



MASTER EN AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estampación en caliente. Pre-diseño de un proceso de estampado en caliente para un pilar B.

Autor: D. Javier Sastre Cascón

Tutor: D. Manuel González Hernández

Valladolid, Julio 2013

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce s/n

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



RESUMEN

La estampación en caliente es un proceso actual para la fabricación de partes estructurales del automóvil. Mediante esta técnica se consiguen piezas con las características de seguridad requeridas, aportando una reducción de peso de las mismas respecto a métodos tradicionales de estampación en frío.

La estampación en caliente es un largo proceso de fabricación, en este proyecto se aborda un profundo análisis del estado de arte de cada una de las operaciones necesarias para llevar a cabo la fabricación.

A partir de las conclusiones sacadas del estado del arte, y siguiendo las mejores prácticas posibles, se pre-diseñará un proceso de fabricación de un pilar B. Este proceso podrá servir de referencia para el pre-diseño de cualquier otra pieza fabricada mediante estampación en caliente, además de diseñar el proceso se valoran las distintas opciones, para optimizar los resultados, tanto económicos como de calidad.

Con este proyecto cualquier persona no familiarizada con la estampación en caliente podrá obtener una visión profunda y actualizada sobre la estampación en caliente. Se considera, que su estudio por parte de técnicos no familiarizados con la estampación en caliente, podrá suponer, un punto de partida en caso de tener que diseñar procesos de estampación en caliente completos.

Hot stamping. A review and pre-design of a process for the manufacturing of a pillar B

ABSTRACT

Hot stamping is a current process for the manufacture of structural parts for automobiles. Through this technique are achieved parts with the required security features, beside providing a weight reduction with respect to traditional methods of cold stamping.

The hot stamping is a long manufacturing process, this project addresses a deep analysis of the state of art of each of the operations required to perform the manufacturing.

From the lessons learned, and following the best practices possible, the pre-design of a manufacturing process of a pillar B is achieved. This process can serve as a reference for pre-design of any piece made by hot stamping, in addition to designing the process other design options are valued.

With this project, anyone unfamiliar with hot stamping can get deep insights and updated information on hot stamping. It is considered, that their study by technicians unfamiliar with her hot stamping, could be a starting point if they have to design a complete hot stamping process.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias a Manuel González, por haber sido el tutor de este trabajo de fin de máster y por el tiempo que ha dedicado a la revisión de los borradores. Revisiones que han servido para mejorar y orientar este proyecto.

No podría olvidarme de Dan Marinac, con sus consejos y su tiempo para ilustrarme sobre el uso del software usado le han dado mayor profundidad a este proyecto.

Por último a todos mis familiares y amigos que me han acompañado hasta este momento y de alguna manera u otra me motivan y me hacen seguir avanzando pese a las adversidades.

A todos muchas gracias.

NOMENCLATURA

Al-Si - Recubrimiento de aluminio y silicio.

BIW - Body in white (Estructura del vehículo)

DPH - Direct press hardening (Estampación en caliente directa)

FLC - Forming limit curve (Curva límite de conformado)

FLD - Forming limit diagram (Diagrama límite de conformado)

GSD - Generative Shape Design

HTC - Heat Transfer Coefficient (Coeficiente de transferencia de calor)

IPH - Indirect press hardening (Estampación en caliente indirecta)

TRB - Tailor roller blank (Formatos enrollados a medida)

TFM - Trabajo fin de máster

TWB - Tailor welded blank (Formatos soldados a medida)

UHSS - Ultra high strength steels (Acero ultra resistentes)

INDICE

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Planteamiento del trabajo	2
2	Estado del arte.....	3
2.1	Piezas fabricadas mediante estampación en caliente.....	3
2.2	Proceso de estampación.....	4
2.3	Proceso térmico detallado.....	5
2.4	Aceros para estampación en caliente	7
2.5	Hornos: Operación de calentamiento.....	11
2.6	Troqueles para estampación en caliente	14
2.7	Estampado y corte de formato: Prensas	17
2.8	Manipulación de formatos y piezas	18
2.9	Procesos auxiliares	18
2.10	Modelado y simulación.....	20
2.11	Conclusiones sobre el estado del arte	20
2.12	Lineas de investigación y nuevas técnicas	20
3	Planteamiento para el pre-diseño de un proceso convencional para un pilar-B y resultados.	25
3.1	Presentación del Pilar-B.....	25
3.2	Elección del material	26
3.3	Estudio de conformado, conceptos clave.....	27
3.4	Simulaciones del proceso de estampado en caliente	28
3.5	Detalles de formato	34
3.6	Dimensionado de la bobina.....	38
3.7	Dimensionado del horno	39
3.8	Selección y pre-dimensionado de las prensas	41
3.9	Operaciones de corte.....	42
4	Conclusiones	45
4.1	Resumen de los resultados.....	45
4.2	Principales aportaciones del autor del TFM	45
4.3	Sugerencia para trabajos futuros	46
5	Referencias.....	47
6	Anexos	¡Error! Marcador no definido.
7	Presupuesto.....	¡Error! Marcador no definido.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La estampación en caliente está resultando ser una gran herramienta para avanzar en uno de los objetivos prioritarios de la automoción en los últimos años; la reducción del peso, teniendo esta reducción, consecuencias directas en la disminución del consumo del automóvil (reducción emisiones de CO₂, aumento de la autonomía coche eléctricos). Con la estampación en caliente lograremos estos objetivos, pero sin reducir la seguridad de los ocupantes, ya que se producirán elementos con aceros de alta resistencia, que brindaran la capacidad resistente necesaria para resistir los impactos y seguir cumpliendo los requisitos de seguridad del ocupante. Estos aceros de alta resistencia son generalmente conocidos como por sus siglas en inglés UHSS (Ultra High Strenght Steel).

La estampación en caliente fue patentada en 1977, siendo en el año 1984 la primera vez que piezas fabricadas por estampación en caliente fueran incluidas en un automóvil, en concreto fueron montadas en el Saab 9000. Con estos datos se podría considerar que la estampación en caliente es una tecnología relativamente antigua, pero nada lejos de la realidad, los avances en esta tecnología siguen siendo continuados, y cada vez más componentes basados en esta tecnología son incluidos en los automóviles.

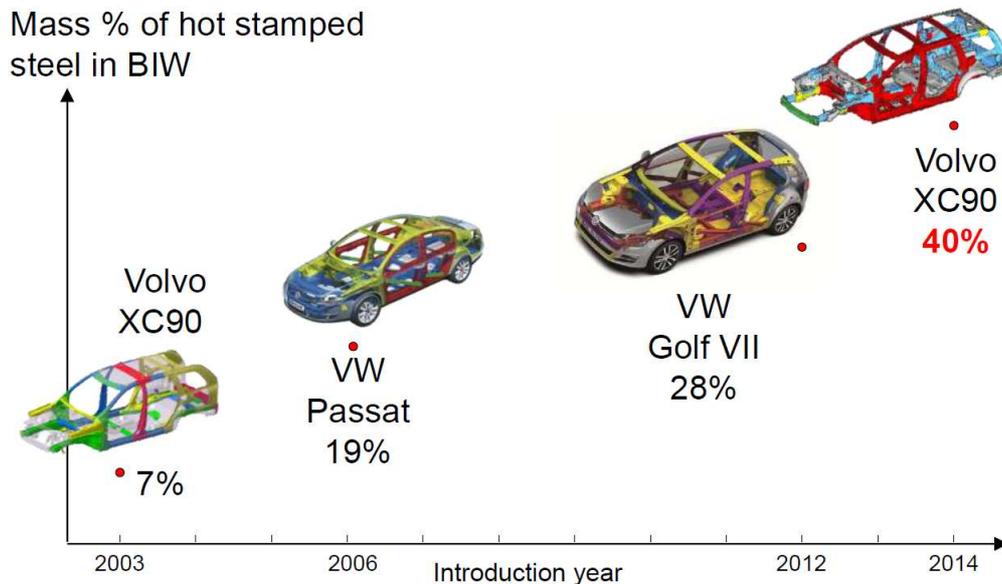


Ilustración 1. Evolución en la utilización de elemento fabricados mediante estampación en caliente. Billur,E [4]

La estampación en caliente nació como indica *Naderi [17]* para dar respuesta a la necesidad de usar aceros de alta resistencia para lograr los objetivos de reducción de peso comentados anteriormente, evitando los inconvenientes que resultan de trabajar con aceros de alta resistencias. Estos inconvenientes son la baja maleabilidad, alto "spring-back", y sobre todo alto impacto sobre la herramientas debido al gran desgaste ocasionado en la mismas.

1.2 Objetivos.

Con esta memoria se pretenden alcanzar dos objetivos prioritarios:

El primer objetivo, es realizar un análisis del estado del arte, que nos dará así una idea clara posible de las fases más críticas del proceso, mostrando los puntos donde se está centrando la investigación y el desarrollo actualmente.

De este análisis del estado del arte, se desprenderán las que serian en por experiencia, y en base a la documentación estudiada, las mejores prácticas que en la actualidad se deberían aplicar a un proceso

de estampación en caliente, para optimizar los resultados de la misma, tanto económicos, calidad, seguridad, etc.

El segundo objetivo, que se considera el más importante, será mostrar un método para el pre-diseño de un proceso de estampación en caliente. Se espera que este método de pre-diseño pueda servir de guía, para el desarrollo de otros procesos de fabricación de elementos mediante estampación en caliente.

Por último, se pretende presentar algunas herramientas para la evaluación de elementos fabricados en estampación en caliente.

1.3 Planteamiento del trabajo

Como he comentado en el apartado anterior, esta memoria va a tener dos partes principales.

Para el análisis del estado del arte, se estudiarán tanto artículos de investigación públicos facilitados por el catálogo de la Universidad de Valladolid, así como información pública facilitada por las páginas web de empresas punteras en el sector, además de otras fuentes de información públicas de diferente origen.

A partir de la análisis de estado de arte, se presentará un proceso ficticio creado para esta memoria, a partir de un pilar-B modelado en Catia V5.

Este proceso ficticio servirá para cumplir el segundo objetivo planteado, sirviendo así como guía.

El proceso ficticio estará basado, en el uso de la mejores prácticas contrastadas, hasta ahora conocidas, para la estampación en caliente.

Por otro lado, y para que el proceso no se quede puramente en un plano teórico, y se aleje de una orientación real y de mercado, el pilar-B modelado, será verificado por herramientas propia del sector de la estampación. Se intentará sacar el máximo partido que estas herramientas software ofrecen.

Estas herramientas propias del sector de la estampación como he comentado anteriormente son AutoForm, PampStamp, FastBlank, Blanknest y Prognest., evaluando lo que pueden aportar de una manera orientada al mercado optimizando el proceso.

2 Estado del arte

En este punto, basándonos principalmente en el artículo de *Karbasian [8]* que servirá ,tanto de guía, como fuente de conocimiento, se mostrara el estado del arte de la estampación en caliente de una manera profunda y actualizada, puesto que este artículo de revisión es del año 2010, en los momentos en los que se presenten aspectos que no aparezcan en la revisión realizada por *Karbasian [8]* se realizara especial hincapié.

Por otro lado, para facilitar la comprensión del lector y aplicación de los conocimiento aquí adquiridos, se realizaran referencias a nombres comerciales comúnmente usados en el mercado Español y Europeo para procesos de estampación en caliente.

Un análisis del estado del arte se basa en mostrar procesos contrastados y en uso. Para facilitar la organización del documento, en la parte final de este capítulo se indicaran las principales líneas de investigación, a nivel de laboratorio, que se están realizando actualmente, y están en pasos previos a su uso industrial.

2.1 *Piezas fabricadas mediante estampación en caliente*

Se aplican principalmente en elementos de alto requerimiento estructural, debido a las altas tensiones de rotura y alto límite elástico que se producen con la tecnología de la estampación en caliente. Permitiendo una reducción de peso de los elementos estructurales.

Un ejemplo clásico son los Pilares-B, que evitan la intrusión en caso de choque lateral, pero también se usan en otras zonas de gran rigidez, como Pilares C en coches de gran tamaño, taloneras, refuerzo de puerta, pilares A y otras muchas partes que requieran una limitada intrusión en el habitáculo. De manera resumida las partes típicas de utilización son las siguientes:

- Vigas de parachoques delantero/trasero;
- Refuerzos de puerta;
- Refuerzos de montante de vano;
- Refuerzos de pilar central;
- Refuerzo de suelo;
- Refuerzo de túnel;
- Refuerzo de salpicadero;

En la imagen siguiente se muestra un figura, con las partes señaladas de los elementos comúnmente fabricados mediante estampación en caliente, con acero de alta resistencia:

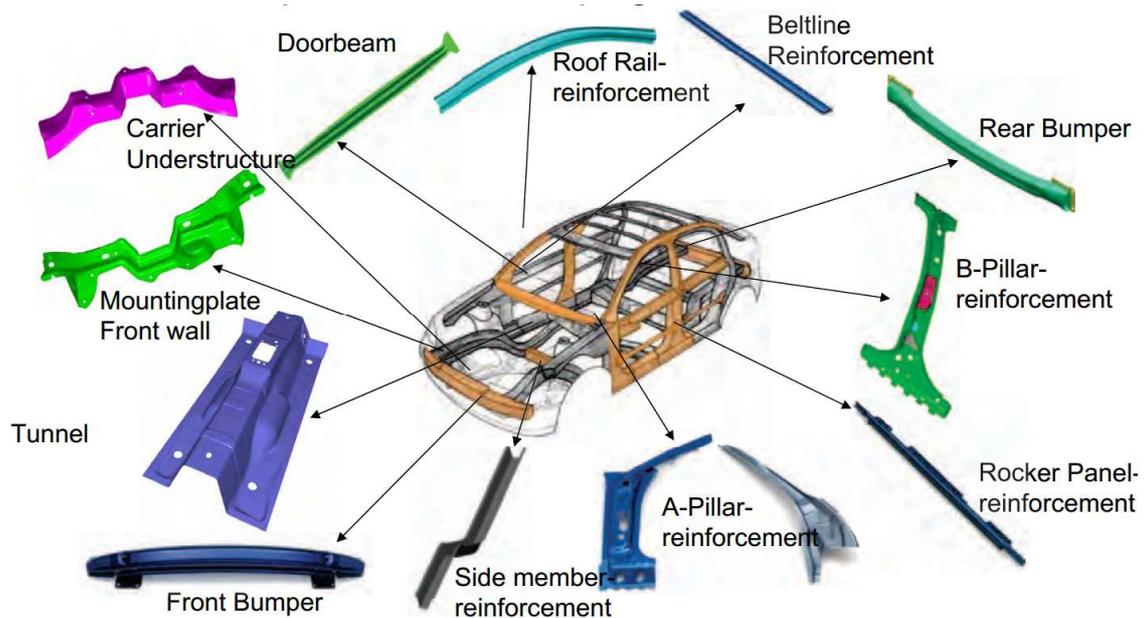


Ilustración 2. Representación grafica de la partes que actualmente, por sus características son candidatas a ser fabricadas mediante estampación en caliente.

En la actualidad debido a las propiedades a medida generadas con diversas técnicas, que posibilitan no solo puntos de extrema rigidez, sino también, la obtención de zonas de absorción de energía, pueden ser utilizadas en multitud de partes, si bien de momento todavía estas técnicas de obtención de partes a medida no están muy difundidas ni contrastadas, por eso y a pesar de no ser muy común, pueden ser encontradas piezas producidas mediante estampación en caliente en cualquier parte del vehículo, incluso piezas del chasis.

2.2 Proceso de estampación

La estampación en caliente, es un proceso bastante extenso en el que existen varias operaciones sobre el material, presentado generalmente en forma de bobina, la operaciones más críticas son estampación, calentamiento y templado.

De una manera general y a modo resumen un proceso de estampación en caliente se compone de los siguiente pasos:

Partiendo de una bobina del acero elegido:

- 1º Obtendremos los formatos mediante prensa.
- 1ºb. Pre-deformación en el caso de método indirecto.
- 2º Calentamos los formatos en el horno.
- 3º Estampamos/calibramos la pieza en caliente.
- 4º Templado de la pieza.
- 5º Operaciones de acabado (corte laser, granallado etc).

El orden de aplicación de las operaciones marca el primer punto de diferenciación, existen dos métodos generales para la estampación en caliente:

-Método directo: (Ilustración 3.) Generalmente referenciado como DPH. Tomado como base del método clásico. El formato es calentado en un horno hasta una temperatura de austenización de unos 900-950°C, durante un periodo de tiempo que oscila entre los 5 y 10 min (tiempo que variara en función de varios parámetros que se irán comentando en otros puntos), después de este calentamiento el formato es transportado de una manera rápida, para que no se pierda la temperatura, a un troquel

refrigerado, en este punto el formato caliente a unos 850°C tiene un límite elástico muy bajo, es decir una gran maleabilidad, permitiendo así la estampación de complejas formas en un solo golpe.

Los formatos son estampados con una presión concreta y refrigerados una vez que la forma deseada se ha logrado. Las tasas de enfriamiento oscilan entre los 30 y los 50 K/s. Desde la salida del horno hasta la apertura final de la prensa pasan entre 15 y 30 segundos.

Por último la pieza estampada sale del troquel a una temperatura de 150-200°C, con altas propiedades mecánicas buscadas con el proceso de hasta 1600 MPa de tensión de rotura y 1200 MPa de límite elástico. (Ver Ilustración 3.a)

-Método indirecto: En contraposición al método directo, en este método se realiza un estampado previo del formato, antes de realizar el calentamiento a temperatura de austenización. Es generalmente conocido por sus siglas en inglés IPH.

El estampado previo suele alcanzar un 90-95% de la forma final de la pieza estampada, este estampado se realiza en un troquel convencional.

La razón de la existencia de este paso intermedio según (Altan T, 2006) es la capacidad de estampar piezas extremadamente complejas, extendiendo la capacidad de deformación mediante el tratamiento térmico de las partes pre-deformadas. (Ver Ilustración 3.b.)

En la figura siguiente vemos esquemáticamente los dos métodos usados en la actualidad:

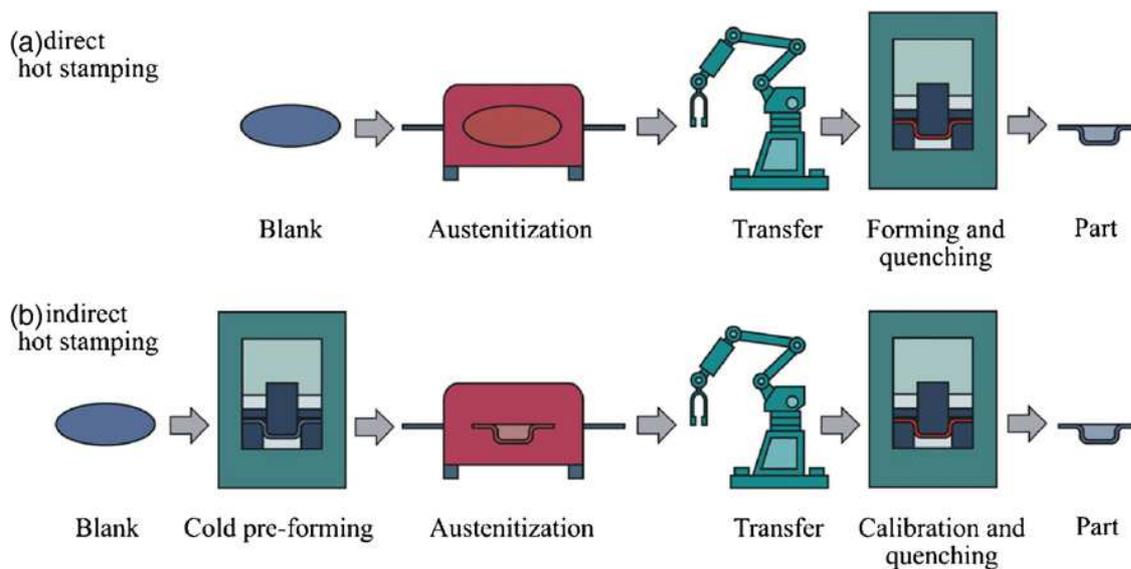


Ilustración 3. Esquemas de fabricación de piezas mediante estampación en caliente. (a) Método directo, (b) método indirecto.

2.3 Proceso térmico detallado

Para comprender mejor el proceso, presento el punto más representativo y uno de los puntos más críticos, de una manera más detallada, para poder así generar una visión más crítica del proceso, que capacite a la hora de poder plantear futuras mejoras del proceso global. Mediante el seguimiento del proceso térmico que sigue la parte a fabricar, el proceso de estampación en caliente queda muy bien definido.

Proceso térmico del material

Para ver de una manera más clara el proceso térmico que tiene lugar en el en una pieza de acero para estampación en caliente, la graficas puestas a continuación son de gran ayuda. En concreto la grafica (a) hace un gran resumen del proceso viendo como el proceso de autenticación dota al formato a estampar de una gran conformabilidad con poco esfuerzo, llevando por efecto del calor la resistencia

mecánica a valores inferiores a 200 MPa, el límite elástico llega a valores inferiores a 100 Mpa, lo que posibilita llevar a cabo la estampación en un solo paso de piezas de grandes dimensiones. Como es lógico el proceso de estampación en caliente debe realizarse en un solo paso, para evitar el enfriamiento de la pieza que incrementaría los esfuerzos tanto internos y residuales que quedarían en la pieza, como los ejercidos por la prensa de estampación.

Generalmente se parte de un formato de acero 22MnB5 con unas características bastante interesantes que lo hacen ideal para la estampación en caliente, razón por la cual es usado directamente sin tratamiento térmico para elementos estructurales en otros ámbitos de la industria, o para herramientas por sus buenas características intrínsecas.

El proceso de "cocción" es denominado austenización, porque el objetivo de la cocción es llevar al acero, por completo, a la fase de austenización, y luego vemos en la segunda línea denominada "Forming and Quenching" estampado y templado, llevado a cabo en el troquel refrigerado, que finalmente dotará a nuestra pieza de la característica buscada, gran resistencia, característica ideal en las partes altas de un pilar B para evitar la intrusión.

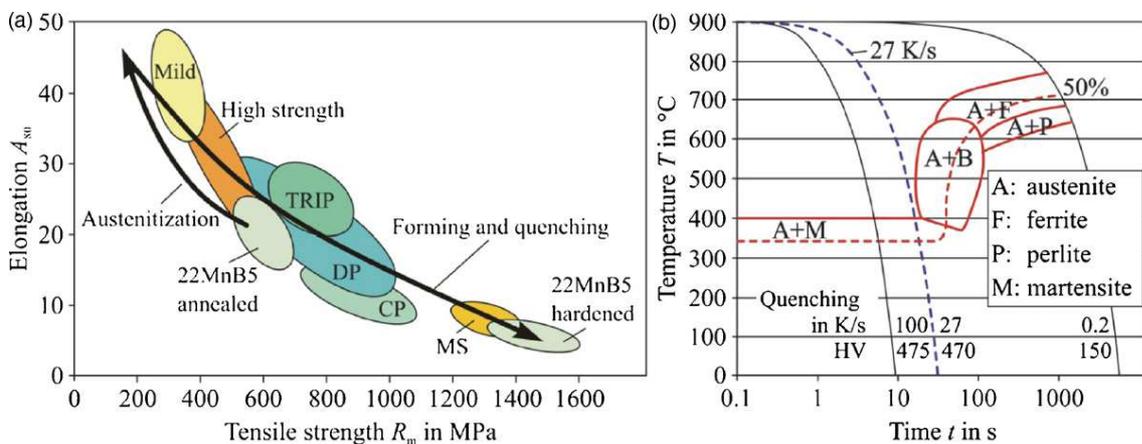


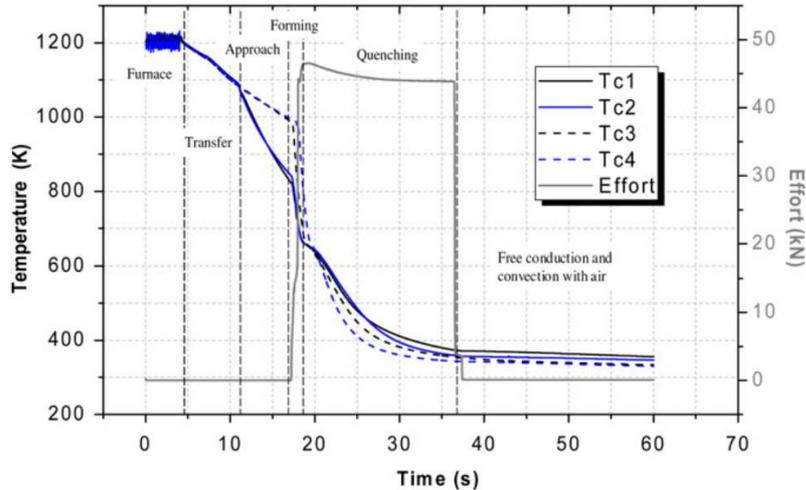
Ilustración 4 En la grafica (b) se puede realizar un análisis previo de la microestructura obtenida durante el proceso de templado, se busca una estructura martensítica la cual se obtiene de manera casi completa con la velocidad de enfriamiento adecuada. Mechanical properties of 22MnB5 and CCT diagram (Garcia Aranda [6])

En los gráficos anteriores podemos ver como la velocidad de enfriamiento adecuada para obtener la una estructura martensítica es de unos 27 k/s, pero como indican mucho estudios como *Mun DJ*[16] y otro mucho autores que hacen referencia a la velocidad optima de enfriamiento esta dependerá principalmente de:

- Temperatura de austenización
- Historial de deformación

A modo resumen como lo describe el proceso *Abdubhay B* [1]. El proceso estándar consiste en el calentamiento del formato en el horno hasta los 900-950 °C durante unos 5 o 10 minutos dependiendo del espesor. Transferencia del mismo a la mesa de estampado enfriamiento (en este caso el autor apunta hacia velocidades de enfriamiento superiores a los 30 k/s . Con la herramienta de estampado cerrada durante aproximadamente 20 s. La herramienta de estampado esta generalmente refrigerada por agua.

Cabe destacar que la temperatura de 900°C como señala *Mun DJ* [16] está considerada el límite para evitar el desequilibrio en la disgregación del boro en la matriz que empeoraría los resultados finales, como señala es su conclusiones.



Gráfica 1. Gráfica resumen. Tiempos y temperaturas típicas para un proceso de estampación en caliente, desde su salida del horno, hasta la parte final de templado.

2.4 Aceros para estampación en caliente

Los aceros más usados para la fabricación de piezas mediante estampación en caliente, son; el 22MnB5 y el Usibor 1500P®, siendo el Usibor un acero 22MnB5 pero con revestimiento con base de aluminio, más adelante entraremos en la necesidad de este revestimiento o "coating".

Usibor 1500P® es el nombre comercial usado por ArcelorMittal.

ThyssenKrupp también ofrece aceros para estampación el correspondiente 22MnB5 es denominado MBW 1500.

ArcelorMittal fue pionera en la oferta de aceros para estampación en caliente con recubrimiento, siendo el recubrimiento un factor importante a tener en cuenta a la hora de elegir el proceso

Existe más variedad de aceros específicos para estampación en caliente, como vemos en la tabla presentada a continuación presentada por *Naderi [17]*, en la que podemos ver los aleantes principales que forman los aceros. Llama la atención la resistencia mecánica del acero 37MnB4, que alcanza los 2040 MPa, además de tener una tasa de enfriamiento muy baja, en ocasiones también es usado para la fabricación de piezas para automóvil, pero presenta peores características respecto a la soldabilidad que el 22MnB5 y el 20MnB5.

Tabla 1. Acero al boro típicamente usados en automoción

Steel	Al	B	C	Cr	Mn	N	Ni	Si	Ti
20MnB5	0.04	0.001	0.16	0.23	1.05	-	0.01	0.40	0.034
22MnB5	0.03	0.002	0.23	0.16	1.18	0.005	0.12	0.22	0.040
8MnCrB3	0.05	0.002	0.07	0.37	0.75	0.006	0.01	0.21	0.048
27MnCrB5	0.03	0.002	0.25	0.34	1.24	0.004	0.01	0.21	0.042
37MnB4	0.03	0.001	0.33	0.19	0.81	0.006	0.02	0.31	0.046

Steel	Martensite start temperature in °C	Critical cooling rate in K/s	Yield stress in MPa		Tensile strength in MPa	
			As delivered	Hot stamped	As delivered	Hot stamped
20MnB5	450	30	505	967	637	1354
22MnB5	410	27	457	1010	608	1478
8MnCrB3	-	-	447	751	520	882
27MnCrB5	400	20	478	1097	638	1611
37MnB4	350	14	580	1378	810	2040

Como podemos ver en estos aceros para estampación en caliente, el boro y el manganeso son los grandes protagonistas para conseguir acero ideales para estampación en caliente, sin entrar en profundidad, el boro como muestra *Karbasian,H [8]* reportan una mejora de la dureza final ya que ralentiza los procesos de transformación de fase originados térmicamente, que generaría compuestos más blandos e.g ferrita y perlita, posibilitando así más porcentaje de martensita en el acero templado.

El manganeso y el cromo también mejora la el endurecimiento final pero de manera no tan acusada como el boro.

Por todo esto los acero para estampación en caliente son denominados habitualmente "Boron-steel" o aceros al boro.

Aceros a medida

Además de estos aceros "típicos" para estampación en caliente, no dejan de aparecer nuevos productos en el mercado como por ejemplo Ductibor® 500 también de la compañía Accerlor Mittal, pensado en la asociación con materiales más rígidos como los mencionados anteriormente, y así mediante técnicas como el TWB (Tailored Welded Blank) se podrán obtener formatos soldados mediante laser con propiedades localmente más blandas, como indica *Karbasian H [8]* las zonas de soldadura generaran problemas, que habrá que valorar consecuentemente, como la necesidad de limpiar los posibles recubrimientos, las variaciones de conformabilidad de la zona etc.

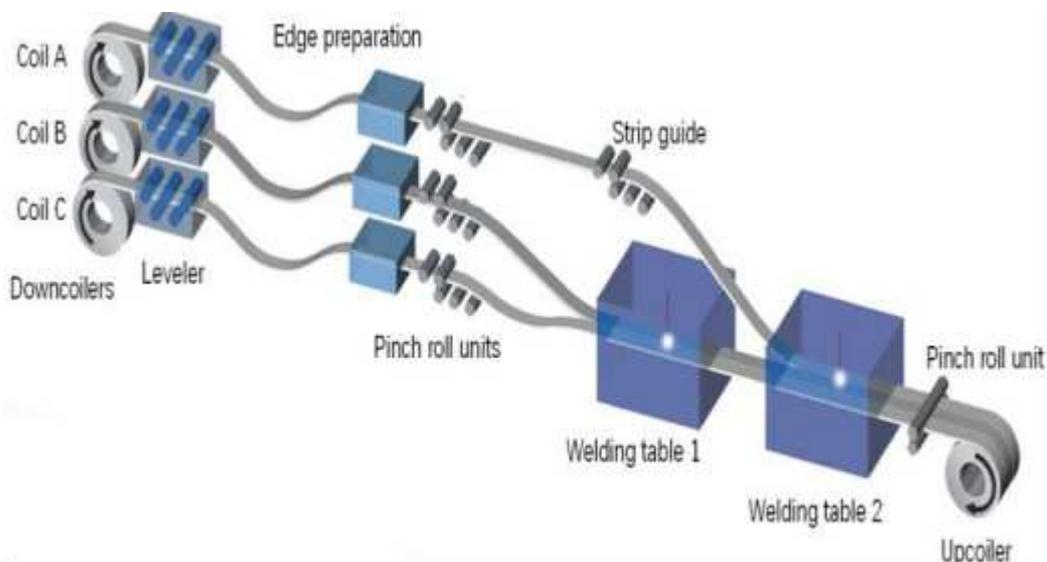


Ilustración 5 Esquema de línea para la fabricación de bobinas TWB, bobinas compuestas por diferentes materiales soldados entre si.

Otra forma de presentar el acero para estampación en caliente es el TRB (Tailor rolled blanks) un método que llama especialmente la atención por su sencillez, la poca información sobre esta técnica para estampación en caliente la encontramos en la presentación *Michael Rehse [13]* ingeniero de Mubea empresa puntera en la oferta de TRB. En definitiva este método, consiste en crear formatos de espesor variable, que luego se estamparan en caliente. Una de las primeras apariciones de este método para estampación en caliente fue en el Detroit motor show 2010. Por lo que estamos hablando de una tecnología muy reciente.

Los TRB son obtenidos directamente de un proceso de cambio de grosor, mediante rodets realizando un segundo bobinado con estas características deseadas de espesor. En el diagrama explicativo que podemos ver en los anexos se percibe más claramente el proceso completo:

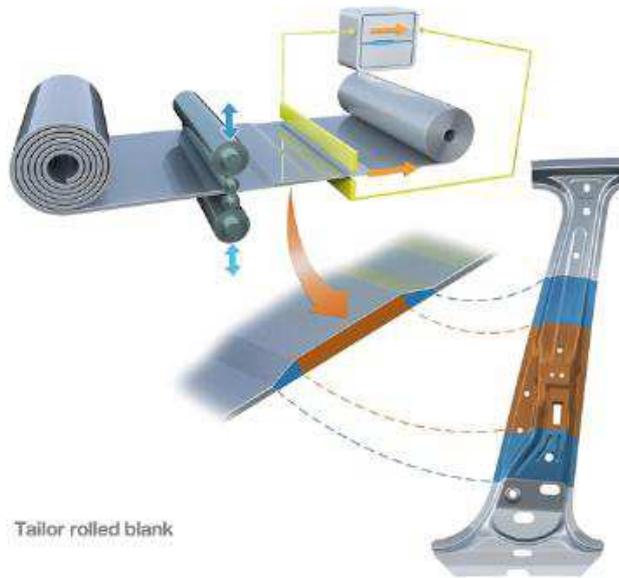


Ilustración 6. *Proceso esquemático de fabricación mediante TRB*

En la siguiente imagen vemos como la técnica TRB se integraría con un método clásico directo de estampación en caliente en colaboración con la empresa Benteler una de la pioneras en estampación en caliente a gran escala.

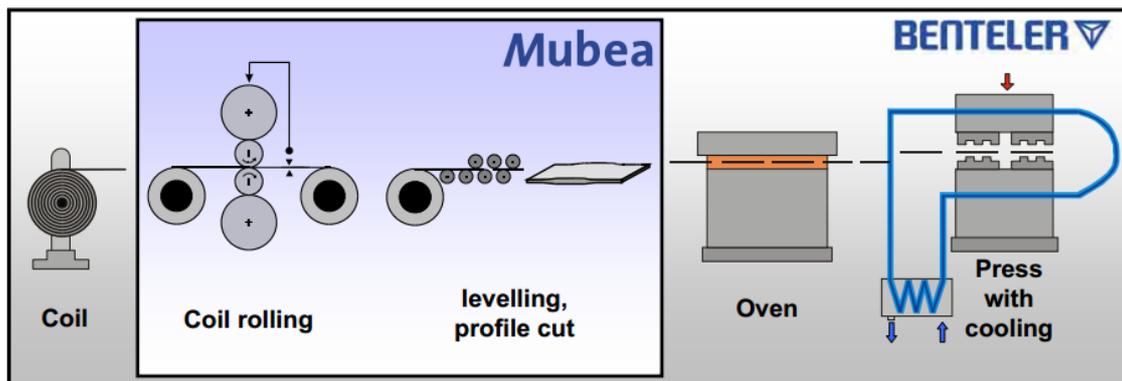


Ilustración 7 . *Proceso de fabricación completa mediante TRB*

Las ventajas y características de este método así como los publicita Mubea y Benteler en presentaciones públicas son las siguientes:

- Ajuste local del comportamiento
- Reducción de peso mediante el ajuste del espesor
- Reducción de los componentes
- Menor coste por parte y en inversión de utillajes
- Mejor comportamiento ante el impacto.

De manera cuantitativa como es fácil imaginar con esta variación de espesores, conseguiremos algunas ventajas al poder ajustar el diseño del elemento a fabricar de una manera más fina. Según Mubea proveedor destacado de TRB las ventajas cuantitativas y cualitativas de esta tecnología son:

- Reducción de más de un 20% por parte
- Reducción de hasta 15 kg por vehículo

- Alta tasa de utilización de material >60%
- Mayor libertad para el diseño de componentes
- La cantidad de variaciones de espesor no afecta al coste

Recubrimiento o "coating"

Para un acero 22MnB5, típicamente usado en estampación en caliente y sin recubrimiento, el hecho de alcanzar la temperatura de austenización, provoca una inmediata oxidación de la capa superficial del mismo. La capa de oxido es conocida como cascarilla, siendo necesaria la eliminación de la misma mediante granallado.

La capa de oxido impediría operaciones subsiguientes necesarias como el pintado, corte o soldado.

En la actualidad existen dos métodos para evitar la oxidación, el primero prácticamente inviable sería realizar el calentamiento de la pieza dentro de una atmosfera controlada, prácticamente inviable para la aplicación industrial. El segundo método sería el uso de recubrimientos, que eviten esta oxidación, con el consecuente aumento de precio del material en bruto, no solo por el material sino por el proceso de aplicación y algunas otras desventajas que iremos comentado.

El recubrimiento para el acero más usado, el 22MnB5, es el Al-Si, este recubrimiento acaba de adherirse al material mediante el calentamiento en horno a temperatura de austenización, por lo que no es adecuado para procesos indirecto de estampación. Existe un proceso de difusión necesario para que los recubrimientos Al-Si sean efectivos, por ellos los tiempos de calentamiento deben ser mayores para aceros con recubrimiento que para aceros sin recubrimiento. En este proceso de difusión se genera una capa Al-Si-Fe mediante difusión, como la que podemos apreciar en las microfía expuesta a continuación:

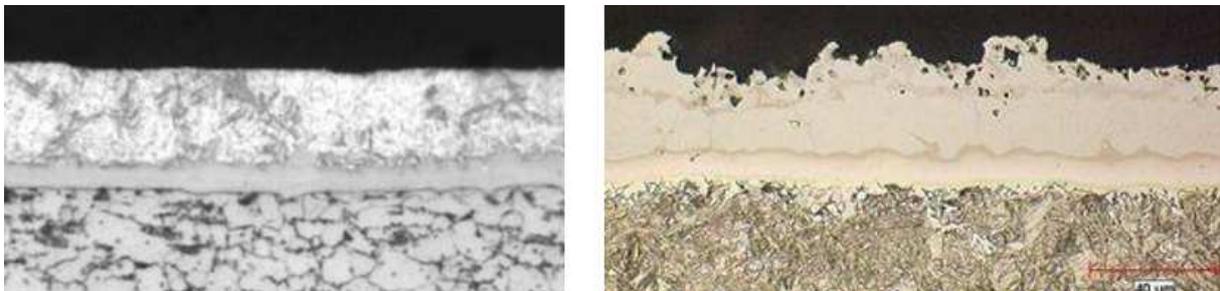


Ilustración 8. Micrografía de acero usibor donde se aprecia la interfase Al-Si-Fe. Izq antes de estampar en caliente. Drch Después del estampado en caliente

El acero Usibor® (22MnB5 + Al-Si) no puede ser utilizado en proceso de estampación indirecta, ya que la baja capacidad de deformación del recubrimiento de Al-Si sin difundir con el metal provocaría una fractura de este recubrimiento, exponiendo zonas a la oxidación.

Esta capa final de Al-Si-Fe no otorga al metal una protección catódica, es decir este recubrimiento no exime la utilización de protección contra la corrosión galvánica.

Las compañías acereras como Arcelor Mittal ofrecen otro tipo de recubrimiento, específicos según el método necesario para la fabricación, son:

- Usibor® 1500-GI galvanizado Zn (únicamente para proceso de embutición indirecta).
- Usibor® 1500-GA galvannealed ZnFe (para procesos directo e indirecto).
- X-tec , un lubricante que además de evitar la oxidación facilita la estampación, da problemas para el corte y la soldadura. Se están proponiendo evoluciones de este material que evitan estos problemas, puede ser el recubrimiento por excelencia en los próximos años.

Presentación de Material

Un aspecto a tener en cuenta es la forma en la que se presenta el material, generalmente salvo casos excepcionales si bien es cierto cada vez menos excepcionales de los cuales hablaremos en otro punto, el acero para estampación en caliente se presenta en bobinas de grandes dimensiones. (Ver Anexos oferta de bobinas ThyssenKrupp).

Los espesores del material bobina para aceros estampados en caliente, se mueven entre 1 y 2,5mm, tanto las anchuras como los diámetros se mueven en grandes rangos para lograr los máximos aprovechamientos de material y el correcto ajuste de lotes. Para orientar al lector sobre el orden que nos movemos, las anchuras pueden ir de 0.5 a 2 metros, y los diámetros exteriores de las bobinas desde 1,5 a 2.5 metros.

Estas bobinas son cargadas en devanadoras, que tienen unas especificaciones en cuanto a peso máximo y diámetros soportados tanto interior como exterior, a los que se atienden para cargar las devanadoras que abastecerán de acero de manera constante a las prensas, donde se realizará el corte del formato o "blank".

Una bobina típica para la estampación en caliente de pilar-B puede rondar el peso de unas 12.000 a 16.000 Kg.

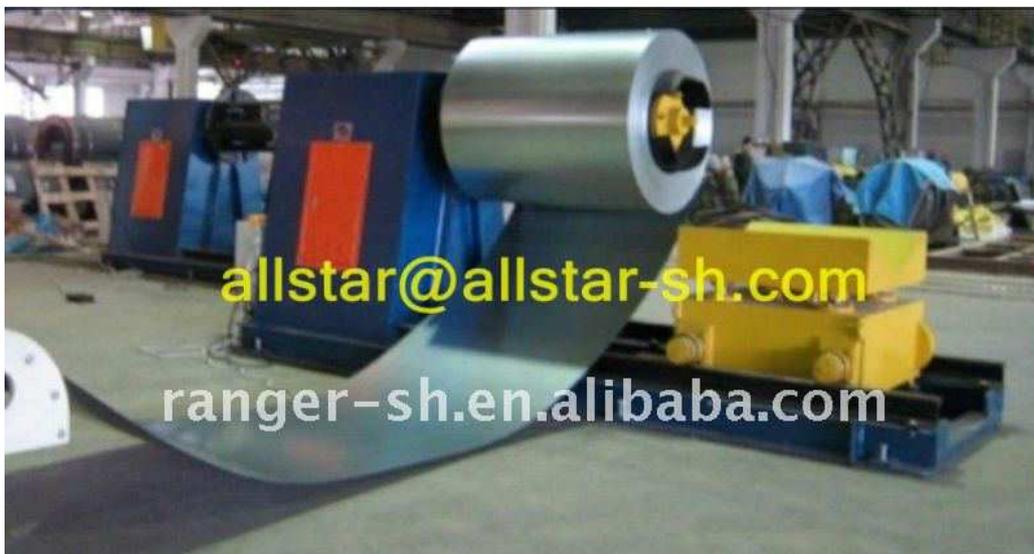


Ilustración 9. Bobina de tamaño medio cargada en devanadora

2.5 Hornos: Operación de calentamiento

El calentamiento a temperatura de austenización es una de las partes más críticas del proceso, en la actualidad existen tres posibilidades a la hora de lograr esas altas temperaturas, que son; calentamiento mediante convección, conducción eléctrica e inducción.

Calentamiento mediante convección

Es la técnica de calentamiento más expandida por su versatilidad y sencillez, pero posee grandes desventajas, como la lentitud del calentamiento (cuello de botella del proceso global), enorme espacio utilizado y por último, baja eficiencia energética.

Los hornos más expandidos en la actualidad son los hornos lineales (ver imagen), son hornos de grandes dimensiones alimentados generalmente por combustible fósil o de manera menos habitual con resistencia eléctrica, son hornos de gran tamaño, entre 15m y 30m y unos 3m o 4m de ancho.



Ilustración 10. Horno de calentamiento por convección lineal. Roller Hearth Furnace(13,5m).

Dentro del calentamiento por convección existen otras variedades, que no son lineales, con intención de optimizar el espacio ocupado. En el mercado podemos encontrar oferta para hornos denominado Double Decker, que son dos líneas superpuestas y las denominadas MultiChamber.



Ilustración 11. Izq: Horno de convección double decker, drch: Multi chamber.

Es fácil ver que a costa de la optimización del espacio ocupado, estas opciones suponen grandes inconvenientes a la hora del manipulado de los formatos, empeorando tanto el tiempo de manipulación de los formatos desde que sale del horno hasta el troquel, y también supone una mayor compilación en los sistemas automáticos para el movimiento de los formatos.

Por último comentar una última opción; hornos circulares, los cuales logran una optimización importante del espacio pero generan problemas a la hora de ajustar los ciclos, estos hornos según señala Schuler (Importante fabricante de hornos) también permiten usar una única unidad para la carga y descarga de formatos.

A continuación se muestran unos tiempos típicos de calentamiento de formato en horno convencional hasta temperatura de autenticación típicos para un acero 22MnB5 para obtener la dureza de 470 HV, recordar que los recubrimientos pueden variar estos tiempos típicos.

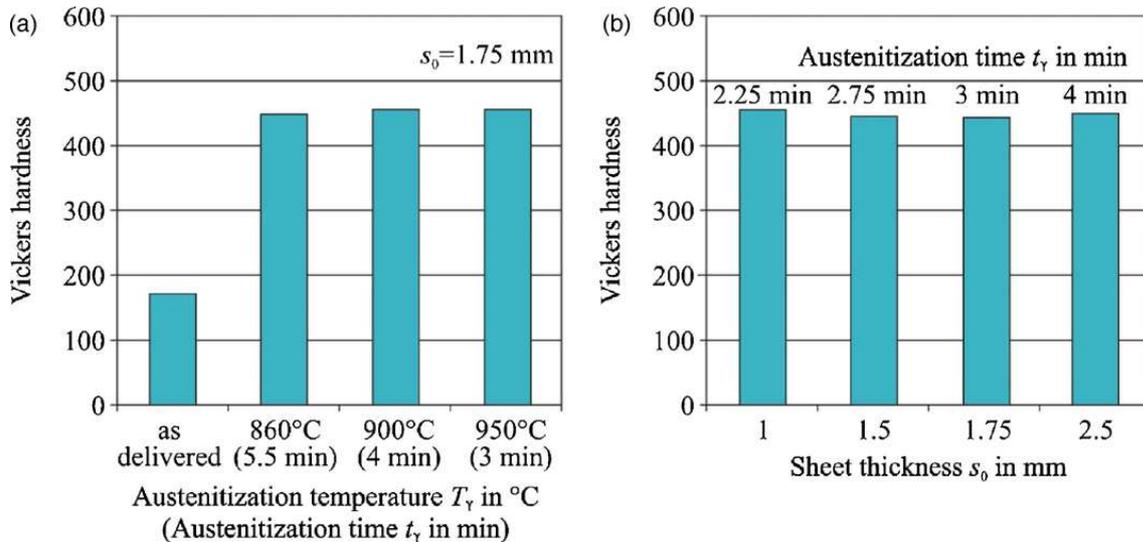


Ilustración 12. Lechler [12] Temperatura y tiempos típicos para la obtención de una dureza final de 470 HV.

Es importante señalar que este método de calentamiento genera un alto gasto energético debido a la pérdidas de calor de la maquinaria en el escape de gases a alta temperatura, penalizando el proceso tanto económicamente como medioambientalmente.

Por todo lo comentado anteriormente y a pesar de ser actualmente el método indiscutiblemente más usado, todo apunta a que dará paso a tecnologías de calentamiento de formatos que se comentan continuación, más rápidas y medioambientalmente más sostenibles.

Calentamiento mediante inducción

Como nos presenta *Kolleck* [9] la tecnología de calentamiento mediante inducción, es muy usada en mucho ámbitos de la industria. Como en todo los procesos que se usa el calentamiento por inducción, la mayor ventaja es la velocidad de calentamiento, que es muy alta en comparación el calentamiento mediante otros métodos más tradicionales como la convección.

El sistema de calentamiento mediante inducción está compuesto por un generador de corriente de alta frecuencia y una bobina inductora. Existen varios método para el calentamiento de los formatos, principalmente determinados por la forma y la colocación del inductor, como se muestran a continuación:

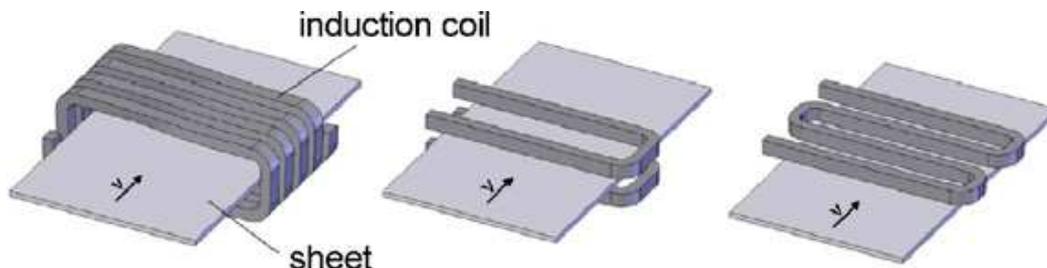


Ilustración 13. Método de aplicación de inducción, por orden; Longitudinal, transversal y en cara.

Para acero sin recubrimiento en los que los procesos de difusión no sean necesarios, se puede alcanzar velocidad de calentamiento realmente altas, llegando incluso a bajar de los 30 segundos. Los rendimientos energéticos de de este método de calentamiento oscilan entre un 60% y un 90%.

Esta tecnología muestra mucho potencial, pero la limitación de no poder usar algunos recubrimientos muy extendidos como el Al-Si limitan su uso ya que reducen mucho su versatilidad.

Quizás no sería inviable plantear la utilización de atmósferas protectoras para estos hornos debido a sus reducidas dimensiones para aplicaciones industriales. No se han encontrado planteamiento de este tipo en las referencias consultadas.

Calentamiento mediante resistencia

Para calentar formatos como muestra *Mori K [15]* el formato es pinzado en sus extremos por unos electrodos, consiguiendo que una potente corriente eléctrica lo recorra, calentando el formato mediante efecto Joule hasta temperaturas de austenización.

Con este método se logra conseguir una temperatura de 800°C en menos de 3 segundo, permitiendo incluso una sincronización con la prensa como muestra el autor en la siguiente imagen, la simbiosis perfecta se consigue con el uso de servo prensas que permiten rápidas reacciones y un gran control de la posición.

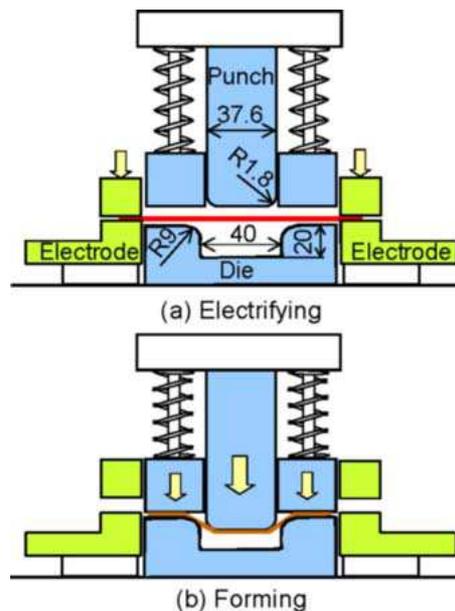


Ilustración 14. Calentamiento mediante resistencia, sincronizado con el estampado en caliente.

Grandes inconvenientes de esta tecnología son la distribución no homogénea de la temperatura, y la difícil aplicación de este tipo de calentamiento para geometrías complejas, lo cual limita su utilidad a pesar de tener una excelente eficiencia energética y bajos coste de inversión, que permiten una gran reducción de costes de fabricación en comparación con otras tecnologías.

2.6 Troqueles para estampación en caliente

Todo lo relacionado con los troqueles es muy crítico para la estampación en caliente. Están expuestos a condiciones muy extremas de trabajo, recibiendo altos impactos térmico, con relativamente altas velocidad de trabajo. Además, es mediante los troqueles como se realiza el templado de la pieza con altas velocidades de enfriamiento.

Los troqueles para estampación en caliente tienen conductos por los que circula agua, de tal manera que la velocidad de enfriamiento pueda ser controlada. Deben tener un diseño muy bueno para lograr una buena repetitibilidad en los elementos fabricados.

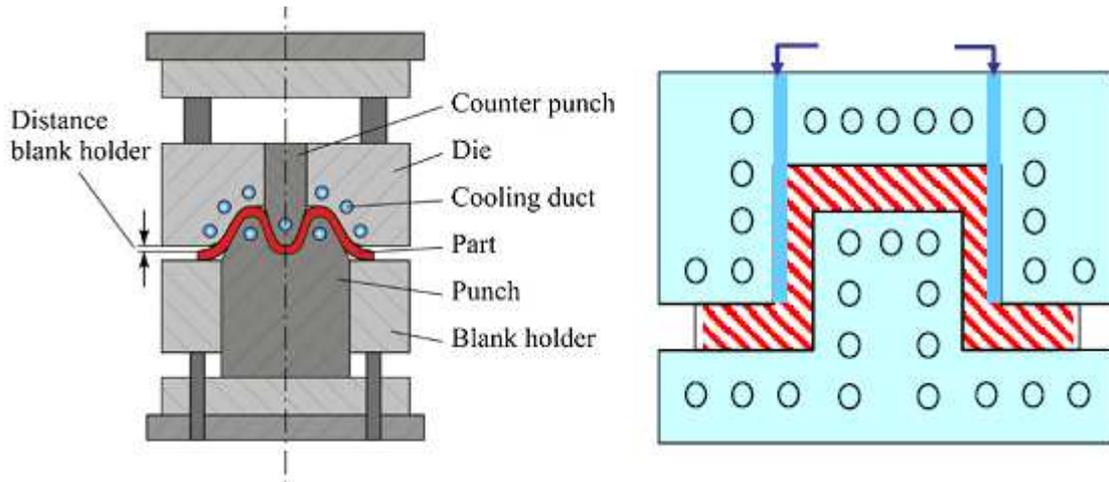


Ilustración 15. Izq troquel conductos de refrigeración. Drch refrigeración por conductos sumada a la refrigeración por aplicación directa de agua.

Un aspecto muy importante como se muestra en *Ghiotti [10]*, es el desgaste de los troqueles, debido a la cargas de trabajo comentadas anteriormente, principalmente caracterizadas por una variación de la herramienta tanto por adhesión como por abrasión. Muchos investigadores y empresas del sector están proponiendo continuamente soluciones para este aspecto, así como nuevos modelos de predicción de fallos y desajuste de los mismo, para optimizar las operaciones de mantenimiento.

Refrigeración a medida

Técnicas de refrigeración a medida *George [7]* vienen siendo aplicadas en los últimos años, por posibilitar una manera sencilla de crear partes con comportamiento a medida dentro del elemento estampado.

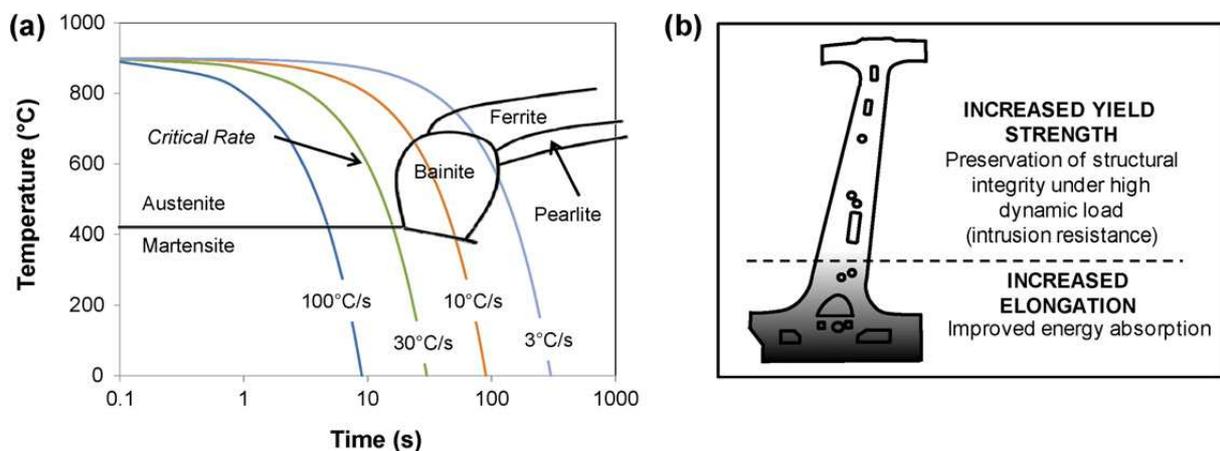


Ilustración 16. Creación de piezas con características mecánicas a medida mediante el control de la velocidad de enfriamiento.

Esta refrigeración a medida se puede lograr usando gran variedad de técnicas, de manera común la refrigeración a medida se realiza calentado las zonas del troquel en los que se desea una menor tasa de enfriamiento. Este calentamiento se realiza mediante resistencias eléctricas embebidas en el troquel. En el esquema mostrado a continuación se pueden ver la disposición de los calentadores, así como las temperaturas deseadas en cada parte del troquel, también podemos ver una pequeña cámara de aire para aislar la zona de diferente temperatura.

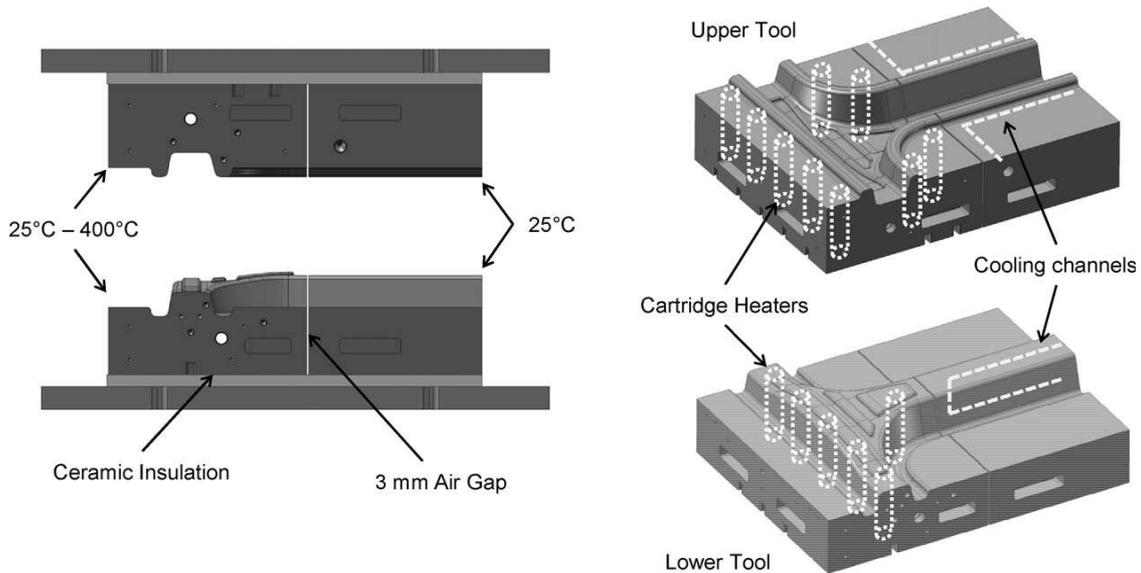


Ilustración 17. Esquema de fabricación de un troquel para enfriamiento a medida.

Conductividad a medida

Se presenta otra técnica también interesante para lograr propiedades a medida mediante el control de la velocidad de enfriamiento Casas [5], el control de la tasa de enfriamiento mediante el la variación de la conductividades.

Se puede lograr una variación de la conductividad térmica en los troqueles mediante la utilización de diferentes tratamientos térmicos. En un mismo troquel pueden producirse variaciones desde 7KW/mK hasta 66KW/mK. Con estas increíble conductividades podríamos reducir de una manera sencilla los tiempos de templado hasta los 2 s.

Es una técnica de momento en un estado de desarrollo muy precario, que necesita más investigación. Existe muy poca información disponible sobre esta técnica.

De manera general comentar que la conductividad térmica conocida como HTC depende en gran medida de la presión de contacto. Como vemos en la gráfica a continuación.

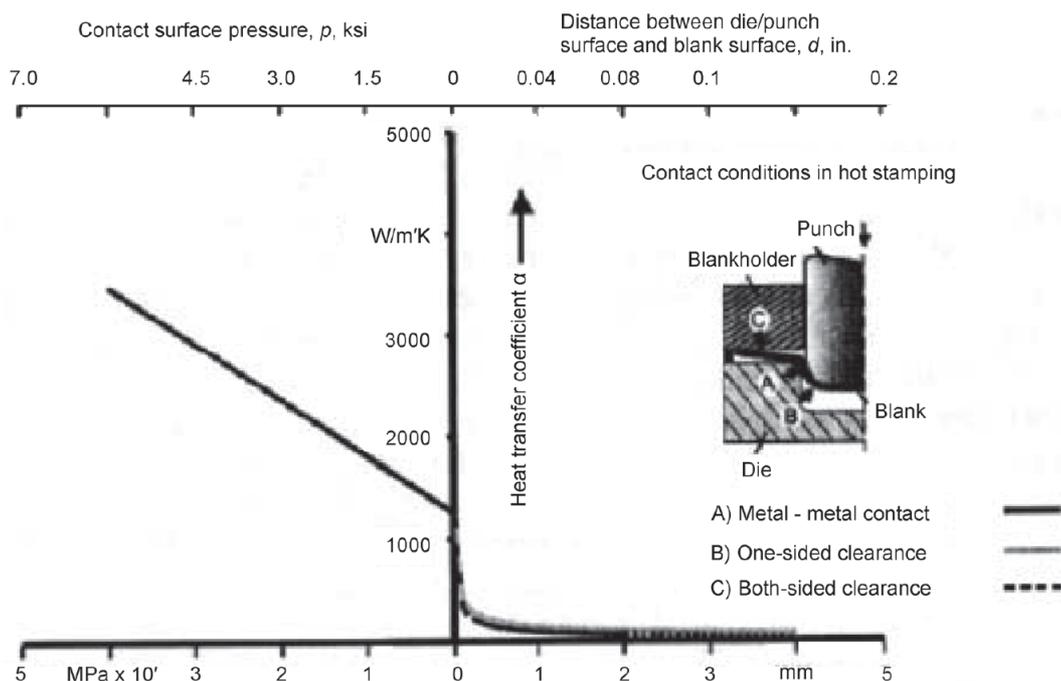


Ilustración 18. Dependencia de la conductividad térmica en relación con la presión de contacto.

2.7 Estampado y corte de formato: Prensas

Como hemos visto anteriormente, en el proceso global de estampación en caliente se usan dos prensas, generalmente, para operaciones de corte tradicionalmente se usan prensas mecánicas y para la operación de estampado en caliente, al ser un proceso que debe estar altamente controlado, usaremos prensas que ofrezcan mayor control, como la prensa hidráulicas o servo prensas.

El rasgo distintivos de la prensas clásicas mecánicas es que constan de un gran volante de inercia, y tradicionalmente se dividen en los grupos que muestra la siguiente imagen:

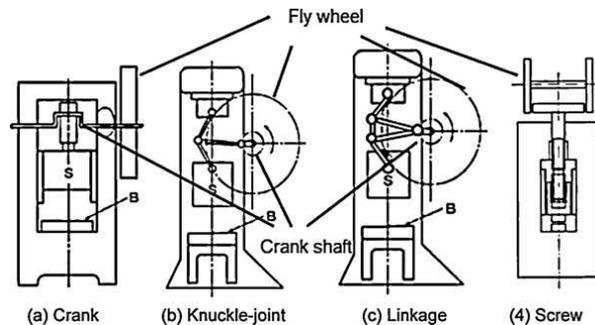
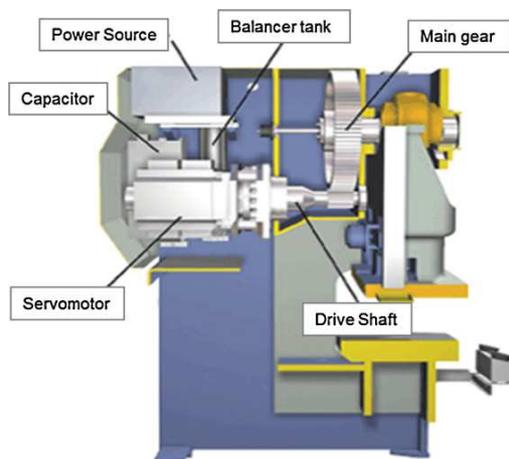


Ilustración 19 Tipos de prensa mecánica.

Las características diferenciadoras de la prensas mecánicas de volante de inercia, era su buena velocidad, en contraste con la poca capacidad de posicionamiento ni control de la fuerza. De ahí que surgiera la necesidad de uso de prensas accionadas hidráulicamente que ofrecen una gran capacidad de posicionamiento, factor muy importante para la estampación en caliente. Por otra lado las prensas hidráulicas nos generan buenas velocidad de desplazamiento, de ahí que se siga avanzado mucho en este campo.

En los últimos años *Osakada [20]* se están empezando a usar cada vez una manera más generalizada las servo prensas. Debido a sus características ofrecen una alternativa tanto para la obtención de formatos como para el estampado en caliente, ya que suple las carencias de la prensas mecánicas e hidráulicas, igualando e incluso mejorando sus puntos fuertes. Alguna de esta características son:

- Control total sobre el movimiento
- Mayor velocidad
- Reducción de vibración
- Menor desgaste de utilajes (reducción de velocidad en momento de impacto)



Existen multitud de servo-prensas, en muchos casos se optan por prensa híbrida, mezclando servo prensa con conceptos hidráulicos.

En definitiva, se espera que el uso de servo prensa se generalice en los próximos años.

Las piezas de estampación en caliente suelen ser piezas grandes, por tanto, para la operación de corte como para la de estampado usaremos prensa de gran tonelaje más de 1500 Tn, con un gran espacio de mesa para la colocación de los troqueles.

2.8 Manipulación de formatos y piezas

Como en casi todos los procesos de la automoción en la estampación en caliente se tiende a la automatización total del proceso, pero en este proceso en concreto esta automatización es imprescindible ya que estamos tratando con elementos a alta temperatura, así pues tanto el abastecimiento del horno, la colocación de la piezas en el horno y la extracción de la misma es realizada por robot, con diferente tipo de pinzas (transfer, succión...).

Se está tendiendo a integrar los procesos anteriores y posteriores para evitar el trasiego de piezas desde el corte a las operaciones auxiliares como corte laser, pero no es muy común ya que se pierde versatilidad en las líneas.



Ilustración 20 Línea integral para estampación en caliente.

2.9 Procesos auxiliares

De la propia estampación en caliente salen elementos semi-terminados, a falta de las operaciones de acabado, que dependiendo del material pueden incluir operaciones de acabado superficial como granallado, y casi siempre e independientemente del material operaciones finales de corte, generalmente de corte laser. Para la realización de agujeros y ajuste de tolerancias de los bordes.

A pesar de existir, como en la estampación tradicional, la opción de incluir en el proceso de estampado la realización de agujeros, las especiales condiciones de calor producirían un rápido desgaste de los punzones o troqueles necesarios, por ello el corte laser está estrechamente asociado a la estampación en caliente, aunque existen otras opciones que veremos a continuación.

Corte de geometría

Sobre todo se recortan geometrías interiores, porque es común que las partes externas del formato sea cortadas durante el proceso de estampado aprovechando el calor de formato para facilitar esta labor. Este tipo de corte genera un gran desgaste y es poco preciso, también se recortaran geometrías exteriores en busca de buenos ajustes de tolerancia.

Laser

El corte laser como ya se ha comentado va íntimamente ligado a la estampación en caliente.

El corte laser no deja de avanzar, y de momento se considera una parte imprescindible para acabar el proceso. Se trata de una maquinaria que requiere una alta inversión y en ocasiones puede ser necesario el corte de mucha longitud por lo que el mercado lleva ofreciendo evoluciones que mejoran la velocidad de corte constante, existen diversos tipos de laser con diferente penetración en el mercado, los más importantes en la actualidad son:

- El laser CO₂, Menor inversión, baja velocidad de corte.
- Fiber Laser o Solid State Laser, más moderno, muy alta velocidad de corte con alto coste de inversión.

En ambos casos la velocidad de corte se ve limitada por la geometría, el espesor y el material (con o sin recubrimiento), también habrá que tener en cuenta si el laser se coloca sobre un robot de múltiples ejes, que permitirá el corte de geometrías complicadas a no muy alta velocidad y con mayores

tolerancias, o corte mediante sujeción en portal (guiado por raíles), menos versátil, pero mayor velocidad.



Ilustración 21. Izq Laser sobre portal. Drch laser sobre robot de 6 ejes.

Corte duro

Existe la posibilidad de realizar corte en la pieza una vez templada, mediante la introducción de la misma en una prensa, otorgando este proceso de corte de una gran velocidad. La gran dureza de la pieza templada causará un gran desgaste de las herramientas usadas. También se ha demostrado que *Lara [10]* el propio proceso de corte genera grandes fisuras aunque se haga un corte de alta calidad, debido a que las imperfecciones son muy acusadas en aceros templados, generando alta propagación de los defectos y creando zonas muy susceptibles a la fatiga.

Granallado

El granallado, más conocido por su nombre en inglés "shot peening", es un paso imprescindible en el caso de usar 22MnB5 sin atmósfera protectora o recubrimiento que impida la creación de la cascarrilla, generada por la inmediata oxidación del acero a temperatura de austenización. Esta cascarrilla originaría una mala adherencia en el proceso de pintado posterior.

El granallado es un tratamiento superficial, que consiste en proyectar esferas a gran velocidad contra la pieza a granallar.

En ocasiones también es necesario granallar para eliminar algunos recubrimientos especiales que mejoran las características del acero después de la difusión mediante calentamiento, como el recubrimiento X-Tec. (*Karbasian [8]*)

Pintado

En un último punto previo a su montaje, las piezas fabricadas mediante estampación en caliente deben ser pintadas, para evitar la corrosión. Este pintado se suele realizar mediante cataforesis.

Montaje

Karbasian[8] A causa de la baja conformabilidad, la buena soldadura es una condición importante para los aceros estampados en caliente, en muchos casos debido a los recubrimientos usados.

El muy usado recubrimiento Al-Si ha demostrado no generar problemas para ningún tipo de proceso de soldadura actual. Para otros recubrimientos como el X-Tec es necesario hacer estudios concretos para conocer sus condiciones de soldabilidad, el desarrollo de este recubrimiento está permitiendo mejores condiciones de soldabilidad.

Finalmente para el recubrimiento con base Zn hay que optar por diversas técnicas que produzcan soldaduras de más o menos calidad.

De manera general habrá que tener en cuenta los procesos de soldadura subsiguientes que puedan ser necesarios para elegir el material y el recubrimiento.

2.10 Modelado y simulación

Aunque a priori parezca que el modelado no entra en el contexto de esta memoria, es importante incluirlo, por la cantidad de referencias en nuevos artículos de investigación, y sobre todo por el tiempo dedicado a este apartado del proceso en la cuarta conferencia internacional sobre estampación en caliente llevada a cabo en Luleå, Sweden, June 9 – 12, 2013.

La estampación en caliente, en su momento crítico de estampado a más de 900 °C, sufre cambio de fase, pérdida de calor etc. Los programas de simulación y modelado de este proceso requieren de mucha capacidad por ello esta parte, teniendo en cuenta que generalmente se trata de piezas de alta seguridad, cobra una gran importancia en el proceso.

Siendo el modelado y simulación de proceso, uno de los grandes campos en los que se trabaja y se sigue trabajando para el ahorro de coste y fiabilidad del proceso.

2.11 Conclusiones sobre el estado del arte

Estamos hablando de un proceso que requiere grandes inversiones de maquinaria, por tanto a pesar de existir muchos avances, de manera general en la actualidad para coches de gama media, los procesos más comunes son los mencionados anteriormente. En la parte final de este documento, podremos ver nuevos avances que prometen soluciones muy afinadas, con un gran control de todos los parámetros de cada etapa.

2.12 Líneas de investigación y nuevas técnicas

Como he comentado en el inicio uno de los objetivos es el sondeo de las líneas de investigación que está siguiendo la estampación en caliente. En los puntos siguientes muestro líneas de investigación pensadas para minimizar los puntos débiles que presenta esta tecnología. También se muestra líneas que mejoraran los puntos fuertes de esta tecnología haciéndola más interesantes.

Nuevas técnicas de calentamiento (furnace-free)

En el artículo *V. Ploshikhin [24]* se presenta una técnica realmente llamativa que aborda directamente uno de los grandes problemas de la estampación en caliente, que ya ha sido comentado anteriormente, el ahorro de la gran cantidad de espacio requerida por los hornos "convencionales", también tendremos otra serie de ventajas que analizaremos a continuación, en la presentación del proceso.

Así pues esta nueva técnica que denominaremos "furnace-free", es un método de calentamiento de formatos sin necesidad de usar un horno propiamente dicho, el calentamiento del formato se lleva a cabo por una conducción masiva a través del contacto directo con dos placas a alta temperatura, como podemos ver en el diagrama colocado a continuación.

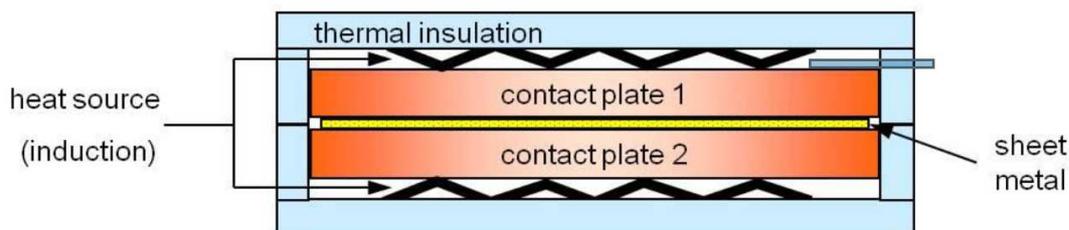


Ilustración 22. Imagen esquemática de la disposición de los elementos en un horno de calentamiento por conducción proceso "furnace-free".

Detalle del proceso furnace-free

En esta investigación llevada a cabo, la denominadas "contact plate" que podemos ver en la ilustración anterior, son de un acero especial, resistente al calor, del que no se dan más detalles. El método de calentamiento de la placas puede ser de varias formas, en el artículo se propone un calentamiento por inducción que sin duda será rápido y fácilmente controlable. Una rápida conclusión puede ser la posibilidad como señalan en el artículo de sectorizar la placas, de manera que podremos controlar la temperatura de manera independiente a los largo del formato, logrando así calentamientos heterogéneos que permitirían un control de las propiedades generadas a medida, siendo esta sin duda una gran ventaja que en sinergia con la comentada posibilidad de enfriamiento sectorizado por contacto de los troqueles, abre un abanico de posibilidades para el diseño de componentes estructurales muy basto.

Para que este proceso quede más claro y se valore su viabilidad se muestran una serie de datos físicos sobre velocidades de calentamiento, en primera instancia destacar que la máxima temperatura a la que se podría calentar las placas de calentamiento es 1050°C, debido al material usado el cual se desconoce, en el artículo se indica que podría intentar usarse otro tipo de materiales que posibiliten alcanzar mayores temperaturas. Vemos el Diagrama 1 donde se aprecian los principales elementos de el calentador de formatos.

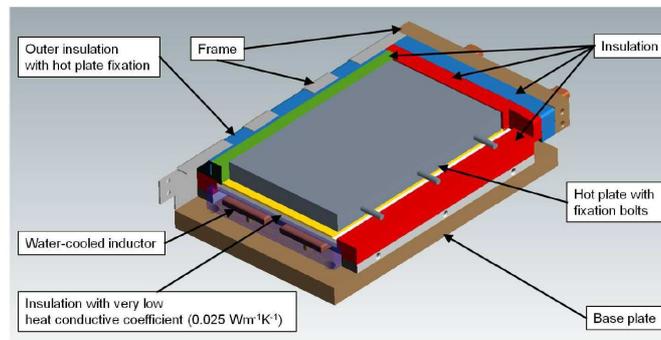
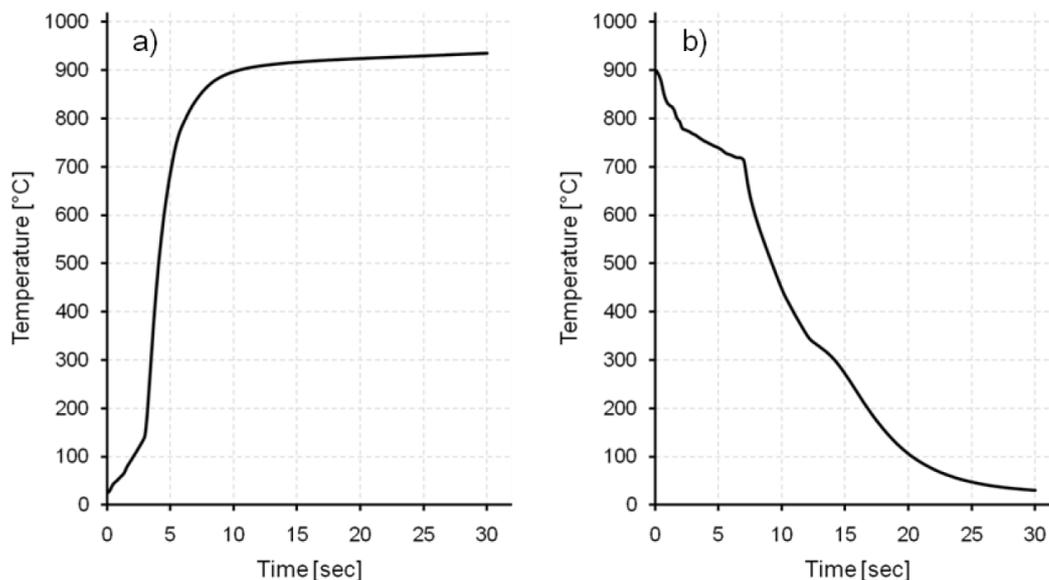


Diagrama 1. Diagrama detallado de la disposición de los elementos del horno por conducción.

Entrando ya de lleno en características físicas que marcaran de manera más clara la velocidades del proceso, se presentan a continuación dos graficas muy descriptivas que nos hacen llegar rápidamente a conclusiones sobre el proceso.



Gráfica 2. (a) Velocidad de calentamiento de formato dentro de horno en el proceso "furnace-Free". (b) Velocidad de enfriamiento del formato dentro de troquel.

Como podemos ver en la Gráfica 2 (a) , se consiguen unas velocidad de calentamiento extremadamente altas, en 15-20s se consiguen temperaturas apropiadas para realizar el proceso de estampación en comparación con hornos convencionales en los cuales siempre hablamos de más de 5min. También se aprecia como en la parte final cuesta alcanzar la temperatura deseada, de ahí que el hecho de usar como placas de calentamiento materiales que puedan alcanzar más temperatura sería importante.

Durante el proceso no se indica nada sobre el espesor del formato con el que se trabaja, lo que a priori puede tener bastante efecto sobre la velocidad de calentamiento, como así lo tiene en la velocidad de enfriamiento por conducción en los troqueles del formato o en este caso partes semiacabada [B. *Abdulhay* [1] de la cual se tiene más experiencia y se ha estudiado más como podemos ver en la sección dedicada en este documento.

En la Gráfica 2 (b) vemos una típica grafica de velocidad en enfriamiento del formato para el templado del mismo.

Respecto a los efectos de adherencia y desgaste en el horno tanto de las placas como de los formatos, los autores del artículos indican que no tiene ningún tipo de desventaja respecto a hornos tradicionales.

Conclusiones y comentarios del "furnace-free"

Enumerando de manera rápida sus ventajas, así como las indica el artículo y a priori se aprecian encontramos:

- Baja inversión, tanto maquinaria como de espacio.
- Alta flexibilidad
- Coste de mantenimiento más bajo
- Posibilidad de fabricar partes con propiedades a medida.

Este método de calentamiento también beneficiaría grandes ahorros a la hora de encender y apagar el equipo, respecto a hornos convencionales con sus largos tiempos de calentamiento.

Sin entrar en suposiciones a este proceso se le aprecia un gran problema, el hecho de calentar formatos a medida más conocidos como TRB, técnica o proceso que está teniendo una fuerte penetración dentro de la estampación en caliente como ya hemos comentado anteriormente por su ahorro de peso. Aún así no se puede descartar la posibilidad de adaptar los instrumentos para poder trabajar con TRB o que sus beneficios anulen esta a priori desventaja.

La afirmación de la no existencia de desgaste ni adherencias debería ser ratificada con el uso de placas que aguanten una mayor temperatura, ya que 1020° para lograr las temperaturas de austenización necesarias, siendo este un aspecto preocupante de esta investigación.

Sin duda estamos ante una apuesta realmente interesante, de la que todavía no se dispone de mucha más información, sería interesante hacer un seguimiento de esta tecnología porque las ventajas son importantes para el siempre cuello de botella que suponen los hornos en el proceso de estampación en caliente.

Austenización y recubrimiento combinados

Hasta ahora todos los tipos de recubrimientos muestran una serie de ventajas y desventajas, como podemos ver en puntos anteriores, *Neugebauer, R* [19] analiza estas ventajas y desventajas y propone una novedosa técnica.

Esta nueva técnica se basa en la inmersión de los formatos en un baño caliente. Este baño caliente cumple dos funciones; calentamiento de la pieza y prevención de la oxidación tanto durante el calentamiento como en todas las operaciones posteriores. Sumar dos operaciones incrementa la eficiencia del proceso global.

La bañera a alta temperatura es de una aleación de Zinc y aluminio, cuando el formato es introducido se produce una reacción en la superficie del mismo. Esta reacción depende de la temperatura y de la composición del baño. Se crea el recubrimiento necesario para evitar la oxidación al sacar la pieza del baño.

Los responsable de esta investigación indican una gran variedad de parámetros que deben ser estudiados, pero el hecho de fusionar dos operaciones, incluyendo una el gran cuello de botella que suponen los hornos parece muy interesante.

Otra ventajas señaladas por el autor son:

- El recubrimiento es aplicado solamente en el material útil final en vez de a todo el ancho de bobina, reduciendo los desperdicios.
- Se prevé mayor velocidad para lograr la temperatura de austenización respecto a hornos convencionales.
- Los baños serán de un tamaño inferior a los hornos convencionales que mejoraran la eficiencia al posibilitar menores aislamientos.
- A esta técnica no le afecta la geometría de pieza, como en las nuevas técnicas de inducción y conducción eléctrica.

En definitiva es un concepto muy interesante que deberá ser seguido de cerca.

Uso de nitrógeno como refrigerante

Como se ha comentado en puntos anteriores, los troqueles para estampación en caliente son refrigerados mediante agua, para lograr las velocidades de enfriamiento que necesitan los aceros para estampación en caliente. Esta velocidad de enfriamiento es muy crítica y sin lograr un valores mínimos no se lograrían las estructuras martensíticas que ofrecen las altas resistencia, buscadas para elementos estructurales.

Naderi [17] [18] presenta una nueva técnica de refrigeración de troqueles que a priori y según los primeros indicios, permiten obtener mayor cantidad de martensita al final de la operación de templado.

Los troqueles refrigerados por agua, en un proceso clásico de estampación como los presentando en la primera parte del estudio del arte, partiendo de una temperatura de unos 25 °C logran mantener al troquel en una temperatura que está entre los 50 y los 60°C. Con la utilización de nitrógeno, estos mismo troqueles con las adaptaciones que a priori fueran necesarias, partiendo de temperaturas de -50°C, al final del templado no superan los 5°C. Con el nitrógeno, pasaríamos de tasa de enfriamiento de 30k/s hasta los 75 k/s.

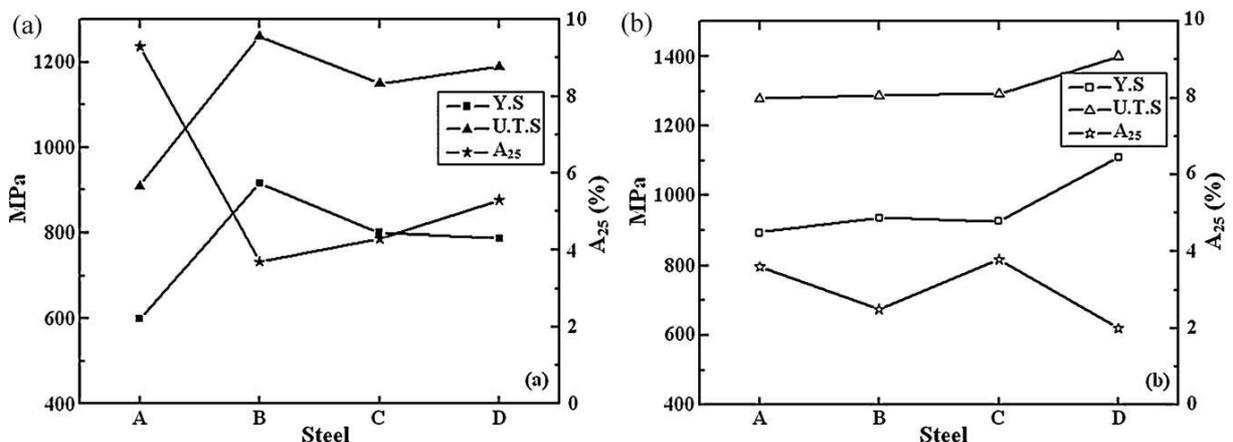


Ilustración 23. Izq (a), características mecánicas: de aceros estampados usado agua como refrigerante. Drch (b) aceros estampados en caliente usando nitrógeno como refrigerante.

Como conclusión no se aprecian mejoras significativas en la aplicación de estas tasas de enfriamiento en los aceros comúnmente usado para estampación en caliente, es posible que en futuros aceros con otras composiciones químicas que pudieran requerir estas comentadas altísimas tasas de enfriamientos, se consigan características mecánicas que compensen los altos costes que se producen por la utilización de nitrógeno como refrigerante de troqueles.

Semi estampación en caliente

Esta técnica, más que un avance, parece una diversificación del proceso de estampado en caliente.

Naderi [18] nos presenta un método de estampación en el que se analizan las características mecánicas logradas para un nuevo material denominado MSW1200 (denominación ThyssenKrup), estampado en caliente con una temperatura máxima de 650°C.

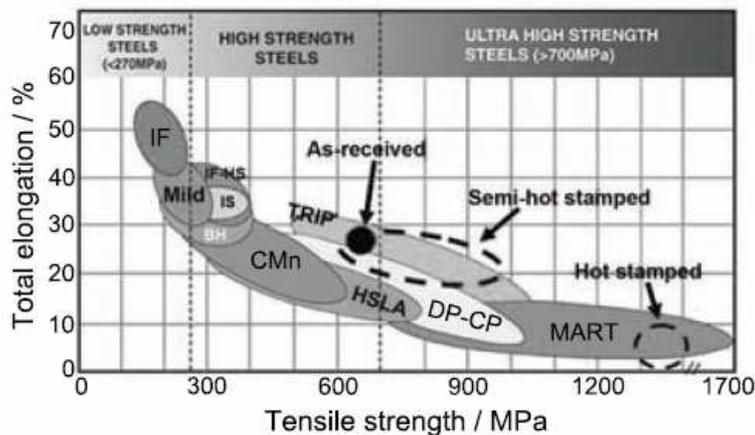


Ilustración 24. Esquema de las propiedades finales en comparación con piezas estampadas en caliente con un proceso clásico.

Se puede ver en la ilustración anterior que se puede llegar a lograr elementos con características mecánicas interesantes, que combina altas resistencia con alta ductilidad, que pueden ser interesante para algunas partes concretas del automóvil que requieran estas características.

Mediante la semi-estampación en caliente lograremos, que el abanico de posibilidades que se logra mediante la cocción de elementos y su posterior templado sea más grande, sacando más rendimiento a las inversiones realizadas tanto en hornos como en prensas.

Corte de formatos en caliente

A pesar de lo comentado en el estado de arte, algunos investigadores como So,H [21], están tratando de mejorar las características del corte en caliente.

El corte en caliente consiste en realizar los recortes geométricos necesarios en la pieza a estampar simultáneamente con la operación de estampado. Tradicionalmente se ha observado que el desgaste de los troqueles y la poca precisión de esta técnica la hacían inviable.

En ocasiones la grandes longitudes necesarias de corte laser, generan tiempos de ciclo muy altos, incompatibles con los tiempos necesarios para el abastecimiento de las líneas de montaje, además de encarecer el proceso global. Todo esto convierte en interesante el hecho de dedicarle más tiempo a la parametrización y estandarización del corte en caliente.

Para el corte en caliente hay que lograr un punto intermedio entre la precisión y el esfuerzo de corte, esto es logrado a una temperatura que ronda los 550°C. Mucho otros parámetros deben ser estudiados para lograr calidades y tolerancia aceptable.

El corte en caliente parece ser un buen camino para reducir los costes de fabricación de elementos estampados en caliente, que son actualmente bastante altos.

3 Planteamiento para el pre-diseño de un proceso convencional para un pilar-B y resultados.

La parte práctica de este proyecto, consistirá en el pre-diseño de un proceso de estampación en caliente. Se pre-diseñara un proceso para uno de los elementos más característicos que se producen mediante esta tecnología; un pilar-B.

En este pre-diseño se optara por soluciones tecnológicas contrastadas como las mostrada en el estado del arte.

Cada una de la partes del pre-diseño serán apoyadas mediante resultados que avalaran en mayor o menor medida las soluciones tecnológicas elegidas para el pre-diseño de este proceso de fabricación.

3.1 Presentación del Pilar-B

Se presenta un pilar-B diseñado para este proceso. Es un pilar B ficticio, solamente se presenta el diseño realizado con ayuda de catiaV5. Antes de nada, reseñar la necesidad de realizar los diseños mediante superficies, todo los programas con los que se ha trabajado requieren superficies como geometrías. En este caso se ha usado el modulo GSD de catia V5.

A continuación se presenta el pilar diseñado y renderizado con la ayuda de Catia V5:



Ilustración 25 *PilarB ficticio de lado derecho de un turismo.*

Al ser un diseño creado de manera ficticia, sin esta limitado en la geometría del mismo, me he basado para su diseño en las geometría típica de pilares B de turismos actuales, además, en el diseño del mismo, se ha tenido en cuenta alguna premisas de diseño mostradas en *A Mihail [2]*.

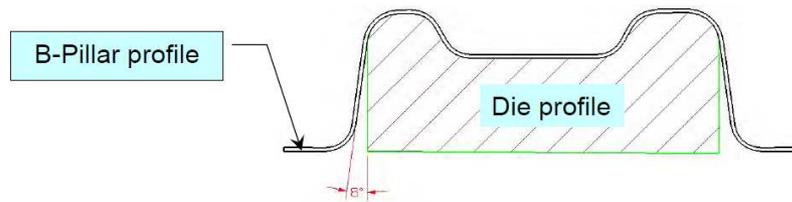


Ilustración 26 Perfil optimo para estampación según A.Mihail [2] para la consecución de una buena estampación.

Se prevé una producción anual de 50.000 vehículos al año, lo que significa que habrá que estampar 100.000 pilares B anuales. Estos datos nos serán útiles para calcular más adelante el tamaño de lote y poder dimensionar la bobina entre otras cosas.

3.2 Elección del material

Como he venido indicando el Usibor 1500P® que es el acero 22MnB5 con recubrimiento Al-Si es el material más interesante en la actualidad, por sus buenas características, además de su uso generalizado en gran cantidad de compañía automovilísticas. Tiene una gran aceptación en el mercado.

El elemento que lo hace sobresalir sobre otros aceros para estampación en caliente es su recubrimiento con Al-Si, que nos evitara tener que realizar una operación de granallado posterior al estampado para eliminar la cascarilla creada, o utilización de atmosferas protectoras.

Como es lógico, es un material ligeramente más caro que la opción 22MnB5, que no cuenta con el recubrimiento, pero el hecho de ahorrarnos la operación de granallado con todo lo que conlleva, puede compensar esta diferencia de precio.

Gracias al recubrimiento la partes fabricadas con Usibor 1500P® presentaran una menor decarburación y una mayor resistencia a la corrosión previa al ensamblaje u operaciones intermedias.

No todo son ventajas, cabe destacar que el hecho de llevar el recubrimiento implica un mayor tiempo de calentamiento en el horno, que como se ha ido comentando, es generalmente el cuello de botella del proceso de estampación en caliente.

También la elección de este material nos condiciona a elegir un proceso de estampación directo. Elegir un proceso de estampación directo conlleva una reducción de coste respecto al indirecto al ahorrarnos una operación.

Otras características interesantes del Usibor 1500P®

Para diseñar el proceso y conocer las posibilidades y limitaciones del material elegido es conveniente tener en cuenta las indicaciones ofrecidas por ArcelorMittal..Alguna de la características específicas de el material elegido son:

Características mecánicas	Antes de la estampación en caliente	Después de la estampación en caliente
Re (MPa)	350 -550	1100
Rm (MPa)	500 -700	1500
A (%) L0 = 80 mm e < 3 mm	≥ 10	6

3.3 Estudio de conformado, conceptos clave

En primera instancia, esta clase de estudio no sería necesaria para lograr realizar un pre-diseño del proceso, pero se considero que tener claros algunos conceptos es básico que pueden ayudar a evitar fallos en esta etapa de pre-diseño que en paso finales sería garrafales.

Para el estudio del conformado del Pilar B, se han usado programas específicos para estampación, que permite la posibilidad de simular un proceso de estampación en caliente. Los programas usados han sido AutoFormR3 V2009 y Fast Blank.

Antes de dar paso a los resultados obtenidos mediante simulación, vale la pena hacer una mención de una manera general, al método seguido para estudiar la posibilidad de conseguir una pieza mediante estampación ya sea en caliente o en frío. Cualquier persona relacionada con estampación profunda, debe tener claros algunos conceptos en este aspecto.

Para este estudio se suele analizar el diagrama de límite de conformado o "forming limit diagram" muy conocido por sus siglas en inglés FLD. Presenta la siguiente forma para el caso de un acero 22MnB5, que será el usado en este proceso.

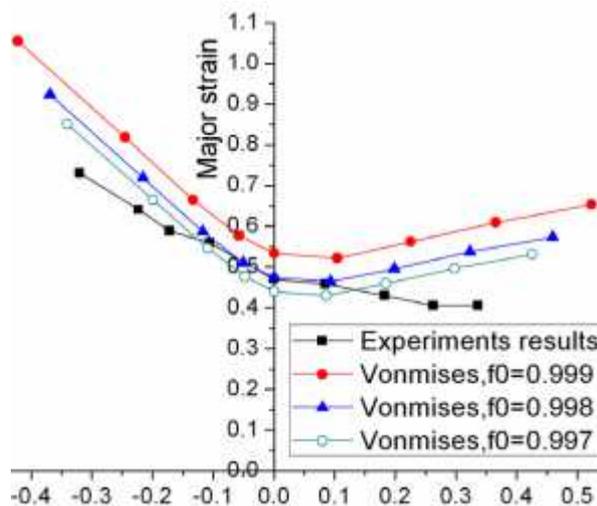


Diagrama 2 Diagrama FLD, presentado por Min J [14] atendiendo tanto a criterios de Von-Mises como a resultados experimentales. A 800 °C. Para acero 22MnB5 usado posteriormente para definir el material en AutoFormR3

Para obtener las curvas de conformado denominadas habitualmente FLC (Forming limit curves) para el diagrama se usa la siguiente probeta, basada en un método estándar para obtener las curvas de conformado:

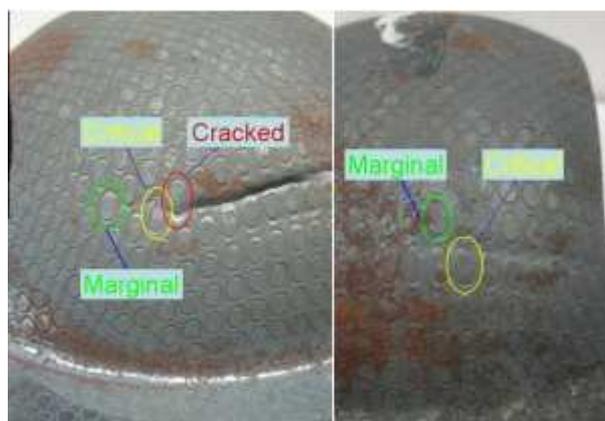


Ilustración 27 Resultado de un ensayo para lograr las gráficas FLC, usando una probeta estándar. Ensayo realizado por Min J [14]

En este ensayo se realizan estampaciones en caliente con diferentes condiciones, con esta forma de capuchón mostrada, que generara gran variedad de deformaciones diferentes posibilitando generar por puntos las curvas FLC para poder crear diagramas FLD.

Las graficas FLD muestra el límite de conformabilidad basándose principalmente en una deformación biaxial y analizando de forma experimental los puntos de rotura, permitiendo así concluir cuales son la combinaciones de deformación con fracturan un proceso de estampación en un punto en concreto.

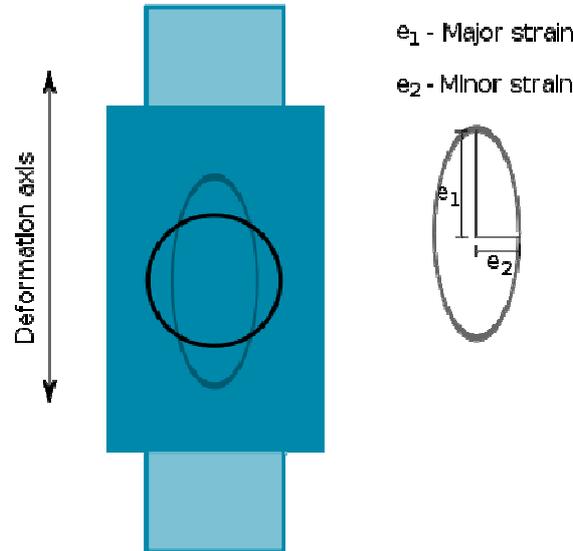


Ilustración 28. Esquema de las deformaciones que se tiene en cuenta para la creación de diagramas FLD.

En la ilustración anterior se muestra el criterio de deformación analizado en el material, y mediante la deformación mayor y menor de un supuesto círculo se podría pronosticar posibles fallos del material.

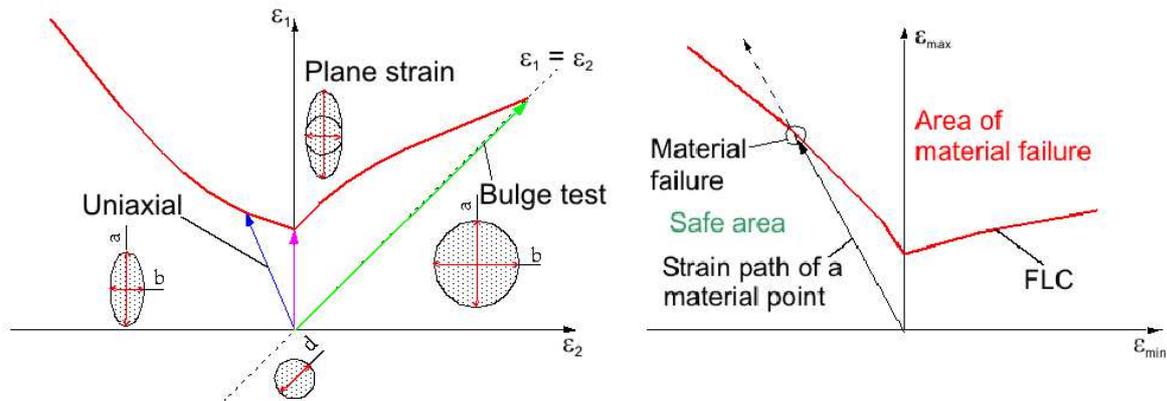


Ilustración 29. Ilustración aclarativa sobre la funcionalidad de las grafica FLD

Después de aclarar este concepto pasaremos directamente a un rápido estudio de conformado del pilar B ficticio objeto de este proyecto.

3.4 Simulaciones del proceso de estampado en caliente

No siendo uno de los objetivos prioritarios de este TFM, valoraremos que nos puede ofrecer primeramente FastBlank.

FastBlank será usado para cálculos que serán mostrados más adelante pero también nos ofrece otros resultados que pueden servir para sacar conclusiones.

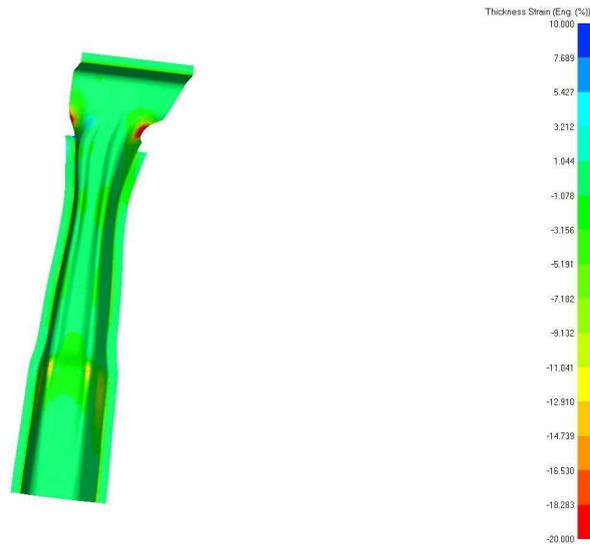


Ilustración 30 Grafica orientativa creada con FastBlank en la que se visualizan las elongaciones lineales del formato al pasar a su forma final. Valor máximo 46,7%

En primera instancia como se ha comentado, FastBlank por su sencillez no sea el programa idóneo para un estudio de conformabilidad, permite la obtención de conclusiones rápidas sobre los posibles puntos críticos a la hora de estampar la pieza, estas conclusiones no son muy precisas ya que apenas ofrecen posibilidades a la hora de parametrizar el proceso. Simplemente se basa en la deformación lineal. En esta ilustración mostrada vemos que la zonas de de color rojo, tienen una gran elongación, los que nos advertirá sobre una posible zona de fallo.

Simulación Rápida

AutoformR3 ofrece la posibilidad de realizar simulaciones "rápidas" pensadas para obtener resultados orientativos en primeras etapas de diseño, que en este caso nos servirán sobre todo para saber la fuerza de la prensa de estampación en caliente.

Para simular el proceso se ha usado AutoFormR3, para conocer los parámetros específicos habría que acudir al los archivos adjuntos, los parámetros generales son los siguientes:

- Material 22MnB5 definido por AutoFormR3
- Temperatura de estampación 830°C
- Velocidad de cierre: 50mm/s
- Tiempo de cerrado: 3.3 s
- Espesor: 2mm



Ilustración 31. Disposición de los troqueles previa a la estampación. El troquel inferior se denomina Die y el superior Punch. El cual tiene una ampliación (offset) de 2 mm.

Como se puede ver en la imagen, en esta simulación solo se usa punzón y troquel, habría que estudiar la necesidad de incluir un pisador, pero no se consiguieron simulaciones aceptables.

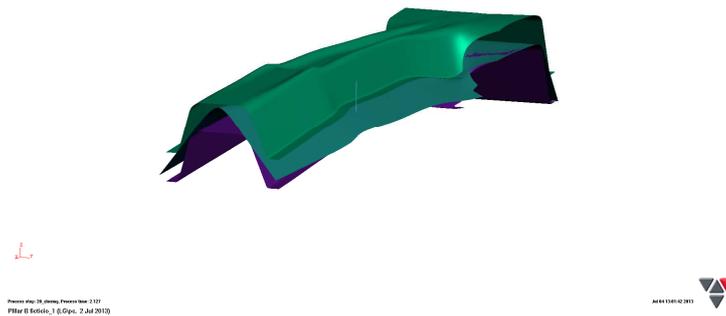


Ilustración 32. Punto intermedio de la estampación.

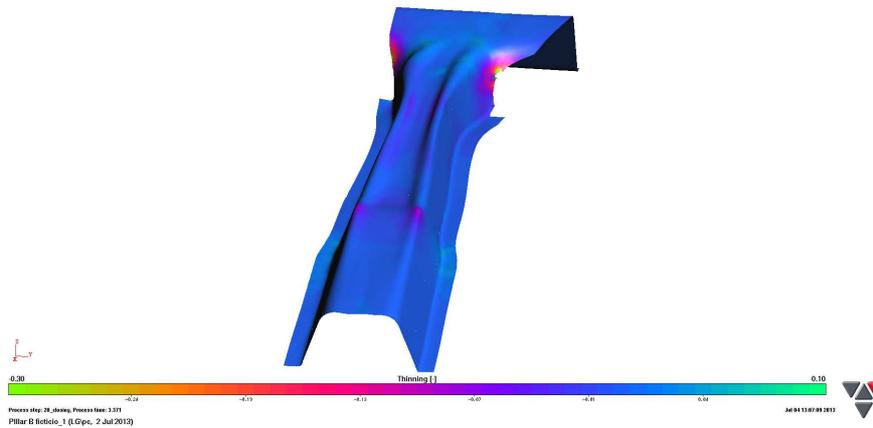


Ilustración 33. Resultado de la simulación con criterios de reducción del espesor.

Podemos apreciar en la ilustración anterior, que la sospecha de posibles problemas para la estampación en la zona superior derecha, anterior al ensanchamiento, también se producirían según la simulación realizada. En la siguiente imagen ver los puntos de rotura:

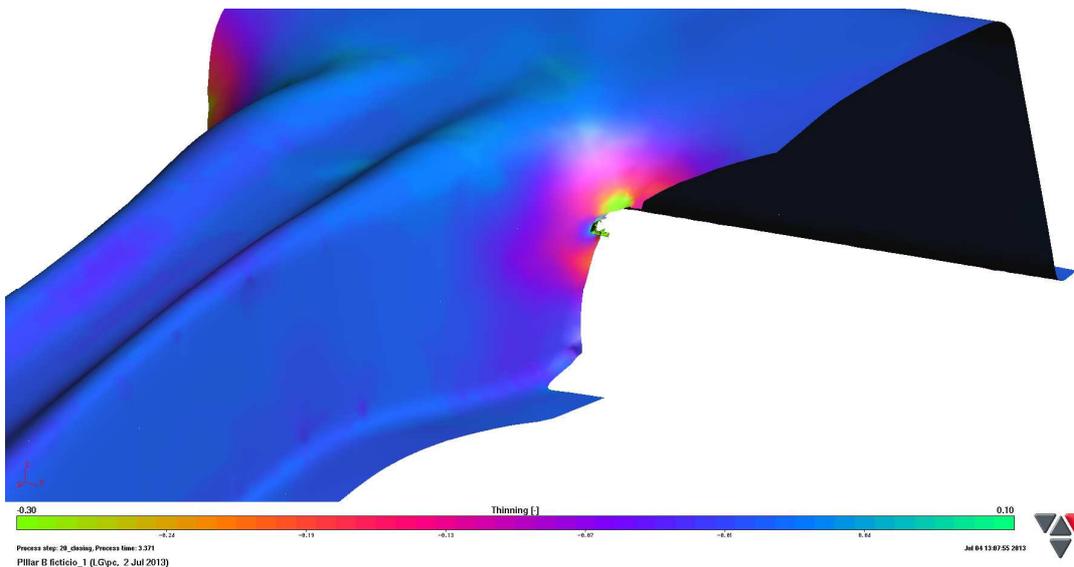


Ilustración 34. Zona de fractura del pilar B al estamparlo en caliente.

Que se produzca una fractura no es preocupante para cumplir los objetivos planteados para este proyecto. Mediante una sencilla mejora de la geometría y una afinación de los parámetros se lograría, que los resultados de brindados por la simulación, pronostiquen resultados favorables para la realización de esta estampación.

Simulación fina

En este estudio de conformabilidad no solo se ha mejorado de una manera sencilla el diseño, sino que se han estudiado y definido de una mejor manera las características del material a estampar, la graficas que definen el comportamiento del material son las siguientes:

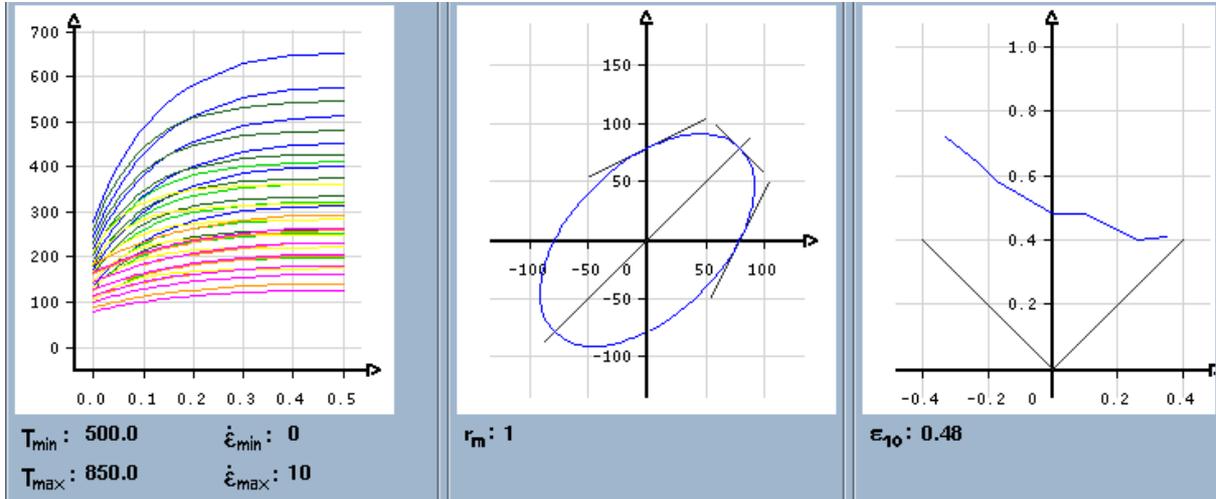


Ilustración 35. Gráficas que definen el comportamiento del material usado para esta simulación en Autoform, definición manual por parte del usuario. Izq diagrama "Hardening Curve" Elongación unitaria en abscisas tensión en ordenadas. En el medio, grafica "Yield surface" Tensión en MPa biaxial que produce el inicio de las deformaciones permanentes. Grafica de la derecha, FLD elongación en base a unas funciones biaxial.

Tanto la gráfica de deformación plástica " yield surface" como la grafica FLD variaran con la temperatura y la deformación, al menos en teoría, AutoForm solo hace referencia a este fenómeno respecto a la gráfica de deformación plástica, se generan dudas respecto a la grafica FLD.

Resulta un tanto compleja la tarea de definir materiales en AutoformR3. Se ha trabajado en la grafica FLD con la conclusiones mostradas en diagrama 2.

Respecto a la optimización de la geometría se ha optado por seccionar las zonas de rotura, ya que no se ha considerado limitaciones geométricas ni de carga. La geometría simulada en esta ocasión es la siguiente:



Ilustración 36. *Diseño optimizado para evitar fractura durante el estampado.*

En este caso no merece la pena molestarte en darle espesor ni propiedades al material, Autoform partirá de una superficie en formato .igs y partir de ahí se definirá los parámetros de la simulación.

Los parámetros más representativos además de la definición del material son:

- Temperatura de estampación 830°C
- Velocidad de cierre: 100 mm/s
- Tiempo de cerrado: 1.6 s
- Espesor: 2mm
- Temperatura del punzón: 50 °C
- HTC ambiente: 0,085 mW/mm²*K
- HTC herramienta (contacto): 3.5 mW/mm²*K

En esta ocasión se tienen en cuenta más parámetros, ya que ha optado por una simulación más fina, pero todos estos parámetros son estimados y pueden alejarnos más de la realidad que para el caso de un simulado "rápido"

En esta simulación se ha tenido en cuenta la temperatura de forma que la misma varíe por las conducciones tanto con ambiente como con la herramienta. Se detecta que no se producen grandes variaciones respecto a realizarlo sin tener en cuenta, para la realización de un pre-diseño.

Como vemos en la imagen siguiente, al final de la estampación la temperatura variaría en la pieza desde los 630°C a los 810°C dependiendo si han tenido más o menos contacto con el punzo o herramienta.

Al introducir enfriamiento también ha sido necesario aumentar la velocidad para evitar enfriamientos excesivos.

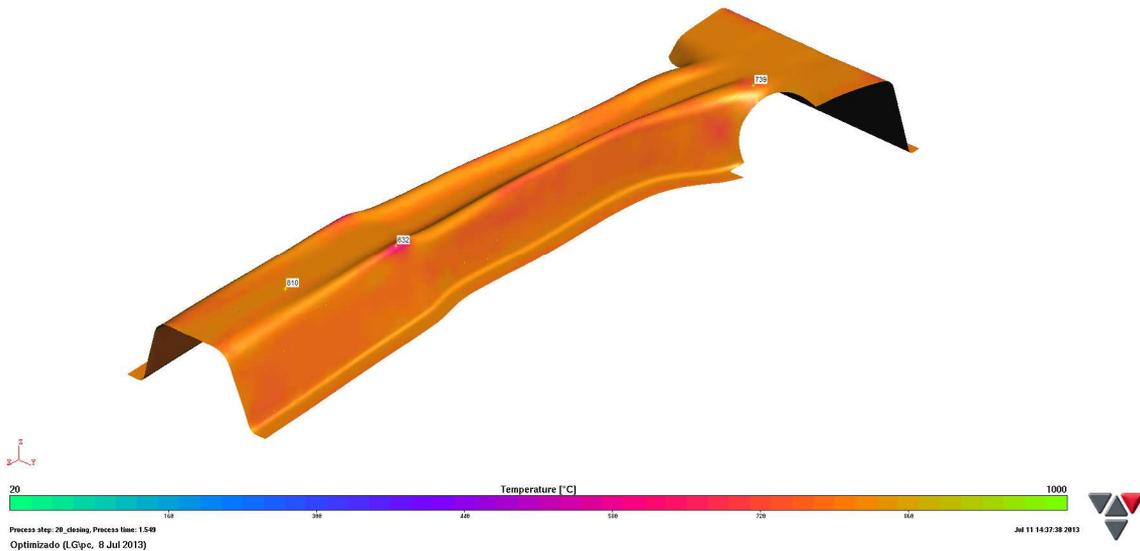


Ilustración 37. Representación de la temperatura de la simulación 2.

En la siguiente imagen, podemos comprobar en comparación con la grafica de fuerza de punzón mostrada en el apartado de cálculo de dimensionado de presa de estampado, al aumentar la velocidad de estampado será requerida mayor potencia en la prensa, esta potencia será también afectada por la reducir de la temperatura. En este caso será necesaria una potencia de al menos 768163N.

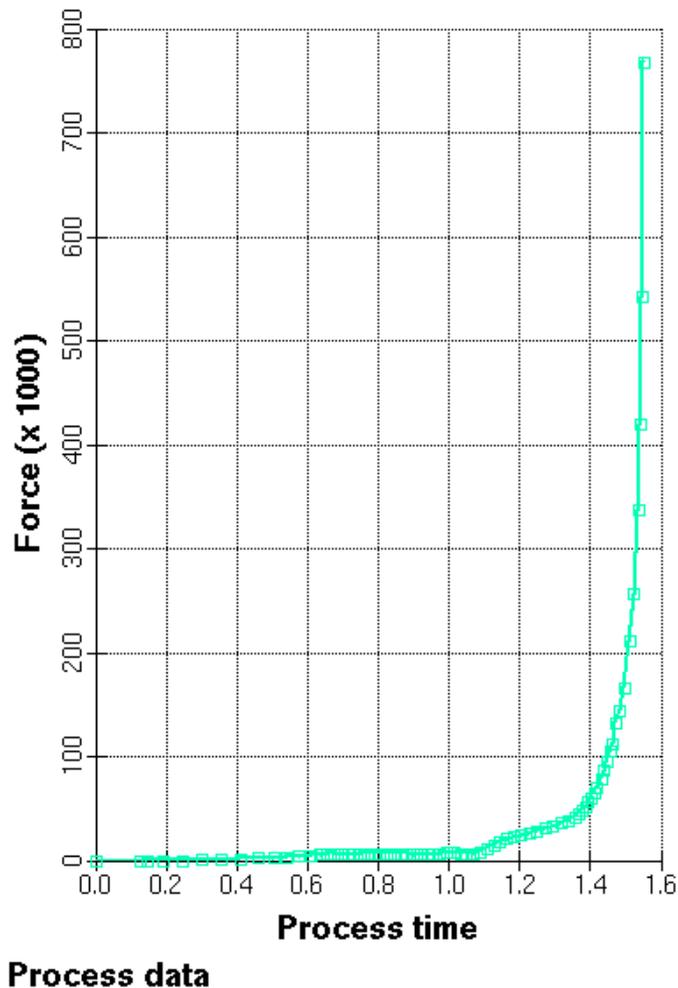


Ilustración 38. Grafica de esfuerzo para el estampado en caliente.

En esta ilustración para concluir esta simulación se muestra los resultados final de estrechamiento, que son un buen indicador para concluir que esta pieza a priori podría ser estampada en caliente sin que se prevean posibles fallos graves o roturas.

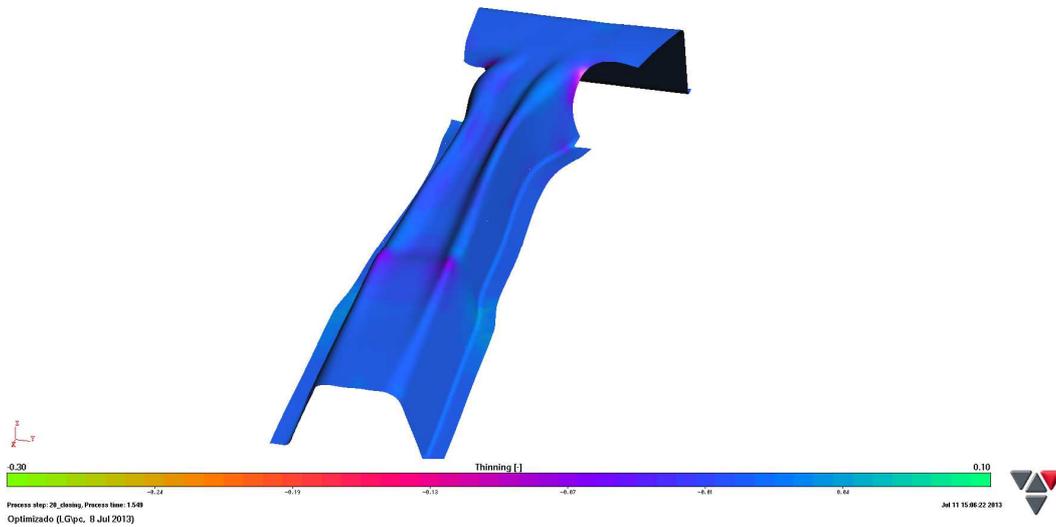


Ilustración 39. Estrechamiento producidos en la piezas por el proceso de estampación en caliente.

3.5 Detalles de formato

El formato, que es la lamina de metal extraída de la bobina debe tener la siguiente forma, existe diversos métodos y programas para obtener el desarrollo de la pieza estampada, en este caso se presenta el formato tal y como lo calcula FastBlank, se parte del diseño preliminar:

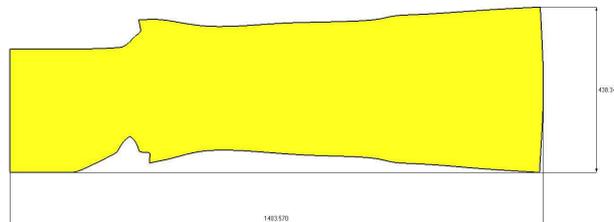


Ilustración 40. Geometría del formato de partida para lograr la pieza mediante estampación en caliente. Formato obtenido mediante Fast Blank.

Detalles finales del formato	
Rectángulo mínimo	438.345 x 1403.570 mm
Espesor	2 mm
Área	501434.641 mm ²
Perímetro	3699.930 mm
Peso	7.780 Kg

Comparativa entre espesor variable y constante

La posibilidad de usar espesor variable con el uso de formatos obtenidos mediante TRB, aporta la capacidad de producir zonas especialmente rígidas en puntos donde sea necesario evitar la excesiva

intrusión en caso de impacto. La ventaja de usar espesor variable, es, que manteniendo las zonas especialmente rígidas, conseguiremos una reducción de peso.

El espesor objetivo de 2 mm ha sido elegido por ser un espesor bastante utilizado para pilares B como podemos ver por ejemplo en cualquiera de los artículos presentados en la bibliografía. Este espesor generalmente lo brinda los estudios de impacto llevados a cabo en etapas anteriores de diseño. Volviendo a un espesor típico, en concreto *Karbasian [8]* comenta que los espesores más usado varia de 1 a 2,5 mm. En conclusión 2 mm es un espesor razonable.

A continuación mostraremos la distribución de las variaciones de espesor a lo largo de la pieza, la zona de mayor espesor es la zona de impacto, en la zonas donde el espesor no está marcado, el espesor varia linealmente desde 1,4 a 2 mm.

Para reducir la cantidad de chatarra, el espesor inicial y final deberán ser iguales para así evitar zonas de transición de espesor a la hora de crear las geometrías exactas de espesor variable.

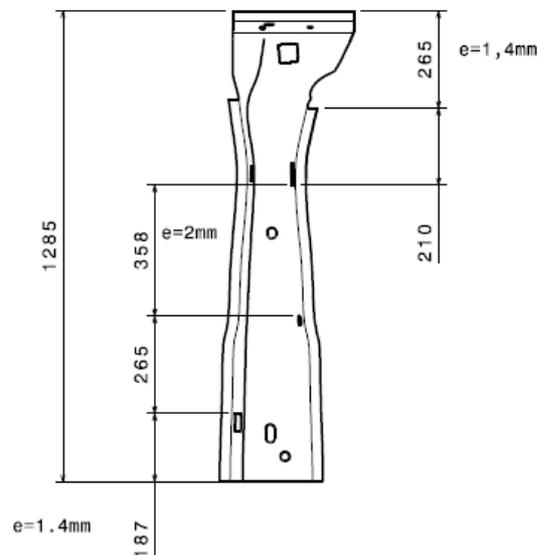


Ilustración 41. Distribución de los espesor variables a lo largo del pilar B.

Se aprecia el hecho comentado anteriormente, tanto el espesor inicial como el final es de 1,4 mm.

Tabla 2. Comparativa entre espesor variable y constante.

	Espesor cte: 2mm	Espesor variable
Peso final	7.780 Kg	6.127 Kg (-21%)
Precio material bruto	Normal	Más caro
Precio final	A estudiar	

El precio final, podría ser más cara para la pieza fabricada con espesor variable, a pesar de usar menos cantidad de material, debido al encarecimiento producido al incluir el proceso para la variación del espesor mediante apisonado y rebobinado. Pero la reducción de peso, es interesante de cualquier modo, al reducir de manera importante el peso de la parte que afectara al peso del vehículo y por consiguiente al consumo de combustible del mismo.

Ya que la estampación en caliente está orientada principalmente para reducir el peso del vehículo, cualquier acción que contribuya a reducir el peso total de alguna manera, sin reducir la seguridad, es interesante.

Por todo esto se elige la utilización de espesor variable como ya fue comentado anteriormente para la fabricación de este Pilar B.

Corte de formato

Para lograr aprovechar de la mejor manera posible y optimizar los recursos, se realiza un estudio de la disposición óptima de los formatos, a la hora de ser cortado en la prensa de corte de formato.

En este estudio se utiliza el modulo BlankNest, que nos propondrá las posibles disposiciones de los formatos, así como el ancho de bobina necesario.

Los parámetros más significativos configurados en BlankNest para obtener la disposiciones que se muestra a continuación son los siguientes:

Dimensiones de la bobina: 1500-500mm (max-min)

Separación entre borde de formatos: 5mm

Separación entre formato y borde de bobina : 5mm

Adendo: 0 mm

Reseñar que los datos mostrados a continuación están calculados para un espesor constante de 2mm.

Se prioriza el aprovechamiento de material siendo las opciones mostradas a continuación las más interesantes:

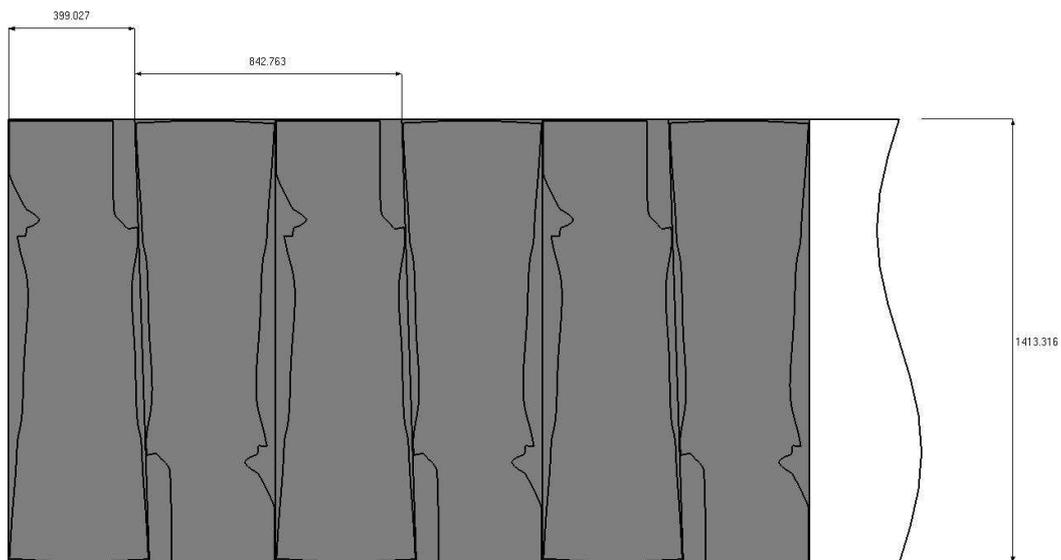


Ilustración 42 Disposición de los formatos para 2 partes por golpe de prensa. Aprovechamiento 84,20%. Peso en grueso 9.221 kg. Con espesor variable 7.28 Kg (calculado manual).

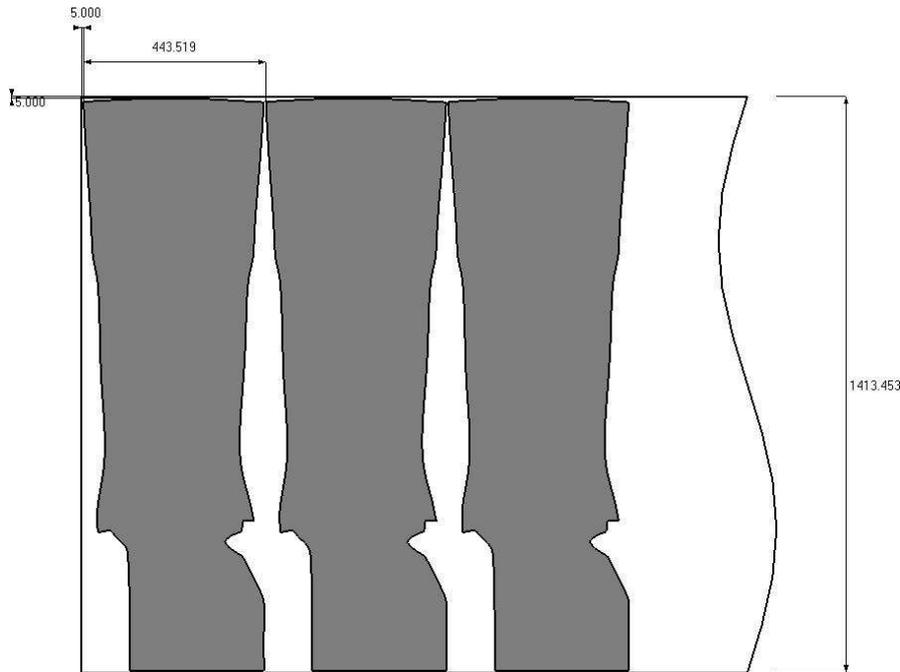


Ilustración 43 Disposición para una parte por golpe de prensa. Aprovechamiento 79,99%. Peso en grueso 9.780kg.

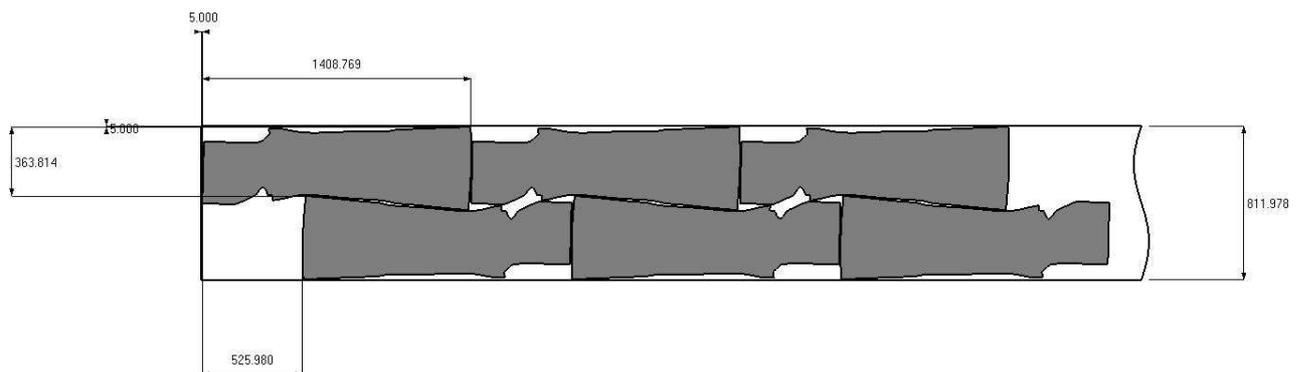


Ilustración 44 Disposición para dos partes por golpe en horizontal. Aprovechamiento 87.67%. Peso en grueso 8.922kg.

Siendo las tres opciones a priori más recomendables, para tomar la decisión correcta sobre la mejor disposición las valoraremos en una tabla:

Tabla 3. Tabla para la valoración cualitativa de la distribución más favorable para el corte de formato.

	2 partes por golpe	1 parte por golpe	2 partes por golpe horizontal
Aprovechamiento	Bueno	Medio	Excelente
Golpes por minuto	Bueno	Excelente	Medio/Bajo
Precio del útil	Medio	Excelente	Medio
Tonelaje de la prensa	Medio	Excelente	Medio

Tabla 4. Comparativa pesos en bruto entre espesor cte y variable.

	2 partes por golpe	1 parte por golpe	2 partes por golpe horizontal
Peso bruto e=emm (Kg)	9.221	9.780.	8.922

Peso Bruto e=variable (Kg)	7.28	7.702	7.026
-------------------------------	------	-------	-------

Los datos presentados en la tabla 4 son aproximados, debido a la imposibilidad de meter espesores variables para el cálculo en FastBlank.

Para valorar correctamente la tabla 3, habrá que comprender hasta que punto afectara cada campo para la optimización del proceso.

Aprovechamiento: Se refiera a la cantidad de material que es aprovechado en la bobina o fleje, cuanto más aprovechamiento menos chatarra generaremos, la chatarra tiene un precio de venta que también habrá que tener en cuenta. Este es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta.

Golpes por minuto: Los golpes por minutos dependerán básicamente del paso de la disposición elegida, ya que cuanto más paso más tiempo tardara la devanadora en colocar la plancha en la posición de corte. Para conocer hasta que punto afecta, sería necesario conocer el precio/tiempo de la maquina usada. Siendo posible que incluso un menor aprovechamiento sea aceptable si nos permite obtener más partes por minutos debido a los costes de utilización de la prensa y la posible saturación de la misma. Se suele tender a ir a máxima velocidad.

Precio del útil: Al producir más piezas por golpe el precio del útil se incrementara al ser necesario un útil más grande. No es un factor demasiado importante.

Tonelaje de la prensa: Producir dos o más partes por golpes requerirá esfuerzos de corte más grandes, que pueden llegar a ser limitantes si no existes a disposición prensas de gran tonelaje. Este punto lo trataremos más adelante.

Finalmente para obtener la solución económicamente más viable, habría que valorar cada disposición detalladamente con los costes reales. Ya que no es posible obtener estos costes la opción a primera vista más viable será la mostrada en la Ilustración 11, dos partes por golpe en vertical. Por esto será la disposición elegida para el proceso.

Supondremos una velocidad de corte típica por la disposición de los formatos de 20 golpes por minuto.

Este un punto importante, ya que afectara al tamaño de bobina, cuyas dimensiones serán planteado a continuación.

3.6 Dimensionado de la bobina

Conociendo la distribución final para el corte de formato podremos calcular las dimensiones de la bobina, para mas detalles examinar los documentos excel adjuntos o el anexos de cálculos.

Para poder dimensionar la bobina además de los datos ya obtenidos deberemos ajustarla al tamaño de lote necesario y a la restricciones del devanador.

Tack time

El tack time son los segundos en los que debemos proveer cada pieza al montador final. Habrá que calcularlo en función de la producción encargada, pero como referencia usaremos la cantidad propuesta al inicio de 50.000 vehículos. Los pilares B va a cada lado del vehículo, es decir, que necesitaremos 100.000 pilares B fabricados anualmente.

Habrá que realizar otras suposiciones respecto a la línea de montaje del montador final, supondremos los siguientes datos:

Días de trabajo. 235

Turnos:3

Horas por turno: 7,5 h

Con esto podemos estimar que el tack time medio será de: **190.35 s**

De los cual se desprende que para un lote diseñado para tres semanas, los lotes deberán ser de **5770 piezas**.

Dimensiones de la bobina

Conociendo el tamaño del lote y suponiendo los siguiente datos:

Peso máximo de la bobina: 16 Tn , limitado por la capacidad del devanador.

Diámetro interior de la bobina : 800 mm, limitado por la capacidad del devanador.

Obtendremos las dimensiones de la bobina que serán la siguientes:

Numero de bobina por lote: 3

Peso de la bobina 14 Tn

Diámetro exterior de la bobina: **1498,87 mm**

Cada tres semanas se consumirá 3 bobinas de las características mostradas. Para un proceso real habría que tener en cuenta la creación de stocks de seguridad.

Acudir a los archivos excel anexos para más datos.

También podemos comprobar en los anexos como las dimensiones y espesor calculados corresponden con la oferta comercial en este caso de Thyssen Krup, se supone que Accerlor oferta aproximadamente las mismas características.

Con estos datos podríamos calcular costes logísticos de abastecimiento de material.

3.7 Dimensionado del horno

Generalmente los hornos vienen definidos de base, y el cálculo consistiría en ver cuánto tiempo tardaría en horno en calentar los formatos con el espesor dado, y a partir de ahí se definiría el proceso, suponiendo una gran restricción, y en caso de que resulte ser corto, sería el cuello de botella ya comentado varias veces en el estado del arte.

En este TFM se toma la libertad de calcular las dimensiones que optimizarían el proceso al máximo.

Estimación de tiempo de templado

Como hemos visto en punto anteriores la velocidad de enfriamiento deseada para conseguir una estructura con la mayor proporción de martensita debe ser sobre unos 30K/s hasta lograr alcanzar 200°C, si partimos de unos 800°C y por lo visto en el estudio del estado del arte, un tiempo típico de temple ronda los 20 segundos. El tiempo exacto de templado tendría que obtenerse mediante cálculos más extensos, modelos complejos y finalmente resultados experimentales.

Este tiempo es importante a la hora de poder sacar el máximo rendimiento al proceso, partiendo de los tiempos mínimos, se buscara optimizar la operación de calentamiento, que presentamos a continuación.

Operación de calentamiento

A pesar de haber comentado nuevas tendencias y técnicas de calentamiento, para este proceso se optara por la técnica clásica de calentamiento en horno en línea (Roller hearth furnace).

En esta delicada operación, habrá que adaptarse a las medidas del horno disponible, las medidas del mismo serán estimadas en base a unos medidas standard, se calculara para un horno de 2m de anchura, la longitud mínima del horno será calculada.

El tiempo de calentamiento para el material seleccionada USIBOR 1500, con un espesor máximo de 2mm según *The AP&T [22]* que corresponde con todo lo visto en los demos artículos utilizados ,es de

330 segundos, para lograr 900 °C para poder lograr que en el momento de estampación obtengamos la temperatura de 830°C-800°C tenida en cuenta en la simulaciones.

Habrá que ajustar la disposición de los formatos del horno, y la velocidad del mismo para no producir parones en la prensa de estampación, y que esta pueda trabajar en sus tiempos mínimos logrando los mayores rendimientos.

En base a los visto en otros punto se estiman los siguiente tiempos de ciclo para la estampación:

Tabla 5. Estimación de los tiempos de ciclo para la estampación en caliente

Transferencia de horno a prensa y posicionado	1.5 s
Aproximación del troquel	0.5 s
Estampación	3.5 s
Templado	20 s
Extracción	0.5 s
Total	26 s

En el caso de piezas de derecha e izquierda es importante fabricar los set con un número de piezas par de una sola vez por cuestiones de trazabilidad y simplificación del proceso.

Con este tiempo mínimo y probando diferentes colocaciones de los sets de formatos a estampar, podremos calcular la longitud mínima necesaria de horno lineal de calentamiento.

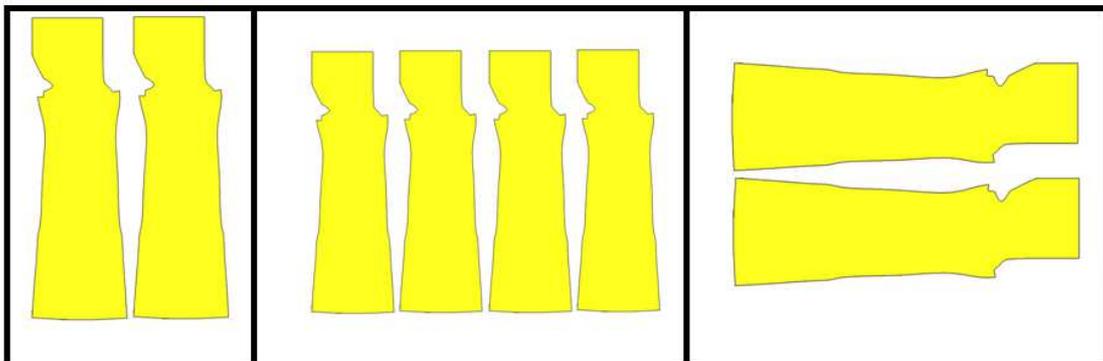


Ilustración 45. Opciones valoradas para disposición de los formatos en el horno de austenización.

Después del análisis con ayuda de una hoja excel de la medidas necesarias de horno, se presentan los siguiente resultados:

Tabla 6. Tamaño mínimo de horno dependiendo de la disposición en el horno.

2 en vertical	14m
4 en vertical	27m
2 en horizontal	20 m

La opción que mas optimizaría el proceso sería un uso de un horno de 27m de longitud, la cual es una longitud bastante grande pero asequible. Cualquiera de la otras opciones también sería factible aunque sin duda saturaran más el horno y la prensa al tener ciclos mayores de fabricación. También supondrán mayores costes de fabricación.

Por último, todo caso habría que plantearse si las disposiciones planteadas entran en la mesa de la prensa de estampado en caliente, aunque a priori no suele dar problemas puede darse el caso para formatos muy largos (pilares A) el tamaño de mesa sea insuficiente.

Finalmente en caso de estar disponible se seleccionara un horno de 27 metros de longitud.

3.8 Selección y pre-dimensionado de las prensas

Habrà que realizar una pre-dimensi3n para la prensa de corte de formato, y otra para el proceso de estampaci3n en caliente, para poder asignar la producci3n a las prensas que m1s se ajusten a las necesidades del proceso.

Prensa de corte de formato

Para realizar una primera estimaci3n de la prensa de corte de formato, a pesar de que con herramientas como FastBlank se consigue un pre-dimensionado r1pido, he optado por realizar los c1lculos manualmente ya que FastBlank no permite la utilizaci3n de espesores variables.

Para el c1lculo ha sido necesario realizar una interpolaci3n entre el esfuerzo necesario para cortar un formato de 2 mm de espesor y el esfuerzo para corta un formato de 1,4mm. Calculado con las consideraciones expuestas por (Lasheras, Jm, 2003).

Tambi3n habrà que distinguir si a la hora de cortar formatos, la disposici3n de los mismos, se presenta tabla resumen de los tonelajes a priori requeridos para las prensas de corte de formato:

Tabla 7. Potencia necesaria de las prensa de corte de formato.(ver anexo c1lculos)

	Espesor Cte 2mm	Espesor Variable(1,4 a 2)
1 formatos por golpe	400 Tm	339 Tm
2 formatos por golpe	800 Tm	679 Tm

Como era de esperar es necesaria m1s potencia para cortar mayor espesor, pero en todos los casos es posible encontrar prensas con esta potencia con relativa facilidad en la industria de la automoci3n.

Para esta operaci3n ser1a posible usar cualquier tipo de prensa, cl1sicamente se utilizan prensas mec1nicas con volante de inercia, pero a ser posible ser1a preferible servo prensas por la ventajas ya comentadas en el estado del arte. Pero debido a la alta inversi3n que supone una prensa de alto tonelaje cualquier prensa a disposici3n que cumpla la potencia m1nima ser1a suficiente.

El hecho de usar prensas de mayor tonelaje implica un ligero incremento de los costes, en este aspecto ser1a un punto a favor de la utilizaci3n de espesor variable.

Prensa para la estampaci3n en caliente

Para el pre-dimensionado de esta parte, se ha optado por la utilizaci3n de un programa especifico para estampaci3n de c1lculo mediante elementos finitos. El programa usado ha sido AutoFormR3 v.2009.

Los par1metros m1s significativos usados para el c1lculo de esta fuerza son:

Material usado: 22MnB5 (sin recubrimiento)

Temperatura del formato: 830 3C

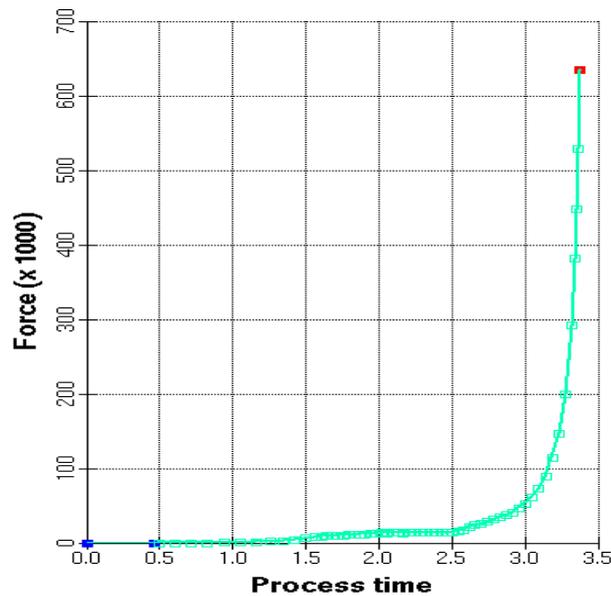
Velocidad de desplazamiento del punz3n : 50 mm/s

Espesor del formato: 2mm

No existe la posibilidad de usar un material 22mnB5 con recubrimiento Al-Si por no estar disponible en su biblioteca de materiales. Se podr1a incluir manualmente pero se estima que las diferencias serian inapreciables.

Ante la imposibilidad de incluir espesor variable, para este pre-dimensionado de la prensa de estampado se opta por usar el espesor m1ximo de la pieza, dotando al c1lculo de un margen de seguridad extra.

Se presenta la gráfica de esfuerzo, calculada hasta cierre del punzón:



Process data

Gráfica 3. En abscisas vemos el tiempo de cerrado del troquel en segundo- En ordenadas la fuerza en N- El valor máximo alcanzado visualizado en AutoForm es : 635069 N

Debido a que la potencia de las prensas es generalmente presentada en Tm, la potencia final para estampar un formato en Tm es; 65Tm.

Tabla 8 Previsión de tonelaje necesario para realizar la estampación en caliente. (Ver anexo calculos)

	E= cte 2mm
2 piezas por golpe	130 Tm
4 piezas por golpe	260 Tm

Para la correcta estampación en caliente, es necesario un gran control tanto en la posición como en la velocidad de desplazamiento en cada punto de la operación de estampado. El tonelaje necesario en el peor de los casos, es asequible para todo tipo de prensas, pero la necesidad de control total, restringe el abanico de prensas posibles a prensas hidráulicas y servo prensas.

La fuerza final mostrada en la grafica será mantenida mientras se temple la pieza, para garantizar un buen contacto y una buena conducción para lograr las tasas necesarias de enfriamiento.

Una servo prensa sería la solución ideal, por la ventajas comentadas en el estado del arte, de ellas la más importante es la capacidad de conseguir una velocidad de aproximación más rápida al formato en caliente, permitiendo así un menor descenso de la temperatura antes de la estampación desde que sale del horno, permitiendo así un menor calentamiento en el horno y menores tiempos de ciclo. Además el ajuste puede ser mucho más preciso permitiendo una repetitividad más alta.

3.9 Operaciones de corte

Aunque el corte laser se pueda considerar a priori fuera del proceso de estampación en caliente, si será incluido, por estar tan estrechamente relacionado con el mismo, será difícil encontrar procesos de estampación en caliente que no tengan en su parte final operaciones de corte por laser.

Por la razones expuestas en el análisis del estado del arte para este punto, el corte laser será elegido, la única duda en este punto, se podría plantear por la elección de una Fiber Laser o de CO2, así como la utilización de un sistema de portal o un robot.

En realidad lo más habitual será adaptarse a la posibilidades que se brinden, respecto a la disposición de un tipo de maquinaria u otra, y a partir de ese momento a partir de las velocidades de corte podremos calcular el ciclo de corte, estas velocidades de corte como es lógico dependerán del espesor, del material y la geometría del mismo.

Para el pilar B que se está tratando suponemos que se tendrán que recortar mediante laser, todo las geometrías internas, y algunas externas para asegurar la tolerancias finales del pilarB, todos los cortes se muestran a continuación:



Ilustración 46. Geometrías exteriores cortadas por laser para asegurar buenas calidad y tolerancias.

Para poder pre-diseñar el tiempo de ciclo debemos conocer exactamente, la geometrías a recortar por laser y sus dimensiones, las cuales se pueden en el anexo de cálculos.

Para este punto me remito al apartado cálculos donde podemos ver qué criterios se han seguido, para el cálculo de tiempo de ciclo de esta operación. De manera general estos han sido las consideraciones tenidas en cuenta.

En total habrá que recortar 2039mm, en 13 pasos. Cada paso supone un incremento de 0,5 s, que será el tiempo que tarda el puntero, de una forma estimada, en pasar de una geometría a otra.

Se ha supuesto una velocidad de corte de entre 50mm/s y 45mm/s es una velocidad muy alta, esta velocidad depende del grosor de la pieza a cortar y del tipo de geometría a cortar.

Con estos datos tenido en cuenta se estima una duración del proceso de corte de exactamente 60.2 segundos por parte. Este tiempo está dentro del tack time calculado y nos permitirá abastecer el montador final.

Podemos observar que es un tiempo de ciclo bastante alto del que resultaría en comparación con realizar otros tipos de corte comentado en el estado del arte. Pero las garantías de calidad, repetitividad, y el hecho que no se produzca desgaste de la herramienta nos hacen optar por la elección de corte laser.

Debido a que las geometrías no son especialmente complicadas, se opta por la elección de un laser de fibra con puntero sujeto en portal, que permite mayor velocidad. Si bien es cierto, posiblemente habrá que fabricar utillaje con giro permitido que son ligeramente más caros que utillajes fijos con los que podría operar un puntero fijado en un robot multieje.

4 Conclusiones

Se consideran logrados los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

En primer lugar el análisis del estado del arte posibilita la toma de decisiones para un pre-diseño de proceso actualizado y completamente factible. Por otro lado, el completo análisis del estado de arte aporta algunas soluciones no tan maduras, que en algunos casos, podrían permitir el desarrollo de procesos que a priori no podrían ser abarcados con técnicas clásicas.

El objetivo de lograr marcar las pautas para el pre-diseño de un proceso también se considera logrado. Se muestra como la primera caracterización del proyecto ha sido diseñada con éxito, teniendo un punto de partida para la estimación de coste de proceso, así como un punto de partida para la implantación final del proceso. También gracias a un pre-diseño como este se puede estimar la saturación de las líneas de fabricación y mediante los datos obtenidos saber si un proyecto puede ser o no abarcado con la maquinaria disponible, y según el caso habría que hacer inversiones o rechazar el proyecto.

También comentar, que, este método de pre-dimensionado, es planteado a modo de guía. Ha sido desarrollado de una forma razonada y con cálculos sencillos, lo cual no quiere decir que se pueda llegar a pre-dimensionar un proceso de una manera más rápida y precisa con las herramientas que tienen a disposición las empresas específicas del sector.

4.1 Resumen de los resultados

Se considera que uno de los resultados de este proyecto, es la muestra de una pauta para la realización de un pre-diseño de proceso de estampación en caliente.

Otro de los resultados es la obtención y definición de las soluciones técnicas y parámetros elegidos para el proceso de estampación en caliente, los cuales se muestran a continuación a modo de síntesis final:

Tabla 9. Resumen del pre-diseño del proceso de fabricación.

Material:	Usibor 1500P®
Tipo de proceso	Estampación directa
Espesor	Variable
Tack time	190,21 s
Tamaño de bobina:	14Tm (Dext: 1498mm Dint: 800mm Ancho: 1413mm)
Tonelaje mínimo de prensa de corte de formato	679 Tm
Tonelaje mínimo de prensa de estampado	260 Tm
Longitud mínima del horno lineal	27 m
Tiempo ciclo de estampado	26 s
Tiempo ciclo de corte	60.2 s (Laser de fibra en portal)

4.2 Principales aportaciones del autor del TFM

Las principales aportaciones del autor del TFM se pueden resumir en dos puntos:

- Recopilación de gran cantidad de información respecto al estado del arte que suple algunas carencias en opinión de los autores respecto a revisiones anteriores como *Karbasian*[8]. Una revisión muy completa que en ocasiones se pierde en exposiciones muy teóricas, poco orientadas a la realización de procesos realmente industrializables, como creo que sí orienta el estado del arte de este proyecto. Así como mencionar que se ha encontrado poca información respecto a estampación en caliente en castellano,

por lo que el autor considera que el hecho de presentar este proyecto en castellano puede ayudar a técnicos que no puedan comprender artículos en Inglés.

- Presentación de un método completo para el pre-diseño de un proceso de estampación en caliente. Si bien es cierto que está basado en cálculos sencillos, algunas consideraciones tenidas en cuenta pueden pasar por alto a personas con conocimiento poco profundo en la materia de estampación en caliente.

4.3 Sugerencia para trabajos futuros

Con la realización de este TFM, se han descubierto varias posibles alternativas para la realización de trabajos futuros, sobre todo a partir del uso de AutoFormR3 que por desgracia fue usado en las últimas etapas de este proyecto con tiempo insuficiente para hacer cambios sustanciales en el mismo. Entre otras razones por lo complejo del programa que no posee un interfaz demasiado sencillo. Algunas de las propuestas irán orientadas a sacar mayor partido a AutoFormR3, en definitiva se enumeran las propuestas:

- De manera general sería interesante contar en trabajos futuros con el apoyo de alguna empresa del sector de la estampación en caliente, se podría haber dado mucha mayor profundidad a este proyecto, ya que usando solo artículos de investigación se corre el riesgo de alejarse de la realidad industrial.

- Estudio de conformabilidad más completo, valorando más posibilidades, y ajustando más parámetros en relación a condiciones reales de trabajo. Para ello se podría usar AutoFormR3 y Pamstamp2G, de este último no se ha logrado conseguir una copia operativa.

- Con apoyo por parte de alguna empresa del sector, se podría llegar a realizar estudios económicos para lograr comparar procesos antiguos y valorar su optimización económica usando técnicas más novedosas.

- Diseño de troqueles refrigerados, puede ser un proyecto un poco más complejo, pero se considera que se abordarían diferentes ámbitos de la ingeniería, como en otros puntos, para este proyecto sería necesaria la colaboración de empresas del sector.

- Por último, se ha detectado un gran número de evoluciones en la estampación en caliente, sería interesante la realización de estudios de arte profundos periódicamente (2-3 años) para seguir la evolución de la misma.

5 Referencias

- (1) Abdulhay B, Bourouga B, Dessain C. Experimental and theoretical study of thermal aspects of the hot stamping process. *Appl Therm Eng* 2011 4;31(5):674-685.
- (2) Adrian Mihail . Desing & Manufacturing a DP980 B-Pillar Inner for the GM Chevy Equinox/Pontiac Torrent. Año desconocido.
- (3) Altan T . Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts. Part I: Process methods and uses. www.stampingjournal.com december 2006.
- (4) Billur, E , Altan, T , 2012. Hot stamping of boron steels. Center for precision forming.
- (5) Casas, B., Latre, D., Rodriguez, N., Valls, I., 2008. Tailor made tool materials for the present and upcoming tooling solutions in hot sheet metal forming. In: 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, Kassel, Germany, pp. 23–35.
- (6) Garcia Aranda, L., Chastel, Y., Fernandez Pascual, J., Dal Negro, T., 2002. Experiments and simulation of hot stamping of quenchable steels. *Advanced Technology of Plasticity* 2, 1135–1140.
- (7) George R, Bardelcik A, Worswick MJ. Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties. *J Mater Process Technol* 2012 11;212(11):2386-2399.
- (8) Karbasian H, Tekkaya AE. A review on hot stamping. *J Mater Process Technol* 2010 11/19;210(15):2103-2118.
- (9) Kolleck R, Veit R, Merklein M, Lechler J, Geiger M. Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels. *CIRP Ann Manuf Technol* 2009;58(1):275-278.
- (10) Lara A, Picas I, Casellas D. Effect of the cutting process on the fatigue behaviour of press hardened and high strength dual phase steels. *J Mater Process Technol* 2013 11;213(11):1908-1919.
- (11) Lasheras José María. *Tecnología mecánica y metrotecnia*.2003
- (12) Lechler, J., Merklein, M., 2008. Hot stamping of ultra strength steels as a key technology for lightweight construction. In: *Materials Science and Technology (MS&T)*, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 1698–1709.
- (13) Michael Rehse. Flexible Rolling of Tailor Rolled Blanks (innovative light weight design in steel). Año desconocido.
- (14) Min J, Lin J, Li J, Bao W. Investigation on hot forming limits of high strength steel 22MnB5. *Computational Materials Science* 2010 8;49(2):326-332.
- (15) Mori K, Maki S, Tanaka Y. Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating. *CIRP Ann Manuf Technol* 2005;54(1):209-212.
- (16) Mun DJ, Shin EJ, Choi YW, Lee JS, Koo YM. Effects of cooling rate, austenitizing temperature and austenite deformation on the transformation behavior of high-strength boron steel. *Materials Science and Engineering: A* 2012 5/30;545(0):214-224.
- (17) Naderi M, Ketabchi M, Abbasi M, Bleck W. Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping. *J Mater Process Technol* 2011 6/1;211(6):1117-1125.
- (18) Naderi M, Ketabchi M, Abbasi M, Bleck W. Semi-hot Stamping as an Improved Process of Hot Stamping. *Journal of Materials Science & Technology* 2011 4;27(4):369-376.
- (19) Neugebauer R., Muller R., Bester A.,. Innovative concept for combining the austenitization and surface coating of steel into one step. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2012;226(7):1281-1284.

- (20) Osakada K, Mori K, Altan T, Groche P. Mechanical servo press technology for metal forming. CIRP Ann Manuf Technol 2011;60(2):651-672.
- (21) So H, Faßmann D, Hoffmann H, Golle R, Schaper M. An investigation of the blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process. J Mater Process Technol 2012 2;212(2):437-449.
- (22) The AP&T. Advanced hot stamping seminar. 2010.
- (23) Thomas Ausman. Hot stamped technologies. Detroit, Michigan, USA 2010.
- (24) V. Ploshikhin, A. Prihodovsky*, J. Kaiser*, R. Bisping*, H. Lindner**, C. Lengsdorf, K. Roll New heating technology for the furnace-free press hardening process. AD