cargas, contactos, refinamiento... además de configurar cortes, posicionamiento inicial de las mallas, criterios de inicio y parada... Las siguientes figuras muestran los detalles de cada uno de los conceptos enumerados.

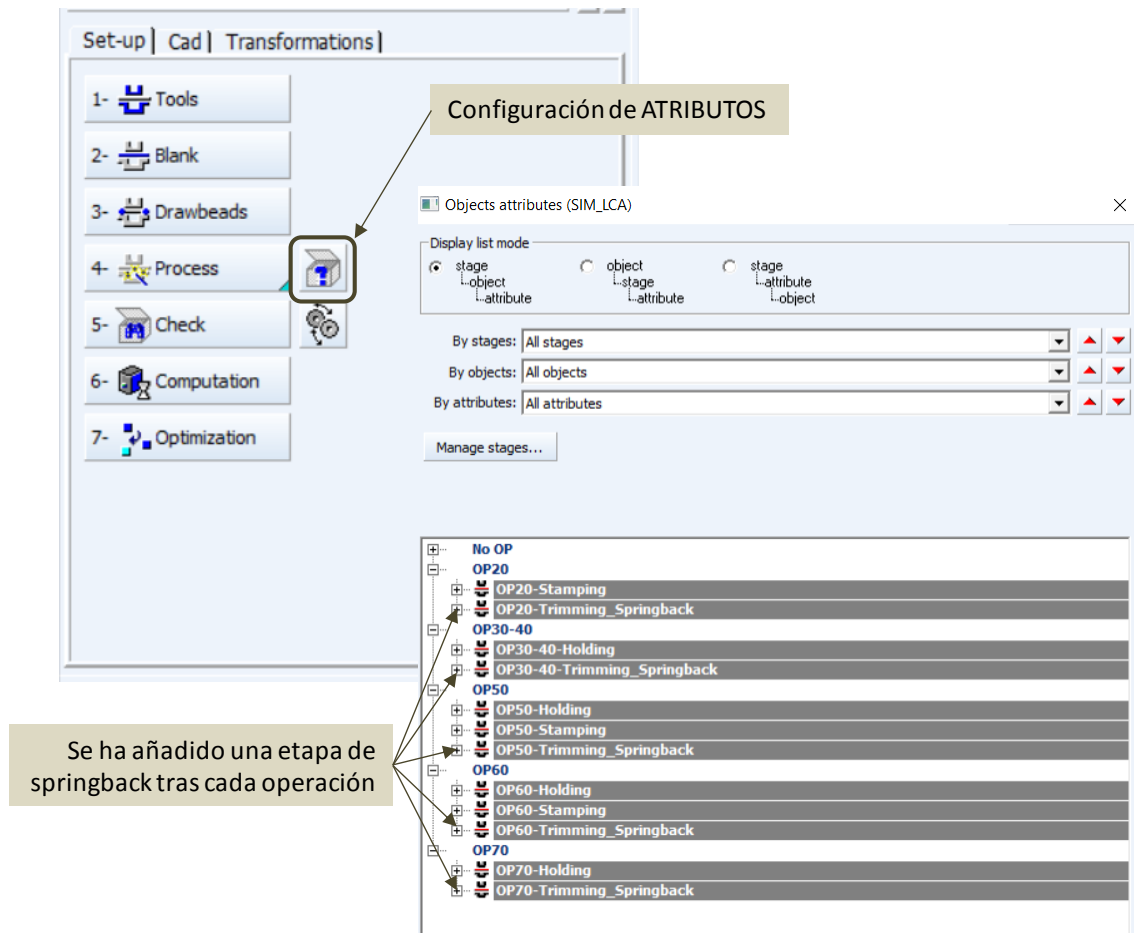


Figura 44. Configuración de atributos en PAM-STAMP

En primer lugar, en la Figura 45, Figura 46 y Figura 47 se muestran las condiciones de contorno y contacto con la chapa para las herramientas de la OP20 – Estampado. Se observa que los pilotos de centraje (*Locator pin*) tienen los mismo atributos que la herramienta inferior (*Die*), porque en la realidad están rígidamente unidos. La herramienta superior es la que tiene una velocidad de traslación impuesta en el eje Z.

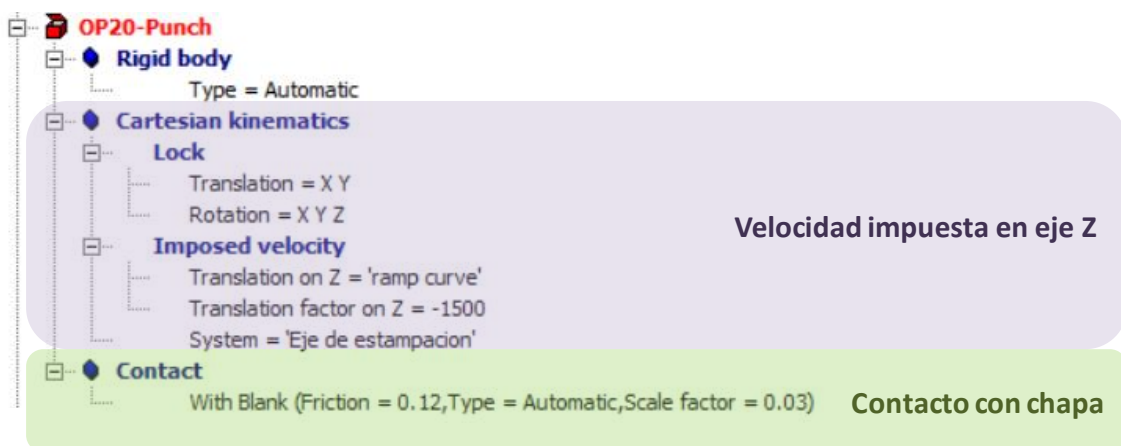


Figura 45. Atributos para punzón en OP20-Estampado

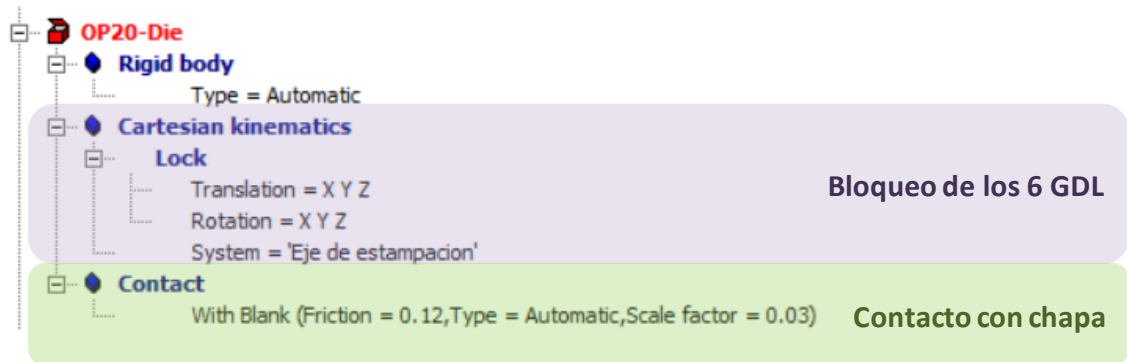


Figura 46. Atributos para matriz en OP20-Estampado

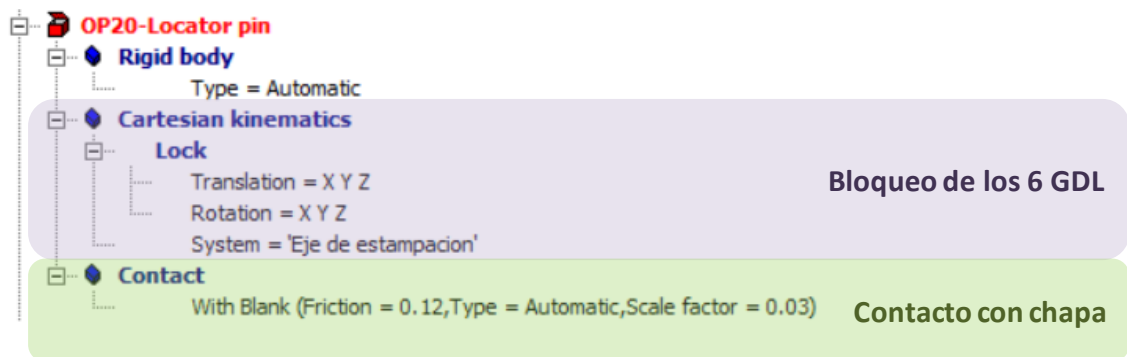


Figura 47. Atributos para pilotos localizadores en OP20-Estampado

Para las tres herramientas mostradas aquí, se define un contacto con el formato con una tribología de coeficiente de fricción 0,12.

En la Figura 48 se muestra el atributo de refinamiento asignado para la primera operación, y que se mantendrá igual en el resto de operaciones.

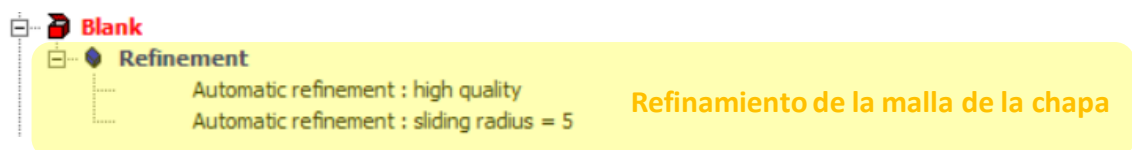


Figura 48. Atributos para formato

Adicionalmente a los atributos de las herramientas y el formato, para toda operación es necesaria una serie de parámetros globales. Destaca el criterio de parada y el posicionamiento relativo inicial de los objetos que toman parte en la simulación. En la Figura 49 se puede ver lo referente a la OP20 – Estampado.



Figura 49. Atributos generales (posicionamiento, criterio de parada)

Al igual que ocurre en la realidad, en el que después de todo conformado hay una recuperación elástica asociada, tras cada una de las operaciones configuradas hay una etapa de *springback*. La configuración se muestra en la Figura 50, y coincide para todas los *springbacks* presentes en el proceso.

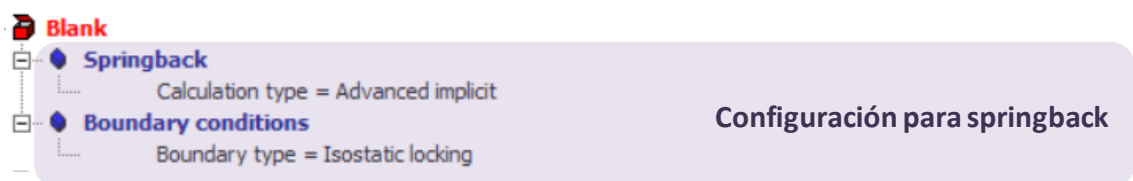


Figura 50. Atributos para *springback* de chapa

De cara a las operaciones de corte que hay durante el proceso, es necesario también configurar la operación mediante los atributos. En la Figura 51 y Figura 52 se muestra el caso concreto del corte exterior de la OP30/40 – Corte I/II. Es necesario importar y seleccionar un perfil de corte, definir la dirección de corte, y muy importante los parámetros de refinamiento si hay operaciones posteriores, como es el caso. El refinamiento en el borde se puede controlar para evitar la distorsión de elementos en transformaciones posteriores, llevando a resultados erróneos.

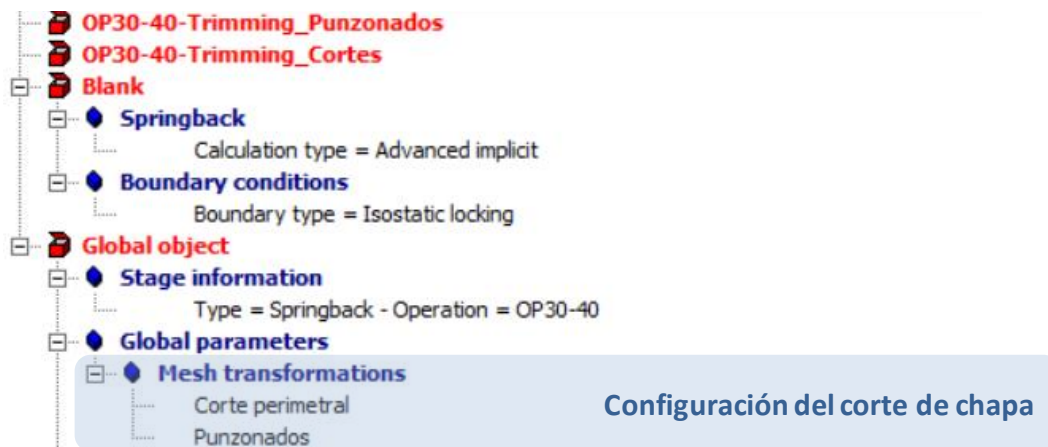


Figura 51. Atributos para configuración de corte de chapa en OP30/40

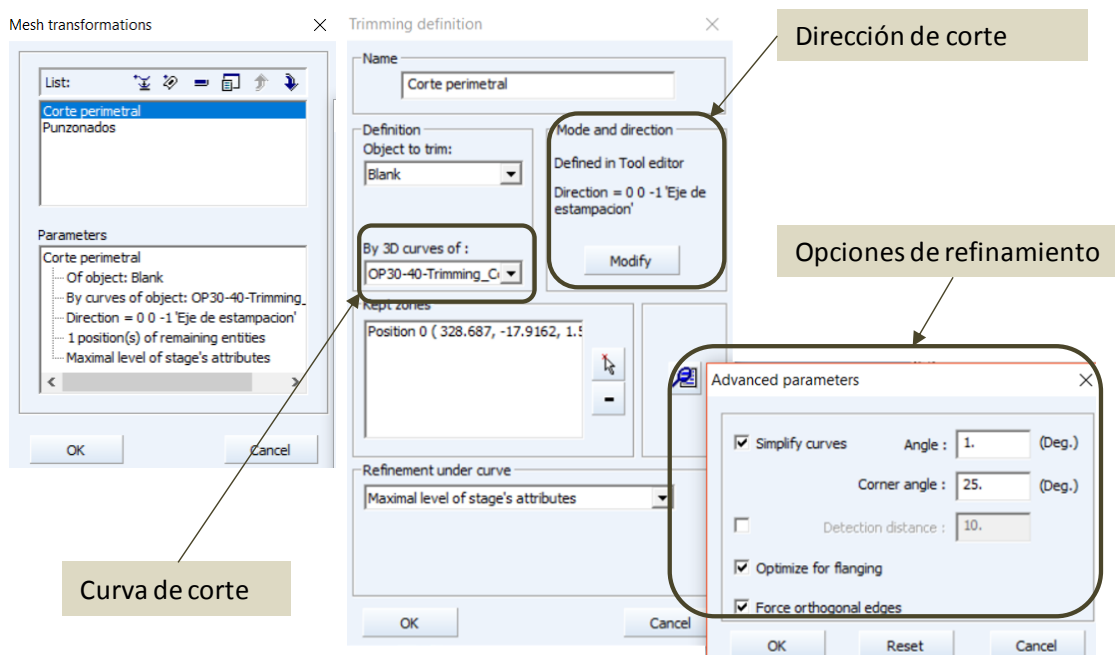


Figura 52. Configuración detallada del corte en OP30/40

Por último en cuanto a los atributos, se muestra cómo se debe configurar una herramienta que actúa de pisador. Además de las propiedades comunes de una herramienta, es necesario añadir una condición de carga con una dirección y magnitud, a la vez que se libera la restricción de traslación en la dirección de trabajo elegida. El caso de la Figura 53 es el pisador de la OP50 – Abocardado.

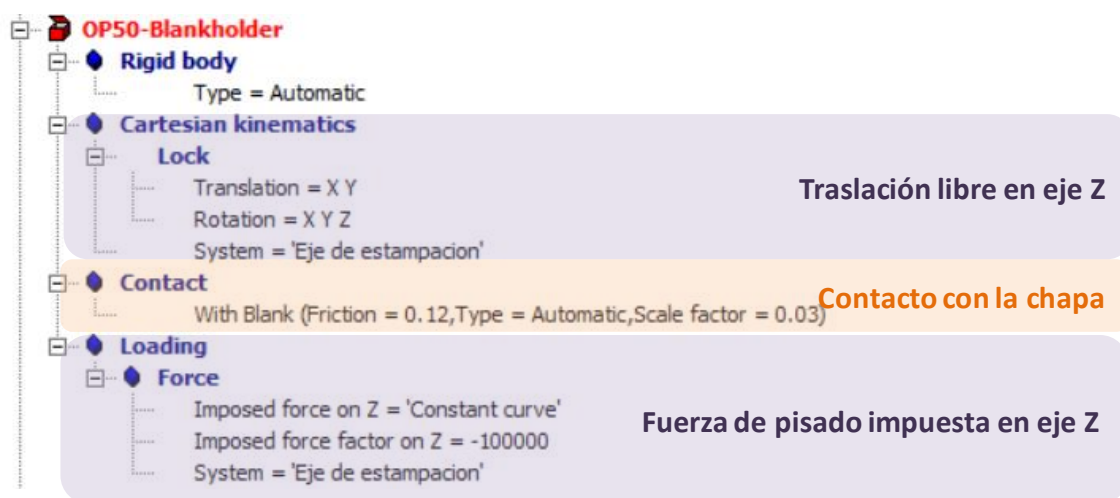


Figura 53. Atributos para pisador en OP50-Pisado

Conviene apuntar que las magnitudes introducidas en PAM-STAMP requieren coherencia en el sistema de unidades, el cual se configura, y debe respetarse para las diferentes variables que se introducen.

Una vez se han configurado las variables del modelo, es posible ayudarse del rastreador de errores de configuración para detectar un error a la hora de la introducción de atributos, o incompatibilidades entre características o modelos.

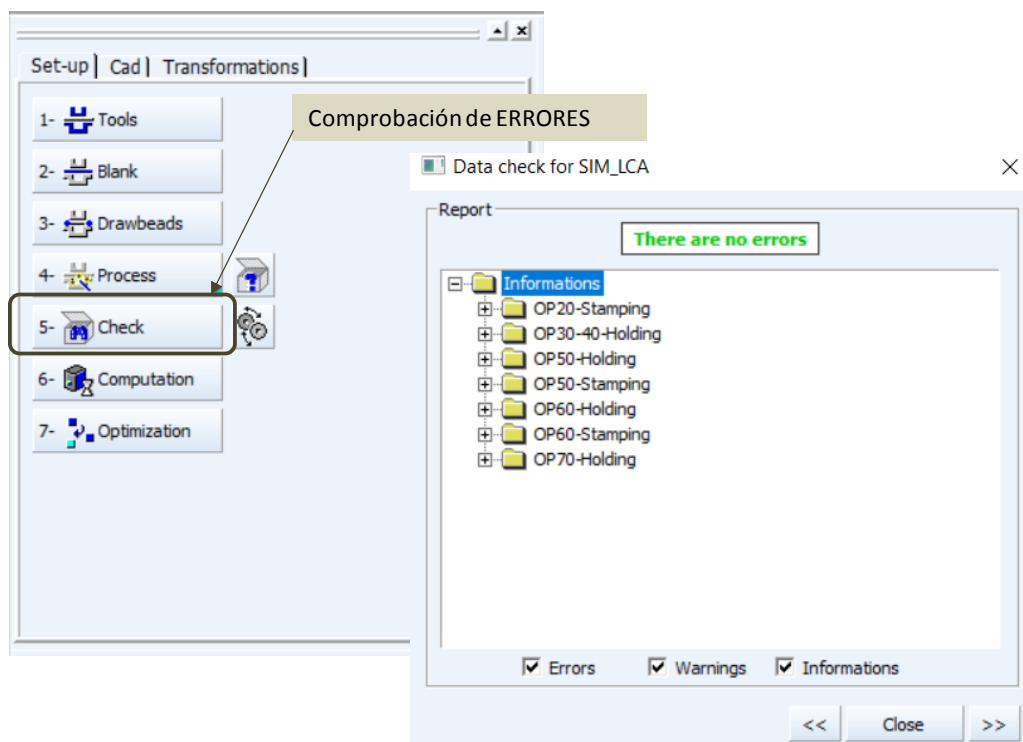


Figura 54. Comprobación de errores en PAM-STAMP

Finalmente, el último paso para lanzar el cálculo es configurar de qué manera el solver de PAM-STAMP gestiona los recursos.

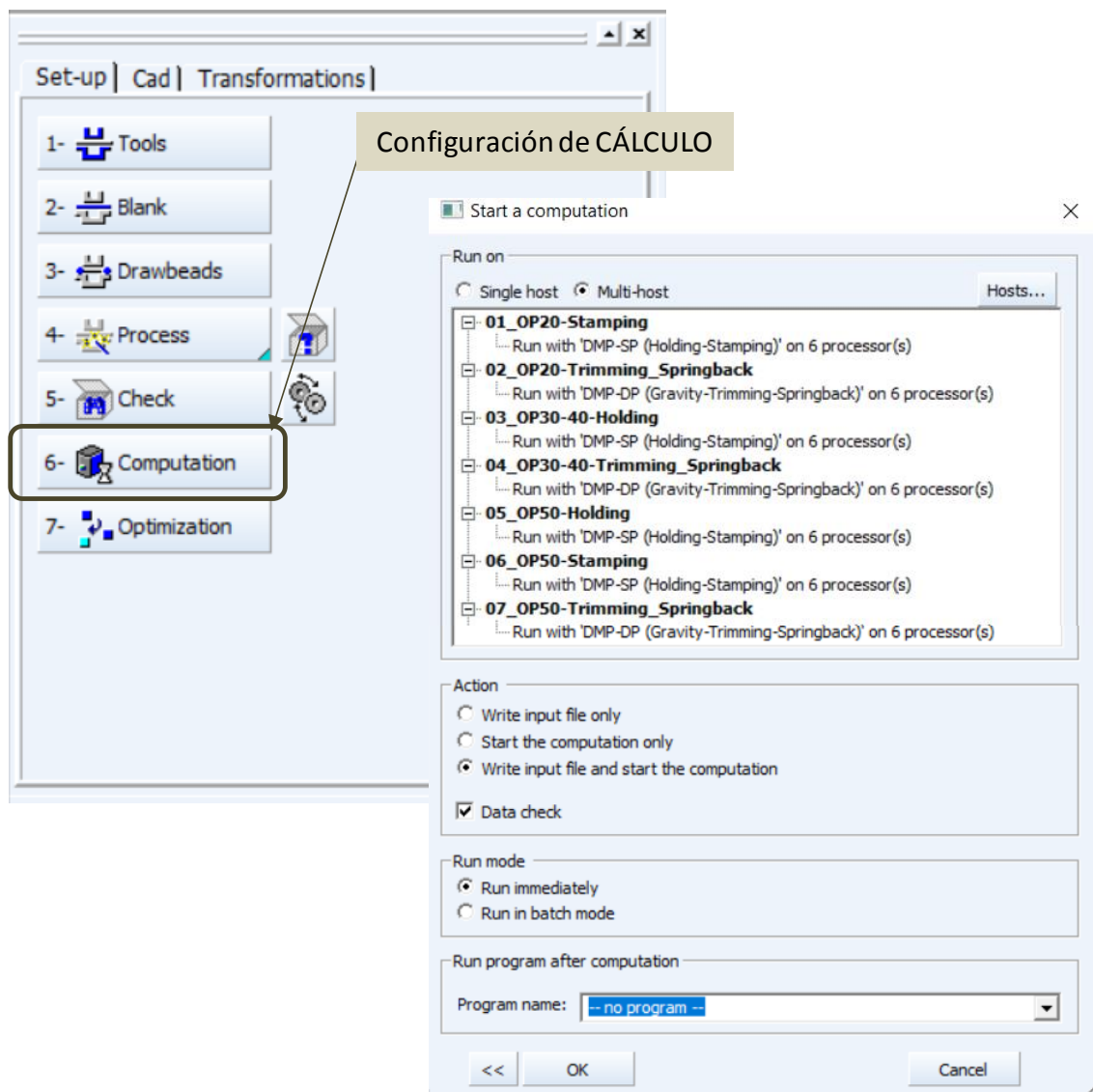


Figura 55. Configuración de cálculo en PAM-STAMP

3.6.3.3. Configuración de la carta de material

1) COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DEL MATERIAL

En este apartado se explica detalladamente el proceso de extracción de la información del ensayo de tracción y FLC del material CP800 provisto por ArcelorMittal, y la configuración de la carta de material necesaria para PAM-STAMP.

Designation and standard

	Euronorms	VDA 239-100
Complex Phase 600	HCT600C (+ZE)	
Complex Phase 800 Y500		
Complex Phase 800 Y600	HCT780C (+ZE,+Z)	CR570Y780T-CP (-UNC,-EG,-GI)
Complex Phase 1000		
Complex Phase 1000 SF	HCT980C (+ZE)	CR780Y980T-CP (-UNC,-EG)
Complex Phase 1000 Y800	HCT980C (+Z)	CR780Y980T-CP (-GI)
Complex Phase 750	HDT750C (+Z)	
Complex Phase 800 SF	HDT780C (+Z)	HR660Y760T-CP (-UNC,-GI)
Complex Phase 1000	HDT950C (+Z)	

Figura 56. Designación según estándar para aceros Complex Phase (Fuente: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/>)

En la Figura 57 se muestran los valores garantizados por la Norma ISO para una probeta de chapa de 20x80 en temperatura ambiente. Mediante este documento Arcelor asegura que el valor de la tensión de fluencia del material estará dentro del margen de 680-830 MPa y que la tensión última del material será siempre menor o igual a 780 MPa.

Guaranteed values for ISO 20x80 specimen of uncoated sheet in the strip center at ambient temperature

	YS (MPa)	UTS (MPa)
Complex Phase 600*	360 - 440	600 - 700
Complex Phase 800 Y500	500 - 650	780 - 900
Complex Phase 800 Y600	600 - 700	780 - 900
Complex Phase 1000	700 - 850	980 - 1200
Complex Phase 1000 SF	780 - 950	980 - 1200
Complex Phase 1000 Y800	800 - 950	980 - 1130
Complex Phase 750	620 - 750	≥ 750
Complex Phase 800	680 - 830	≥ 780
Complex Phase 1000*	800 - 950	≥ 950

Figura 57. Propiedades mecánicas aceros Complex Phase (Fuente: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/>)

Se han importado a un archivo Excel los valores de fuerza y deformación ingenieril de los datos experimentales obtenidos mediante el ensayo de tracción. Con estos valores se han calculado los valores de tensión y se han dibujado gráficamente junto con los de deformación. Obteniendo de esta manera la curva de tensión-deformación ingenieril de la probeta. Posteriormente, se han convertido los

valores ingenieriles a reales utilizando las fórmulas de conversión y se ha dibujado gráficamente de la misma manera.

Cabe destacar que los valores convertidos a real a partir de la tensión última (856,97 MPa) no se tomaran en cuenta debido al estrechamiento de la sección. El valor de la tensión de fluencia es de 686,01 MPa.

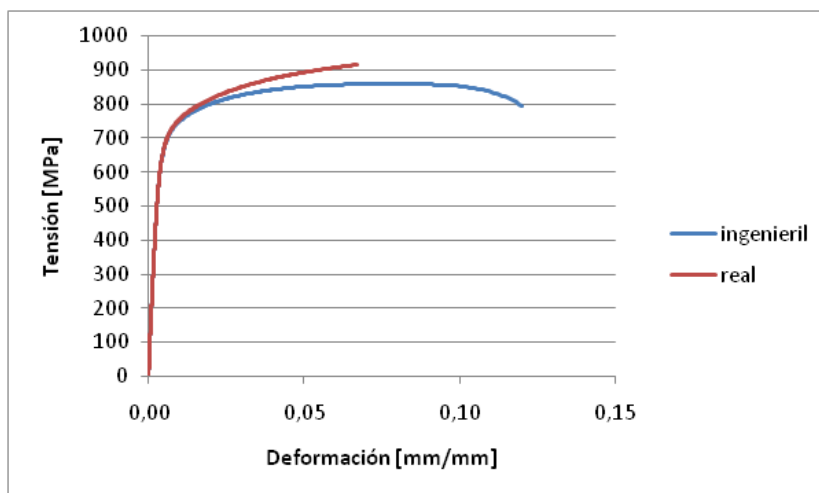


Figura 58. Curvas de tensión-deformación ingenieril y real

En los software de estampación, la introducción de datos de los valores de tensión-deformación se hace distinguiendo los valores de la zona elástica de la plástica. Por lo tanto los datos de deformación plástica se deben suministrar partiendo desde cero tal y como se aprecia en la siguiente figura. Para obtener estos valores, se ha restado el valor que toma la deformación en la fluencia a todos los valores de deformación en zona plástica.

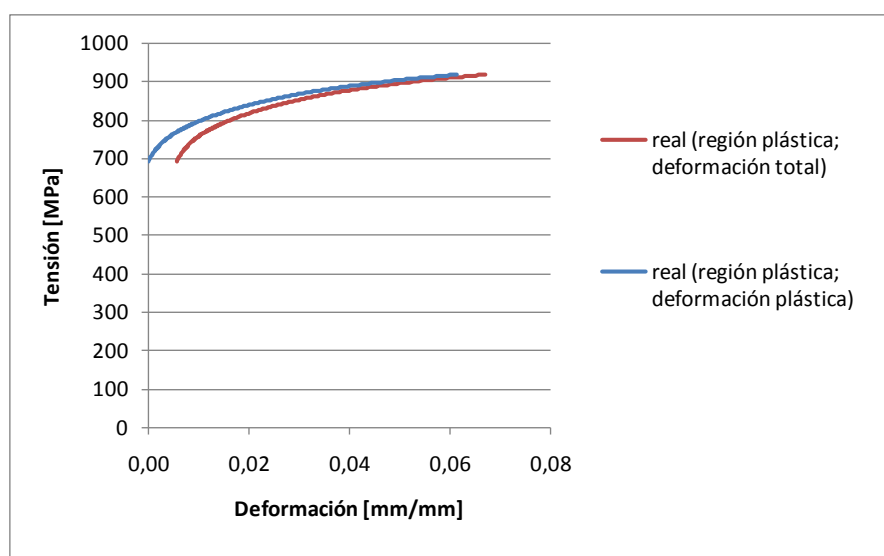


Figura 59. Región plástica de la curva de tensión-deformación real

Además, es necesario introducir en PAM-STAMP las características elásticas del material que también se obtienen de Arcelor. Entre ellas el Módulo de Young (E) de valor $2 \cdot 10^5$ MPa y el coeficiente de Poisson (ν) de valor 0,3.

```
*****
ENGINEERING PROPERTIES
*****
Elastic Modulus (MPa)           = 200000
```

Figura 60. Módulo elástico del material (Fuente: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/>)

Dentro de las características mecánicas del material falta definir la densidad del mismo, es decir $\rho=7860$ kg/m³. Para mantener coherencia con el sistema de unidades utilizado en la configuración de la simulación, el valor introducido será de $7.865 \cdot 10^{-9}$.

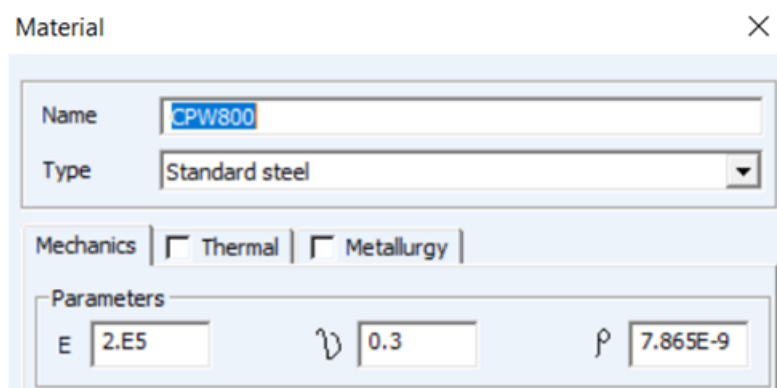


Figura 61. Características elásticas del material CP800 (Fuente: Captura PAM-STAMP)

2) CURVA DE ENDURECIMIENTO

Tras la separación de datos, se han utilizado diferentes modelos matemáticos para extrapolar la curva de tensión-deformación real. Esto se debe a que en la estampación se dan valores de deformación más altos de los que se pueden obtener en un ensayo de tracción.

Por lo tanto se han introducido las diferentes fórmulas:

Swift/Hollomon

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n$$

Power-law

$$\sigma = YS + K \cdot \varepsilon_p^n$$

Krupkowsky

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n$$

Kinematic

$$\sigma = \sigma_0 + R_{sat} \cdot (1 - \exp(-C_r \cdot \varepsilon_p))$$

Hockett-Sherby

$$\sigma = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_i) \cdot e^{-a\varepsilon_{pt}^p}$$

Se han extendido los valores de deformación plástica real hasta 1mm/mm (100%) y se han introducido diferentes valores para las variables de los modelos matemáticos.

Con la ayuda del Solver de Excel se ha logrado que cada modelo matemático se ajuste lo máximo posible a la curva experimental, para ello se han introducido condiciones y limitaciones para conseguir los valores más correctos para cada variable.

Una vez ajustadas todas las curvas, y dando un vistazo general no se puede descartar ningún modelo matemático.

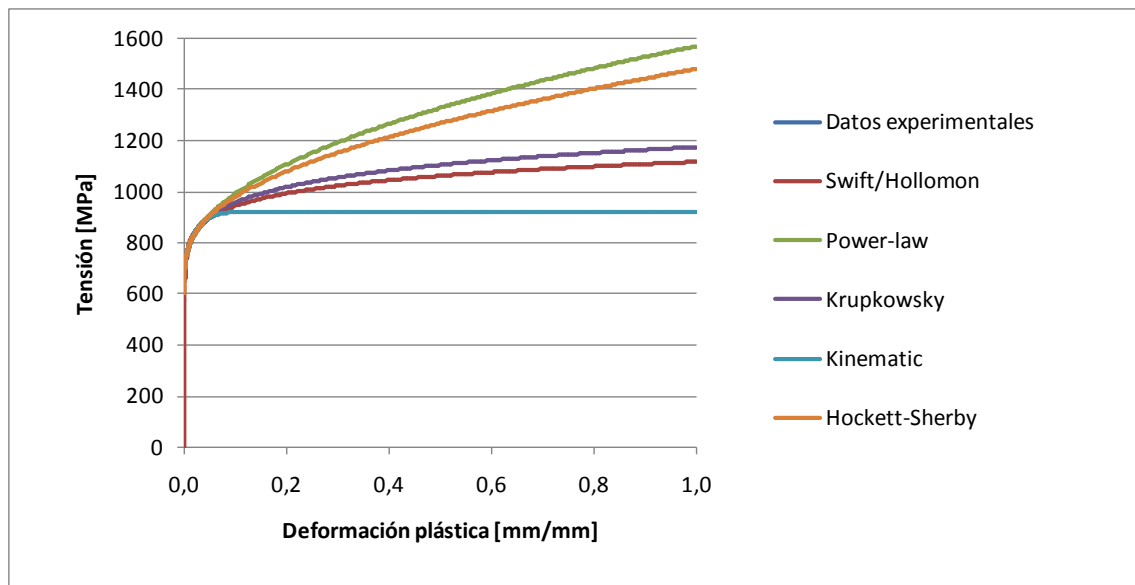


Figura 62. Curvas de endurecimiento según modelos matemáticos

Es necesario focalizar en el inicio de la deformación plástica para poder apreciar las diferencias. A priori se puede ver cómo los modelos de Swift/Hollomon o Kinematic difieren considerablemente.

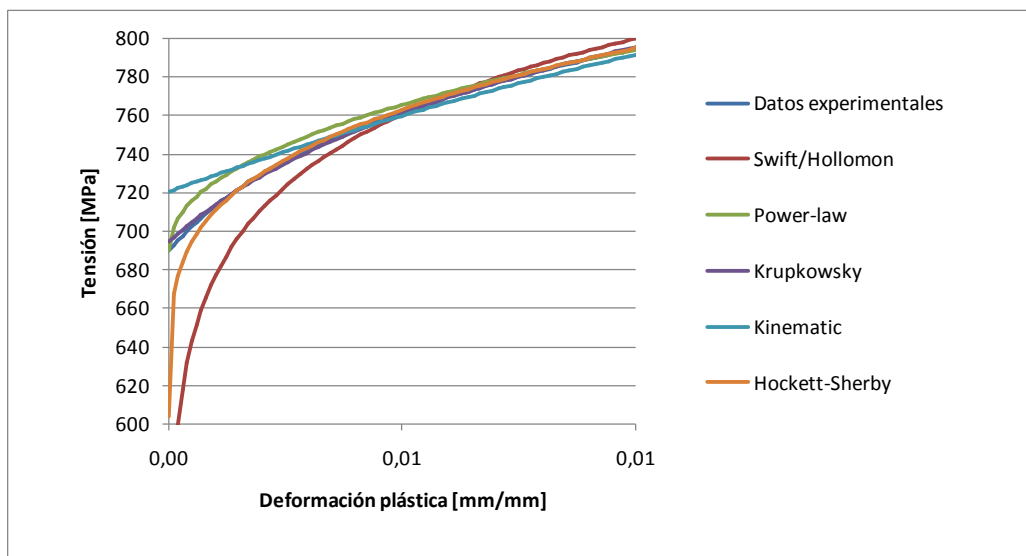


Figura 63. Detalle de curvas de endurecimiento según modelos matemáticos

Para corroborar lo que se expone en la imagen, se ha calculado la diferencia entre la tensión experimental del ensayo de tracción y la obtenida en cada instante para cada modelo y a continuación se han sumado, obteniendo así el error total.

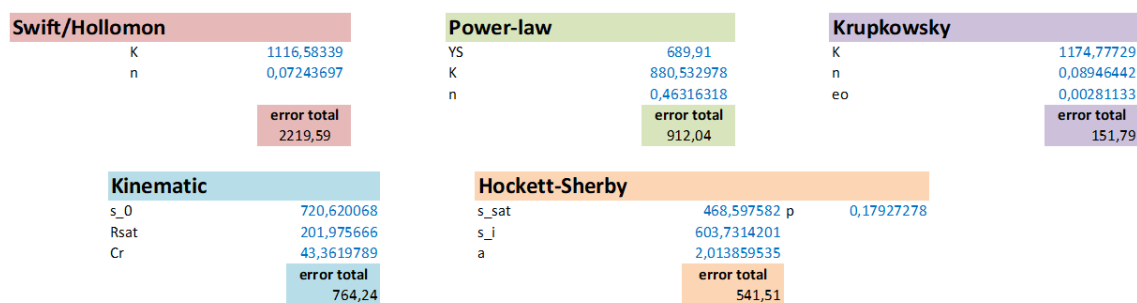


Figura 64. Valores de parámetros de modelos matemáticos de endurecimiento

Modelo	Error
Krupkowsky	151,79
Hockett-Sherby	541,51
Kinematic	764,24
Power-law	912,04
Swift/Hollomon	2219,59

Tabla 1. Error de modelos matemáticos respecto a la curva de tensión experimental

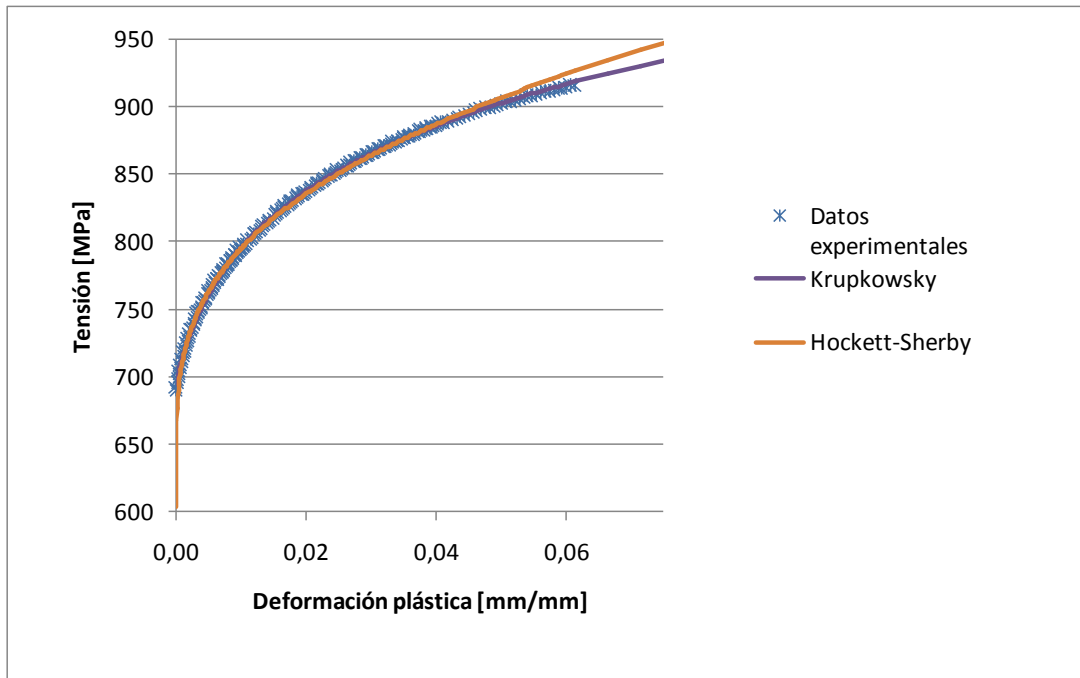


Figura 65. Comparativa entre modelos Krupkowsky y Hockett-Sherby

El modelo que mejor se ajusta a la curva de tensión-deformación obtenida del postproceso de la información experimental del ensayo de tracción es el de Krupkowsky. Usando este modelo se reproducirá fielmente el comportamiento de endurecimiento isotrópico del material.

Se ha seleccionado este modelo fijándose en el error acumulado entre la información experimental y el modelo para los valores de deformación del ensayo de tracción.

Cuando se busque la robustez de proceso, se empleará este modelo para representar la curva del material en la condición más baja y más alta de tensión de fluencia (YS) y tensión última (UTS). En las siguientes imágenes se muestra cómo se ha introducido el modelo matemático de Krupkowsky en la carta de material, junto con las variables previamente definidas en Excel.

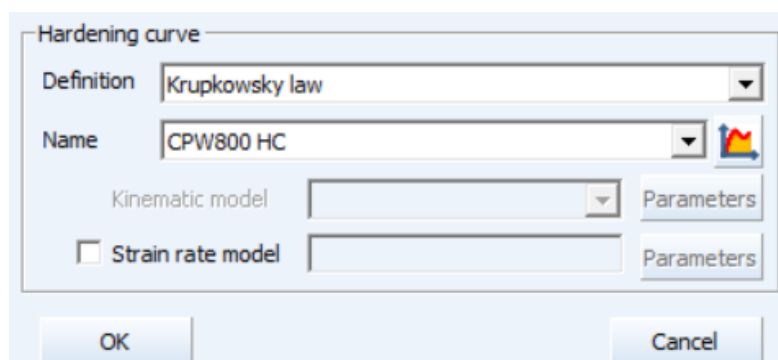


Figura 66. Introducción de modelo de endurecimiento elegido en PAM-STAMP

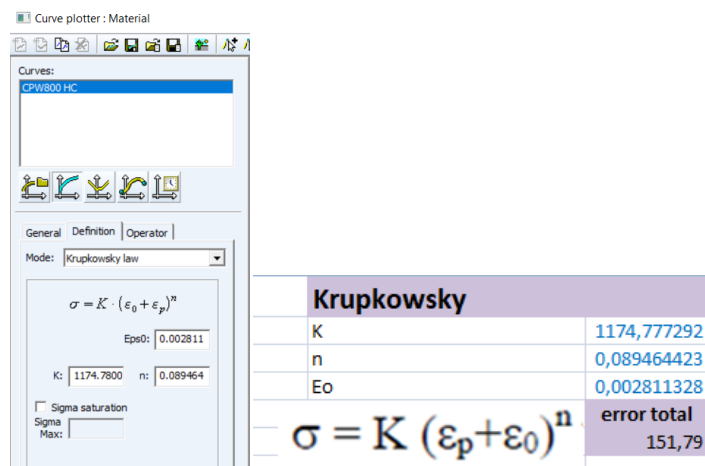


Figura 67. Introducción de variables del modelo en PAM-STAMP

Con estos datos el programa es capaz de reproducir la curva de endurecimiento del material.

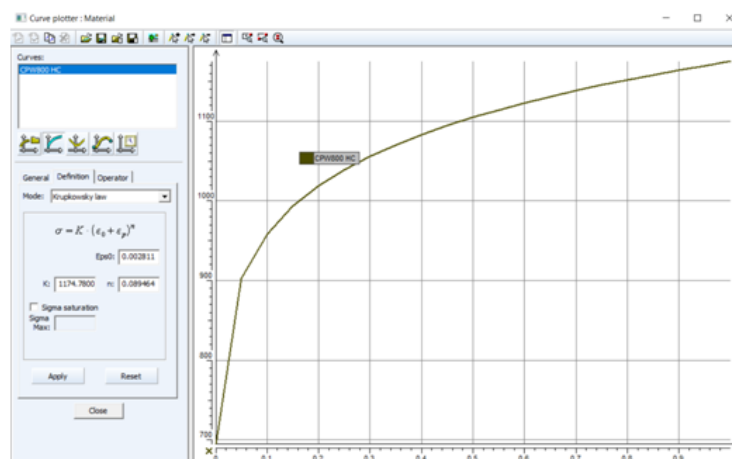


Figura 68. Visualización de la curva de endurecimiento modelizada

3) CRITERIO DE FLUENCIA

Los siguientes datos mostrados, son datos obtenidos de forma experimental mediante ensayos de tracción, para las distintas direcciones de laminación (a 0°, 45° y 90°). Estos coeficientes se consiguen mediante la fórmula que relaciona la longitud y ancho de la probeta durante el ensayo de tracción.

	r	YS
0	0,6	686
45	1,05	728
90	0,75	755

Tabla 2. Valores de anisotropía y tensión de fluencia para las direcciones de laminación a 0°/45°/90°

Para conocer el comportamiento del material en cualquier estado de fuerzas, existen diferentes modelos en los que se introducen estos valores. Entre ellos: Hill, Von Mises, Hosford. Hill es el modelo más utilizado en el ámbito de la embutición y el utilizado en este caso.

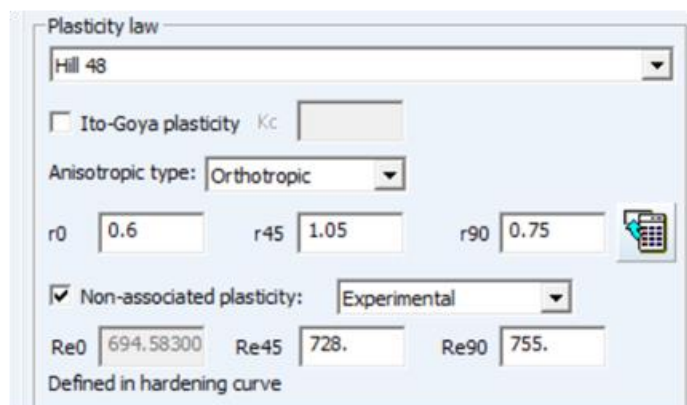
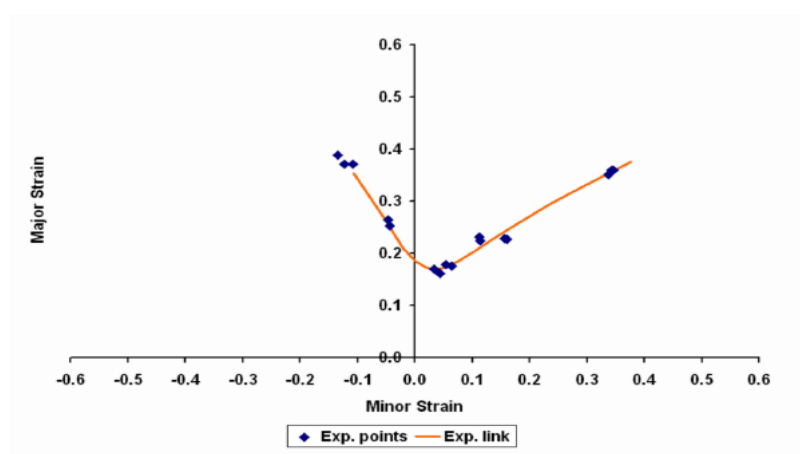


Figura 69. Introducción de valores de anisotropía y tensión de fluencia en PAM-STAMP

De esta manera en el apartado de ley de plasticidad, se introducen los valores de anisotropía y tensión de fluencia en la carta de material del software PAM-STAMP.

4) CRITERIO DE CONFORMABILIDAD

Se toman los datos de las deformaciones obtenidas del ensayo experimental Marciniak/Nakajima (con un punzón de forma semiesférica).



Experimental FLC	UT	WT	PS	BT	EBT
Major Strain	0.33	-	0.17	0.23	0.36
Minor Strain	-0.09	-	0.05	0.14	0.34

Figura 70. Diagrama y valores de FLC (Fuente: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/>)

Para que el software pueda considerar correctamente el fallo de la pieza, se debe introducir una curva definida en el software. Es decir, no es posible introducir todos los valores experimentales directamente, la curva constará de al menos 4 puntos claros. Por ello se debe hacer una media de los valores que estén más cerca los unos de los otros.

Eps1	Eps2
0,33	-0,09
0,17	0,05
0,23	0,14
0,36	0,34

Tabla 3. Puntos definidos para creación de FLC en PAM-STAMP

Se ha creado una nueva curva de límite de conformabilidad (FLC) en PAM-STAMP introduciendo los anteriores valores en las columnas de *abscisa* y *ordinate*.

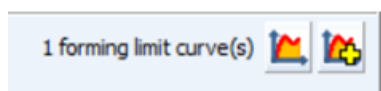


Figura 71. Creación de nueva FLC en PAM-STAMP (Fuente: PAM-STAMP)

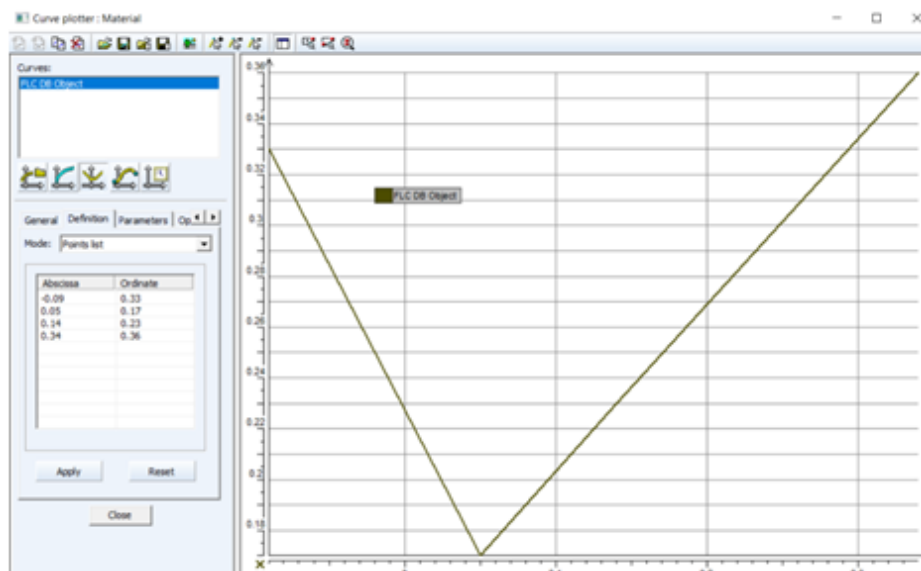


Figura 72. Visualización de la FLC en PAM-STAMP (Fuente: Captura PAM-STAMP)

No obstante, las curvas FLC no caracterizan completamente el comportamiento del material cuando se deforma, ya que a este también le afectan otros parámetros de la operación de conformado como pueden ser las condiciones de los útiles o la lubricación.

Éste sería el resultado final de la carta de material después de haber introducido todos los parámetros necesarios para la caracterización del material.

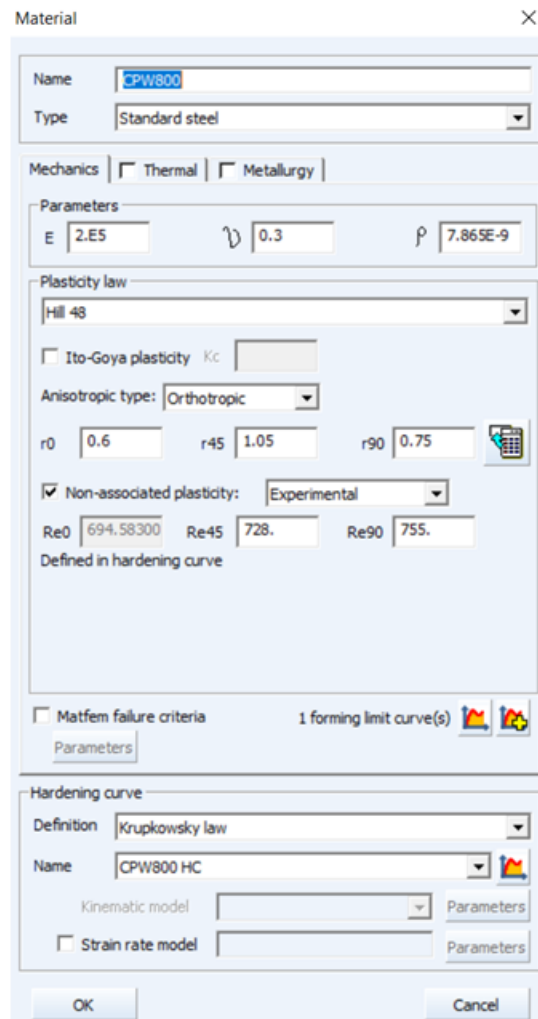


Figura 73. Resultado final de carta de material en PAM-STAMP (Fuente: Captura PAM-STAMP)

3.6.3.4. Parámetros para el análisis de robustez de proceso

En este apartado se detalla los factores de ruido identificados que pueden influir en la factibilidad. Se denominan de “ruido” porque son variables y en muchos casos no totalmente controlables, pudiendo afectar negativamente al proceso. Por ello, es preciso identificarlos y analizar su efecto dentro de la ventana en la que pueden fluctuar, para así poder establecer pautas de control. En la siguiente tabla se muestran los distintos factores identificados, con la correspondiente justificación, además de una indicación de cómo se tiene en cuenta en la simulación, en qué rango se ha analizado y la codificación para poder tener una trazabilidad en los resultados.

Parámetro a variar	¿Por qué estudiarlo?	¿Cómo reproducir en simulación su variación?	Casos	Nomenclatura
Endurecimiento	Variabilidad propiedades de material durante la producción en serie	Modificando los parámetros del modelo matemático que reproduce la curva de tensión-deformación (Krupkowsky)	1.- Curva a máximo endurecimiento según norma (YS830MPa;UTS-)	MAT_ENDUR_MAX
			2.- Curva a mínimo endurecimiento según norma (YS680MPa;UTS780MPa)	MAT_ENDUR_MIN
Espesor de chapa	Porque el acerista puede proveer la chapa con una variación estándar de $\pm 0,15\text{mm}$ durante la producción serie	Modificando el valor de espesor inicial en la simulación y el criterio de cierre de las herramientas (el gap entre herramientas se mantendrá en nominal, y se estudiará el caso de mínimo espesor, por ser el más crítico para la factibilidad)	Nominal -0,15mm	MAT_ESP_MIN
Tribología chapa-troquel	Variabilidad de la rugosidad superficial de la chapa, cantidad de lubricante, rugosidad y estado del desgaste del troquel	Variando el coeficiente de fricción (μ) del modelo de Coulomb	1.- $\mu=0,25$	PRO_LUB_MAX
			2.- $\mu=0,08$	PRO_LUB_MIN
Contorno formato inicial	Tolerancia de las cuchillas de corte del proceso de blanking (desgaste, desajuste)	Offset constante al conorno con el que se genera la malla inicial de la chapa	1.- nominal -1mm	PRO_BLK_MIN_1
			2.- nominal -0,5mm	PRO_BLK_MIN_05
			3.- nominal -0,25mm	PRO_BLK_MIN_025
Contorno cortante OP30	Por el desgaste o desajuste que puedan tener las cuchillas de corte	Offset de la línea de corte en zonas críticas (Tokyo-bay, ala curva)	1.- nominal +1mm	PRO_CORT_MAX_1
			2.- nominal +0,5mm	PRO_CORT_MAX_05
			3.- nominal +0,25mm	PRO_CORT_MAX_025

Tabla 4. Parámetros utilizados en análisis de robustez

Presentada la vista general de los factores a analizar, se explica a continuación cómo se proceder en el análisis. En primer lugar se simulan todos los factores por independiente para conocer la magnitud de su influencia. Se anotan los peores casos para cada uno de los parámetros, y si hay algún caso que conlleve la rotura, se tienen en cuenta para las conclusiones. En segundo lugar, partiendo de las conclusiones de las simulaciones independientes, se generan simulaciones combinadas con los factores analizados previamente. Finalmente, se concluyen los límites admisibles para los rangos analizados de las variables, y se definen los planes de acción necesarios para asegurar la robustez del proceso.

A continuación se procede a explicar cómo se ha reproducido en PAM-STAMP cada uno de los factores:

1) Endurecimiento del material [MAT_ENDUR_MAX/MIN]

Tal y como ya se ha mostrado en un apartado anterior, Arcelor garantiza la provisión de material con las propiedades mecánicas dentro de una ventana. En la siguiente figura se observa que para el CP800, la tensión de fluencia puede fluctuar 680 y 830 MPa, y la resistencia mecánica estará siempre por encima de 780MPa.

Guaranteed values for ISO 20x80 specimen of uncoated sheet in the strip center at ambient temperature

	YS (MPa)	UTS (MPa)
Complex Phase 600*	360 - 440	600 - 700
Complex Phase 800 Y500	500 - 650	780 - 900
Complex Phase 800 Y600	600 - 700	780 - 900
Complex Phase 1000	700 - 850	980 - 1200
Complex Phase 1000 SF	780 - 950	980 - 1200
Complex Phase 1000 Y800	800 - 950	980 - 1130
Complex Phase 750	620 - 750	≥ 750
Complex Phase 800	680 - 830	≥ 780
Complex Phase 1000*	800 - 950	≥ 950

Figura 74. Rango garantizado de las propiedades mecánicas para aceros Complex Phase (Fuente: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/>)

Por la importancia del endurecimiento del material en la conformabilidad y lo expuesto encima, es necesario tener en cuenta esta fluctuación en el análisis.

Para ello, se ha tomado el modelo de Krupkowsky, que ya se había empleado para ajustar la información experimental del ensayo de tracción en condiciones nominales, y se ha ajustado para el caso de mínimas propiedades mecánicas y endurecimiento, y para el caso de máximas propiedades mecánicas y endurecimiento, nombrándolas como MAT_ENDUR_MIN y MAT_ENDUR_MAX respectivamente. Ambas curvas se pueden visualizar en la figura inferior. Conviene apuntar que para el caso de propiedades más altas, se ha considerado una resistencia mecánica proporcionar a partir de la información en nominal y el caso de propiedades mínimas.

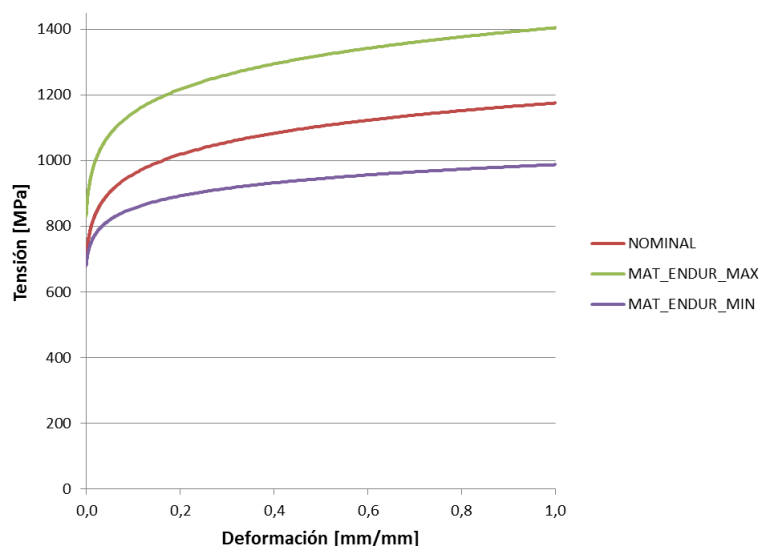


Figura 75. Curvas de máximo y mínimo endurecimiento

Teniendo ambas curvas, se han generado las cartas de material correspondientes para simulación.

2) Espesor de la chapa [MAT_ESP_MIN]

El espesor de la chapa suministrada por el acerista también puede tener cierta variabilidad durante la producción serie. De hecho, la tolerancia de espesor para aceros laminados en caliente, como es el caso del CP800 empleado en este estudio, es de $+0,15\text{mm}$. Sin embargo, gracias a las importantes mejoras en la monitorización y control de los procesos de laminación de los aceristas, aunque exista esa tolerancia, en la práctica se provee chapa con valores de espesor muy estables durante el tiempo.

Para este estudio, se analiza el caso hipotético del comportamiento en caso de espesor mínimo, pero no se considera para el análisis del efecto conjuntamente con otros factores, por la razón expuesta en el párrafo anterior.

En la siguiente figura se puede observar cómo se ha configurado el espesor mínimo de chapa ($3,4\text{mm} - 0,15\text{mm} = 3,25\text{mm}$) a la hora de la generación de la malla del formato inicial de chapa.

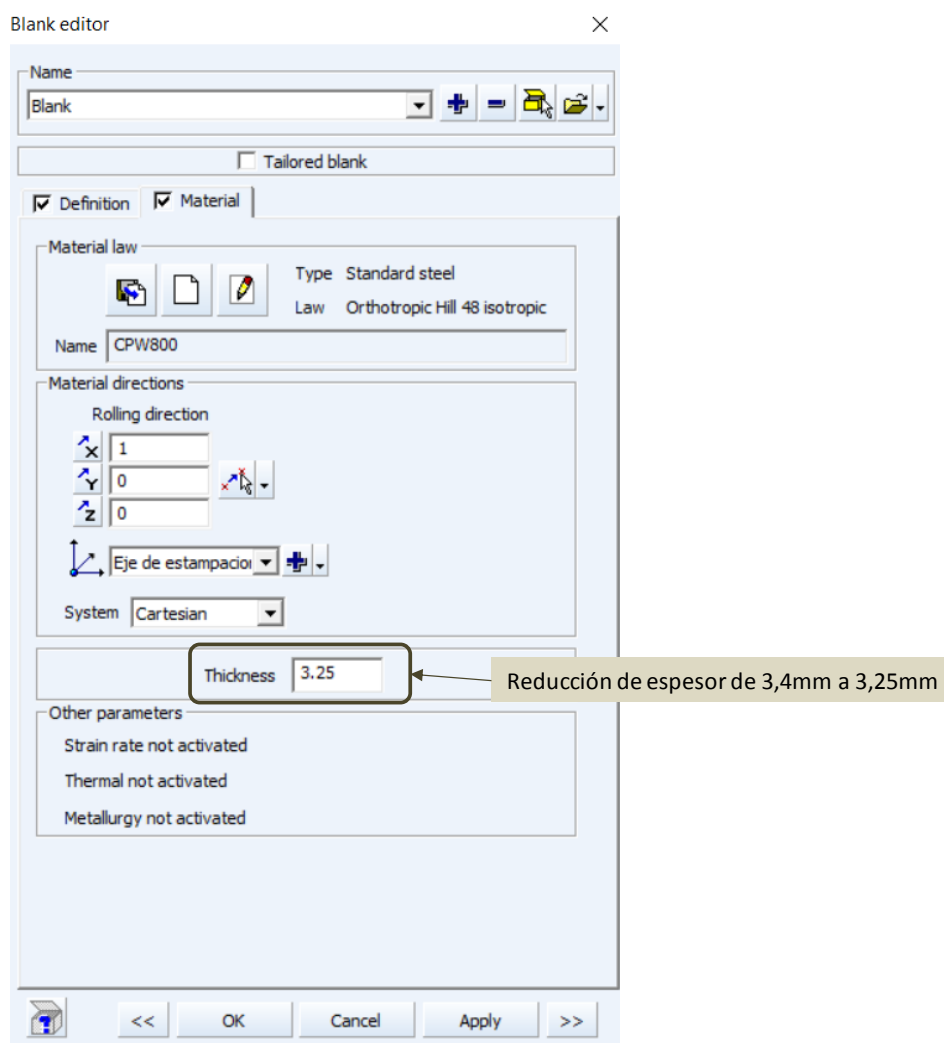


Figura 76. Reducción del espesor del formato en PAM-STAMP

Así mismo, si se analiza qué ocurriría en el caso hipotético de tener una chapa de espesor en tolerancia mínima, se concluiría que el ajuste de la regulación para el gap en el cierre del troquel ajustaría al nuevo espesor con el objetivo de mantener en tolerancia dimensional la pieza. Por ello, la manera de considerar también este efecto en simulación será modificando el criterio de parada, que en vez de tener el cierre según el diseño de CAD a gap igual a espesor nominal, deberá ser 0,15mm inferior, o lo que es lo mismo, permitiendo 0,15mm más de carrera a la traslación en Z de la herramienta superior. Se puede observar en la siguiente figura la configuración descrita.

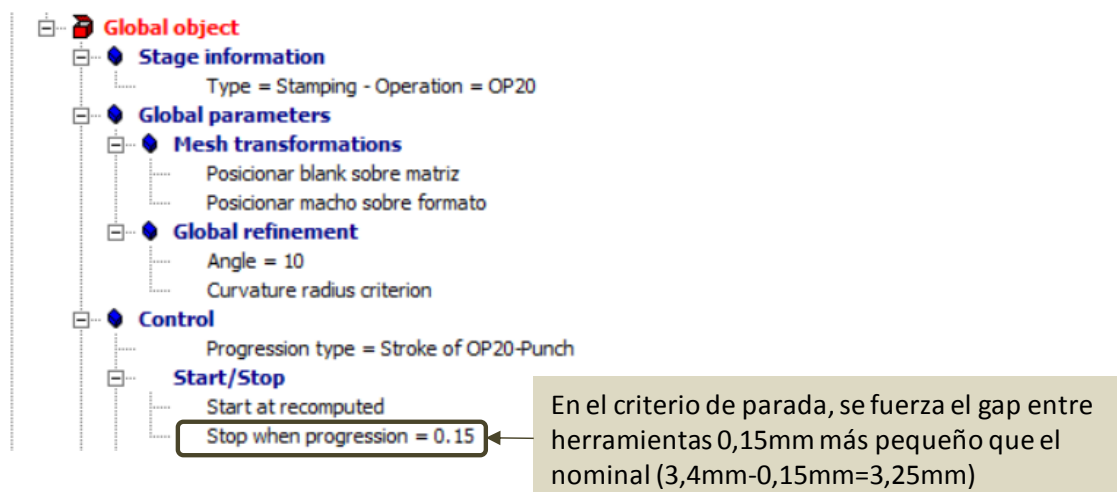


Figura 77. Actualización del criterio de parada para reducción de espesor en PAM-STAMP

3) Tribología chapa-troquel [PRO_LUB_MAX/MIN]

Una correcta modelización de las condiciones de fricción entre la chapa y el troquel es muy importante para una buena reproducción del proceso real y en consecuencia de una valoración de factibilidad realista.

La ley de fricción empleada en este estudio es la Ley de Coulomb, que relaciona la fuerza de restricción tangencial linealmente con la fuerza normal mediante el coeficiente de fricción. Esta ley está ampliamente aceptada en el sector de la estampación, y el valor estándar de coeficiente de fricción para este tipo de aceros es de 0,12. En la siguiente figura se observa cómo se ajusta este parámetro en PAM-STAMP.

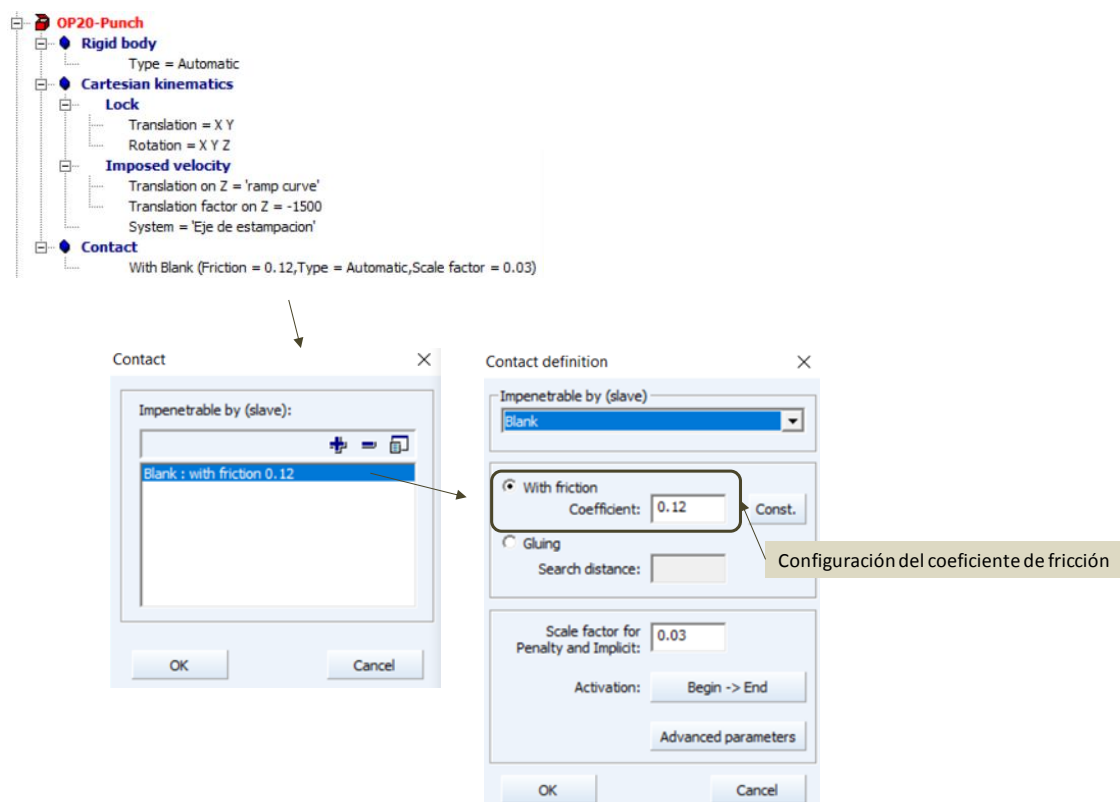


Figura 78. Configuración de coeficiente de fricción en PAM-STAMP

El coeficiente de fricción, además de estar influenciado por la presión de pisado y velocidad relativa del contacto, también se ve afectado por la calidad superficial y nivel de lubricación empleado. En el estudio, se ha considerado una ventana desde 0,08 hasta 0,25, desde condiciones muy favorables hasta las condiciones más desfavorables respectivamente. La codificación para la trazabilidad se muestra en la siguiente figura.

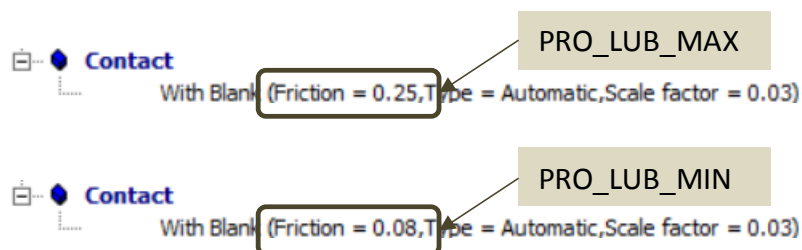


Figura 79. Variación de coeficiente de fricción en atributos de PAM-STAMP

4) Contorno del formato inicial [PRO_BLK_MIN_1/05/025]

En el proceso de blanking, no analizado en este estudio, también pueden darse variaciones que afecten a la factibilidad del proceso transfer. La manera de tener en cuenta estas variaciones debidas a desviación en el ajuste y el desgaste de las cuchillas de corte, es modificando el contorno del formato inicial de chapa. En la siguiente figura se observa una vista de detalle de cómo se ha generado un offset a tres niveles diferentes partiendo del contorno nominal. Esos niveles son 1mm, 0,5mm y 0,25mm, y todos ellos son a disminuir el formato, ya que es la situación que afecta negativamente en la factibilidad, tal y como se ha podido observar durante todas las iteraciones realizadas para lograr la factibilidad en condiciones nominales.

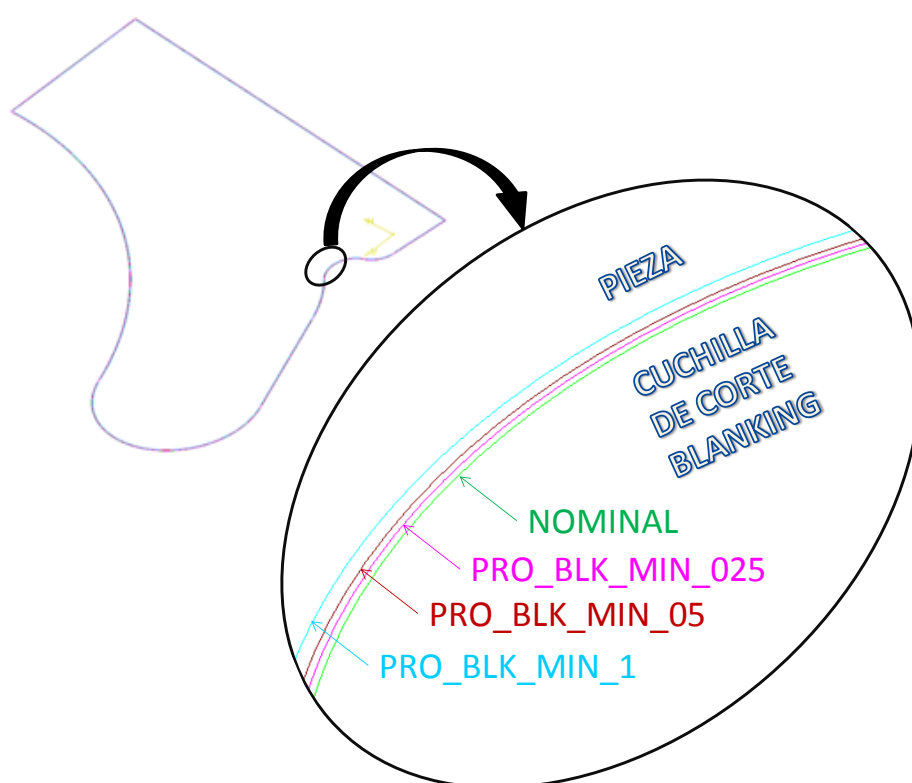


Figura 80. Contornos de formato para variaciones de simulación PRO_BLK_MIN

5) Contorno del cortante de la OP30-40 [PRO_CORT_MAX_1/05/025]

Este caso es similar al anterior, pero esta vez se trata del cortante de la OP30-40 del proceso transfer. Las razones son las mismas: riesgo de desajuste de las cuchillas de corte, y su desgaste. Al igual que antes, se han analizado tres casos (1mm, 0,5mm y 0,25mm de offset), pero esta vez todos a aumentar la superficie de la chapa, ya que es el caso más desfavorable de cara al doblado de la OP60. En la siguiente figura se puede observar la vista de detalle para este caso y la codificación para la trazabilidad.

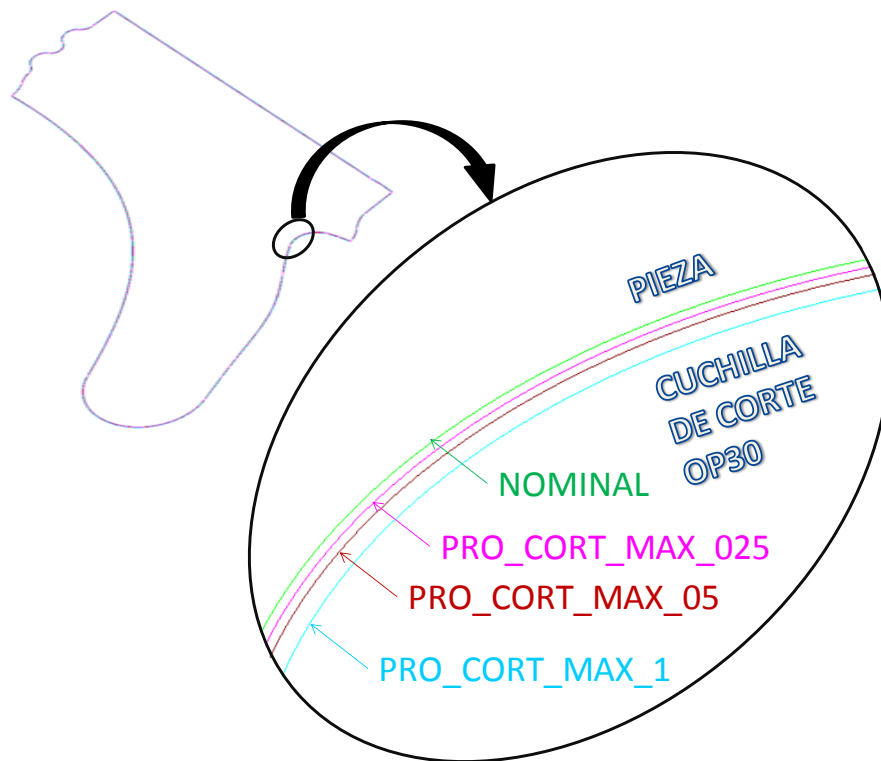


Figura 81. Líneas de corte para variaciones de simulación PRO_CORT_MAX

3.6.4. Procesamiento de datos

En el presente apartado se exponen los criterios de fallo a los que serán sometidos los datos obtenidos de las simulaciones.

Por un lado, el criterio del diagrama de conformabilidad (FLC), principal criterio de fallo utilizado en la industria para predecir el fallo por estricción. En la Figura 82 se muestra la curva límite de conformabilidad, previamente introducida en la carta de material de PAM-STAMP. En caso de que alguna combinación de deformaciones de los elementos de la malla de la pieza sobrepase esta curva, se considerará el fallo en la pieza. Es decir, toda la región de debajo de la FLC será zona segura, mientras que la superior será zona de fallo de la pieza.

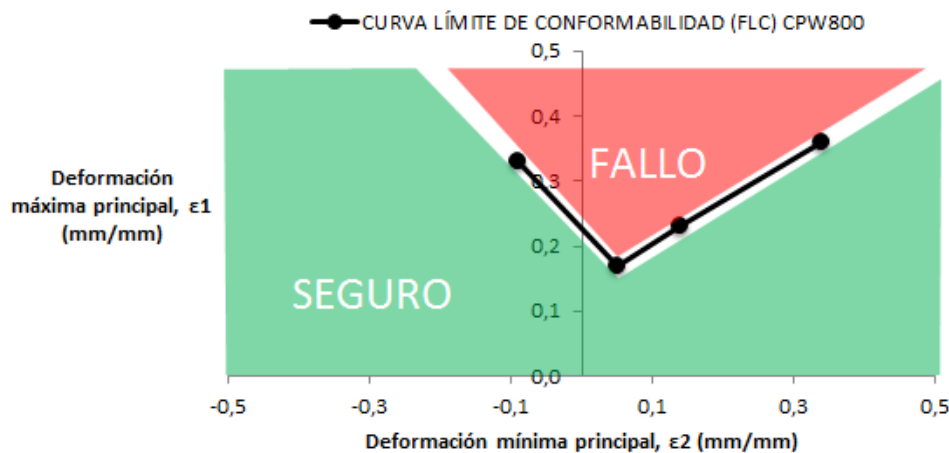
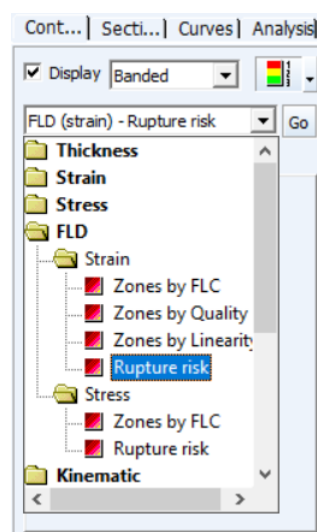


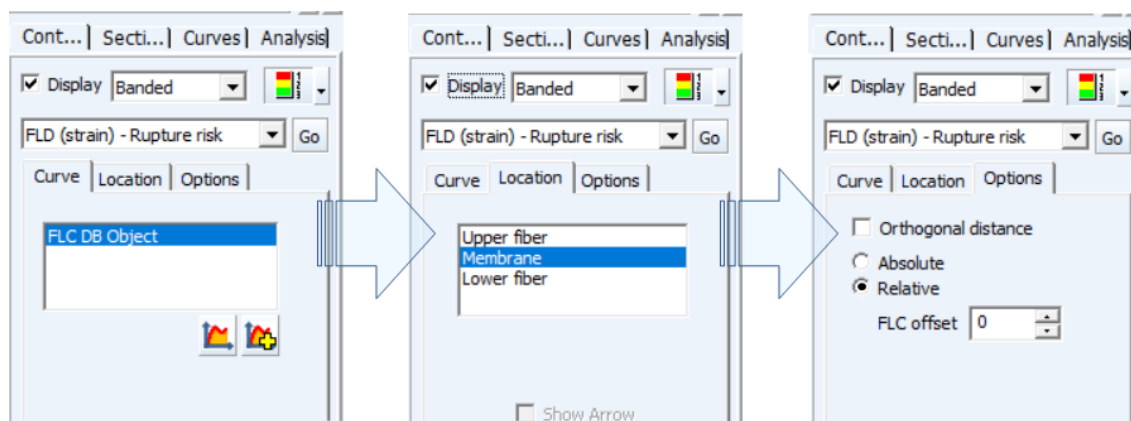
Figura 82. Criterio de fallo FLC empleado

El gestor de visualización de resultados de PAM-STAMP permite configurar este criterio. De la siguiente manera, configurando la variable *Rupture Risk* para FLD, el software indicará mediante un porcentaje cuan cerca del fallo se encuentra la pieza. Siendo 100% la probabilidad total de rotura.



83. Figura. Gestor de visualización de resultados en PAM-STAMP

Ésta variable debe medirse en la fibra intermedia de la pieza a estudio, para ello se selecciona la opción de *Membrane* en la pestaña de localización. En la pestaña de opciones, se selecciona *Relative*, de esta manera se seguirá el criterio explicado anteriormente, siendo 100% la aparición de fallo de la pieza. No se creará ningún offset de la curva de conformabilidad debido a que los márgenes de seguridad del acerista se consideran suficientemente conservadores.



84. Figura. Configuración de FLD – Rupture Risk en PAM-STAMP

Por otro lado, se cuenta con el criterio de fallo de adelgazamiento. Se considera que se da el fallo si el espesor de la pieza tras el proceso de conformado se reduce en más del %25. La región entre el 2,72 y 2,55mm de espesor se considera de riesgo, pero aceptable siempre que la estricción no excesiva sea localizada.

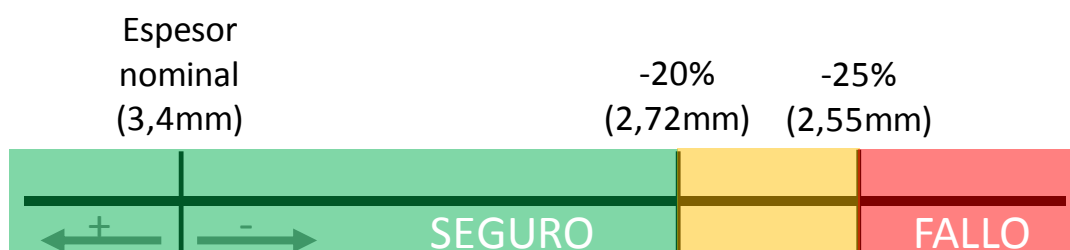


Figura 85. Criterio de fallo de adelgazamiento empleado

3.7. Resultados y conclusiones

En este capítulo se presentan de forma ordenada los resultados de las simulaciones calculadas. En primer lugar los de la simulación en condiciones nominales, y en segundo lugar los de todas las simulaciones hechas para el análisis de factores influyentes.

Los resultados mostrados son tras procesarlos acorde a la explicación dada en el apartado anterior. En el caso de la conformabilidad, se incluye también el diagrama FLD correspondiente. Conviene puntualizar que los valores de Rupture Risk y de espesor son valores máximos y mínimos absolutos de la pieza.

3.7.1. Resultado de factibilidad en condiciones nominales

En la siguiente figura se presentan los resultados de la simulación en condiciones nominales. Este es el resultado más favorable obtenido en condiciones estándar de proceso y la información experimental de material.

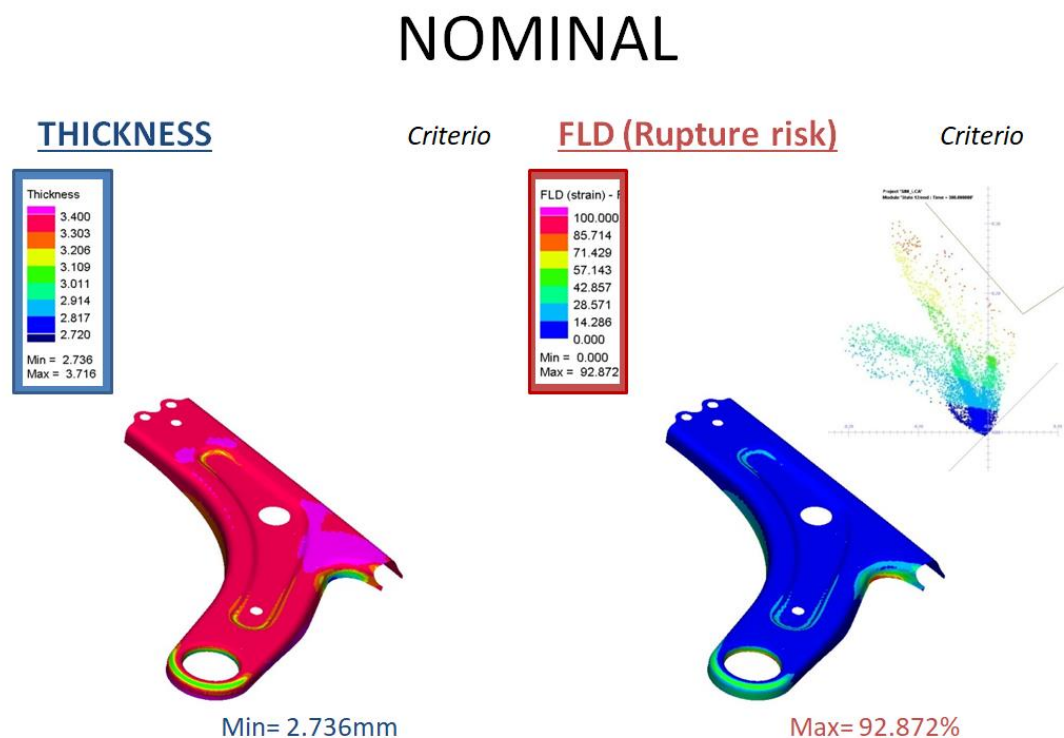


Figura 86. Resultados simulación nominal

Tal y como se puede ver en la figura, tanto el criterio de adelgazamiento como el de conformabilidad están dentro de los límites admisibles.

Por lo tanto, se puede afirmar que la pieza es factible en condiciones nominales de proceso y material. Esto responde al primero de los objetivos planteados para el estudio.

Dicho esto, el paso lógico es pasar a estudiar la robustez mediante el análisis de los factores que pueden influir negativamente en el proceso.

3.7.2. Resultados de factibilidad bajo análisis de robustez de proceso

En la siguiente tabla se muestran cada una de las simulaciones independientes de las que se expondrán los resultados en el presente apartado.

SIMULACIONES
MAT_ENDUR_MAX
MAT_ENDUR_MIN
MAT_ESP_MIN
PRO_LUB_MAX
PRO_LUB_MIN
PRO_BLK_MIN_1
PRO_BLK_MIN_05
PRO_BLK_MIN_025
PRO_CORT_MAX_1
PRO_CORT_MAX_05
PRO_CORT_MAX_025

Tabla 5. Codificación de simulaciones independientes de robustez

- 1) Endurecimiento del material [MAT_ENDUR_MAX/MIN]

MAT_ENDUR_MAX

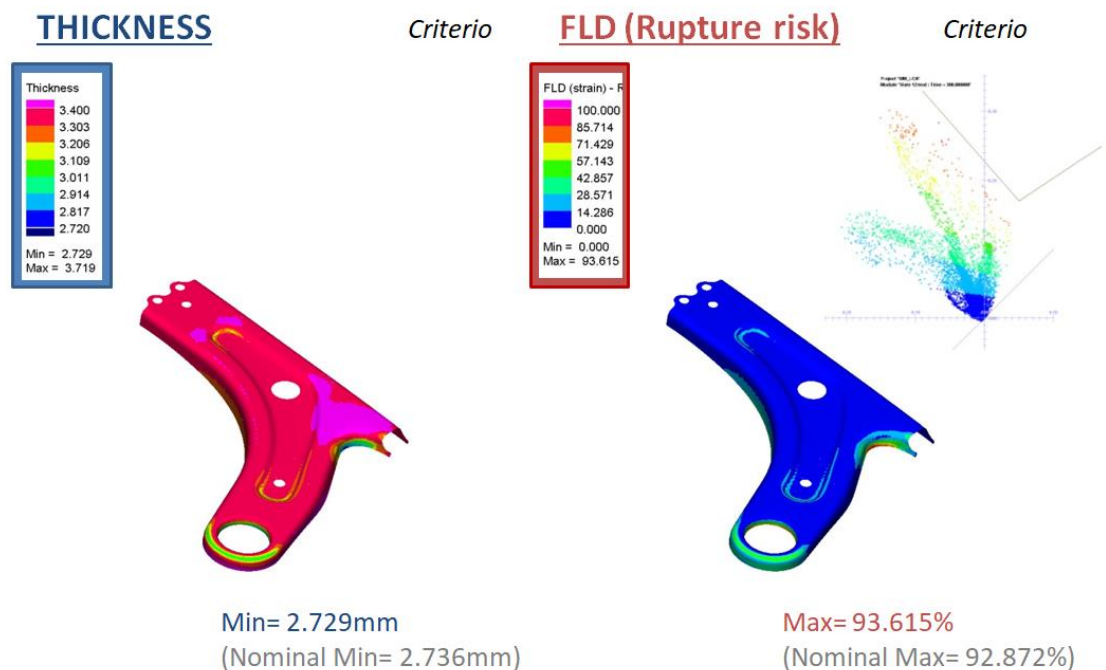


Figura 87. Resultados simulación MAT_ENDUR_MAX

MAT_ENDUR_MIN

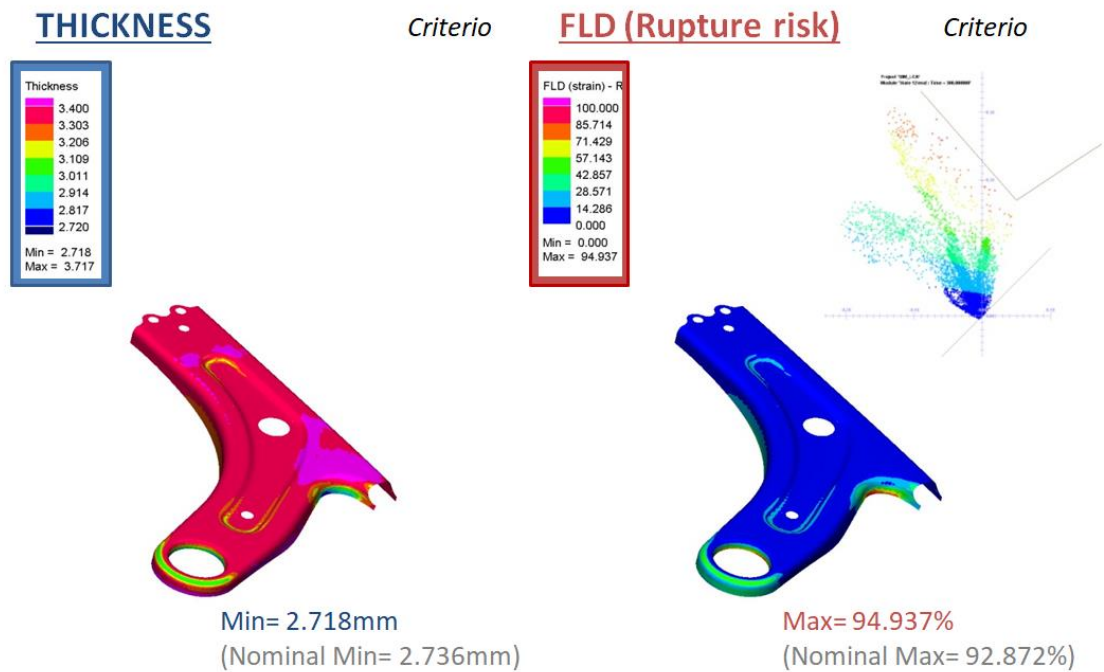


Figura 88. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN

De los cálculos realizados con las propiedades máximas y mínimas del material, se observa que ambos casos siguen estando seguros. De cara al estudio de “peor caso posible”, MAT_ENDUR_MIN es la que peores resultados ofrece.

2) Espesor de la chapa [MAT_ESP_MIN]

MAT_ESP_MIN

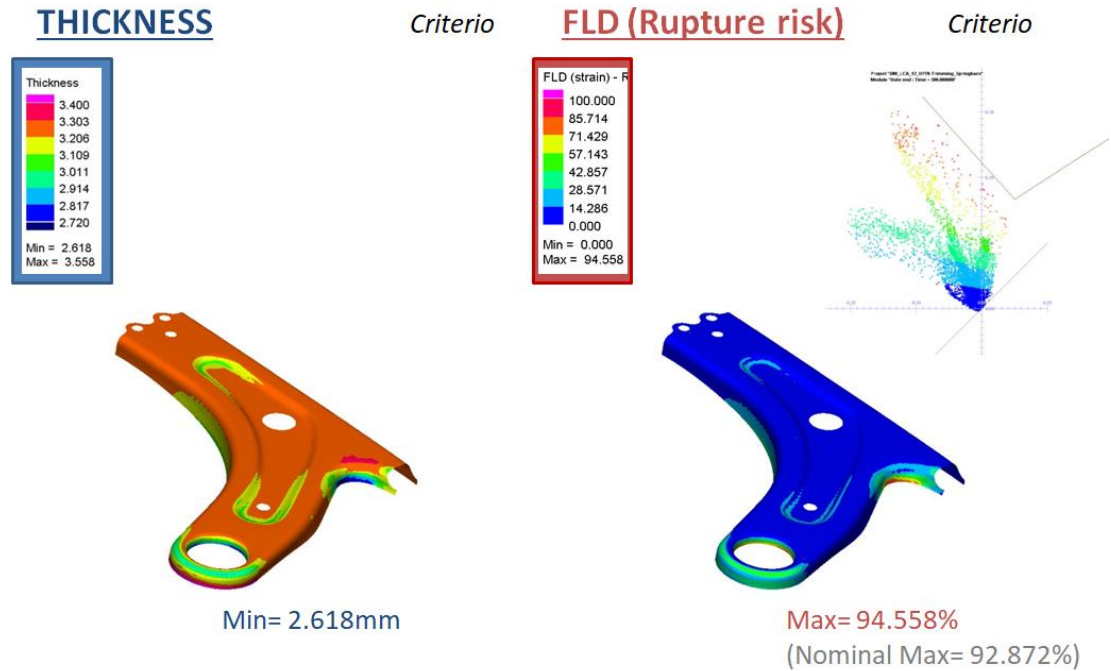


Figura 89. Resultados simulación MAT_ESP_MIN

De los cálculos realizados con el espesor mínimo de material, se observa que no supone un empeoramiento reseñable respecto a la situación nominal.

Es importante aclarar que para este caso con espesor de chapa reducido, el criterio de adelgazamiento debe ajustarse. El %20 de adelgazamiento para este espesor (3,25mm) es 2,6mm en vez de 2,72mm.

Tal y como se justifica en apartados anteriores, este factor no se tiene en cuenta para el estudio de “peor caso”.

3) Tribología chapa-troquel [PRO_LUB_MAX/MIN]

Si se observan ambas Figuras 90 y 91 referentes a los cálculos realizados con coeficientes de fricción máximos y mínimos se puede apreciar que ambos casos siguen estando seguros. De cara al estudio de “peor caso posible”, PRO_LUB_MAX es la que peores resultados ofrece.

PRO_LUB_MAX

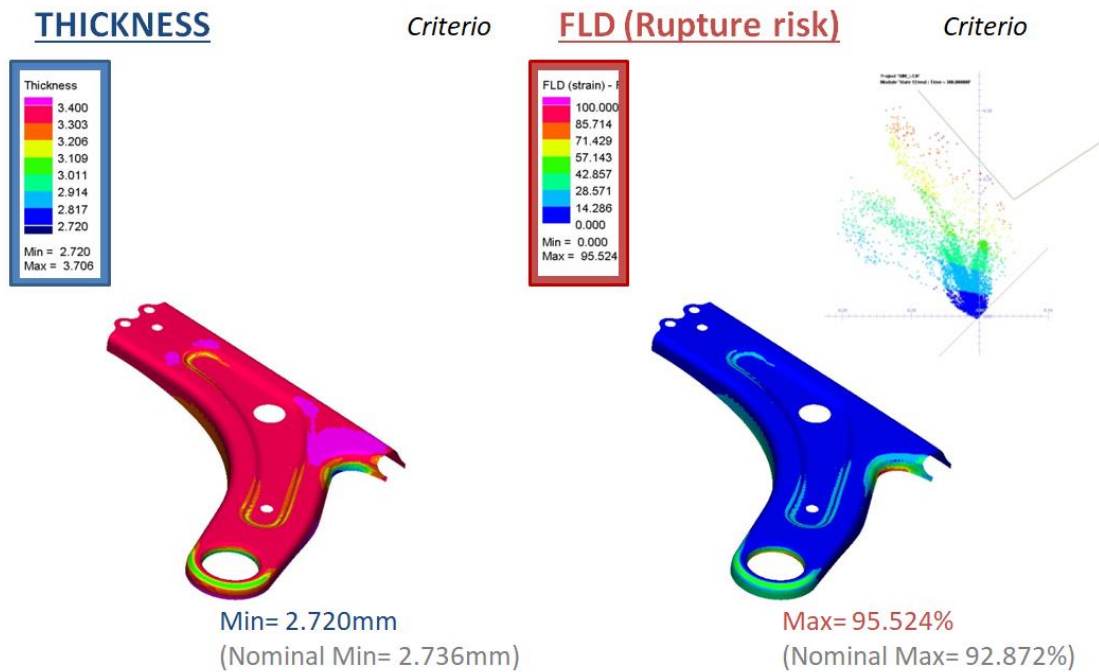


Figura 90. Resultados simulación PRO_LUB_MAX

PRO_LUB_MIN

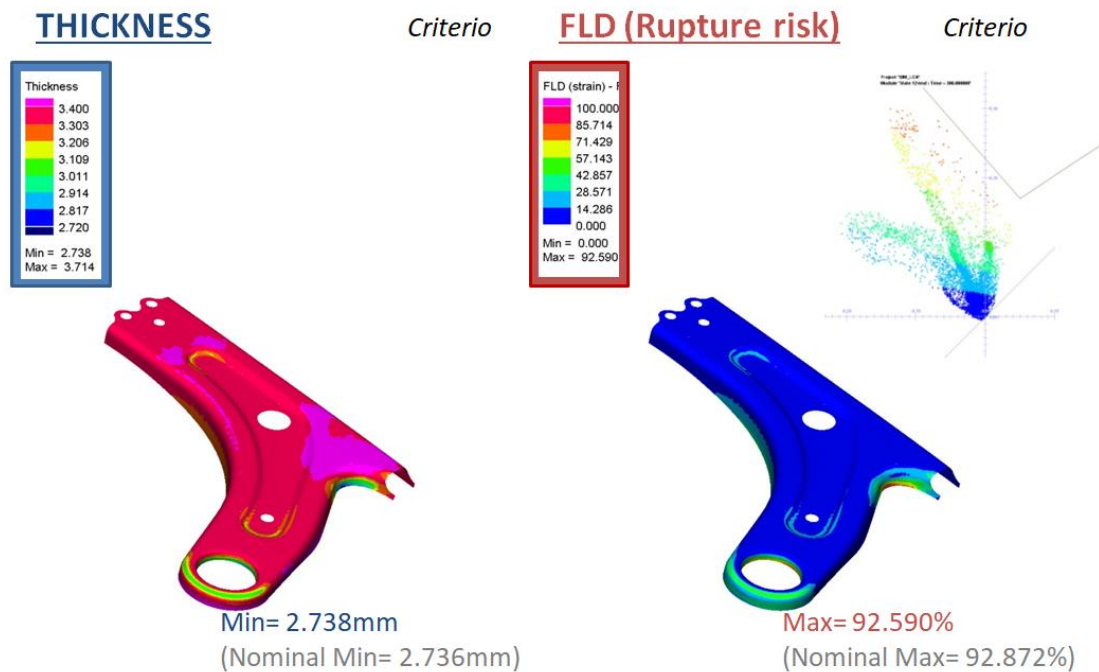


Figura 91. Resultados simulación PRO_LUB_MIN

4) Contorno del formato inicial [PRO_BLK_MIN_1/05/025]

PRO_BLK_MIN_1

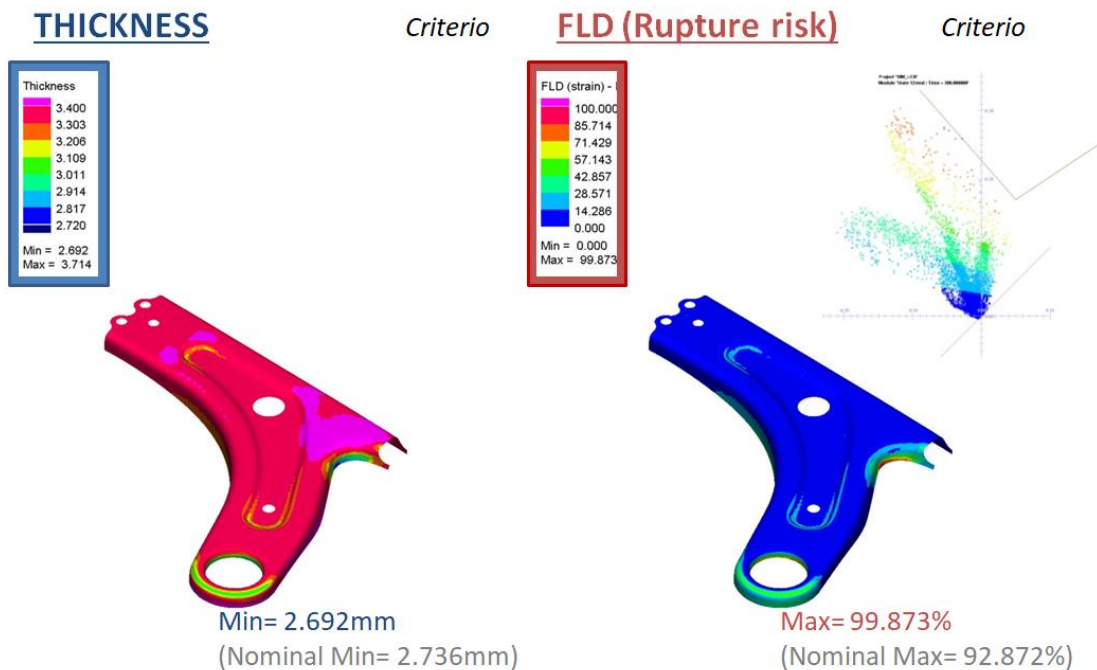


Figura 92. Resultados simulación PRO_BLK_MIN_1

PRO_BLK_MIN_05

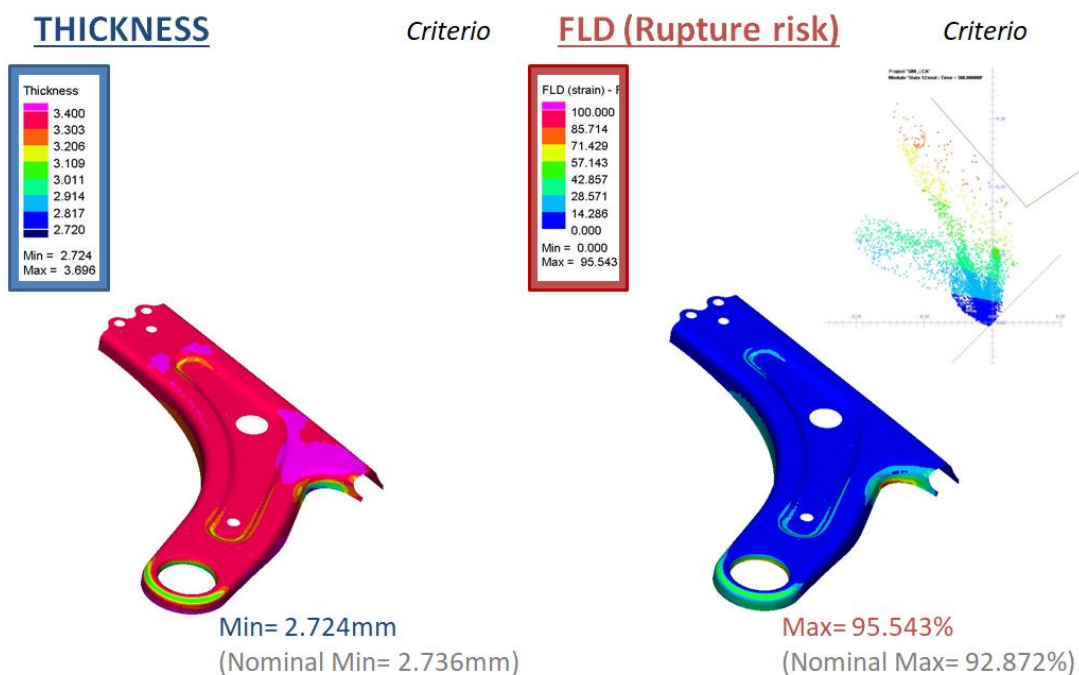


Figura 93. Resultados simulación PRO_BLK_MIN_05

PRO_BLK_MIN_025

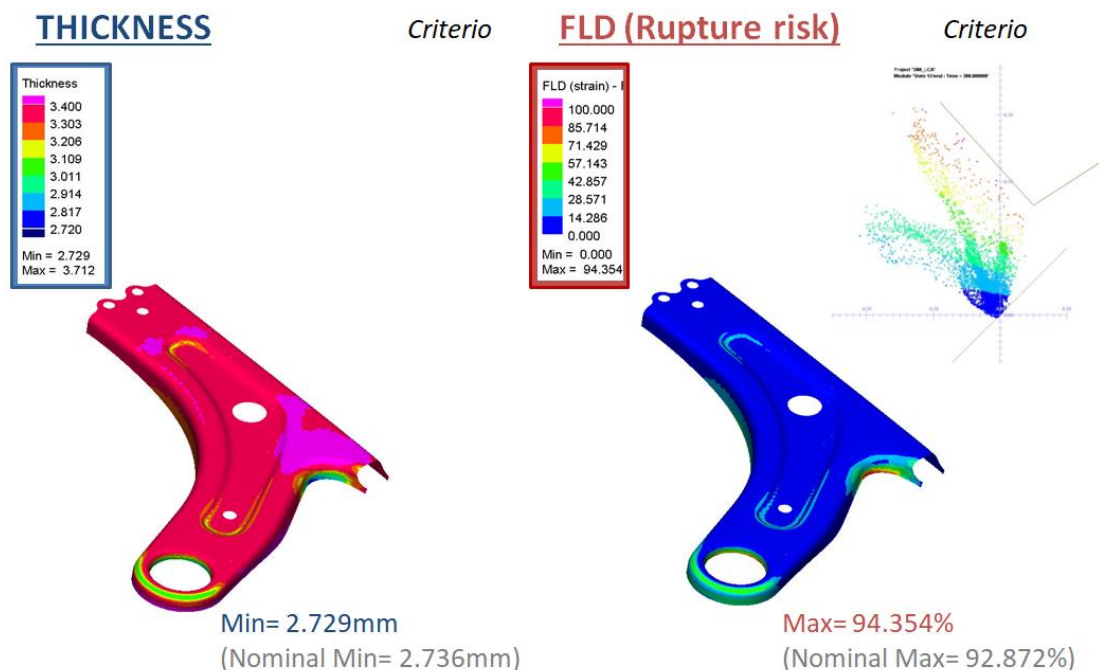


Figura 94. Resultados simulación PRO_BLK_MIN_025

De los cálculos realizados con los diferentes tamaños de formatos, se observa que en el caso PRO_BLK_MIN_1 se da el fallo en la pieza. Si debido al desgaste o a un desajuste de herramientas hubiera una variación de un -1mm en el formato inicial de la pieza, la situación de rotura sería inminente. Por ello, se debe controlar el mantenimiento del troquel para la zona del "Tokyo-bay".

Al contrario que en PRO_BLK_MIN_05 y PRO_BLK_MIN_025, que se consideran seguros. De cara al estudio de "peor caso posible", se estudiarían ambas situaciones, teniendo en cuenta que un offset del formato superior a 0,5mm no será admisible en ningún caso.

5) Contorno del cortante de la OP30-40 [PRO_CORT_MAX_1/05/025]

Al igual que en PRO_BLK_MIN, de los cálculos realizados con los diferentes contornos de corte, en la Figura 95 se observa que en el caso PRO_CORT_MAX_1 se da el fallo en la pieza. Si debido al desgaste o a un desajuste de herramientas hubiera una variación de un +1mm en el contorno del corte de la OP30, la situación de rotura sería inminente.

Al contrario que en PRO_CORT_MAX_05 y PRO_CORT_MAX_025, que se consideran seguros. De cara al estudio de "peor caso posible", se estudiarían ambas situaciones.

PRO_CORT_MAX_1

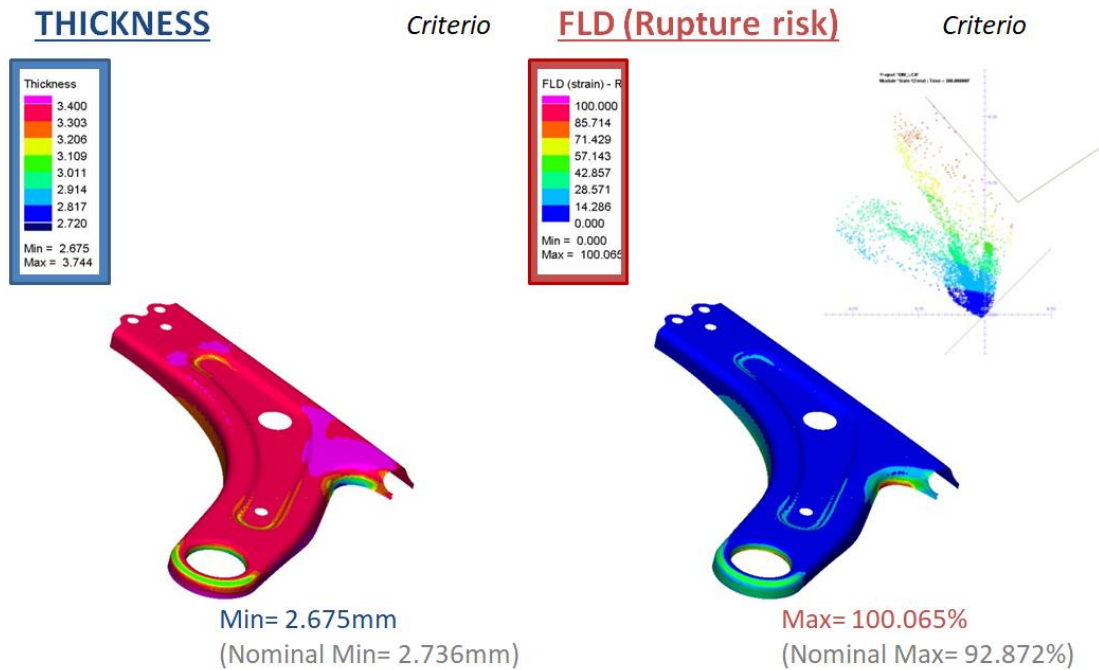


Figura 95. Resultados simulación PRO_CORT_MAX_1

PRO_CORT_MAX_05

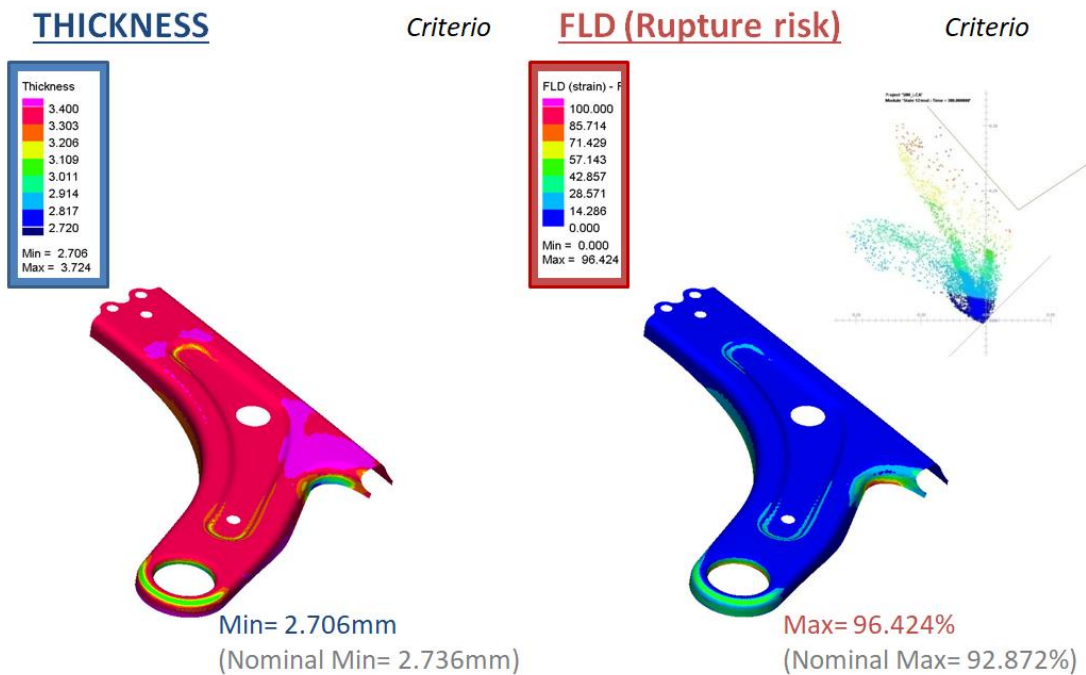


Figura 96. Resultados simulación PRO_CORT_MAX_05

PRO_CORT_MAX_025

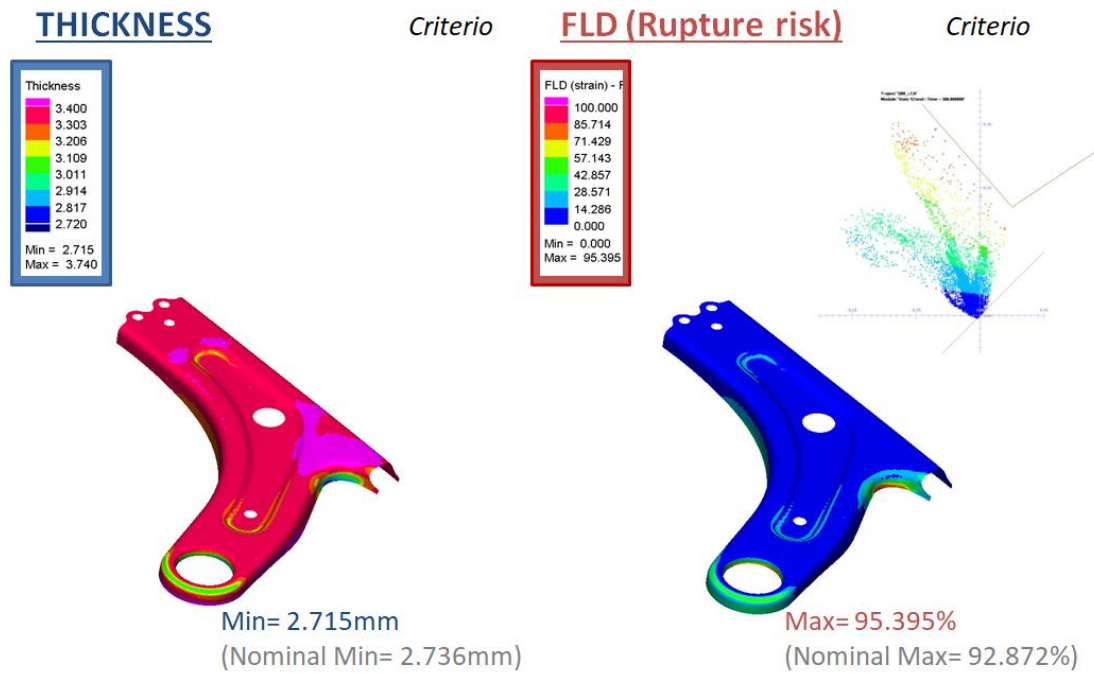


Figura 97. Resultados simulación PRO_CORT_MAX_025

En la siguiente tabla se muestran los resultados de espesor y FLD para cada una de las situaciones de simulaciones independientes expuestas anteriormente.

SIMULACIONES	ESPESOR (mm)	% respecto nominal	FLD (%)	Δ respecto nominal
MAT_ENDUR_MAX	2.729	-0.26	93.615	+0.743
MAT_ENDUR_MIN	2.718	-0.66	94.937	+2.065
MAT_ESP_MIN	2.618	-	94.558	+1.686
PRO_LUB_MAX	2.720	-0.58	95.524	+2.652
PRO_LUB_MIN	2.738	+0.07	92.590	-0.282
PRO_BLK_MIN_1	2.692	-1.61	99.873 ⚡	+7.001
PRO_BLK_MIN_05	2.724	-0.44	95.543	+2.671
PRO_BLK_MIN_025	2.729	-0.26	94.354	+1.482
PRO_CORT_MAX_1	2.675	-2.23	100.065 ⚡	+7.193
PRO_CORT_MAX_05	2.706	-1.10	96.424	+3.576
PRO_CORT_MAX_025	2.715	-0.77	95.395	+2.523

Nominal Min= 2.736mm

Nominal Max= 92.872%

Tabla 6. Valores de espesor y FLD de las simulaciones de robustez

Los valores marcados con un rayo indican las situaciones en las que se producirá el fallo en la pieza mediante el criterio de FLD “*Rupture Risk*”.

Se han dejado a un lado las situaciones que no se aplicaran para las simulaciones de robustez combinadas. Ya sea debido a que se produce el fallo en la pieza o por existir una situación más crítica.

Las simulaciones subrayadas se combinan entre ellas buscando el “peor caso posible”.

SIMULACIONES	ESPESOR (mm)	% respecto nominal	FLD (%)	Δ respecto nominal
MAT_ENDUR_MAX	2.729	-0.26	93.615	+0.743
MAT_ENDUR_MIN	2.718	-0.66	94.937	+2.065
MAT_ESP_MIN	2.618	-	94.558	+1.686
PRO_LUB_MAX	2.720	-0.58	95.524	+2.652
PRO_LUB_MIN	2.738	+0.07	92.590	-0.282
PRO_BLK_MIN_1	2.692	-1.61	99.873	+7.001
PRO_BLK_MIN_05	2.724	-0.44	95.543	+2.671
PRO_BLK_MIN_025	2.729	-0.26	94.354	+1.482
PRO_CORT_MAX_1	2.675	-2.23	100.065	+7.193
PRO_CORT_MAX_05	2.706	-1.10	96.424	+3.576
PRO_CORT_MAX_025	2.715	-0.77	95.395	+2.523

Configuraciones que se van a emplear en las combinadas Nominal Min= 2.736mm Nominal Max= 92.872%

Tabla 7. Valores de espesor y FLD de las simulaciones de robustez a combinar

En la siguiente tabla se muestran cada una de las simulaciones de robustez combinadas de las que se expondrán los resultados más abajo.

SIMULACIONES COMBINADAS
1ª COMBINADA_05
1ª COMBINADA_025
2ª COMBINADA_05
2ª COMBINADA_025
3ª COMBINADA
4ª COMBINADA

Tabla 8. Codificación de simulaciones de robustez combinadas

- 1ª COMBINADAS [MAT_ENDUR_MIN + PRO_BLK_MIN_05/025]

Como punto de partida de la combinación se tomará MAT_ENDUR_MIN, simulación con la curva de endurecimiento inferior mínima posible. Además se le añade la variación en el tamaño del formato. La primera con variación del tamaño del formato con offset de 0,5mm y la segunda de 0,25mm.

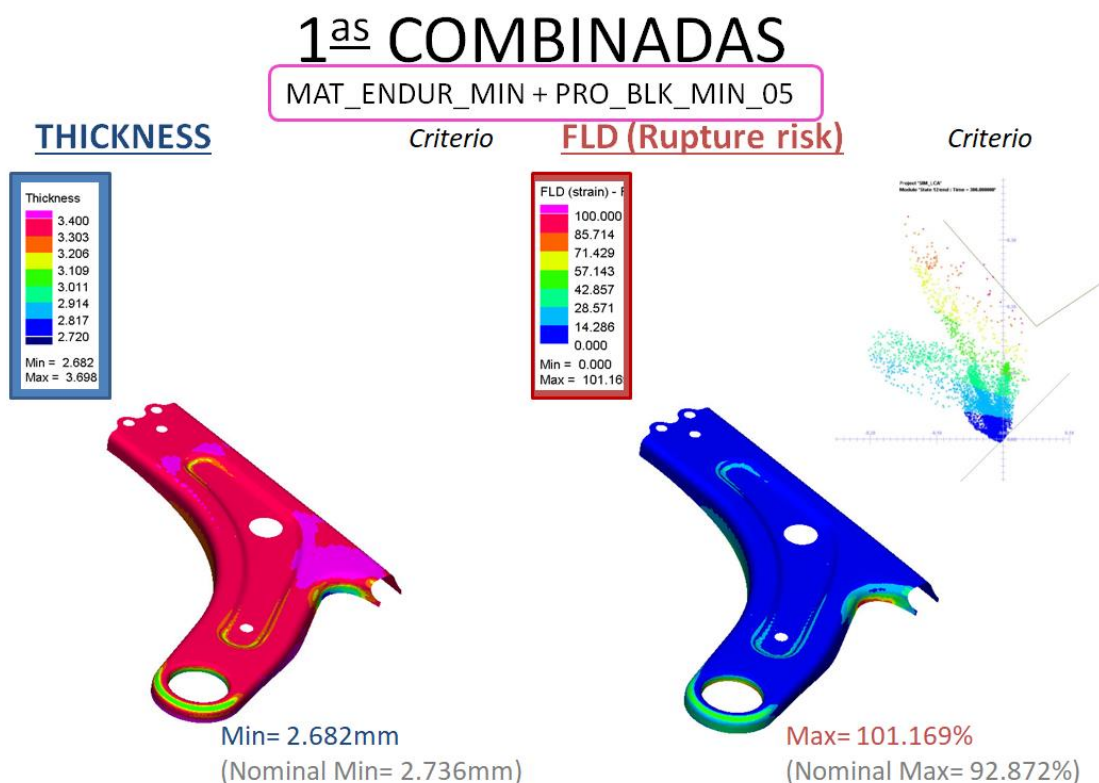


Figura 98. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_BLK_MIN_05

De los cálculos realizados con MAT_ENDUR_MIN + PRO_BLK_MIN_05, se observa que se produce el fallo en la pieza. De cara al estudio de “peor caso posible”, esta combinación se dejará a un lado.

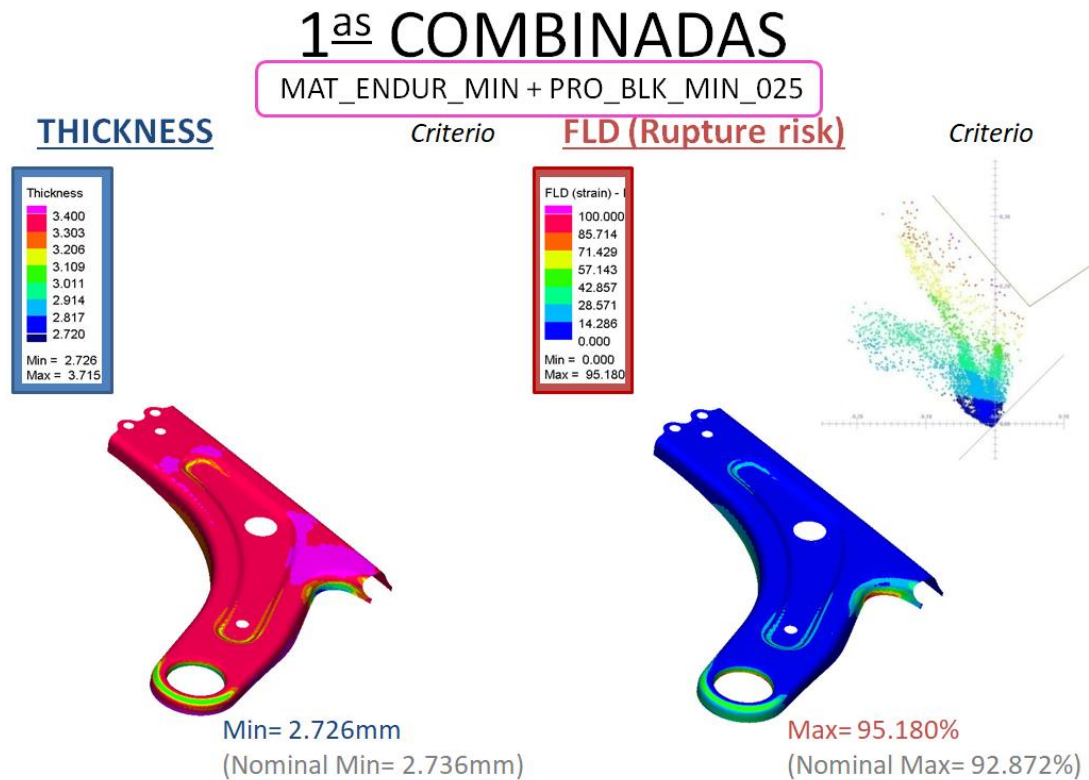


Figura 99. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_BLK_MIN_025

De los cálculos realizados con MAT_ENDUR_MIN + PRO_BLK_MIN_025, se observa que la pieza sigue estando dentro de los límites de seguridad en cuanto a espesor y FLD se refiere. Debido a los resultados aceptables logrados, de cara al estudio de “peor caso posible”, se tendrá en cuenta esta situación para la tercera combinada.

- **2^{as} COMBINADAS [MAT_ENDUR_MIN + PRO_CORT_MAX_05/025]**

Como punto de partida de la combinación se tomará MAT_ENDUR_MIN una vez más. Pero esta vez se le añade la variación en el contorno de corte de la OP30. La primera con variación con offset de 0,5mm y la segunda de 0,25mm.

2^{as} COMBINADAS

MAT_ENDUR_MIN + PRO_CORT_MAX_05

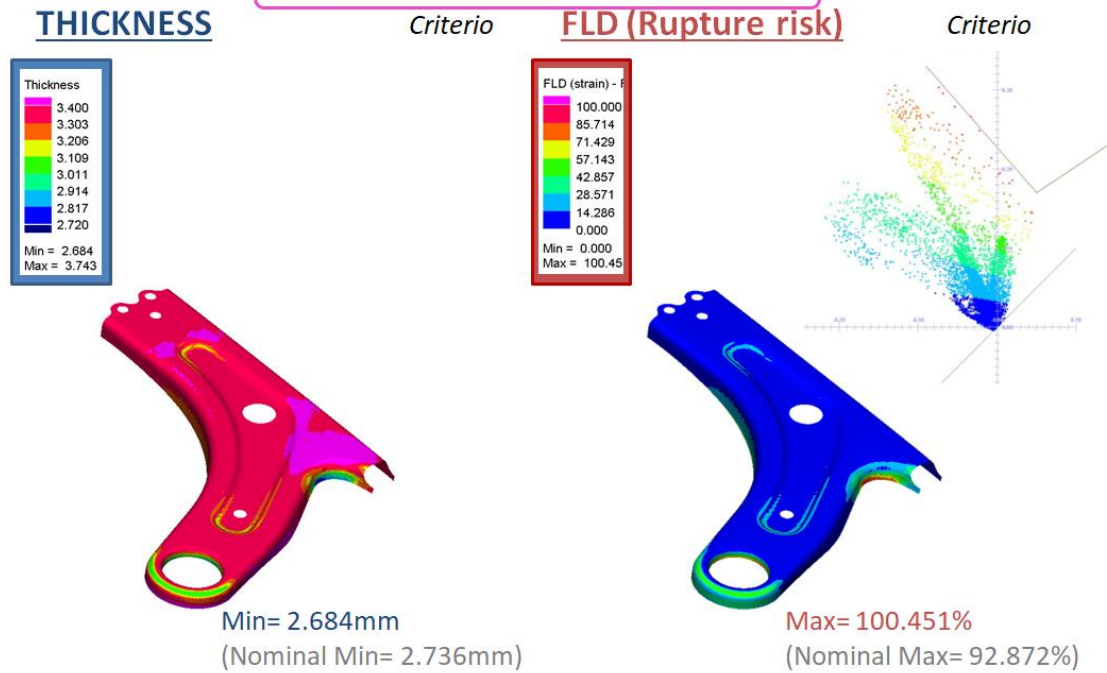


Figura 100. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_CORT_MAX_05

2^{as} COMBINADAS

MAT_ENDUR_MIN + PRO_CORT_MAX_025

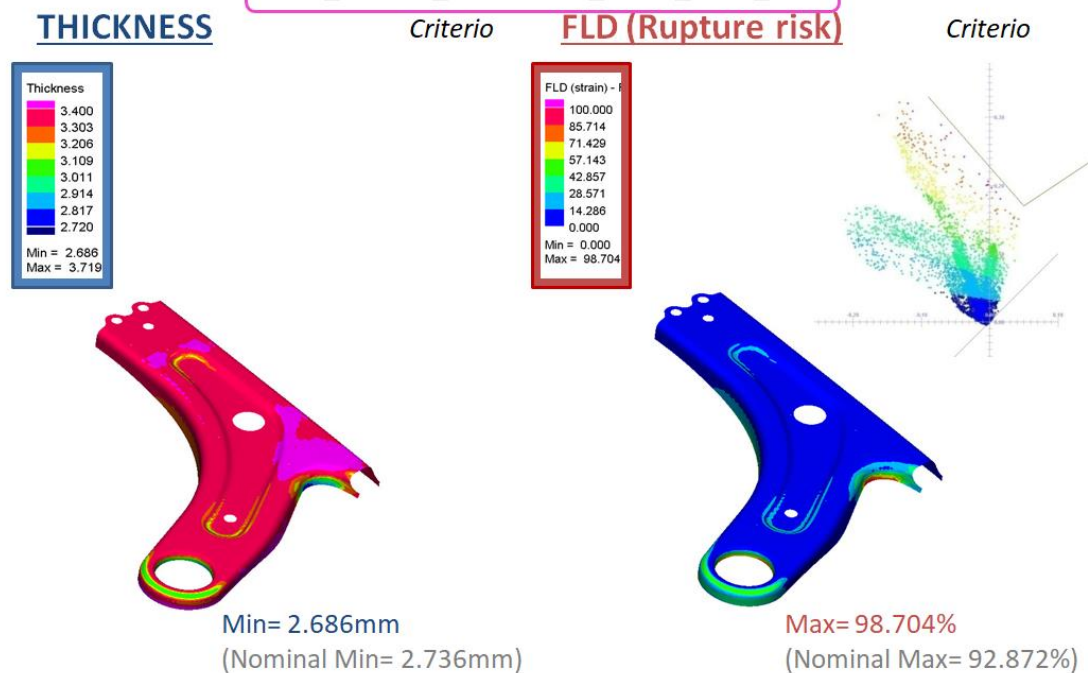


Figura 101. Resultados simulación MAT_ENDUR_MIN+PRO_CORT_MAX_025

De los cálculos realizados con MAT_ENDUR_MIN + PRO_CORT_MAX_05, se observa que se produce el fallo en la pieza. De cara al estudio de “peor caso posible”, esta combinación se dejará a un lado.

De los cálculos realizados con MAT_ENDUR_MIN + PRO_CORT_MAX_025, se observa que la pieza sigue estando dentro de los límites de seguridad en cuanto a espesor y FLD se refiere. Debido a los resultados aceptables logrados, de cara al estudio de “peor caso posible”, se tendrá en cuenta esta situación para la tercera combinada.

- 3ª COMBINADA

[MAT_ENDUR_MIN + PRO_BLK_MIN_025 + PRO_CORT_MAX_025]

Atendiendo a los resultados anteriores, queda claro que tanto en el caso del formato con una desviación de 0,5mm [PRO_BLK_MIN_05] como en el caso del cortante con misma desviación [PRO_CORT_MAX_05], los resultados no son aceptables, por suponer roturas aseguradas.

El objetivo con la 3a combinada es evaluar cómo se ve afectada la factibilidad si se combinan los casos de propiedades mínimas de material, formato con una reducción de 0,25mm y el cortante 0,25mm más grande que el nominal. En la siguiente figura se ven los resultados para esta combinada.

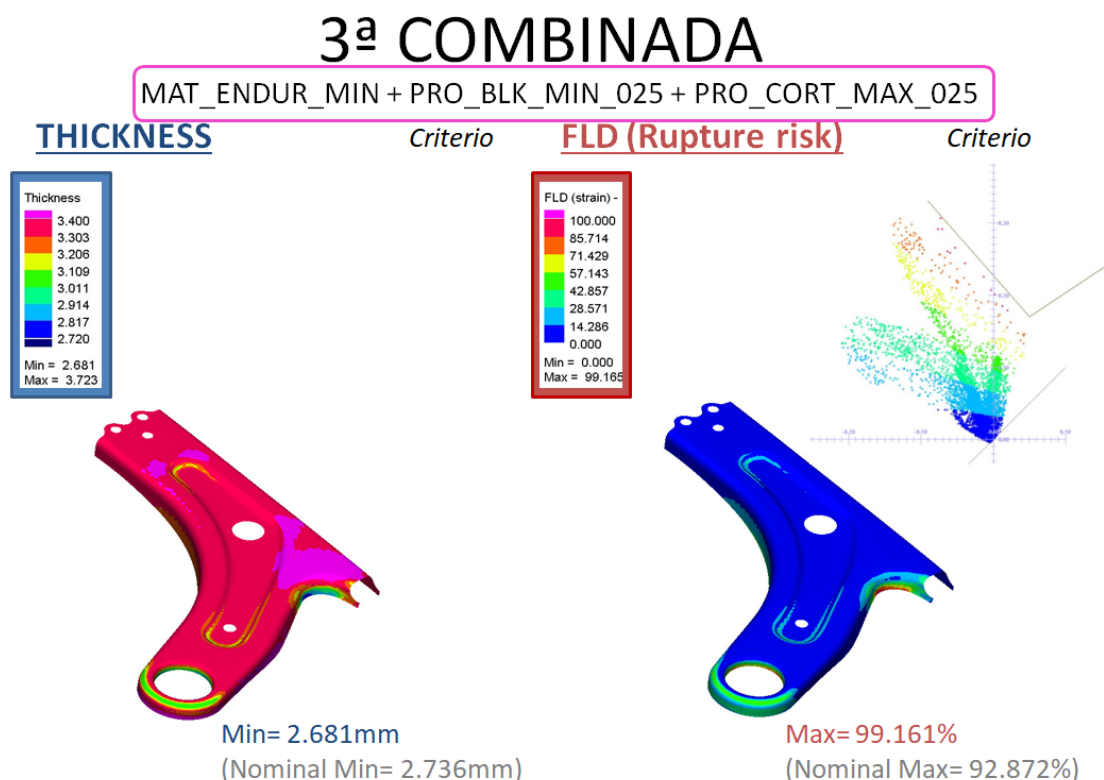


Figura 102. Resultados simulación 3ª COMBINADA

De los resultados mostrados, se puede afirmar que la pieza es factible bajo esta combinación. Este debería ser el peor caso admisible, bajo el cual el proceso es robusto.

- 4ª COMBINADA

[MAT_ENDUR_MIN + PRO_BLK_MIN_025 + PRO_CORT_MAX_025 + PRO_LUB_MAX]

Un parámetro de proceso no incluido hasta ahora es la fricción entre chapa-troquel. Se considera función del nivel de lubricación aplicado a los formatos para su conformado. Es un parámetro más controlable en el proceso, por lo que se considera que queda fuera del posible “peor caso” planteado en la combinación previa.

En la siguiente figura se muestran los resultados para la 4ª combinación, en la que se ha incluido la variante más perjudicial de las dos simulaciones realizadas para entender el efecto de la fricción sobre este proceso.

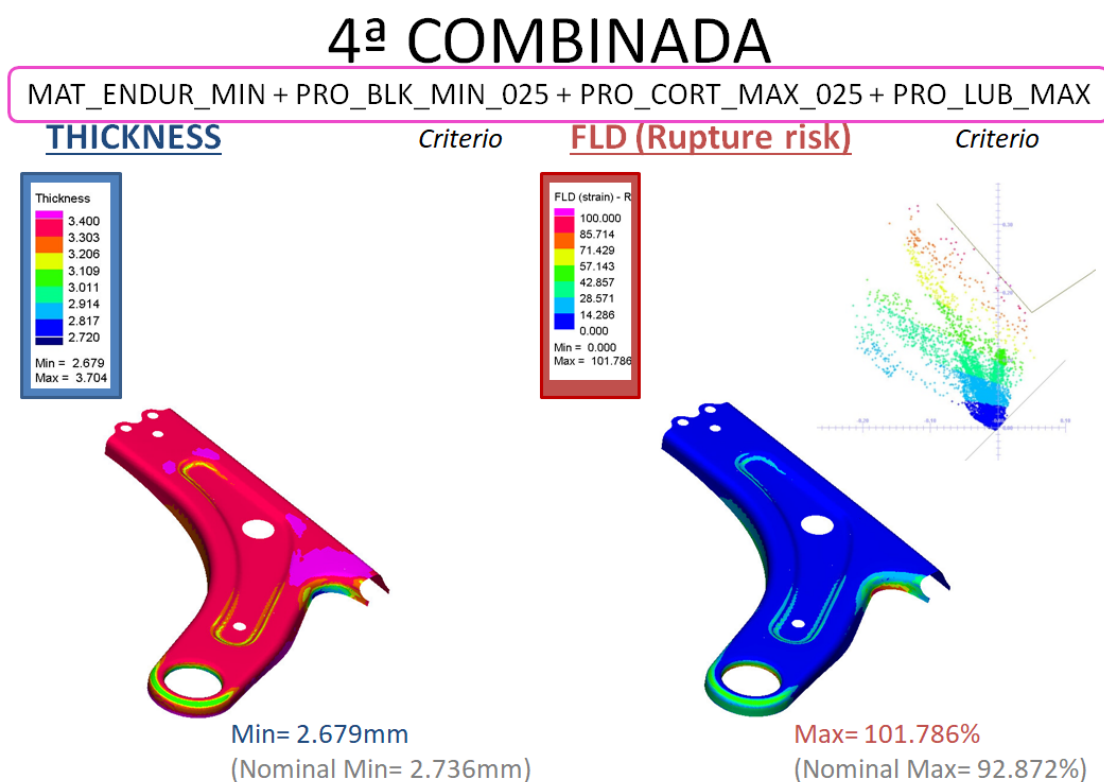


Figura 103. Resultados simulación 4ª COMBINADA

Para este caso de combinación de parámetros, la pieza no es factible; se prevén valores por encima del límite de rotura en FLD.

Para tener una visión general de las combinaciones realizadas, en la siguiente tabla se resumen los resultados de todas ellas. Al igual que con el resumen para las simulaciones con los parámetros por independiente, el símbolo del rayo significa que se prevé rotura en la pieza.

SIMULACIONES	ESPESOR (mm)	% respecto nominal	FLD (%)	Δ respecto nominal
1ª COMBINADA_05	2.682	-1.97	101.169 ⚡	+8.297
1ª COMBINADA_025	2.726	-0.36	95.180	+2.308
2ª COMBINADA_05	2.684	-1.90	100.451 ⚡	+7.579
2ª COMBINADA_025	2.686	-1.83	98.704	+5.832
3ª COMBINADA	2.681	-2.01	99.161	+6.289
4ª COMBINADA	2.679	-2.08	101.786 ⚡	+8.914

Nominal Min= 2.736mm

Nominal Max= 92.872%

Tabla 9. Valores de espesor y FLD de las simulaciones de robustez combinadas

Como conclusión para las combinadas, se puede decir que tanto el contorno del formato inicial como el contorno de la pieza tras el cortante de la OP30, no pueden desviarse más de 0,25mm en cada dirección correspondiente, en el caso hipotético de recibir un material con las propiedades cerca del límite inferior del rango que garantiza el acerista. Como ya se explica más adelante, en el caso de tener propiedades de material cercanas a los valores experimentales considerados como nominales en este estudio, el rango de los contornos puede desviarse hasta 0,5mm.

Por otro lado, queda patente el efecto nocivo de la alta fricción que puede darse si no se lubrica.

De cara a tener una visión global de todas las simulaciones lanzadas, se presenta un gráfico con los resultados según el criterio FLC. Las conclusiones se desarrollan de manera detallada en el siguiente apartado.

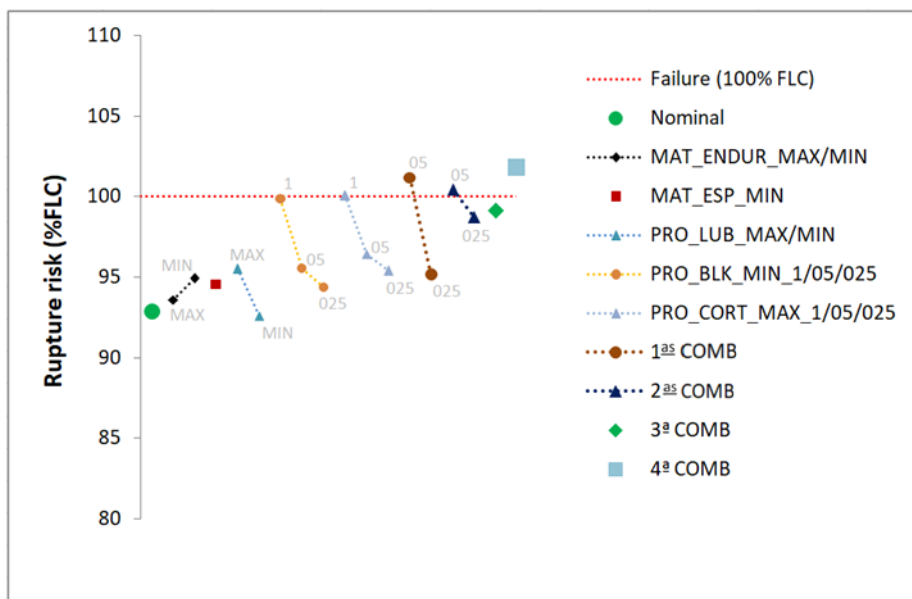


Figura 104. Diagrama resumen de valoración de criterio fallo FLC

3.7.3. Conclusiones del estudio

A continuación se presentan de manera ordenada las conclusiones del estudio, relacionándose con los objetivos presentados al principio de este documento.

- La pieza es factible en condiciones nominales con el proceso planteado.
- La zona más crítica, y en la que se ha centrado el estudio, es la zona denominada "Tokyo-bay".
- Se ha cuantificado la influencia sobre la factibilidad de los factores de ruido debidos tanto a material como a proceso, y se ha analizado el potencial "peor caso" mediante la selección y combinación de los factores.
- El proceso es robusto bajo las siguientes premisas:
 - Si las propiedades de endurecimiento del material están en condiciones nominales, puede existir una desviación de hasta 0,5mm en los contornos de corte, bien del formato inicial o bien del corte de la OP30.
 - Sí el material se suministra con las propiedades en el mínimo garantizado, la desviación en los contornos no puede ser de más de 0,25mm.
 - Además, las condiciones tribológicas entre chapa-troquel deben mantenerse alrededor de nominal, ya que un aumento de la fricción provocaría rotura si se añade el efecto al "peor caso" planteado.
- Para lograr la estabilidad del proceso de cara a producción serie son necesarias las siguientes pautas de control:

- Debe existir un plan de mantenimiento en los útiles de corte que asegure una desviación máxima de $\pm 0,25\text{mm}$ en el perfil de corte, especialmente en la zona del "Tokyo-bay".
- Debe mantenerse un nivel de lubricación adecuado para no aumentar la fricción entre la interfaz chapa-troquel.

Conviene recordar que la pieza dispone de un margen de seguridad frente a la rotura de entorno al 7-8% en condiciones nominales, y las simulaciones con factores combinados pretenden reproducir la situación de "peor caso", cuya probabilidad de ocurrencia es reducida. Sin embargo, este enfoque permite conocer más a fondo las potenciales debilidades del proceso y establecer planes de control para evitar por completo llegar a darse las condiciones que provoquen la rotura de la pieza.

3.8. Propuesta técnica

Tal y como se explica al inicio de este documento, los resultados y conclusiones fruto de este estudio son de gran interés para la fabricación de los troqueles de estampación, y para la producción serie.

Por un lado, la confirmación de la factibilidad por simulación es condición indispensable para comenzar con el diseño y construcción del troquel. Recordar que el alcance del estudio termina con las conclusiones de las simulaciones, no entrando en el diseño del troquel.

Y por otro lado, con la información obtenida del análisis de sensibilidad y robustez de proceso, es posible diseñar el troquel prestando especial atención en las zonas y operaciones críticas, y además tener acotados y monitorizados los factores que de alguna manera pueden controlarse (lubricación y el correcto ajuste y desgaste de cuchillas de corte) frente a otros no directamente controlables (propiedades de material).

3.9. Valoraciones generales y líneas futuras

Ha sido interesante a nivel personal, investigar la estampación de una pieza más allá de las condiciones nominales. Esto no es lo habitual en la industria hoy en día. En un principio, podría parecer, que la variabilidad de ciertos parámetros, no solo de material sino también de proceso, tiene que ser reducida. Sin embargo, con el estudio presentado en este documento, este pensamiento inicial queda cuestionado. Por lo tanto, no quedarse en un estado del proceso y explorar toda la ventana del mismo para conseguir un proceso robusto, ha resultado gratificante.

Factores que consideraba invariables durante la producción serie de una pieza, han resultado lo contrario. Uno de los casos es la fluctuación de las propiedades del material. Un dato llamativo: a lo largo de una misma bobina, las propiedades pueden llegar a variar hasta un 5% si se comparan el inicio, mitad y final de bobina.

Por otro lado, como ya esperaba, la simulación del proceso permite adelantarse a futuros fallos inesperados.

En cuanto a líneas futuras, se podrían analizar más variables de material y proceso para incluirlas en el análisis de robustez, ya que se debe puntualizar que en este estudio solo se han tenido en cuenta las consideradas más influyentes.

Para el material, por ejemplo, podría incluirse la variación de los coeficientes de anisotropía, que definen el modelo de fluencia del material. En cuanto a variables relacionadas con el proceso, podría analizarse el efecto de un mal centraje en el formato, sobre todo de gran importancia en la primera operación.