



## Trabajo Fin de Grado

Estudio de la conformación metálica de un panel  
posterior de lavadora

Study on metallic conformation of a washing  
machine back panel

Autor

**Marcos Hernando Blasco**

Director

**Emilio Royo Vázquez**

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

2024

# Estudio de la conformación metálica de un panel posterior de lavadora

## RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado se realiza un estudio de conformabilidad de un panel posterior que forma parte de un bastidor LHL de una lavadora, en chapa DC04 de 0,9 milímetros de espesor.

Durante el análisis, se ha estudiado la viabilidad del proceso de conformado con numerosas simulaciones variando parámetros como pueden ser la lubricación y la presión inicial de pisado.

En este caso en concreto, no ha hecho falta cambiar la geometría inicial para llegar a una pieza final dentro de los criterios que se han considerado adecuados. Aun así, este análisis no ha sido comprobado en un proceso de fabricación real. Se ha planteado un método PLAN que se ha dividido en dos etapas, un estampado y un corte, como se explicará más adelante.

Se ha utilizado un programa software de elementos finitos en el que, en el transcurso del estudio, se han encontrado zonas problemáticas, tanto de rotura como de arrugas en la chapa. Es por ello que se han evaluado distintos métodos para solucionar estos problemas, entre los que se encuentra el uso de frenos en diferentes bordes de la chapa para solucionar la casuística de las arrugas.

Por último, se ha realizado un diseño de experimentos (DOE) y un análisis de regresión lineal con el fin de buscar relaciones entre las condiciones de trabajo.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ÍNDICE.....	3
1 INTRODUCCIÓN .....	4
2 METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	5
3 FUNCIONALIDAD Y ANÁLISIS DE LA PIEZA.....	7
4 ESTADO DEL ARTE.....	9
4.1 Materiales utilizados y sus propiedades mecánicas .....	9
4.2 Presente y futuro de los procesos de conformado metálico .....	10
4.3 Estándares de calidad .....	10
4.4 Formabilidad, Diagrama FLD y curva FLC.....	11
4.5 Max failure.....	13
4.6 Arrugas.....	14
5 MÉTODO PLAN .....	15
6 SIMULACIONES.....	18
6.1 Configuraciones previas descartadas .....	18
6.1.1 Simulación tipo “Punch en 2 etapas” .....	19
6.1.2 Simulación tipo “Frenos” .....	20
6.2 Etapa OP20 .....	22
6.3 Etapa OP30 .....	27
7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	30
7.1 Diseño de experimentos - análisis DOE .....	30
7.1.1 Max failure .....	32
7.1.2 Wrinkles .....	33
7.2 Análisis de regresión lineal .....	35
7.2.1 Max failure .....	35
7.2.2 Wrinkles .....	36
8 CONCLUSIONES.....	37
9 BIBLIOGRAFÍA.....	38

# 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo final del Trabajo Fin de Grado es el análisis del proceso de conformado metálico de un panel posterior de lavadora a través de la planificación de las operaciones que se le realizan a la chapa.

El conformado en chapa es un proceso de fabricación que implica dar forma a láminas delgadas de metal. Este proceso se realiza mediante la aplicación de presión mecánica, presión o calor para lograr la deformación plástica del material sin que llegue a romperse. Hay varios métodos de conformado, como el forjado o la embutición que permiten obtener diferentes formas y geometrías. Después se produce el corte de la chapa para obtener la geometría final y eliminar el exceso de material. El modelo 3D de la parte trasera de la lavadora ha sido obtenido de la empresa BSH.

BSH es una empresa líder en el sector de electrodomésticos, con sede en Alemania. Sus lavadoras destacan por la innovación tecnológica y diseño ergonómico. BSH ha proporcionado el modelo 3D de varios componentes de un bastidor LHL para una lavadora, del que se ha seleccionado la pieza posterior como objeto de estudio.



*Ilustración 1. Panel posterior de lavadora.*

## 2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Lo primero que se ha realizado es un análisis de la geometría en formato. prt, esta extensión es utilizada para archivos CAD. En nuestro caso se utiliza el programa software Solid Edge 2022 para la visualización y edición de dicha geometría. Seguidamente se empieza con el procedimiento de puesta a punto para el estudio de la pieza. Éste consiste en optimizar la pieza, lo que le otorga un aumento de la calidad del modelo corrigiendo bordes e identificando caras. También se establecen unos ejes de referencia alineando la geometría con un sistema de coordenadas que ayudan a trabajar con más facilidad y coherencia.

Como la pieza proporcionada es un sólido, se ha convertido a tipo superficie y se ha trabajado con la piel exterior. Se eliminan los agujeros y se establecen unas superficies de contacto usando las herramientas de extruir, entre otras, las cuales van a ayudar al diseño de las herramientas que se usarán en el programa de simulación.

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 método PLAN es la secuencia de operaciones que se realizan para conseguir la geometría de la pieza final. El software de elementos finitos que se ha elegido para este estudio es Autoform R7, en éste se introducen las superficies obtenidas del análisis del modelo y se implementan las herramientas necesarias para realizar las operaciones que darán forma a la geometría deseada.

En nuestro estudio, tras numerosas pruebas, se ha llegado a la conclusión de que solamente se necesitan dos etapas, OP20 y OP30. La OP20 se encarga del conformado de la chapa mientras que la OP30 realiza la operación de 'trim', es decir, el punzonado y el corte de la pieza.

De esta forma, por cada simulación realizada, se puede detectar los problemas de rotura y arrugas y así, ir mejorando las herramientas y los parámetros necesarios para conseguir la pieza con los menores errores posibles. Esto no deja de ser una simulación, lo que nos permite optimizar y mejorar sin costes el proceso de conformado sin necesidad de hacer un conformado de chapa real. También se deberá tener en cuenta que dichos parámetros como la lubricación o la presión inicial de pisado de la prensa tienen variaciones en un conformado real, por tanto, la veracidad de las simulaciones dependerá de la rigurosidad con la que los parámetros reales se acerquen a los de dichas simulaciones.

En resumen, lo que se ha realizado en este Trabajo Fin de Grado es una prueba de ensayo y error con una mejora continua para conseguir una serie de simulaciones con el fin de ver cuál de ellas es la que mejor se adapta para alcanzar fielmente la geometría real.

Esta última observación se hará a través del análisis de los resultados de las diversas simulaciones gracias a un diseño de experimentos (DOE), donde se podrán vislumbrar las relaciones entre dos variables significativas para encontrar las condiciones ideales para el proceso de fabricación teniendo en cuenta los límites y tolerancias impuestos. Así pues, se llegará a una conclusión donde se verá explicada la viabilidad del proyecto.

### 3 FUNCIONALIDAD Y ANÁLISIS DE LA PIEZA

El panel posterior de una lavadora desempeña varias funciones esenciales para el funcionamiento eficiente del electrodoméstico, no solamente es un componente estructural, sino que también desempeña un papel importante en la accesibilidad, seguridad, aislamiento y estética de una lavadora.

Al tratarse de un bastidor LHL, a diferencia del bastidor en U, se compone de tres paneles que después de ser fabricados por separado se ensamblan. Por tanto, cada componente por separado tendrá una función específica, pero sin dejar de lado la armonía que tienen que presentar para en su conjunto dotar de estabilidad a la lavadora.

Algunas de las funciones y propiedades que debe cumplir el panel posterior son las siguientes:

- Estructura y soporte: proporciona una estructura robusta y soporte para los componentes internos de la lavadora, asegurando que estén correctamente alineados y protegidos durante el uso.
- Acceso y mantenimiento: suele contar con aberturas o paneles desmontables que permiten el acceso a los componentes internos, facilitando la instalación y el mantenimiento. Esto es crucial para los técnicos de servicio y reparación.
- Seguridad: contribuye a la seguridad del usuario al cubrir partes eléctricas y mecánicas, evitando el contacto accidental y protegiendo contra posibles riesgos.
- Estética y diseño: aun siendo una parte que no suele estar a la vista del cliente, el panel posterior contribuye al diseño general de la lavadora, aportando a la estética del electrodoméstico y proporcionando un acabado limpio y profesional.
- Cumplimiento normativo: debe cumplir con normativas y estándares para electrodomésticos, asegurando que la lavadora cumpla con requisitos legales y de calidad.

Estas son las vistas de planta, alzado y perfil derecho respectivamente.

Se encuentran acotadas algunas de las dimensiones que han tenido relevancia a la hora de hacer este estudio, como pueden ser las alturas de las elevaciones tanto inferior como laterales y los radios internos de refuerzo de soporte (Ilustración 3).

Estos radios han dado lugar a diferentes planteamientos de la OP20. Finalmente, a pesar de considerarse en una primera instancia, no ha sido necesario retocar dicho radio, pero cabe mencionar que es una de las soluciones que se puede plantear para solucionar problemas de rotura en dichas zonas en la estampación de la chapa de acero.

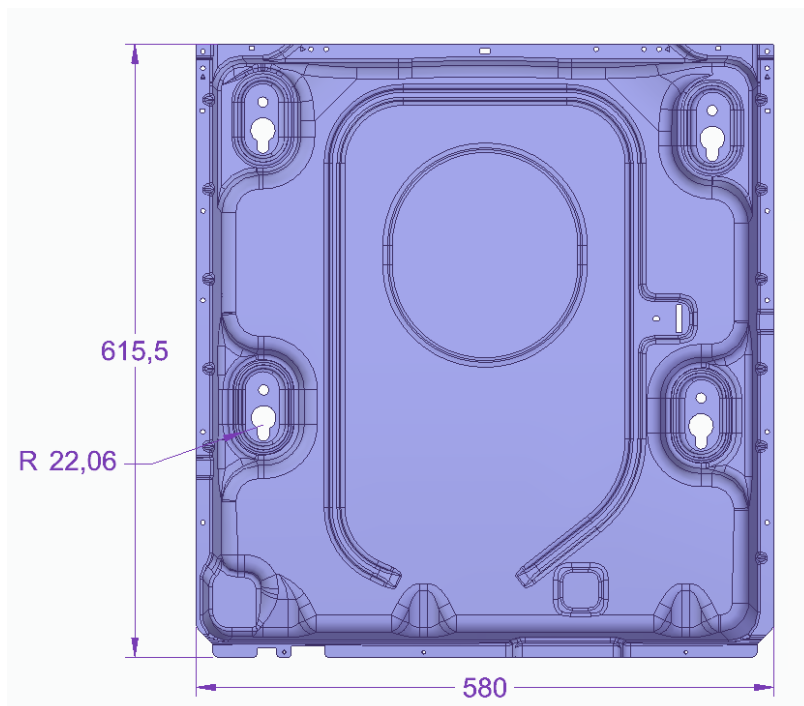


Ilustración 2. Vista en planta de la pieza final.

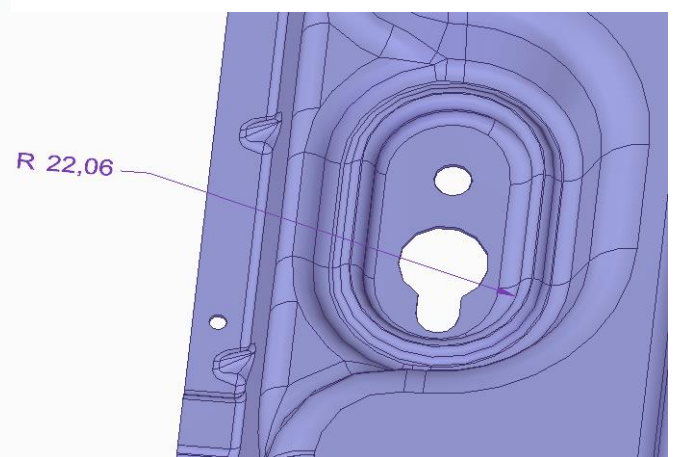


Ilustración 3. Detalle radio interno

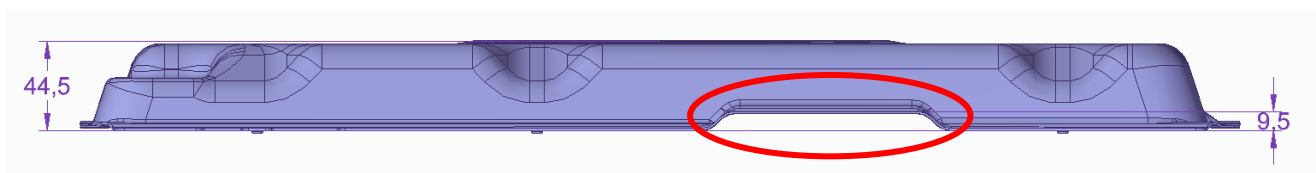


Ilustración 4. Vista en alzado de la pieza final.

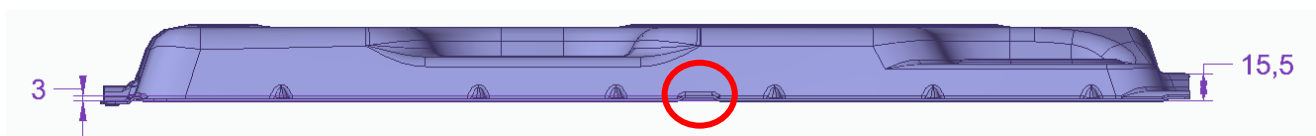


Ilustración 5. Vista del perfil derecho de la pieza final.



## 4 ESTADO DEL ARTE

### 4.1 Materiales utilizados y sus propiedades mecánicas

Para esta pieza del bastidor LHL se va a utilizar un acero DC04. Este acero que está definido por la norma EN 10130 y es de uso común para la fabricación de componentes donde se requiere conformado en frío como es nuestro caso. En la siguiente tabla vemos algunas de las propiedades del acero DC04.

Steel Name	Steel Number			Max Yield Strength, MPa	Min Tensile Strength, MPa	Max Tensile Strength, MPa	Elongation, %	Valid for	C, %	Mn, %	P, % max	S, % max	Ti, %
DC01	1.0330	LC	non-alloy	280	270	410	28	3 mo	0.12	0.60	0.05	0.05	
DC03	1.0347	LC	non-alloy	240	270	370	34	6 mo	0.10	0.45	0.04	0.04	
DC04	1.0338	LC	non-alloy	210	270	350	38	6 mo	0.08	0.40	0.03	0.03	
DC05	1.0312	LC	non-alloy	180	270	330	40	6 mo	0.06	0.35	0.03	0.03	
DC06	1.0873	LC	alloy	170	270	330	38	no limit	0.02	0.25	0.02	0.02	0.30
DC07	1.0898	LC	alloy	150	270	310	40	no limit	0.01	0.20	0.02	0.02	0.20

*Ilustración 6. Tabla de propiedades aceros.*

Este tipo de acero tiene una alta ductibilidad y una buena capacidad de embutición lo que minimiza el riesgo de fractura frente a otros tipos de materiales.

Como tiene bajo contenido en carbono, el acero DC04 es fácil de soldar. Además, gracias a su resistencia a la tracción y su límite elástico lo hace un material que puede soportar cargas y tensiones que puede experimentar un panel posterior de lavadora durante su uso y transporte.

También se caracteriza por ser rentable económicamente en comparación con otros materiales de propiedades similares lo que lo hace atractivo desde el punto de vista de la producción en masa.

## 4.2 Presente y futuro de los procesos de conformado metálico

Actualmente, los procesos de conformado metálico en la fabricación de paneles de lavadora están altamente desarrollados y optimizados. Los métodos predominantes incluyen el estampado, la embutición profunda, el corte por láser y el doblado. Cada uno de estos métodos ofrece ventajas específicas para la producción de dichos paneles de lavadora.

De cara al futuro, los avances tecnológicos en este sector vienen de la mano de la creciente demanda de sostenibilidad y eficiencia.

La integración de sistemas automatizados y control digital con el uso de robots, sistemas de control basados en inteligencia artificial está revolucionando la industria, permitiendo de esta forma mejorar la precisión y reduciendo los tiempos de ciclo de producción.

Cabe destacar también las investigaciones y desarrollo de materiales avanzados, como pueden ser aleaciones de alta resistencia y materiales compuestos, que combinan ligereza y durabilidad.

Todas estas nuevas tecnologías que están envueltas en la creciente preocupación por la utilización de materiales reciclables y procesos de producción más eficientes energéticamente y sostenibles. Así como también el progresivo interés que tienen las empresas de reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub> para alinearse con los objetivos globales de sostenibilidad.

## 4.3 Estándares de calidad

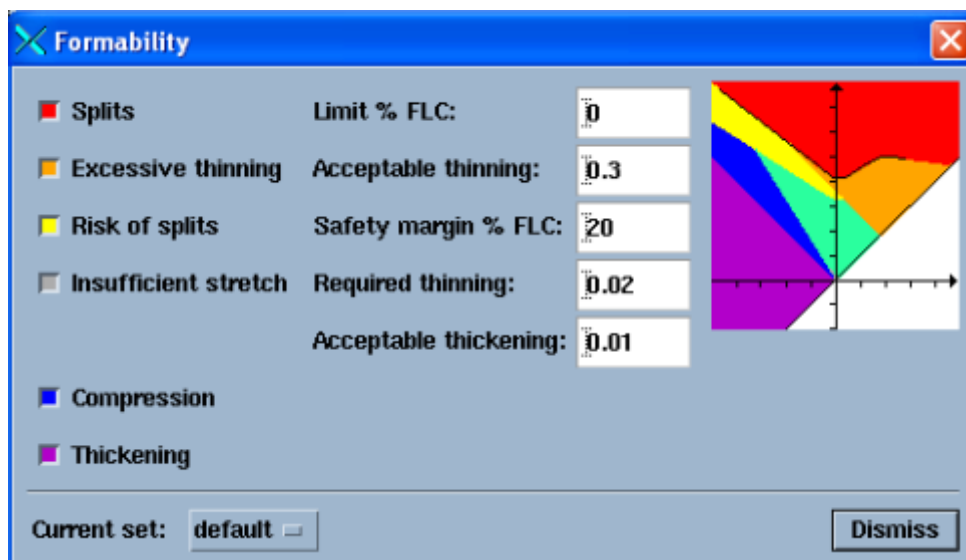
BSH, siendo uno de los líderes mundiales en fabricación de electrodomésticos mantiene rigurosos estándares de calidad para asegurar que sus productos cumplen con las expectativas y normativas internacionales.

Dentro de estas normativas se incluyen las ISO 9001 para sistemas de gestión de calidad entre otras. Las empresas como BSH deben cumplir ciertos estándares no solo para garantizar que sus productos sean seguros y eficientes sino también sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Teniendo en cuenta que la conformidad con estas normativas es crucial para acceder a mercados globales y obtener certificaciones que aumenten la confianza del consumidor.

## 4.4 Formabilidad, Diagrama FLD y curva FLC

La variable de resultado *Formabilidad* muestra los resultados calculados teniendo en cuenta varios criterios. Esta variable de resultado ofrece un estudio rápido de la formabilidad de la pieza. Las áreas que muestran tendencias al fallo según los aspectos enumerados a continuación se representan con diferentes colores:

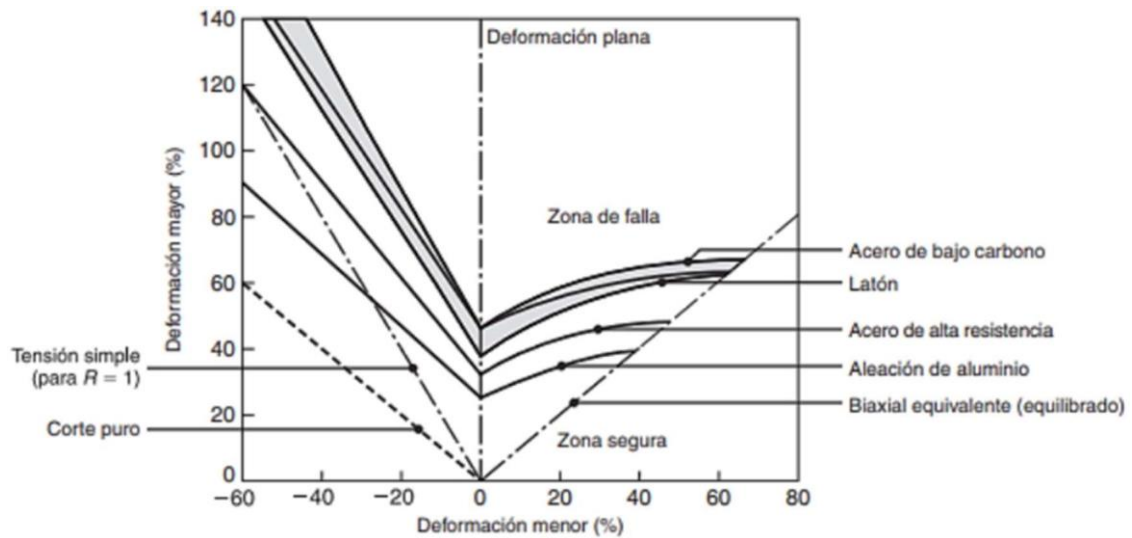
- Grietas
- Riesgo de grietas
- Compresión
- Arrugas



*Ilustración 7. 'Formability'. Manual Autoform.*

El *Forming Limit Diagram* (FLD) se utiliza para comprender cómo se produce la deformación del material durante el proceso de conformación. Este diagrama representa los valores límite en cuanto a deformaciones principales se refiere que resiste una chapa cuando se deforma.

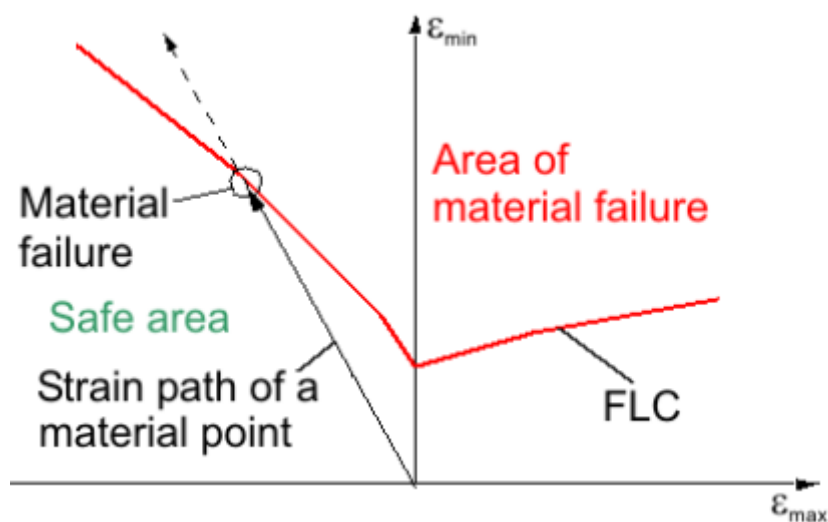
Por tanto, la curva que describe es el límite a partir del cual el material falla y se comienzan a producir roturas. En la ilustración 8 se presenta un ejemplo de FLD: la deformación mayor siempre positiva, ya que la lámina se está estirando, mientras que la deformación menor indica la magnitud de estiramiento o contracción en la dirección transversal, por lo que puede ser positiva o negativa.



*Ilustración 8. Diagrama FLD para distintos tipos de hojas metálicas.*

A la hora de ver un diagrama FLD se debe tener en cuenta que la fricción y la lubricación afectan al proceso de conformado y se tiene que saber que con una lubricación adecuada las deformaciones de la chapa se distribuyen de manera más homogénea.

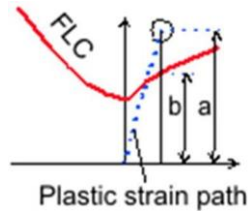
El FLC se utiliza para predecir el fallo del material. En teoría, sólo debería utilizarse para puntos del material que hayan sufrido deformación lineal, ya que la FLC se ha determinado suponiendo una trayectoria de deformación lineal.



*Ilustración 9. 'Forming Limit Curve'. Manual Autoform.*

## 4.5 Max failure

El parámetro *Max Failure* se define como la relación entre la deformación mayor calculada en un elemento y la deformación mayor de la Curva Límite de Conformación basada en la deformación (FLC basada en la deformación) para la misma deformación menor.

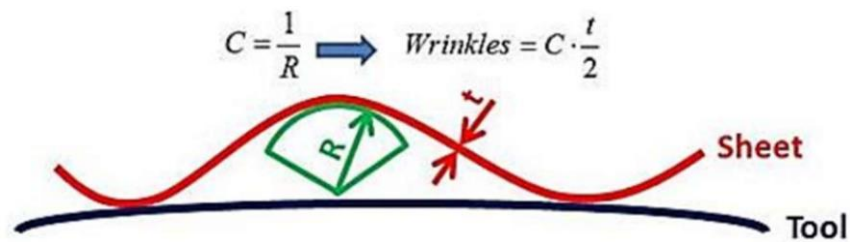


*Ilustración 10. Max failure (linear). Manual Autoform R7.*

Esta variable puede utilizarse para hacer una estimación aproximada de la probabilidad de fallo en el elemento o de la seguridad de los elementos, siempre que el elemento haya sufrido una trayectoria de deformación totalmente lineal.

## 4.6 Arrugas

La arruga es un defecto general en el proceso de conformado de chapa que resulta de la tensión de compresión en la dirección de la membrana. Hay muchos factores que influyen en la formación de arrugas, como el grosor, el material, la fricción, la forma de la herramienta, la fuerza del pisador, los frenos...

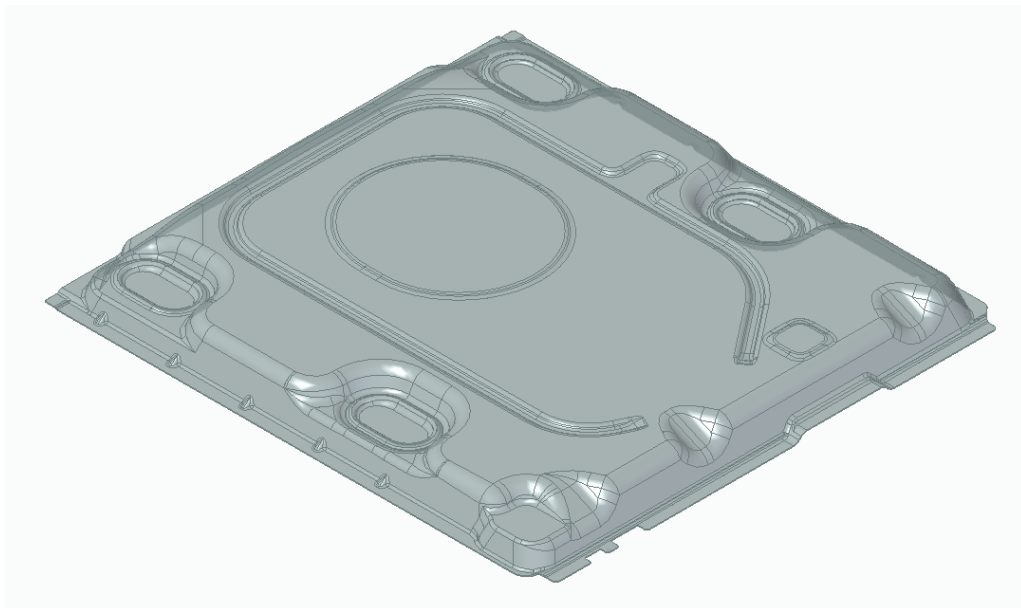


*Ilustración 11. Sección de contacto entre la chapa y la herramienta determinar la aparición de arrugas.*

Hay que tener en cuenta que cabe la posibilidad de que las arrugas no se muestren en la 'foto' final de la pieza terminada, pero hayan podido existir a lo largo del proceso de conformado. 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*.

## 5 MÉTODO PLAN

Para empezar a elaborar un método PLAN, primero se debe aplicar una serie de operaciones al cuerpo inicial de diseño para, como se ha mencionado, obtener las superficies de trabajo. Estas operaciones son principalmente hacer una copia de la piel superior de la pieza, eliminar los agujeros y extender los bordes para alcanzar la superficie con la que, en el software de simulación, serán introducidas las diferentes matrices, machos y pisadores.



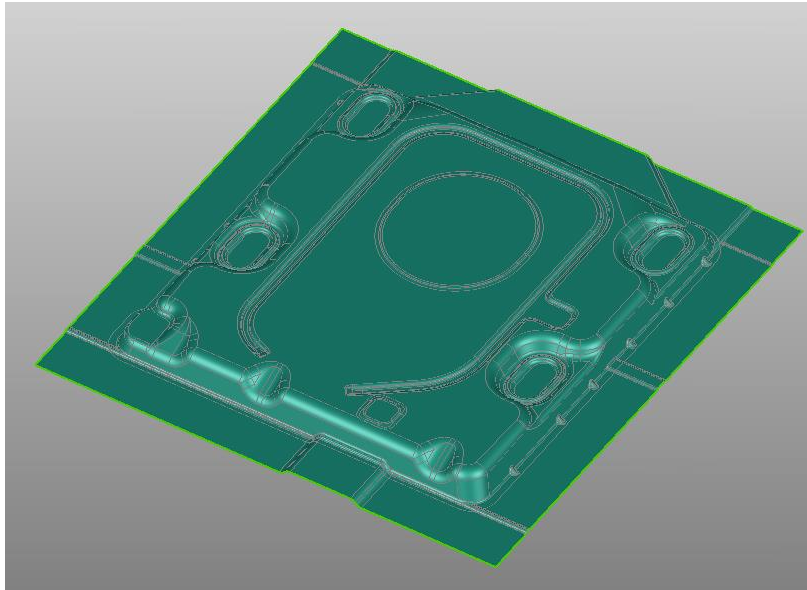
*Ilustración 12. Superficie de trabajo de la pieza.*

Una vez se obtienen dichas superficies de trabajo, el procedimiento es hacer un estudio de cuántas etapas con sus respectivas geometrías van a hacer falta para que la conformabilidad sea viable.

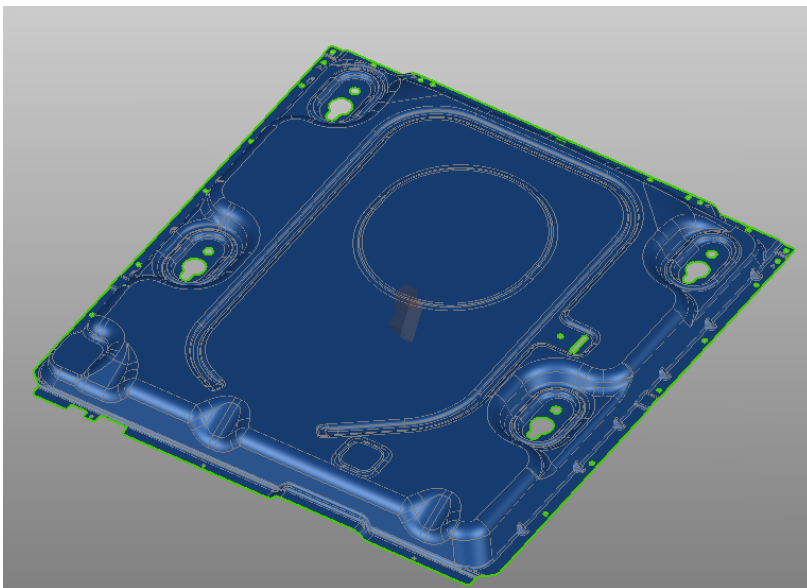
A lo largo de los meses de trabajo se han probado dos o tres etapas en el método PLAN, donde la diferencia principal entre estas dos opciones era la embutición de la chapa y ambas alternativas tenían una etapa en común, la última, la cual se encarga de la operación de corte. Por tanto, tras numerosas simulaciones se ha logrado discernir que la mejor opción es hacer un método PLAN de dos etapas. La posibilidad de hacer la pieza en tres etapas se ha estudiado en profundidad y no ha dado los resultados necesarios para ser mejor para la conformación del panel posterior.

Se ha utilizado la herramienta software SolidEdge para trabajar la geometría y obtener las superficies mencionadas anteriormente.

Una vez trabajadas y obtenidas las superficies, se importan al programa Autoform. En este caso, al tener solamente dos operaciones basta con introducir la superficie que dará soporte a implementar la operación OP20 y la geometría final, con los agujeros y orificios correspondientes, para conformar lo que es la OP30.



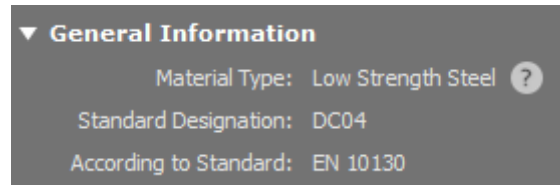
*Ilustración 13. Superficie de la operación OP20.*



*Ilustración 14. Superficie de la operación OP30.*



El paso siguiente es la designación del material con el que el software va a realizar la simulación, como se ha mencionado con anterioridad, es el acero DC04 de acuerdo a la norma EN 10130.



*Ilustración 15. Información del material.*

A continuación, se establecen las dos operaciones que harán falta para conformar la pieza.

En primer lugar, la D-20 es una acción de simple efecto, es decir, en el proceso de fabricación, la prensa que realiza la embutición aplica la fuerza en una sola dirección y sentido durante el ciclo de operación.

Este tipo de operación tiene diferentes ventajas como puede ser que las prensas son más fáciles de operar y de mantener ya que tienen un diseño más sencillo comparado con las de doble efecto. También suelen tener una relación coste - efectividad mejor ya que en términos económicos se necesita menor inversión inicial y tienen menos costes operativos.

En segundo lugar, la operación T-30 donde gracias a la geometría final importada, se forman las líneas de corte y punzonado para dar forma a la pieza final.

## 6 SIMULACIONES

Con el método plan aclarado anteriormente, se llevan a cabo las simulaciones que abarcan las diferentes operaciones que se han mencionado.

Cabe destacar que, como se indicado previamente, el proceso de simulación es un trabajo de ensayo y error. Siendo esta fase la más larga y que muestra mejor la evolución de este trabajo. Se han llegado a hacer más de 60 simulaciones, la gran mayoría de ellas con resultados no aptos pero que han servido para descartar ciertas configuraciones e ir aclarando el camino hacia la simulación óptima.

Por ello, se ha decidido comentar en esta memoria algunas de las simulaciones fallidas y, por otro lado, el procedimiento que se ha seguido hacia la última simulación que se ha dado por favorable.

### 6.1 Configuraciones previas descartadas

Con el fin de mostrar la búsqueda de soluciones para las zonas conflictivas que se ha realizado, a continuación, se exponen algunas de las simulaciones con configuraciones previas que se han estudiado y descartado.

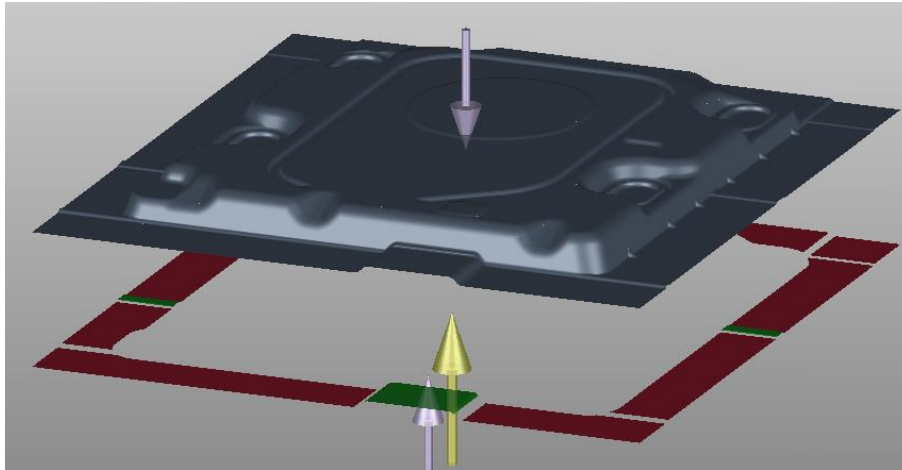
Las numerosas simulaciones que se han probado se pueden agrupar en tres tipos de configuraciones diferentes que se han denominado de la siguiente manera:

- **“Punch en 2 etapas”**: proceso de embutición realizado en dos etapas diferentes OP20 y OP30.
- **“Frenos”**: simulaciones caracterizadas por incluir gran cantidad de frenos para intentar paliar las arrugas.
- **“Carros”**: simulaciones en las cuales se realiza el proceso de embutición en una sola etapa (OP20) incluyendo carros laterales para las elevaciones que se consideran zonas críticas.

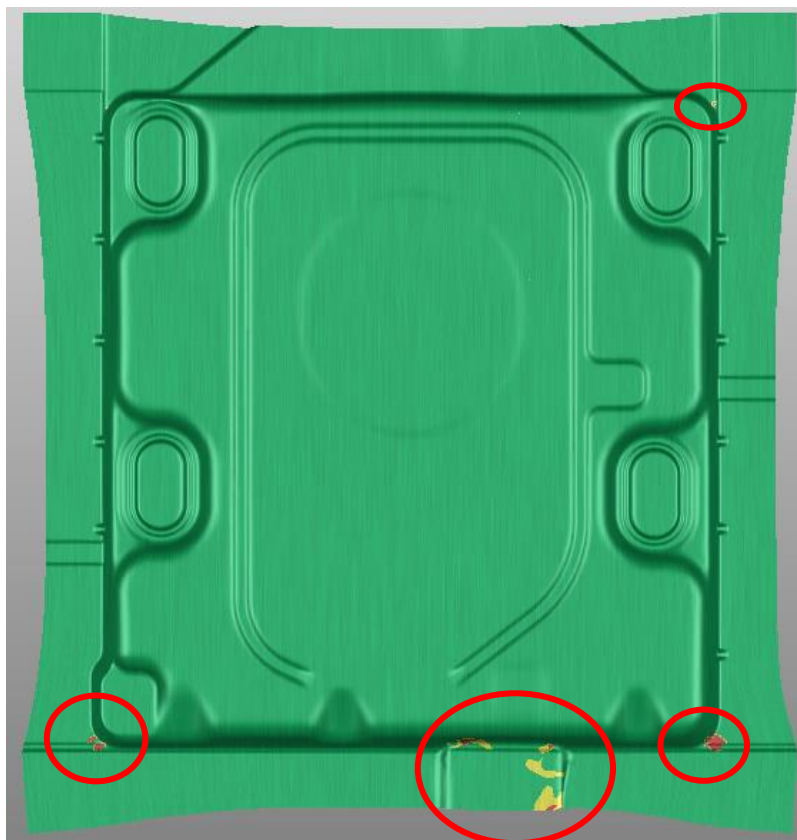
Antes de dar paso a la explicación en detalle de la configuración final, que es del último tipo, se va a evidenciar por qué se han descartado los dos tipos de configuraciones anteriores (“Punch en 2 etapas” y “Frenos”).

### 6.1.1 Simulación tipo “Punch en 2 etapas”

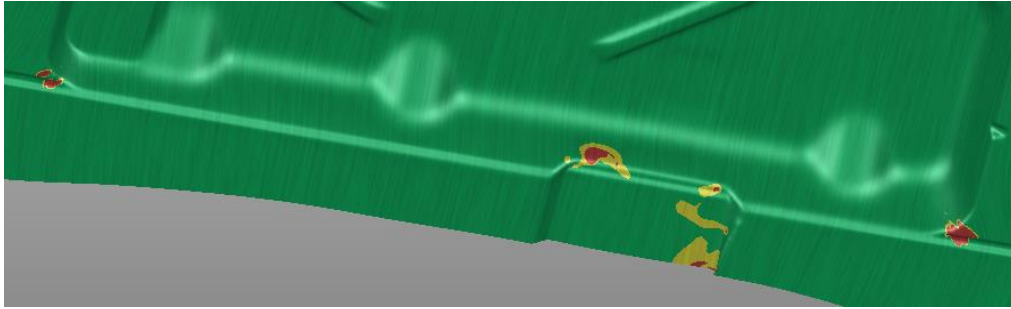
Este tipo de simulaciones se caracterizan, como se ha mencionado, en hacer el proceso de embutición en dos etapas diferentes. En la ilustración 16 se observa como son el pisador (de color rojo) y los machos (de color verde) correspondientes para elevar las zonas laterales que son consideradas críticas de la pieza final



*Ilustración 16. Matriz, pisador y machos de la operación D-30.*



*Ilustración 17. Arrugas después de la operación D-30.*

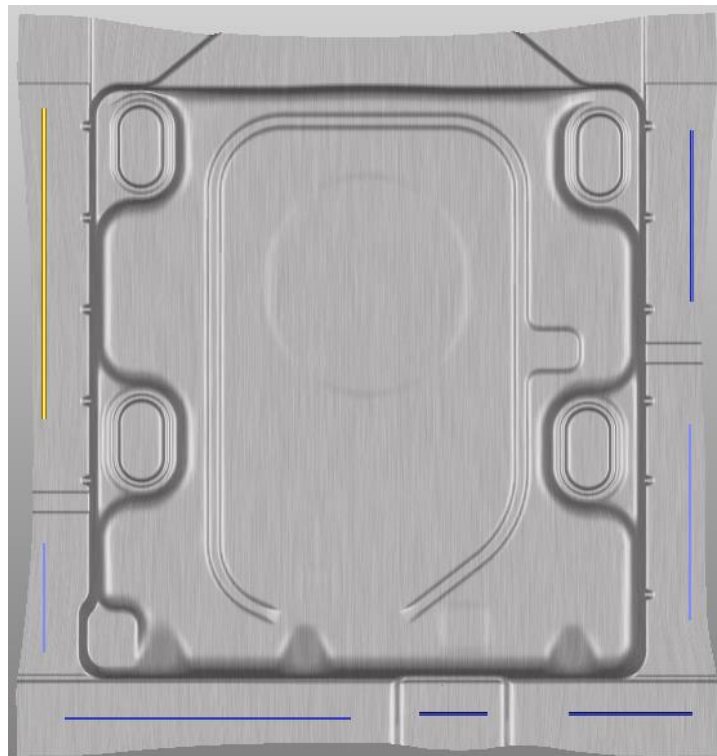


*Ilustración 18. Detalle de las arrugas.*

Tanto en la ilustración 17 y particularmente en la ilustración 18, se distingue perfectamente la problemática de las arrugas. Tras diversos intentos, se decidió descartar la configuración de las dos etapas, D-20 y D-30, para el proceso de embutición de la chapa.

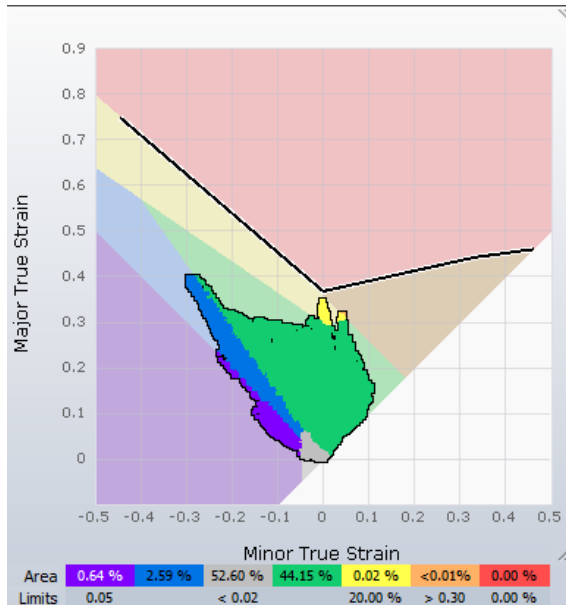
### 6.1.2 Simulación tipo “Frenos”

Otro tipo de simulaciones que se han estudiado se identifican por la presencia de hasta siete frenos con el objetivo final de intentar paliar las arrugas que han sido uno de los constantes problemas inherentes de este trabajo.

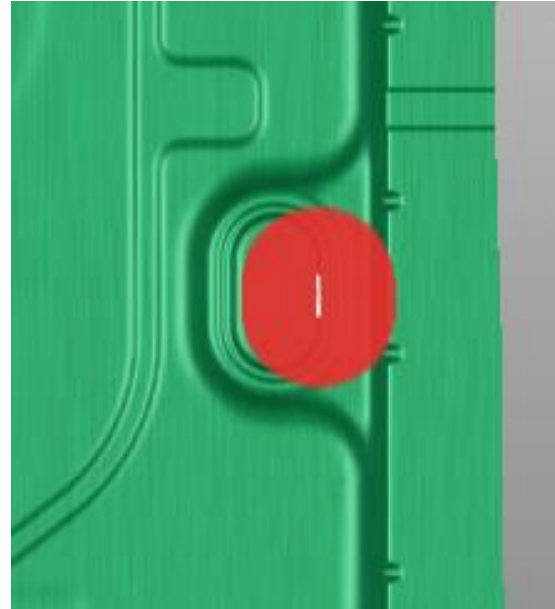


*Ilustración 19. Detalle de los frenos.*

Si bien es verdad que conseguía reducir el inconveniente de las arrugas, con una presión inicial de tan solo 3Mpa, sobrepasaba los límites de rotura (max failure) impuestos en las condiciones iniciales.



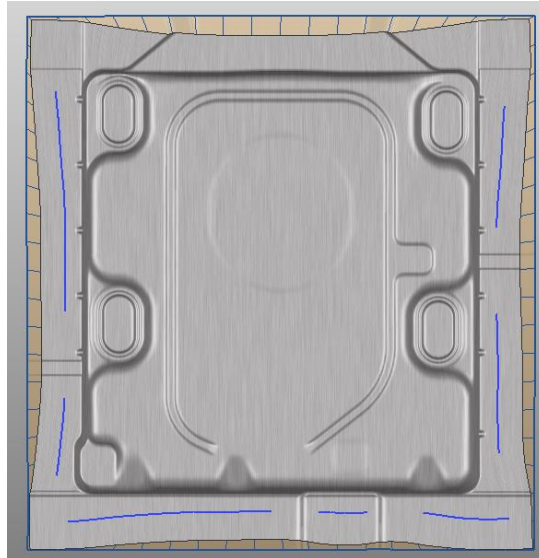
*Ilustración 20. Diagrama FLD.*



*Ilustración 21. Detalle de las roturas.*

Otras de las desventajas que presentaba este tipo de simulación era el hándicap de tener que necesitar más cantidad de chapa de acero a la hora de fabricar el panel posterior de la lavadora, lo cual significa un aumento de los costes en un mercado de producción en masa.

Después de ajustar al máximo la distancia de los frenos a la geometría final, se necesita una chapa de acero de 690x695mm, lo que representa un aumento del 6% respecto al área necesitada en la simulación definitiva. Teniendo en cuenta también el mantenimiento, calibración y puesta a punto que supone tener siete frenos actuando sobre la pieza.



*Ilustración 22. Detalle Draw-in frenos.*

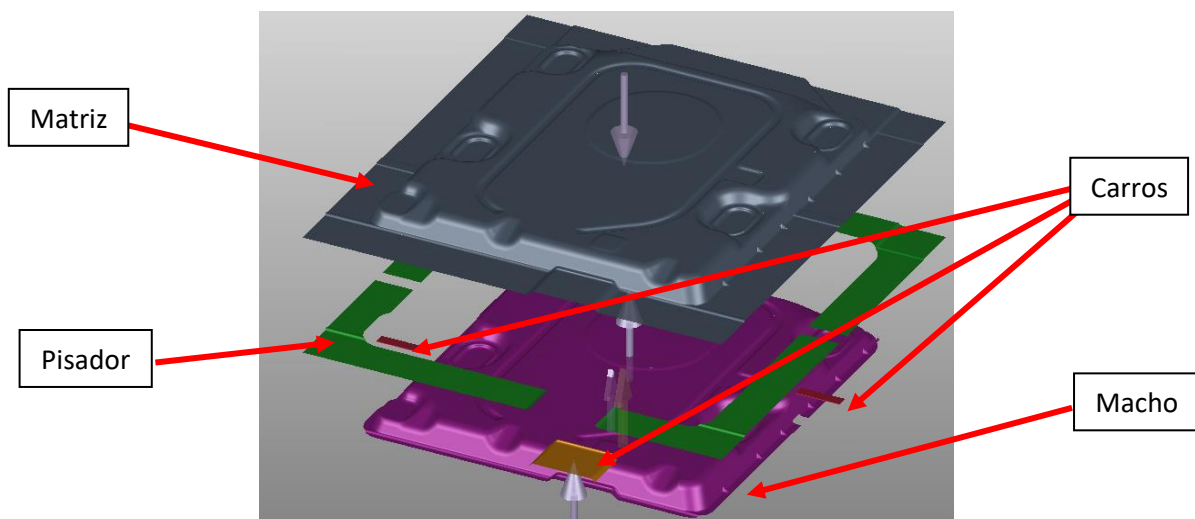
Por todo lo comentado anteriormente, se ha dado por no apta este tipo de simulaciones.

En un futuro se podría estudiar la viabilidad de esta alternativa solucionando la dificultad de la cercana rotura de los radios internos suavizándolos en una primera etapa para luego en una segunda etapa conseguir su geometría final.

## 6.2 Etapa OP20

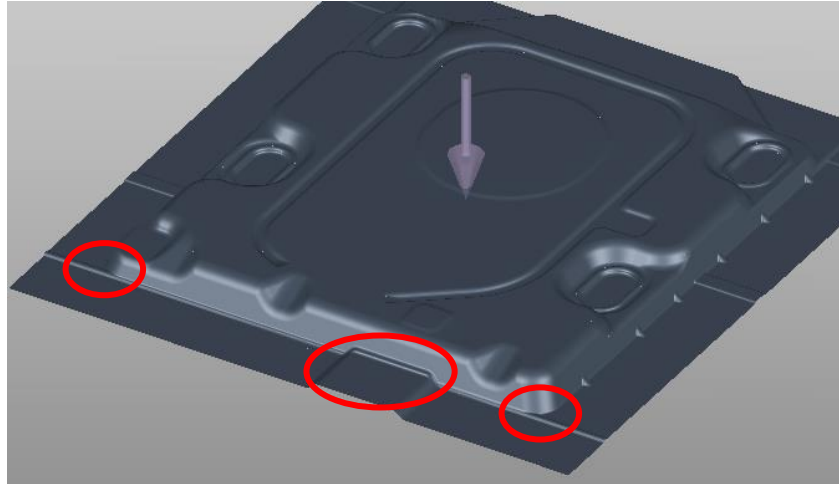
La etapa OP20 consiste en la estampación de la geometría que da lugar a las formas principales del panel posterior de la lavadora.

Para esta operación es necesario definir la matriz (die), el pisador (binder) y los diferentes machos (punch) de la D-20. Se toma de punto de partida una presión inicial de pisado de 3Mpa y un coeficiente de rozamiento de 0,11.



*Ilustración 23. Herramientas OP20.*

En un primer periodo de simulaciones, se encuentra el problema de las elevaciones en la zona inferior de la pieza, que debido a la geometría que se ha impuesto, son lugares de concentración de roturas y sobre todo de arrugas.



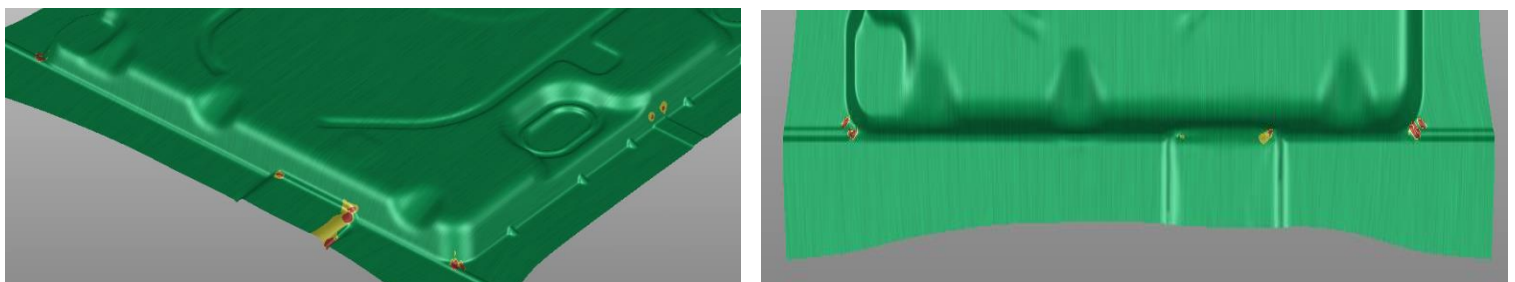
*Ilustración 24. Elevaciones.*

Este inconveniente se soluciona parcialmente una vez se incorporan los carros a la simulación.

Se realiza un cambio en el pisador para que incluya toda la geometría lateral de la pieza exceptuando las zonas conflictivas señaladas en la ilustración anterior. Previamente el pisador rodeaba toda la superficie lateral exterior de la pieza.

Con esta modificación la cinemática es la siguiente: primero se conforma la parte principal de la pieza y seguidamente entran los carros laterales para acabar de conformar las elevaciones.

Como se puede apreciar en la ilustración 25, con esta configuración se producen arrugas en las mismas zonas, aunque menos que en simulaciones anteriores.

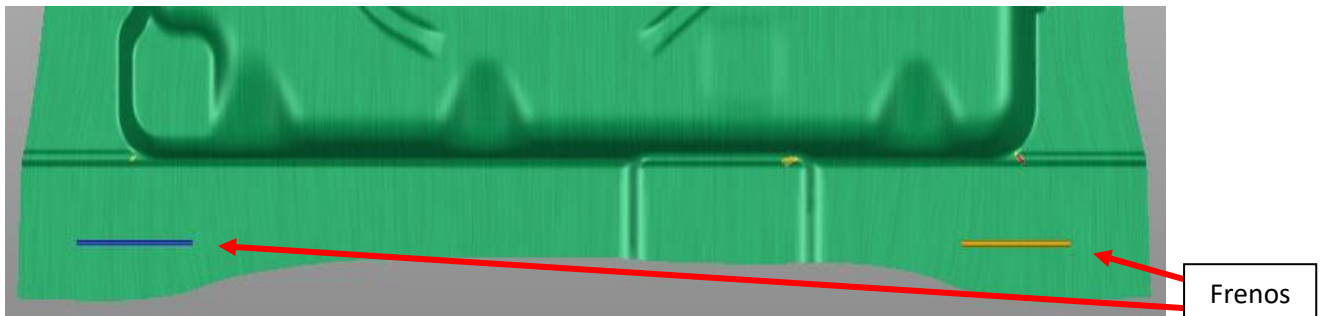


*Ilustración 25. Comparativa de arrugas antes (izquierda) y después (derecha) de los carros.*



Ante esta problemática, la alternativa que mejor resultados ha dado es la incorporación de frenos (drawbeads). La primera disposición es de dos frenos en la parte inferior, cerca de las zonas de arrugas, utilizando unos frenos de tipo “AF4\_Strong” que aplican una fuerza lineal de 243 N/mm.

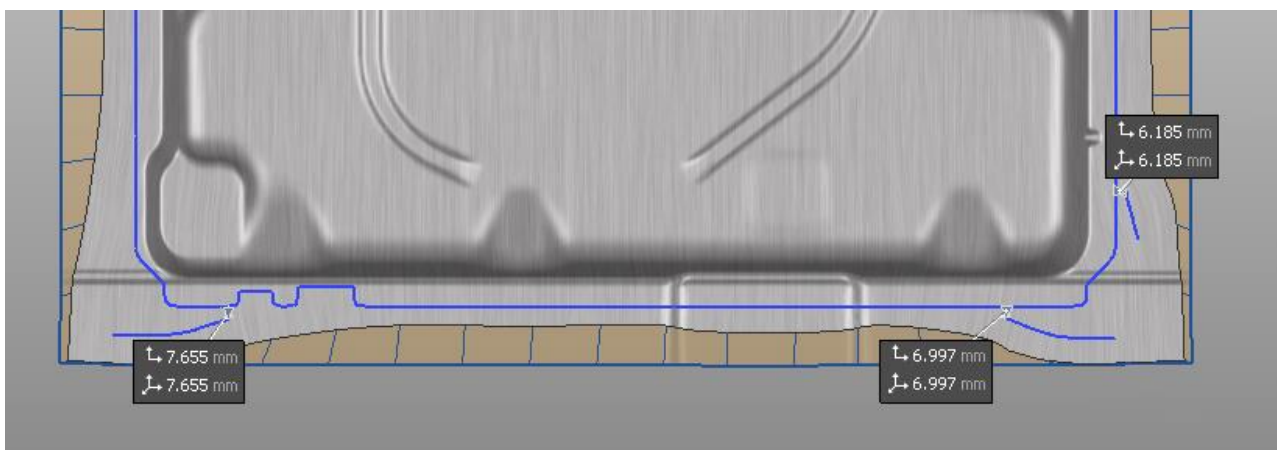
Como se ve en la imagen, esta posibilidad ha hecho que se reduzcan en gran medida la existencia de arrugas.



*Ilustración 26. Frenos y arrugas.*

Una vez agregados los frenos, el siguiente paso es ajustar la longitud y la posición de éstos con el objetivo de optimizar el formato de chapa al máximo dejando un margen de 6 milímetros respecto a la pieza final.

Se añade un último freno para paliar el problema de las arrugas en la zona inferior derecha y se aumenta el coeficiente de rozamiento de 0,11 a 0,12.



*Ilustración 27. Draw-in de los frenos y distancia de hasta la geometría final.*

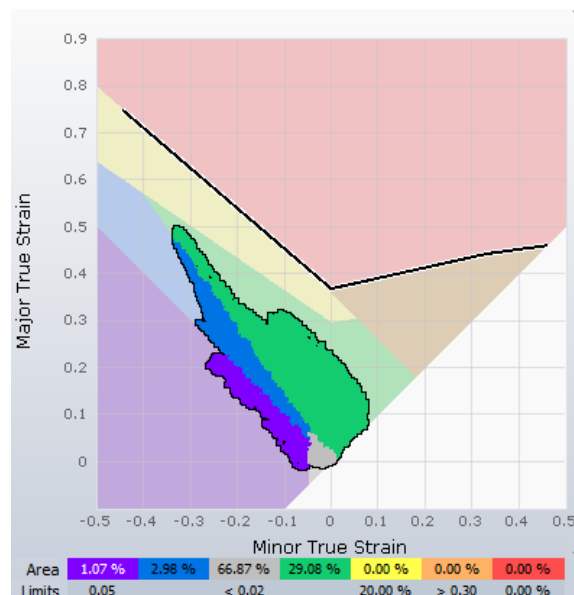


Con este ajuste de los frenos a la geometría final, se logra adecuar el formato de la chapa pasando de unas dimensiones iniciales de 700x735,5mm a 670x675mm, lo que supone una reducción de material de cerca del 14%.

Cabe destacar que a la vez que se realizaban simulaciones con esta configuración de la OP20, también se llevaron a cabo diversas simulaciones con diferentes configuraciones, las cuales además de ser menos favorables, tampoco lograban reducir tanto el formato de chapa como la explicada hasta ahora.

Es importante mencionar también que la reducción de chapa afecta a la aparición de arrugas y roturas.

Como se muestra en las imágenes a continuación, los resultados son más que aceptables tanto de roturas, arrugas y formability al final de la etapa D-20.

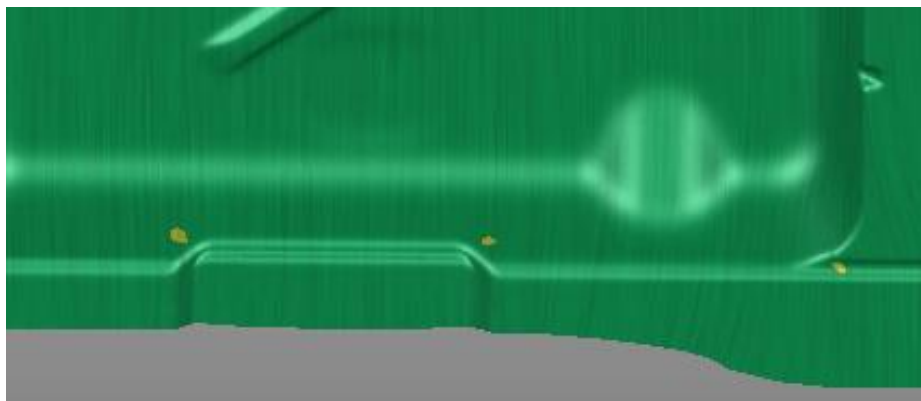


*Ilustración 28. Diagrama FLD de la operación D-20.*

En el diagrama FLD se muestra que todos los puntos de la pieza se encuentran por debajo del límite estipulado tras la operación D-20.



*Ilustración 29. Arrugas de la operación D-20.*



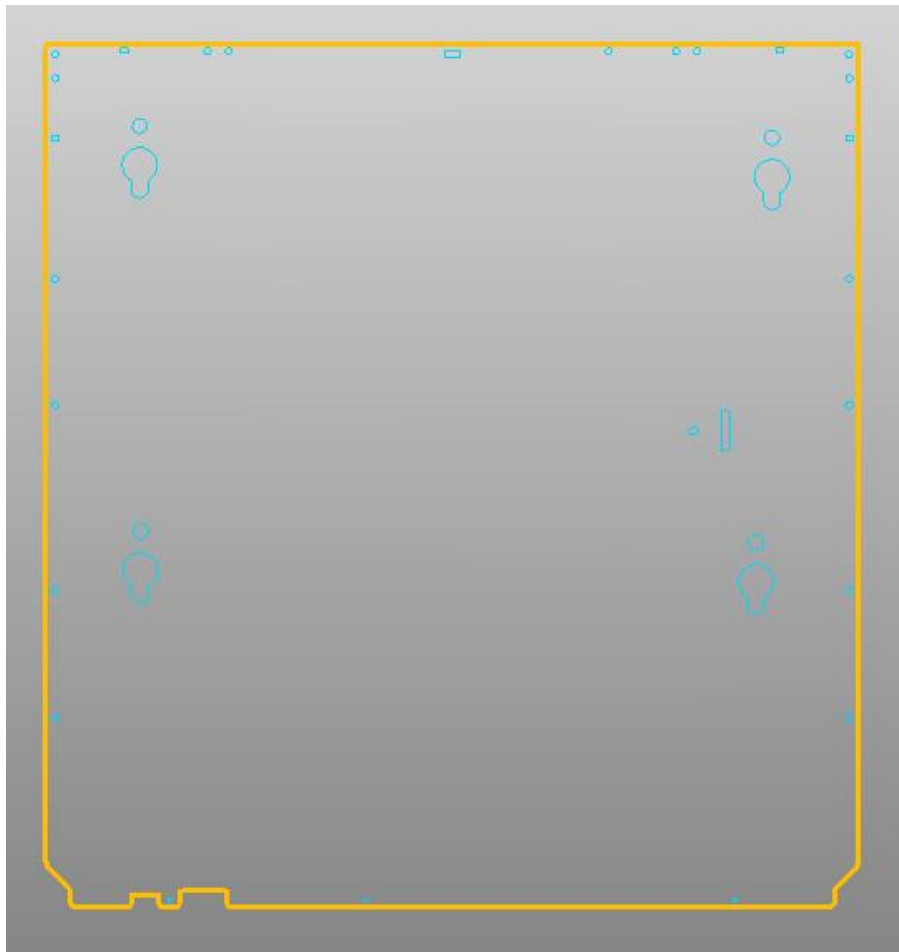
*Ilustración 30. Detalle arrugas de la operación D-20.*

En las ilustraciones 29 y 30 se aprecia que las arrugas ahora son mucho menores a la situación previa a la introducción de los carros y de los frenos.

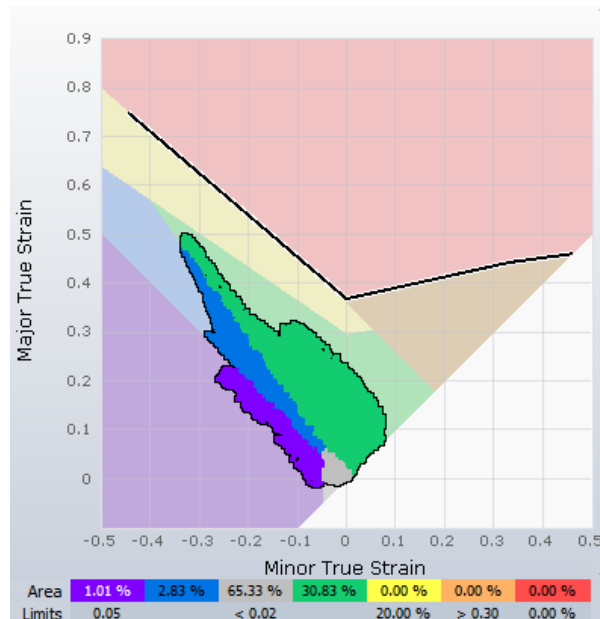
### 6.3 Etapa OP30

Por último, para la etapa OP30, se debe hacer una distinción entre las dos herramientas que en su conjunto constituyen la operación de trim T-30.

Por un lado, se realiza el punzonado de todos los agujeros que hay en la geometría final de la lavadora (en azul en la imagen). Por otra parte, se tiene el corte de la chapa exterior sobrante de la pieza final (en amarillo en la imagen).



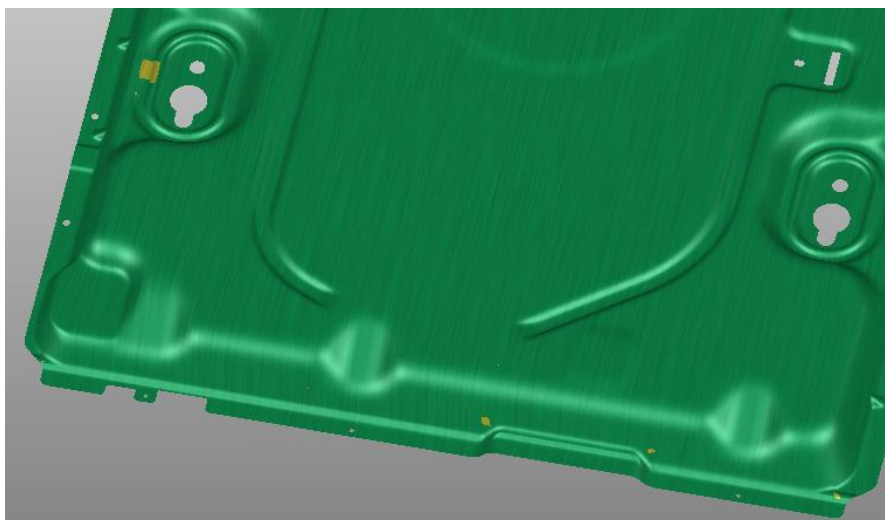
*Ilustración 31. Herramientas T-30.*



*Ilustración 32. Diagrama FLD de la operación T-30.*

Al observar el diagrama FLD, se ve que la operación de trim T-30 no ha variado apenas y los máximo puntos de rotura de la pieza siguen por debajo del límite impuesto.

También se observa en la imagen inferior que las arrugas apenas cambian tras la T-30 y siguen siendo muy similares a antes de las operaciones de punzonado y corte de la pieza.

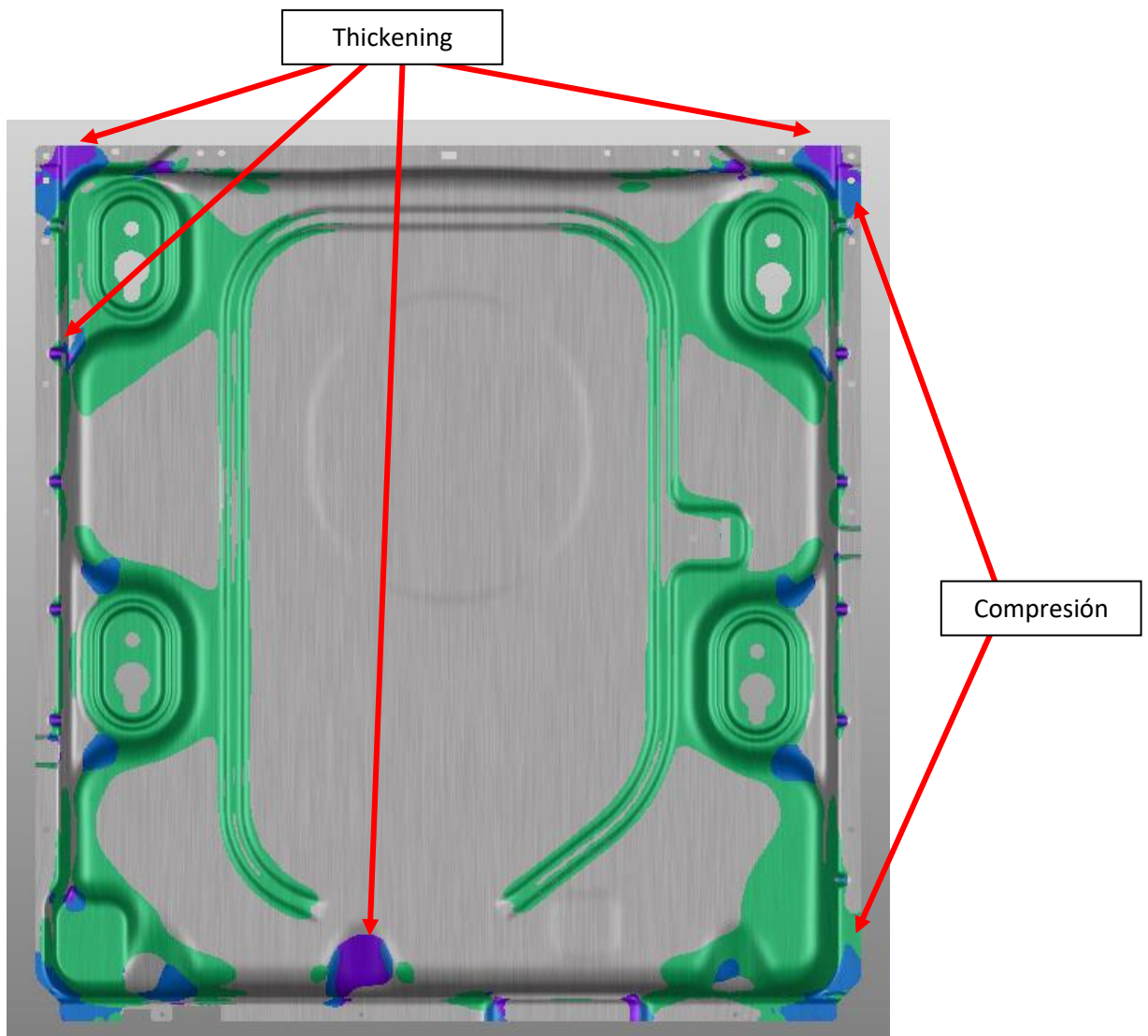


*Ilustración 33. Arrugas de la operación T-30.*

Por último, si se pone atención a la formabilidad de la pieza, sirve de ayuda para entender con exactitud lo que esta sucediendo a lo largo del conformado de la geometría.

Por un lado, se tiene zonas de “thickening” (engrosamiento, aumento de espesor y tendencia a arrugas), principalmente en las esquinas superiores y en las zonas que tiene un radio de curvatura pequeño.

Aparecen también zonas de compresión (compress), ubicadas en mayor medida en las cuatro esquinas. Este tipo de zonas sirven para indicar las arrugas de la pieza o futuras arrugas que pueden llevar a haber si hay alguna variación en el proceso de conformado.



*Ilustración 34. Formability de la pieza final.*

## 7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 7.1 Diseño de experimentos - análisis DOE

El diseño de experimentos (DOE) es una metodología sistemática y estructurada que permite estudiar la influencia de múltiples factores sobre un proceso.

En este contexto de la fabricación de un panel posterior de una lavadora, hacer un análisis estadístico es un potente recurso para examinar cómo la variación de ciertos parámetros afecta a las características finales.

En este caso, los parámetros seleccionados para este estudio son el coeficiente de rozamiento (lubricación) y presión inicial de pisado (BHF) para ver cómo influyen en el max failure (roturas) y arrugas. Ambos parámetros han sido identificados como críticos debido a su impacto directo en la estructura final del panel posterior.

- **Coeficiente de rozamiento:** todo el estudio se ha llevado a cabo con las condiciones por defecto del programa de simulación de elementos finitos, es decir, se utiliza “Mill Oil” como condición de lubricación.

Durante la investigación en las múltiples simulaciones, se ha variado el coeficiente de rozamiento entre 0,11 y 0,12. Para el análisis DOE se ha tomado los valores 0,11, 0,12 y 0,13 para ver cómo influye en la geometría.

- **Presión inicial de pisado:** la presión aplicada durante el proceso de conformado es crucial para asegurar que el material se deforme correctamente sin sobrepasar los límites elásticos. Se ha observado que este parámetro tiene gran influencia en la formación de roturas. Para el diseño de experimentos se ha tomado los valores de 3, 4 y 5MPa.

Este análisis de experimentos evalúa todas las combinaciones posibles de los factores seleccionados. Por tanto, este enfoque permite identificar no solo los efectos individuales de cada parámetro, sino también las interacciones entre ellos.

Se ha decidido examinar únicamente la zona más conflictiva que se ha encontrado a lo largo de las numerosas simulaciones.

Para la interpretación de los resultados se utilizó el programa software MINITAB, el cual nos permite graficar las soluciones obtenidas.



*Ilustración 35. Zona de estudio.*



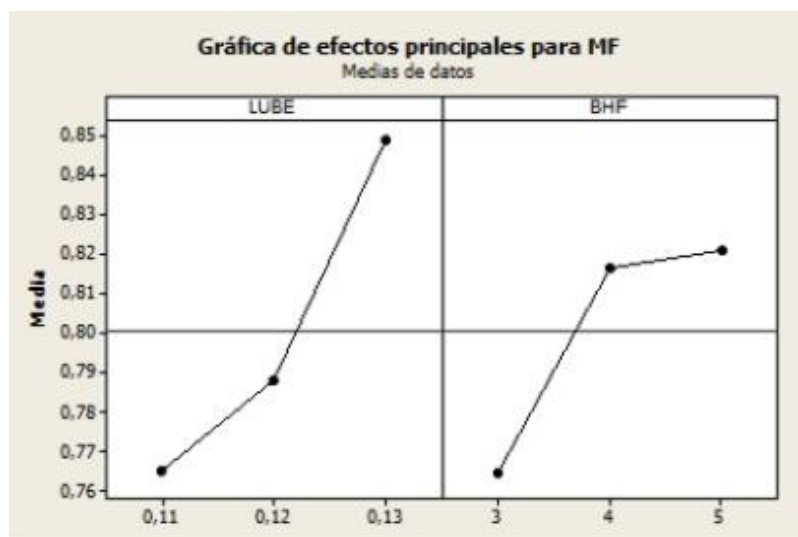
*Ilustración 36. Zona de estudio.*

En la siguiente tabla se registran los resultados de max failure y de arrugas para cada combinación de niveles tras realizar las simulaciones variando los parámetros indicados de lubricación y presión inicial de pisado.

Coeficiente de rozamiento	Presión inicial de pisado	Max failure	Wrinkles
0,11	3	0,745	0,123
0,11	4	0,768	0,104
0,11	5	0,783	0,084
0,12	3	0,762	0,112
0,12	4	0,791	0,104
0,12	5	0,811	0,071
0,13	3	0,787	0,114
0,13	4	0,891	0,077
0,13	5	0,869	0,063

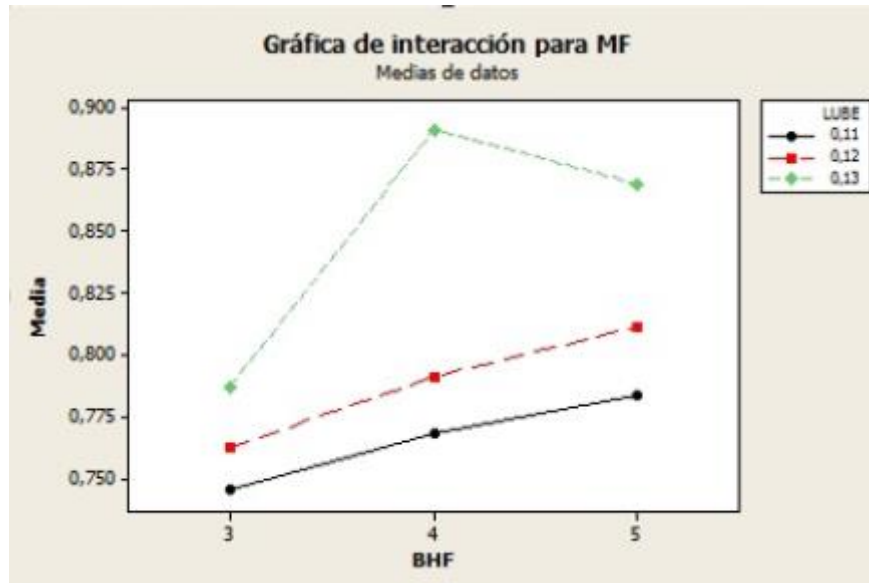
*Tabla 1. Mediciones zona de estudio.*

### 7.1.1 Max failure



*Gráfica 1. Efectos principales para max failure.*



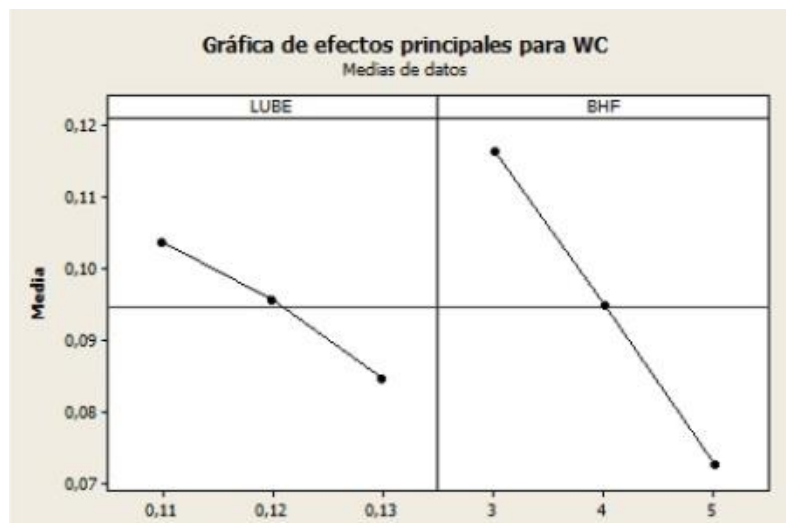


*Gráfica 2. Interacción para max failure.*

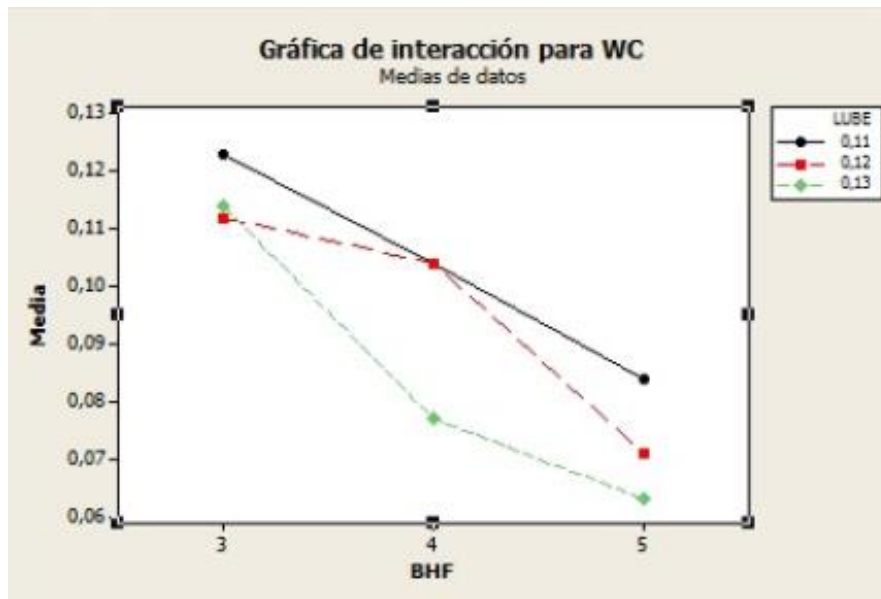
Tal y como se puede apreciar en las gráficas, como era de esperar, el criterio de max failure incrementa de manera directamente proporcional según aumenta la variable de lubricación o la presión ejercida (presión inicial de pisado).

El límite superior válido para el criterio max failure está establecido en 0,8. Teniendo en cuenta esto, todas las simulaciones son dadas por favorables a excepción de aquellas con coeficiente de rozamiento de 0,13 y presión de pisado 4 y 5Mpa ya que se acercan demasiado al punto de rotura.

### 7.1.2 Wrinkles



*Gráfica 3. Efectos principales para wrinkles.*



*Gráfica 4. Interacción para wrinkles.*

Al contrario que pasa con el resultado max failure, el criterio de wrinkles disminuye de manera inversamente proporcional al incrementar los parámetros de coeficiente de rozamiento y presión de pisado.

Para el caso de las arrugas, se ha establecido el límite en 0,1. Lo que nos indica que las simulaciones válidas son aquellas con una presión inicial de pisado de 4Mpa y un coeficiente de rozamiento de 0,13 y las simulaciones con una presión inicial de pisado de 5Mpa independientemente del coeficiente de rozamiento.

## V 7.2 Análisis de regresión lineal

Para acabar de completar el estudio de los resultados de las simulaciones se ha realizado un análisis de regresión lineal.

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para modelar la relación entre una variable dependiente (variable de respuesta) y una o más variables independientes. Este tipo de análisis permite cuantificar el impacto de los parámetros elegidos anteriormente (coeficiente de rozamiento y presión inicial de pisado de pisado) sobre las características de la pieza final, en este caso, max failure y wrinkles.

Se ha utilizado una herramienta de excel para prodecer al análisis de los datos.

### 7.2.1 Max failure

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,891763211
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,795241624
R <sup>2</sup> ajustado	0,726988833

*Tabla 2. Estadísticas de la regresión para max failure.*

El coeficiente de determinación R<sup>2</sup> indica la cantidad proporcional de variación en la variable de respuesta explicada según las variables tomadas. Cuanto más se acerque a 1 mejor será este valor.

El coeficiente R<sup>2</sup> ajustado para max failure es de 0,726 lo cual quiere decir que las variables de coeficiente de rozamiento y presión de pisado explican gran parte de la variación de los resultados de max failure.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	0,296	0,032613998	9,075857662	0,000100404
Coeficiente de rozamiento	-0,95	0,257300804	-3,692176571	0,010182401
Presión de pisado	-0,021833333	0,002573008	-8,485528611	0,000146519

*Tabla 3. Estadísticas de la regresión para max failure.*

Tanto el estadístico t como la probabilidad son también dos factores a tener en cuenta.

Por un lado, cuando el estadístico t es mayor que 2 en valor absoluto, se puede decir que las variables estudiadas son significativas en la respuesta.

En cuanto a la probabilidad o valor  $-p$ , se quiere que sea lo más pequeño posible ya que resalta la probabilidad de que el coeficiente sea igual a cero.

Al analizar la tabla se puede llegar a la conclusión de que tanto el coeficiente de rozamiento como la presión inicial de pisado tienen gran influencia y son significativas en el parámetro max failure.

Siendo la variable de presión la que a priori es más influyente de las dos, al tener mayor estadístico  $t$ .

### 7.2.2 Wrinkles

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,966707717
Coeficiente de determinación $R^2$	0,93452381
$R^2$ ajustado	0,912698413

*Tabla 4. Estadísticas de la regresión para wrinkles.*

Se observa que el coeficiente de determinación  $R^2$  ajustado es para las variables indicadas es aun mayor en el resultado de las arrugas que en max failure, llegando a un valor de 0,912.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	0,186111111	0,132423462	1,405423997	0,209502797
Coeficiente de rozamiento	4,183333333	1,04472514	4,004243006	0,007084663
Presión de pisado	0,028166667	0,010447251	2,696083936	0,035761861

*Tabla 5. Estadísticas de la regresión para wrinkles.*

Tal y como se puede comprobar, los datos de la tabla 5 son acordes al coeficiente  $R^2$ , en este caso y al contrario que en max failure, el coeficiente con más importancia es el coeficiente de rozamiento, siendo las dos variables de gran peso en la formación de arrugas.

## 8 CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Grado ha investigado la viabilidad del proceso de conformado metálico de un panel posterior de lavadora.

A través de un análisis detallado de la pieza y una metodología de trabajo clara se ha elaborado un método PLAN y se han contemplado distintas alternativas para resolver las dos dificultades más comunes de la conformación, exceder el límite de max failure llegando incluso a la rotura y la formación arrugas.

Cabe destacar que, como se ha visto en este estudio, tanto la configuración de las herramientas para realizar las operaciones de embutición o corte como la variación de los parámetros como son el coeficiente de rozamiento y la presión inicial de pisado tienen una influencia inapelable en los resultados de las simulaciones.

Por ello, se debe tener en cuenta que una geometría de herramientas adecuada y una regulación correcta de las variables significativas es la manera eficaz de hacer posible este proceso de conformado.

La interpretación de los resultados es compleja, por ello se ha decidido estudiar en particular la zona más crítica de la pieza por medio de un análisis estadístico DOE o diseño de experimentos y un análisis de regresión lineal.

Se ha llegado a la conclusión de que las variables coeficiente de rozamiento y presión inicial de pisado guardan cierta relación y ambas tienen un peso importante en las soluciones de las simulaciones, siendo el coeficiente de rozamiento más influyente en la formación de arrugas y, la presión inicial de pisado, por contraparte, repercute más en el parámetro max failure.

Una línea de trabajo a seguir puede ser la implementación de un estudio de robustez y ver las posibles variaciones de las propiedades mecánicas del material y cómo corregir su efecto modificando los parámetros del proceso.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] AutoForm Engineering GmbH, AutoForm - Stand-alone Software Manual, 2017.
- [2] <https://es.steelwarehouse.com/en-10139/> – Propiedades mecánicas de los aceros EN10139