

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la conformación metálica de un panel
lateral de lavadora

Study on metallic conformation of a washing
machine lateral panel

Autor

Javier Ricón Bona

Director

Emilio Royo Vázquez

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

2023



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe remitirse a seceina@unizar.es dentro del plazo de depósito)

D./D^a. JAVIER RICÓN BONA ,

en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de Estudios de la titulación de

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales



(Título del Trabajo)

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 29 de Agosto de 2023

Fdo:

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora

Resumen

En este trabajo de final de grado se presenta un estudio de conformabilidad de un panel lateral que forma parte de un bastidor LHL de una lavadora, en chapa DX52 de 0,8 milímetros de espesor.

Debido a algunas limitaciones, como adaptarse correctamente a un proceso de fabricación real en una línea de prensas limitada, se ha planteado un método PLAN eficiente y factible. Es por ello que se ha dividido el proceso en cuatro operaciones, un estampado, un corte, y dos doblados.

En el estudio del proceso a través de un software de simulación, se han encontrado zonas problemáticas, tanto de rotura como de arrugas en la chapa, además de una línea de corte poco precisa. Es por ello que se han evaluado distintos métodos para solucionar estos problemas, entre los que se encuentra el estudio de la línea de corte por secciones de la pieza o la modificación de la geometría original del panel lateral.

Por último, se ha realizado un diseño de experimentos (DOE) con el fin de buscar relaciones entre los parámetros del material, las condiciones de fabricación y otros aspectos.

Este estudio proporciona una posible línea a seguir para el futuro diseño de esta pieza, así como algunas soluciones y variaciones que se pueden llevar a cabo.

ÍNDICE

1	Introducción	- 3 -
2	Metodología de Trabajo.....	- 4 -
3	Función y Análisis de la pieza	- 5 -
4	Estado del arte	- 9 -
4.1	Diagrama FLD y Curva FLC	- 9 -
4.2	Max Failure	- 12 -
4.3	Arrugas.....	- 13 -
5	Método PLAN	- 14 -
6	Simulaciones Panel Lateral.....	- 19 -
6.1	Material.....	- 19 -
6.2	Etapas op20	- 20 -
6.3	Etapas op30	- 22 -
6.4	Etapas op40	- 23 -
6.5	Etapas op50	- 25 -
6.6	Análisis	- 27 -
7	Estudio de Trim	- 27 -
7.1	Esquina Inferior (simétrica).....	- 29 -
7.2	Detalle Lateral 1	- 30 -
7.3	Detalle Lateral 2	- 31 -
7.4	Detalle Lateral 3	- 32 -
7.5	Detalle Lateral 4	- 33 -
7.6	Detalle Lateral 5	- 34 -
7.7	Detalle Lateral 6	- 35 -
7.8	Detalle Lateral 7	- 36 -
7.9	Pieza Final y Análisis de Resultados	- 36 -
8	Diseño de Experimentos (DOE)	- 40 -
9	Conclusiones.....	- 45 -
10	Bibliografía.....	- 47 -
11	Anexo.....	- 48 -

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es el análisis del proceso de conformado metálico de un panel lateral de lavadora, planteando una serie de mejoras en su diseño para facilitar la estampación en la línea de presas disponible y en el material preestablecido.

El conformado en chapa es todo aquel proceso en el que se le aplica una determinada fuerza a una pieza de chapa para modificar su geometría, dimensiones y propiedades. De esta manera, se puede lograr la embutición de formas, el doblado y el corte de variedad de piezas complejas. En este trabajo, se va a estudiar el proceso de fabricación de una pieza lateral en chapa para una lavadora. El modelo 3D de la misma ha sido obtenido gracias a la empresa BSH.

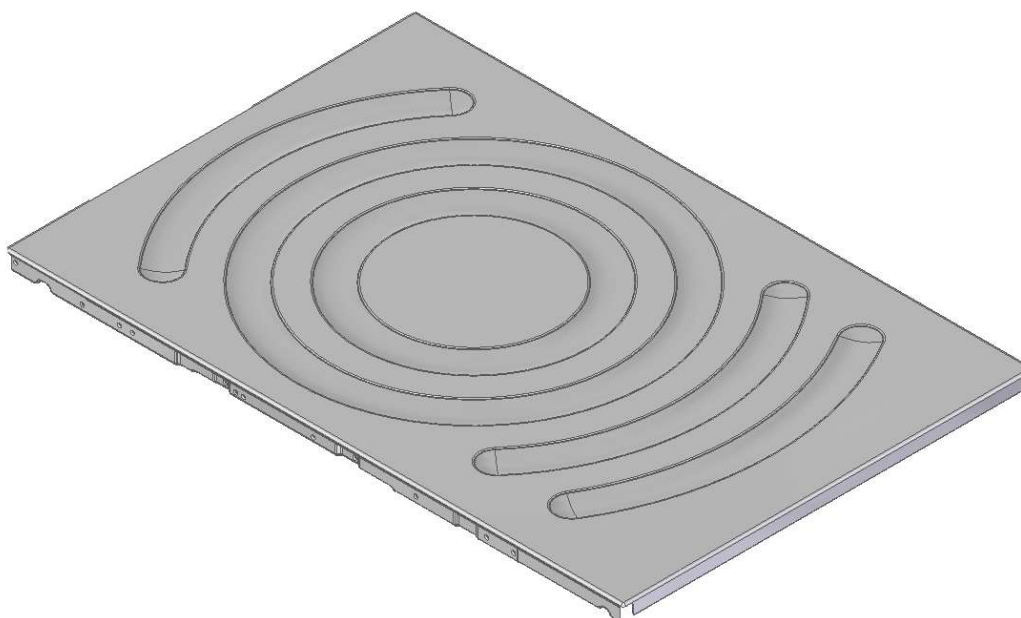


Ilustración 1 Panel lateral de lavadora.

BSH es un grupo empresarial alemán, cuyas marcas principales y más conocidas en la industria de los electrodomésticos son Bosch, Siemens y, más concretamente en España, Balay. En este caso, BSH ha proporcionado el modelo 3D de varias partes de un bastidor LHL para una lavadora, del que se ha seleccionado la pieza lateral como objeto de estudio.

2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El estudio de la pieza comenzará por el análisis de la geometría proporcionada por BSH, en formato .prt, extensión utilizada para archivos CAD y que puede contener líneas, superficies, texturas, dimensiones y descripciones. Se analiza el espesor de la pieza, ángulos de doblado, etc. Una vez analizada la geometría de la pieza se inicia el proceso de elaboración de archivos CAD necesarios para el resto del trabajo. En este procedimiento se emplea la geometría inicial proporcionada y se establecen las superficies de contacto de las herramientas utilizando el software de diseño en 3D Solid Edge. Para llegar hasta la geometría inicial de chapa (*blank*) se realiza una distribución de las operaciones que se van a efectuar hasta alcanzar el estado original de la lámina en blanco: Método PLAN. En el transcurso de este procedimiento se efectúan algunas modificaciones menores en la geometría original como cerrar agujeros en la pieza o realizar pequeños cambios sobre la geometría recibida, que simplifican la simulación. Estos ajustes incluyen también la alineación de la geometría con un sistema de coordenadas adecuado.

Una vez obtenidas estas geometrías necesarias en CAD se analizan las etapas de conformación, teniendo en cuenta las posibles restricciones impuestas por una línea de prensa real. En el desarrollo de las geometrías, se habrá de tener en cuenta el método PLAN que se seguirá para su conformado, el cual vendrá limitado por el número de prensas de las que se dispone, en este caso, de cuatro de ellas. Esto limita el método PLAN a cuatro operaciones.

Completado el paso anterior, se simula el proceso de estampación en cada etapa a través de un programa de elementos finitos del proceso de fabricación. El software seleccionado para esta tarea es AutoForm, que permite la simulación del conformado de chapa y hace posible la detección de errores y problemas como roturas de la pieza o posibles arrugas que se darían en un conformado real. De esta forma se puede poner en práctica un posible método PLAN sin el coste que supone una prueba real y permitiendo la optimización tanto de la pieza como de herramientas, fuerzas de la prensa, etc.

El análisis de los resultados de la simulación se amplía a través de un diseño de experimento o DOE, herramienta estadística usada para encontrar las condiciones ideales del proceso de fabricación, además de tener en cuenta posibles tolerancias y desperfectos que puedan tener tanto la chapa suministrada como las herramientas del proceso. En concreto se observa la idoneidad del método PLAN

Por último, se procederá con un análisis final de todos los resultados obtenidos, en el que poder concluir si la pieza es viable para los materiales seleccionados, si será necesaria alguna modificación de la geometría proporcionada o si por otro lado serán necesarios cambios más drásticos para su conformación.

3 FUNCIÓN Y ANÁLISIS DE LA PIEZA

La pieza forma parte de un bastidor LHL para una lavadora. El bastidor consiste en una estructura generalmente metálica cuya función principal es proporcionar un soporte y dotar de estabilidad a la lavadora. Este bastidor proporciona un marco robusto sobre el que poder montar y anclar algunas de las piezas de la lavadora tanto internas como externas. La diferencia principal de un bastidor LHL con un bastidor en U, más habitual, es que mientras que el bastidor en U es una sola pieza conformada y doblada en una misma chapa, el bastidor LHL se compone principalmente por tres paneles separados, un frontal y dos laterales, que serán unidos posteriormente.

El bastidor debe ser capaz de proporcionar al resto del conjunto una base robusta sobre la que asentar los demás componentes. Es por ello que debe de cumplir con una serie de propiedades básicas que garanticen un rendimiento óptimo y seguro de la lavadora. Entre estas propiedades se encuentran:

- Resistencia y durabilidad: El bastidor debe de ser capaz de aguantar las tensiones y las cargas que se generan durante el uso normal de la lavadora. Es por eso que se suelen fabricar con aceros de buena calidad y aleaciones resistentes.
- Estabilidad: El bastidor debe asegurar una base sólida y estable, al mismo tiempo que ha de ser capaz de absorber parte de las vibraciones que pueda generar el uso habitual de una lavadora.
- Facilidad de ensamblaje: El diseño del bastidor debe ser adecuado, de tal manera que proporcione puntos de fijación de los distintos elementos que deban anclarse a él.
- Compatibilidad con el diseño estético: Por lo general, el bastidor no suele ser visible una vez montada y colocada la lavadora en un hogar, ya que se encuentra bajo algún mueble o encimera. Sin embargo, en los casos que esto no se cumpla, su diseño, acabado y pintura de la tapa lateral debe ser importante y mantener una coherencia estética con el resto de los componentes de la lavadora, como puede ser el panel frontal.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora Memoria

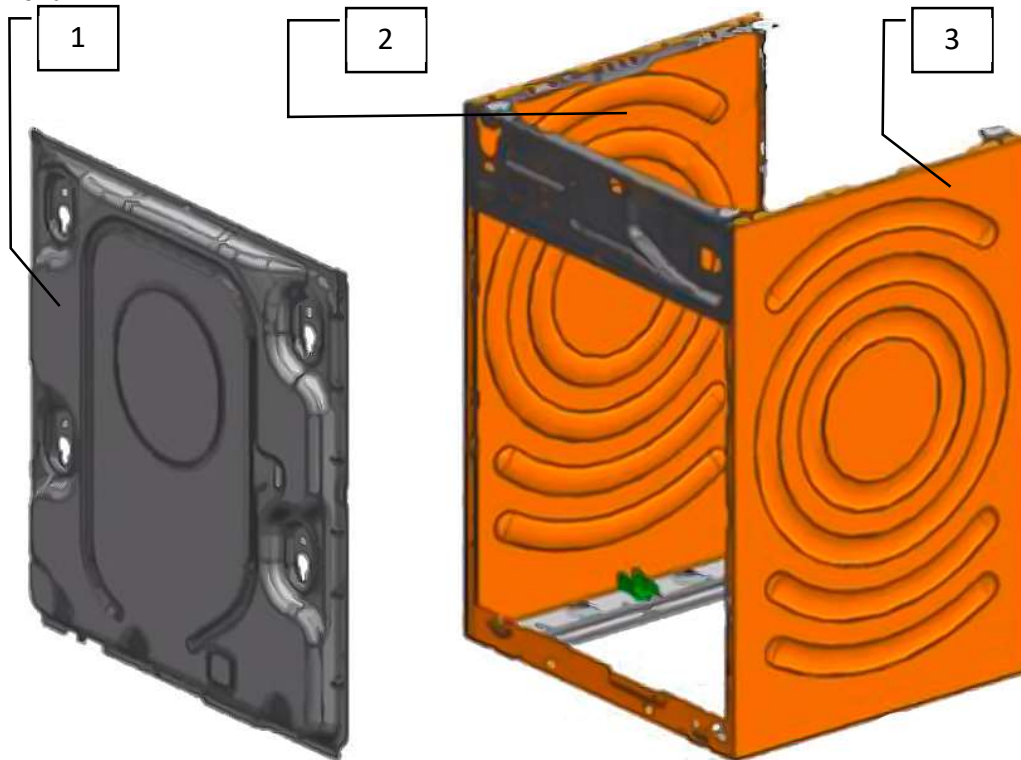


Ilustración 2 Bastidor en LHL dividido en 3 partes

En lo que respecta al proceso de fabricación de la tapa lateral, va a consistir en un conformado en chapa, que contará al menos con una embutición, un corte y algunos doblados.

En un principio esta pieza está diseñada para conformarse en acero DX52 de 0,8 milímetros de espesor. Este tipo de acero y conforme a la norma UNE-EN-10327, es un acero óptimo para la estampación, que además presenta ya un recubrimiento protector gracias a una inmersión en caliente. Aunque es un acero que puede ser estampado, sus propiedades para esta operación no son las mejores, como si pudieran ser las de un acero DC04. Sin embargo, debido a que las formas estampadas no son realmente complejas, se ha optado por realizarlas con este acero, que dotará a la pieza de mejores propiedades resistentes como su límite elástico y su resistencia a la tracción. En la siguiente tabla (tabla 2) podemos ver algunas de sus propiedades, así como posibles tolerancias en el suministro

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora

Memoria

TABLA 2

Designación		Composición química % en masa máx.						Limite elástico R_e^a MPa *	Resistencia a la tracción R_m MPa *	Alargamiento A_{80}^b % min.	Coefficiente de anisotropía plástica r_{90} min.	Coefficiente de acritud n_{90} min.
		C	Si	Mn	P	S	Ti					
DX51D	1.0226	+Z,+ZF,+ZA,+AZ,+AS						—	270 a 500	22	—	—
DX52D	1.0350	+Z,+ZF,+ZA,+AZ,+AS						140 a 300 ^c	270 a 420	26	—	—
DX53D	1.0355	+Z,+ZF,+ZA,+AZ,+AS						140 a 260	270 a 380	30	—	—
DX54D	1.0306	+Z,+ZA						120 a 220	260 a 350	36	1,6	0,18
DX54D	1.0306	+ZF						120 a 220	260 a 350	34	1,4	0,18
DX54D	1.0306	+AZ						120 a 220	260 a 350	36	—	—
DX54D	1.0306	+AS						120 a 220	260 a 350	34	1,4 ^{de}	0,18 ^e
DX55D	1.0309	+AS						140 a 240	270 a 370	30	—	—
DX56D	1.0322	+Z,+ZA						120 a 180	260 a 350	39	1,9 ^d	0,21
DX56D	1.0322	+ZF						120 a 180	260 a 350	37	1,7 ^{de}	0,20 ^e
DX56D	1.0322	+AS						120 a 180	260 a 350	39	1,7 ^{de}	0,20 ^e
DX57D	1.0853	+Z,+ZA						120 a 170	260 a 350	41	2,1 ^d	0,22
DX57D	1.0853	+ZF						120 a 170	260 a 350	39	1,9 ^{de}	0,21 ^e
DX57D	1.0853	+AS						120 a 170	260 a 350	41	1,9 ^{de}	0,21 ^e

A continuación, se va a realizar un pequeño análisis de las distintas geometrías de la pieza, así como sus dimensiones y particularidades.

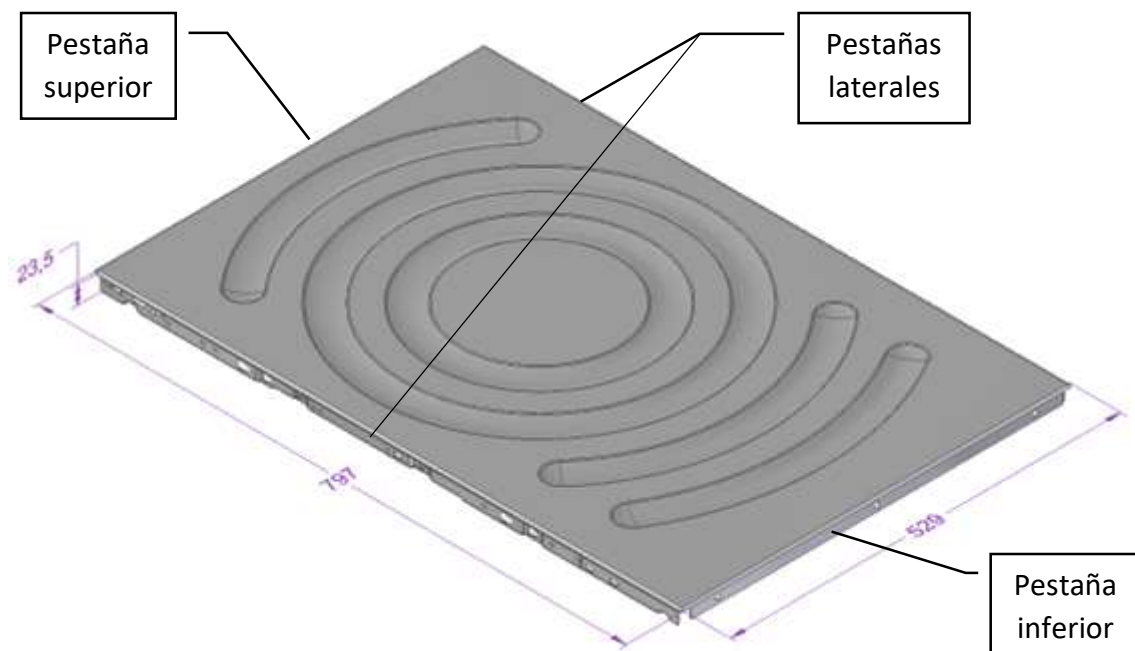


Ilustración 3 Dimensiones y pestañas de la pieza.

Como se puede ver en la ilustración anterior, las dimensiones clave de la pieza son las siguientes: 797 milímetros de largo por 529 milímetros de ancho, y con una altura máxima de 23,5 milímetros. Además, se puede distinguir 4 pestañas que forman parte de la misma y que aportan distintas funciones. En lo que refiere a la pestaña superior, su función principal el dotar de varios enganches sólidos para la suspensión del tambor, que puede conseguirse gracias a muelles. Por otra parte, la función de las pestañas laterales es permitir la unión de la pieza con distintas partes de la lavadora, como podría ser la tapa frontal. Además, estas pestañas laterales cuentan con un segundo doblado cuya función es prevenir cualquier corte que pudiera provocarse una persona al

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora

Memoria

manipular la tapa. Por último, la función de la pestaña inferior es proporcionar los agujeros en los que se atornillará el soporte patas de la lavadora.

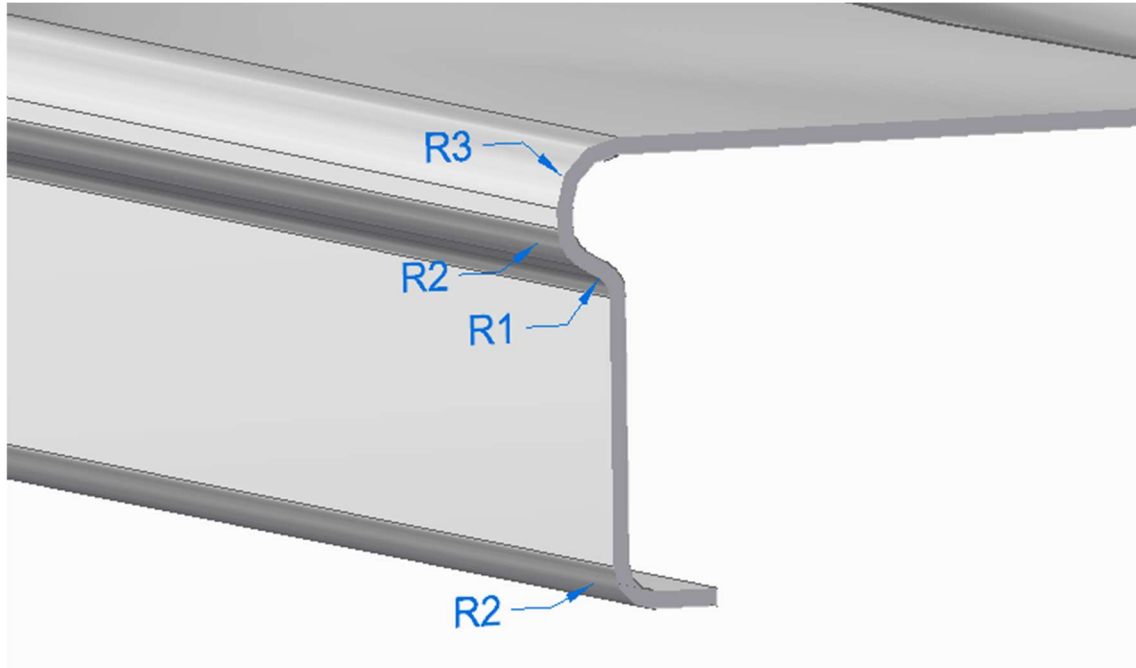


Ilustración 4 Sección lateral de la pieza, en la que se pueden observar los distintos radios de la misma.

Vista la ilustración anterior, se puede observar la complejidad de la misma en cuanto al número de ángulos que se han de lograr en la conformación de la misma. Debido al limitado número de operaciones de las que se dispone al poder realizarlas únicamente en 4 prensas, será necesario incluir alguno de estos en la operación inicial de estampación (op20), de forma que se reduzca el número de operaciones de doblado necesarias, incluyéndolas en 2 prensas.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 DIAGRAMA FLD Y CURVA FLC

El *Forming Limit Diagram* (FLD), o Diagrama de Límite de Conformado, se utiliza para comprender cómo se produce la deformación del material durante el proceso de conformación. En la ilustración 5 se presenta un ejemplo de FLD: la deformación mayor es siempre positiva, ya que la lámina se está estirando, mientras que la deformación menor indica la magnitud de estiramiento o contracción en la dirección transversal, por lo que puede ser positiva o negativa. En el FLD, se pueden observar diversas situaciones que surgen debido a la deformación del material.

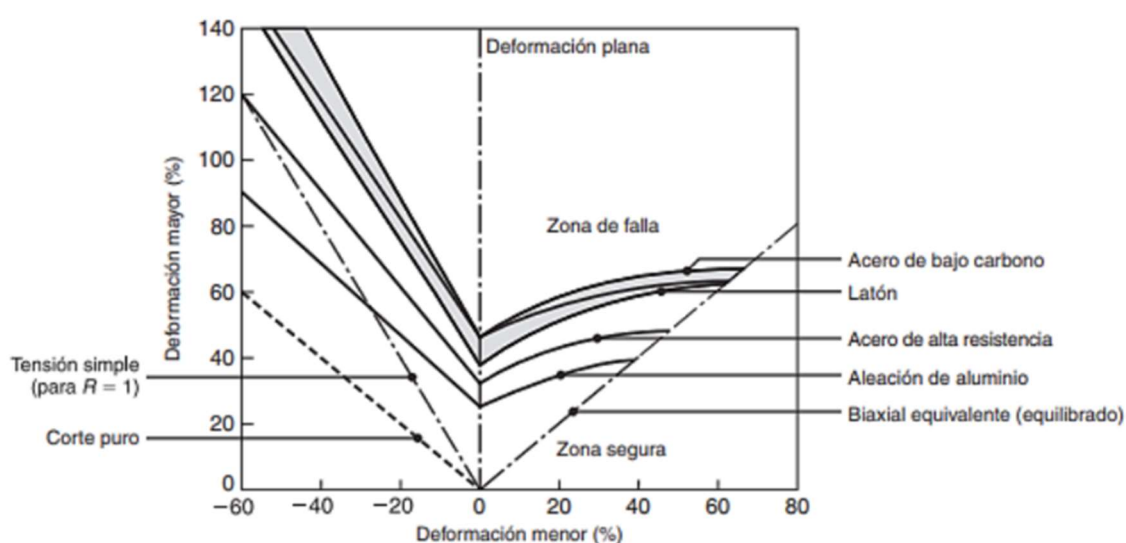


Ilustración 5 Diagrama FLD para distintos tipos de hojas metálicas

En contraste con una prueba de tracción uniaxial, en la cual ambas tensiones principales son nulas, en un proceso típico de estampado, los elementos se deformarán con esfuerzos de membrana. La tensión perpendicular a la superficie de la lámina es muy reducida, dado que la presión de contacto entre la lámina y las herramientas suele ser considerablemente menor que el límite elástico del material. Esta es la razón por la cual se asume un estado de deformación plana. En la ilustración 6 se presentan los resultados de la deformación de varios elementos tanto en tracción uniaxial (a) como en deformación plana (b).

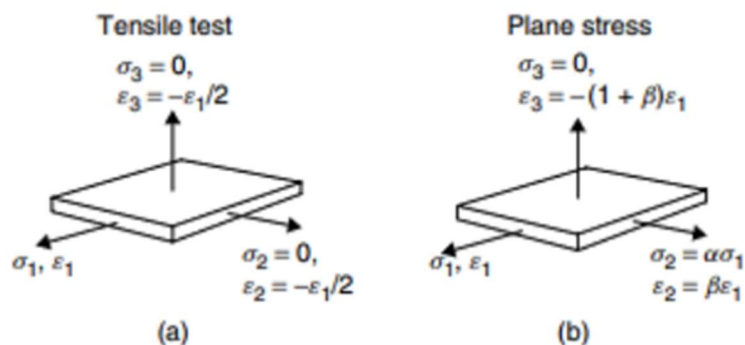


Ilustración 6 Esfuerzos y deformaciones para elementos bajo (a) tensión uniaxial y (b) un proceso general de deformación plana.

Además, es posible establecer una relación entre la deformación y diversos modos de fallo. Siguiendo la convención de asignar la dirección principal más grande al eje y positivo, los modos de deformación estarán siempre en las diagonales izquierdas o derechas de este eje. Un esquema de los diferentes modos se encuentra ilustrado en la ilustración 7, donde se observan las variaciones según la relación de las deformaciones en el plano de la chapa.

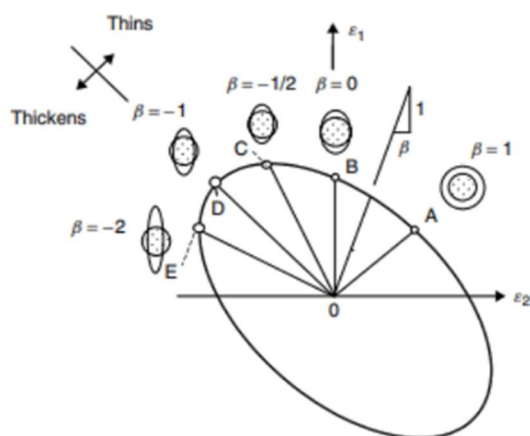


Ilustración 7 Diagrama de tensiones donde se muestran los distintos modos de deformación correspondientes a diferentes relaciones de esfuerzos.

Los diversos modos de fallo presentados en la ilustración anterior se indican utilizando deformaciones representadas por circunferencias, ya que la prueba se realiza utilizando un patrón de rejilla. En la ilustración 8 se muestra un ejemplo de compresión uniaxial, que se relaciona con una relación $\beta = -2$, y una situación cercana a la deformación plana, en la que en este caso $\beta > 0$.

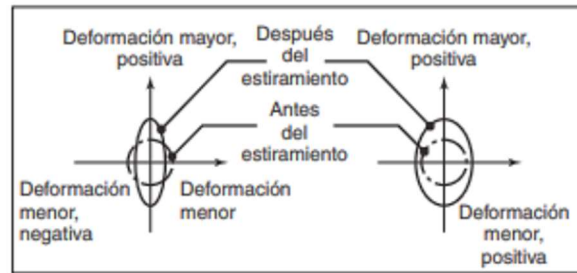


Ilustración 8 Deformaciones en patrones deformados de rejillas circulares

Para determinar en qué condiciones ocurre el fallo en la lámina y cómo varían los niveles de deformación según el modo, se utiliza la curva límite de conformado (FLC, por sus siglas en inglés, *Forming Limit Curve*). Esta curva se relaciona con las diversas líneas presentes en la ilustración 5. La FLC representa la frontera entre las diferentes situaciones de deformación y el punto de ruptura del material. Bajo esta curva se encuentran diversas regiones que el software AutoForm señala mediante códigos de color (ilustración 9).

El método de sombreado aplicado a las diversas áreas del diagrama FLD en AutoForm, así como en todo el análisis del estudio de conformación, se basa en el rango de deformación. La zona que se ubica por encima de la curva se relaciona con la región de rotura y se resalta en color rojo. Justo debajo, en la zona amarilla, se encuentra el área de riesgo de roturas, lo que implica que el material ha sufrido deformaciones excesivas y se requiere precaución al trabajar en estas áreas y aplicar los resultados en la práctica. A la derecha de la región amarilla se sitúa el área en la que la lámina ha experimentado una reducción excesiva en el espesor, coloreada en marrón. La zona verde representa la zona segura, donde los puntos no han experimentado deformaciones que puedan plantear algún riesgo en la conformación. La zona azul corresponde a áreas comprimidas, mientras que la zona morada está relacionada con posibles engrosamientos del material. Esta área morada se vincula directamente con la formación de arrugas, que puede dar lugar a fallos estéticos y desviaciones en las tolerancias. Estas mismas regiones pueden compararse con la ilustración 10, extraída de "Mechanics of the Sheet Metal Forming".

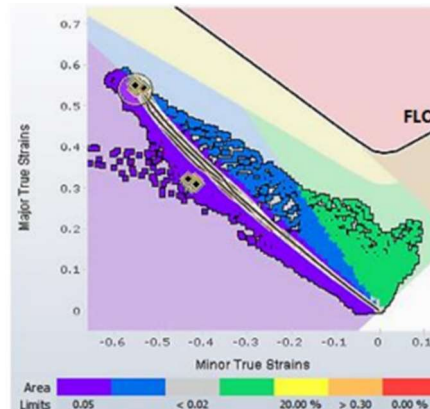


Ilustración 9 Diagrama FLD extraído del Manual de AutoForm con la escala de color en función de la deformación. Se incluye todo el rango de valores que han alcanzado los distintos puntos a hasta acabar con la deformación final.

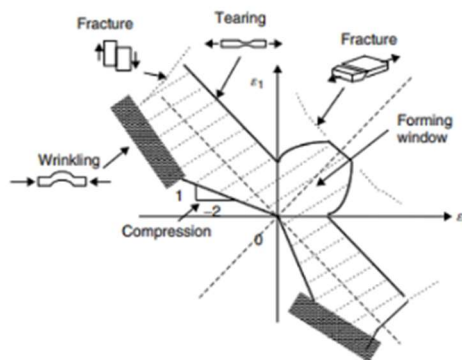


Ilustración 10 Ventana de conformado en la estampación de una chapa con deformación plana.

4.2 MAX FAILURE

El parámetro *Max Failure* suele ser habitual en programas de conformación de chapa, en este caso AutoForm, y representa el cociente entre la mayor deformación que se obtiene en un punto de la pieza y el límite de conformación para ese material, obtenido del diagrama FLD. Por lo tanto, si este cociente no excede el valor unidad, se puede determinar que la chapa no llegará a rasgar.

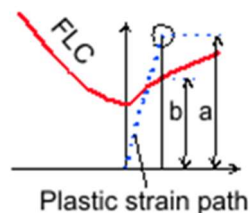


Ilustración 11.

4.3 ARRUGAS

Para evaluar la formación de arrugas en la chapa, además de analizar la deformación en el diagrama FLD, se realiza un cálculo que considera dos variables: el espesor de la chapa y su curvatura en las áreas cóncavas. La medida de esta concavidad se calcula en relación con la herramienta utilizada. Si en esa área existe contacto con la herramienta, se interpreta como parte de la geometría, por ejemplo, un redondeo. En cambio, si no hay contacto entre la chapa y la herramienta, como se puede apreciar en la siguiente ilustración, entonces se clasifica como una arruga.

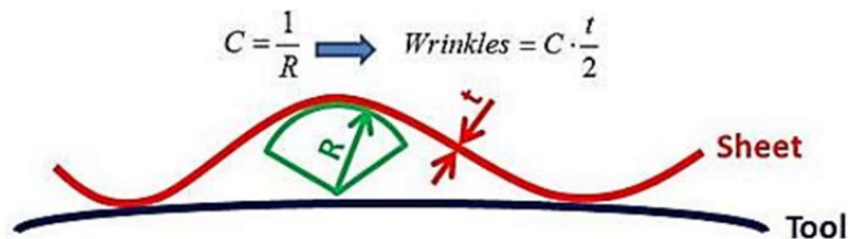


Ilustración 12 sección de contacto entre la chapa y la herramienta determinar la aparición de arrugas.

A pesar de que las arrugas puedan desaparecer durante el cierre final de las herramientas durante el proceso de estampado, el color de la zona en AutoForm se mantendrá conforme a su escala. Si se desea obtener una comprensión más detallada sobre el riesgo de que puedan surgir arrugas en operaciones futuras, se puede utilizar la variable *potential wrinkles*. Sin embargo, a pesar de que este cálculo también considera la anisotropía del material, los resultados se observarán principalmente a través del diagrama FLD.

5 MÉTODO PLAN

Una vez recibida la geometría, se procede a obtener todas las superficies de contacto que serán necesarias para el desarrollo de las distintas herramientas, matrices, machos y pisadores de las distintas etapas. Se comienza realizando una copia de la superficie superior de la pieza (debido a como se trabaja en AutoForm) y eliminando todos los agujeros de esta. A continuación, se trabaja deshaciendo las distintas etapas, de pieza final a primera etapa. Entonces se puede elaborar un método PLAN que pueda ser viable a partir de estas superficies.

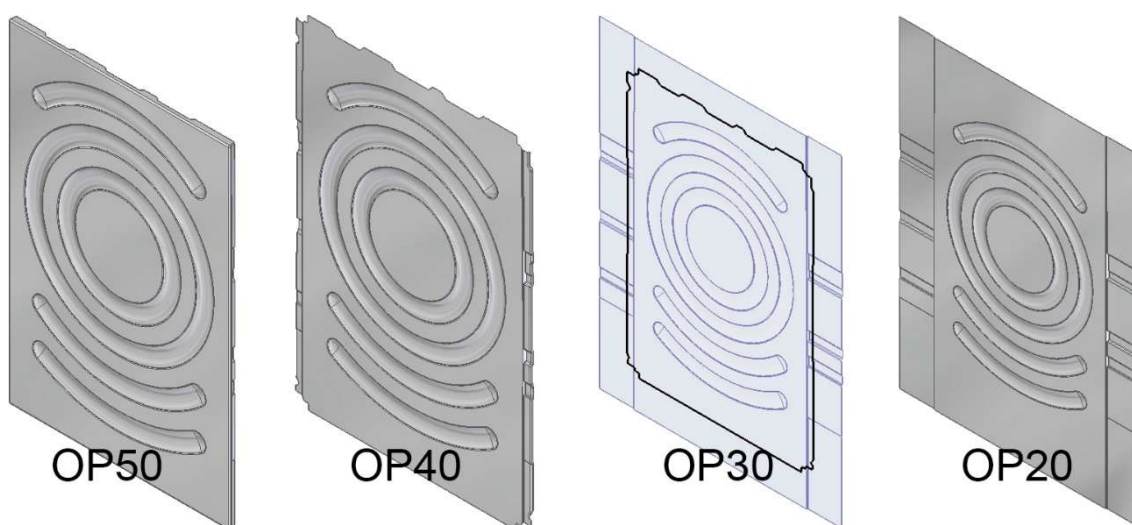


Ilustración 13.

El método PLAN seguido puede resumirse en distintas operaciones recogidas en la tabla 1. Todas las operaciones han sido simuladas en AutoForm, desde la estampación inicial hasta el corte y los doblados posteriores.

TABLA 1	
<i>Resumen del método PLAN</i>	
Etapas	Operaciones
OP20	Embutición geometrías principales
OP30	Trim ajustado a la geometría final
OP40	Primer doblado pestañas laterales
OP50	Segundo doblado pestañas laterales

Con el fin de facilitar la comprensión de esta tabla y las diversas operaciones a llevar a cabo, se destacan en las ilustraciones 14 y 15 las áreas de la pieza más relevantes.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora
Memoria

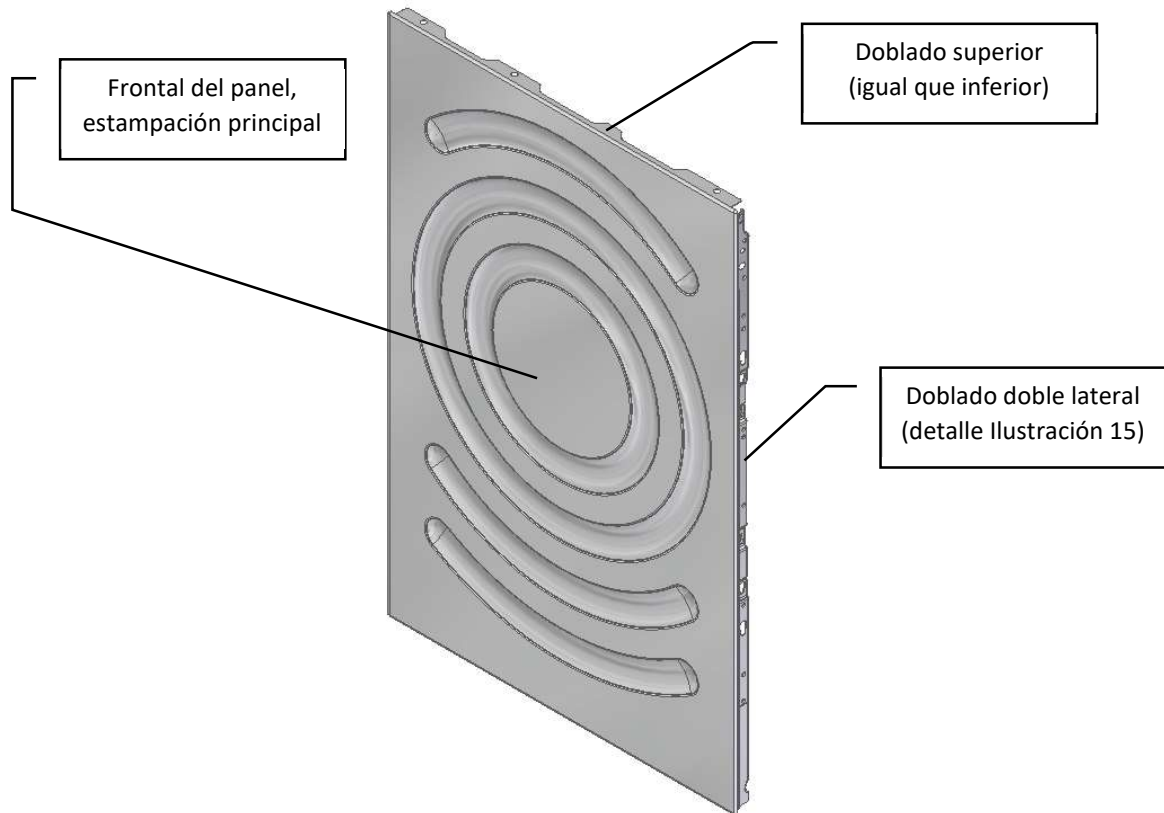


Ilustración 14.

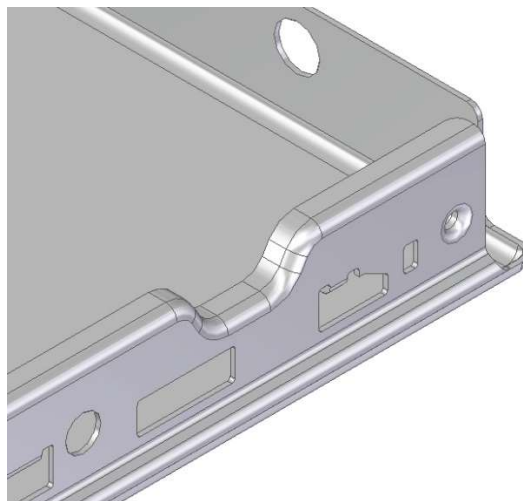


Ilustración 15 Detalle de los doblados laterales.

Por lo tanto, después de eliminar los agujeros, la forma resultante de la op50 se muestra en la ilustración 16. Esta geometría ha sido la base para el desarrollo del diseño de esta operación.

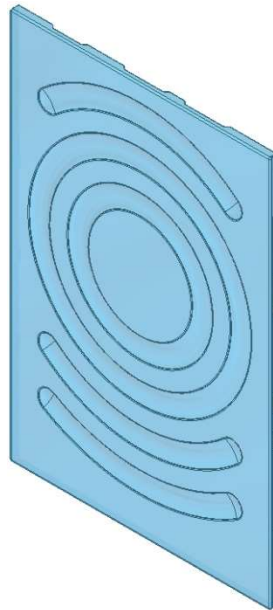


Ilustración 16 Piel superior de la op50 (pieza final) tras limpiar agujeros.

Como se mencionó previamente, para poder obtener la op40 a partir de la geometría final de la op50, que implica el doblado de los laterales utilizando un macho, es esencial efectuar este desdoble en la geometría CAD correspondiente (ver ilustración 17). Para lograrlo se procede a calcular el doblado considerando la fibra neutra para determinar la superficie que debe agregarse, y cuyo calculo puede verse en el anexo correspondiente. Es importante resaltar que este doblado es solo el punto de inicio y proporciona una dirección a seguir.

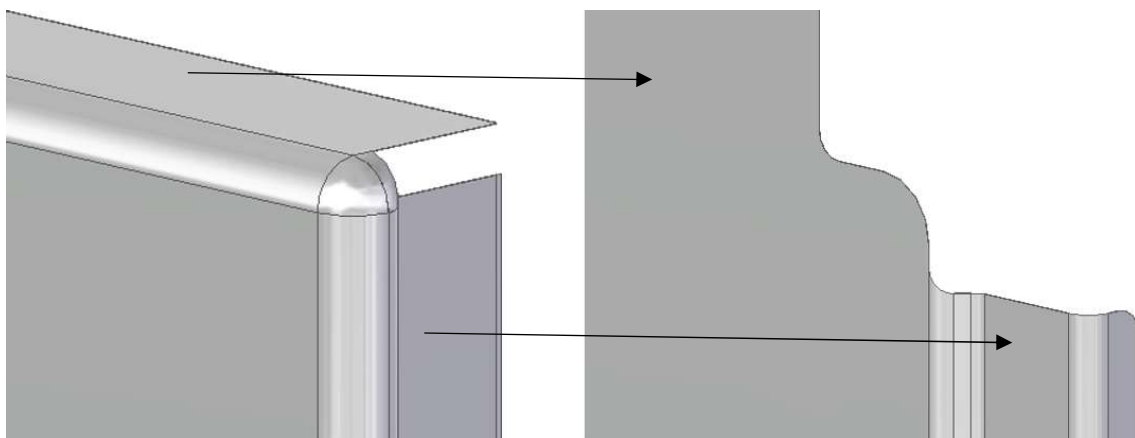


Ilustración 17 Desdoble de la op50 (izquierda) para obtener la op40 (derecha).

Para el diseño de la op30 es necesario diseñar previamente la op20, de la cual se obtendrá la línea de corte a través de AutoForm. El desarrollo de la op20 es más sencillo de calcular que el de la op40, ya que se puede partir de la op50 final y realizar un corte en CAD en los bordes de la pieza antes de que doblen, y luego extender estas superficies hasta obtener un rectángulo que simularía el tamaño de chapa de una bobina.

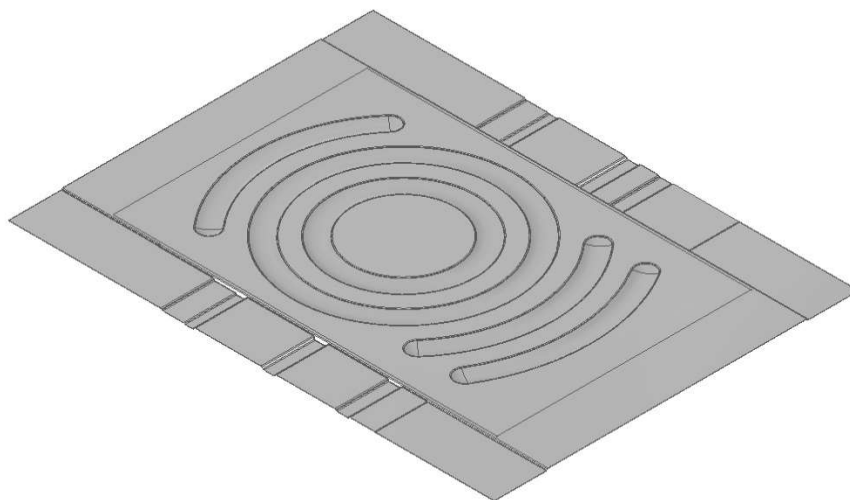


Ilustración 18 Desarrollo de la op20 a partir del corte en la op50.

Con estas geometrías (op50, op40 y op20) todavía no se podrían recrear todas las herramientas en AutoForm, es por ello por lo que se hacen copias de las mismas para introducir algunas modificaciones. Un ejemplo es la necesidad de extender algunos doblados para poder diseñar correctamente el macho, que debe bajar lo suficiente para doblar correctamente la pieza, además de que hay que diseñarlos con un radio que en este caso será de 2 milímetros. En la siguiente ilustración se puede ver un ejemplo de la op40 y la que se ha llamado “op40_htas”

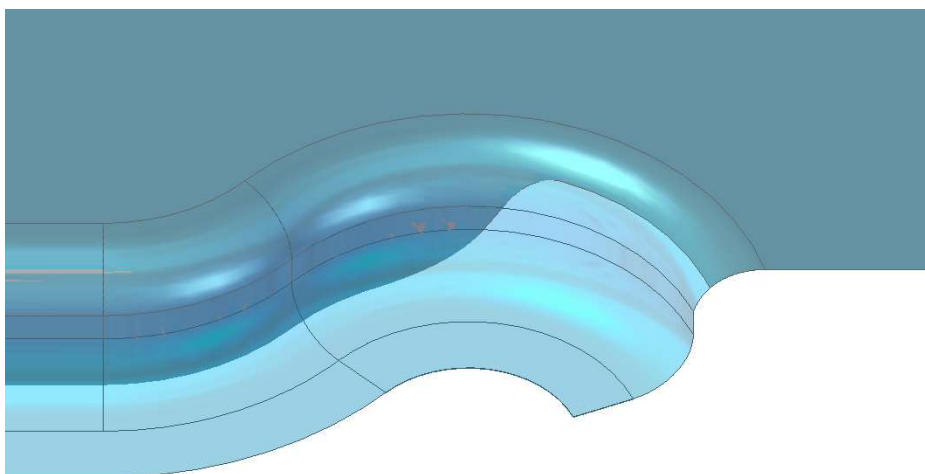


Ilustración 19 op40 en tono oscuro y op40_htas en tono claro. Podemos ver cómo ha sido necesario extender tanto la curva como introducir un radio para el macho (de 2 milímetros).

Además de estas nuevas geometrías, y como se detallará en secciones posteriores, fue necesario realizar modificaciones parciales en algunas de estas geometrías para lograr una adaptación exitosa a un método PLAN viable. En esta parte, solo se ha proporcionado una visión general del proceso y del trabajo realizado en las superficies de la geometría del panel lateral, empleando distintos enfoques de modelado.

Es evidente que el proceso de modificar todas las geometrías CAD no es sencillo, lo que implica que abordar todas estas áreas y cambios en la geometría es un proceso complejo y que requiere una inversión significativa de tiempo. Además, estas geometrías se crean inicialmente con un desdoble ficticio que también facilita el análisis del recorte. Sin embargo, el tiempo utilizado en este proceso inicial no se ha podido emplear posteriormente para investigar posibles variaciones relacionadas con el material.

6 SIMULACIONES PANEL LATERAL

Considerando el enfoque PLAN planificado, se llevarán a cabo simulaciones para el panel lateral que abarcarán desde la operación op20 hasta la op50. El estudio de la etapa op10 no se tendrá en cuenta para las simulaciones, ya que se trata del corte de la chapa de la bobina con la longitud correcta, y no se prevé ningún problema ni complicación para esta operación.

6.1 MATERIAL

Para las simulaciones del proceso de conformado se ha utilizado la biblioteca de AutoForm para tener unas propiedades nominales con las que hacer las simulaciones principales, y que no forman parte del estudio DOE. Con ellas se pueden obtener unas primeras conclusiones, así como utilizar los resultados para modificar alguna geometría o la línea de corte. Se pueden ver las propiedades que da AutoForm al acero DX52D en la siguiente ilustración:

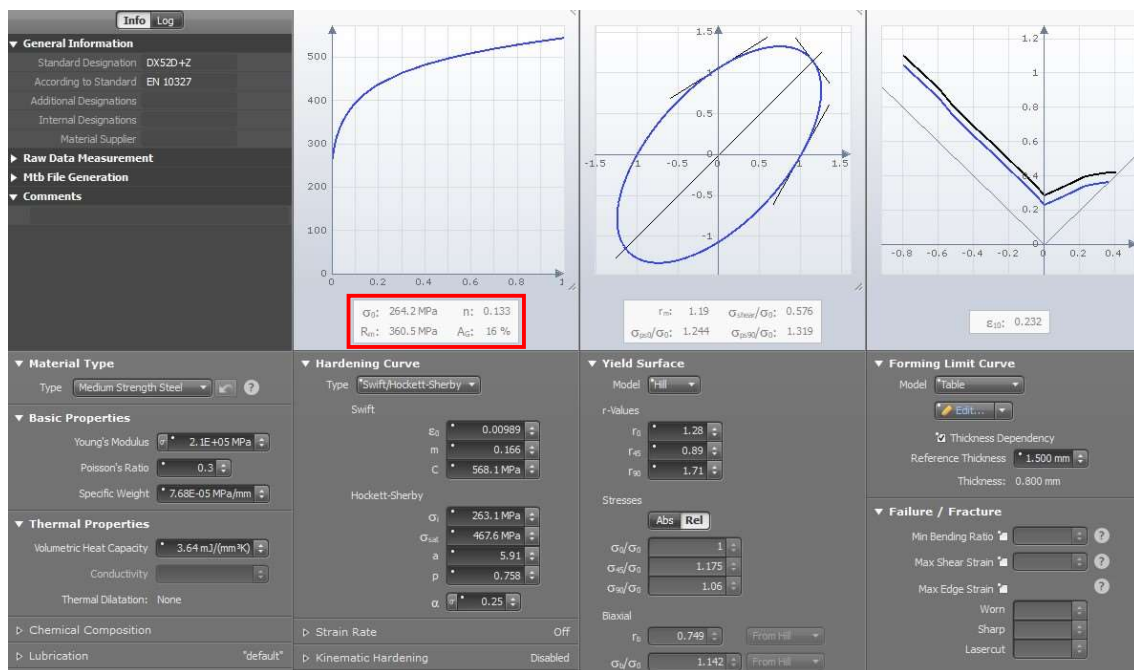


Ilustración 20.

Las principales propiedades en las que fijarse y que son señaladas en la ilustración 20 son las siguientes:

- **Límite Elástico (σ_0):** El límite elástico de un material se refiere al punto en el cual su comportamiento deja de ser lineal bajo la aplicación de una carga o fuerza. En otras palabras, el límite elástico es la máxima tensión que un material podría soportar sin experimentar una deformación plástica permanente después de que la carga se retire. Este límite indica

almacenar y liberar energía sin sufrir una deformación duradera o, en otras palabras, la capacidad del material para absorber energía elásticamente.

- **Resistencia a la tracción (R_m):** La resistencia a la tracción de un material se refiere a su capacidad para resistir a fuerzas de tensión que tienden a estirarlo o alargarlo. Representa la carga máxima o la fuerza que el material puede soportar antes de fracturarse o romperse debido a una carga de tracción aplicada en una dirección axial.
- **Coefficiente de endurecimiento (n):** El coeficiente de endurecimiento de un material es un parámetro indicador de cómo su resistencia mecánica se incrementa como reacción a la deformación plástica. Se refiere al cambio en la resistencia del material por cada unidad de deformación plástica aplicada.

Una vez conocido el material y después de haberlo introducido en AutoForm, se puede seleccionar las dimensiones de la chapa que se va a utilizar para la simulación. En este caso será una *blank* de una altura de 900 milímetros por 650 milímetros de anchura, y como se dijo anteriormente, de 0,8 milímetros de espesor.

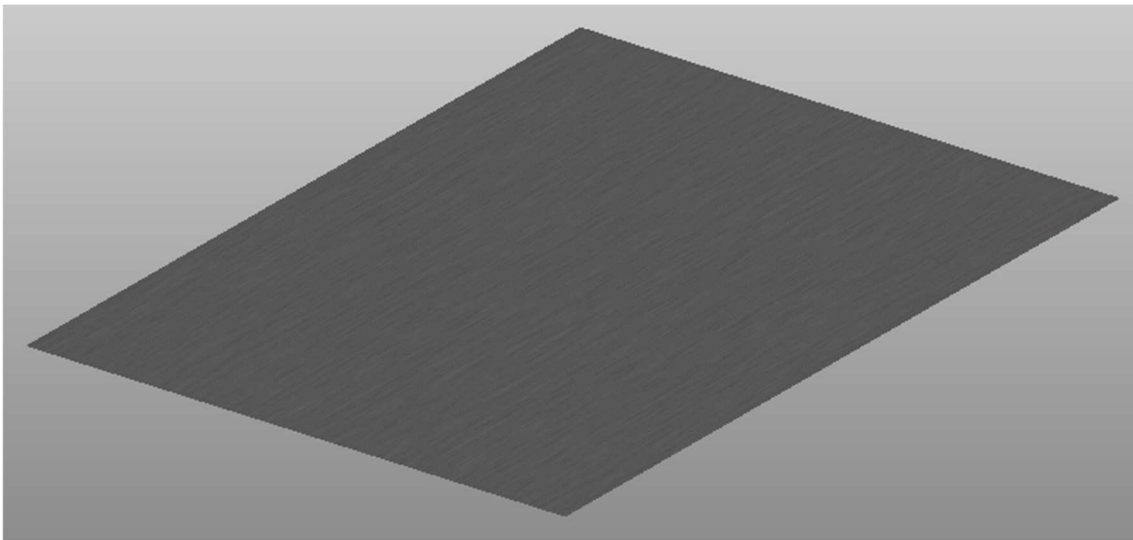


Ilustración 21 Dimensiones de la chapa utilizada.

6.2 ETAPA OP20

La primera etapa consiste en la estampación de las formas principales de la geometría de la tapa lateral. Para el desarrollo de esta operación será necesaria la matriz, así como varios machos y pisadores debido a las formas estampadas, cuya función es tanto dar rigidez a la tapa como servir de decoración para la lavadora.

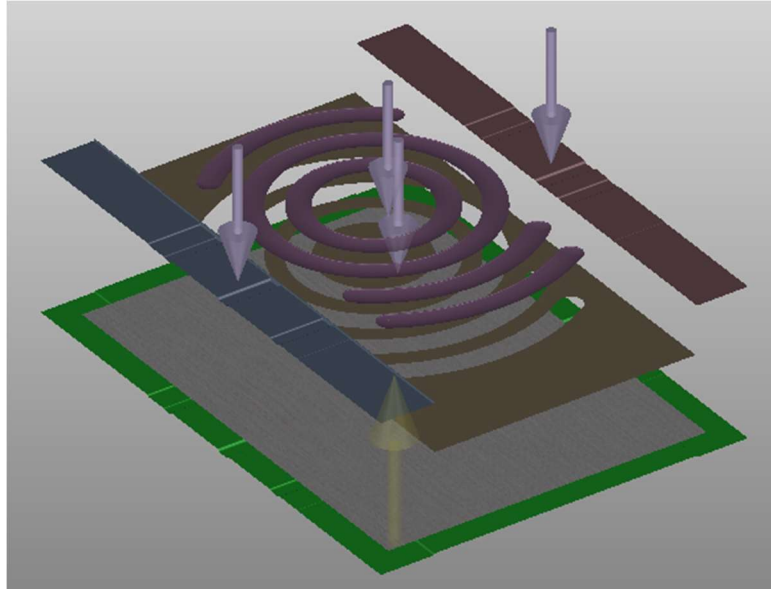


Ilustración 22 Pieza antes de op20 y herramientas.

Una vez simulada la estampación se procede a analizar los resultados, aunque no se esperan mayores complicaciones es posible que el alto coeficiente de rozamiento pueda provocar algunas roturas en la pieza.

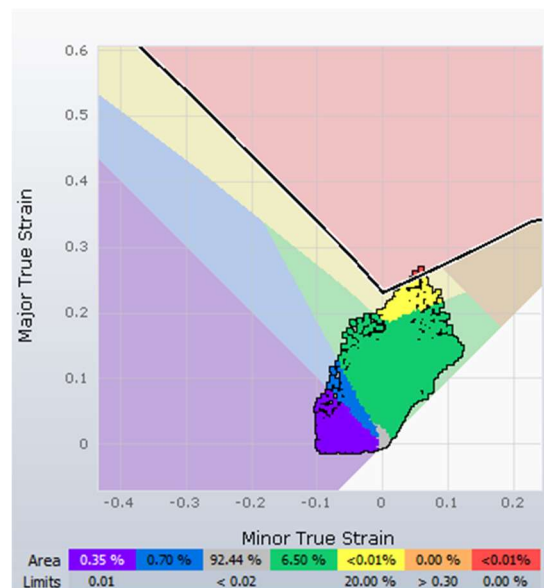


Ilustración 23 Diagrama FLD tras la operación op20.

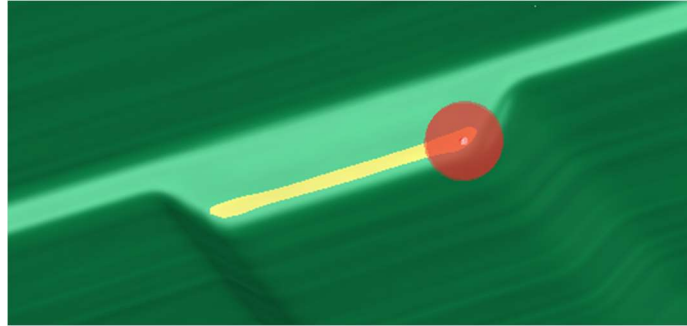


Ilustración 24 Zona conflictiva tras la op20.

Como se puede ver en las ilustraciones si existen algunas zonas en las que se sobrepasa el límite elástico del material y provoca una zona que sobrepasa el *Max Failure*, lo que indica que muy posiblemente en un ensayo real surgiría una rotura en esa zona. En este caso es debida a una profundidad de estampación mayor en esa zona que provoca un crecimiento del área de la pieza demasiado grande. Se prevé que estas roturas sean eliminadas tras reducir el coeficiente de rozamiento. Por lo demás la pieza tras esta operación no presenta más inconvenientes.

6.3 ETAPA OP30

La siguiente etapa consiste en único corte que se va a realizar, el cual es necesario que sea preciso que, después de realizar las siguientes operaciones, los bordes de la pieza generada se ajusten correctamente a la pieza importada y deseada. Para ello es necesario introducir una geometría inicial dentro de AutoForm que permita el cálculo posterior de la línea de corte y una optimización de la misma. Esta geometría fue exportada desde Solid Edge y después de que AutoForm generase la línea de *Trim* a través de dos desdobles, fue importada de nuevo, para poder simplificar y optimizar de esta manera la línea.

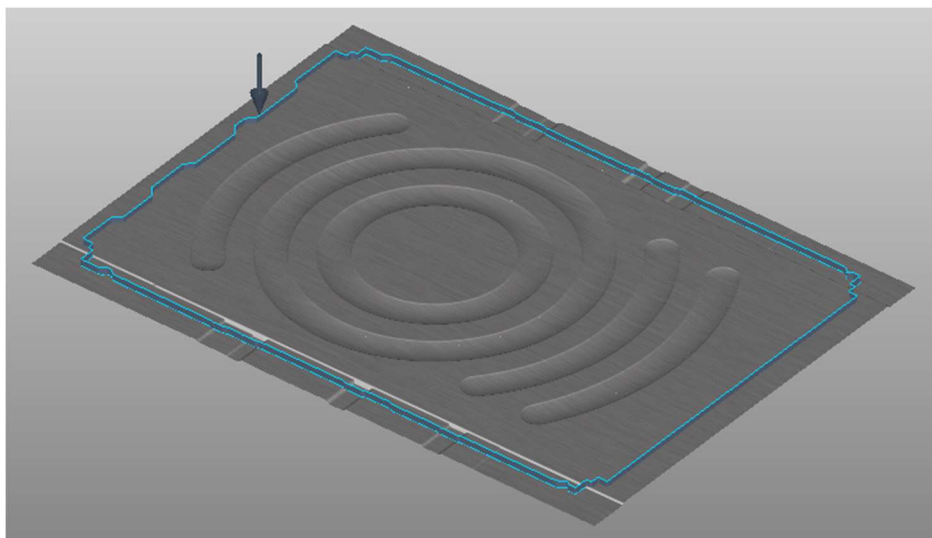


Ilustración 25 Línea de Trim, herramienta de corte y dirección de la misma.

Esta operación no genera ningún cambio respecto a la operación anterior, así que el único problema es ajustar posteriormente esta línea. AutoForm ofrece la posibilidad de hacer un *setup* para ajustar la línea de *Trim* a través de un método iterativo. Sin embargo, en este caso no fue posible, posiblemente debido a que el corte de la pieza no se realizaba en una superficie de dos dimensiones como puede ser una *blank*, si no en una pieza que ha recibido un estampado previo, modificando la geometría y generando así una línea *Trim* en 3D.

6.4 ETAPA OP40

En esta operación se va a realizar el primero de los doblados, que solo afecta a los laterales de la pieza. Por ello, serán necesarios dos machos independientes, uno para cada lateral, y que además debido a la geometría de la pieza no serán simétricos.

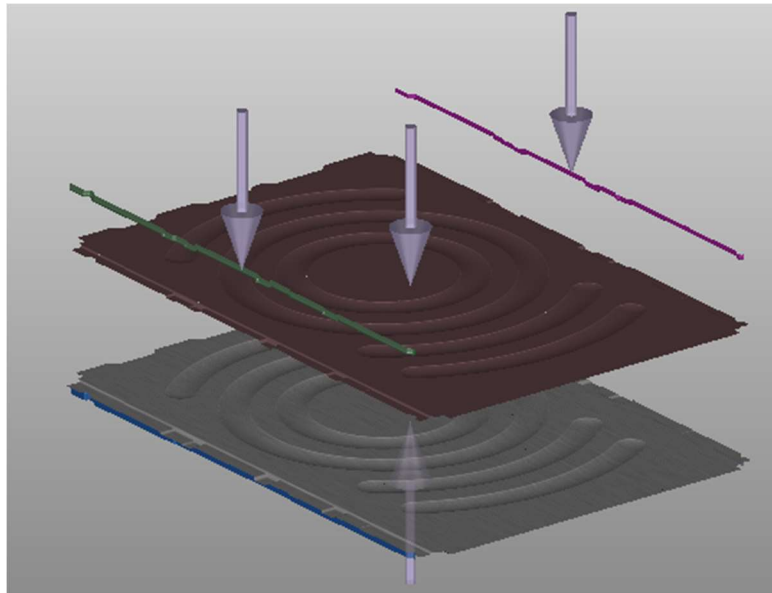


Ilustración 26 Pieza antes de op40 y herramientas.

El proceso de doblado puede producir tanto roturas como posibles arrugas de la pieza. Ambos desperfectos son causados por la diferencia de diámetro de la pieza antes de doblar y después. En zonas cóncavas puede producirse una rotura del material, ya que pasamos a tener un diámetro mayor, al igual que puede ocurrir en un proceso de *hole-flanging*. Por el contrario, en zonas convexas es posible producir arrugas, al pasar de un diámetro mayor a uno menor.

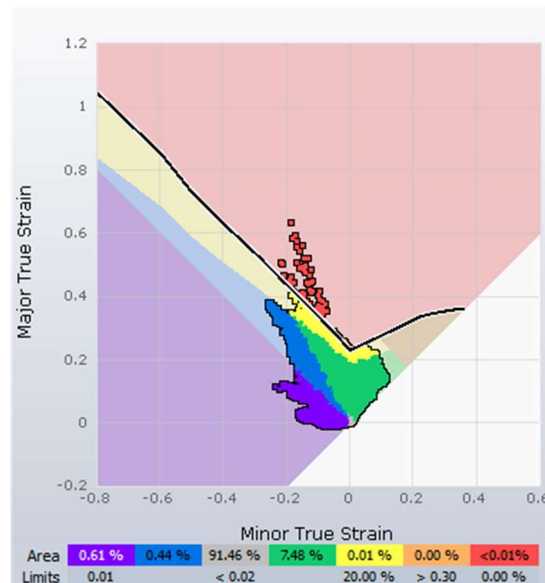


Ilustración 27 Diagrama FLD tras operación op40.

Como se puede observar gracias al diagrama FLD, esta operación si genera muchos más problemas para su conformado. Las zonas conflictivas son por lo general zonas en las que se ha alcanzado el límite *Max Failure*, más concretamente las vistas en las ilustraciones 28, 29 y 30.

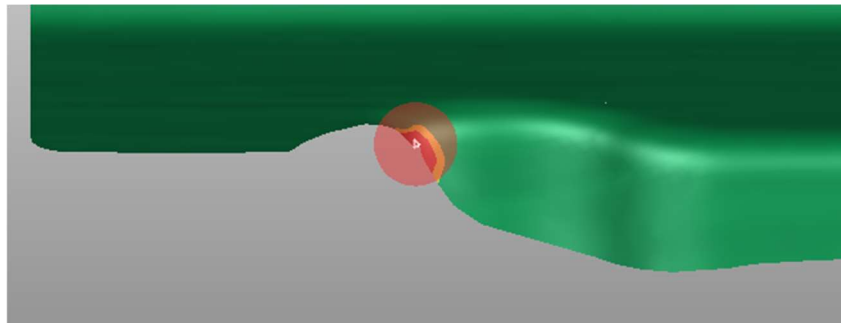


Ilustración 28 Detalle más problemático en la esquina de la pieza (simétrica para ambos lados).

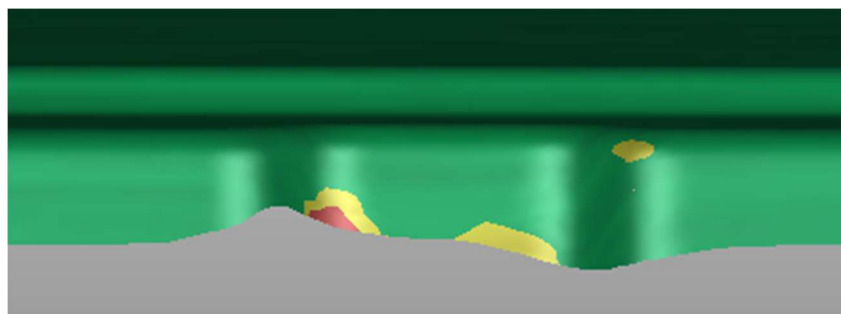


Ilustración 29 Detalle del lateral izquierdo de la pieza (no simétrico).

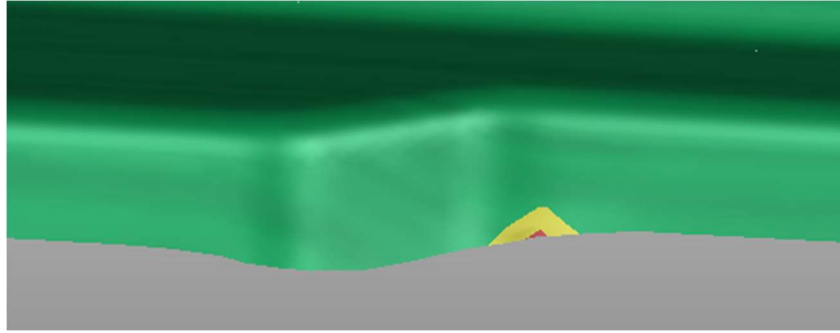


Ilustración 30 Detalle del lateral derecho de la pieza (no simétrico).

Estas son las tres zonas (cuatro en realidad) en las que se produce rotura en la pieza. Por otro lado, también existen zonas con arrugas potenciales, como se puede observar en la siguiente ilustración. Sin embargo, estas arrugas se producen en zonas muy cercanas al límite de la pieza y como se ha podido observar tras esta operación, la línea de *Trim* está lejos de ser aceptable, por lo que habrá que ajustarla posteriormente, y cuyo ajuste será también en beneficio de eliminar algunas zonas con estas posibles arrugas.

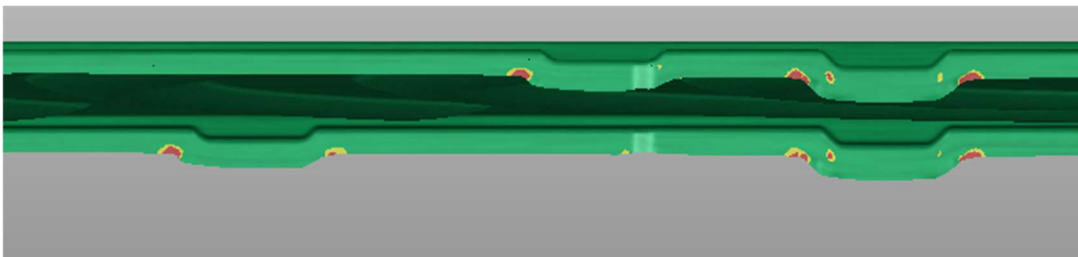


Ilustración 31 Algunas zonas con arrugas potenciales.

6.5 ETAPA OP50

En esta última operación se va a desarrollar el segundo doblado de la pieza. Este doblado afecta de nuevo a los laterales de la pieza y también a la zona superior e inferior. Los doblados laterales serán probablemente los más problemáticos ya que además de por su geometría más compleja será necesario el uso de carros para lograr un doblado de 90°. Por otro lado, no se prevén inconvenientes para los doblados superior e inferior ya que ambos son doblados rectos, sin geometrías complejas y sin uso de carros.

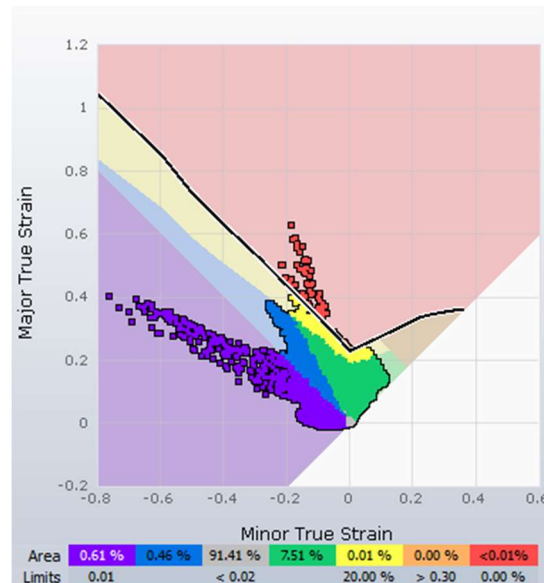


Ilustración 32 Diagrama FLD tras operación op50.

Como se puede observar en el diagrama FLD y tras compararlo con el de la op40, después de realizar esta operación no se generan nuevas zonas por encima del *Max Failure*, por lo que por este lado la operación no genera roturas en la pieza. Sin embargo, si se puede ver cómo existen zonas en las que se pueden desarrollar posibles arrugas, así que es necesario analizarlas con las herramientas que ofrece el programa. Estas herramientas permiten ver (ilustración 33) como estas nuevas zonas problemáticas por las arrugas potenciales se encuentran en las esquinas de la pieza, que también son dobladas, y que pasan de tener un diámetro mayor a uno menor.

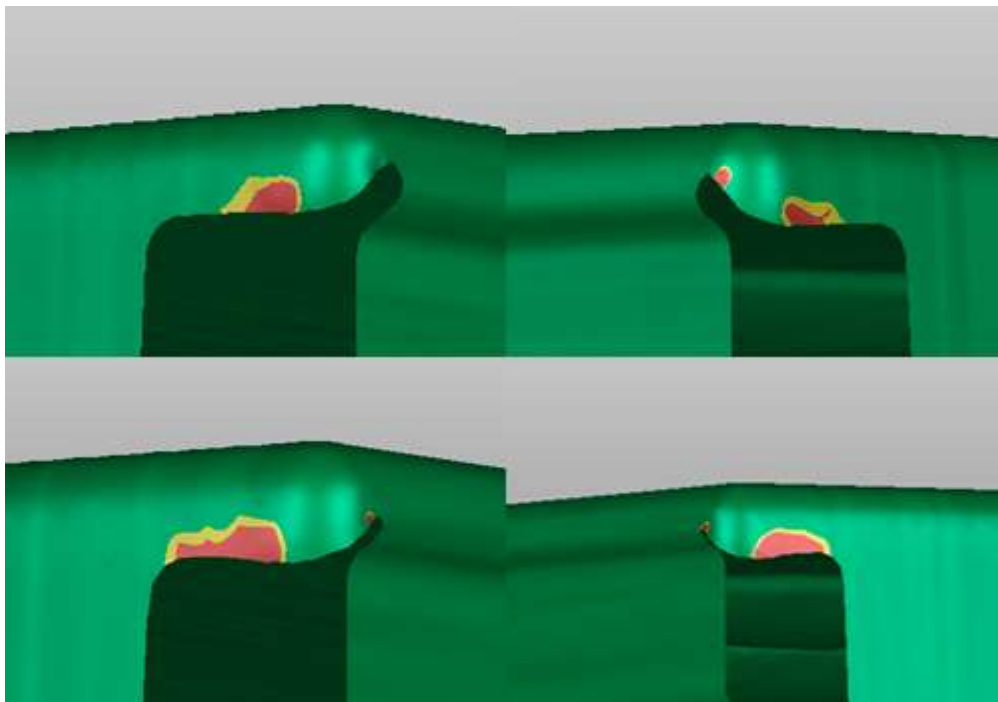


Ilustración 33 Arrugas potenciales en las cuatro esquinas tras op50.

6.6 ANÁLISIS

Una vez vistas todas las etapas del conformado y sus resultados podemos concluir que con la geometría actual y las propiedades del material seleccionado (DX52D), la pieza no acaba de ser viable. Esto se debe a que existen varios puntos de rotura en alguna de las operaciones, así como zonas con posibles arrugas. Además, con la línea de *Trim* actual, la pieza final está lejos de ajustarse correctamente a la geometría deseada, por lo cual se va a realizar un estudio de *Trim* a parte.

7 ESTUDIO DE TRIM

Como se ha visto en el apartado anterior, la línea de *Trim* no se ajusta lo suficiente a la pieza deseada. Esto se debe a que la línea calculada por AutoForm no es lo suficientemente buena y, además, no ha sido posible realizar un *setup* de la línea, que hubiese ido aproximando la línea hasta alcanzar unas tolerancias marcadas a través de un método iterativo de simulación.

Como no ha sido posible realizar este *setup* se va a ajustar esta línea de *Trim* de una forma menos automatizada. Para ello se va a dividir la pieza tras la op40 y la línea de *Trim* obtenida en el apartado anterior en varias secciones. De esta forma se logra que una vez se modifique la línea de *Trim*, se puedan ver los resultados de la simulación de una manera mucho más rápida, ya que no tiene que simular la pieza entera. Una vez se tengan todas las secciones ajustadas con la línea de *Trim* correcta, se procederá a exportarlas a un mismo archivo CAD para unir las, y optimizar la línea.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora
Memoria

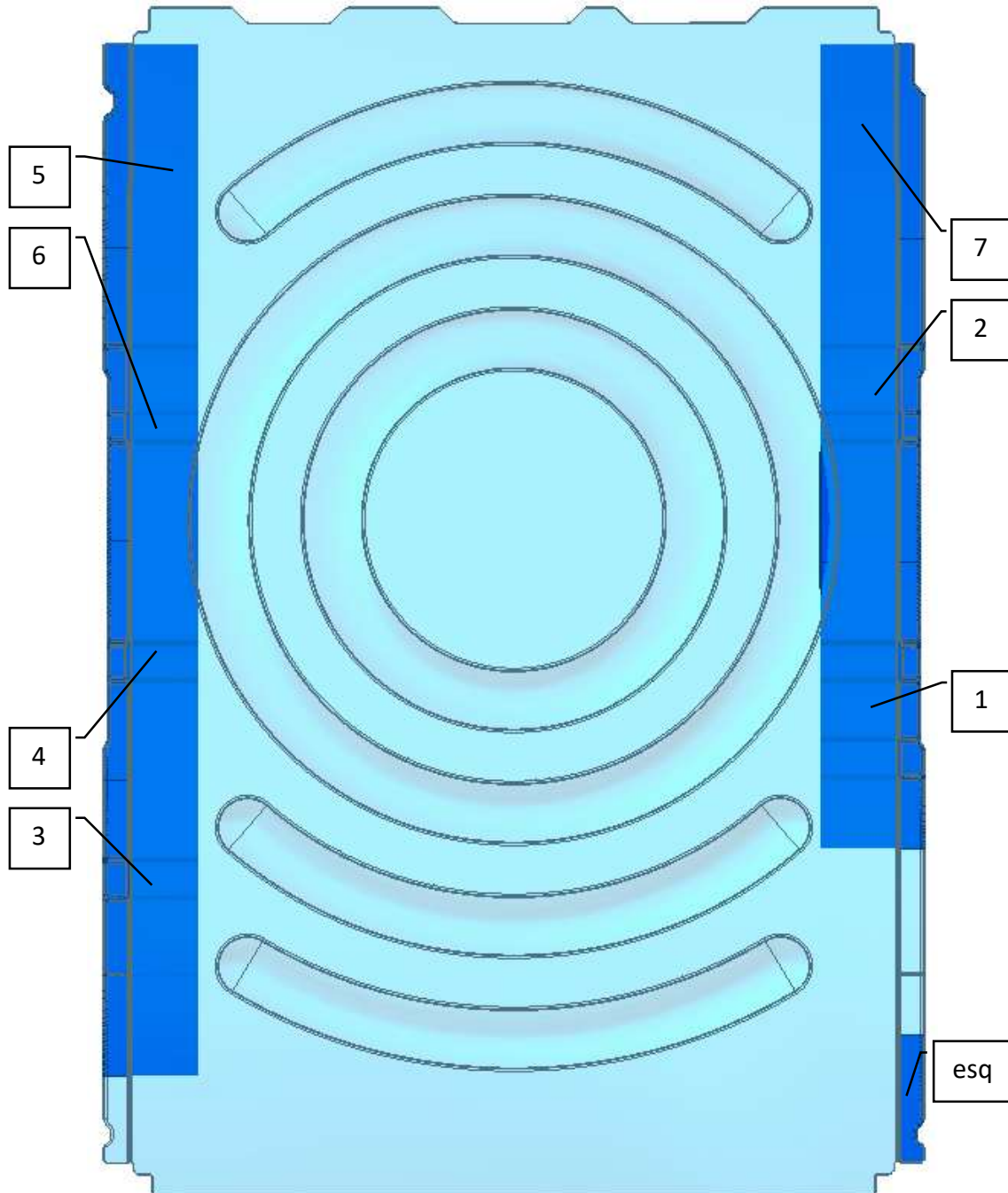


Ilustración 34 Mapa de las distintas zonas de la pieza que se van a estudiar por separado.

7.1 ESQUINA INFERIOR (SIMÉTRICA)

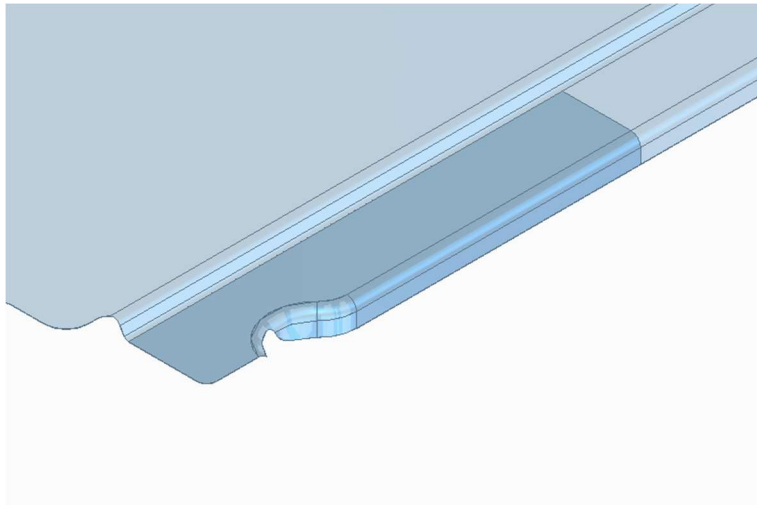


Ilustración 35.

Esta esquina es problemática como se ha visto anteriormente debido que se excede el límite elástico del material en la zona de la curva. Se han diseñado varios métodos de estampación. A la primera versión hubo que aplicar algunos cambios, como aumentar la fuerza de pisado. Esto se debe a que al haber dividido la pieza se ha reducido también el área de pisado del pisador y por ello es necesario aumentar la fuerza que ejerce el mismo para evitar el desplazamiento de material. Como esta primera versión no ajustaba correctamente se optó por incluir una contraestampa en el macho. La contraestampa consiste en modificar la geometría del macho, añadiéndole un radio igual al del doblado, de tal forma que al bajar ayude a la chapa a doblar correctamente. De esta manera se consiguió ajustar mucho mejor la línea de *Trim*.

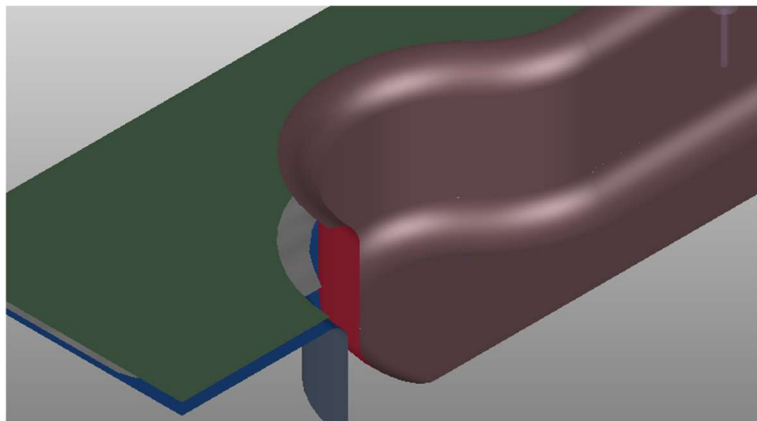


Ilustración 36 Imagen de la operación, en la que se puede ver la contraestampa añadida al macho.

Sin embargo, la pieza seguía rompiendo en el mismo lugar que lo hacía en la pieza completa, por lo cual, tras un *setup* de *Trim* que termino de ajustar la pieza, se modificó esta línea ligeramente para evitar la zona de rotura, como se puede ver en la siguiente ilustración.

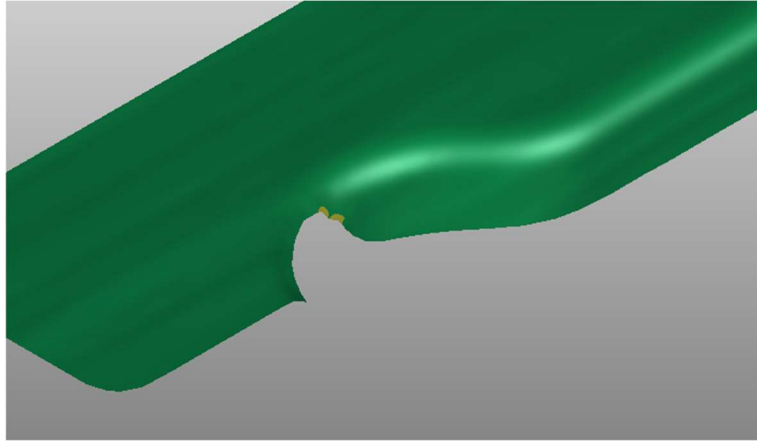


Ilustración 37 Pieza tras finalizar la operación, análisis de Max Failure en el que se puede observar no existen zonas que lo excedan.

Por último, cabe destacar que se diseñó otro método para obtener la línea de *Trim* mediante la herramienta *unfold* que ofrece AutoForm y que se utiliza en algunos de los siguientes detalles. Lamentablemente estas simulaciones no fueron fructíferas y se encuentran añadidas en el anexo correspondiente.

7.2 DETALLE LATERAL 1

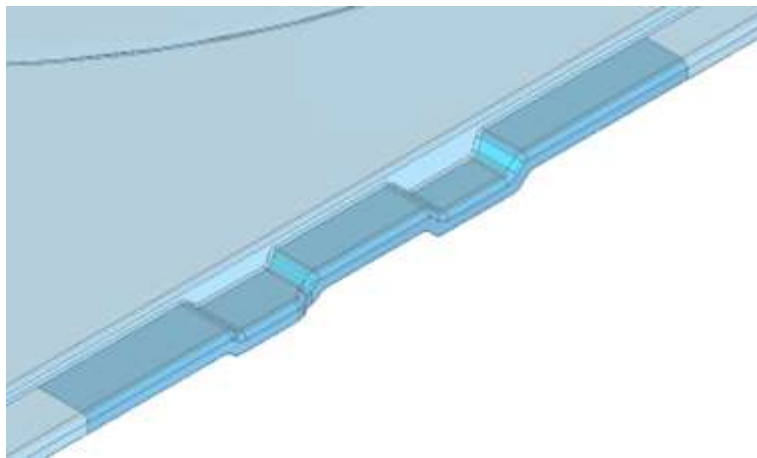


Ilustración 38.

En primera instancia se intentó conseguir una buena línea de *Trim* a partir de la generada en la pieza completa y posteriormente corrigiéndola a mano. Sin embargo, además de ser un procedimiento tedioso, no se alcanzaban resultados lo suficientemente buenos ya que al ajustar algunas curvas se desplazaba material en otras, complicando mucho encontrar un buen ajuste final.

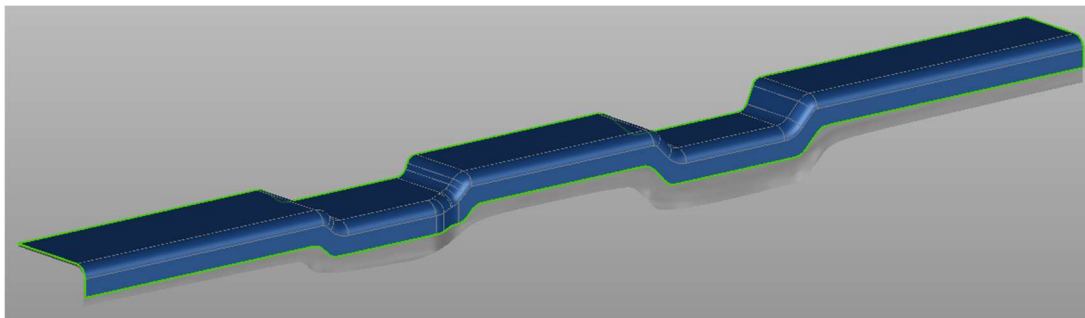


Ilustración 39 Simulación con la línea de Trim obtenida en simulación de la pieza completa.

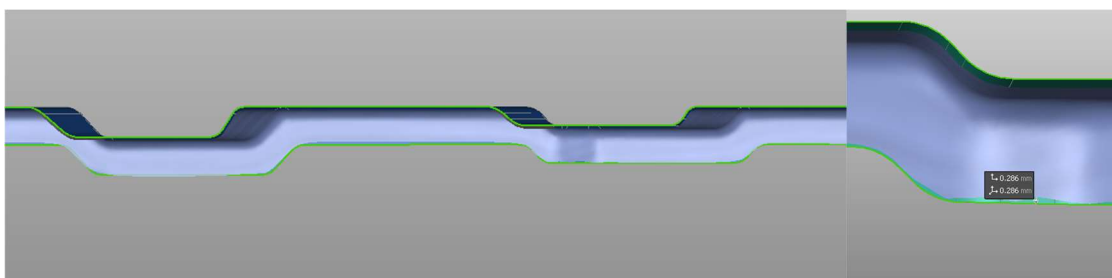


Ilustración 40 Línea de Trim ajustada a mano. Zonas de mayor desviación alcanzan los 0.3 milímetros.

Por ello se acabó optando por partir de una línea de *Trim* obtenida tras realizar un *unfold* de la pieza. Esta es una herramienta que ofrece AutoForm y que consiste en realizar un desdoble de la geometría deseada, que aprovecharemos para usar como línea de *Trim*. Posteriormente esta línea es ajustada ligeramente a mano.

Para esta zona, y para el resto, se ha optado por no incluir una contraestampa, ya que no era necesario para conseguir un buen resultado.

7.3 DETALLE LATERAL 2

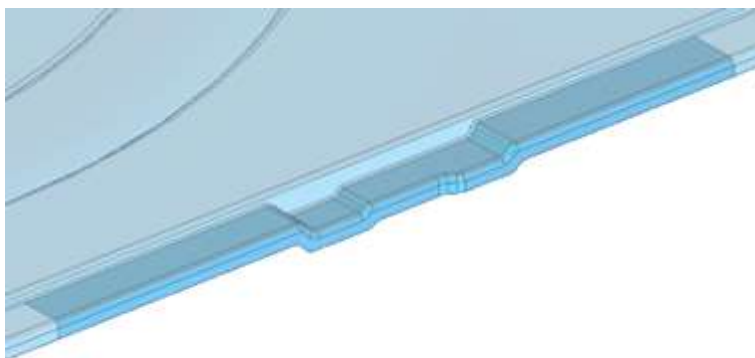


Ilustración 41.

En esta geometría, aprendiendo del caso anterior, se comenzó directamente aplicando un *unfold* de la pieza, y ajustando posteriormente el resultado a mano en una única curva. El resultado aplicando este método es bueno.

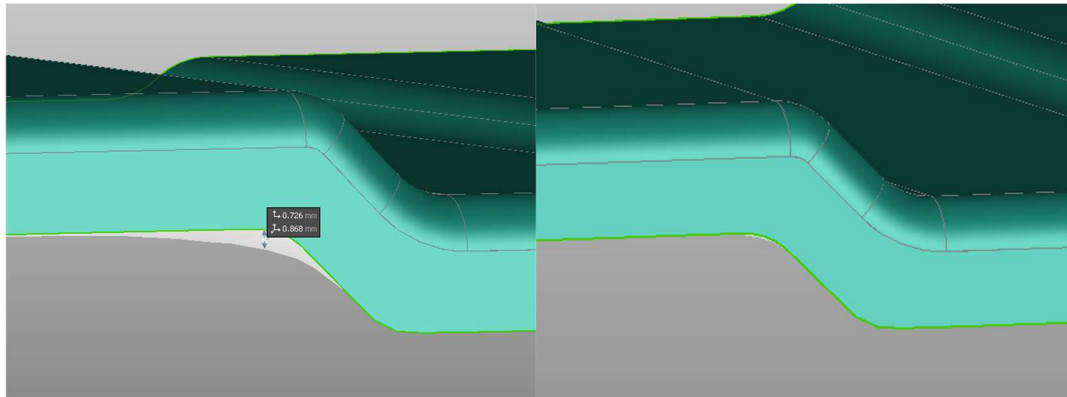


Ilustración 42 A la izquierda podemos observar la desviación antes de corregir la línea de Trim, a la derecha la pieza final ya corregida.

7.4 DETALLE LATERAL 3

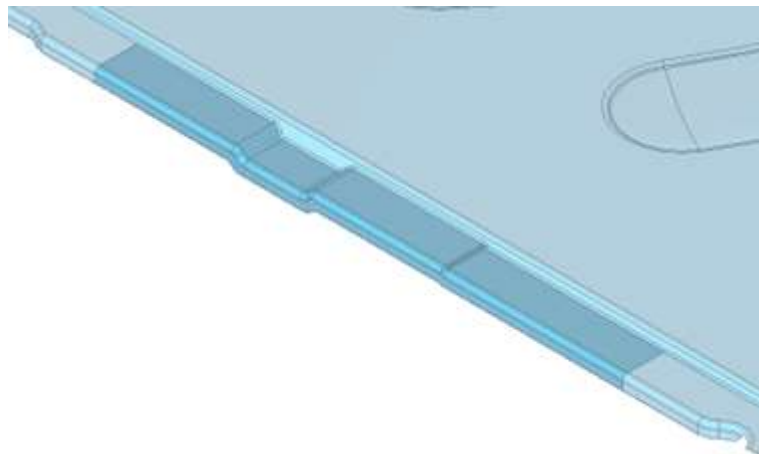


Ilustración 43.

Línea de *Trim* obtenida a través de la herramienta *unfold* siendo únicamente necesario un ajuste importante en una de las curvas.

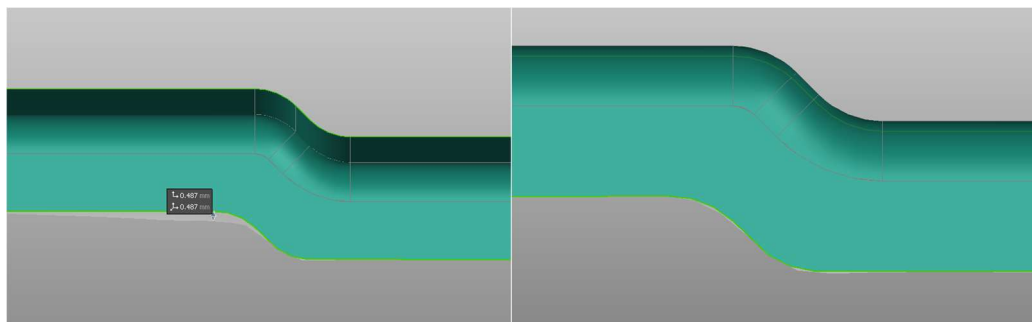


Ilustración 44 A la izquierda podemos observar la desviación antes de corregir la línea de Trim, a la derecha la pieza final ya corregida.

7.5 DETALLE LATERAL 4

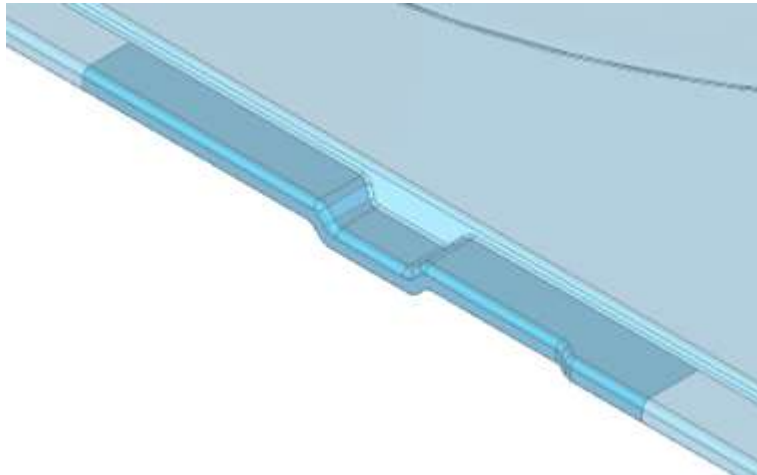


Ilustración 45.

La línea de *Trim* también ha sido obtenida tras un ajuste a mano posterior al uso de la herramienta *unfold*.

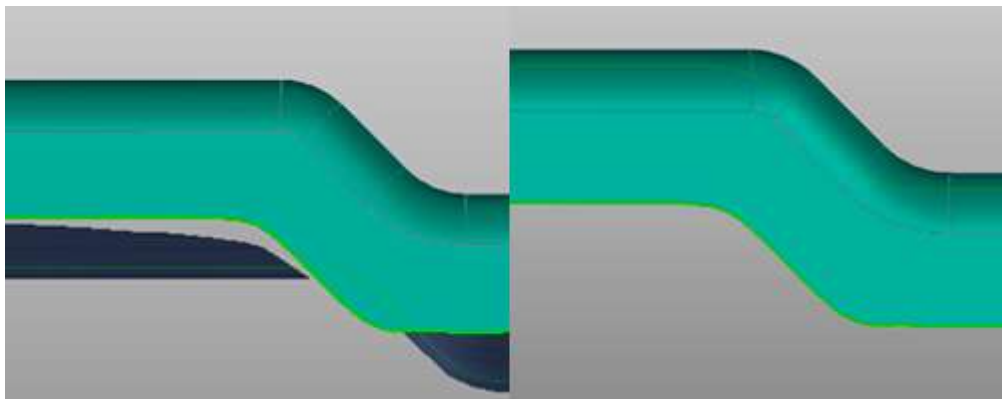


Ilustración 46 A la izquierda se puede observar la desviación de la línea de Trim, de unos 0,4 milímetros, y a la derecha la línea corregida a mano.

7.6 DETALLE LATERAL 5

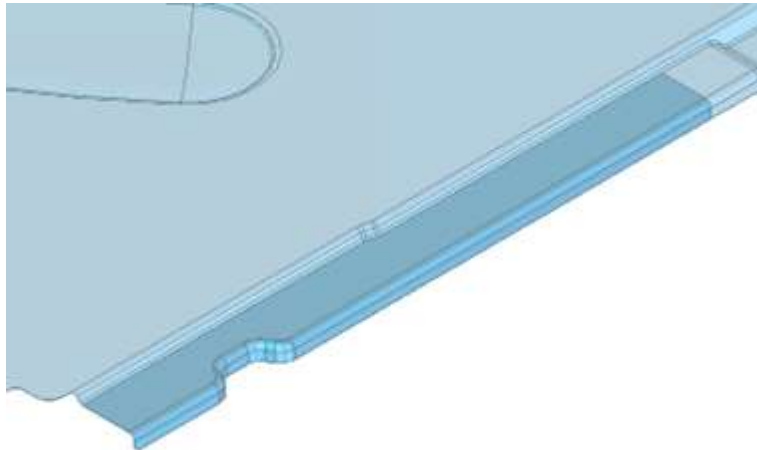


Ilustración 47.

Este detalle a primera vista no parece especialmente problemático, sin embargo, como ya se vio en la simulación de la pieza completa genera tanto roturas como arrugas por su geometría que contiene tanto curvas cóncavas como convexas. Es por ello que se han probado varias versiones de como poder conformar esta zona. A continuación, se analiza el mejor resultado obtenido, mientras que las demás versiones se adjuntan en el anexo.

La mejor opción ha sido tratar de evitar las zonas con arrugas y roturas reduciendo el volumen de chapa expuesta a estos problemas, modificando la línea de *Trim*. Primero se realiza una simulación “borrador” en el que la línea es modificada a mano para poder determinar si es un método valido.

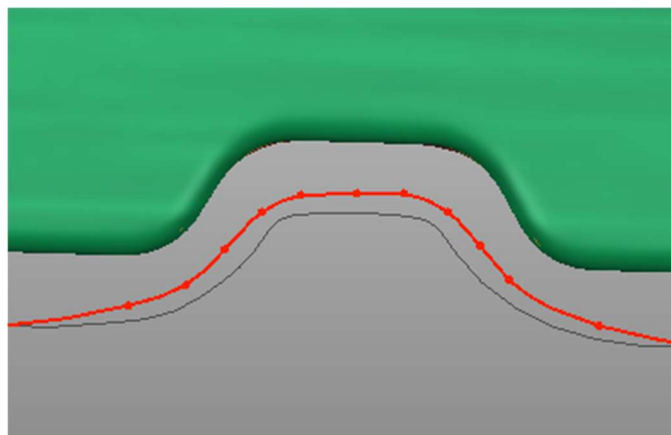


Ilustración 48 Modificación de la línea de Trim en la simulación "borrador"

Como se consiguen eliminar estas zonas, se procede a diseñar una línea de corte más exacta en CAD.

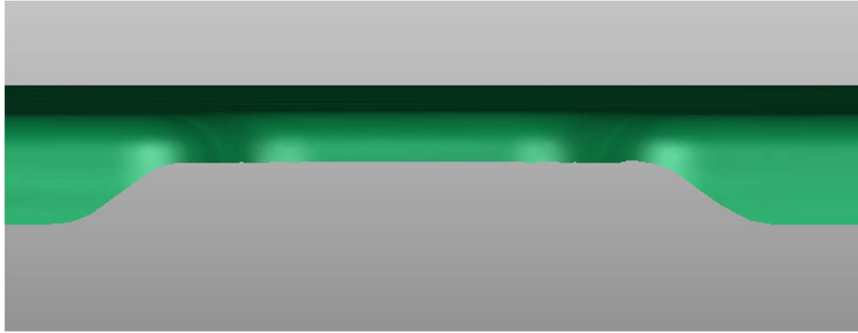


Ilustración 49 Arrugas potenciales.

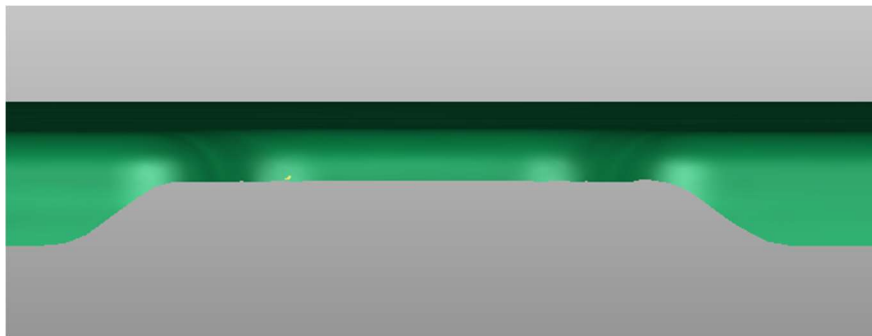


Ilustración 50 Max Failure.

Como se puede ver en las ilustraciones, de esta manera se ha conseguido reducir a cero las zonas expuestas a estos problemas, manteniendo el doblado de forma que sigue cumpliendo su función.

7.7 DETALLE LATERAL 6

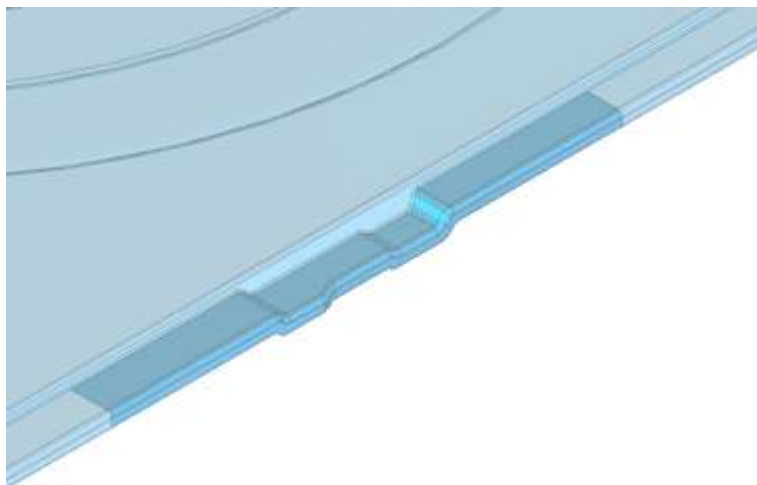


Ilustración 51.

Esta zona es simétrica a “detalle lateral 2”, por ello podríamos exportar la línea obtenida antes a CAD y por simetría duplicarla. Sin embargo, como este método es rápido y la línea obtenida una vez exportada estará perfectamente situada se va a

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora

Memoria

simular también, a través del mismo método de *unfold* y posterior ajuste de la línea a mano.

7.8 DETALLE LATERAL 7

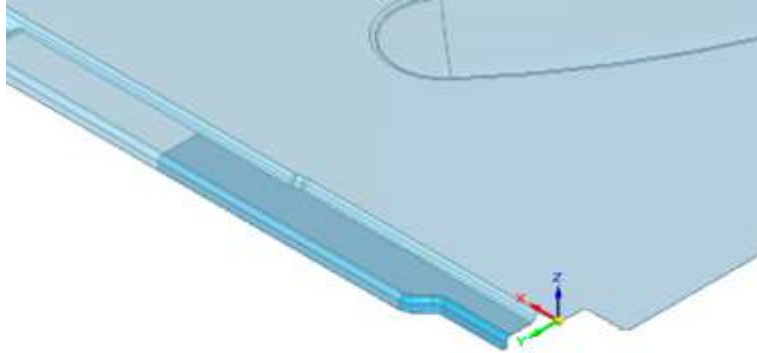


Ilustración 52

Por último, se obtiene la línea de *Trim* de esta zona de igual manera que se ha obtenido en la mayoría de las anteriores, aplicando un *unfold* y ajustando ligeramente a mano.

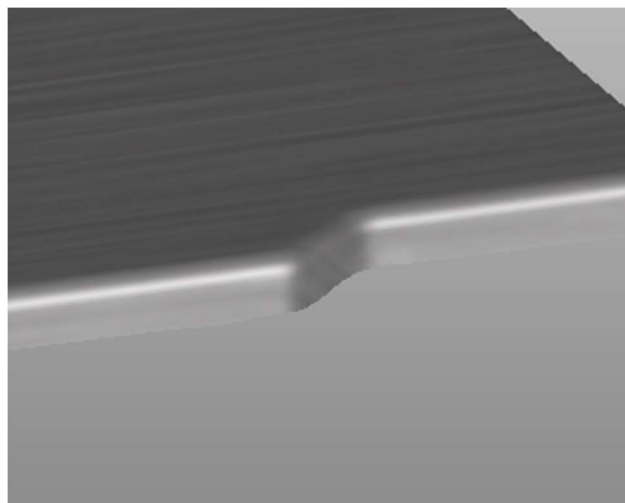


Ilustración 53

7.9 PIEZA FINAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez se ha obtenido la línea de *Trim* de cada uno de los detalles se exporta la curva en formato .igs a Solid Edge, en el que gracias al *assembly* se puede generar un boceto inicial sumando todas las líneas de *Trim*. Posteriormente se optimiza la línea con otro boceto superpuesto en el que se van a simplificar las geometrías de la misma, utilizando rectas y curvas tangentes. Esa línea final se puede utilizar ya en una primera simulación en AutoForm de la pieza final. La aproximación es buena, sin embargo, como

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora
Memoria

no se han usado contraestampas, se sigue teniendo el problema del detalle de las esquinas, en el que no consigue doblar bien la pieza. Será necesario diseñar un macho con una contraestampa específica en la zona de las esquinas.

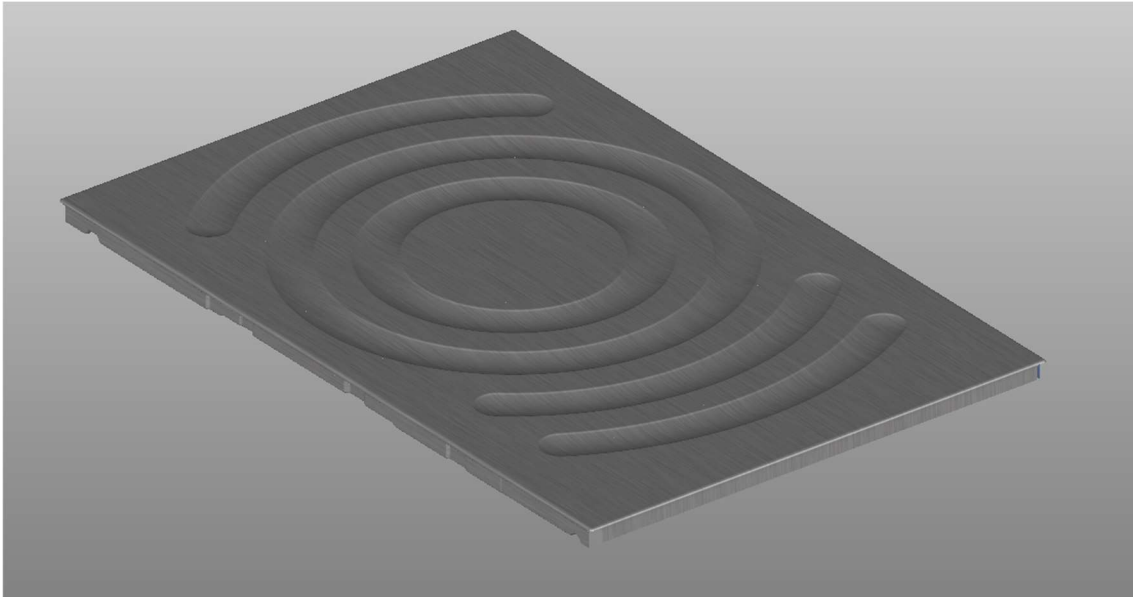


Ilustración 54 Pieza final simulada.

Después de comprobar los límites de la pieza vemos que se ajusta bastante a la pieza objetivo. Seguimos encontrando algunas roturas en zonas ya previstas por sobrepasar el *Max Failure*. Se procederá a solucionar algunas de ellas por métodos ya vistos en el análisis por partes, por ejemplo, en el detalle lateral 5 y en la zona de las esquinas.

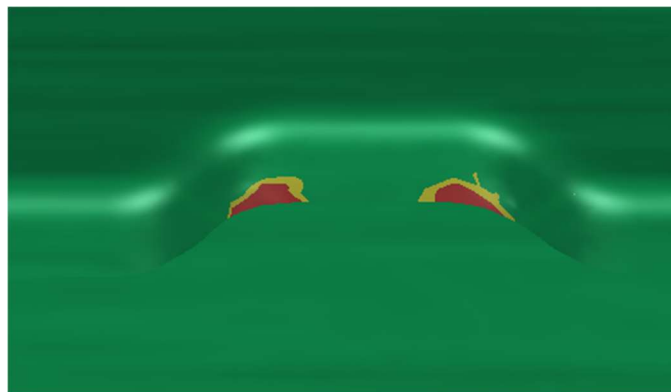


Ilustración 55 Max Failure en Detalle lateral 5

Primero para el detalle lateral 5 se optará por reducir el volumen de chapa expuesto, como ya se hizo en una de las versiones. Por otro lado, en la zona de las esquinas se tratará de eliminar usando la línea de *Trim* obtenida a través del *setup* y que fue ligeramente modificada a mano.

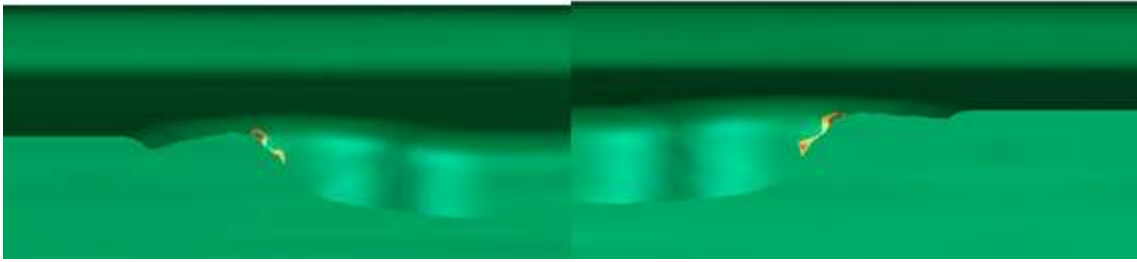


Ilustración 56 Rotura en las esquinas de la pieza.

Las esquinas de la pieza presentan el fallo típico al exceder el *Max Failure*, pese a que se ha intentado solucionar aplicando la línea de *Trim* diseñada a partir de la parte simplificada.



Ilustración 57 Estampación al límite del Max Failure.

Esta parece una zona de riesgo, sin embargo, al comprobarlo con el FLD, se puede ver que está lejos de alcanzar el límite de deformación. Por otro lado, esta zona si es problemática durante la embutición de la op20, ya que si presenta zonas por encima del límite de deformación (ilustración 58). Es muy posible que, modificando el coeficiente de rozamiento, se logre subsanar este fallo.

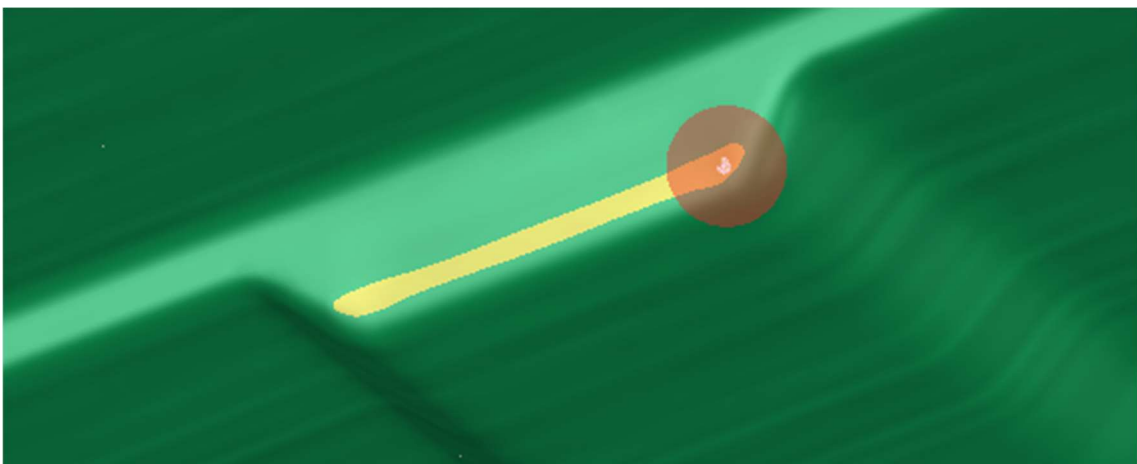


Ilustración 58 Pequeña zona de rotura tras la estampación op20.

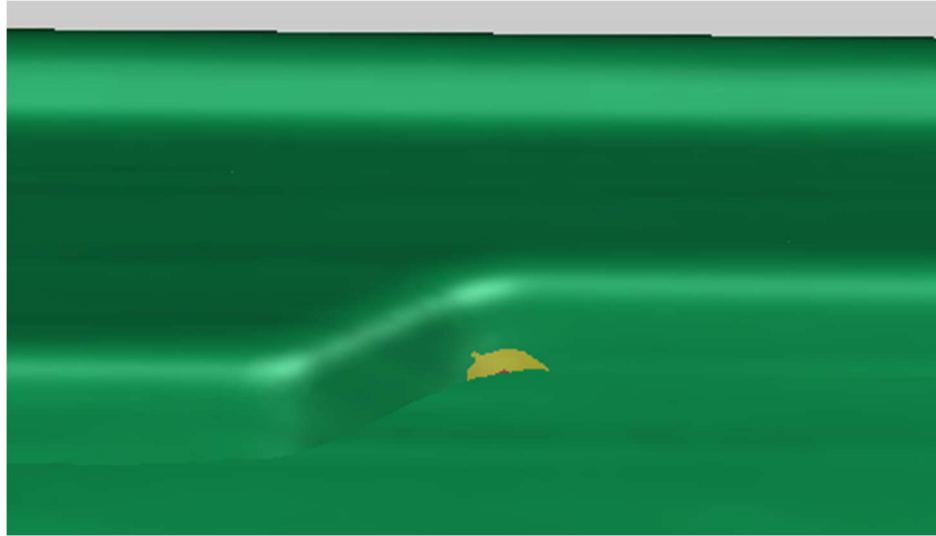


Ilustración 59 Detalle lateral 7.

En el detalle lateral 7 existe una posibilidad de rotura, aunque siendo mínima. Es posible que al cambiar el material o el coeficiente de rozamiento se elimine.

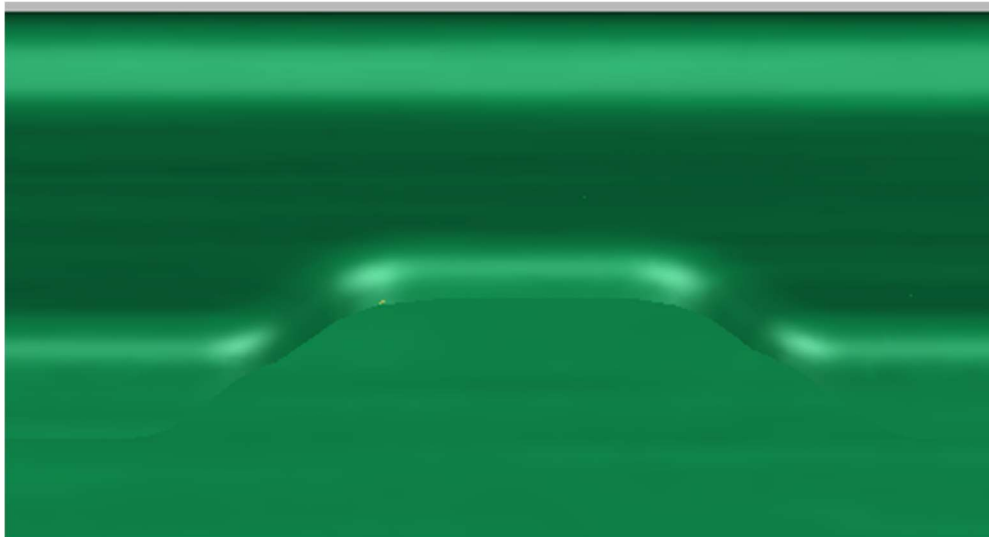


Ilustración 60 Detalle lateral 5.

Por último, en el detalle lateral 5 si se ha logrado eliminar por completo las zonas de riesgo de rotura gracias a la modificación de la línea de *Trim* y, por consiguiente, la geometría final de la pieza.

8 DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)

Para poder analizar correctamente el proceso de conformado de la pieza y sus características, se ha visto oportuno realizar un pequeño análisis de experimentos (DOE) en el que mediante métodos estadísticos se van a determinar características y tendencias de la pieza ante la variación de algunos parámetros. El DOE será un 2^2 , es decir, se tienen dos factores y dos niveles para cada uno. En este caso se ha determinado realizar el análisis variando por un lado el coeficiente de rozamiento (*lube*) de las superficies de la chapa con las herramientas y por otro lado algunas propiedades del material que podrían variar por tolerancias en el suministro. Estos serán los factores.

Se ha realizado un análisis por separado de tres zonas, dos de ellas es interesante estudiarlas debido a que exceden o están al límite de exceder el *Max Failure* de la pieza, y la última de ellas debido a la formación de arrugas.



Ilustración 61 Max Failure zona Esquina Inferior Derecha.

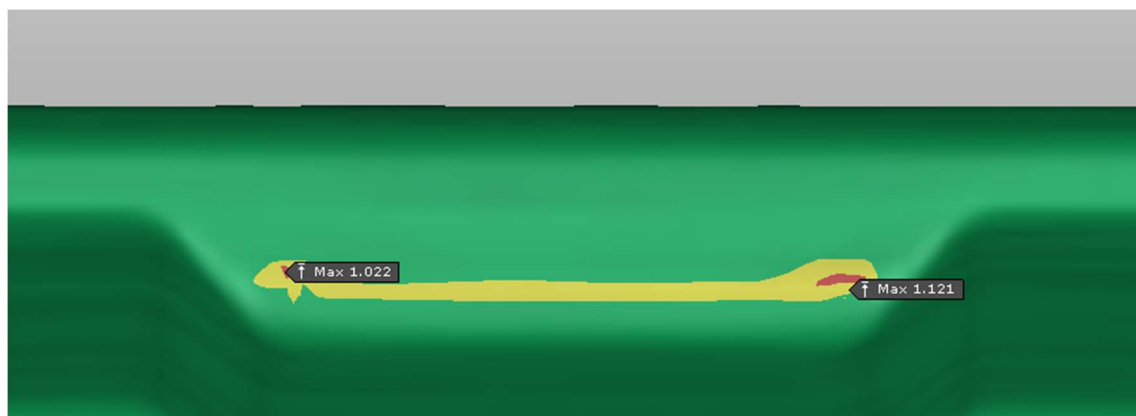


Ilustración 62 Max Failure en zona Lateral Derecha.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora Memoria

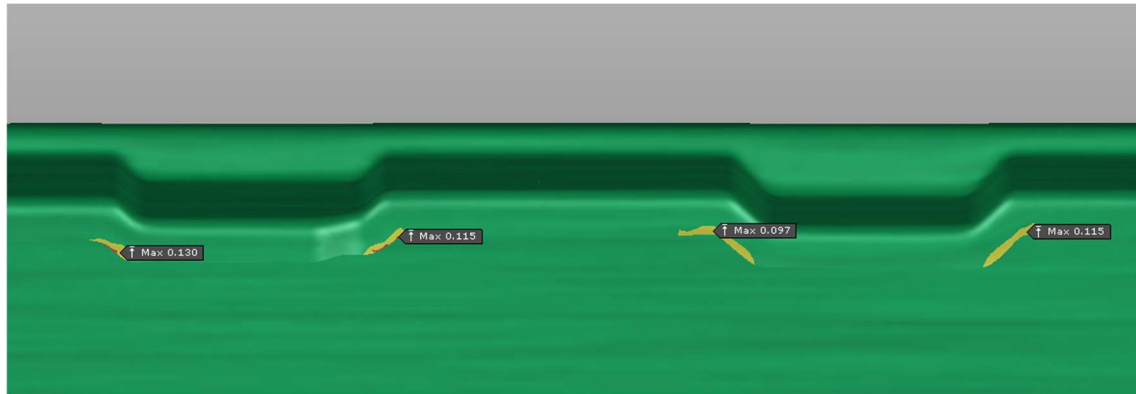


Ilustración 63 Arrugas en pestañas laterales.

TABLA 3

	o0	Rm	FC	MAX FAILURE ESQUINA INF DER	MAX FAILURE LATERAL DER	ARRUGAS P.MAX
-1 -1	140	270	0,11	1,700	1,121	0,097
+1 -1	300	420	0,11	1,136	1,129	0,122
-1 +1	140	270	0,15	1,500	1,089	0,142
+1 +1	300	420	0,15	1,630	1,154	0,132

Primero se va a realizar un análisis de los diagramas de Pareto, que se utilizan para determinar la magnitud y la importancia de los efectos, de forma que se puede comprobar si realmente su influencia es significativa o no.

Max Failure en zona esquina:

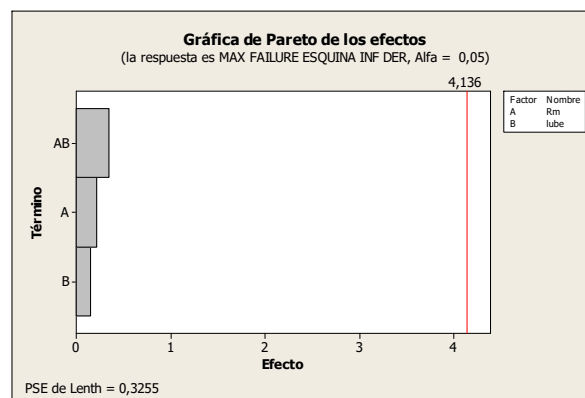


Ilustración 64.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora
Memoria

Max Failure en zona lateral:

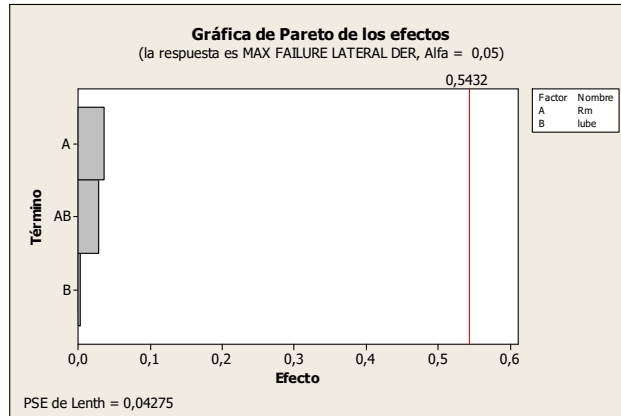


Ilustración 65.

Arrugas en pestaña lateral:

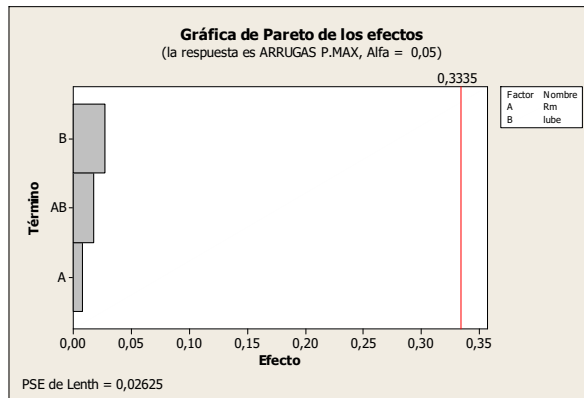


Ilustración 66.

Como podemos comprobar gracias a las gráficas de Pareto, en ninguno de los casos se cruza la línea roja de referencia, indicando que ninguno de los factores es realmente significativo.

No obstante, se analizan los efectos principales y la interacción de los factores en cada una de las zonas. Las gráficas de interacción permiten conocer si el efecto de un factor depende del nivel de otro factor. Si las líneas de la gráfica fuesen paralelas, no existiría interacción entre los factores. A mayor diferencia de pendientes, mayor es la interacción entre los factores.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora

Memoria

Max Failure en zona esquina:

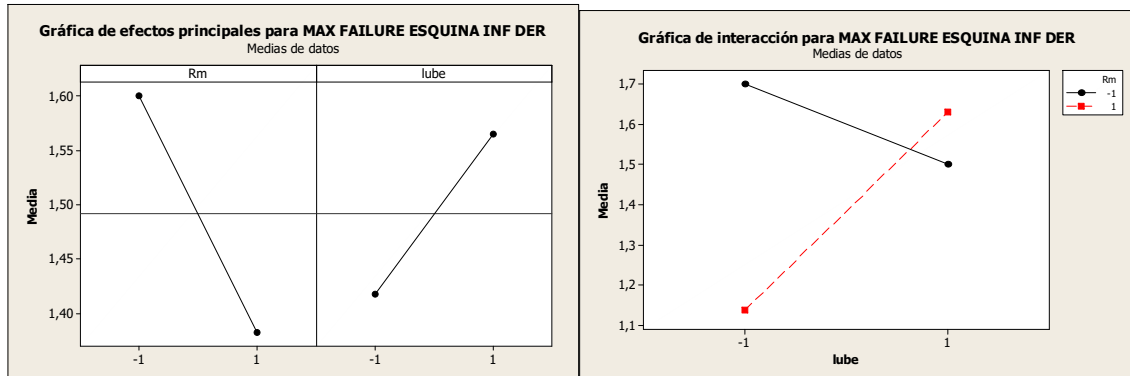


Ilustración 67 y 68.

Max Failure en zona lateral:

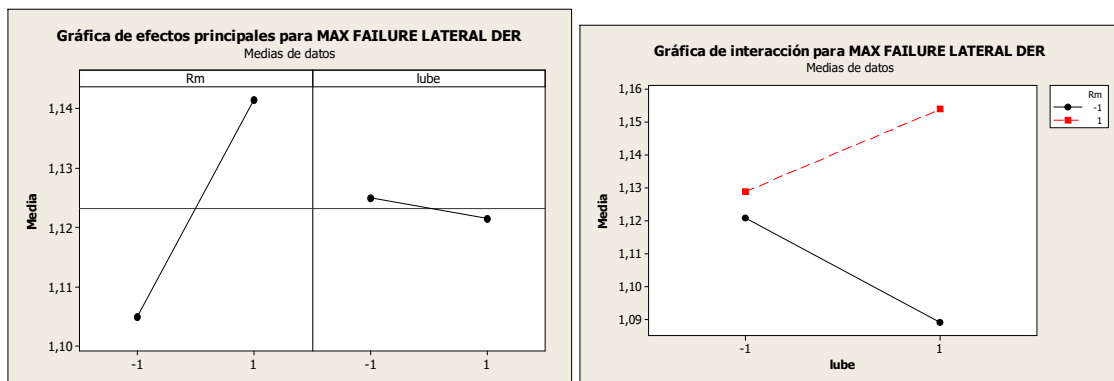


Ilustración 69 y 70.

Arrugas en pestaña lateral:

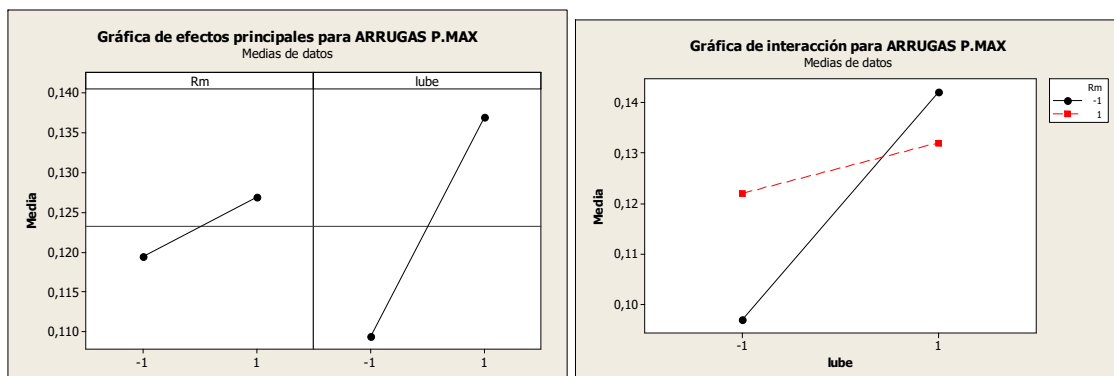


Ilustración 71 y 72.

Tal y como se puede ver en las gráficas de efectos principales, las variaciones en los parámetros influyen de distinta manera dependiendo de la zona de estudio. Los parámetros del material influyen mucho más cuando se estudian las zonas con *Max Failure*, sin embargo, su influencia es de sentido contrario, por lo cual no se puede determinar que opción sería correcta a la hora de querer reducir estas zonas con roturas. Por otro lado, aumentar el coeficiente de rozamiento si debería ser más determinante a

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora
Memoria

la hora de reducir las arrugas de la pestaña lateral, ya que impide el flujo de chapa. Sin embargo, no ocurre de la forma en la que cabría esperar, ya que al parecer el aumento del coeficiente de rozamiento supone aumentar la gravedad de esas arrugas. Esto se debe a que se trata de un doblado, en lugar de una estampación, en el borde de la pieza.

Analizando ahora las gráficas de interacción, puede observarse una fuerte relación entre las variables, es decir, modificando una de las dos, la otra se ve fuertemente afectada, cambiando su influencia sobre el estudio realizado. Sin embargo, al no compartir pendientes similares entre varias de las gráficas, no se puede determinar cómo influir correctamente en estas variables para un mejor desarrollo de la pieza, ya que al mejorar una de las zonas, se puede estar creando problemas en otra.

De todas maneras, tomando los valores de *Max Failure* y de arrugas del experimento, y comparándolos con los valores máximos que podríamos considerar válidos (0,8 para el Max Failure y 0,05 para las arrugas), se llega a la conclusión de que la variación de estos parámetros no es un buen camino a seguir si se busca eliminar estas zonas problemáticas, ya que no es viable llegar a una solución con la modificación de estas variables.

9 CONCLUSIONES

En el transcurso de este trabajo, se ha estudiado la posibilidad de conformar un panel lateral de lavadora, que forma parte de un bastidor LHL. Para comenzar, se ha evaluado el enfoque PLAN del panel lateral existente y se han estudiado las distintas operaciones llevadas a cabo en cada etapa. Durante este análisis se ha comprobado la dificultad de conformación de la misma, ya que se han encontrado varios problemas que dificultan el proceso de fabricación y para los que todavía no se han encontrado solución durante este trabajo.

Como se ha visto durante el análisis, el conformado de la pieza presenta problemas derivados de exceder el límite de *Max Failure* o la formación de arrugas en algunas zonas, y que se han tratado de solucionar de varias formas, como disminuir el coeficiente de rozamiento o variando algunos ángulos. Todos estos métodos han resultado insuficientes, por lo que será necesario un estudio más en profundidad si es que se quiere desarrollar finalmente esta geometría de pieza.

El análisis de experimentos (DOE) realizado que, aunque sencillo, puede aportar una línea de trabajo a seguir en dirección a solucionar estos problemas.

Problemas como las arrugas en las pestañas laterales de la pieza y las roturas en las esquinas de la misma podrían solucionarse aplicando el mismo método de análisis por secciones que se realizó para ajustar la línea de corte, volviendo a modificarla para excluir de la pieza estas zonas problemáticas. Otros como las roturas en zonas más interiores no podrían solucionarse por este método, por lo que serían necesarias soluciones más drásticas, ya habiendo visto que variar algunos parámetros del material o el coeficiente de rozamiento con las herramientas está lejos de solucionarlos. Por ejemplo, una variación en algunos radios o reducir las pendientes en el estampado podrían ser suficientes.

Poniendo en práctica alguna de estas soluciones, sí se ha llegado a eliminar uno de estos problemas, en el llamado detalles 5 de la pieza. Aquí un estudio de la línea de *Trim* y una ligera modificación de la misma han sido suficientes para subsanarlos, logrando además no perder la funcionalidad original de la zona modificada.

Hay que considerar que no se han incluido en las simulaciones los punzonados necesarios para obtener todos los agujeros del panel lateral, distribuyéndolos entre la 2ª y 4ª etapa del método PLAN en función de si se deforman o no en los procesos de doblado de la op40 y op50. En principio, la experiencia de la empresa señala que estas operaciones no son críticas en los paneles laterales y por dicho motivo no se han incorporado.

En resumen, al considerar el análisis de las etapas, se han examinado las variables necesarias para lograr una conformación adecuada del panel lateral, junto con el ajuste de la línea de corte en la operación op30. Entre estas variables se incluyen la evaluación del coeficiente de rozamiento, el límite elástico y la resistencia a la tracción del material.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora

Memoria

También se ha demostrado que el enfoque simplificado en el estudio por zonas permite un análisis preciso y eficiente de la línea de corte de manera individual, lo que agiliza y mejora la precisión del análisis.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. MARCINIAK, J. L. DUNCAN y S. J. HU, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Segunda ed., Butterworth-Heinemann, 2002.
- [2] AutoForm Engineering GmbH, *AutoForm - Stand-alone Software Manual*, 2017.
- [3] D. BANABIC, H. -J. BUNGE, K. PÖHLANDT, A. E. TEKKAYA, *Formability of Metallic Materials*, Springer, 2000.
- [4] W. F. HOSFORD, R. M. CADDELL, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Tercera ed., Cambridge, 2007.
- [5] R.H. WAGONER, J. -L. CHENOT, *Metal Forming Analysis*, Cambridge, 2001.

11ANEXO

Cálculo de la fibra neutra:

La fibra neutra se refiere a la región del material, en un elemento doblado, que se encuentra en una posición donde sus fibras no se ven alteradas debido a las fuerzas de tracción o compresión resultantes del proceso de doblado, es decir, su longitud no ha cambiado.

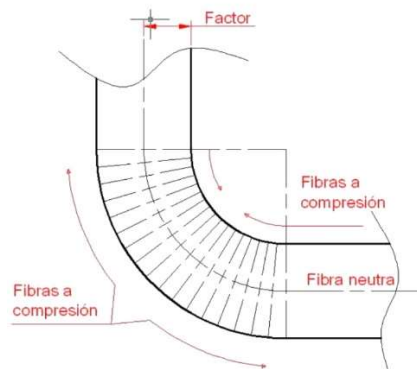
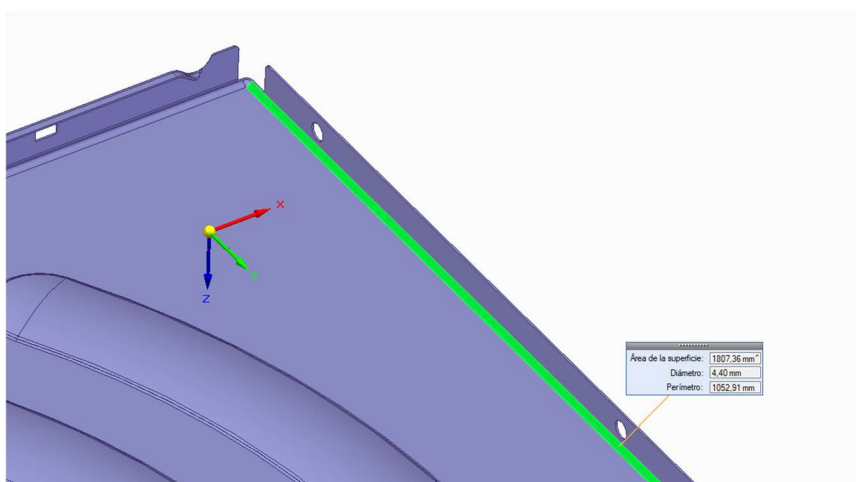


Ilustración 73 Cálculo de la posición de la fibra neutra en un doblado de chapa.

Para poder calcular la longitud de la fibra neutra es necesario conocer, como mínimo, dos datos de la geometría: espesor y radio interior. Existen otros factores variables que pueden influir en el desarrollo de la pieza, como la lubricación, tolerancias.... Sin embargo, para la realización de los cálculos es mejor limitarse a los factores indicados en primero lugar, ya que estos son más importantes y fiables. Se obtienen gracias a las herramientas que ofrece el programa CAD y permitirán obtener la posición de la fibra neutra gracias a la relación $\frac{r}{s}$.



- Radio interior: $r = \frac{4,40 \text{ mm}}{2} = 2,2 \text{ mm}$
- Espesor: $0,8 \text{ mm}$

A partir de estos datos se puede obtener la relación:

$$\frac{Radio}{Espesor} = \frac{2,2 \text{ mm}}{0,8 \text{ mm}} = 2,75$$

El factor X de 2,75 se interpola de la siguiente tabla:

r	Factor
. 0,2	0.347 · s
. 0,5	0.387 · s
. 1	0.421 · s
. 2	0.451 · s
. 3	0.465 · s
. 4	0.470 · s
. 5	0.478 · s
. 10	0.487 · s

$$0,451 + \frac{2,75 - 2}{3 - 2} \cdot (0,465 - 0,451) = 0,4615$$

$$espesor \cdot factor = 0,8 \text{ mm} \cdot 0,4615 = 0,3692 \text{ mm}$$

0,3692 milímetros es la situación de la fibra neutra respecto al radio interior, por lo cual su radio es:

$$0,3692 \text{ mm} \cdot 2,2 \text{ mm} = 2,5692 \text{ mm}$$

Ahora sí, se calcula el desarrollo de la zona doblada:

$$\frac{2\pi \cdot 2,5692}{4} = 4,035 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm}$$

Otras versiones para solucionar el detalle lateral 5.

La primera de ellas ha sido seguir el procedimiento que se había seguido hasta ahora para la mayoría de los detalles, aplicar la herramienta *unfold* y posteriormente realizar un ajuste final a mano.

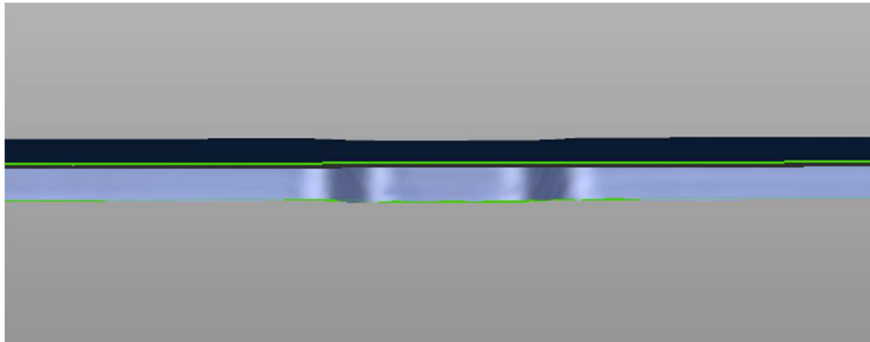


Ilustración 74 Buen ajuste de la pieza a la geometría deseada.

Analizando los resultados (ilustraciones 75 y 76) se ve cómo, aunque ajuste correctamente, no es viable seguir esa geometría por las zonas de arrugas potenciales y las zonas con rotura de la chapa.

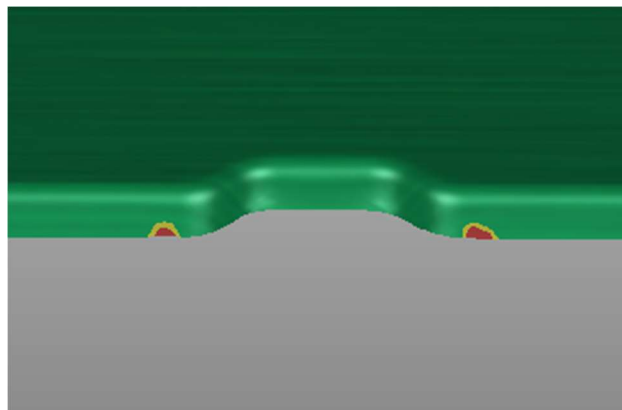


Ilustración 75 Arrugas potenciales.

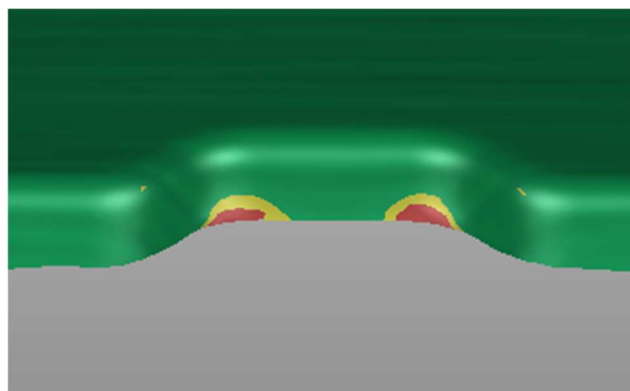


Ilustración 76 Zonas en las que se excede el Max Failure.

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora Memoria

En otra de las versiones se ha buscado un método que permita eliminar estos problemas manteniendo la geometría deseada. Por ello se opta por introducir un *binder* inferior. El objetivo de este nuevo pisador es mantener la chapa recta mientras el macho la dobla, de modo que la pieza se dobla poco a poco, simulando una embutición. De esta manera pueden reducirse las arrugas, aunque podrían llegar a aumentar las zonas con rotura.

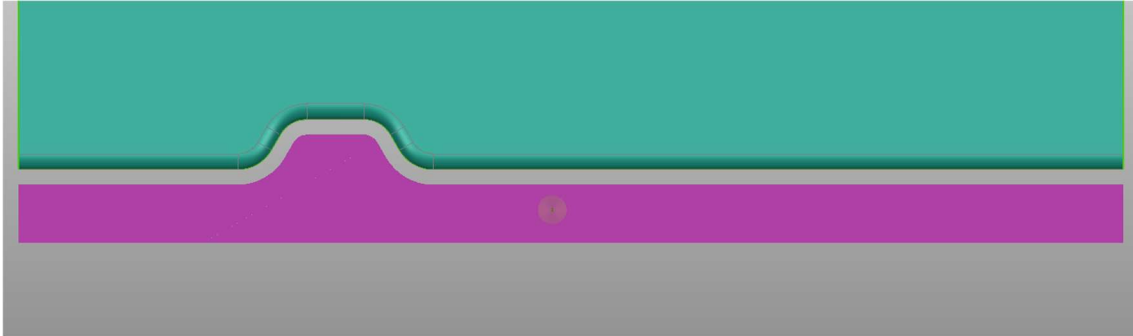


Ilustración 77 Forma del binder inferior.

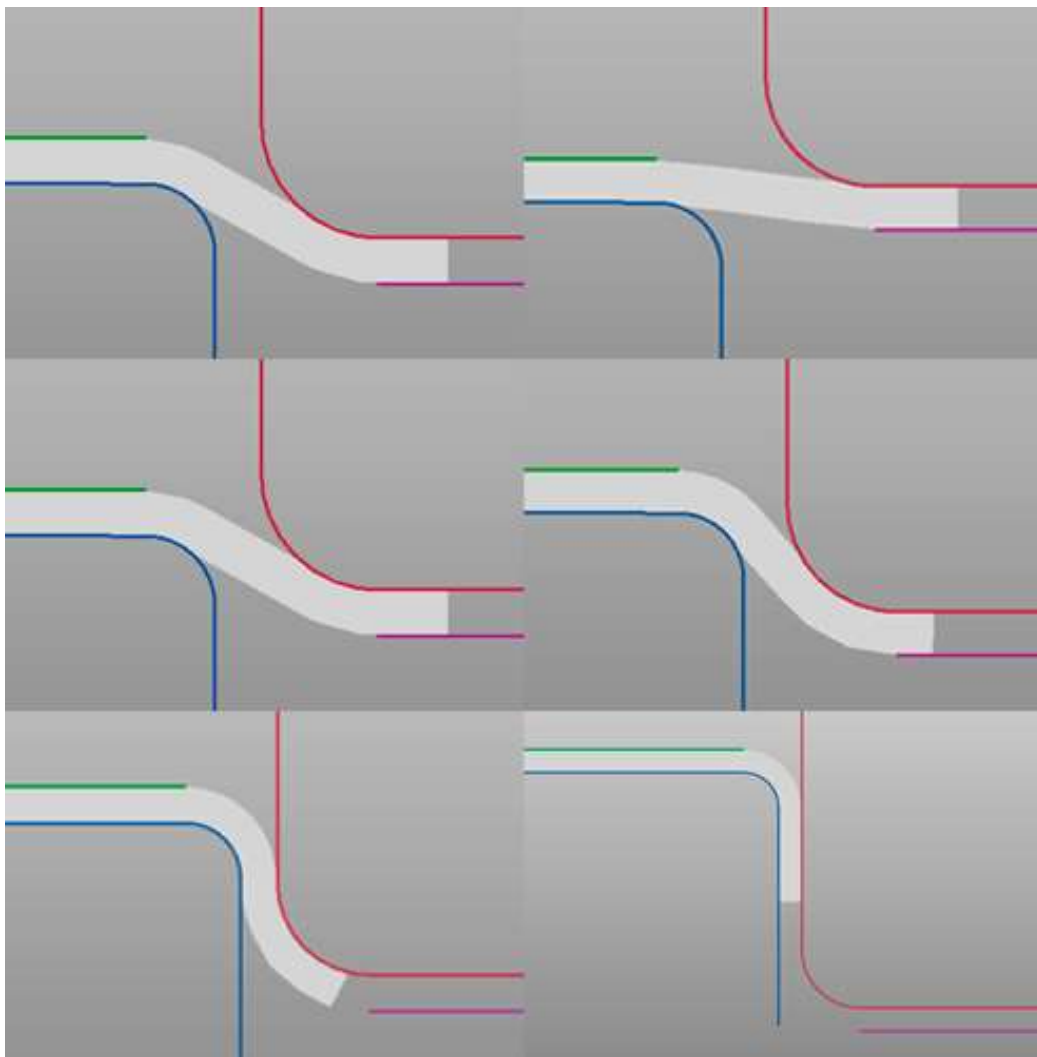


Ilustración 78 Proceso de doblado con binder inferior, simulando una estampación.

Analizando los resultados de la simulación, y como era previsible, se han reducido las zonas con arrugas potenciales a cero, mientras que las zonas en las que se excede el *Max Failure* han aumentado.

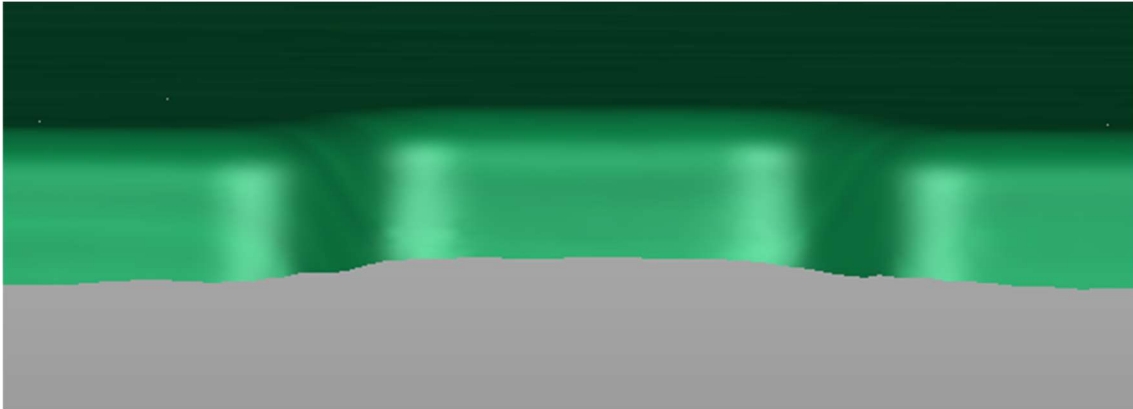


Ilustración 79 Arrugas potenciales.

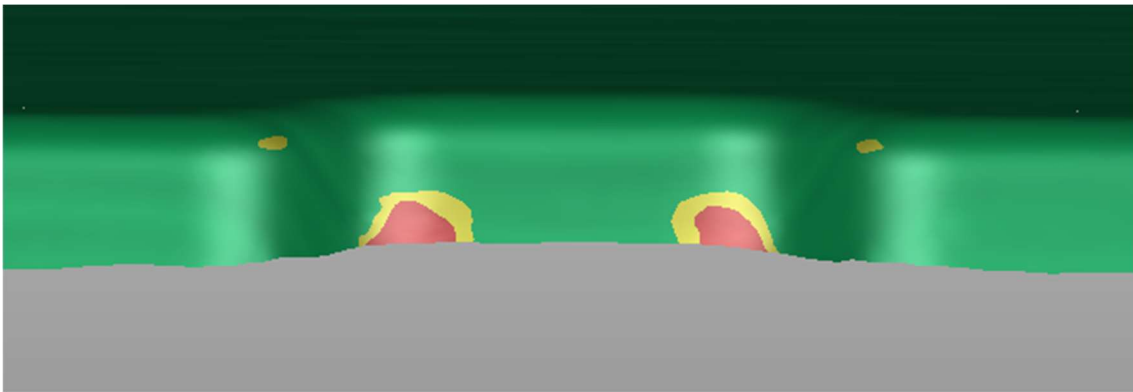


Ilustración 80 Max Failure.

Una posible solución es buscar una geometría del pisador inferior que permita un doblado en la zona interior evitando aumentar las zonas con *Max Failure* y una embutición en la zona exterior reduciendo las arrugas potenciales. De esta manera se ha diseñado un binder recto que podría cumplir este objetivo.

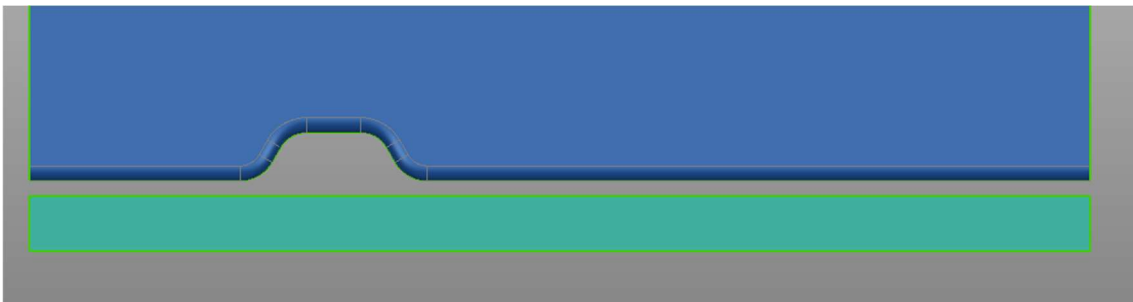


Ilustración 81 Nueva geometría recta del pisador inferior.

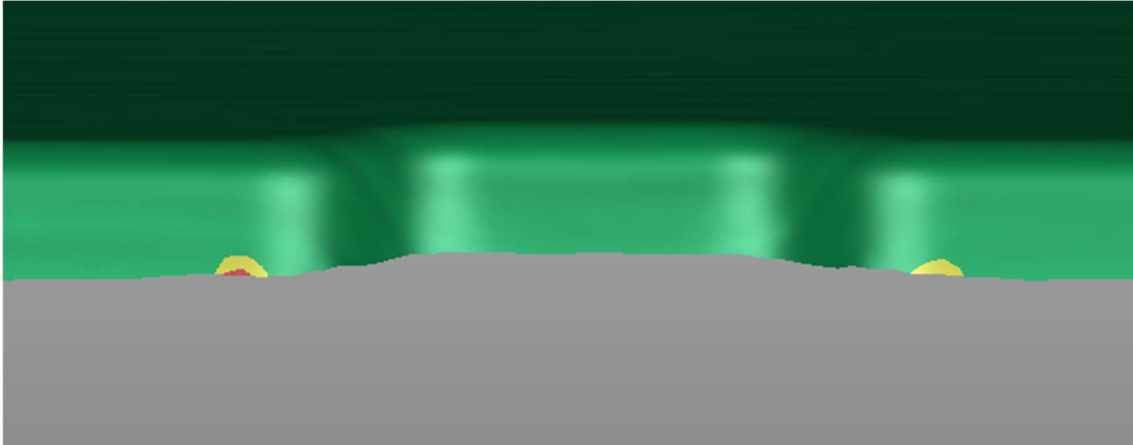


Ilustración 82 Arrugas potenciales.

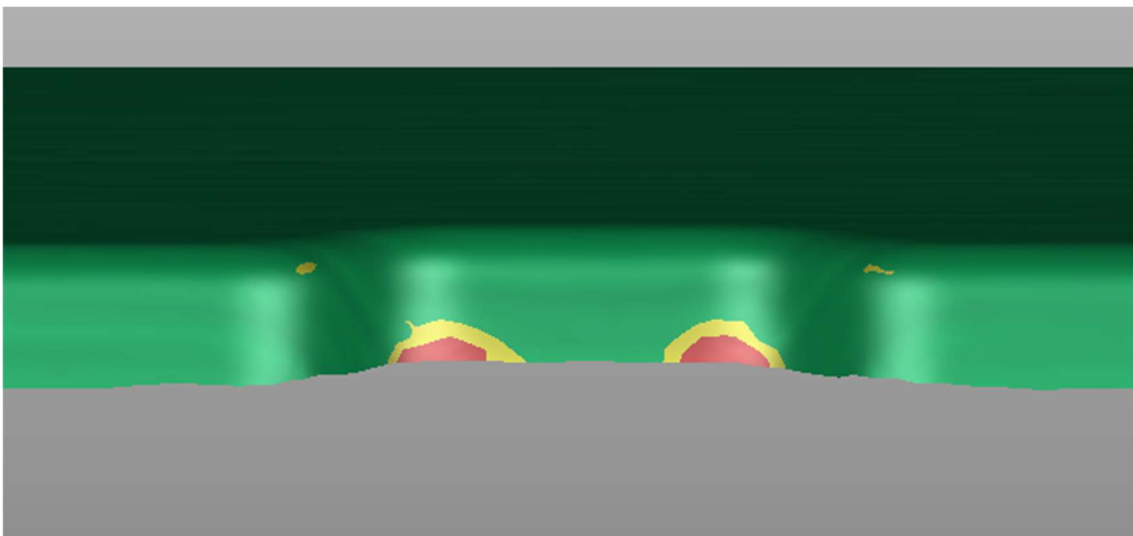


Ilustración 83 Max Failure.

Como se puede comprobar en las ilustraciones anteriores este método no ha acabado siendo suficiente, por lo que finalmente se va a desestimar.

Esquina Inferior versión “Unfold”.

Se va a tratar de aplicar el mismo método realizado para el resto de los detalles en esta geometría, igual para ambas esquinas de la pieza, y así ver si es obtener un mejor resultado que con el método anterior. Se aplica un *unfold* a la pieza y se prueba con un primer diseño sin contraestampa.

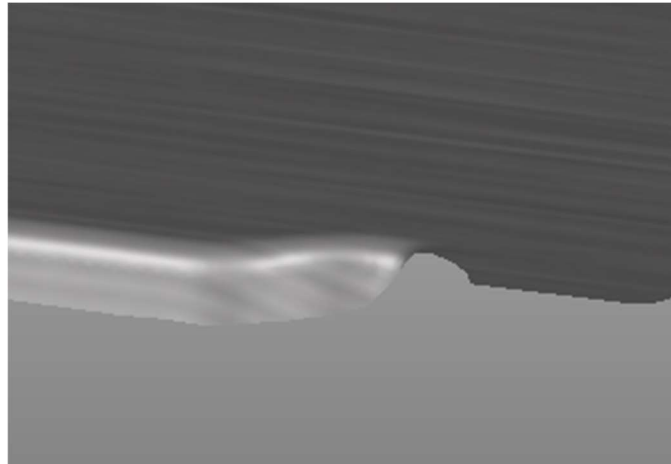


Ilustración 84 Esquina sin doblar por un macho sin contraestampa.

Como se puede ver en la ilustración anterior, la línea está bien aproximada, hasta que en la zona de transición el macho no llega a doblar la chapa. Por ello se va a tratar de solucionar a través de una contraestampa.

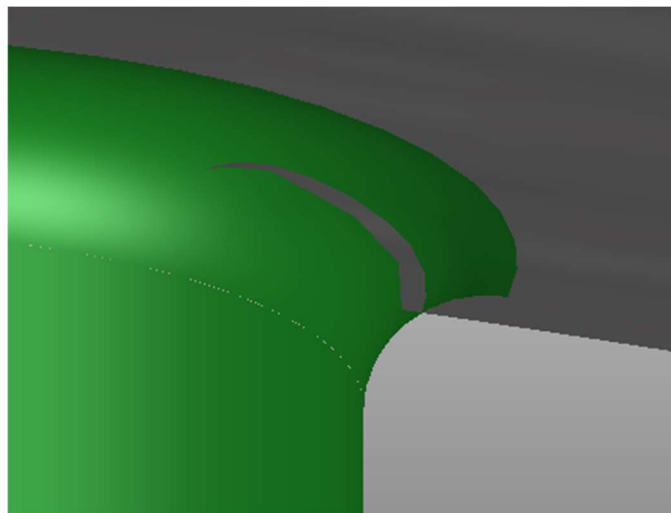


Ilustración 85 Fallo del programa.

Llegados a este punto, surge un error del programa, en el que no era capaz de simular correctamente el doblado, llegando la chapa a atravesar el macho diseñado. Se reduce el *End Tool Displacement Step* y se aumenta *End Tool Displacement Steps*, tratando de mejorar los resultados de la simulación, y que tampoco resulta efectivo. En la primera simulación que se hizo para la esquina derecha si se lograba el doblado de

Estudio de la conformación metálica de un panel lateral de lavadora
Memoria

esa zona con la contraestampa. Esto puede deberse a que las herramientas eran algo más grandes que la zona de doblado, algo que no se ha diseñado en este caso.

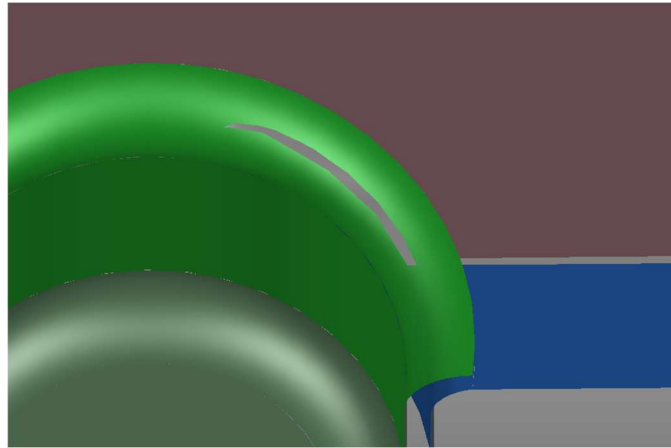


Ilustración 86 Mismo fallo aun después de diseñar unas herramientas más largas.

Alargando las herramientas tampoco se consigue que se doble esa zona en la simulación. Como no ha sido posible encontrar el motivo de este fallo del programa, ni una solución, se descartará este método y se optará por continuar con la línea de *Trim* obtenida en primera instancia.