

GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CONFORMADO EN CALIENTE.  
PROCESO DE ESTAMPACION EN  
CALIENTE DE UN PILAR B***

**Alumno/Alumna** Martín, de Castro, Eneko

**Director/Directora (1):** Lobato, Gonzalez, Roberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 20 de octubre de 2019



## 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 los métodos tradicionales de estampación en frío.

Este proyecto consiste en el diseño del proceso de fabricación de un componente para un cliente del sector de la automoción. En el mismo se diseñan los parámetros de la estampación del componente. Además, se selecciona el material de la pieza más apropiado y la maquinaria a utilizar.

Todo ello se realiza mediante simulación por ordenador, lo cual facilita la optimización del proceso productivo. Se estudian, por tanto, los resultados obtenidos variando los parámetros propios de los procesos de conformado plástico de metales, teniendo en cuenta factores como la productividad y el coste.

## ABSTRACT

Hot stamping is a current manufacturing process used to create automotive structural parts. This technique achieves parts with the required safety features, providing a reduction in the weight of them compared to traditional cold stamping methods.

This project consists of the design of the manufacturing process of a component for a customer in the automotive sector. It designs the parameters of the components stamping. In addition, the most appropriate part material and the machinery to be used are selected.

All this is done by computer simulation, which makes easier the optimization of the production process. The results obtained are therefore studied by varying the parameters of the metal plastic forming processes, taking into account factors such as productivity and cost.

## LABURPENA

Beroko estanzazioa gaur eguneko prozesua da autoen egiturazko zatiak fabrikaziorako. Teknika honen bitartez eskatutako segurtasun ezaugarriak betetzen dituzten pieza lortzen dira, beren pisuaren murriztapen nabarmena izanda hotzezko estanzazio metodo tradizionalekin konparatuz.

Proiektu hau, automobilgintzako sektoreko bezero batentzako osagai baten fabrikazio prozesuaren diseinuan datza. Osagaiaren estanzazio parametroak bertan diseinatzen dira. Gainera, pieza fabrikatzeko materialik egokiena eta erabiltzeko makineria aukeratzen dira.

Hura guztia ordenagailu bidezko simulazio bidez egiten da, zeinak produkzio prozesuaren optimizazioa errazten du. Beraz, produktibitatea eta kostua kontuan izanda, metalen konformatu plastikoaren prozesuen berezko parametroak aldatuz, lortutako emaitzak aztertzen dira.

# ÍNDICE

<b>1. DOCUMENTO 1- MEMORIA</b> .....	0
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. CONTEXTO.....	2
1.3. OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	5
1.4. BENEFICIOS QUE APORTA EL PROYECTO .....	5
1.4.1. Beneficios económicos.....	5
1.4.2. Beneficios técnicos.....	6
1.4.3. Beneficios sociales.....	6
1.5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS .....	7
1.6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA .....	15
<b>2. DOCUMENTO 2- METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO</b> .....	0
2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS .....	1
2.1.1. Paquetes de trabajo.....	1
2.1.2. Hitos.....	4
2.1.3. Tareas.....	4
2.2. CRONOGRAMA.....	5
<b>3. DOCUMENTO 3- ASPECTOS ECONÓMICOS</b> .....	0
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO.....	1
<b>4. DOCUMENTO 4- CONCLUSIONES</b> .....	0
4.1. CONCLUSIONES.....	1
<b>5. DOCUMENTO 5- BIBLIOGRAFIA</b> .....	0
5.1. BIBLIOGRAFIA.....	1
<b>6. DOCUMENTO 6- ANEXOS</b> .....	0
6.1. ANEXO I: NORMATIVA APLICABLE.....	1
6.2. ANEXO II PLANOS Y ESQUEMAS.....	2
6.3. ANEXO III ACERO 22MnB5 .....	3
6.4. ANEXO IV RESULTADOS .....	4

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Aumento del uso de estampación en caliente en piezas de vehículos.....	2
Imagen 2. Piezas fabricadas mediante estampación en caliente .....	3
Imagen 3. Fabricas presentes en España.....	3
Imagen 4. Disposición pilar B .....	4
Imagen 5. Prueba de prensas.....	5
Imagen 6. Simple Efecto.....	12
Imagen 7. Doble Efecto.....	13
Imagen 8. Triple Efecto .....	14
Imagen 9 Matriz.....	15
Imagen 10 Pisador .....	15
Imagen 11 Punzón .....	16
Imagen 12 Chapa de partida.....	16
Imagen 13 Diagrama FLD de varios materiales .....	18
Imagen 14 Definición de parámetros 1 .....	19
Imagen 15 Definición de parámetros 2.....	20
Imagen 16 Definición de parámetros 3.....	21
Imagen 17. Parámetros Chapa .....	22
Imagen 18 Parámetros herramientas.....	22
Imagen 19 Walls .....	23
Imagen 20 Gravity Fase Inicial .....	4
Imagen 21 Gravity Fase Final.....	4
Imagen 22 Adelgazamiento.....	5
Imagen 23 Temperatura de la Chapa.....	6
Imagen 24 Temperatura de la Matriz.....	7
Imagen 25 Temple 0-4s.....	8
Imagen 26 Temple 8-20s .....	8
Imagen 27 Fase Austenita .....	10
Imagen 28 Fase martensita.....	11
Imagen 29 Temperatura tras Templado .....	12
Imagen 30 Temperatura tras enfriamiento.....	13
Imagen 31 Fase martensita tras templado.....	14
Imagen 32 Fase martensita tras enfriamiento.....	15
Imagen 33 Dureza tras Templado.....	16
Imagen 34 Dureza tras enfriamiento .....	17

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de priorización. Elección del material.....	9
Tabla 2. Matriz priorización de la prensa.....	11
Tabla 3. Tareas.....	4
Tabla 4. Cronograma .....	5
Tabla 5. PRESUPUESTO .....	1
Tabla 6 Tasa de enfriamiento.....	9
Tabla 7 Transformación de fases.....	9

GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CONFORMADO EN CALIENTE.  
PROCESO DE ESTAMPACION EN  
CALIENTE DE UN PILAR B***

**1. DOCUMENTO 1- MEMORIA**

**Alumno/Alumna:** Martin, de Castro, Eneko

**Director/Directora (1):** Lobato, González, Roberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 20 de octubre de 2019

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta el proyecto de diseño de un proceso de conformación en caliente de un pilar B para un automóvil. El pilar B es una pieza fundamental en la estructura, que además de ejercer de soporte para el techo, en coches con cuatro puertas, tiene una gran importancia en el aspecto de la seguridad, evitando males mayores en el caso de colisiones laterales, por ejemplo. Por todo esto, es necesario que posea gran resistencia.

Otra de las características requeridas para este tipo de elementos, es la ligereza. Es primordial lograr gran resistencia con espesores reducidos de chapa, por una parte, por el enorme ahorro de material que supone y por otra, porque cuanto menor sea el peso en conjunto del vehículo, menor será el consumo de combustible, disminuyendo así las emisiones a la atmosfera.

En primer lugar, se estudian las diferentes alternativas disponibles para la realización del proyecto, se elige el material de la pieza y se comienza con el diseño. Todos los parámetros de la estampación se diseñan con el uso de un software de simulación de operaciones de conformado plástico que proporciona los resultados de las mismas y dispone de herramientas para facilitar el proceso de diseño.

## 1.2. CONTEXTO

La estampación en caliente resulta ser una herramienta muy útil para uno de las industrias importantes dentro de España, como es la automoción. A través de ella se ha logrado avanzar en unos de los grandes objetivos de los últimos tiempos; la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o, en el caso de los coches eléctricos, un aumento de la autonomía de las baterías. Gracias a la estampación en caliente se han alcanzado estos objetivos, pero sin reducir la seguridad de los ocupantes de los vehículos, ya que estos elementos se producirán en aceros de alta resistencia conocidos por sus siglas UHSS (Ultra High Strength Steel)

La estampación en caliente se patentó en 1977 por la empresa sueca *Plannja* para la producción de hojas de sierras y cortadoras de césped, pero el primer fabricante automovilístico que lo aplicó fue *Saab Automobile AB* en su modelo Saab9000 en 1984. Vistos los datos, se podría considerar que la estampación en caliente se trata de una tecnología antigua, nada más lejos de la realidad, los avances en esta tecnología son continuos. A partir de esta primera aplicación el número de componentes producidos mediante estampación en caliente creció a gran velocidad pasando de 3 millones/año a 8 en 1997 y alcanzando los 107 millones/año en 2007. A continuación, se muestra un gráfico del porcentaje de elementos producidos mediante estampación en caliente en coches.

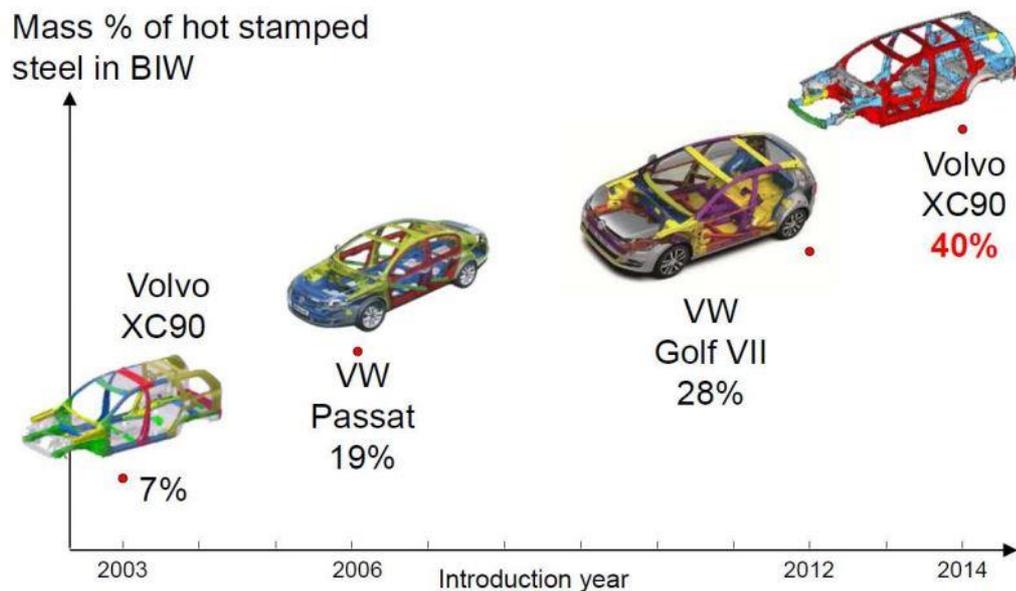


Imagen 1. Aumento del uso de estampación en caliente en piezas de vehículos

La siguiente imagen ilustra las diferentes partes del coche que se fabrican mediante conformación en caliente.

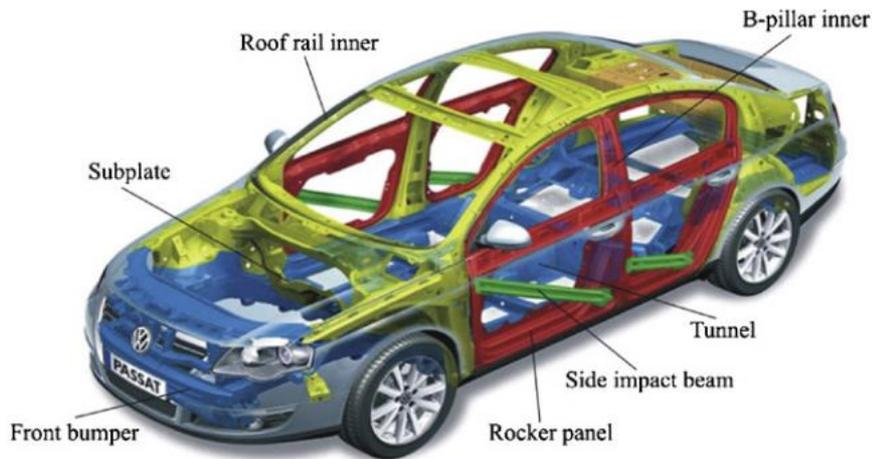


Imagen 2. Piezas fabricadas mediante estampación en caliente

Desde la entrada en la Unión Europea, el sector automovilístico ha sido clave en España, que ha ocupado la 6ª posición mundial en la fabricación de vehículos hasta 2004. A partir del año 2008, con la llegada de la crisis, este sector se vio fuertemente afectado reduciendo su producción hasta un 30%. Tras tocar fondo en 2012, el sector ha comenzado una recuperación estable que se ha mantenido en años posteriores.

Actualmente este sector representa el 10% del PIB, mientras España, como fabricante, ocupa una posición privilegiada internacionalmente. En la actualidad, funcionan 17 factorías y el sector supone el 18% de las exportaciones totales del país.



Imagen 3. Fabricas presentes en España

La pieza en la que se basa este proyecto es un componente de un vehículo de pasajeros y conforma una parte de la estructura del automóvil. En concreto este elemento se encuentra, en el caso de un automóvil con cuatro puertas, entre las dos puertas de un mismo lado. Es una parte no visible, lo que implica que no existen requisitos estéticos que condicionen el diseño de la misma. En cambio, como ya se ha mencionado, la resistencia mecánica del pilar B es un factor a tener en cuenta ya que debe soportar el techo y estar sobredimensionada para soportar cargas generadas en los accidentes. Esto se comprueba mediante crash-test, que se realizan a todos los vehículos de nuevo diseño.



Imagen 4. Disposición pilar B

### 1.3. OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en el diseño y simulación de la estampación en caliente de la pieza comentada, además de dar una visión general del estado del arte que ayude a comprender los puntos críticos del proceso. El objetivo es obtener unos resultados satisfactorios en la simulación gracias al empleo de diferentes elementos y parámetros sobre los troqueles de estampación.

Partiendo de que éste es un proyecto de ámbito académico, se realizan diferentes simplificaciones en la simulación, lo cual no impide que se alcancen unos resultados similares a los que se le exigen a este tipo de piezas en el sector automovilístico. Se pretende, por tanto, lograr una pieza que pueda estamparse sin llegar a la rotura en ningún punto y que tenga una calidad que le confiera la resistencia que requiere una pieza estructural de este ámbito.

### 1.4. BENEFICIOS QUE APORTA EL PROYECTO

#### 1.4.1. Beneficios económicos

Que los resultados de una simulación se tratan de una estimación de los que se obtendrían en la estampación real de la pieza es una obviedad. De ahí la necesidad de realizar pruebas de troqueles en las que se pulen las imperfecciones que no se han previsto durante la fase de diseño. Las simulaciones garantizan que los resultados reales van a ser similares a los que se obtienen en el ordenador y que no serán necesarias grandes modificaciones a posteriori. Debido a la inversión que supone la fabricación de troqueles, es primordial que los resultados de las simulaciones sean óptimos.



Imagen 5. Prueba de prensas

Una simulación mal ejecutada, o incluso la ausencia de la misma, supondría fabricar unos troqueles que requerirían un proceso de prueba mucho más complejo, siendo necesarias constantes operaciones de mecanizado posterior para lograr ajustar todas las imperfecciones, aumentándose así el coste del proceso. Se debe tener en cuenta que las operaciones de fresado de troqueles son muy costosas debido a la complejidad y la dureza del acero de los mismos.

A la hora de cuantificar el beneficio económico de realizar simulaciones o no en un proyecto de este tipo para una empresa estampadora, se estima un ahorro de 50.000€ aproximadamente.

#### 1.4.2. Beneficios técnicos

Gracias a un proyecto de este tipo se optimizan todos los procesos y la utilización de equipos para lograr un consumo eficiente de recursos y prolongar la vida de las herramientas y la maquinaria, fabricando una pieza que cumpla con los requisitos técnicos solicitados.

#### 1.4.3. Beneficios sociales

Las simulaciones que se realizan con los troqueles garantizan que las correcciones que los operarios tengan que realizar en el último proceso de puesta a punto sean mínimas, facilitando el trabajo de los mismos.

Además, debido a que no se requiere que las prensas ejerzan presiones muy elevadas, se garantiza que no se superen valores que puedan provocar accidentes consiguiendo así unas condiciones de seguridad y salud laboral que cumplan los estándares europeos más exigentes.

## 1.5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Para resolver un tipo de proyecto como este existen infinidad de alternativas disponibles en gran número de parámetros y variables. Por lo que es necesario estudiar la viabilidad de todas ellas para escoger la que más se ajuste a lo que se quiere lograr.

### 1.5.1. Materiales

En primer lugar, se estudian los materiales que se pueden emplear para el proceso.

- Aceros al carbono

El acero al carbono, o acero de construcción, ha sido históricamente el que ha representado el mayor porcentaje de producción (en torno al 90%). Se trata de un material con una cantidad de carbono menor al 1% y presencia de otros elementos, necesarios para su fabricación, como silicio y manganeso. Dependiendo del porcentaje de carbono, sus valores de resistencia mecánica oscilan entre 350-650 MPa y de dureza entre 140 y 220 HB. El aumento del contenido de carbono eleva la resistencia del acero disminuyendo la ductilidad y tenacidad del mismo. Tiene una densidad de 7850 kg/m<sup>3</sup>. Sus principales aplicaciones son diversas: desde la construcción civil hasta una gran variedad de elementos de máquinas como ejes, cilindros, engranajes, etc... Actualmente es el más utilizado en procesos de conformado debido principalmente a su bajo coste y su ductilidad que facilita este tipo de operaciones.

- Aluminio

El aluminio es un metal que se obtiene de la bauxita mineral mediante el proceso Bayer y posterior electrólisis. Es un material que destaca por su baja densidad, de 2700 kg/m<sup>3</sup> y aunque puro tiene una resistencia de 160-200 MPa, esta aumenta notablemente en presencia de elementos de aleación. De esta manera una aleación de aluminio-zinc o de aluminio-cobre puede superar los 450 MPa de resistencia a tracción lo cual lo convierte en un material con excelente relación resistencia/peso. Tiene una gran ductilidad que lo hace idóneo para procesos de embutición. Es el segundo metal más utilizado, después del acero. Gracias a una película de óxido que se forma en su superficie presenta una gran resistencia a la corrosión. Su precio es mayor que el del acero y por eso actualmente se utilizan piezas conformadas de aluminio en aplicaciones aeronáuticas y en automóviles de gama alta.

- Aceros inoxidables

El acero inoxidable es una aleación descubierta a principios del siglo XX con una cantidad mínima de cromo del 10%, que, al reaccionar con el oxígeno, forma una capa pasivadora que protege al hierro de la oxidación. Es el material más utilizado en aplicaciones sensibles a la corrosión. Tiene una resistencia mecánica similar al acero al carbono, aunque su precio es mucho mayor. Para procesos de conformado es común emplear aceros inoxidables austeníticos, ideales por su gran ductilidad.

- Aceros de alto límite elástico (HSS)

Este tipo de aceros comenzó a desarrollarse a partir de la Primera Guerra Mundial y, hoy en día, su uso está ampliamente extendido en el sector de la automoción. Estos materiales incrementan considerablemente la resistencia estructural del vehículo, al mismo tiempo que permiten una disminución del peso final del mismo. Se pueden obtener variando los procesos de fabricación o la composición química de los aceros convencionales. En cuanto a los procesos de fabricación, basta con modificar la velocidad de enfriamiento o los ciclos en tratamientos térmicos como el recocido. Respecto a la composición química, el aumento del contenido en carbono o la adición de elementos como vanadio, magnesio o boro incrementan considerablemente la resistencia del material original. En general, un acero se considera de alto límite elástico si su límite elástico supera los 300 MPa. Si el mismo supera los 500 MPa.

- Aceros de Avanzados de alto límite elástico (AHSS)

Se trata de una evolución de los anteriores. Se trata de aceros con límites elásticos mayores a 550 MPa y con tensiones de rotura mayores a 700 MPa. La principal diferencia de los AHSS con los convencionales es su microestructura. Los HSS son monofásicos con una estructura ferrítica, mientras que los AHSS son de múltiples fases, que pueden contener ferrita, martensita, bainita y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir distintas propiedades mecánicas. Algunos tipos de AHSS tienen una mayor capacidad de endurecimiento dando como resultado unas propiedades resistencia-ductilidad mayor a los aceros convencionales.

- Otros materiales

Para aplicaciones muy específicas se podrían utilizar materiales como el cobre, el titanio o el magnesio, pero su elevado coste hace que queden descartados para este proyecto.

Por lo tanto, se plantean cinco posibles soluciones. Para decantarse por una de ellas se seguirán los siguientes criterios:

- Resistencia mecánica: debido a que se trata de un elemento fundamental para garantizar la seguridad de los ocupantes. Peso=2
- Coste: en el sector de la automoción, al igual que en el resto de sectores industriales, el coste es un parámetro muy importante. Peso=2
- Resistencia a la corrosión: la pieza no estará expuesta a agentes externos muy corrosivos. Peso=1
- Conformabilidad: es un parámetro importante a tener en cuenta para facilitar las operaciones de embutición. Peso=1
- Reducción de peso: el peso del vehículo tiene una gran influencia sobre el consumo del mismo, por lo que es un parámetro controlado minuciosamente. Peso=2

La valoración se realiza desde 5 puntos al metal mejor valorado y 1 al menos valorado.

**Tabla 1. Matriz de priorización. Elección del material**

Materiales	Resistencia mecánica P=2		Coste P=2		Resistencia a la corrosión P=1		Conformabilidad P=1		Reducción de peso P=2		TOTAL
	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	
Acero al carbono	3	6	5	10	1	1	4	4	2	4	25
Aluminio	1	2	2	4	4	4	5	5	4	8	23
Acero inoxidable	2	4	1	2	5	5	1	1	1	2	14
HSS	4	8	4	8	2	2	3	3	3	6	27
AHSS	5	10	3	6	3	3	2	2	5	10	31

Atendiendo a la tabla 1. Se elige el acero avanzado de alto límite elástico (AHSS) como material para este proyecto. En este caso se trata de un acero al boro, debido al efecto del boro sobre la dureza de los aceros. Una pequeña adición de boro tiene un gran efecto en la dureza de los aceros siendo una de las formas más baratas de mejorar las propiedades mecánicas de los mismos. El boro facilita la formación de vainita y martensita, aumentando así la templabilidad del acero. En concreto se utiliza un acero al boro 22MnB5, ya que es uno de los más empleados en el sector de la automoción.

### 1.5.2. Prensa

La elección del tipo de prensa supone un factor muy importante en la fabricación de la pieza ya que va a marcar, en otros parámetros, la fuerza máxima disponible para la operación.

- Prensa mecánica

Las prensas mecánicas están accionadas por un motor eléctrico y cuentan con un mecanismo de biela-manivela, al cual se incorpora un volante de inercia en la biela, para transmitir el movimiento. La fuerza y la velocidad varían con la carrera del mecanismo, dando su fuerza máxima al final de la misma. Son prensas muy rápidas, que dan una alta productividad, y en general poco flexibles. Su precio no es muy elevado y no requieren un gran mantenimiento debido a la simplicidad de su mecanismo.

- Prensa hidráulica

Son prensas accionadas por cilindros hidráulicos que pueden ejercer grandes fuerzas, mayores que las prensas mecánicas. Se tiene en todo momento un control exhaustivo de la posición, velocidad y fuerza a lo largo de la carrera. Generalmente tiene una gran flexibilidad, aunque presentan tiempos de operación mayores. Son más caras que las mecánicas y su mantenimiento es mucho más complejo.

- Prensa servoaccionada

Son las más tecnológicamente avanzadas y su uso es creciente en la industria del conformado. Se basa en una prensa mecánica en la que el volante de inercia y el motor son sustituidos por un servomotor y un sistema de transmisión. Existen diferentes diseños de transmisión, pero todos utilizan un torque multiplicador usando servomotores estándar para incrementar la energía de trabajo disponible. Existe un control programable del movimiento y velocidad de la corredera sin pérdida de energía. Tienen mayor cadencia que las prensas hidráulicas y aumentan la vida del troquel. Por lo general son las más caras, aunque no precisan de un mantenimiento excesivamente complejo.

Para la elección de la mejor solución se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Fuerza máxima: por ser la pieza que vamos a fabricar de un material con un elevado límite elástico se necesitaran grandes fuerzas. Se le asigna, por tanto, P = 2.
- Flexibilidad: existe la posibilidad de utilizar la prensa en proyectos posteriores, por tanto, se le asigna P = 1.
- Coste: es un parámetro muy importante para el sector automovilístico. P = 2.
- Control de la operación: cuanto mayor sea el control de posición y velocidad de la prensa se reducirá la cantidad de piezas defectuosas. P = 2.
- Vida del troquel: la pieza se va a fabricar en largas tiradas resultando muy importante la vida de las herramientas, debido también al elevado coste de las mismas. P = 2.
- Cadencia: al ser la tirada muy alta se necesitan tiempos de operación cortos. P = 2.

La valoración se hace de 3 a 1, siendo 3 el más valorado.

Como se aprecia en la matriz de priorización (*Tabla 2*), la mejor opción es la de la prensa servoaccionada, que es la solución que se ha adoptado finalmente.

**Tabla 2. Matriz priorización de la prensa**

Prensas	Fuerza máxima P=2		Flexibilidad P=1		Coste P=2		Control de la operación P=2		Vida de troquel P=2		Cadencia P=2		TOTAL
	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	
Prensa Mecánica	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2	3	6	15
Prensa Hidráulica	3	6	3	3	2	4	2	4	2	4	1	2	23
Prensa Servoac.	2	4	2	2	3	6	3	6	3	6	2	4	28

### 1.5.3. Cinemática de la Prensa

Se pueden distinguir tres cinemáticas básicas en las prensas de conformado de chapa, las cuales pueden sufrir ciertas variaciones según el tipo de pieza con la que se está trabajando. Estas tres tipologías son las prensas de simple efecto, doble efecto o triple efecto.

- Simple efecto

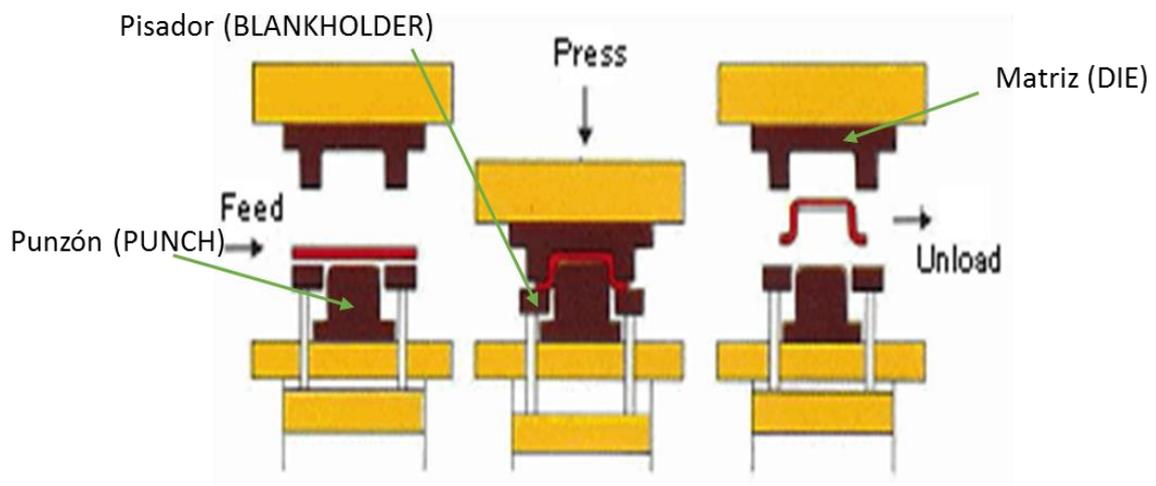


Imagen 6. Simple Efecto

En la embutición de simple efecto la chapa de partida se coloca inicialmente sobre el pisador, que en este tipo de operación hace también las labores de expulsor. La disposición de las herramientas es la mostrada en la *Imagen 6*, con la matriz en la parte superior y el punzón y pisador en la inferior. La matriz desciende sobre el punzón como consecuencia de la presión ejercida sobre el pistón solidario a la misma y realiza la estampación. En este movimiento el pisador acompaña a la matriz, de manera que está permanentemente en contacto con la chapa. Una vez finalizada la operación, la matriz y el pisador vuelven a su posición inicial despegando la chapa del punzón. Por tanto, hay dos partes móviles que son accionadas por cilindros diferentes que deben actuar sincronizadas. El punzón, sin embargo, permanece fijo en todo momento.

- Doble efecto

En las prensas de doble efecto la matriz se sitúa en la parte inferior mientras que punzón y pisador se sitúan en la parte superior (ver *Imagen 7*). La chapa se coloca sobre la matriz y el pisador descende para fijarla. En ese momento el punzón realiza la operación de embutición gracias a la presión ejercida sobre el mismo. Una vez finalizado el proceso, el expulsor (normalmente se utilizan varios, aunque solidarios al mismo cilindro de accionamiento) actúa despegando la chapa de la matriz. Este tipo de embudidor tiene tres partes móviles (pisador, punzón, expulsores) que son accionadas de manera independiente y deben ser sincronizadas. Tiene especial importancia la perfecta sincronización entre pisador y punzón, vital para el correcto acabado de la pieza. La matriz permanece fija y los expulsores suelen correr por agujeros tallados en la misma y estratégicamente posicionados. Se consigue de esta manera una gran precisión y un completo control de las fuerzas de pisado y de embutición, aunque presenta la dificultad de tener que acompasar ambos movimientos.

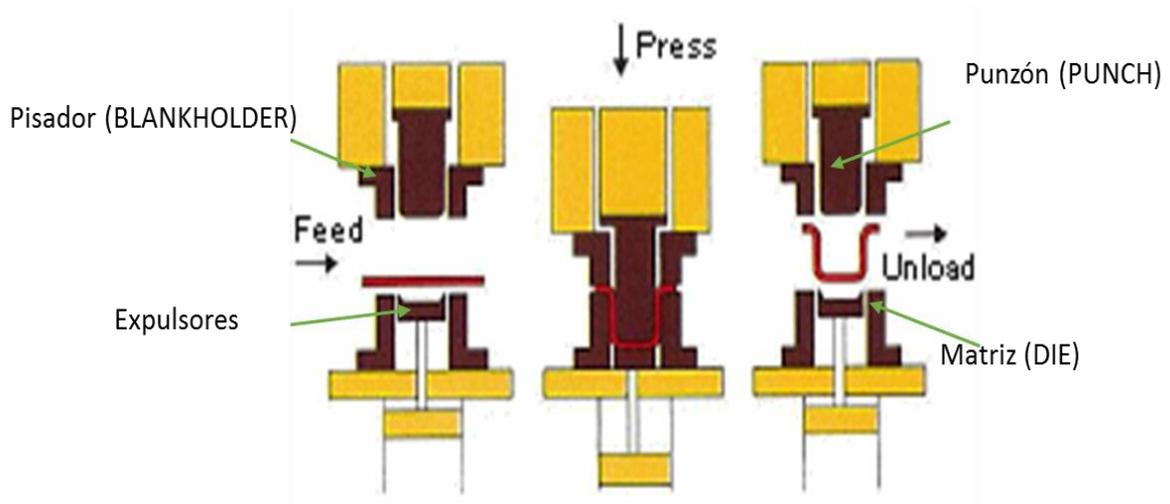


Imagen 7. Doble Efecto

- Triple efecto

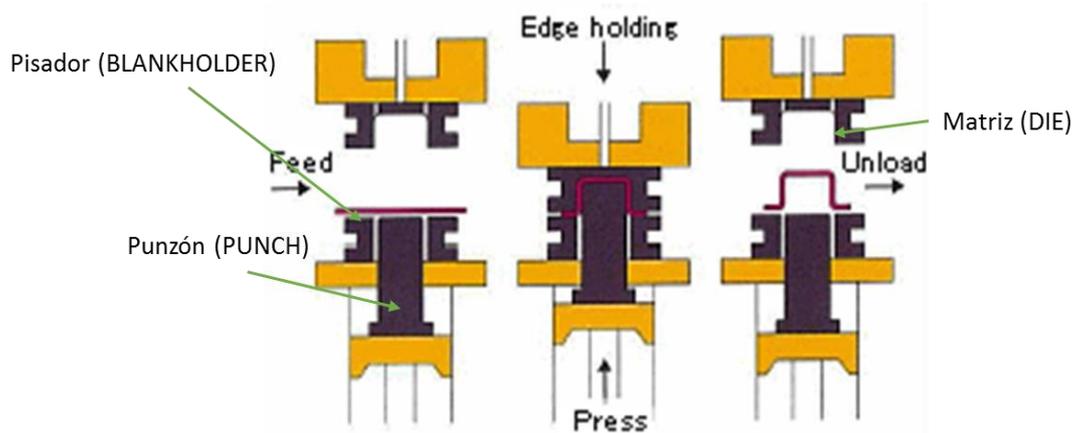


Imagen 8. Triple Efecto

En este tipo de prensas la disposición de los troqueles es igual que en el caso de las de simple efecto (ver *Imagen 8*). La chapa inicialmente se coloca sobre el pisador y la matriz desciende sobre la misma. A continuación, el punzón es accionado y realiza la operación de estampación volviendo después tanto matriz como punzón a su posición inicial. Es el pisador, en este caso, el que realiza la labor de expulsar la chapa una vez está conformada. Tanto la matriz como el punzón son móviles lo cual resta precisión a la operación y convierte en imprescindible la perfecta sincronización entre los movimientos.

Si bien cualquiera de las cinemáticas sería apropiada para la fabricación de cualquier pieza (salvo casos muy especiales), en este proyecto se van a realizar las simulaciones con una variación de la cinemática de doble efecto. La variación consiste en fabricar punzón y pisador como una misma pieza que por tanto solo necesita un accionamiento, restando así complejidad al proceso. Al eliminar la independencia del pisador respecto al punzón, en la prensa solo se deben sincronizar dos movimientos: el del conjunto pisador-punzón (en adelante punzón) y el de los expulsores. La matriz, que permanece fija, debe disponerse perfectamente enfrentada con el punzón y de manera que los expulsores discurran por su interior sin ocasionar daños en la misma.

## 1.6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

El proceso de fabricación de la pieza solicitada se llevará a cabo en varias fases, en el proyecto se estudiará detenidamente la fase de estampación en caliente del pilar. Una vez diseñada la geometría de la pieza se obtendrán las herramientas que se emplearán en el proceso de estampación. A continuación, se exponen las diferentes herramientas mencionadas.

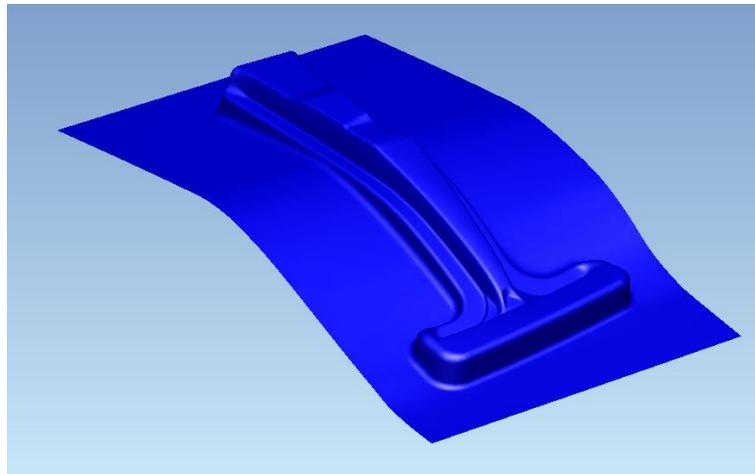


Imagen 9 Matriz

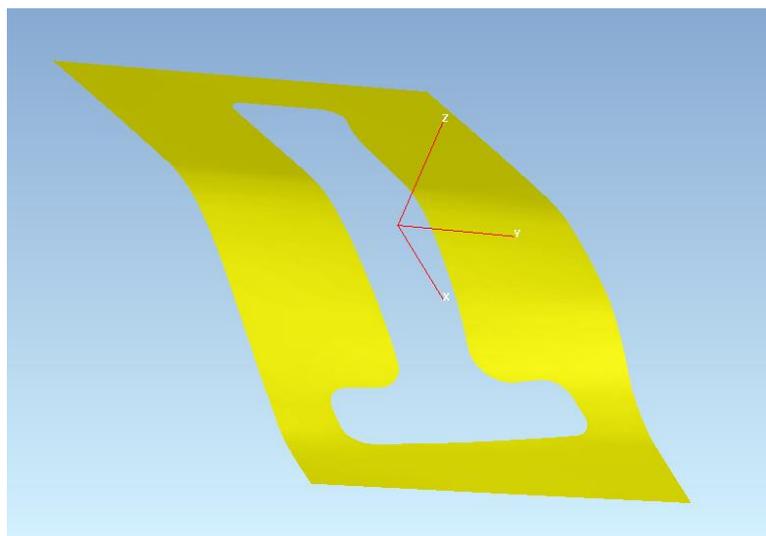
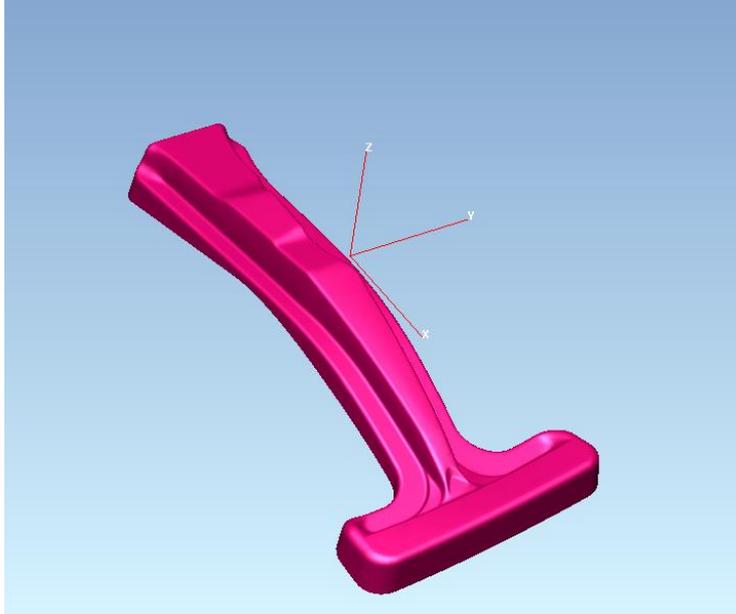
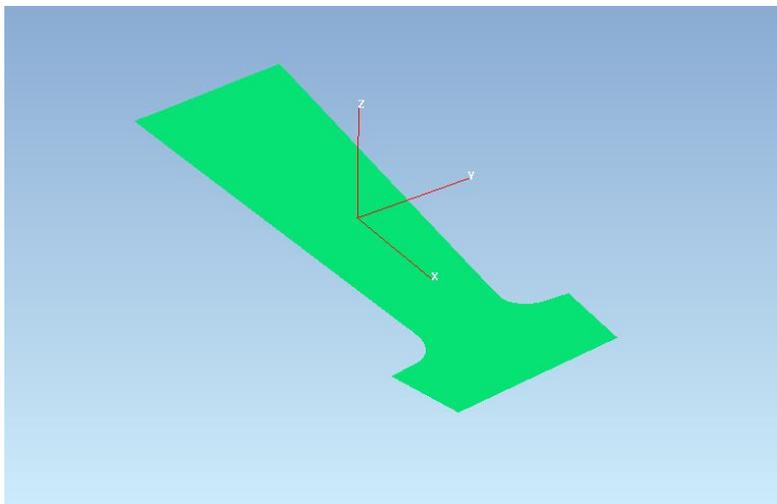


Imagen 10 Pisador

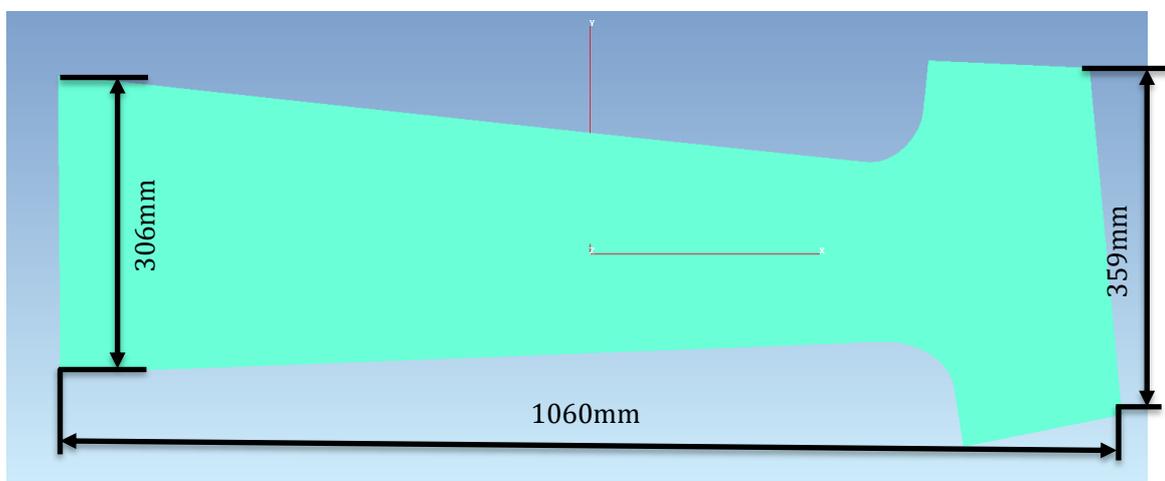


**Imagen 11 Punzón**



**Imagen 12 Chapa de partida**

A partir de la bobina de chapa con la que se alimenta la prensa, se corta a la misma para que la estampación se produzca con una chapa de las dimensiones requeridas. En este proyecto, la chapa de partida de la estampación tiene forma de T como se aprecia en la Imagen 12, con unas dimensiones de 1060mm de largo y una anchura máxima de 359mm. Se tomará un espesor de chapa de 1,95mm. Cabe mencionar que a la hora de introducir este parámetro para la simulación se debe tener en cuenta la dilatación de la chapa debido a la temperatura, por ello cuando se edita la chapa en el Pam-Stamp se introduce un valor de 1,97mm.



Como se ha mencionado anteriormente el material empleado es acero avanzado de alto límite elástico (AHSS). En concreto se utiliza un acero al boro 22MnB5, ya que es uno de los más empleados en el sector de la automoción (las características del acero se anexarán al proyecto). Una de las propiedades más importantes de la chapa sobre la que se realizarán las operaciones es la que muestra la curva FLD (Forming Limit Curve).

La curva FLD de una chapa es única para cada material, espesor y condiciones de lubricación y se determina experimentalmente. Esta curva indica las deformaciones en dos direcciones perpendiculares de los puntos en los que el material comenzaría a agrietarse. Para determinarla se dibujan unos círculos en una chapa la cual se le realizan diversos ensayos (tracción, distintas embuticiones, etc...) y se representan en el diagrama FLD las deformaciones de los ejes perpendiculares de los círculos próximos a las zonas de fallo obteniéndose así una curva en V. También se pueden distinguir en el diagrama varias zonas de no fallo en las cuales la tendencia a la aparición de arrugas puede ser mayor o menor. Generalmente la curva que limita la zona segura de trabajo (zona sin arrugas) es la correspondiente a las deformaciones obtenidas por estados de tensión simple. Por debajo de esta curva aparece una tendencia a la aparición de arrugas y por debajo de la curva que se corresponde con el estado de cortadura pura esta tendencia es mayor.

Se puede apreciar una línea discontinua que se ubica por debajo de la curva FLC que se corresponde con una reducción del 10% de los valores para los cuales se produce el fallo, lo cual sirve como coeficiente de seguridad.

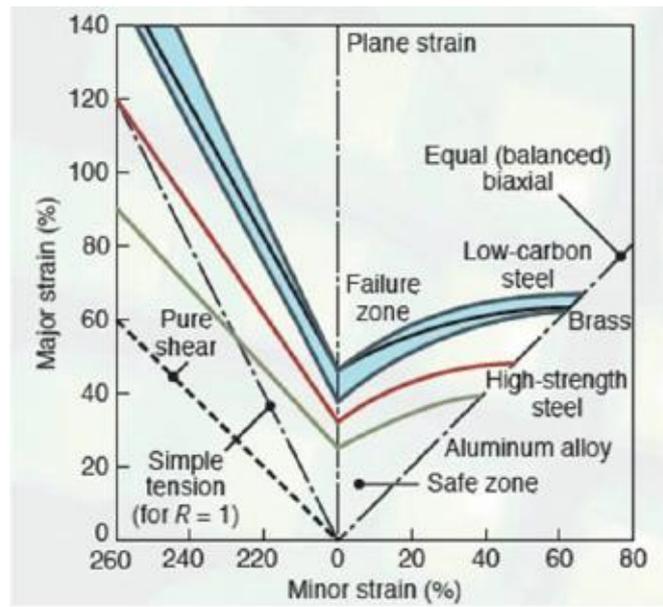


Imagen 13 Diagrama FLD de varios materiales

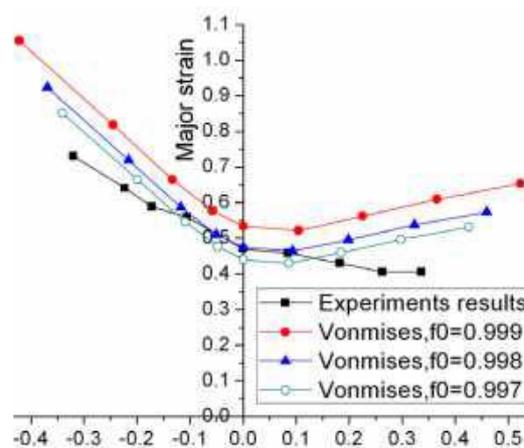


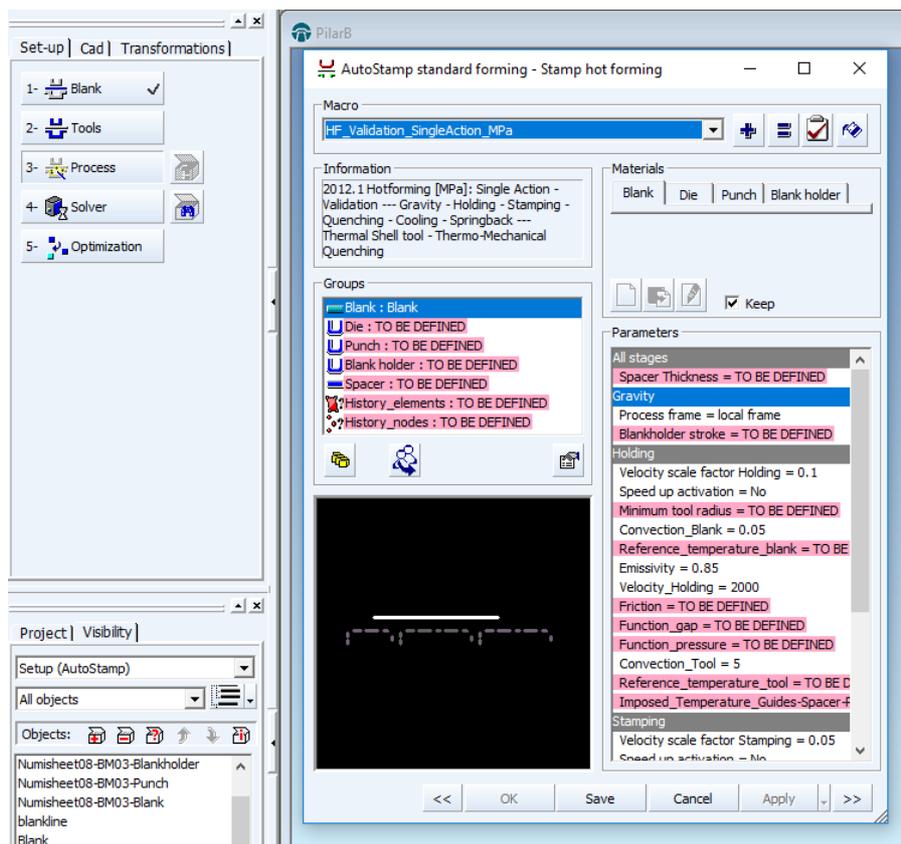
Imagen 14 Diagrama FLD para Acero 22MnB5 a 800°

El diagrama FLD presenta la forma mostrada en la imagen anterior para el acero 22MnB5 atendiendo tanto al criterio de Von Mises como a resultados experimentales.

Otro parámetro de gran importancia en operaciones de conformado es el coeficiente de rozamiento entre el material de la chapa y el de los troqueles. Para evitar un rozamiento excesivo, que podría deteriorar, e incluso romper, el material se suelen añadir sustancias lubricantes sobre los troqueles. Con los materiales y lubricación de los que disponemos para este proyecto se ha estimado que el coeficiente de rozamiento tiene un valor  $\mu = 0.35$ .

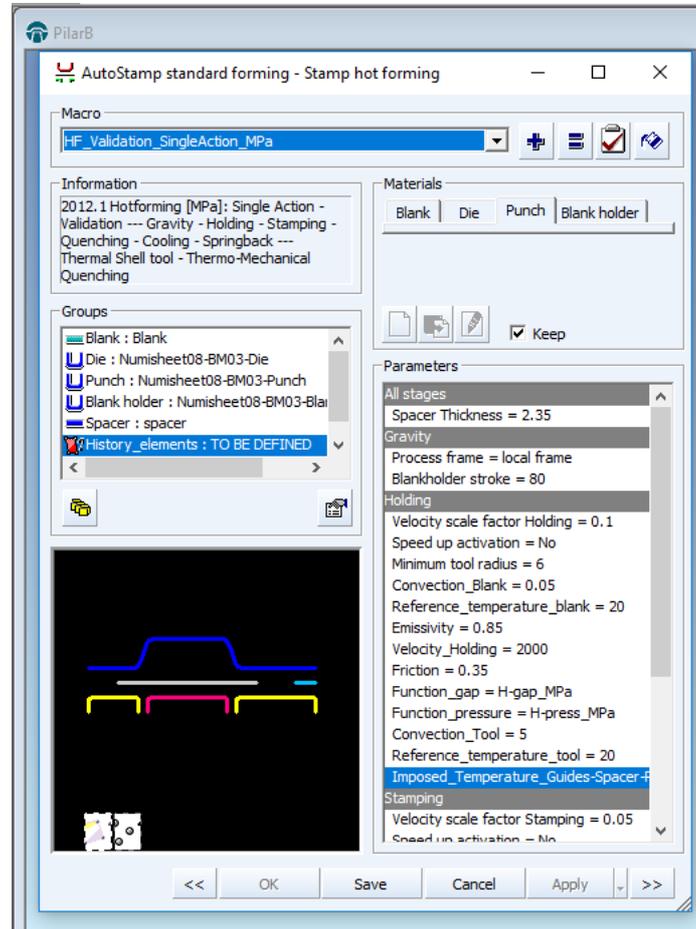
A continuación, se llevará a cabo una breve explicación de los pasos tomados para la simulación de la estampación en Pam-Stamp. Mencionando las fases clave del proceso de preparación de los parámetros.

Una vez obtenidas las herramientas y la chapa (Blank), se definen los parámetros del proceso (Process) tal y como se muestra en las siguientes imágenes.



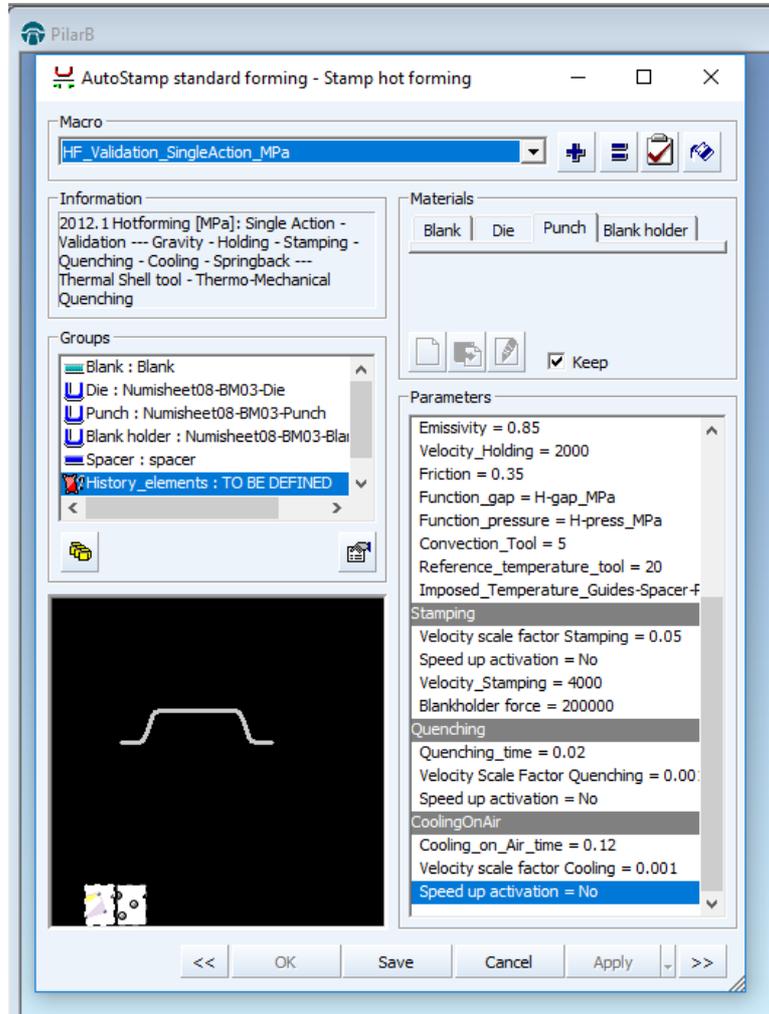
**Imagen 15 Definición de parámetros 1**

En esta primera imagen se destaca el cuadro de información, donde se especifican los diferentes procesos que se llevarán a cabo en la simulación.



**Imagen 16 Definición de parámetros 2**

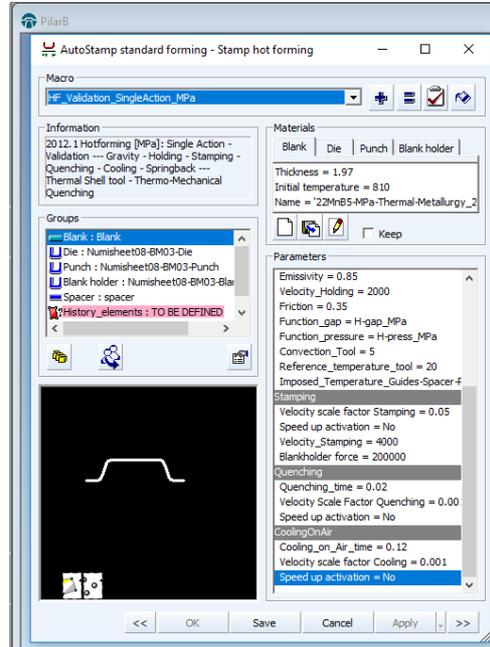
En esta segunda imagen, se eligen las diferentes herramientas y se definen diferentes parámetros entre los que destacan la carrera del pisador (Blank Holder Stroke), el radio mínimo de la herramienta y también, uno de los parámetros más importantes, la fricción. Si existe un rozamiento excesivo entre la chapa y las herramientas, puede deteriorarse e incluso romperse la pieza.



**Imagen 17 Definición de parámetros 3**

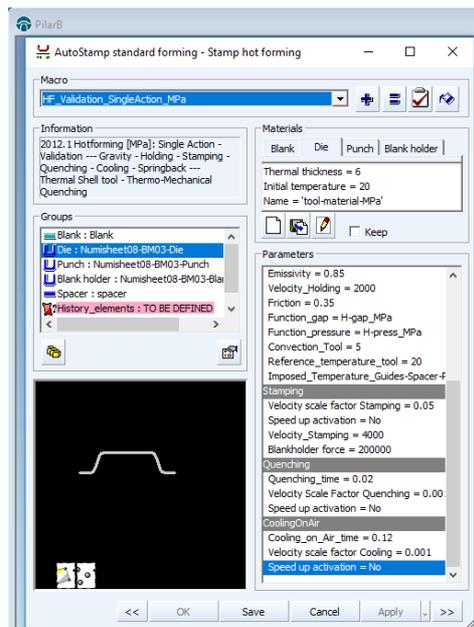
En los parámetros referentes a la estampación, se precisa, entre otras cosas, la fuerza del pisador, muy importante para permitir un desplazamiento regular de la chapa a través de los radios de la matriz. Una presión insuficiente provocaría la formación de arrugas y una presión excesiva impediría la fluidez del material provocando alargamiento y rotura.

En esta tercera imagen se aprecia que se templará la pieza y después se realizará enfriamiento al aire y se definen los parámetros necesarios para simular dicho enfriamiento.



**Imagen 18. Parámetros Chapa**

La atención ahora se centra en el apartado de materiales, se introduce el material elegido para la chapa de la base de datos de Pam-Stamp, la temperatura inicial y el espesor de la chapa. Para las herramientas se sigue el mismo proceso (Imagen 18), donde se elige la temperatura inicial de las mismas.



**Imagen 19 Parámetros herramientas**

Para prevenir problemas de contacto entre piezas, en el pisador se utilizará el comando Walls como se ilustra en la siguiente imagen.

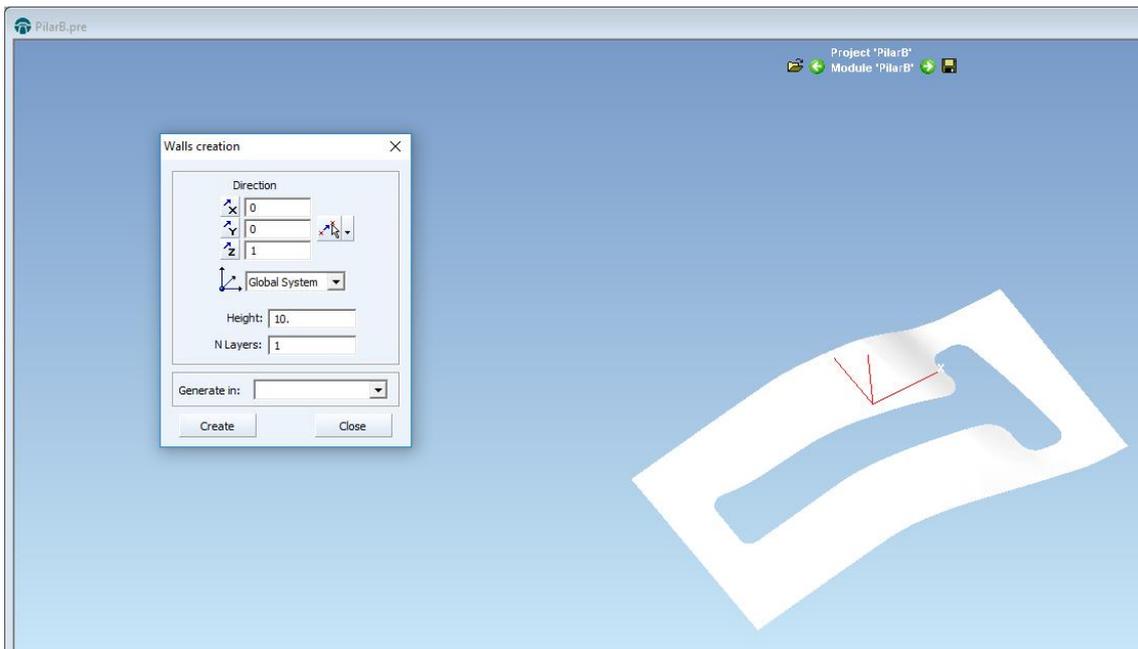


Imagen 20 Walls

GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CONFORMADO EN CALIENTE.  
PROCESO DE ESTAMPACION EN  
CALIENTE DE UN PILAR B***

**2. DOCUMENTO 2- METODOLOGÍA  
SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL  
TRABAJO**

**Alumno/Alumna:** Martin, de Castro, Eneko

**Director/Directora (1):** Lobato, González, Roberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 20 de octubre de 2019

## 2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS

### 2.1.1. Paquetes de trabajo

- **P.T.1 Preparación del proyecto.**

En este primer paquete se incluirán las tareas que deben realizarse antes de comenzar con la fase de diseño del proyecto.

#### **T.1.1 Análisis de la tecnología a emplear**

- Se recopila información sobre la conformación en caliente de elementos de chapa con el objetivo de conocer los materiales y herramientas a emplear en este tipo de procesos. Además, se analiza la influencia de esta tecnología dentro de un país como España dentro del sector de la automoción.

- Recursos materiales: Ordenador y posibilidad de conexión a internet.

- Duración: 35 días

#### **T.1.2 Preparación archivo de la pieza**

- Se comprueba que el archivo CAD se encuentra en condiciones de poder utilizarse en el software de simulación, comprobando, además, que los radios de la pieza no sean demasiado pequeños.

- Recursos materiales: Ordenador y licencia CAD (NX10).

- Duración: 16 días

#### **T.1.3 Compatibilizar formatos CAD**

- Para cargar adecuadamente los archivos en el software de simulación (PAMSTAMP) deben estar en un formato adecuado (.igs o .iges).

- Recursos materiales: Ordenador y licencia CAD (NX10).

- Duración: 2 días

#### **T.1.1 Análisis de alternativas del proyecto**

- Se elige el material, tipo de prensa y software a utilizar en el proyecto.

- Recursos materiales: Ordenador y e información disponible en varios libros adquiridos en la biblioteca de la Escuela de Ingenieros de Bilbao.

- Duración: 20 días

- **P.T.2 Elección de la chapa inicial.**

En el segundo paquete se elige la chapa de partida para la operación de conformado.

**T.2.1 Parámetros chapa inicial**

- Se introducen en el programa de simulación los parámetros necesarios para definir la chapa de partida

- Recursos materiales: Ordenador y licencia Pam-Stamp.

- Duración: 4 días

**T.2.2 Elección del material**

- Entre los posibles tipos de aceros avanzados de alta resistencia, se elige uno de los más empleados en la industria de la automoción, por sus características mecánicas y su coste.

- Recursos materiales: Ordenador y licencia Pam-Stamp.

- Duración: 3 días

**T.2.3 Definición de parámetros**

- Se introducen en el programa de simulación los parámetros necesarios para realizar la simulación, así como temperaturas y espesores.

- Recursos materiales: Ordenador y licencia Pam-Stamp.

- Duración: 15 días

- **P.T.3 Obtención de resultados.**

En el tercer paquete se incluyen las tareas en las que se obtienen y analizan los resultados obtenidos.

**T.3.1 Simulación**

- Mediante la simulación se obtienen los resultados esperados en la estampación en caliente.
- Recursos materiales: Ordenador y licencia Pam-Stamp.
- Duración: 3 días

**T.3.2 Análisis de la pieza obtenida**

- Se analiza la pieza obtenida, centrándose en la aparición de arrugas (Análisis del diagrama FLD) así como en los espesores en todos los puntos de la pieza.
- Recursos materiales: Ordenador y licencia Pam-Stamp.
- Duración: 5 días

**T.3.3 Validación de resultados**

- Se comprueba que los resultados son válidos y que cumplen las exigencias marcadas.
- Recursos materiales: Ordenador y licencia Pam-Stamp.
- Duración: 2 días

- **P.T.4 Gestión del proyecto.**

Se incluyen las tareas de control y seguimiento de las diferentes fases del proyecto.

**T.4.1 Seguimiento del proceso**

- Se realiza un control exhaustivo para que las tareas se realizan correctamente.
- Recursos materiales: Ordenador y licencia Microsoft Office.
- Duración: a lo largo de todo el proyecto

**T.4.2 Control de plazos**

- Se comprueba que las tareas se completan en los plazos acordados.
- Recursos materiales: Ordenador y licencia Microsoft Office.
- Duración: a lo largo de todo el proyecto

### 2.1.2. Hitos

Para facilitar el control y seguimiento del proceso por un supuesto cliente o la propia empresa desarrolladora de dicho proyecto, se definen una serie de hitos.

Hito 1: Final de fase de preparación. Una vez alcanzado este objetivo se podrá comenzar con la fase de diseño de la fabricación.

Hito 2: Final fase de diseño. Este hito marca el cumplimiento de las tareas incluidas en el paquete de trabajo 2, dando pie al tercer y último hito.

Hito 3: Cumplimiento de los requisitos. Éste se alcanza cuando los resultados obtenidos en la simulación son los exigidos, es decir cuando se completan las tareas del paquete de trabajo 3.

### 2.1.3. Tareas

Todas las tareas y grupos de trabajo se recogen en la siguiente tabla que además incluye fechas de inicio y fin de cada una de ellas y siendo la fuente de la información que más adelante aparecerá en el cronograma.

**Tabla 3. Tareas**

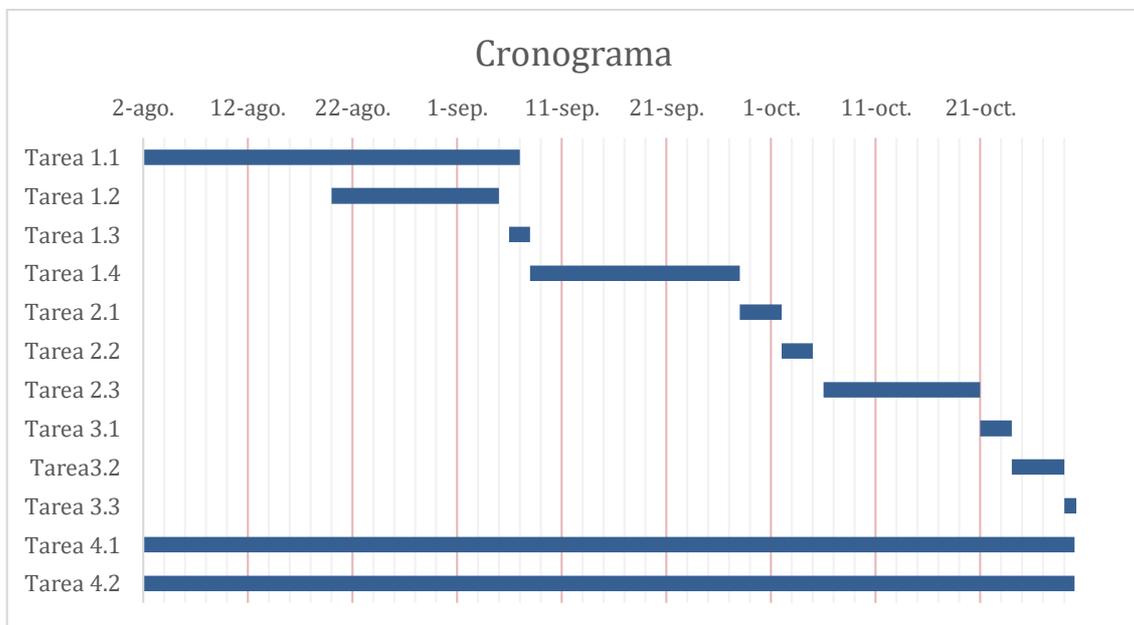
<b>Paquete de Trabajo</b>	<b>Tarea</b>	<b>Fecha Inicio</b>	<b>Duración (días)</b>	<b>Fecha Fin</b>
<i>Preparación del Proyecto</i>	Tarea 1.1	2-ago.	36	6-sep.
	Tarea 1.2	20-ago.	16	5-sep.
	Tarea 1.3	6-sep.	2	7-sep.
	Tarea 1.4	8-sep.	20	27-sep.
<i>Elección de chapa inicial</i>	Tarea 2.1	28-sep.	4	1-oct.
	Tarea 2.2	2-oct.	3	4-oct.
	Tarea 2.3	6-oct.	15	20-oct.
<i>Obtención de resultados</i>	Tarea 3.1	21-oct.	3	23-oct.
	Tarea 3.2	24-oct.	5	28-oct.
	Tarea 3.3	29-oct.	2	30-oct.
<i>Gestión de proyecto</i>	Tarea 4.1			
	Tarea 4.2			

## 2.2. CRONOGRAMA

A continuación, se muestra el cronograma basado en la Tabla 3. Tareas en el que se pueden apreciar las fechas de comienzo y fin de cada una de las tareas. La duración estimada del proyecto es de unos 60 días laborables, teniendo en cuenta que el inicio de data del día 2 de agosto de 2019 y el final del 30 de octubre de 2019, periodo al que se le han restado los días festivos, así como fines de semana.

Entre las tareas críticas del proyecto se destacan aquellas que pueden producir un retraso en el resto de tareas como por ejemplo el diseño de la chapa o la definición de parámetros.

**Tabla 4. Cronograma**



GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CONFORMADO EN CALIENTE.  
PROCESO DE ESTAMPACION EN  
CALIENTE DE UN PILAR B***

**3. DOCUMENTO 3- ASPECTOS ECONÓMICOS**

**Alumno/Alumna:** Martin, de Castro, Eneko

**Director/Directora (1):** Lobato, González, Roberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 20 de octubre de 2019

### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO

Se tratará de describir a continuación el coste que tiene la realización de este proyecto. En las partidas del presupuesto que se expondrá a continuación destacan las horas internas y las amortizaciones, principalmente la amortización de la licencia Pam-Stamp.

Para realizar el cálculo de la amortización del ordenador se ha tenido en cuenta que tiene un precio de 1.500€ y se ha utilizado 1.500 horas durante 2 años. La licencia de Pam-Stamp, que tiene un valor de 35.000€ anuales, se utiliza un total de 1.000 horas al año. Lo mismo sucede con NX, que tiene un coste anual de 25.000€.

El gasto en material de oficina incluye fotocopias y diversas herramientas utilizadas en el trabajo propio de oficina.

**Tabla 5. PRESUPUESTO**

CONCEPTO	UNIDADES	Nº DE UNIDADES	COSTE UNITARIO	COSTE
<b>HORAS INTERNAS</b>				
INGENIERO JUNIOR	h	300	20.00 €	6,000.00 €
INGENIERO SENIOR	h	75	50.00 €	3,750.00 €
<b>AMORTIZACIONES</b>				
ORDENADOR	h	250	0.50 €	125.00 €
PAM-STAMP	h	200	35.00 €	7,000.00 €
LICENCIA CAD	h	30	25.00 €	750.00 €
<b>GASTOS</b>				
BIBLIOGRAFIA				150.00 €
MATERIAL OFICINA				30.00 €
<b>TOTAL</b>				<b>17,805.00 €</b>

GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CONFORMADO EN CALIENTE.  
PROCESO DE ESTAMPACION EN  
CALIENTE DE UN PILAR B***

**4. DOCUMENTO 4- CONCLUSIONES**

**Alumno/Alumna:** Martin, de Castro, Eneko

**Director/Directora (1):** Lobato, González, Roberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 20 de octubre de 2019

#### 4.1. CONCLUSIONES

En primer lugar, el análisis del estado del arte permite la toma de decisiones para un diseño de proceso actualizado y factible, siendo conscientes de las virtudes y limitaciones de las herramientas de simulación empleadas.

Es necesario comentar la versatilidad de los procesos de conformado de chapa, con los que se pueden fabricar piezas con geometrías tan complejas como la de la pieza de este proyecto manteniendo e incluso mejorando la resistencia mecánica propia del material empleado. Además, la cantidad de parámetros que se pueden modificar hace que el proceso pueda ajustarse en función de las exigencias de cada pieza o de las características del proyecto, como el presupuesto disponible o la productividad deseada.

En este caso se ha estudiado el conformado de chapa en caliente, por lo que se han tenido en cuenta parámetros relacionados con la temperatura, así como la temperatura inicial de la chapa y la contracción de la misma una vez terminado el proceso. Se trata de un proceso con más factores a tener en cuenta que el conformado de chapa en frío, pero del que se obtienen unos mejores resultados y unas propiedades del material características.

También destaca la importancia de un correcto diseño de la chapa inicial para evitar flujos deficientes de material y de definir correctamente los parámetros de laminación, de temperatura etc. de la misma para beneficiarse de las características del material.

Por último, hay que destacar la utilidad de un software de simulación como Pam-Stamp que dispone de herramientas que facilitan el proceso de diseño de este tipo de operaciones. También facilita el análisis de los resultados obtenidos ya que puede mostrar valores de parámetros tan importantes como espesores, deformaciones, riesgo de rotura, temperatura de las diferentes piezas durante el proceso etc...

GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CONFORMADO EN CALIENTE.  
PROCESO DE ESTAMPACION EN  
CALIENTE DE UN PILAR B***

**5. DOCUMENTO 5- BIBLIOGRAFIA**

**Alumno/Alumna:** Martin, de Castro, Eneko

**Director/Directora (1):** Lobato, González, Roberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 20 de octubre de 2019

## 5.1. BIBLIOGRAFIA

Argullo, Jesus Juan Lopez. Pistonudos. Historia de la automocion [En línea] 4 de Noviembre de 2016.<http://www.pistonudos.com/reportajes/breve-historia-de-la-automocion-industrial-en-espana-i/>.

*EVOLUCION DEL SECTOR DE LA AUTOMOCION EN ESPAÑA*. Aznar, Hidalgo. s.l. : TECNOINDUSTRIA, 19 de Mayo de 2015.

Manuel González Vergara, María Del Carmen Huerga Castro. *EL SECTOR DEL AUTOMÓVIL EN ESPAÑA*. Leon : Universidad de Leon, 2014.

Grupo PSA. *Wikipedia*. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Grupo\\_PSA](https://es.wikipedia.org/wiki/Grupo_PSA).

EFE. La compra de Opel convertirá a PSA en el octavo grupo automovilístico mundial. *Expansion*. 04/03/2017.

PSA, Grupo. Web corporativa del Grupo PSA. [En línea] <https://www.groupe-psa.com/en/automotive-group/>.

Aznar, Ana Elena Heras. Invest in Spain. [En línea] Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.  
<http://www.investinspain.org/invest/es/sectores/automocion/descripcion/index.html>.

datosmacro.com. [En línea] <http://www.datosmacro.com/negocios/produccion-vehiculos/espana>.

Cancela, Carlos. PSA es el primer fabricante español tras comprar a Opel a General Motors. *El Confidencial*. 06/03/2017.

Estampaciones RUBI. Web Corporativa del Grupo RUBI. [En línea] <http://www.estampaciones-rubi.com/index.asp>.

FAGOR Arrasate. Prensas de retoque de troqueles. [En línea] <http://www.fagorarrasate.com/es/producto/88/26/prensas-de-retoques-de-troqueles.aspx>.

Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco- Euskal Herriko Unibertsitatea. Tema 6: Conformado de chapa. *Tecnología Mecánica*. Bilbao : s.n., 2016.

Wikipedia. Acero al Carbono. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Acero\\_al\\_carbono](https://es.wikipedia.org/wiki/Acero_al_carbono).

Wikipedia. Aluminio. [En línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>.

Wikipedia. Acero inoxidable. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Acero\\_inoxidable](https://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable).

Outokumpu. Web corporativa del Grupo Outokumpu. [En línea] de 2017.] <http://www.outokumpu.com/mx/acero-inoxidable/tipos-de-acero-inoxidable/Paginas/default.aspx>.

Latinoamerica, Soldadura. *Los aceros de alta resistencia y baja aleacion* . [En línea]  
<https://es.slideshare.net/marcoandresmonsalve/aceros-de-alta-resistencia>.

Dpto. Ingenieria Mecanica. Universidad del Pais Vasco- Euskal Herriko Unibertsitatea.  
Tema 5: El proceso de Forja. *Tecnologia mecanica*. Bilbao : s.n., 2016.

Dpto. Ingenieria Mecanica. Universidad del Pais Vasco- Euskal Herriko Unibertsitatea.  
Tema 2: Conformado de chapa. *Sistemas integrados de fabricacion*. Bilbao : s.n., 2016.

Altan, T., Oh, S., Gegel, H. *Metal forming. fundamentals and applications*. s.l. : American Society for the Metals, 1983.

Barabic, Donel. *Sheet Metal Forming Processes*. s.l. : Springer, 2010.

ESI GRoup. Pam-Stamp. [En línea] <https://www.esi-group.com/es/soluciones-de-software/procesos-y-fabricacion/procesos-de-estampacion/estampacion/transformacion-de-chapa-metalica>.

AutoForm Engineering. AutoForm Forming Reality. [En línea]  
<http://www.autoform.com/es/>.

Revista de Metalurgia, 48 (2) MARZO-ABRIL, Aceros avanzados de alta resistencia en la industria automovilistica.

Características del acero 22MnB5  
<https://industry.arcelormittal.com/catalogue/A54/ES>

GRADO EN INGENIERIA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CONFORMADO EN CALIENTE.  
PROCESO DE ESTAMPACION EN  
CALIENTE DE UN PILAR B***

**6. DOCUMENTO 6- ANEXOS**

**Alumno/Alumna:** Martin, de Castro, Eneko

**Director/Directora (1):** Lobato, González, Roberto

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 20 de octubre de 2019

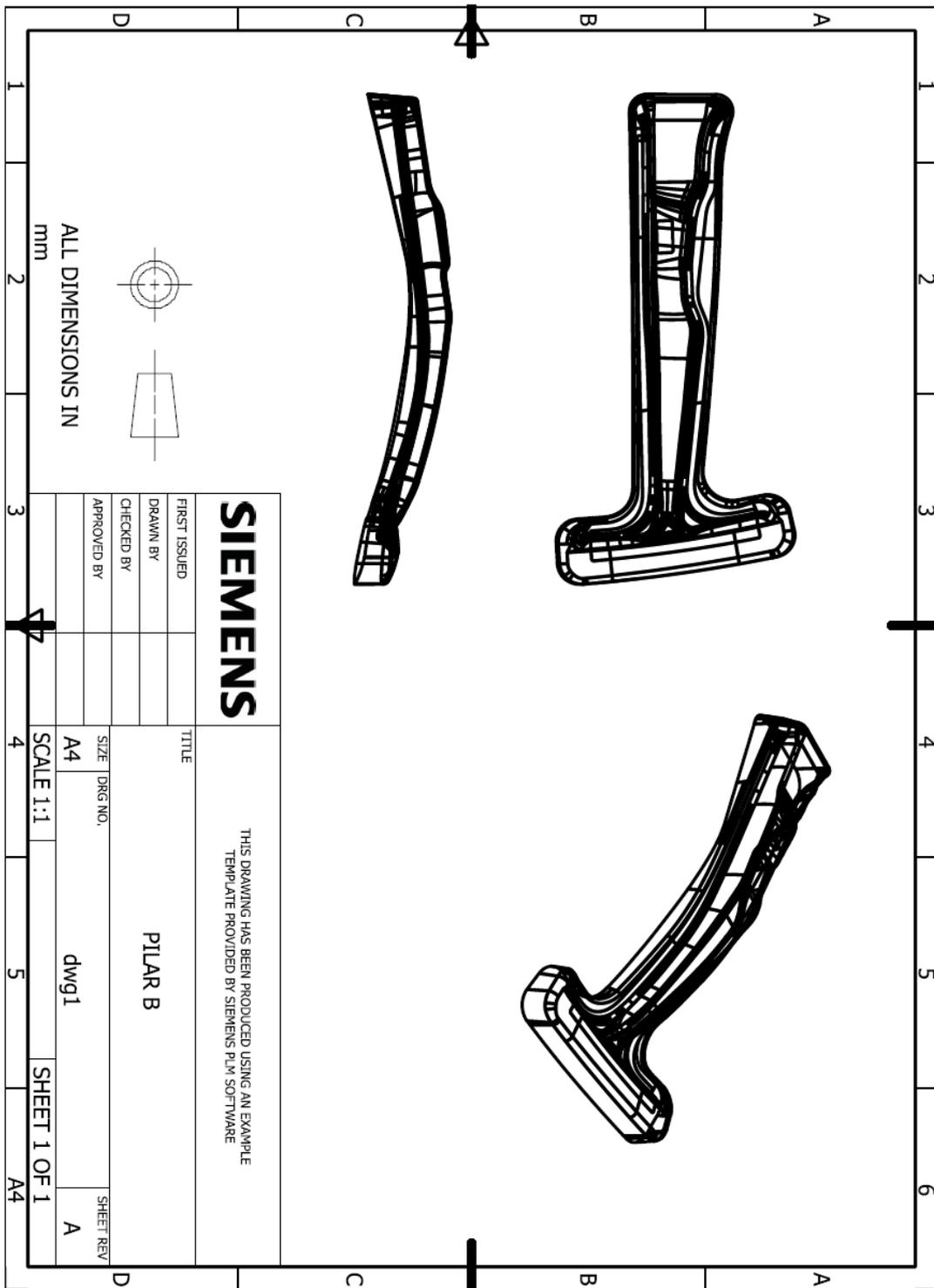
## 6.1. ANEXO I: NORMATIVA APLICABLE

La normativa que se aplica en este proyecto se recoge en principalmente en las dos siguientes normas:

La norma ISO 12004-2:2008 (Materiales metálicos. Chapas y bandas. Determinación de las curvas límite de conformado. Parte 2: Determinación de las curvas límite en laboratorio) especifica las condiciones que deben cumplirse para determinar la curva FLC de un material mediante diversos ensayos en un laboratorio. Esta norma debe cumplirse para chapas planas, de material metálico y de espesor entre 0,3 mm y 4 mm.

La norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 (Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente) recoge las condiciones que se deben cumplir en un ensayo de tracción en laboratorio de materiales metálicos.

## 6.2. ANEXO II PLANOS Y ESQUEMAS



### 6.3. ANEXO III ACERO 22MnB5

Según <https://industry.arcelormittal.com/catalogue/A54/ES> de donde se ha obtenido la información sobre este material, los aceros templables al boro se utilizan en aplicaciones en las que se requieren excelentes propiedades de resistencia al desgaste. Los principales usos, se inscriben en los campos de la maquinaria agrícola, maquinaria para obras públicas y minería, equipos de corte o piezas de seguridad de automoción que es el caso que nos ocupa. Se adjunta a continuación el catálogo con diferentes características de este acero.



## A54 - Aceros templables al boro **Durabor**<sup>®</sup>

*Los aceros templables al boro se utilizan en aplicaciones en las que se requieran excelentes propiedades de resistencia al desgaste.*

---

A54

# Propiedades

Los aceros templables al boro representan un significativo avance en la tecnología de los tratamientos térmicos. En ellos se utiliza el boro como elemento endurecedor.

Los procesos de colada y afino del acero, junto con el tratamiento termomecánico aplicado durante la fase de laminación controlada, hacen posible que los aceros templables al boro producidos por ArcelorMittal alcancen un notable grado de endurecimiento y una microestructura altamente uniforme, lo que, a su vez, redundo en un excelente comportamiento de la pieza acabada en condiciones de carga mecánica después del tratamiento térmico.

---

A54

# Ventajas

## Después del tratamiento térmico

Su extremada dureza, obtenida después de ser sometidos a tratamiento térmico, hace que estos grados sean especialmente adecuados para aplicaciones que requieran altos niveles de resistencia al desgaste/abrasión.

Su utilización permite reducciones significativas en el peso de los componentes estructurales o del automóvil (de hasta un 50% en comparación con los aceros de alto límite elástico y baja aleación-HSLA).

El rasgo más distintivo de los aceros templables al boro de ArcelorMittal es su aptitud para tratamientos de templeado en agua, facilitando de este modo que los procesos de transformación sean más ecológicos (menores requisitos de tratamiento de efluentes) que los utilizados en el caso de los aceros al carbono clásicos.

Su capacidad de endurecimiento es excelente, tanto en medios líquidos como gaseosos.

La oferta de ArcelorMittal comprende las siguientes calidades de aceros templables al boro: Durabor® 20MnB5, Durabor® 22MnB5, Durabor® 28MnB5, Durabor® 30MnB5, Durabor® 33MnCrB5 y Durabor® 38MnB5, y calidades equivalentes a EN ISO 683-2:2018. Contacte con nosotros si desea información sobre otros grados en desarrollo.

Las propiedades pueden adaptarse a necesidades específicas. Hay grados adicionales disponibles previa solicitud. Si desea más información al respecto puede ponerse en contacto con nuestros equipos comerciales.

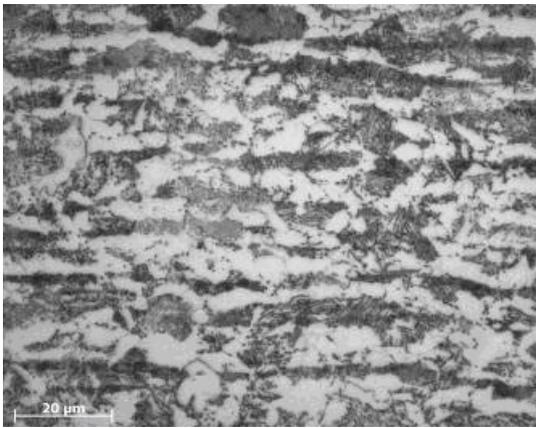
La selección de la calidad más adecuada dependerá de los siguientes factores:

- Dureza exigida a la pieza acabada
- Resistencia a la abrasión requerida
- Condiciones previstas del proceso de conformado

Todos los grados de la gama de acero al boro Durabor® son aptos para procesos de conformado en caliente y en frío.

### Estado normal de suministro

A pesar de sus moderados valores de dureza y propiedades mecánicas, las calidades de acero al boro, en su estado normal de suministro, presentan una excelente resistencia a la abrasión, obtenida gracias a su microestructura compuesta, constituida por una fase perlítica dura embebida en una matriz de ferrita. Por ello, son soluciones que ofrecen una muy buena relación coste-prestaciones para aplicaciones que requieren una elevada resistencia a la abrasión.



*Durabor® 30MnB5*

*Estructura ferrítica-perlítica*

---

**A54**

## Aplicaciones

Los aceros templables al boro se utilizan en aplicaciones en las que se requieren excelentes propiedades de resistencia al desgaste. Los principales usos de estas calidades de acero, tras tratamiento térmico, se inscriben en los campos de la maquinaria agrícola (discos, rejas y vertederas de arados), maquinaria para obras públicas y minería, equipos de corte, tubos para piezas de seguridad de automoción, etc. Una aplicación frecuente de estos grados de acero, sin tratamiento previo, es la fabricación de tambores de hormigoneras.

---

**A54**

# Recomendaciones de uso

## **Caracterización TEC del grado Durabor® 22MnB5**

La temperatura de austenización recomendada es de 880°C.

La temperatura de inicio del proceso de templado (a la velocidad máxima de enfriamiento) es de 750°C.

La temperatura  $A_{c3}$  equivale a 860°C para una velocidad de calentamiento de 5°C/s. La temperatura  $A_{c1}$  es de 750°C y la temperatura  $M_s$  (inicio de fase martensítica) alcanza los 400°C.

En el ensayo de resistencia a la tracción, la muestra obtenida presenta una estructura totalmente martensítica tras un periodo de austenización de 5 minutos a 850°C seguido de templado en agua.

Cuando este mismo ensayo se realiza a una temperatura de 840°C, se aprecia un reducido número de islas de ferrita distribuidas regularmente.

## **Caracterización TEC del grado Durabor® 30MnB5**

La temperatura de austenización recomendada está comprendida en el rango 830-850°C.

La temperatura de inicio del proceso de templado (a la velocidad máxima de enfriamiento) es de 730°C.

Los clientes que así lo soliciten podrán disponer de los correspondientes diagramas TEC.

## **Conformación**

Las calidades Durabor® 20MnB5, Durabor® 22MnB5, Durabor® 28MnB5, Durabor® 30MnB5, Durabor® 33MnCrB5 y Durabor® 38MnB5 son aptas para procesos de conformado en caliente o en frío.

---

**A54**

## Tratamiento térmico

En la siguiente tabla se incluyen las propiedades mecánicas más habituales para una probeta de 6 mm, obtenida en sentido de laminación, antes y después de ser sometida a un proceso de templeado:

Calidad	Estado de suministro				Templado		
	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)	Dureza HRC	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)
Durabor® 20MnB5 y EN ISO 683-2:2018	350	520	27	45	1100	1450	11
Durabor® 22MnB5						1500	10
Durabor® 28MnB5	420	620	26	49	1200	1650	9
Durabor® 30MnB5 y EN ISO 683-2:2018	440	660	25	50		1700	8
Durabor® 33MnCrB5 y EN ISO 683-2:2018	495	750	20	54	1300	2000	7
Durabor® 38MnB5	480	760	18	55			

El cambio del grado Durabor® 30MnB5 al grado Durabor® 38MnB5 permite aumentar en aproximadamente un 10% la dureza de las piezas sometidas a un proceso de temple. Los ensayos de abrasión demuestran que esto supone una sustancial mejora del 40% en la resistencia al desgaste.

---

**A54**

## Calidad superficial

Los grados de boro están disponibles solamente en calidad de la superficie A no expuesta.

---

**A54**

## Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga se determina después del tratamiento térmico y templado del material.

En la siguiente tabla, se presentan los resultados obtenidos con una probeta de acero Durabor® 22MnB5 de 2,65 mm de espesor en una prueba de resistencia a la fatiga, consistente en la aplicación de una carga de tracción con un ratio de carga de  $R_s = 0,1$  y tras varios tratamientos térmicos. Las muestras fueron sometidas a una fase de austenización a 950°C durante 5 minutos.

Probeta calentada durante 5 minutos a 950°C seguido de:	Resistencia a la fatiga sD (MPa)	Amplitud (sigma) (MPa)	Tensión máxima sD (MPa)
Temple en agua	253	6	562
Temple en aceite	260	5	578
Temple en agua + tratamiento térmico a 200°C durante 20 minutos	293	26	651

$$sD = (smax - smin)/2$$

Observaciones:

La resistencia a la fatiga de los aceros templables al boro de ArcelorMittal es entre un 40 y un 60% superior a la de la calidad S355MC AM FCE; puede reducirse en más del 30% si se realiza una descarburación total.

# A54

## Equivalencia marcas y normas

	EN 10083-3:2006	NF A 36102	DIN 1654 Teil 4	BS970 Part 1	UNI 3756	UNE 36034	J1268	UNS
20MnB5 EN ISO 683-2:2018	20MnB5	20MnB5RR	20B2	174H20				
<i>Durabor® 20MnB5</i>	<i>20MnB5</i>	<i>20MnB5RR</i>	<i>20B2</i>	<i>174H20</i>				
<i>Durabor® 22MnB5</i>	<i>20MnB5</i>	<i>20MnB5RR</i>	<i>22B2</i>	<i>174H20</i>	<i>21B3</i>	<i>21B3/20MnB5</i>	<i>10B21/15B21</i>	<i>H15211</i>
<i>Durabor® 28MnB5</i>	<i>28MnB5</i>	<i>28MnB5RR</i>	<i>28B2</i>					
30MnB5 EN ISO 683-2:2018	30MnB5	30MnB5RR	28B2				15B30	H15301
<i>Durabor® 30MnB5</i>	<i>30MnB5</i>	<i>30MnB5RR</i>	<i>28B2</i>				<i>15B30</i>	<i>H15301</i>
33MnCrB5 EN ISO 683-2:2018	33MnCrB5							
<i>Durabor® 33MnCrB5</i>	<i>33MnCrB5</i>							
39MnB5 EN ISO 683-2:2018	38MnB5							
<i>Durabor® 38MnB5</i>	<i>38MnB5</i>							

En cursiva, grados que no figuran en la norma

A54

# Dimensiones

## No decapado

Espesor (mm)	20MnB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 20MnB5		Durabor® 22MnB5		Durabor® 28MnB5		30MnB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 30MnB5		33MnCrB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 33MnCrB5		39MnB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 38MnB5									
	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.								
1.50 ≤ esp. < 1.70	800	1020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
1.70 ≤ esp. < 1.80			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
1.80 ≤ esp. < 2.00		1250	1015	800	1250	685	1065	1250	-	-	-	-								
2.00 ≤ esp. < 2.30		1350																		
2.30 ≤ esp. < 2.40	1450	1265	1350										1265	-	-	1350	-	-	-	
2.40 ≤ esp. < 2.50																				
2.50 ≤ esp. < 2.60		1460		1400	1460	800	1450	-	-											
2.60 ≤ esp. < 2.80		1460		1400	1460															
2.80 ≤ esp. < 3.00		1475		1475	1450					600	1550	-								-
3.00 ≤ esp. < 3.40		1550		685	600															
3.40 ≤ esp. < 4.00	1575	1650	1550	1650	-								-	1550	-	-	-			
4.00 ≤ esp. < 4.50		1850																1850	1850	
4.50 ≤ esp. < 5.00		1950				1950	1950													
5.00 ≤ esp. < 8.00		1575				1575	1575	1575												
8.00 ≤ esp. < 12.70	800	1370	-	-	1370	800	1370	1000	-	-	800	1370								
12.70 ≤ esp. < 14.00													2150	685	2150	2150				
14.00 ≤ esp. < 15.00													1000	800	800	800				
15.00 ≤ esp. < 15.50													1370	800	1370	1370				
15.50 ≤ esp. < 16.00	-	-	-	-	800	1370	-	-	-	-	-	-								

Decapado

Espesor (mm)	20MnB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 20MnB5		Durabor® 22MnB5		Durabor® 28MnB5		30MnB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 30MnB5		33MnCrB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 33MnCrB5		39MnB5 EN ISO 683-2:2018, Durabor® 38MnB5	
	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.	Ancho mín.	Ancho máx.
1.50 ≤ esp. < 1.70			-	-			-	-				
1.70 ≤ esp. < 1.80	800	1020			-	-			-	-		
1.80 ≤ esp. < 2.00		1250			1050			1050			1250	
2.00 ≤ esp. < 2.30		1300				800						
2.30 ≤ esp. < 2.40					1260			1250				
2.40 ≤ esp. < 2.50	600	1310										
2.50 ≤ esp. < 2.80		1400			1450							
2.80 ≤ esp. < 3.00		1475										
3.00 ≤ esp. < 3.20		1525						1280		800		
3.20 ≤ esp. < 3.60		1550		660		600	660				1300	
3.60 ≤ esp. < 4.00												
4.00 ≤ esp. < 4.50						1830						
4.50 ≤ esp. < 5.00			1500					1500				
5.00 ≤ esp. < 6.00						1930			1100			
						2130						
6.00 ≤ esp. < 6.20	800	1300				800	1300					
6.20 ≤ esp. < 7.00					1550			-				
7.00 ≤ esp. < 8.00	-	-			1280				-		-	

# Análisis químicos

Estas calidades reciben un tratamiento de globulización de los sulfuros de manganeso. La incorporación de elementos ligantes del nitrógeno permite optimizar la eficiencia del boro.

	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Al (%)	Ti (%)	B (%)	Cr (%)
20MnB5 EN ISO 683-2:2018	0.170 - 0.230	1.10 - 1.40	≤ 0.025	≤ 0.035	≤ 0.40	-	-	0.0008 - 0.0050	-
<i>Durabor® 20MnB5</i>	0.190 - 0.230	1.15 - 1.35	≤ 0.020	≤ <b>0.005</b>	0.15 - 0.35	≥ <b>0.020</b>	<b>0.020 - 0.050</b>	<b>0.0015 - 0.0045</b>	-
<i>Durabor® 22MnB5</i>	0.200 - 0.250	1.10 - 1.40	≤ 0.025	≤ <b>0.008</b>	0.15 - 0.35	≥ <b>0.020</b>	<b>0.020 - 0.060</b>	0.0020 - 0.0050	-
<i>Durabor® 28MnB5</i>	0.260 - 0.300	1.20 - 1.40	≤ 0.020	≤ 0.005	0.20 - 0.30	≥ 0.015	0.020 - 0.050	0.0020 - 0.0050	-
30MnB5 EN ISO 683-2:2018	0.270 - 0.330	1.15 - 1.45	≤ 0.025	≤ 0.035	≤ 0.40	-	-	0.0008 - 0.0050	-
<i>Durabor® 30MnB5</i>	0.270 - 0.330	1.15 - 1.45	≤ 0.025	≤ <b>0.004</b>	<b>0.20 - 0.30</b>	≥ 0.020	<b>0.020 - 0.050</b>	<b>0.0010 - 0.0040</b>	-
33MnCrB5 EN ISO 683-2:2018	0.300 - 0.360	1.20 - 1.50	≤ 0.025	≤ 0.035	≤ 0.40	-	-	0.0080 - 0.0050	0.30 - 0.60
<i>Durabor® 33MnCrB5</i>	0.300 - 0.380	1.20 - 1.45	≤ 0.020	≤ 0.030	≤ 0.35	≥ <b>0.015</b>	0.020 - 0.050	0.001 - 0.004	0.40 - 0.50
39MnB5 EN ISO 683-2:2018	0.360 - 0.420	1.15 - 1.45	≤ 0.025	≤ 0.035	≤ 0.40	-	-	0.0008 - 0.0050	-
<i>Durabor® 38MnB5</i>	0.360 - 0.400	1.20 - 1.40	≤ 0.020	≤ <b>0.005</b>	<b>0.20 - 0.35</b>	≥ <b>0.020</b>	<b>0.020 - 0.050</b>	<b>0.0020 - 0.0050</b>	-
En cursiva, grados que no figuran en la norma									
En negrita, valor más estricto que la norma									

## ¿Tiene dudas?

Préguntenos a través de nuestro formulario de contacto en <https://industry.arcelormittal.com/getintouch>

*Todos los datos que aparecen en el catálogo de ArcelorMittal Flat Carbon Europe S.A. figuran a título indicativo. ArcelorMittal Flat Carbon Europe S.A. se reserva el derecho a modificar en todo momento sin previo aviso su gama de productos.*

## 6.4. ANEXO IV RESULTADOS

El análisis de los resultados se dividirá en los diferentes procesos que se llevan a cabo en la simulación, se intenta de esta manera tener una visión clara de las condiciones a las que la pieza está sometida en cada momento.

### 6.4.1. GRAVITY

A continuación, en el primer paso del proceso se muestra como la chapa sufre la primera deformación al ponerse en contacto con el pisador.

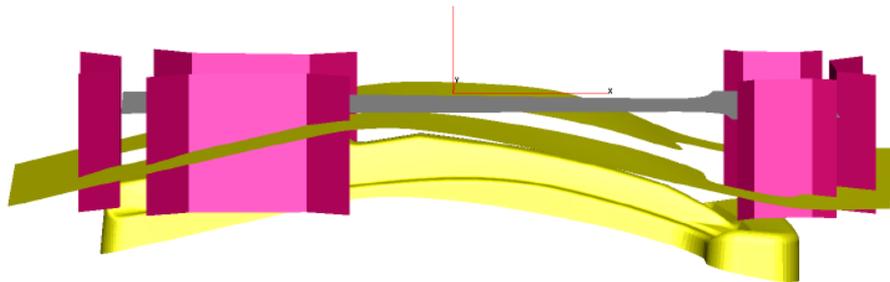


Imagen 21 Gravity Fase Inicial

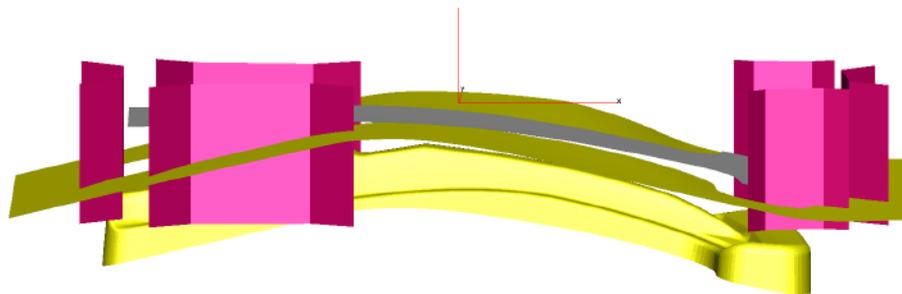
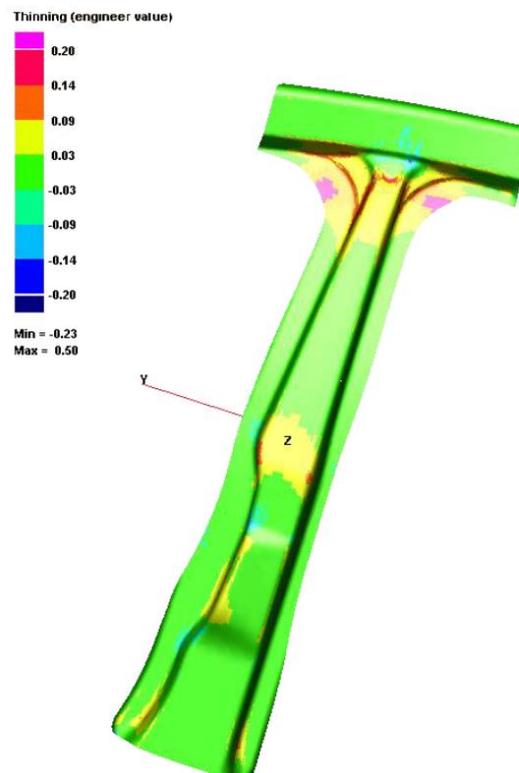


Imagen 22 Gravity Fase Final

Una vez terminado este proceso, que podríamos catalogar de aproximación, comienza el proceso de estampación (Stamping).

## 6.4.2. STAMPING

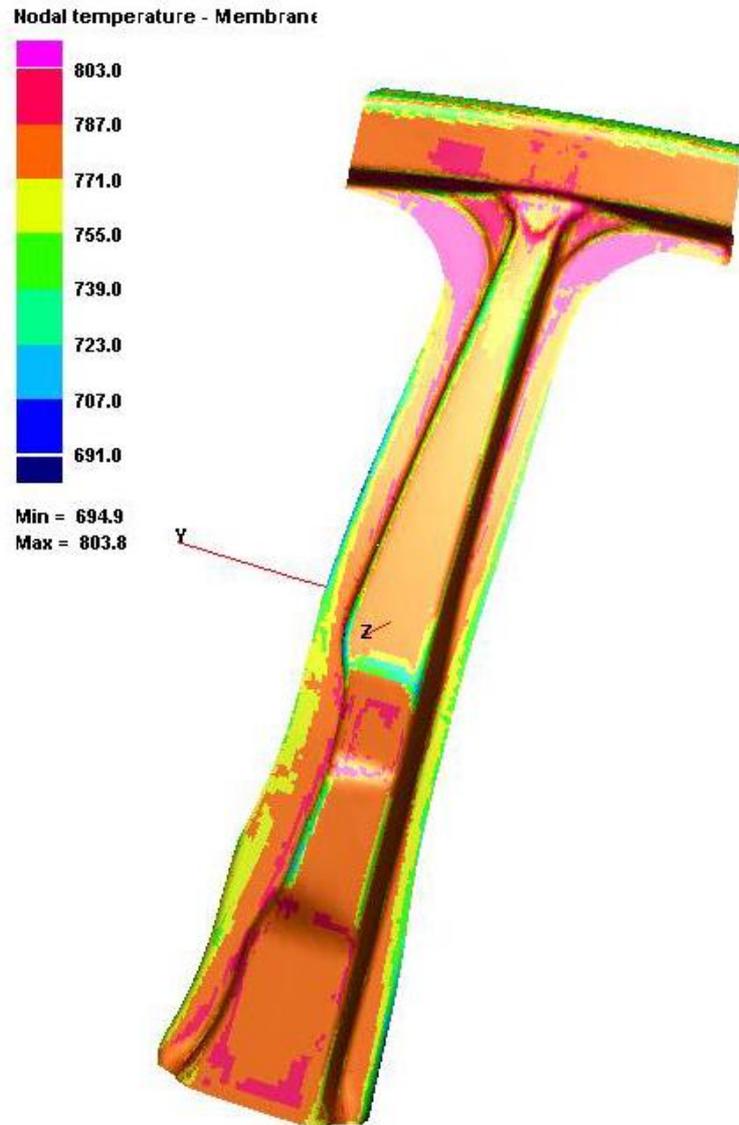
El valor del espesor de la pieza es un parámetro importante al cual hay que prestar especial atención. Se deben evitar espesores muy pequeños que fragilicen dicha pieza.



**Imagen 23 Adelgazamiento**

En la imagen 22 se muestra el adelgazamiento que sufre el pilar y se observa que la zona crítica es la superior, parte en la que se hace la transición al techo del vehículo, donde se encuentran los valores más altos de adelgazamiento de la chapa, es decir, donde el espesor es menor.

La mayor parte de la pieza conserva valores de espesor tras la estampación similares al de la chapa inicial, que es de 1,95 mm. Las zonas en las cuales el espesor ha aumentado se corresponden con aquellas que tienen una mayor tendencia a la aparición de arrugas. Las zonas cuyo espesor es menor, están localizadas como ya se ha mencionado, por lo cual no supone un problema para las características mecánicas.



**Imagen 24 Temperatura de la Chapa**

En la Imagen 23 se aprecia como la temperatura en toda la pieza es constante, teniendo en cuenta que la temperatura inicial de la pieza se ha fijado en  $810^{\circ}$ , es de mencionar que la zona superior, que es aquella con un mayor grado de adelgazamiento, es también la zona que mayor temperatura mantiene durante la estampación.

A continuación, se muestra también el estado de la matriz en cuanto a la temperatura se refiere. Se aprecia una temperatura constante a través de toda la herramienta, con una variación de 2° a 4° a lo largo de todos los bordes de la misma.

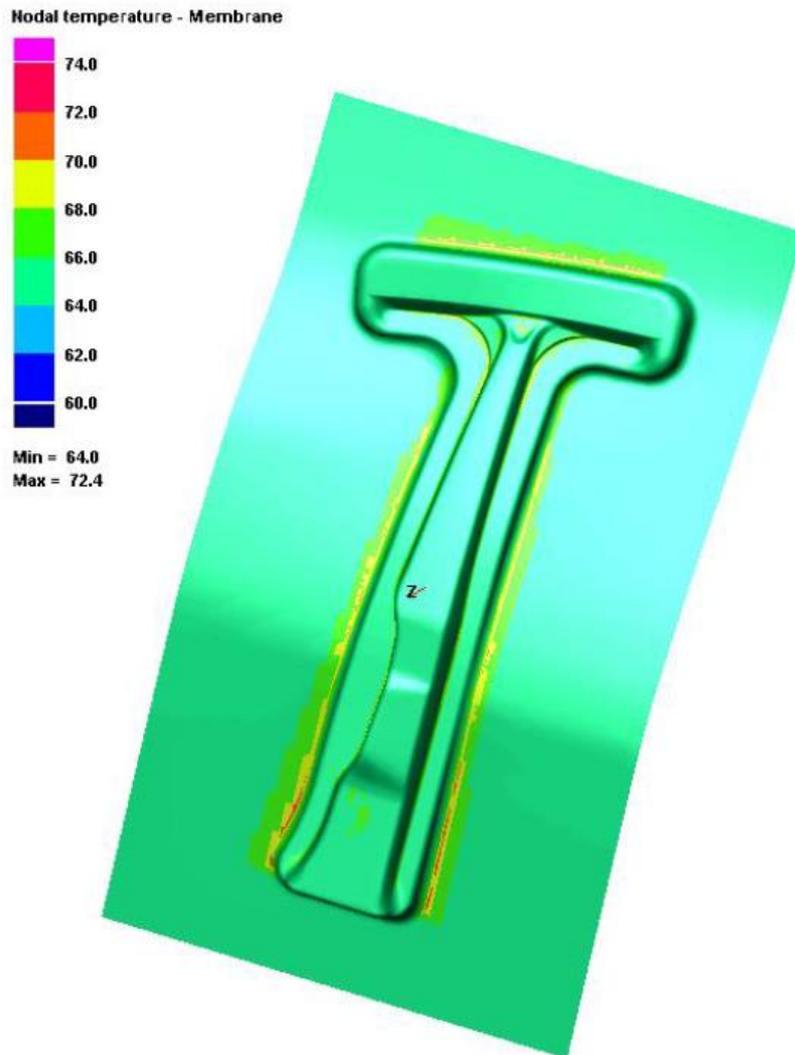


Imagen 25 Temperatura de la Matriz

### 6.4.3. QUENCHING

Una vez finalizado el proceso de estampación, se procede a templar la pieza, a continuación, se mostrará el proceso centrándose en el enfriamiento del material a lo largo del tiempo y en la transformación del acero cuando esto sucede.

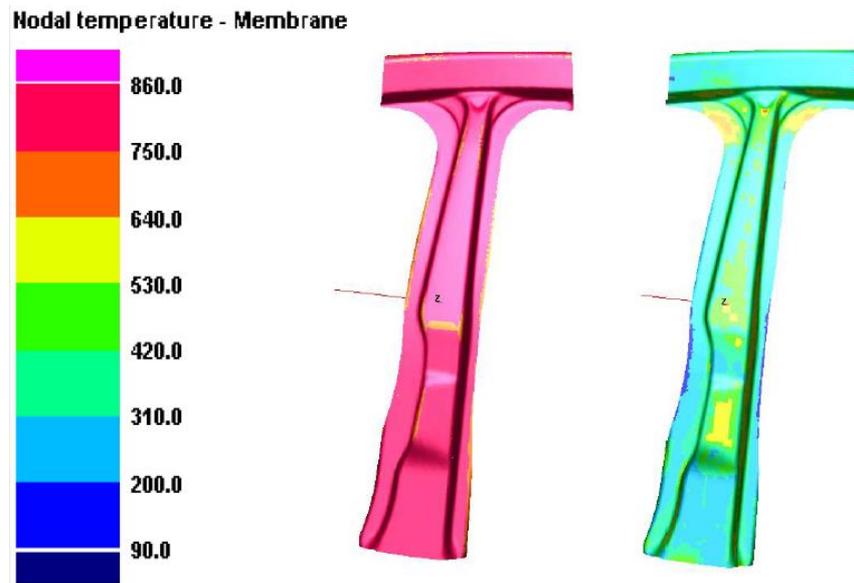


Imagen 26 Temple 0-4s

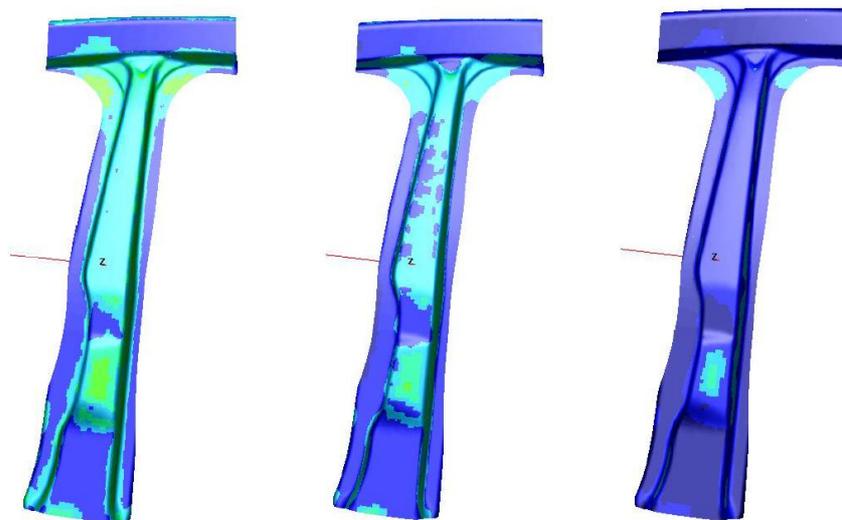
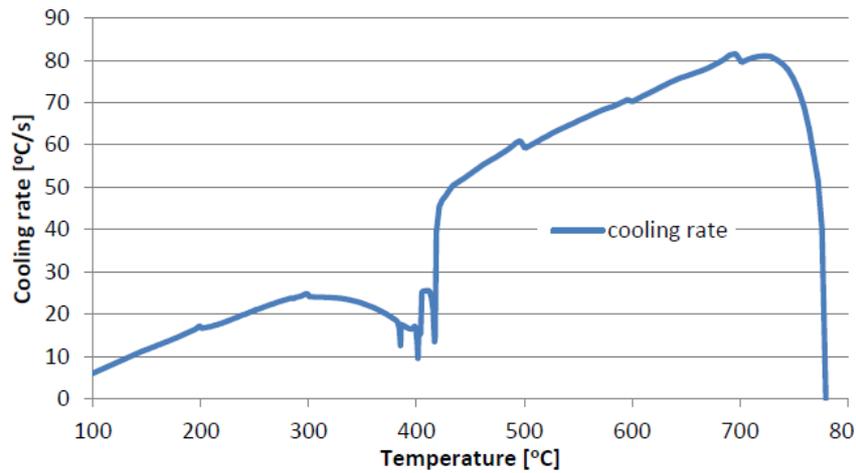


Imagen 27 Temple 8-20s

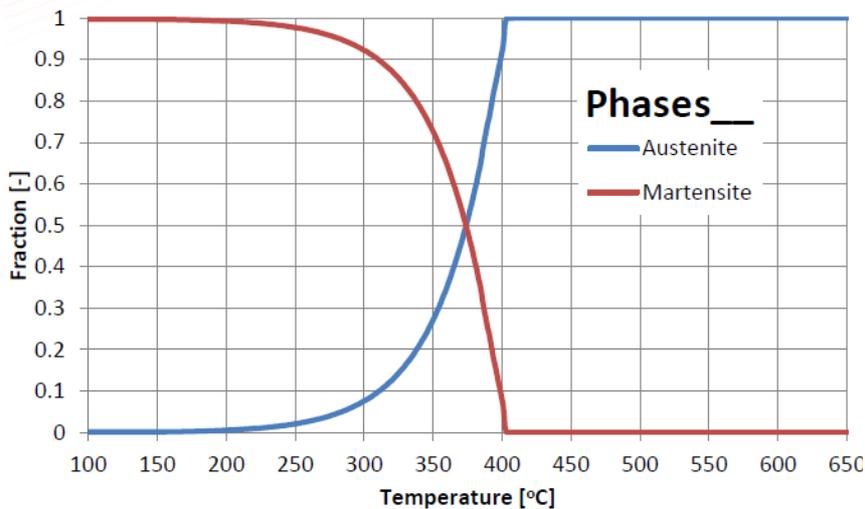
En las imágenes anteriores se ilustra el proceso de temple a lo largo del tiempo, la primera imagen corresponde al estado de la pieza recién finalizada la estampación, la segunda una vez transcurridos 4 segundos y la última, 20 segundos más tarde.

**Tabla 6 Tasa de enfriamiento**



Se aprecia un enfriamiento muy rápido en la primera parte del templado del pilar de los 700 a los 430 descendiende de una manera uniforme, hasta que vuelve a aumentar la velocidad de enfriamiento debido al cambio de fases (Tabla 7) para volver a estabilizarse hasta alcanzar la temperatura ambiente.

**Tabla 7 Transformación de fases**



Para terminar con el apartado de temple, se muestran dos imágenes correspondientes a la fracción de austenita y martensita que posee la pieza una vez realizado el temple.

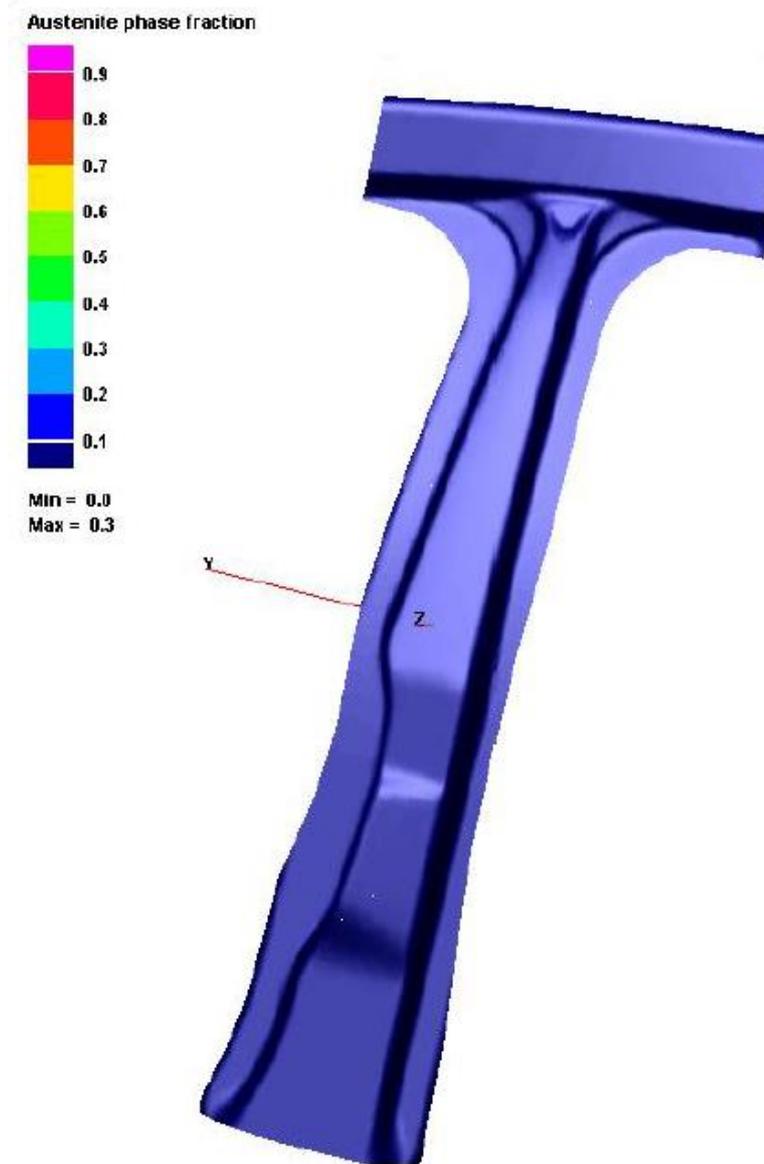


Imagen 28 Fase Austenita

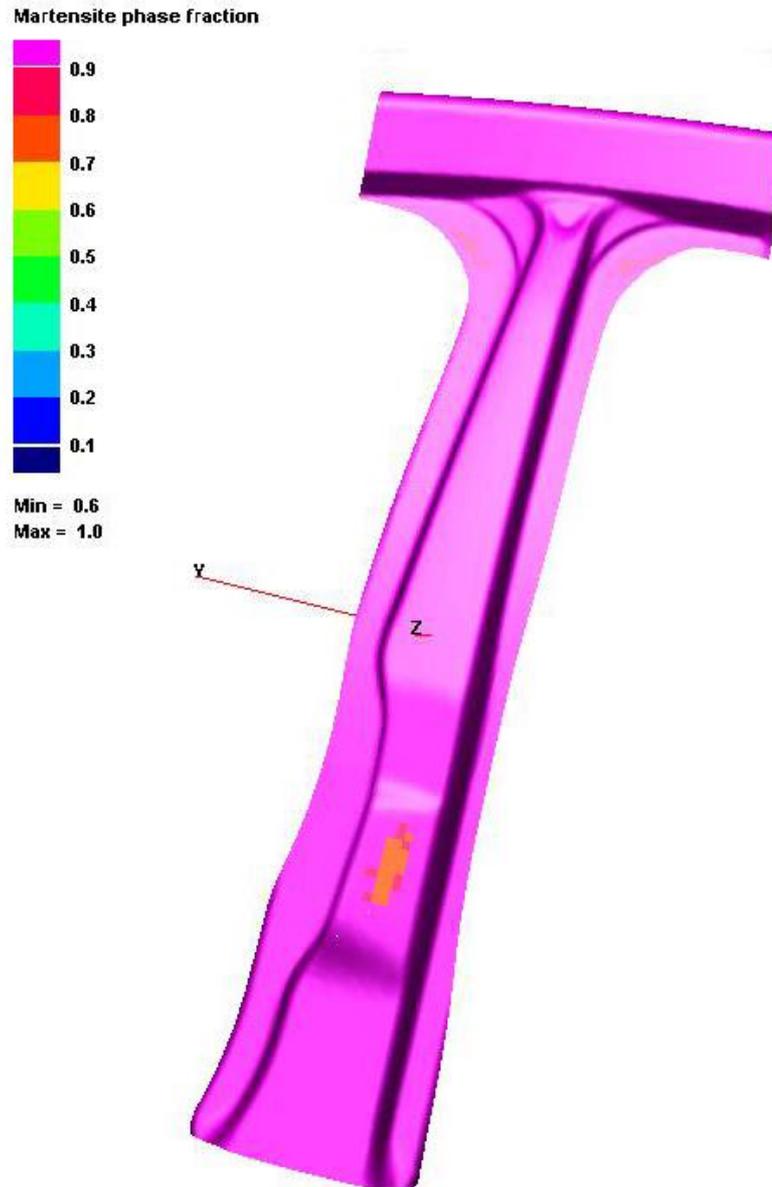


Imagen 29 Fase martensita

#### 6.4.4. RESULTADOS

El último proceso es el del enfriamiento al aire de la pieza, se presentarán diferentes imágenes comparando, por un lado, la temperatura de la pieza antes y después del enfriamiento al aire y por otro, el estado de las fases antes y después del proceso mencionado.

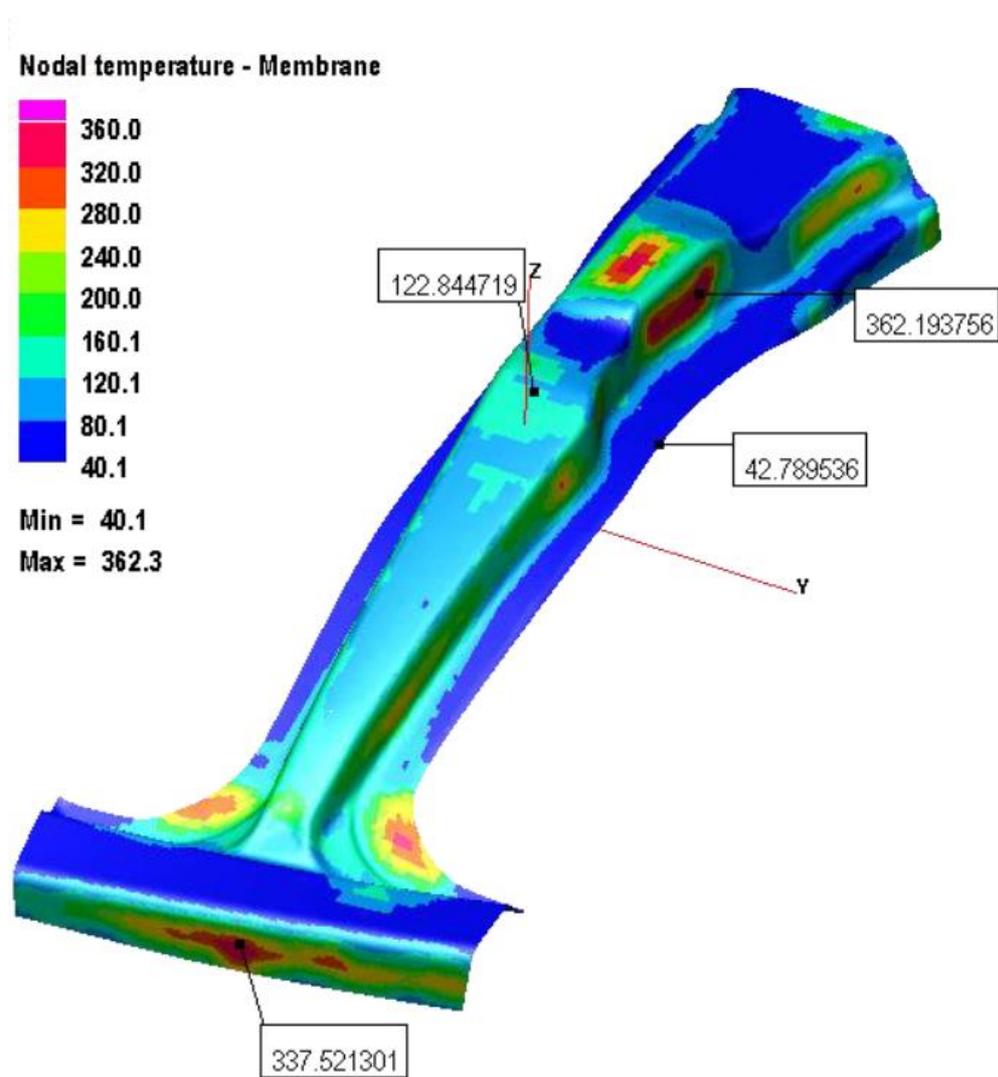


Imagen 30 Temperatura tras Templado

Nodal temperature - Membrane

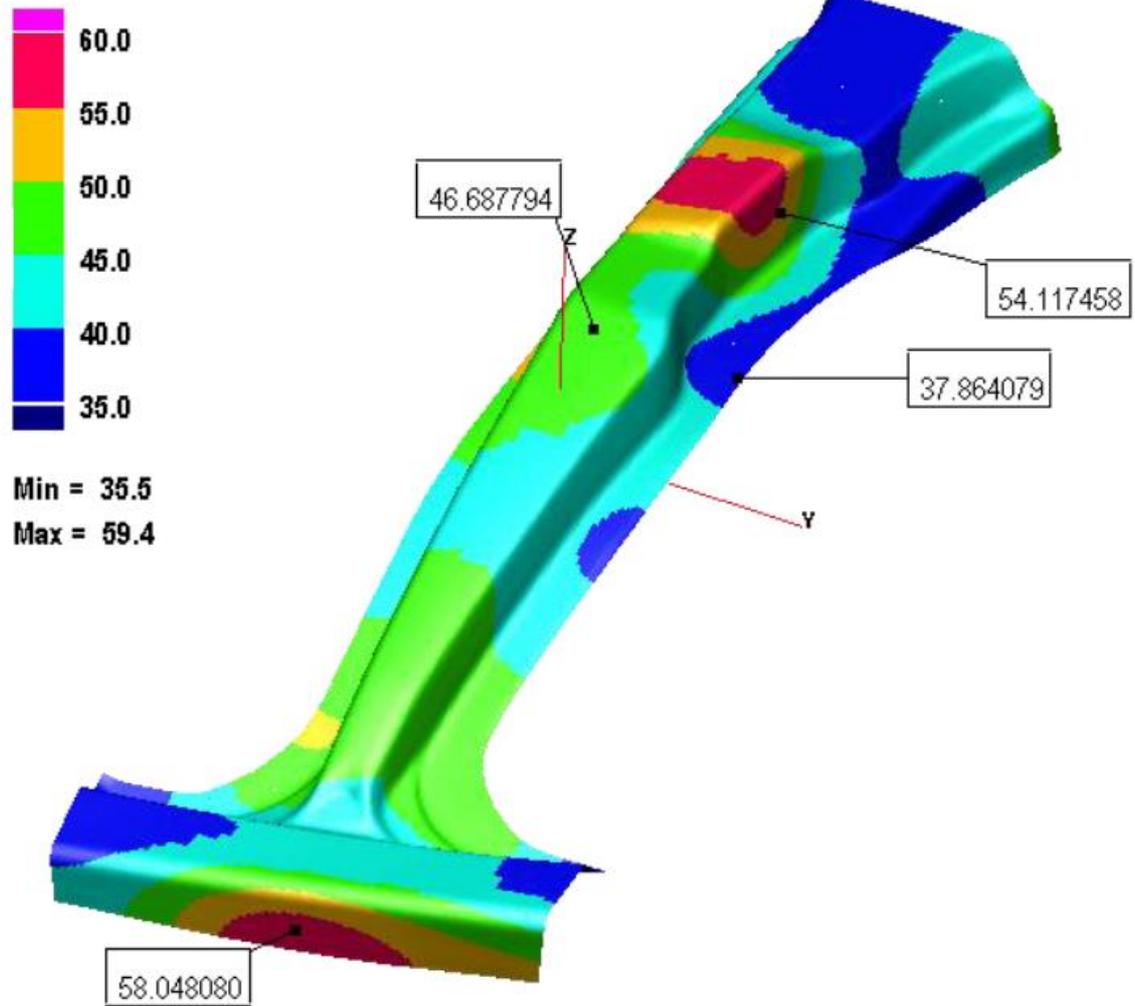


Imagen 31 Temperatura tras enfriamiento

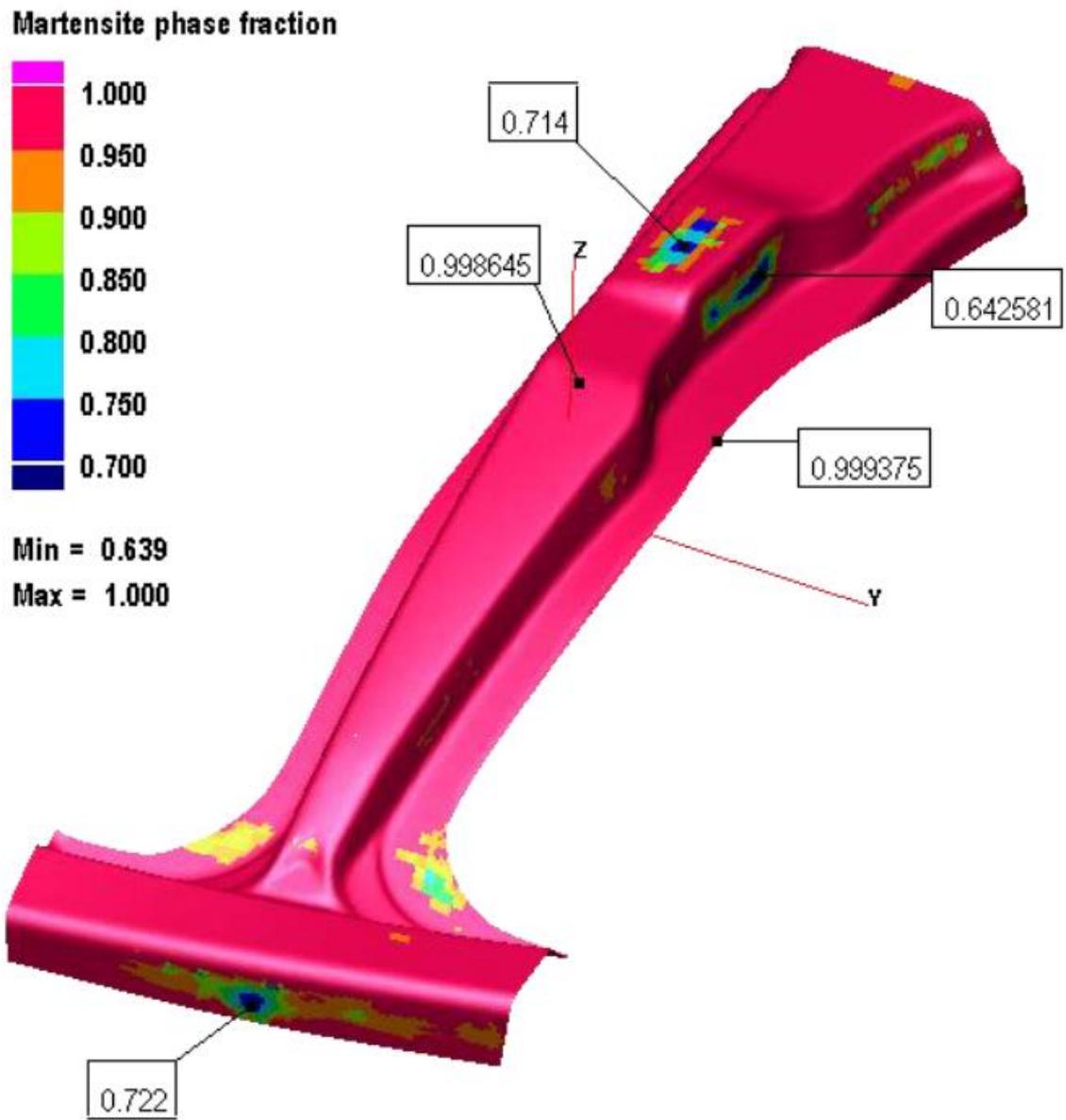


Imagen 32 Fase martensita tras templado

Martensite phase fraction

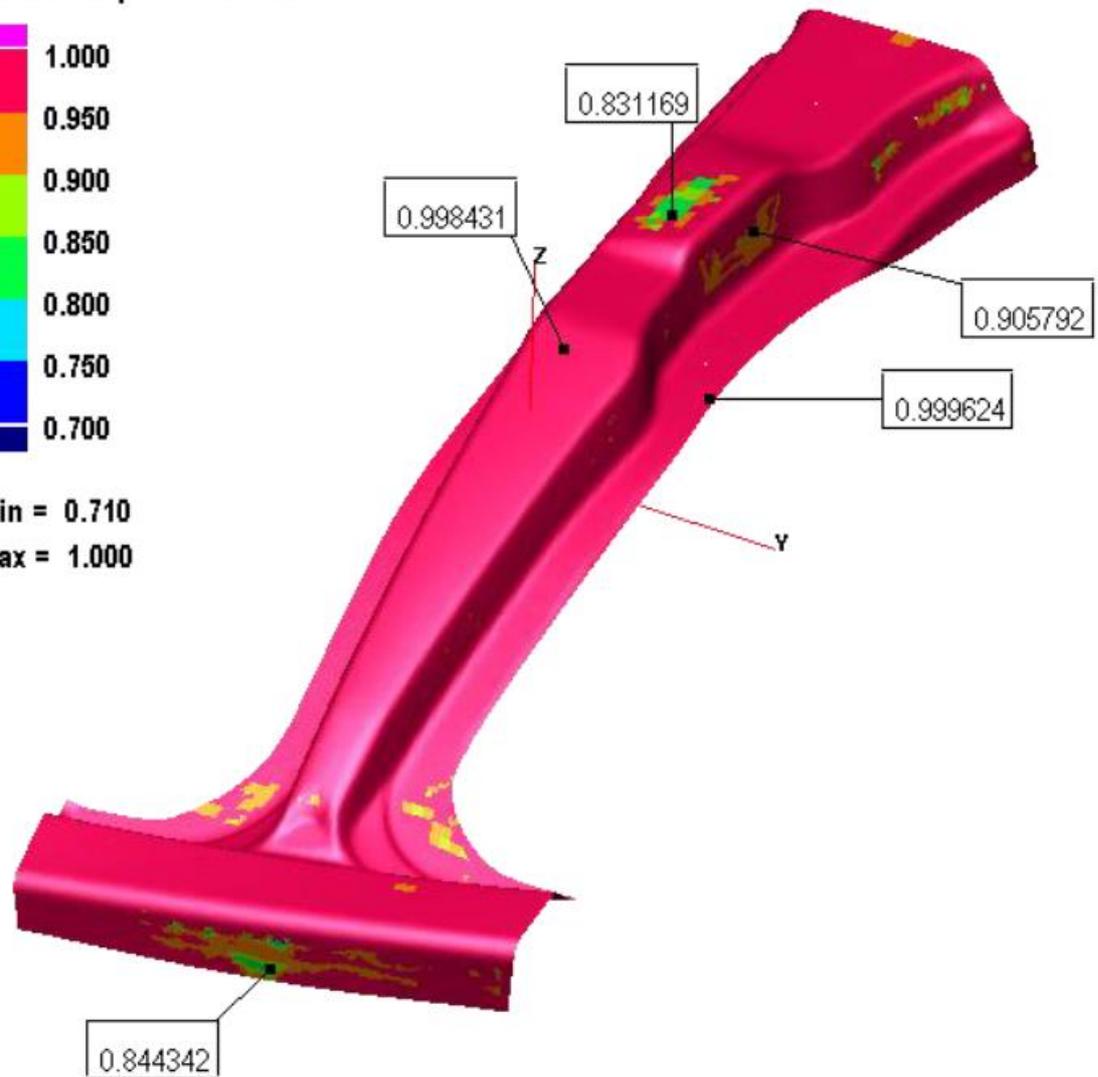
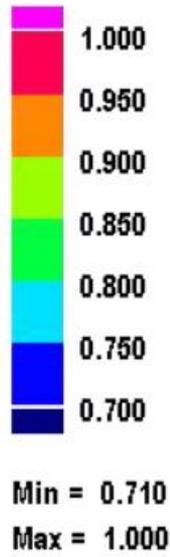


Imagen 33 Fase martensita tras enfriamiento

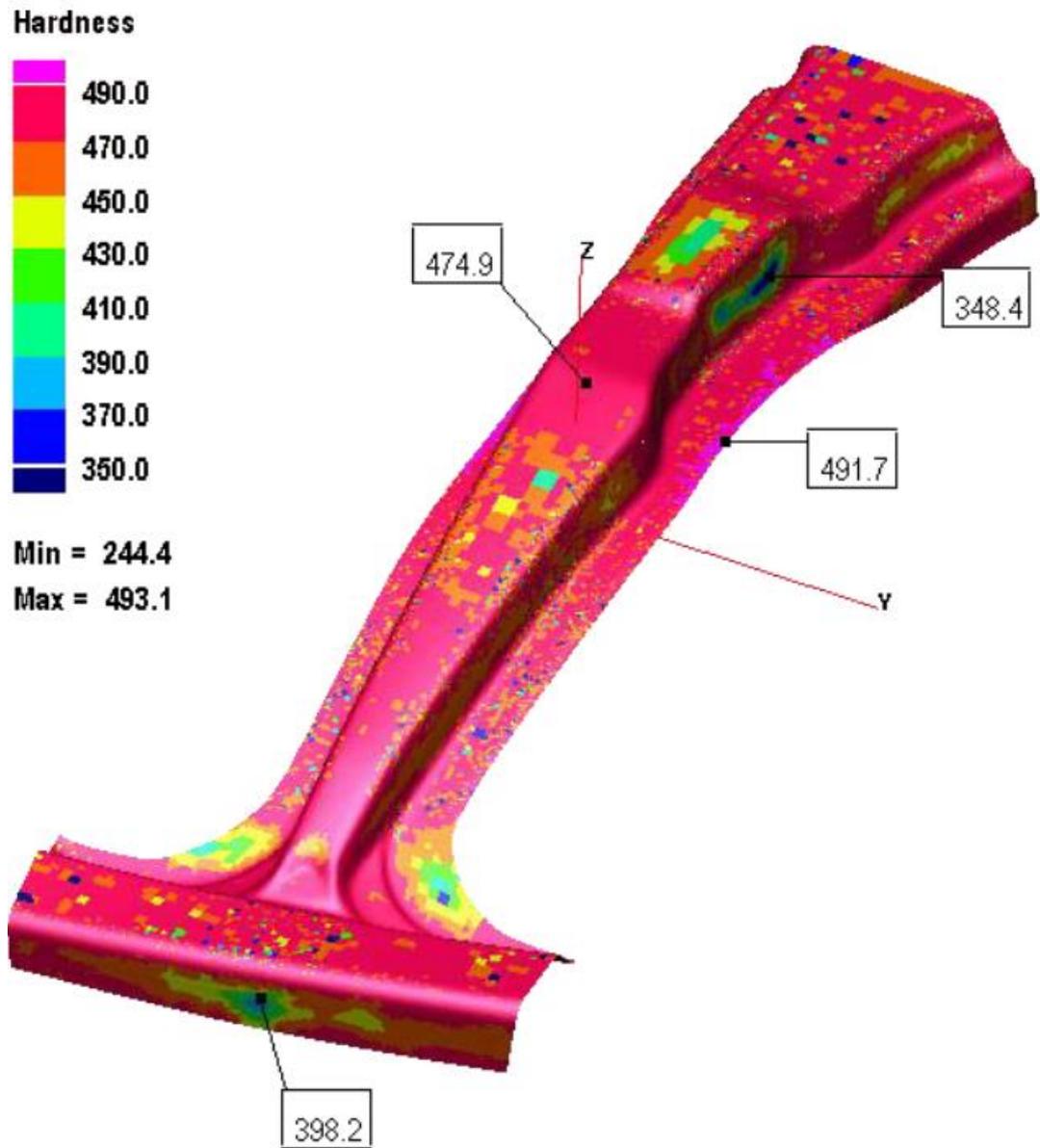
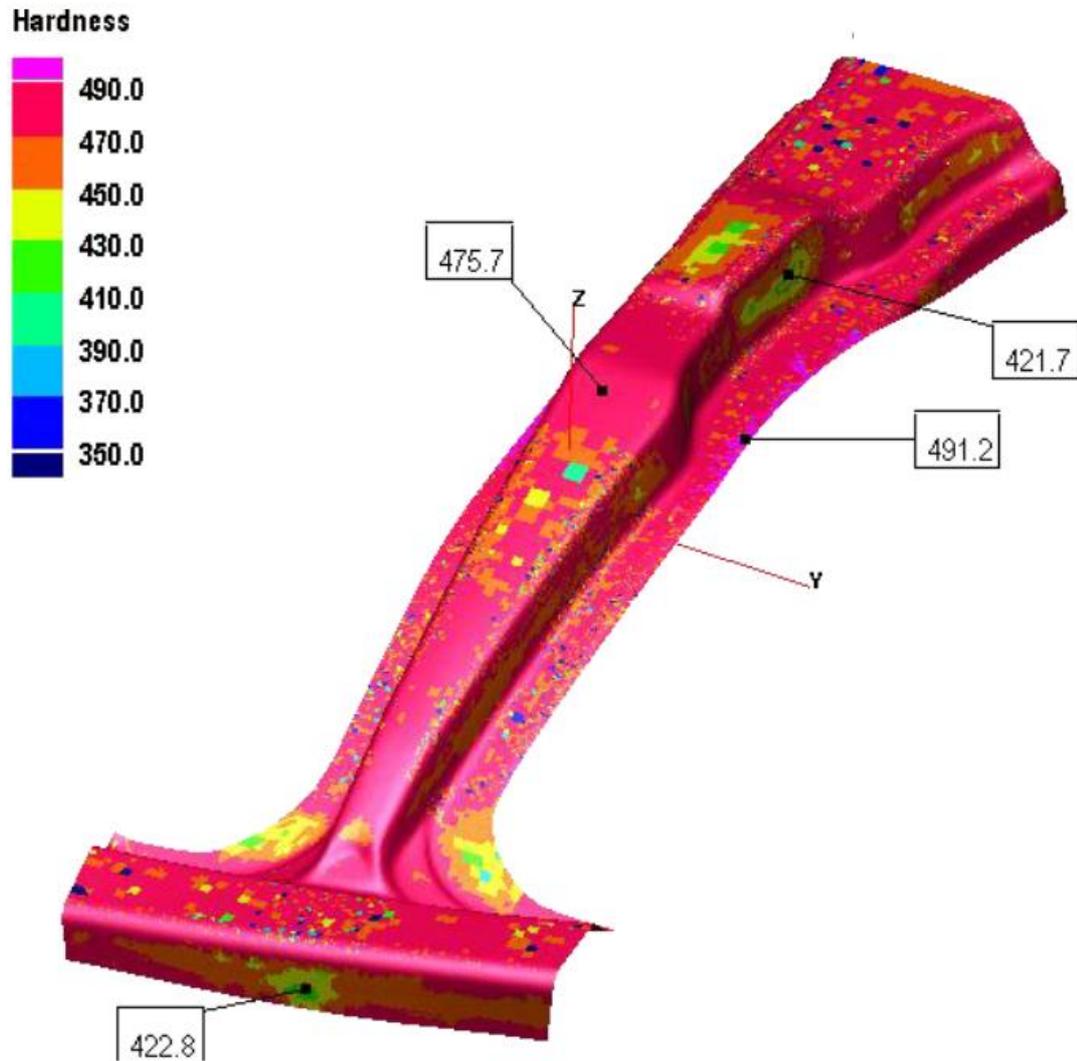


Imagen 34 Dureza tras Templado



**Imagen 35 Dureza tras enfriamiento**

Con estas imágenes se muestra como las partes de la pieza que más tardan en enfriarse, son aquellas que menos dureza tienen debido a que la proporción de material en fase martensita es menor. Son zonas muy localizadas de la pieza y la dureza, aun siendo menor, no supone un riesgo para la durabilidad y el correcto funcionamiento de la misma. Por el contrario, las partes del pilar que sufren un descenso de temperatura más rápido, muestran valores mayores de dureza alcanzando los 491,2 HV después del enfriamiento al aire.