

TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE  
UTILLAJES DE CONFORMADO EN CALIENTE MEDIANTE EL  
CÁLCULO DEL MAPA TÉRMICO DE LA PIEZA ESTAMPADA**

*Presentada por:*

**Borja Fernández Hernández**

*en el*

**Departamento de Ingeniería Mecánica**

*en la*

**Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea**

*para la obtención del grado de*

**Doctor Ingeniero Industrial**

*Dirigida por:*

**Prof. Dr. D. Carlos Angulo Duque**

**Prof. Dr. D. Luis Norberto López de Lacalle Marcaide**

Bilbao, Noviembre de 2020



Dedicado a mi Mujer, Hijas, Padre, Madre, Hermana y Hermano.



Desde estas líneas quiero transmitir mi agradecimiento a todas las personas involucradas en la realización de este trabajo. Quiero dar las gracias de forma especial a Juncal por su constante apoyo y consejo durante estos años y a mis hijas Ane y Leire por inspirarme cada día con su vitalidad. También quiero destacar la aportación de mis padres, Domingo y Cristina, porque gracias a su esfuerzo yo he podido cumplir mis sueños, y a mis hermanos Itziar y Sergio por acompañarme en el camino.

Por otro lado, también me gustaría agradecer la labor incansable de mis directores de tesis, Carlos Angulo y Luis Norberto López de Lacalle por su paciencia, consejos y confianza mostrada.

Apartado especial para toda la gente con la que he compartido mi carrera profesional y me han permitido llegar a desarrollar este trabajo. Beatriz González un espíritu positivo por definición, Ignacio García por dar consejo ante cualquier dilema, Ivan Cerro, Jaime de las Heras, Gerardo Uriguen e Idoia Castrillo por su infinita paciencia y gran profesionalidad y a mis colegas del norte Dr. Oliver Straube y Per-emil Back por el material aportado para hacer viable este trabajo.

Por último, no puedo dejar de agradecer a Gestamp el apoyo prestado durante la realización de este doctorado.

A todos ellos, de corazón, mila esker.



## **GLOSARIOS DE TÉRMINOS Y SIGLAS**

### **RESUMEN**

### **INTRODUCCIÓN**

<b>1. PRÓLOGO</b> .....	1
1.1 Contexto industrial.....	1
1.2 Proceso de fabricación de un troquel en caliente.....	3
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	7
<b>3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS</b> .....	9

### **CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE**

<b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ESTAMPACIÓN EN CALIENTE</b> .....	I-1
1.1 Antecedentes.....	I-2
1.2 Actualidad.....	I-4
1.3 Proceso de estampación en caliente.....	I-5
1.4 Ventajas y desventajas de la estampación en caliente frente a la estampación en frío.....	I-7
1.5 Materiales.....	I-9

1.6	Procesos de estampación en caliente.....	I-16
1.7	Futuro y tendencias.....	I-18
<b>2.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE DE LA SIMULACIÓN MECÁNICA Y TÉRMICA DE LA ESTAMPACIÓN EN CALIENTE.....</b>	<b>I-23</b>
2.1	Principales etapas de simulación de la estampación...	I-24
2.2	Análisis de programas comerciales de estampación...	I-29
<b>3.</b>	<b>FASES DE FABRICACIÓN DE UN TROQUEL DE ESTAMPACIÓN EN CALIENTE.....</b>	<b>I-42</b>
<b>4.</b>	<b>SUPERFICIE DE MECANIZADO DEL TROQUEL.....</b>	<b>I-54</b>
4.1	Superficie de mecanizado final teórica.....	I-55
4.2	Superficie de mecanizado final teórica compensada...	I-56
4.3	Superficie de mecanizado final ciclo mejora.....	I-58
 <b>CAPÍTULO II. MODELIZACIÓN TÉRMICA DEL CONJUNTO</b>		
<b>1.</b>	<b>ESTUDIOS PRELIMINARES DE SIMULACIÓN DEL CONJUNTO.....</b>	<b>II-1</b>
1.1	Test troquel prototipo .....	II-3
1.2	Simulación base: simulación_v0.....	II-6
1.3	Hipótesis nuevas.....	II-10
1.4	Modelo mejorado: simulación_v4.....	II-31
1.5	Conclusiones de los estudios preliminares.....	II-34



<b>2. MODELO DE SIMULACIÓN TÉRMICA DEL CONJUNTO.....</b>	<b>II-35</b>
2.1 Modelo base.....	II-35
2.2 Modelo mejorado.....	II-37
<b>3. MODELO DE SIMULACIÓN DE RECUPERACIÓN TÉRMICA..</b>	<b>II-38</b>
<b>4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>II-40</b>

### **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA**

<b>1. METODOLOGÍA DE TRABAJO PROPUESTA.....</b>	<b>III-1</b>
<b>2. MÉTODO PARA REALIZAR EL MODELO DE CÁLCULO DEL MAPA TÉRMICO Y OBTENCIÓN DE LA RECUPERACIÓN TÉRMICA DIMENSIONAL.....</b>	<b>III-5</b>
2.1 Simulación térmica.....	III-6
<b>3. APORTACIONES AL MODELO.....</b>	<b>III-13</b>

### **CAPÍTULO IV. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO**

<b>1. PROCESO DE ESTAMPACIÓN DEL PILAR A.....</b>	<b>IV-1</b>
1.1 Diseño, fabricación y puesta a punto.....	IV-2
1.2 Ciclo de mejora.....	IV-11
<b>2. MODELOS DE SIMULACIÓN DEL PILAR A.....</b>	<b>IV-15</b>
2.1 Modelo base simulación térmica del conjunto.....	IV-15
2.2 Modelo mejorado simulación térmica del conjunto.....	IV-18

<b>3. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DEL PILAR A.....</b>	<b>IV-19</b>
3.1 Validación del mapa de temperaturas de la pieza.....	IV-19
3.2 Validación dimensional de la pieza.....	IV-24
<b>4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>IV-25</b>

## **CAPÍTULO V. APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

<b>1. APORTACIONES.....</b>	<b>V-1</b>
<b>2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>V-2</b>

## **REFERENCIAS**





## **GLOSARIO DE TÉRMINOS Y SIGLAS**

ACICAE. Cluster de Automoción del País Vasco

AlSi. Aluminio y Silicio

BIW. Body in White o carrocería

CAD. Computer Aided Design o diseño asistido por computadora

CAE. Computer Aided Engineering o ingeniería asistida por computadora o por ordenador

CAM. Computer Aided Manufacturing

CMM. Coordinate Measuring Machine o máquina de medición por coordenadas

CNC. Control Numérico Computarizado

CO<sub>2</sub>. Dióxido de carbono

CTC. Coeficiente de Transferencia de Calor

DOE. Design Of Experiments

GAP. Distancia de separación entre dos elementos

MEF. Método de los Elementos Finitos

RPS. Reference Point System

STL. Stereo Lithography o archivo CAD

SZ. Soft Zone o pieza con distintas propiedades mecánicas

TIER 1. Son los proveedores de primer nivel. Fabricantes de sistemas, subsistemas y componentes completamente terminados para facilitarlos directamente al fabricante de vehículos

TRB. Tailor Rolled Blank o formato laminado con diferentes espesores

TWB. Tailor Welded Blank o formato soldado

2D. Dos Dimensiones

3D. Tres Dimensiones







## RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar una metodología de optimización de superficies de mecanizado de troquel mediante la predicción de deformaciones térmicas debidas a un mapa de temperaturas heterogéneo en la pieza y a su posterior enfriamiento en el ambiente.

Actualmente para obtener las superficies de mecanizado de los troqueles de estampación en caliente se parte de la geometría original del cliente. La forma deseada de la pieza final dependerá en gran manera de la superficie de mecanizado utilizada. La modificación de dicha superficie en los sucesivos ciclos de corrección será la que nos ayude a conseguir la forma final de pieza deseada. En los casos en los que la pieza estampada tenga un mapa de temperatura homogéneo el cálculo arriba descrito es suficiente para obtener resultados óptimos de calidad de pieza sin necesidad de tener que hacer ciclos de corrección ya que no existirá una distorsión térmica debida al enfriamiento. Por otro lado, aquellas piezas que tienen un mapa de temperatura heterogéneo y por tanto una distorsión térmica durante el enfriamiento necesitaran un ciclo de prueba y error durante la fase de puesta a punto para obtener la superficie de mecanizado óptima y así cumplir con los requisitos de cliente.

Para corregir dichas distorsiones térmicas la operación empleada en los casos de menor desviación será un retoque y pulido manual de la superficie, siendo necesario en los casos de mayor desviación repetir el mecanizado de la superficie de trabajo de troquel. Este proceso de prueba y error tiene un coste muy elevado además de un aumento en el periodo de maduración de los troqueles. La estimación de la deformación térmica y su minimización y control permite conseguir la forma final más precisa, reduciendo e incluso eliminando las operaciones de acabado posterior ya sean manuales o mediante máquinas de mecanizado.

El modelo térmico del binomio troquel-pieza se basa en un cálculo térmico lineal. Por un lado, se tiene en cuenta la transferencia de calor de la pieza al troquel mediante la modelización de la superficie de contacto entre ambas y por el otro, la transferencia de calor del troquel al agua de los canales de refrigeración. Tanto en la pieza, como el

troquel, se considera también la transferencia de calor por radiación y convección. Mediante la obtención del mapa de temperaturas, después de la estampación, se puede calcular las deformaciones térmicas finales en la pieza al enfriarse a temperatura ambiente. La última etapa, una vez obtenido el mapa de deformación completo de la pieza, es realizar la ingeniería inversa para su aplicación en la superficie de mecanizado.

El modelo se ha validado mediante la predicción del mapa de temperaturas y la deformación térmica en una pieza estampada industrialmente. Los resultados obtenidos permiten determinar el mapa de temperaturas final de la pieza con un error menor al 10%.

El presente trabajo de investigación se sitúa dentro del campo de la modelización de procesos de simulación de estampación, cuyo avance ha sido constante en los últimos años.





# **INTRODUCCIÓN**



## 1. PRÓLOGO

En la presente memoria se resume la nueva metodología de optimización de superficies de mecanizado de troquel mediante la predicción del mapa térmico, para reducción de coste, mejora de calidad y reducción del periodo de maduración en los troqueles de estampación en caliente.

En el proceso de estampación en caliente tanto los troqueles como las piezas se calientan y enfrían respectivamente durante el proceso, dando lugar a mapas térmicos que se estabilizan cuando la producción alcanza el régimen estacionario.

Se propone realizar un análisis de la transferencia de calor del conjunto troquel-pieza y posterior enfriamiento de la pieza hasta temperatura ambiente para obtener el mapa de deformación térmica. Con esta información y comparándola con los límites establecidos, se compensarán las superficies del troquel en la etapa de mecanizado final dentro del proceso de fabricación del troquel de estampación en caliente.

### 1.1. Contexto industrial

Dentro del campo industrial del sector de automoción, la estampación de chapa en caliente está creciendo de forma exponencial, llegando a ser en algunos modelos de automóvil cerca del 30% de los componentes de la carrocería del vehículo también conocido por Body In White (BIW).

La estampación en caliente es una tecnología de fabricación clave para las piezas de automoción, que consigue una alta productividad, costes reducidos de ensamblaje y piezas de alta resistencia con peso reducido [Joost, 2012], ayudando de esta manera a cumplir a los fabricantes de coches con la estricta reglamentación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Los troqueles de estampación de chapa en caliente son utillajes que se caracterizan por ser unitarios para producir una determinada pieza, siendo especialmente importante tres aspectos tales como la definición del proceso de estampación empleado, superficie de copiado y diseño del sistema de enfriamiento.

Aunque las herramientas actuales para diseño del troquel, permiten analizar el proceso de deformación de la pieza, recuperación elástica del material y distribución de espesores, no contemplan de forma realista la distribución térmica de la pieza al no tener en cuenta los diferentes ajustes geométricos y de contacto derivados de la puesta a punto y un tiempo de ciclo de enfriamiento ajustado a la realidad.

En Europa las empresas del sector, especialmente en el apartado de troqueles de estampación en caliente, se sitúan principalmente en Europa. Esto es debido a que las empresas fabricantes de coches (VW, Audi, Opel, Mercedes...) tienen sus centros tecnológicos en Europa, que es donde diseñan los productos de mayor valor añadido (piezas en caliente, piezas de gran tamaño, piezas complejas, piezas de piel, etc..).

Fuera de Europa los principales competidores se sitúan en Norteamérica y China [Mingtu, 2014]. Este último país, está creciendo fuertemente en los últimos años debido a la gran expansión que están teniendo los productos de estampación de caliente en las carrocerías de los coches. Cabe destacar que varios de los fabricantes de coches están empezando a comprar troqueles de estampación en caliente en China, debido a los bajos costes y reducidos tiempos de ejecución en los troqueles. Por lo tanto, la competencia se ha agudizado mucho a todos los niveles. El mercado de fabricación de troqueles de estampación en caliente es cada vez más global y eso significa que el número de competidores internacionales ha aumentado notablemente.

En España, debida a la gran implantación de las empresas internacionales TIER1 (GESTAMP, BENTELER, MAGNA...) que apuestan por la estampación en caliente como parte de su núcleo de negocio, ha surgido una renovación dentro de las troquelarías que se encuentran en el País Vasco aumentando su porfolio de productos e incluyendo además de los troqueles de estampación en frío los troqueles de estampación en caliente.

Según datos de ACICAE, el sector vasco de la automoción sigue creciendo y alcanzó un nivel de facturación cercano a los 18.400 M€. En el País Vasco se encuentran situadas más de 300 empresas proveedoras de automoción con unas 280 sucursales en el extranjero, dando empleo dentro de Euskadi a unas 41.000 personas y fuera de ella a cerca de 45.000 más. Este sector representa para Euskadi el 25% del PIB de la



comunidad autónoma que supone casi el 50% del total del sector de componentes de automoción en el Estado. Del total de las 300 empresas sitas en Euskadi, el 12% se dedican a la fabricación de troqueles, utillajes y moldes, lo que significa que aproximadamente unas 36 empresas se dedican a este sector.

Actualmente los principales retos de las troquelarías serían:

- a. Reducción de los precios debido a la aparición de nuevos países competidores.
- b. Reducción de los plazos de entrega, para satisfacer la demanda actual del mercado.
- c. Aumentar la competitividad de sus empresas capitalizando el conocimiento adquirido y generando metodologías de trabajo.

De estos retos se extrae que el propósito final de la tesis sea conseguir reducir el coste y periodo de maduración en los troqueles de estampación en caliente (Figura 1) aplicando metodologías de trabajo adecuadas, a la vez que se capitaliza el conocimiento adquirido.



**Figura 1.** Troquel de estampación en caliente.

## **1.2. Proceso de fabricación de un troquel en caliente**

El proceso actual para el diseño y fabricación de un troquel de estampación de caliente se realiza a partir de las especificaciones técnicas del cliente (CAD pieza y plano de tolerancias) y consta de las siguientes fases:

- a. Traspaso comercial del proyecto al equipo de proyecto en el cual se definen los objetivos a cumplir con respecto a la calidad, coste y plazo.
- b. Simulación mecánica y definición del proceso de estampación en caliente. Se realiza la definición desde un punto de vista mecánico asegurando la factibilidad del producto y haciendo especial hincapié en los adelgazamientos, pliegues, engordes y defectos de la pieza estampada en caliente. Previamente se recibe y analiza toda la información enviada por el cliente. Se utilizan herramientas de simulación CAE, teniendo en cuenta la línea de estampación elegida por el cliente y el material y espesor deseado para la pieza objetivo. En esta fase es necesaria la revisión y aceptación por parte del cliente. El entregable de esta fase es el informe de simulación mecánica en el cual quedará reflejado la viabilidad del proceso y los pasos a dar en caso de ser necesario modificar la pieza. Además, se genera el CAD de las superficies de trabajo para el diseño de troquel.
- c. Diseño completo del troquel de estampación en caliente mediante sistemas de diseño 3D, la definición de la lista de materiales (donde vienen identificado todos los elementos que componen el troquel) y definición de las superficies de mecanizado. En esta etapa se realiza el diseño completo y detallado del troquel de estampación en caliente. En esta fase se definen los modelos de fundición, mecanizado de las fundiciones, piezas medianas y grandes, forma y dimensiones de los tacos refrigerados de contacto y las piezas y elementos específicos del troquel (cilindros gas, cilindros hidráulicos, componentes eléctricos...). Como entrada se utiliza las superficies de trabajo de la fase anterior, así como los cuadernos de carga del cliente (documentos en los que vienen las especificaciones técnicas de cliente). En esta etapa hay una revisión y aceptación del diseño por parte del cliente. El entregable de esta fase es el diseño en 3D, planos 2D y lista de materiales.
- d. Simulación térmica. Se realiza la simulación térmica teórica de los tacos refrigerados para obtener una imagen térmica de la pieza en condiciones de producción en serie. La pieza tiene que cumplir con las especificaciones

solicitadas por el cliente. Dentro de esta fase, se calcula la deformación térmica de la pieza durante el enfriamiento. En función del nivel de deformación de la pieza frente al CAD de cliente se mantendrá la superficie obtenida en la simulación mecánica o en caso contrario se generará una superficie compensada de mecanizado dependiendo de si la deformación supera unos límites establecidos. Como entrada se utiliza el diseño 3D de la fase anterior, así como las especificaciones del proceso y de la línea de estampación. El entregable de esta fase es el informe de la simulación térmica y la superficie final de mecanizado de los tacos refrigerados en caso de ser necesaria la compensación.

- e. Compra de materiales. A partir de la lista de materiales se procede a la compra y adquisición de los materiales necesarios para fabricar el troquel. Se suelen catalogar en 5 categorías diferentes: piezas de fundición, placas grandes y medianas, tacos refrigerados de contacto, elementos estándar y piezas pequeñas.
- f. Etapa de mecanizado 2D y desbaste. Preparación del CAM y posterior mecanizado de fundiciones, placas grandes y medianas y tacos refrigerados de contacto. En esta etapa se preparan los programas de mecanizado de las superficies 2D y de desbaste para su posterior mecanizado. Se utilizan herramientas de software CAM y máquinas de CNC de 3 ejes y de 5 ejes.
- g. El pre-ensamblaje del troquel de estampación en caliente. Ensamblado de la función, placas intermedias y tacos refrigerados de contacto (además de aquellos elementos necesarios para asegurar el montaje) con la finalidad de poder realizar el mecanizado final de los tacos refrigerados.
- h. Etapa de mecanizado 3D. Preparación del CAM y posterior mecanizado de la superficie final de los tacos refrigerados. En esta etapa se preparan los programas de mecanizado de las superficies finales para su posterior mecanizado. De la calidad y precisión, tanto en geometría, como en acabado, dependerán los ciclos de mejora posteriores en la fase de puesta a punto. Se utilizan herramientas de software CAM y máquinas de CNC de 3 ejes.

- i. El ensamblaje final del troquel. Etapa en la que se termina de montar todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de troquel en la prensa. Los elementos a montar son: cilindros de gas, cilindros hidráulicos, sistema de refrigeración, sistema eléctrico, y demás elementos aprovisionados de la lista de materiales.
- j. Puesta a punto del troquel de estampación en caliente. En esta etapa se realizan las operaciones manuales necesarias de ajuste y de marmoleo hasta obtener un contacto óptimo entre la pieza y el utillaje. Una vez conseguido se producen piezas (Figura 2), y se mide la distribución térmica de la pieza y la calidad dimensional de la misma. En los casos en los que hay homogeneidad térmica y por lo tanto no hay deformaciones debido a la diferencia de temperaturas, las piezas se encontraran dentro de las especificaciones de cliente. Por otro lado, en aquellas piezas donde existe una heterogeneidad en la temperatura, debida a los diferentes ajustes geométricos de la superficie y diferencias del contacto derivados de la puesta a punto, se han de realizar sucesivos ciclos de ingeniería inversa. Estos ciclos de mejora consisten en un análisis de las mediciones, compensación de las superficies de mecanizado de los tacos refrigerados y posterior mecanizado de los troqueles. Estos ciclos se realizan de forma iterativa hasta que la pieza cumple con las especificaciones definidas por el cliente.



**Figura 2.** Puesta a punto de un troquel estampación en caliente.

- k. Venta de troquel. Una vez que la pieza estampada cumple con las especificaciones de cliente es donde se procede a su embalaje y envío del troquel a la planta productiva.

La oportunidad de mejora se encuentra en la reducción del número de los ciclos de ingeniería inversa, ya que estos ciclos incrementan el coste y el tiempo de entrega del troquel. En muchos casos estos ciclos son los causantes de un sobrecoste elevado en la fabricación del troquel, así como del retraso en la entrega del mismo.

La diferencia entre el resultado real obtenido y el de la simulación se debe, entre otros factores, a) los diferentes ajustes geométricos de la superficie durante la puesta a punto del troquel, b) cálculos de tiempo de refrigeración simplificados, c) un coeficiente de transferencia de calor constante con la distancia de contacto. Por lo tanto, para la reducción de los ciclos de mejora, se propone introducir dichos ajustes en la simulación térmica.

El objetivo de este trabajo es analizar el mapa de temperaturas del producto, una vez enfriado a temperatura ambiente, teniendo en cuenta los factores arribas descritos. Con esta información se calculará la deformación ocasionada y se generará el CAD de las superficies compensadas de mecanizado del troquel.

A la vista de esta problemática y su repercusión negativa, se ha visto interesante la realización de una metodología que mejore el cálculo la deformación térmica de la pieza enmarcada dentro de los retos del sector de la troquelaría.

Este es el contexto de este trabajo y precisamente lo que marca la oportunidad del mismo respecto al entorno industrial.

## **2. OBJETIVOS**

Hay muchos estudios, artículos y tesis realizados sobre la afección de la deformación del conjunto prensa-troquel para la estampación en frío [Del Pozo, 2008], [Firat, 2004], [Firat, 2007]. Por el contrario, no encontramos mucha bibliografía relacionada con la compensación térmica del conjunto troquel-pieza en estampación en caliente. Por lo tanto, una vez analizado el proceso de fabricación de troqueles nos encontramos con la

necesidad de resolver una carencia de la tecnología de estampación en caliente desde una perspectiva industrial.

Los objetivos de esta tesis son los extraídos de la presentación realizada en la introducción. El objetivo más representativo es el de desarrollar una metodología para el análisis de la transferencia de calor del conjunto troquel-pieza y posterior enfriamiento de la pieza hasta temperatura ambiente con el fin de obtener el mapa de deformación para compensar, en caso de necesidad, las superficies de mecanizado del troquel. Este modelo, tras su validación con un caso real, será una herramienta importante que dará una ventaja competitiva a sus usuarios ya que se obtendrán reducciones en plazo y coste.

En este proyecto se busca investigar la modelización del proceso de estampación en caliente para la posible compensación de las superficies de mecanizado del troquel. El interés de la simulación de los procesos productivos como medio para mejorar la eficiencia de los mismos, evitando el procedimiento de prueba y error, es algo muy demandado por el sector de automoción.

Dada la importancia que el sector de matricera tiene en España, este trabajo dará un paso para mejorar el mecanizado de superficies de copia en embutidores de caliente.

Por tanto, los objetivos de partida de este trabajo son:

- a. Proponer una metodología para el análisis de la transferencia de calor del conjunto troquel-pieza teniendo en cuenta los diferentes ajustes geométricos de la superficie durante la puesta a punto del troquel, un cálculo de tiempo de refrigeración más preciso y un coeficiente de transferencia de calor variable la distancia de contacto. Con el mapa de temperaturas obtenido se calculará la deformación final de la pieza estampada en caliente mediante un software de estampación genérico y se podrá generar la superficie compensada final para el mecanizado de los tacos refrigerados.
- b. Aplicar la metodología a una referencia real que demuestre la viabilidad industrial del método, presentando las posibilidades de integración entre las etapas de diseño y fabricación.

El modelo de cálculo deformación térmica de la pieza debe ser ejecutable en un software comercial, con estaciones de trabajo estándares y utilizando tiempos de computación aceptables.

### **3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

Este trabajo consta de 5 capítulos, además de la introducción previa.

En el capítulo I se abordan los antecedentes y el contexto donde se realiza este trabajo de investigación. En primer lugar, se explica la evolución del mercado de automoción, así como la descripción del proceso de estampación en caliente, para poder comprender cada uno de los elementos que componen dicho proceso. En segundo lugar, se hace una revisión del estado del arte de la simulación mecánica y térmica de la estampación en caliente. Para ello se revisarán los principales programas de elementos finitos utilizados con tal fin. En tercer lugar, se hace una descripción detallada de las diferentes fases de fabricación de un troquel de estampación en caliente analizando las fases de ingeniería, mecanizado, montaje y finalizando con la puesta a punto del troquel. En cuarto y último lugar, se presenta el concepto de diseño de superficie de un troquel dentro del ciclo de fabricación de un troquel.

El capítulo II presenta la modelización desde el punto de vista conceptual. En primer lugar, se hace una explicación detallada de las diferentes modelizaciones realizadas. Como dentro de cualquier modelo se realizan simplificaciones de la realidad y para ello se presentarán los estudios preliminares de la simulación del conjunto troquel-pieza. En segundo lugar, se presentan los modelos del conjunto troquel-pieza. En tercer lugar, se revisa simplificada los conceptos de la simulación de recuperación térmica aplicada. En cuarto y último lugar, se presentan los resultados y conclusiones.

El capítulo III presenta la metodología de trabajo propuesto. Además, se explica el método para realizar, en última instancia, la superficie compensada final para el mecanizado de los tacos refrigerados. Al final del capítulo se enumeran las aportaciones realizadas al modelo.

El capítulo IV se dedica a la validación del modelo propuesto, realizando la comparativa de las medidas térmicas y dimensionales obtenidas de forma experimental de una pieza estampada en caliente, frente a los valores calculados de la pieza con los modelos base y mejorado, este último modelo con las aportaciones estudiadas dentro de la tesis. En primer lugar, se describe el proceso de estampación en caliente de la pieza seleccionada. En segundo lugar, se hace una comparativa entre el resultado térmico de la simulación frente a la pieza teórica y, en tercer lugar, se hace una comparativa de validación dimensional de la pieza real medida frente a la simulada. Finalmente se presentan los resultados y conclusiones del capítulo.

En el capítulo V se presentan las principales aportaciones de la investigación, y se proponen las líneas futuras de investigación.

Por último, se recopila la bibliografía utilizada a lo largo de estos años de trabajo.

No concluiremos este apartado introductorio sin reconocer que a medida que aumentaba nuestro conocimiento sobre la modelización de los procesos térmicos, hemos ido constatando la magnitud del esfuerzo que todavía queda por hacer en lo referente a la modelización de los mismos para su integración a nivel industrial.







## **REFERENCIAS**



- [Abdollahp., 2016] Abdollahpoora, A.; Xiangjun, C.; Pereira, M.; Xiaob, N.; Rolfe, B. Sensitivity of the final properties of tailored hot stamping components to the process and material parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 228, 2016, pp 125–136.
- [Abdulhay, 2012] Abdulhay, B.; Bourouga, B.; Dessain, C. Thermal contact resistance estimation: influence of the pressure contact and the coating layer during a hot forming process. *International Journal Materials*, 2012, pp 183-197.
- [Alsmann, 2012] Alsmann, M. Volkswagen experience on press hardening. *International Conference on Accuracy in Forming Technology, ICAFT*, 2012.
- [Alzaga, 2003] Alzaga, A., Yalniz, Z. Collaborative development of tools and dies in SMEs networks. *CIRP Design Seminar, Grenoble*, 2003.
- [Aranda, 2003] Aranda, L.G.; Ravier, P.; Chastel, Y. Hot Stamping of Quenchable Steels: Material Data and Process Simulations. *IDDRG Conference Proceedings*, 2003, pp 64–166.
- [Arbelaez, 2017] Arbelaez, R. Side Impact Challenges for Steel Vehicle Structures. *Insurance Institute for Highway Safety*, 2017.

- [Arrizubieta, 2019] Arrizubieta, J.; Cortina, M.; Ostolaza, M.; Ruiz, J.; Lamikiz, A. Case Study: Modeling of the cycle time reduction in a B-Pillar hot stamping operation using conformal cooling. 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, Procedia Manufacturing 41, 2019, pp 50–57.
- [ASTM E8-16, 2013] ASTM E8-16. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material. ASTM International, PA, USA, 2013.
- [AutoForm, 2018] AutoForm, AutoForm Forming Solver Software. [Online]. Available:  
<https://www.autoform.com/es/productos/autoform-forming/autoform-formingsolver/autoform-phasechange-plugin/> [Accessed: 10-Jun-2018].
- [AutoForm, 2020] AutoForm, Autoform Simulation Software. [Online]. Available:  
<https://www.autoform.com/en/products/autoform-forming/autoform-formingsolver/autoform-thermo-plugin/>. [Accessed: 01-Apr-2020].
- [Banik, 2011] Banik, J.; Lenze, F.; Sikora S.; Laurenz, A. Tailored Properties - A Pivotal Question for Hot Forming. 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High Performance Steel, Kassel, Germany, 2011.
- [Bao, 2019] Bao J.; Qi L.; Yu, G.; Jian, W.; Weiji, L. Research on a New Localized Induction Heating Process for Hot Stamping Steel Blanks. International Journal Materials, 2019.

- [Bardelcik, 2010] Bardelcik, A.; Salisbury, C.; Winkler, S.; Wells, M.; Worswick, M. Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel. *International Journal of Impact Engineering* 37, 2010, pp 694–702.
- [Behrens, 2013] Behrens, B.; Bach, F.; Diekamp, M.; Hubner, S.; Nurnberger, F.; Schrodter, J.; Wolf, L.; Moritz, J. Process Time Reduction of Hot Stamping by Means of Early Extraction from the Press. 4th International Conference Hot Steel Metal Forming of High- Performance Steel, Lulea, Sweden, 2013.
- [Berglund, 2008] Berglund, G. The history of hardening boron steels in northern Sweden. 1st International Conference Hot Steel Metal Forming of High- Performance Steel, Kassel, Germany, 2008.
- [Berger, 2017] Berger, R. Automotive metal components for car bodies and chassis. Global market study, Munich, 2017.
- [Bhargav, 2017] Bhargav, P. A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behavior of hot stamping steels. PhD thesis, Erlagen, 2017.
- [Billur, 2017] Billur, E. Hot formed steels from Metallurgy of steels and blank materials. Woodhead Publishing, 2017, pp 387-411.
- [Billur, 2019] Billur, E. Hot stamping of Ultra High Strength Steels - From a Technological and Business Perspective, Springer, 2019.

- [Bolin, 2015] Bolin, M.; Wennan, Y.; Xiangdong, W.; Xinjun, L.; Min, W. Study on temperature distribution of HSS in hot FLD test. *Applied Thermal Engineering* 89, 2015, pp 144-155.
- [Caron, 2014] Caron, R.; Daun, J.; Wells, A. Experimental heat transfer coefficient measurements during hot forming die quenching of boron steel at high temperatures. *International Journal Heat Mass Transfer* 71, 2014, pp 396-404.
- [Chang, 2016] Chang, Y.; Tang X.; Zhao, K.; Hu, P.; Wu, Y. Investigation of the factors influencing the interfacial heat transfer coefficient in hot stamping. *Journal Materials Process Technology* 228, 2016, pp 25-33.
- [Chantzis, 2020] Chantzis, D.; Liu, X.; Politis, D.; Fakir, O.; Chua, T.; Shi, Z.; Wang, L. Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020.
- [Cortina, 2018] Cortina, M.; Arrizubieta, J.I.; Calleja, A.; Ukar, E.; Alberdi, A. Case Study to Illustrate the Potential of Conformal Cooling Channels for Hot Stamping Dies Manufactured Using Hybrid Process of Laser Metal Deposition (LMD) and Milling. *Metals*, 2018, pp 102.
- [Davies, 1997] Davies, J.R. *ASM Specialty Handbook—Heat-Resistant Materials*. ASM Materials, OH, USA, 1997.



- [Del Pozo, 2008] Del Pozo, D.; López de Lacalle, L.N.; López, J.M.; Hernández, A. Prediction of press/die deformation for an accurate manufacturing of drawing dies. *International Journal Advance Manufacturing. Technology* 37, 2008, pp 649–656.
- [Dorribo, 2020] Dorribo, D.; Et, A. Development of Models for Resistance Spot Weld Failure Simulation on Advanced High strength steel sheets based on an energetic fracture criterion. *CHS2 Lulea*, 2020.
- [Eller, 2016] Eller, T. K. Modeling of Tailor Hardened Boron Steel for crash simulation. PhD thesis, University of Twente, 2016.
- [Eriksson, 2019] Eriksson, K.; Lindgren, S.; Muskos, P. Hot Stamping of 1800-2000 Mpa. *CHS2, Lulea, Suecia* 2019.
- [ESI, 2020] ESI, Pam\_stamp Simulation Software. [Online]. Available: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/sheet-metal-forming/applications/hot-forming-press-hardening>. [Accessed: 01-Apr-2020].
- [Fekete, 2017] Fekete, J.; Hall, R. Design of auto body: materials perspective. Woodhead Publishing, 2017, pp 1-18.
- [Fernández, 2019] Fernández B.; González B.; Artola, G.; López de Lacalle, N.; Angulo, C. A Quick Cycle Time Sensitivity Analysis of Boron Steel Hot Stamping. *Metals* 2019, 9, 235.

- [Firat, 2004] Firat, M. Sheet metal spring-back prediction including initial plastic anisotropy. Proceeding of third international conference on design and production of dies and molds, Bursa, 2004, pp 248-254.
- [Firat, 2007] Firat, M., Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part III – Stamping die-face design. *Materials and Design*, Vol 28, No. 4, 2007, pp. 1311-1320.
- [Gaitonde, 2008] Gaitonde, V.N.; Karnik, S.R.; Davim, J.P. Taguchi multiple-performance characteristics optimization in drilling of medium density fiberboard (MDF) to minimize delamination using utility concept. *Journal Materials*, 2008, pp 73-78.
- [George, 2012] George, R.; Bardelcik, A.; Worswick, M. Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties. *Journal of Materials Processing Technology* 212, 2012, pp 2386– 2399.
- [González, 2019] González, B.; Fernández, B.; Artola, G.; Muro, M.; Sanz, Á.; López de Lacalle, L.N. Failure- Analysis Based Redesign of Furnace Conveyor System Components: A Case Study. *Metals* 2019, 9, 816.
- [Gorriño, 2016] Gorriño, A.; Angulo, C.; Muro, M.; Izaga, J. Investigation of thermal and mechanical properties of quenched high-strength steels in hot stamping. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47, 2016, pp 1527–1531.

- [Gröger, 2010] Gröger, S.; Burkhardt, T.; Eckert, U.; Kühn, C. New characterization methods for the assessment and the design of friction optimized surfaces. International Chemnitz Manufacturing Colloquium, 2010, pp 839-846.
- [Gui, 2013] Gui, Z.; Zhang, Y.; Li, H.; Ma, M. Hot Stamping and Blank Designing for a Vehicle Bumper Using Ultra High Strength Steel (UHSS). Advanced Materials Research, 2013, pp 690-693, pp 2240-2244.
- [Güler, 2014] Güler, H.; Özcan, R. Comparison of hot and cold stamping simulation of Usibor 1500 prototype model. 2014.
- [Hande, 2013] Hande, G. Investigation of Usibor 1500 Formability in a Hot Forming Operation. Materials Science (Medziagotryra), Vol. 19, No. 2, 2013
- [Hardell, 2008] Hardell, J.; Prakash, B. High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al-Si-coated high-strength steel. Tribology International 41, 2008, pp 663–671.
- [He, 2016] He, B.; Ying, L.; Li, X.; Hu, P. Optimal design of longitudinal conformal cooling channels in hot stamping tools. Applied Thermal Engineering 106, 2016, pp 1176–1189.
- [Hochhol., 2011] Hochholdingera, B; Hora, P.; Grassb, H.; Lippb, A. Simulation of the Press Hardening Process and Prediction of the Final Mechanical Material Properties. Numisheet, 2011.

- [Hoffmann, 2007] Hoffmann, H.; So, H.; Steinbeiss, H. Design of hot stamping tools with cooling system. *CIRP Ann-Manufacturing Technology* 56, 2007, pp 269–272.
- [Hund, 2012] Hund, R. Advanced Tools and Systems for Hot Stamping of Components with Complex Shape. *CHS2*, 2012, Hanover.
- [Hunga, 2014] Hunga, T.; Tsaia, P.; Chena, F.; Huangb, T.; Liuc, W. Measurement of heat transfer coefficient of boron steel in hot stamping. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, 2014, pp 19-24.
- [Hyun, 2014] Hyun, H.; JongWon C.; Frédéric, B.; Dong, W.; Myoung-Gyu, L. Thermo-mechanical-metallurgical modeling for hot-press forming in consideration of the prior austenite deformation effect. *International Journal of Plasticity* 58, 2014, pp 154–183.
- [Joost, 2012] Joost, W. Reducing Vehicle Weight and Improving US Energy Efficiency Using Integrated Computational. *Materials Engineering, JOM*, vol. 64, no. 9, 2012, pp 1032-1038.
- [Jue, 2017] Jue, L.; Yanli, S.; Lin, H.; Jianing, L.; Yuhan, S. Influence of thermal deformation conditions on the microstructure and mechanical properties of boron steel. *Materials Science & Engineering A* 701, 2017, pp 328–337.

- [Junghwan, 2018] Junghwan, C.; Beomjoon, C.; Soojeong, H.; Youkeun, O.; Seungwon, S. Numerical modeling of the thermal deformation during stamping process of an automotive body part. *Applied Thermal Engineering* 128, 2018, pp 159–172.
- [Junying, 2011] Junying, M.; Jianping, L.; Lijiu, X.; Jiayue, L. Indirect Hot Stamping of Boron Steel 22MnB5 for an upper B-pillar. *Advanced Materials Research Vols. 314-316*, 2011, pp 703-708.
- [Kang, 2015] Kang, J.; Omer, E.; Haoxiang, G.; Liliang, W.; Determination of heat transfer coefficient for hot stamping process. *Materials Today: Proceedings 2S*, 2015, pp 434–439.
- [Kang, 2016] Kang, J.; Xiaochuan, L; Omer, E.; Jun, L.; Qunli, Z.; Liliang, W. Determination of the Interfacial Heat Transfer Coefficient in the Hot Stamping of AA7075. Published by EDP Sciences, 2016.
- [Karbasiyan, 2010] Karbasiyan, H.; Tekkaya, A.E. A review on hot stamping. *Journal Materials Processing Technology*, 210, 2010, pp 2103-2118.
- [Kerström, 2006] Kerström, P. A Modeling and simulation of hot stamping. PhD thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2006.

- [Kolleck, 2004] Kolleck, R. Hot forming and cold forming - two complementary processes for lightweight auto-bodies. Proceedings from the international conference New Development in Sheet Metal Forming Technology, Stuttgart, Germany, 2004, pp 235–44.
- [Kolleck, 2008] Kolleck, R.; Veit, R.; Hofmann, H.; Lenze, F.J. Alternative heating concepts for hot sheet metal forming. Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, Germany, Kassel, 2008, pp 239-246.
- [Lechler, 2008] Lechler, J. Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen, PhD Thesis, University of Erlangen-Nuremberg, 2008.
- [Lee, 2018] Lee, S.H.; Park, J.; Park, K.; Kweon, D.K.; Lee, H.; Yang, D.; Park, H.; Kim, J. A Study on the Cooling Performance of Newly Developed Slice Die in the Hot Press Forming Process. *Metals* 8, 2018, pp 947.
- [Mendiguren, 2016] Mendiguren, J.; Ortubay, R.; Saenz de Argandoña, E.; Galdos, L. Experimental characterization of the heat transfer coefficient under different close loop controlled pressures and die temperatures. *Applied Thermal Engineering* 99, 2016, pp 813-824.

- [Mengmeng, 2016] Mengmeng, L.; Zhengwei, G.; Xin, L.; Hong, X. Optimal Design for Cooling System of Hot Stamping Dies. J-STAGE 23, 2016.
- [Merkleina, 2016] Merkleina, M.; Wielanda, M.; Lechnera, M.; Bruschi, S.; Ghiottib, A. Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review. Journal of Materials Processing Technology 228, 2016, pp 11–24.
- [Min, 2016] Min, W.; Chun, Z.; Haifeng, X.; Bing, L. Inverse evaluation of equivalent contact heat transfer coefficient in hot stamping of boron steel. International Journal Advance Manufacturing Technology, 2016.
- [Mingtú, 2014] Mingtu, M.; Yisheng, Z.; Leifeng, S.; Wang, J. Research and Progress of Hot Stamping in China. China Automotive Engineering Research Institute Co., 2014.
- [Mori, 2017] Mori, K.; Bariani, P.F.; Behrens, B.A.; Brosius, A.; Bruschi, S.; Maeno T.; Merklein, M.; Yanagimoto, J. Hot stamping of ultra-high strength steel parts. CIRP Annual-Manufacturing Technolgy 66, 2017, pp 755-777.
- [Moria, 2017] Moria, K.; Maenob, T.; Sakagamia, M.; Ukaic, M.; Agatsumac, Y. Two-stage progressive-die hot stamping of ultra-high strength steel parts using resistance heating. Procedia Engineering 207, 2017, pp 681–686.
- [Muro, 2018] Muro, M.; Artola, G.; Gorriño, A.; Angulo, C. Effect of the martensitic transformation on the stamping force and cycle time of hot stamping parts. Metal 385, 2018, pp 1–13.

- [Muvunzi, 2017] Muvunzi, R.; Dimitrova, D. M.; Matopea, S.; Harms, T.M. Heat transfer in a hot stamping process: a review. *R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering* 33, 2017, pp 75-84.
- [Muvunzi, 2018] Muvunzi, R.; Dimitrova, D.M.; Matope, S.; Harms, T.M. Development of a model for predicting cycle time in hot stamping. *Procedia Manufacturing* 21, 2018, pp 84–91.
- [Naderi, 2007] Naderi, M.; Uthaisangsuk, V.; Prah, U.; Bleck, W. A Numerical and Experimental Investigation into Hot Stamping of Boron Alloyed Heat Treated Steels. *Steel Research International* 79, 2008.
- [Nakagawa, 2018 a] Nakagawa, Y.; Mori, K.; Maeno, T. Spring-back-free mechanism in hot stamping of ultra-high-strength steel parts and deformation behavior and quenchability for thin sheet. *International Journal Advance Manufacturing Technology* 95, 2018, pp 459–467.
- [Nakagawa, 2018 b] Nakagawa, Y.; Moria, K.; Maeno, T.; Nakao Y. Reduction in holding time at bottom dead center in hot stamping by water and die quenching. *7th International Conference on Metal Forming, Metal Forming, Toyohashi, Japan 2018*, pp 16-19.
- [Nan, 2016] Nan, L.; Chaoyang, S.; Guob, N.; Mohameda, M.; Lina, J.; Matsumotoc, T.; Chao, L. Experimental investigation of boron steel at hot stamping conditions. *Journal of Materials Processing Technology* 228, 2016, pp 2–10.



- [Neugebauer, 2006] Neugebauer, R.; Schieck, F.; Polster, S.; Mosel, A.; Rautenstrauch, A.; Schönherr, J.; Pierschel, N. Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures. *Annals of the CIRP* 55, 2006, pp 793–816.
- [Neugebauer, 2012] Neugebauer, R. Press hardening — An innovative and challenging technology. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 12, Issue 2, June 2012, Pages 113-118.
- [Neugebauer, 2017] Neugebauer, R.; Schieck, F.; Polster, S.; Mosel, A.; Rautenstrauch, A.; Schönherr, J.; Pierschel, N. Press hardening—An innovative and challenging technology. *Civil Mechanical Engineering* 12, 2012, pp 113–118.
- [Ota, 2019] Ota, E.; Yogo, Y.; Iwata, N.; Nishigaki, H. CAE-based process design for improving formability in hot stamping with partial cooling. Toyota Central R&D Labs., Inc., 41-1 Yokomichi, Nagakute, Aichi, Japan, 2019, pp 480-1192.
- [Palaniswamy, 2014] Palaniswamy, H.; Yadav, A.; Kaya, S.; Altan, T. New Technologies to Form Light Weight Automotive Components. Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, 2014.
- [PamStamp, 2020] PamStamp, Hot Forming - From Customer Request to Virtual Reality. [Online]. Available: <https://www.esi-group.com/es/soluciones-de-software/procesos-y-fabricacion/procesos-de-estampacion/pam-stamp/hot-forming>. [Accessed: 01-Apr-2020]

- [Pereira, 2013] Pereira, M.; Weiss, M.; Bernard, F.; Rolfe, B.; Hilditch, T. The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 66, 2013, pp 44–53.
- [Pradeep, 2009] Pradeep, L.; Kumar, K.; Kailas, V. Influence of friction during forming processes—a study using a numerical simulation technique. *International Journal Advance Manufacturing Technology*, 2009, pp 1067–1076.
- [Salomonsson, 2009] Salomonsson, P.; Oldenburg, M.; Akerström, P.; Bergman, G. Experimental and numerical evaluation of the heat transfer coefficient in press hardening. *Steel Research International* 80, 2009, pp 841-845.
- [Schmitt, 2018] Schmitt, J.; lung, T. New developments of advanced high strengths steels for automotive applications. *Comptes rendus physique*, 2018.
- [Sester, 2011] Sester, M.; Selig, M.; Feuser, P.; & Roll, K. Simulation of Tailored Tempering with a Thermo-Mechanical-Metallurgical Model in AutoForm (Plus). *AIP Conference Proceedings* 1383, 2011, pp 610.
- [Shapiro, 2009] Shapiro, A. Finite Element Modeling of Hot Stamping. *Steel research international* Volume 80, 2009, pp 658-664.
- [Taha, 2016] Taha, Z.; Shaharudin, H. Estimation of Thermal Contact Conductance between Blank and Tool Surface in Hot Stamping Process. *Materials Science and Engineering* 114, 2016.

- [Tamarelli, 2011] Tamarelli, C. The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications. AutoSteel, Michigan, 2011.
- [Tao, 2014] Tao, L.; Hong-Wu, S.; Shi-Hong, Z.; Ming, C.; Wei-Jie, L. Cooling Systems Design in Hot Stamping Tools by Thermal-Fluid-Mechanical Coupled Approach. Advances in Mechanical Engineering, 2014.
- [Taylor, 2018] Taylor, T. A critical review of automotive hot stamped sheet steel from an industrial perspective, Material Science and Technology 34, 2018, pp 809-861.
- [Thawin, 2020] Thawin, H.; Buhla, J.; Bambacha, M. Fast Approach for Optimization of Hot Stamping Based on Machine Learning of Phase Transformation Kinetics. Chair of Mechanical Design and Manufacturing, Brandenburg University of Technology, Cottbus, Germany, 2020.
- [Toshinobu, 2013] Toshinobu, N.; Kojima, N. Effect of quenching rate on hardness and microstructure of hot-stamped steel. Journal of Alloys and Compounds 577S, 2013, pp 549–554.
- [Wang, 2017] Wang, L.; Zhu, B.; Wang, Y.; An, X.; Wang, Q.; Zhang, Y. An online dwell time optimization method based on parts performance for hot stamping. Procedia Engineering 207, 2017, pp 759–764.

- [Wieland, 2011] Wieland, M.; Merklein, M. Wear Behavior of Uncoated and Coated Tools With Respect to Different Loading Conditions. Proceedings of the 3rd International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2011, pp 361-368.
- [Xiaorong, 1998] Xiaorong, X.; Sachs, E.; Allen, S.; Cima, M. Designing conformal cooling channels for tooling. MIT Cambridge, MA 02139, 1998.
- [Yanagimotol, 2018] Yanagimotol, J.; Oyamada, K.; Springback of High-Strength Steel after Hot and Warm Sheet Formings. The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2018.
- [Ying, 2011] Ying, C.; Zhao-huan, M.; Liang, Y.; Xiao-dong, L.; Ning, M.; Ping, H. Influence of Hot Press Forming Techniques on Properties of Vehicle High Strength Steels. Journal of iron and steel research, International 18, 2011, pp 59-63.
- [Ying, 2014] Ying, X.; Zhong, S. Design parameter investigation of cooling systems for UHSS hot stamping dies. International Journal Advanced Manufacturing Technology 70, 2014, pp 257–262.
- [Zhang, 2020] Zhang, L. Study on Phase Transformation in Hot Stamping Process of USIBOR® 1500 High-Strength Steel. Metals, 2020.

- [Zheng, 2014] Zheng, Q.; Aoyama, T.; Shimizu, T.; Yang, M. Experimental and numerical analysis of spring-back behavior under elevated temperatures in micro bending assisted by resistance heating. *Procedia Engineering* 81, 2014, pp 1481–1486.



eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA  
ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

