

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***SIMULACIÓN DE LA ESTAMPACIÓN DE
UNA PIEZA DE LA ESTRUCTURA DE
UN AUTOMÓVIL***

Alumno/Alumna: Caballero, Lejarza, Diego

Director/Directora: Angulo, Duque, Carlos

Curso: 2018-2019

Fecha: 16, junio, 2019

ÍNDICE

I. RESUMEN.....	1
II. LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRÓNIMOS.....	3
II.1 Lista de ilustraciones.....	3
II.2 Lista de tablas	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. CONTEXTO	6
3. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	8
4. BENEFICIOS DEL PROYECTO.....	9
4.1 Beneficios Técnicos.....	9
4.2 Beneficios económicos	9
5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	10
5.1 Software a emplear	10
5.2 Proceso de simulación	10
6. ESTADO DEL ARTE.....	11
7. METODOLOGÍA.....	17
7.1 Ensayos y simulación	17
7.2 Análisis de resultados	23
8. DESCRIPCIÓN DE TAREAS	29
T1. Estudio del arte y proceso	29
T2. Trabajo de simulación.....	29
T3. Trabajo de validación.....	29
T4. Redacción del trabajo	29
8.1 Diagrama de GANTT	30
9. PRESUPUESTO.....	31

9.1 Coste de recursos humanos.....	31
9.2 Coste de recursos materiales.....	31
9.3 Costes indirectos.....	32
9.4 Costes totales.....	32
10. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	33
11. CONCLUSIONES.....	35
12. REFERENCIAS	36
13. ANEXO: RESULTADOS	37
13.1 ESTAMPACIÓN A 10MPa.....	37
13.2 Comparación entre simulaciones	39

I. RESUMEN

Actualmente, La producción de piezas de aceros de alta resistencia para la industria del automovilismo, requiere un profundo control y conocimiento de la tecnología denominada estampación en caliente. De esta manera, las propiedades que se obtienen en estos aceros se vuelven predecibles y ajustables en función de diferentes parámetros de procesado. En este documento, se analizará la influencia de, entre otros, la presión de contacto o temperatura sobre una chapa de acero.

Para llevar esto a cabo, se empleará el software 'Pam-Stamp' el cual es capaz de realizar simulaciones de procesos de estampación en caliente mediante elementos finitos. De este modo, se podrán comparar los datos obtenidos en las simulaciones con los resultados de varios ensayos realizados sobre distintas chapas proporcionados por UPV/EHU y IK4 AZTERLAN para así entender la relación de los parámetros de procesado a determinar y las propiedades finales de la chapa.

Gaur egun, automobilgintzarako erresistentzia altuko altzairuen piezen ekoizpenerako, beroko konformazioa izeneko teknologiaren inguruko kontrola eta ezagutza sakona edukitzea beharrezkoa da. Horrela, altzairu hauetan lortzen diren propietateak moldatu eta iragarri daitezke hainbat prozesu parametroen bidez. Dokumentu honetan, hainbat parametroen artean, kontaktuko presioa edo tenperatura duten eragina xafla batengan aztertuko da.

Horretarako, 'Pam-Stamp' izeneko softwarea erabiliko da, beroko konformazioko prozesuak elementu finituen bidez simulatzeko gai dena. Horrela, simulazioetan lortzen diren datuak UPV/EHU eta IK4 AZTERLAN-ek eskaintzen dituen hainbat xaflatan egindako entseguen emaitzekin konparatu ahalgo dira eta honekin, diseinu parametroen eta amaierako propietateen arteko erlazioa ulertu.

Currently, the production of high strength steel components for the automotive industry requires a deep knowledge and control of the technology known as hot forming. In this way, the properties obtained in these steels become adjustable and predictable as a function of several processing parameters. In this document, the influence of several parameters (such as the contact pressure or the temperature) over a steel plate will be analyzed.

In order to fulfill this, a software called 'Pam-Stamp' will be employed which is capable of simulating hot forming processes by means of finite elements. The data obtained in the simulations will be used to be compared with the results obtained in different tests carried out in several plates by UPV/EHU and IK4 AZTERLAN with the objective of understanding the relation between the processing parameters and the final properties of the plates.

II. LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRÓNIMOS

II.1 Lista de ilustraciones

Figura 1. Representación gráfica de las partes que actualmente, por sus características, son fabricadas mediante estampación en caliente [1]	6
Figura 2. Representación gráfica de los diferentes métodos de estampación en caliente (a)método directo (b)método indirecto [2]	12
Figura 3. (a) Elongación y tensiones de rotura en función del tratamiento térmico aplicado a 22MnB5 (b)curvas de enfriamiento para 22Mn [2]	13
Figura 4. Esquema de un troquel con calentamiento mediante resistencias eléctricas [1]	14
Figura 5. Método de calentamiento por inducción, por orden; longitudinal, transversal y en cara [1]	14
Figura 6. Esquema de un troquel genérico de estampación en caliente [2]	15
Figura 7. Relación entre los distintos campos a tener en cuenta en la estampación en caliente. [2]	16
Figura 8. Esquema de la placa	17
Figura 9. Configuración del troquel en el laboratorio	18
Figura 10. Dimensiones del troquel y el sistema de enfriamiento	18
Figura 11. Ventana de selección del tipo de proyecto	19
Figura 12. Interfaz principal del programa Pam-Stamp	20
Figura 13. Configuración de troquel cerrado	20
Figura 14. Ventana de traslación de elementos.....	21
Figura 15. Ventana del menú ‘process’	22
Figura 16. Ventana de selección de resultados.....	23
Figura 17. Distribución de la fracción de martensita en el último instante del templado en la simulación a 36kN (5MPa)	23
Figura 18. Perfiles de temperaturas durante el templado en la parte interior y exterior de la chapa en la simulación a 5MPa	24
Figura 19. Distribución de durezas Vickers en la chapa simulada a 5MPa de presión	25
Figura 20. Perfiles de las temperaturas recogidas por el termopar en el ensayo de 5MPa de presión.....	26
Figura 21. Comparación de temperaturas en ensayo y simulación a 5MPa de presión..	27

Figura 22. Evolución de las presiones de contacto en diferentes puntos de la chapa durante el templado a 5 MPa de presión nominal.....	28
Figura 23. Diagrama de GANTT en el que se reflejan las diferentes tareas llevadas a cabo en el proyecto.....	30
Figura 24. Distribución de la fracción de martensita en el último instante de la simulación a 72kN (10MPa)	37
Figura 25. Comparación entre ensayo y simulación a 10MPa de presión	38
Figura 26. Evolución de las presiones de contacto en diferentes puntos de la chapa durante el templado a 10MPa de presión nominal	38
Figura 27. Distribución de durezas Vickers en la chapa simulada a 10MPa de presión ..	39
Figura 28. Comparación entre las simulaciones realizadas a 10 y 5 MPa en el punto del termopar.....	39

II.2 Lista de tablas

Tabla 1. Composición química de la aleación 22MnB5	13
Tabla 2. Equivalencias entre dureza Vickers y resistencia a la tracción.....	25
Tabla 3. Costes de horas internas empleadas en el proyecto.....	31
Tabla 4. Amortizaciones del proyecto	31
Tabla 5. Costes totales del proyecto	32
Tabla 6. Matriz de Impacto-Probabilidad.....	33

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se va a realizar un análisis de la simulación de estampación en caliente sobre una chapa rectangular mediante el programa Pam-Stamp. Este proceso se basa en el calentamiento de los aceros y una posterior deformación más un rápido enfriamiento para obtener propiedades mecánicas de gran valor.

Para comprender con más detalle esta tecnología, primero se expondrán sus orígenes y su evolución hasta llegar al estado actual en el que se encuentra y las piezas que hoy en día son producidas utilizando este proceso.

A continuación, se definirán los objetivos y el alcance de las simulaciones explicando los diferentes datos que se esperan obtener y como servirán de utilidad para el desarrollo de esta tecnología.

Después, se enunciarán los beneficios que puede llegar a tener el análisis de los datos a procesar en diferentes ámbitos como el técnico o el económico mostrando la influencia del trabajo realizado.

Se continuará haciendo una exposición en detalle de la estampación en caliente mediante el estado del arte, explicando en que se basa y las últimas variaciones técnicas que pueden ser encontradas en la industria además del análisis de los diferentes campos que la componen.

Una vez expuestos los objetivos, alcance y el estado del arte, se procederá a explicar la metodología realizada para la realización de este trabajo; tanto la parte de los ensayos en el laboratorio realizados por UPV/EHU y IK4 AZTERLAN, como la posterior parte computacional en el software a emplear. Además de la descripción de los pasos que se han llevado a cabo, se expondrán los resultados obtenidos mediante la simulación y se compararán con los datos de los ensayos para comprobar que las propiedades de las piezas procesadas en los ensayos son las deseadas.

Explicada la metodología a seguir, se hará una descripción de las diferentes tareas que se han llevado a cabo en este proyecto. Las tareas se clasificarán en varios apartados y finalmente se utilizará el programa Ms Project para desempeñar un diagrama de GANTT y posteriormente, se hará un desglose de gastos presentando un presupuesto del trabajo.

Por último, se hará un análisis de riesgos para finalmente terminar el trabajo con una serie de conclusiones resumiendo los puntos más importantes que han sido desarrollados en él.

2. CONTEXTO

La estampación en caliente es una tecnología que combina el forjado en caliente tradicional con la estampación en frío y se considera como la mejor manera de producir componentes que proporcionan la mayor relación resistencia/peso para el automóvil llegando a obtener resistencias a tracción de hasta 1500 MPa.

Este proceso, fue desarrollado y patentado por una empresa sueca llamada 'Plannja' en 1977 y no fue empleado en la industria del automovilismo hasta 1984 cuando Saab introdujo esta tecnología para la producción de varias de sus piezas en su Saab 9000. Esto supuso un incremento en la producción de 3 millones de piezas/año a 8 millones de piezas/año hasta llegar a 107 millones de piezas/año estampadas en caliente a partir del siglo XXI.

Con el objetivo de reducir emisiones de CO₂ y de asegurar la estabilidad del vehículo en los accidentes, la demanda de componentes con peso reducido y seguridad mejorada ha recibido un aumento considerable en los últimos años. En consecuencia, la estampación en caliente se ha convertido en la opción óptima para la producción de componentes estructurales del automóvil ya que permite elaborar aceros de alta resistencia en una amplia variedad de geometrías.

Entre las piezas de coche estampadas en caliente se incluyen los parachoques frontales y traseros, pilares A, B, y C o la estructura del techo entre otros (**Figura 1**).

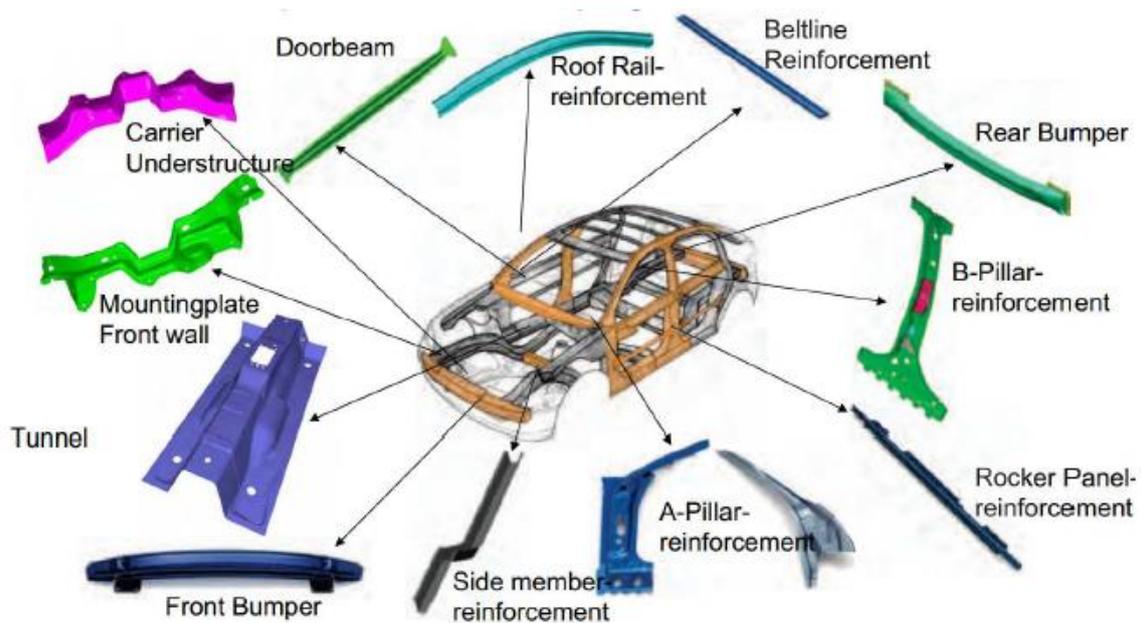


Figura 1. Representación gráfica de las partes que actualmente, por sus características, son fabricadas mediante estampación en caliente [1]

Por otro lado, el método de elementos finitos es uno de los grandes contribuyentes para la implantación de este proceso en la industria. Gracias al avance de la tecnología computacional a finales de los 80 y la madurez en la que se encontraba este método, la simulación de forjado de partes de aceros de alta resistencia fue desarrollada rápidamente como conclusión la gran demanda de este tipo de piezas.

Durante este periodo, se desarrolló la teoría tridimensional no lineal de cáscaras que ayudó a analizar en profundidad cuerpos complejos como las cubiertas de carrocería y, en consecuencia, varios softwares de elementos finitos de alta precisión como 'Dynaform', 'Autoform' o 'Pam-Stamp' fueron desarrollados. Estos programas son capaces de tratar con problemas de alta complejidad como las grandes no linealidades geométricas o materiales, contactos y fricción, tanto para estampación en frío como en caliente.

Actualmente, el uso de la estampación en caliente se da mayoritariamente en la automoción, pero gracias a su gran efectividad y optimización, se espera que esta tecnología se expanda a otros sectores de la industria como el naval, trenes de alta velocidad o construcción.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto es realizar varias simulaciones de un proceso de estampación en caliente empleando el método de elementos finitos mediante el software Pam-Stamp el cual es capaz de reproducir esta tecnología de manera precisa.

Principalmente, las simulaciones realizadas servirán para la verificación de los ensayos realizados por UPV/EHU y el grupo IK4 AZTERLAN sobre una pieza y de esta manera comprobar que estos han sido realizados correctamente obteniendo las propiedades mecánicas deseadas. Para esta

Además, las simulaciones permitirán un análisis de los diferentes campos que componen este proceso ya que será posible observar entre otros, el proceso térmico al que son sometidas las chapas, los cambios su microestructura así como el efecto que estos tendrán en las presiones de contacto en diferentes puntos.

Por otro lado, las simulaciones serán de gran ayuda para extrapolar los resultados obtenidos a otros modelos a procesar mediante la estampación en caliente ya que permitirán predecir las propiedades finales que podrían ser obtenidas en geometrías más complejas de manera aproximada.

Finalmente, se espera que este trabajo sea continuado por futuros alumnos ya que es posible utilizar otras herramientas que proporciona Pam-Stamp para, entre otros aspectos, simular el enfriamiento en los troqueles durante varios ciclos y comprobar el impacto térmico sobre ellos.

4. BENEFICIOS DEL PROYECTO

Este proyecto proporciona dos tipos de beneficios principalmente: los beneficios técnicos y los económicos

4.1 Beneficios Técnicos

Esta tecnología ha sido desarrollada como una alternativa optimizada de la estampación en frío ya que no solo proporciona piezas de menor peso aumentando su resistencia frente a impactos u otros imprevistos, sino que también permite una mayor flexibilidad en los materiales a emplear sin la necesidad de esfuerzos y fuerzas tan elevados en el estampado.

Es por eso que, entre los beneficios técnicos se puede destacar en mayor medida la comprensión de esta tecnología en auge para así obtener componentes de gran calidad. Gracias a la simulación de la estampación en caliente será posible realizar una predicción de las propiedades que pueden ser obtenidas mediante este proceso y así poder implementarlas en diferentes ámbitos de la industria.

Por lo tanto, las contribuciones de las simulaciones realizadas están directamente relacionadas con la mejora y optimización de esta flexible tecnología proporcionando una mayor comprensión en los diferentes campos que la componen.

4.2 Beneficios económicos

Como es lógico, estos beneficios técnicos repercutirán directamente en el apartado económico generando un considerable ahorro monetario al prevenir el procesado de piezas no aptas para las características requeridas. La predicción de factores como temperaturas o presiones óptimas, habilitará un diseño de procesado preciso ahorrando tiempo en pruebas y, en consecuencia, reducirá el impacto económico de los procesos de estampación en caliente.

Además, conocer esta tecnología en profundidad permitirá optimizar los sistemas de producción de las piezas produciendo más piezas/hora y de esta manera generando más beneficios.

5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

En este punto se estudiarán diferentes alternativas o soluciones que se podrían haber tomado en lugar de haber seguido las pautas tomadas.

5.1 Software a emplear

Existen varios programas para la simulación de estampación en caliente mediante elementos finitos como pueden ser Autoform, Pam-Stamp y Dynaform. Como se ha mencionado anteriormente, el software empleado para realizar este trabajo es Pam-Stamp ya que es el software del que la escuela dispone licencia y además diferentes tutoriales para facilitar su aprendizaje.

Pam-Stamp es un software desarrollado por ESI-Group, está especialmente diseñado para uso automotriz y aeroespacial y puede ser empleado para todo tipo de procesos de conformado de lámina. Entre los programas disponibles, puede ser algo más complicado de utilizar a la hora de introducir geometrías o definir parámetros de diseño, sin embargo, los resultados de las simulaciones son más precisos que los demás softwares mencionado. Combina todos los procesos (estampado, troquelado, hidroformado, formado en caliente, formado superpástico) en un único programa.

5.2 Proceso de simulación

Existen dos tipos de métodos para llevar a cabo la simulación: 'Single Action' y 'Double Action'. Ambos métodos fueron empleados para la obtención de los resultados pero el método single action fue descartado ya que pese a introducir valores de la fuerza ejercida por los troqueles, los valores de la presión de contacto no tenían sentido y eran mucho mayores que la presión nominal esperada.

6. ESTADO DEL ARTE

En este punto, se analizarán los diferentes aspectos y variaciones de la estampación en caliente. La estampación en caliente es un proceso extenso en el que se aplican varias operaciones sobre el material y generalmente, se compone de los siguientes pasos:

1. Obtención de la chapa
2. Calentamiento de la chapa en el horno
3. Estampación mientras está en caliente
4. Templado de la pieza
5. Operaciones de acabado (Corte láser, granallado etc.)

Las operaciones críticas a analizar son la estampación, el calentamiento y el templado ya que determinaran las propiedades de la pieza final de manera directa.

Existen dos métodos generales de estampación en caliente que se emplean en la industria actual:

-Método directo: También conocido como el método clásico, se basa en calentar la pieza en el horno hasta una temperatura de austenización de unos 900-950°C durante 4-10 minutos y después es transportado a un troquel refrigerado de manera rápida para que no pierda temperatura. En estas temperaturas la chapa tiene un límite elástico muy bajo, esto hace posible estampar formas complejas de un solo golpe.

Durante la estampación la temperatura de la pieza es reducida por unos segundos debido a la refrigeración del troquel, la pieza recibe un tratamiento térmico llamado templado haciendo que su temperatura al salir del troquel esté entre 150 y 200°C y con unas propiedades mecánicas de aproximadamente 1400-1600 MPa de tensión de rotura y 1000-1200 MPa de límite elástico.

-Método indirecto: En este método se aplica un estampado en frío a la pieza previo a su calentamiento el cual alcanza un 90-95% de la forma final para después ser tratada térmicamente.

Este paso previo se realiza para la estampación de piezas extremadamente complejas ya que extiende la capacidad de deformación de las partes pre-reformadas en el tratamiento térmico.

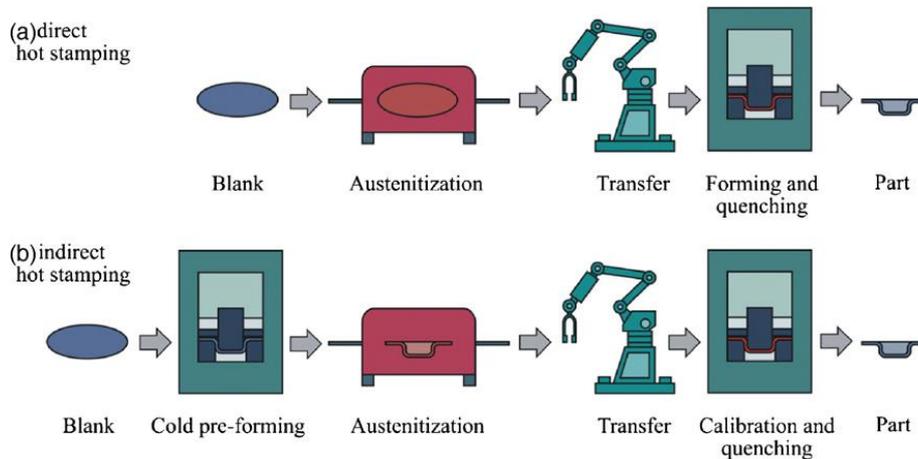


Figura 2. Representación gráfica de los diferentes métodos de estampación en caliente (a)método directo (b)método indirecto [2]

Para comprender la variación en las propiedades mecánicas de las chapas es necesario analizar el tratamiento térmico que se les aplica y su composición química, ya que en función de diferentes variables la microestructura del acero cambia.

Como se puede observar en Figura 3.(a) la austenización hace que el material de la pieza sea muy maleable, con grandes valores de elongación y pequeños valores de tensión de rotura (200-400MPa). Cuando el acero se encuentra en esta fase es deformado a la geometría deseada y así posteriormente templado. Asimismo, estas propiedades son determinadas mediante la microestructura del material la cual es fijada empleando las curvas CCT (**Figura 3.b**). Éstas representan los cambios en la microestructura de un material en función de la velocidad a la que se enfría.

Para este proceso la aleación de acero más empleada es la llamada 22MnB5 y el objetivo es llegar a obtener tensiones de rotura de valores entre los 1400 y 1600 MPa (**Figura 3.a**). En consecuencia, la microestructura austenizada debe realizar una transformación completa a martensita, una microestructura con grandes valores de dureza y resistencia mecánica. Como se puede apreciar en la **Figura 3.b** esta transformación será completa si la velocidad de enfriamiento es superior a la de 27K/s. Este enfriamiento, conocido como enfriamiento crítico, determina el límite para la transformación de la austenita en otras microestructuras como perlita o ferrita las cuales no son tan interesantes en cuanto a sus propiedades mecánicas[3].

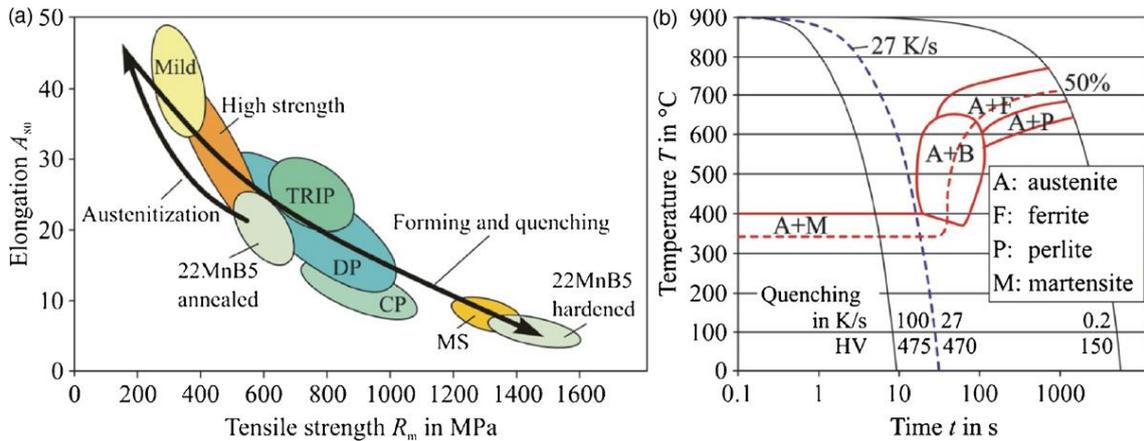


Figura 3. (a) Elongación y tensiones de rotura en función del tratamiento térmico aplicado a 22MnB5 (b) curvas de enfriamiento para 22Mn [2]

La aleación 22MnB5 (Tabla 1.) se considera como la óptima para la estampación en caliente debido a su alto contenido en Boro el cual disminuye de enfriamiento crítico permitiendo un proceso más flexible. Además, su elevado contenido en Cromo y el Manganeso aumenta la tensión de rotura para la obtención de una mayor resistencia.

Composition, wt%											
C	Mn	Si	Ni	Cr	Cu	S	P	Al	V	Ti	B
0.221	1.29	0.28	0.013	0.193	0.01	0.001	0.018	0.032	0.005	0.039	0.0038

Tabla 1. Composición química de la aleación 22MnB5 [1]

Generalmente, el calentamiento de las chapas se emplea mediante hornos continuos, donde la chapa se calienta por radiación y convección mientras es transportada por una serie de rodillos. Estos hornos funcionan mediante gas o electricidad y son los más empleados por su sencillez y versatilidad. Sin embargo, tienen algunos inconvenientes como la oxidación de la pieza en el transporte del horno al troquel, el enorme espacio necesario para su implantación o la lentitud en el calentamiento el cual puede llegar a generar cuellos de botella en el proceso.

Debido estas desventajas, otras formas de transmisión de calor están siendo empleadas para calentar las piezas a estampar. En primer lugar, troqueles con resistencias eléctricas incorporadas, (Figura 4.) los cuales calientan la pieza en el propio troquel mediante corriente eléctrica debido a la parte resistiva de la pieza. Con este método se pueden llegar a obtener 800°C en menos de tres segundos pero también tiene algunos inconvenientes como la distribución no homogénea de la temperatura en la pieza.

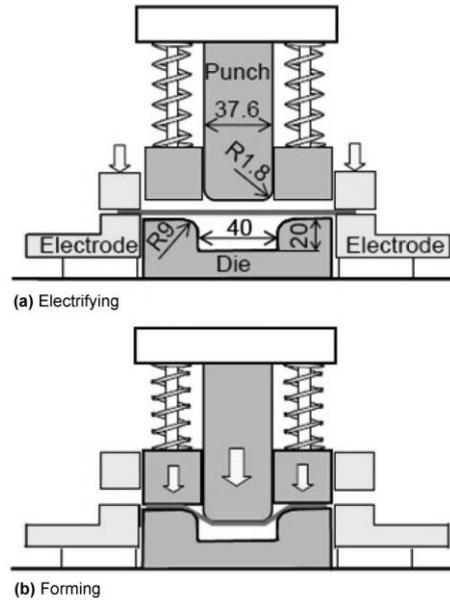


Figura 4. Esquema de un troquel con calentamiento mediante resistencias eléctricas [1]

Además del método por resistencias eléctricas, existe el de calentamiento mediante inducción, empleado en múltiples áreas de la industria. Tiene dos componentes principales: un generador de corriente de alta frecuencia y una bobina de inducción. Varias configuraciones son empleadas en función de la forma y colocación del inductor (**Figura5.**).

La geometría de la bobina determina la posición del campo magnético respecto a la y de esta manera se obtienen diferentes valores de eficiencia. En concreto, la configuración longitudinal ofrece la mayor eficiencia entre las tres diferentes empleadas. En comparación con el horno continuo, el calentamiento mediante inducción ofrece hasta dos veces su eficiencia ya que las chapas no tienen tantas pérdidas de calor.

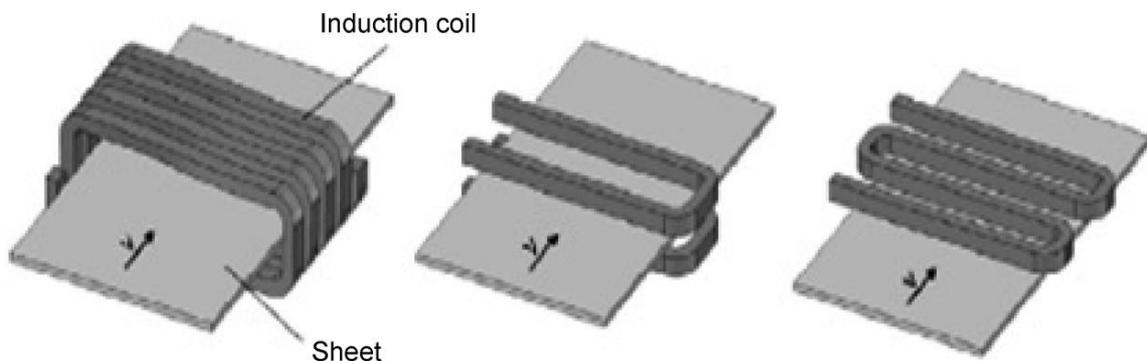


Figura 5. Método de calentamiento por inducción, por orden; longitudinal, transversal y en cara [1]

De igual modo que el calentamiento, no puede haber pérdidas de calor en el estampado, por eso tiene que ser lo más rápido posible y debe ser realizado antes de la transformación de la austenita a martensita.

Por otro lado, los troqueles empleados para el estampado están expuestos a condiciones de trabajo extremas recibiendo altos impactos térmicos y mecánicos. Como se ha mencionado anteriormente, tienen un sistema de refrigeración interno que consta de conductos por donde circula el agua, de este modo, es posible controlar la velocidad de enfriamiento en el templado.

Como se puede apreciar en la **Figura 6**, Los troqueles de estampación en caliente constan de diferentes elementos los cuales realizan distintas funciones en el estampado. Normalmente constan de un pisador (Blank holder) que se encarga de sujetar la pieza mientras el punzón (punch) deforma la chapa sobre la matriz (die). Otros elementos como los frenos, muy empleados en la estampación en frío no son necesarios ya que la pieza al estar en caliente es muy deformable y no hace falta aguantar el estiramiento del material ni ejercer un control preciso sobre las deformaciones.

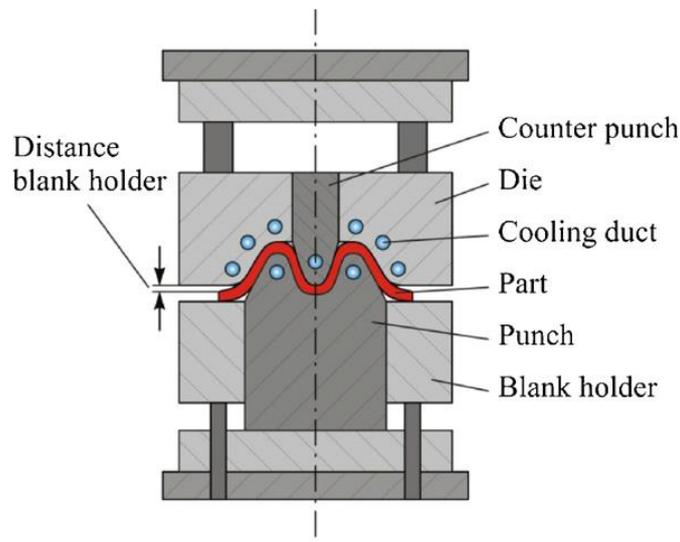


Figura 6. Esquema de un troquel genérico de estampación en caliente [2]

Un aspecto muy importante a considerar, es el desgaste de los troqueles debido a las cargas de trabajo a la que están expuestos, principalmente caracterizado por fenómenos como la abrasión y la adhesión. Actualmente, muchas empresas están llevando a cabo investigaciones relacionadas con este problema proponiendo tanto soluciones como modelos de predicción de fallo para optimizar las operaciones de mantenimiento.

En el proceso general de estampado en caliente se usan dos prensas, la prensa mecánica para operaciones de corte de las chapas y la hidráulica para el propio estampado ya que, como debe ser controlado con alta precisión, es la más apropiada. Después del

estampado suele ser habitual la implementación de procesos como el granallado para dotar a las chapas de un acabado superficial de mayor calidad.

En conclusión, este proceso se compone de la interacción de los diferentes campos de microestructura, estampado y transmisión de calor. Estos campos están directamente relacionados entre sí y un profundo análisis de todos ellos es fundamental para el diseño de la estampación en caliente.

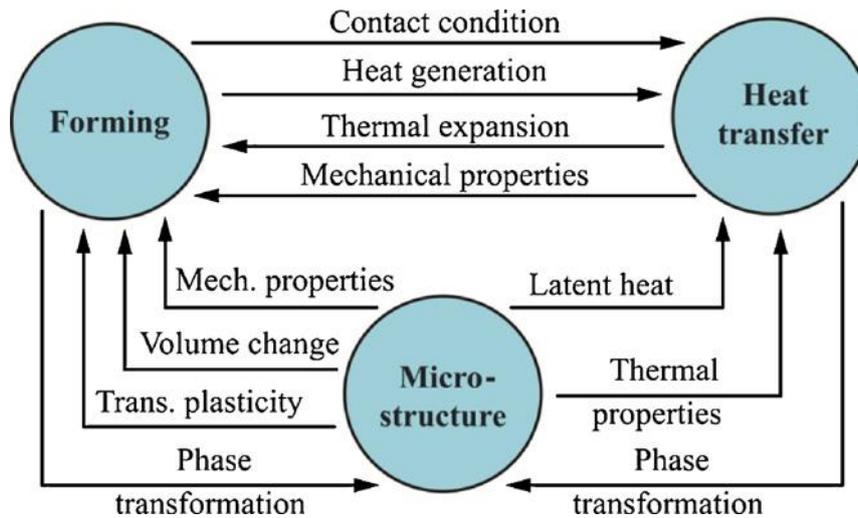


Figura 7. Relación entre los distintos campos a tener en cuenta en la estampación en caliente. [2]

7. METODOLOGÍA

7.1 Ensayos y simulación

Dado que este trabajo se centra principalmente en la simulación de la estampación en caliente mediante el software Pam-Stamp, la metodología se centrará principalmente en la descripción del funcionamiento del programa. Sin embargo, para entender la simulación que se ha llevado a cabo, primero se describirán los ensayos realizados en el laboratorio realizados por el grupo IK4 AZTERLAN y UPV/EHU sobre los que trata dicha simulación.

En estos ensayos, se realizará una estampación de una chapa de dimensiones 80x90mm con un espesor de 3mm de una variación de la anteriormente mencionada aleación de acero 22MnB5, cuyo nombre comercial es USIBOR 1500P cuando se le aplica un recubrimiento de AISi.

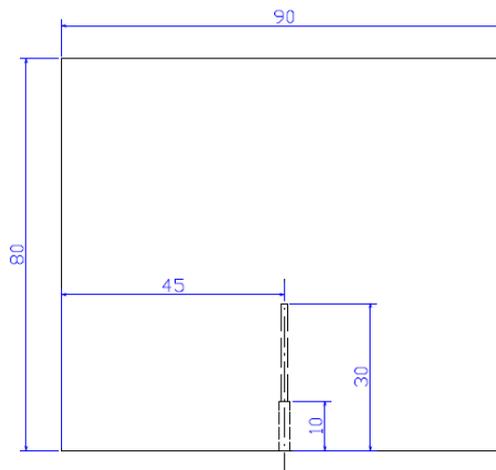


Figura 8. Esquema de la placa

En la chapa a analizar se encuentra un termopar insertado en las dimensiones que pueden ser apreciadas en la **Figura 8**. El termopar se encarga de medir la temperatura de la chapa durante la estampación, por lo tanto, a la hora de realizar la simulación, será importante recopilar los datos aproximados del punto donde este está situado.

Las probetas son calentadas en un horno de resistencias eléctricas y una vez llegan a los 900°C son trasladadas al troquel. Como se puede observar en la **Figura 9**, la configuración a emplear consta de un punzón y una matriz que son totalmente planos e idénticos ya que el objetivo de los ensayos no es realizar piezas con grandes deformaciones si no observar los cambios tanto en la microestructura como en la temperatura de la chapa en función de la presión y otros factores.



Figura 9. Configuración del troquel en el laboratorio

Los troqueles están formados por una fundición gris denominada GJS-700-2 y tanto sus dimensiones como las del sistema de enfriamiento interno pueden ser apreciadas en la **Figura 10**. También quedan indicadas tanto la entrada como la salida del fluido de refrigeración (agua en este caso) ya que el resto de agujeros de M12 son tapados para tener una circulación uniforme del fluido.

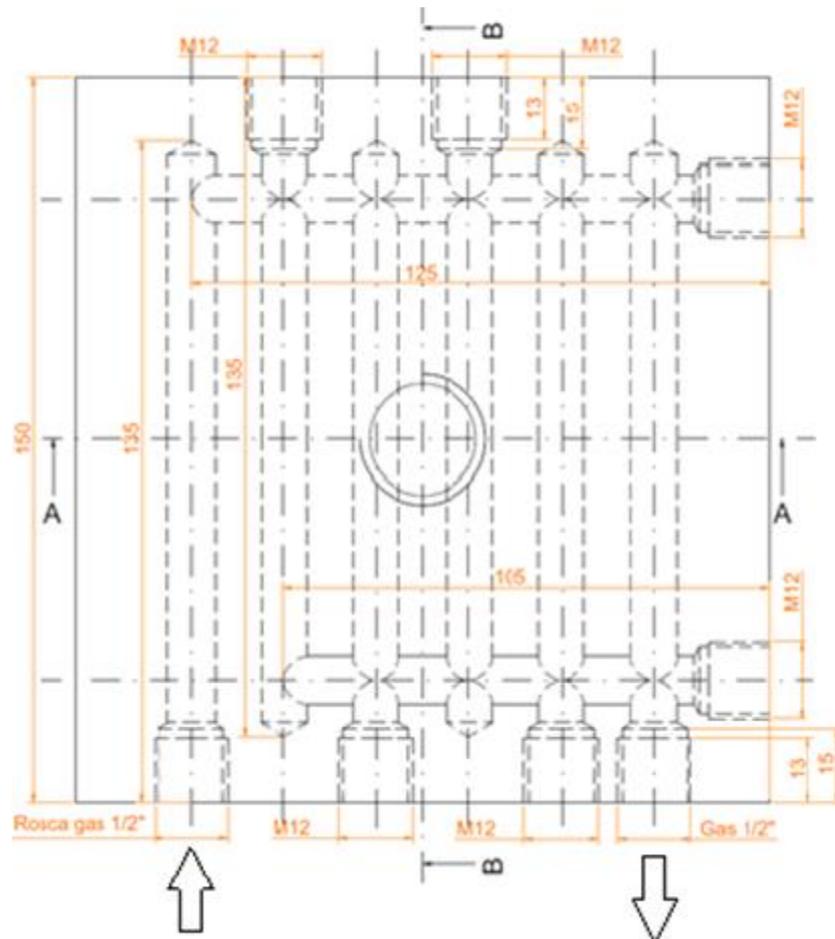


Figura 10. Dimensiones del troquel y el sistema de enfriamiento

Estos ensayos se llevaron a cabo por el grupo IK4 AZTERLAN con la colaboración de UPV/EHU y los datos recopilados son distribuciones de temperaturas y variaciones de presiones clasificadas mediante las presiones de contacto nominales de valores 2.5, 7.5, 10 y 12.5 MPa.

Una vez explicada la metodología empleada en el laboratorio, se desarrollarán los pasos dados en el software Pam-Stamp para la realizar las simulaciones [4].

En primer lugar, se genera un nuevo proyecto del tipo 'Stamp hot forming' y en este caso se le da el nombre de 'Estampación en caliente' (**Figura 11.**). Una vez se ha creado el proyecto se llega a la interfaz principal del programa, donde se encuentran multitud de funciones para llevar a cabo las simulaciones (**Figura 12.**).

Después de seleccionar el tipo de proceso a simular, se introducen las geometrías de punzón, matriz y chapa mediante la opción 'Project' donde es posible importar los CAD que se han generado en el programa ANSYS empleando 'Design Modeler'. Estos CAD serán 3 superficies planas, una rectangular de 80x90 mm y dos cuadradas de 150x150 mm.

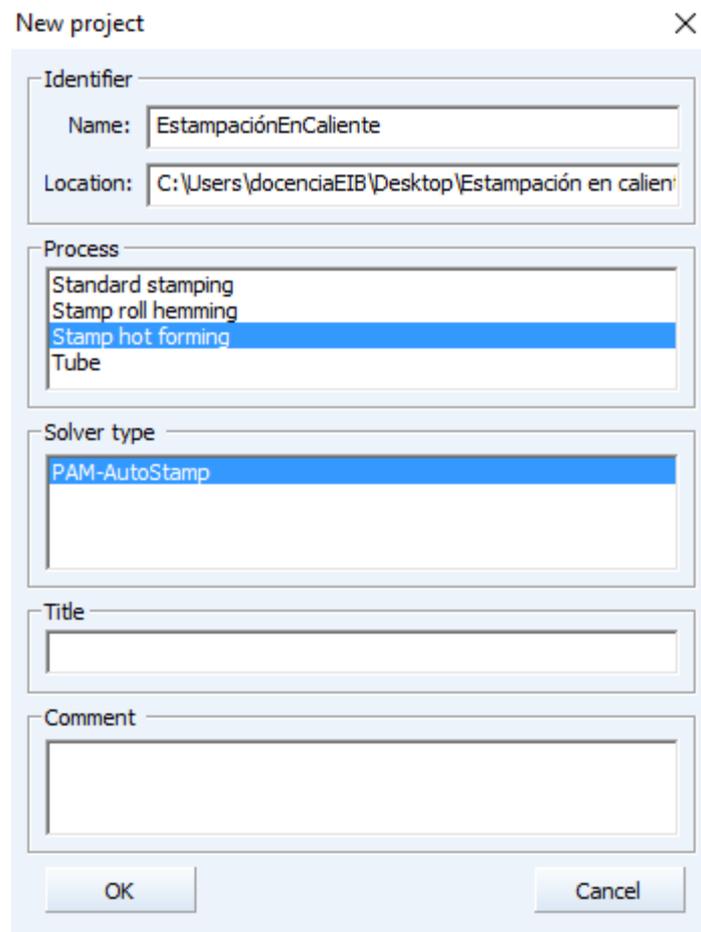


Figura 11. Ventana de selección del tipo de proyecto

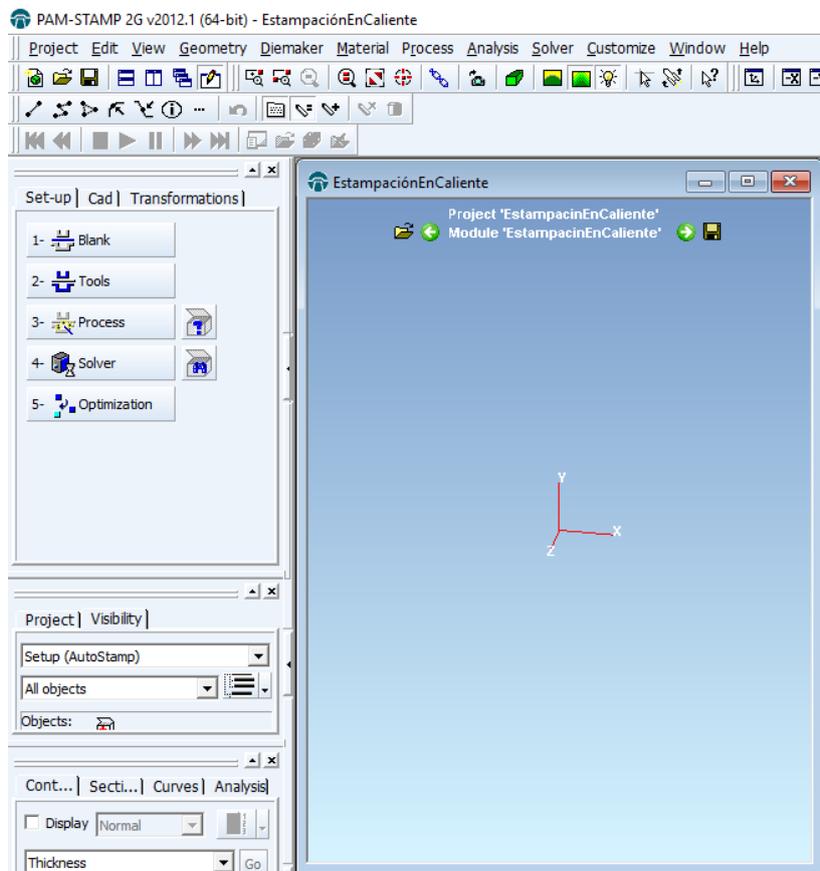


Figura 12. Interfaz principal del programa Pam-Stamp

Las geometrías introducidas en el software, aparecen colocadas de manera arbitraria por lo que se repositionarán para obtener la configuración de troquel cerrado (**Figura 13**), empleando la ventana 'Transformations' en el icono 'Traslacion' (**Figura 14**) dejando un espacio entre matriz y punzón de 3 mm donde la chapa es situada.

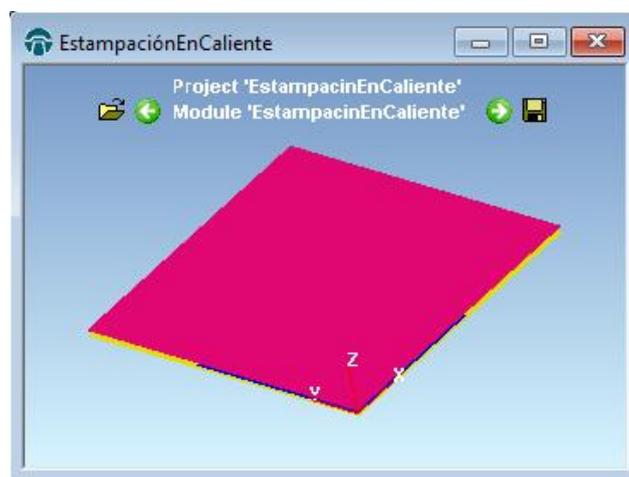


Figura 13. Configuración de troquel cerrado

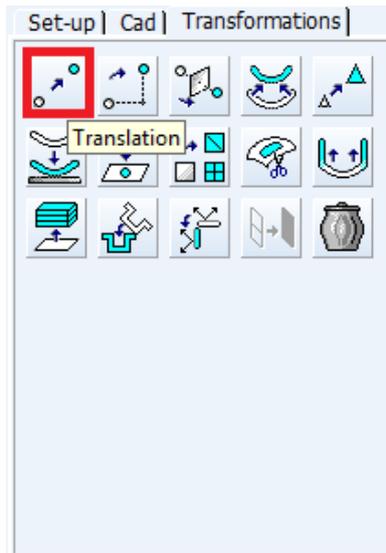


Figura 14. Ventana de traslación de elementos

A continuación, se fijan las propiedades, temperatura inicial y espesor además de generar la malla de la chapa a estampar en la ventana 'Blank' y posteriormente se abre la ventana 'Process' (Figura 15.).

Esta ventana es la más determinante en la simulación ya que permite variar los valores de los parámetros de estampación y relacionar las geometrías importadas con las diferentes partes del troquel.

El tipo de simulación a llevar a cabo será la llamada 'double action' ya que la configuración del troquel es la misma que la empleada en el laboratorio y es posible fijar la fuerza ejercida por el punzón en el temple.

Entre todos los parámetros alternables en esta ventana, algunos como el coeficiente de fricción o la velocidad de estampación tienen valores predeterminados ya que suelen ser los habituales en este tipo de procesos. Sin embargo, otros como el tiempo de templado o, como se ha mencionado anteriormente, la fuerza ejercida por el punzón deben ser alternados para así comprobar su efecto en las temperaturas, presiones y microestructura de la chapa.

Para poder comparar los resultados de los ensayos con las simulaciones, se introducirá una fuerza del pisador de valor de 36kN para así tener presiones nominales 5MPa y de 72kN para una presión de 10MPa.

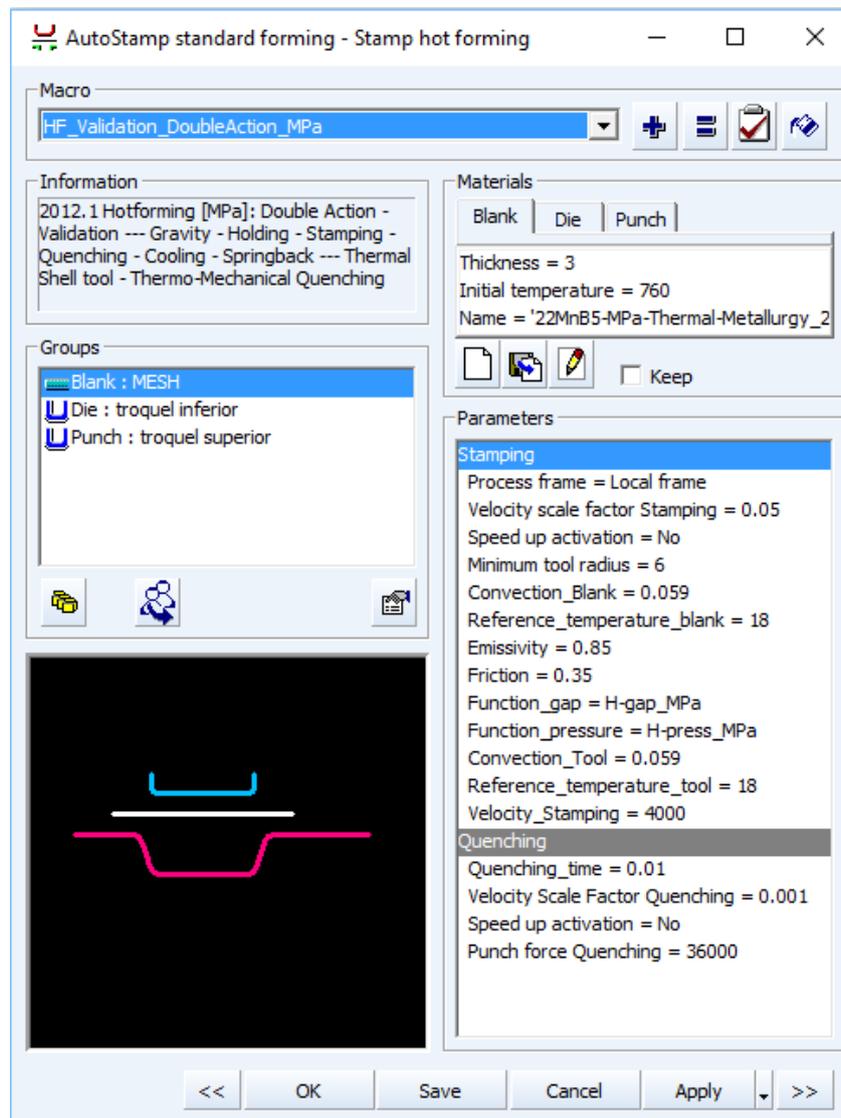


Figura 15. Ventana del menú 'process'

Como los ensayos realizados el tiempo de templado es aproximadamente de 10 segundos, a continuación, se fija un 'Quenching time' de 0.01 segundos para que al ser dividido entre el 'Velocity Scale Factor' resulte en 10 segundos y así obtener la progresión de los diferentes resultados a comparar cada segundo de templado.

Finalmente, se abre el 'Solver' y se lleva a cabo la simulación, la cual como es lógico tardará mas o menos en función del tamaño de la malla a emplear.

Cuando acabe la simulación, llega el momento visualizar las diferentes opciones que da el programa para analizar los resultados. En la pestaña hace clic sobre el desplegable para disponer de todas las opciones que el programa dispone y elegir una que se mostrará en la pantalla principal (**Figura 16.**).

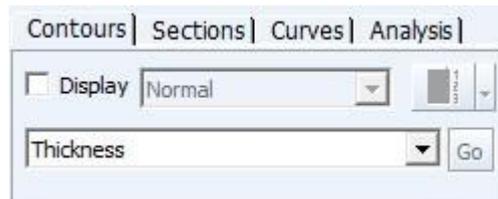


Figura 16. Ventana de selección de resultados.

7.2 Análisis de resultados

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos en la simulación a 5MPa de presión nominal, la cual irá variando localmente debido a la expansión que sufrirá la chapa por los cambios en su microestructura. Los resultados de la otra simulación realizada se pueden apreciar en los anexos en la parte final de este documento.

En primer lugar, se debe comprobar que la microestructura del material ha sido completamente transformada a martensita, ya que como se ha explicado anteriormente, será crucial para la obtención de las propiedades deseadas en estos aceros. Como se puede observar en la **Figura 17**, La transformación de la martensita es prácticamente del 100%, siendo algo mayor en las extremidades de la placa debido a que en estos puntos el enfriamiento se produce más rápidamente alcanzando temperaturas menores (**Figura 18**).

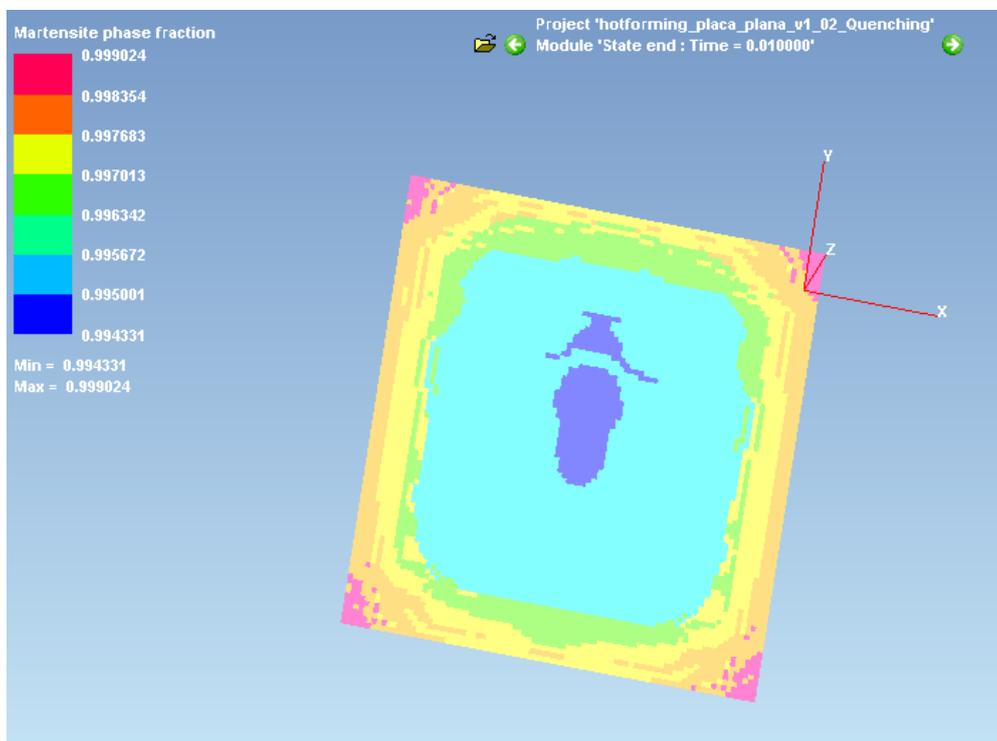


Figura 17. Distribución de la fracción de martensita en el último instante del templado en la simulación a 36kN (5MPa)

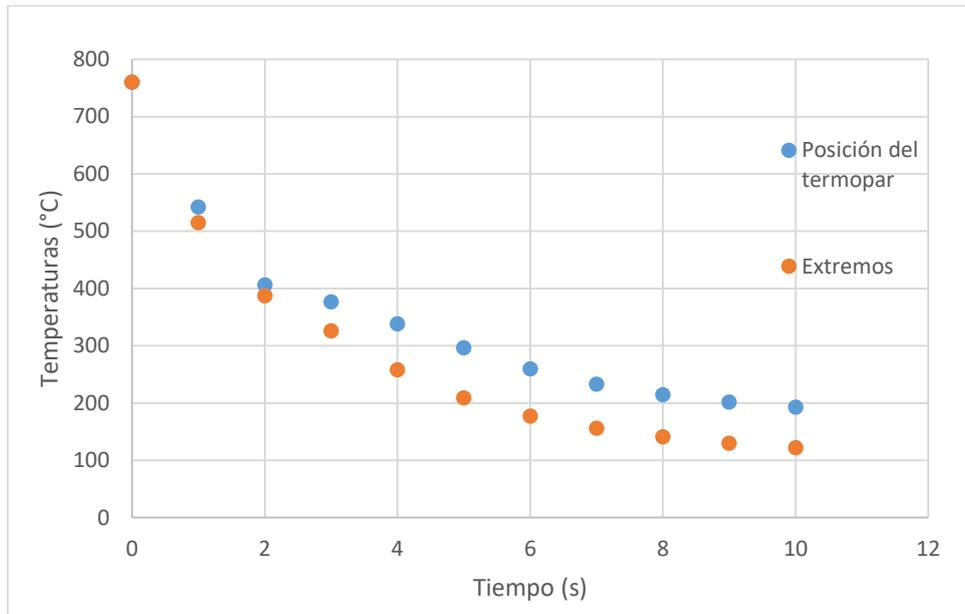


Figura 18. Perfiles de temperaturas durante el templado en la parte interior y exterior de la chapa en la simulación a 5MPa

Esta distribución coincide con los resultados obtenidos en el laboratorio ya que se comprobó que la chapa realizó una transformación a Martensita en prácticamente su totalidad. Por lo tanto, es posible aproximar los valores de resistencia que la chapa puede llegar a tener ya que la fracción de Martensita en las distintas partes de la chapa está relacionada con su dureza y gracias a la dureza se puede obtener un valor aproximado de la resistencia de la misma.

En la **Figura 19.** quedan reflejadas las distintas durezas Vickers registradas en la simulación, las cuales son mayores en la parte exterior de la chapa como es lógico ya que es donde se encuentra la mayor fracción de Martensita. Además, la distribución de durezas es similar a la de la de fracción de Martensita ya que tienen una relación directa como se ha mencionado anteriormente.

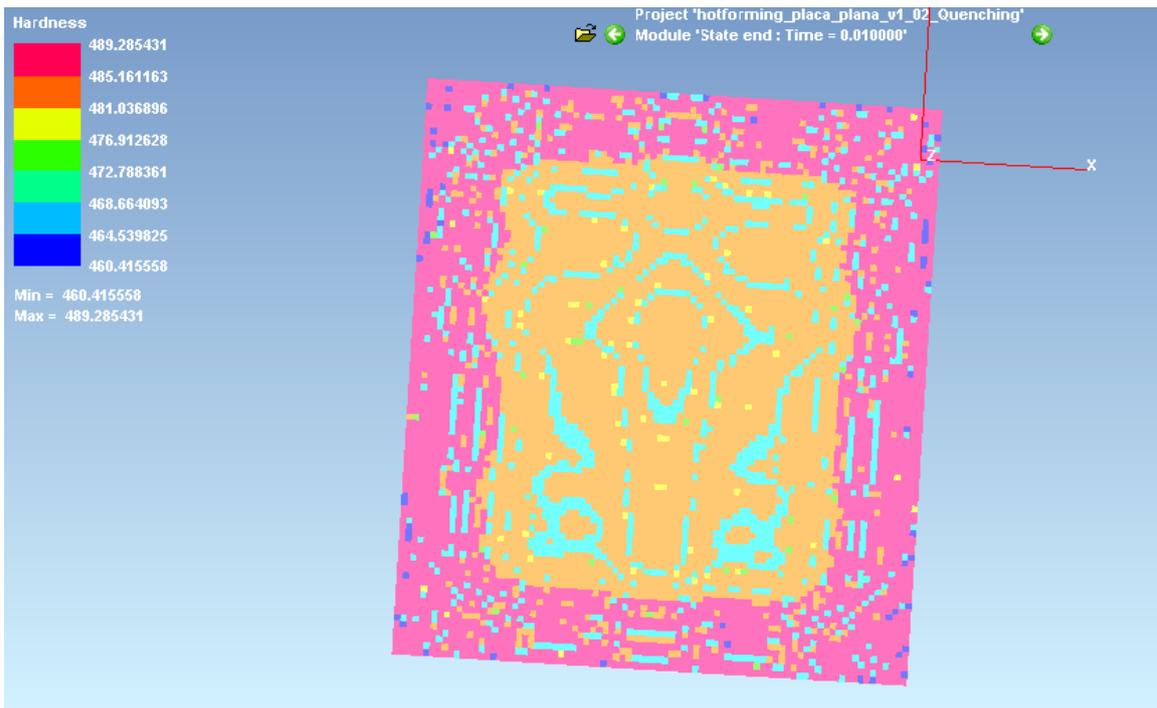


Figura 19. Distribución de durezas Vickers en la chapa simulada a 5MPa de presión

En la parte externa de la placa se puede considerar un valor de dureza aproximado de 487.22 HV y en la parte interna 483.039 HV por lo que mediante interpolación empleando la **Tabla 2**, se obtiene un valor medio de resistencia de 154.38 Kg/mm², es decir, 1543.8 MPa aproximadamente. Este valor es adecuado e indica que el templado se ha llevado a cabo correctamente obteniendo de esta manera unas propiedades similares a los datos de los ensayos.

Dureza Vickers HV	Resistencia a la tracción Kg/mm ²	Resistencia a la tracción MPa
494	157.0	1570
472	150.6	1506

Tabla 2. Equivalencias entre dureza Vickers y resistencia a la tracción [6]

El siguiente paso a analizar será el perfil de la temperatura de la chapa para así entender el efecto que este tiene en la microestructura final y, por lo tanto, en las propiedades finales.

Tal y como se refleja en la **Figura 20**, las temperaturas obtenidas por el termopar resultan en una curva en la que se pueden distinguir tres zonas diferentes. En la primera, la chapa se encuentra en la temperatura de austenización mientras está en el horno, por eso, esta se mantiene constante respecto al tiempo. En la segunda, sucede una leve reducción en

la temperatura debido a las pérdidas de calor por convección en el traslado de la chapa del horno al troquel. Finalmente, la tercera zona comienza con un cambio de curvatura a aproximadamente 760 °C ya que en ese punto empieza el contacto y se aplica la presión iniciando el templado de la pieza.

Las presiones sobre la superficie de contacto facilitan la transmisión de calor mediante conducción y, en consecuencia, hace que la temperatura de la chapa decrezca rápidamente para posteriormente ser enfriada a temperatura ambiente con el aire en el laboratorio.

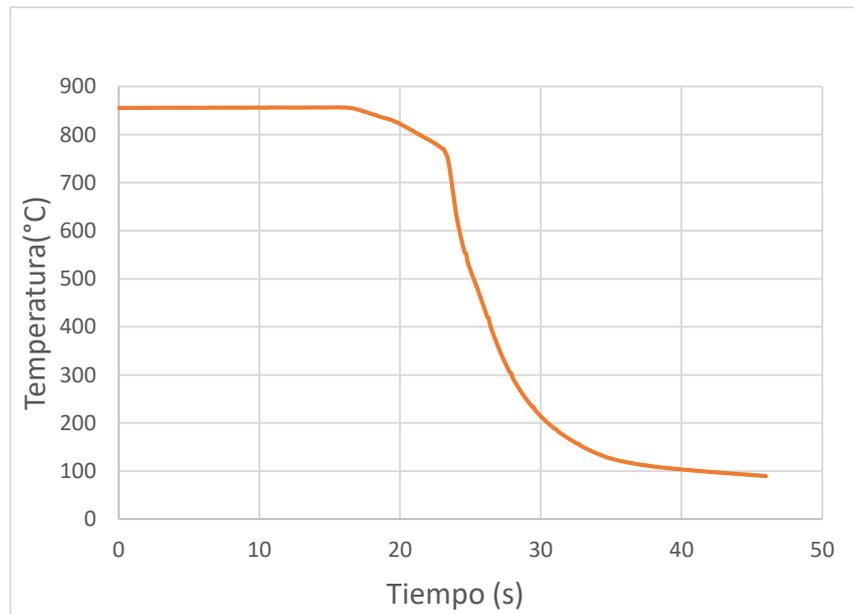


Figura 20. Perfiles de las temperaturas recogidas por el termopar en el ensayo de 5MPa de presión.

El periodo a comparar mediante la simulación realizada es el del temple de la pieza, es decir, los 10 segundos posteriores al inicio del contacto de los troqueles con la chapa. Por lo tanto, la temperatura inicial de la simulación será de 760°C.

A continuación, se muestra en la **Figura 21.** la comparación entre los datos de los ensayos y las temperaturas obtenidas en las simulaciones localizadas en la misma posición del termopar aproximadamente.

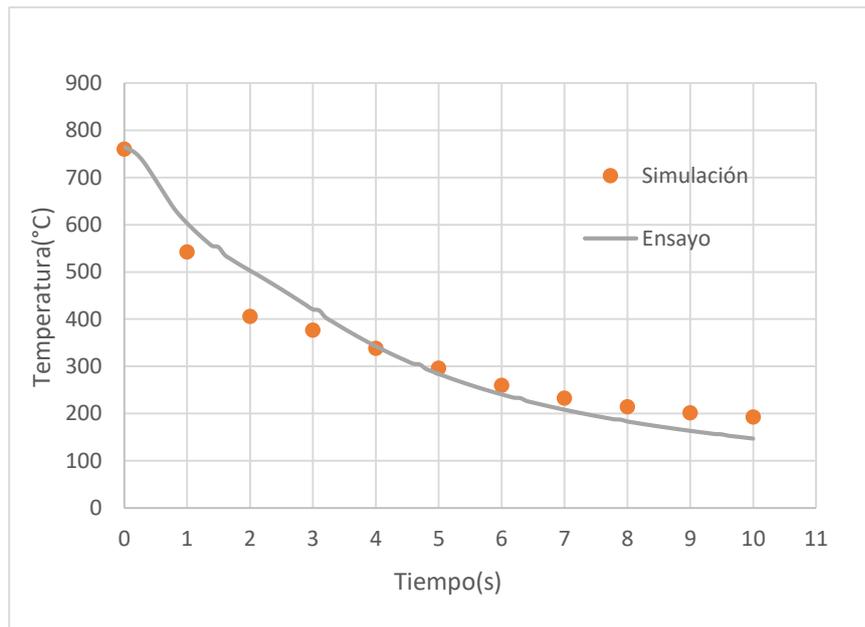


Figura 21. Comparación de temperaturas en ensayo y simulación a 5MPa de presión

Pese a mostrar una tendencia similar, en los instantes iniciales del templado, hay unas diferencias de temperaturas bastante notorias llegando a ser de hasta 100°C en el segundo 2 concretamente.

Es posible que estas variaciones hayan sucedido debido a que los parámetros del material de la chapa introducidos en Pam-Stamp son valores de la aleación 'standard' de 22MnB5. Como se ha mencionado antes, el acero empleado es Usibor 1500P el cual tiene una capa de recubrimiento de AlSi sobre la aleación de 22MnB5, por lo que es posible que la transmisión de calor sea menor que la simulación en los instantes iniciales. Esto tiene sentido ya que en los finales no hay tanta diferencia de temperatura entre la chapa y los troqueles porque se llega al equilibrio térmico y, por lo tanto, la diferencia de temperaturas entre ensayo y simulación se ve reducida.

Otro aspecto que puede haber afectado estas diferencias en los instantes iniciales es la rugosidad de la chapa. Puede que la rugosidad de la chapa antes de ser deformada en los ensayos haya sido mayor que la introducida en el software por lo que el área de contacto inicial entre troquel y chapa habría sido menor. En consecuencia, se habrían producido huecos de aire entre troquel y chapa y de este modo, se habría generado una menor transmisión de calor por conducción. Como las deformaciones plásticas en la chapa aumentan el contacto entre la chapa y el troquel a lo largo de la estampación, la transmisión de calor es cada instante más similar en el ensayo y en la simulación por lo que se justificaría la reducción en la diferencia de temperaturas al final del proceso.

Finalmente, se expondrá la evolución de la presión de contacto en la parte central y en los extremos de la chapa. Esta sufrirá variaciones ya que en la transformación de la microestructura la chapa se expande y comprime. Debido a que la fuerza aplicada por el troquel se mantiene constante, la chapa tendrá incrementos y reducciones de presiones llegando a obtener valores de hasta 6 MPa (**Figura 22.**).

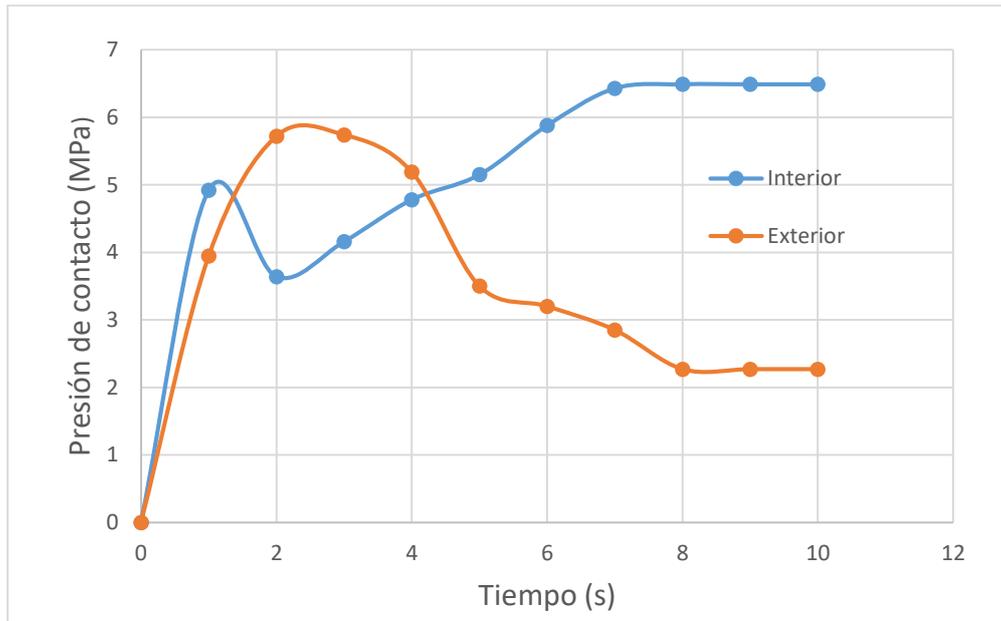


Figura 22. Evolución de las presiones de contacto en diferentes puntos de la chapa durante el templeado a 5 MPa de presión nominal

Como se ha mencionado anteriormente, los extremos de la chapa se enfrían más rápidamente que la parte central. Esto hace que el cambio de la microestructura ocurra antes y, en consecuencia, la chapa sufre una expansión generando un incremento en la presión de contacto inicial en los extremos y cuando la transformación de martensita es completada en la parte central, esta aumenta su presión de manera similar.

8. DESCRIPCIÓN DE TAREAS

En este apartado se explicarán las tareas a llevar a cabo para llevar a cabo correctamente este trabajo.

T1. Estudio del arte y proceso

En esta primera tarea se inicia el proyecto con una primera reunión con el tutor para recibir información acerca del trabajo, forma de realizarlo y una guía de uso del programa Pam Stamp. En este caso sobre la simulación de la estampación en caliente mediante el uso del programa Pam Stamp. Una vez obtenida la información se realizan prácticas para poder utilizar correctamente el software.

T2. Trabajo de simulación

Después de realizar diferentes simulaciones tanto de estampación en frío como en caliente, se simula la pieza sobre la que se han hecho varios ensayos, introduciendo en el software las condiciones más similares posibles a las dadas en el laboratorio.

T3. Trabajo de validación

Una vez obtenidos los resultados de la simulación de la pieza original, los resultados obtenidos son comparados con los diferentes datos proporcionados por UPV/EHU y IK4 AZTERLAN. Finalmente se procede a varias reuniones con el tutor para comprobar que las simulaciones han sido realizadas correctamente.

T4. Redacción del trabajo

Por último se lleva a cabo la redacción de la memoria escrita de este trabajo acorde a los resultados obtenidos.

En la siguiente página se puede observar el diagrama de GANTT empleado para realizar este proyecto el cual da comienzo el día 4 de Febrero de 2019 y finaliza el 11 de Julio de 2019 (**Figura 23.**).

8.1 Diagrama de GANTT

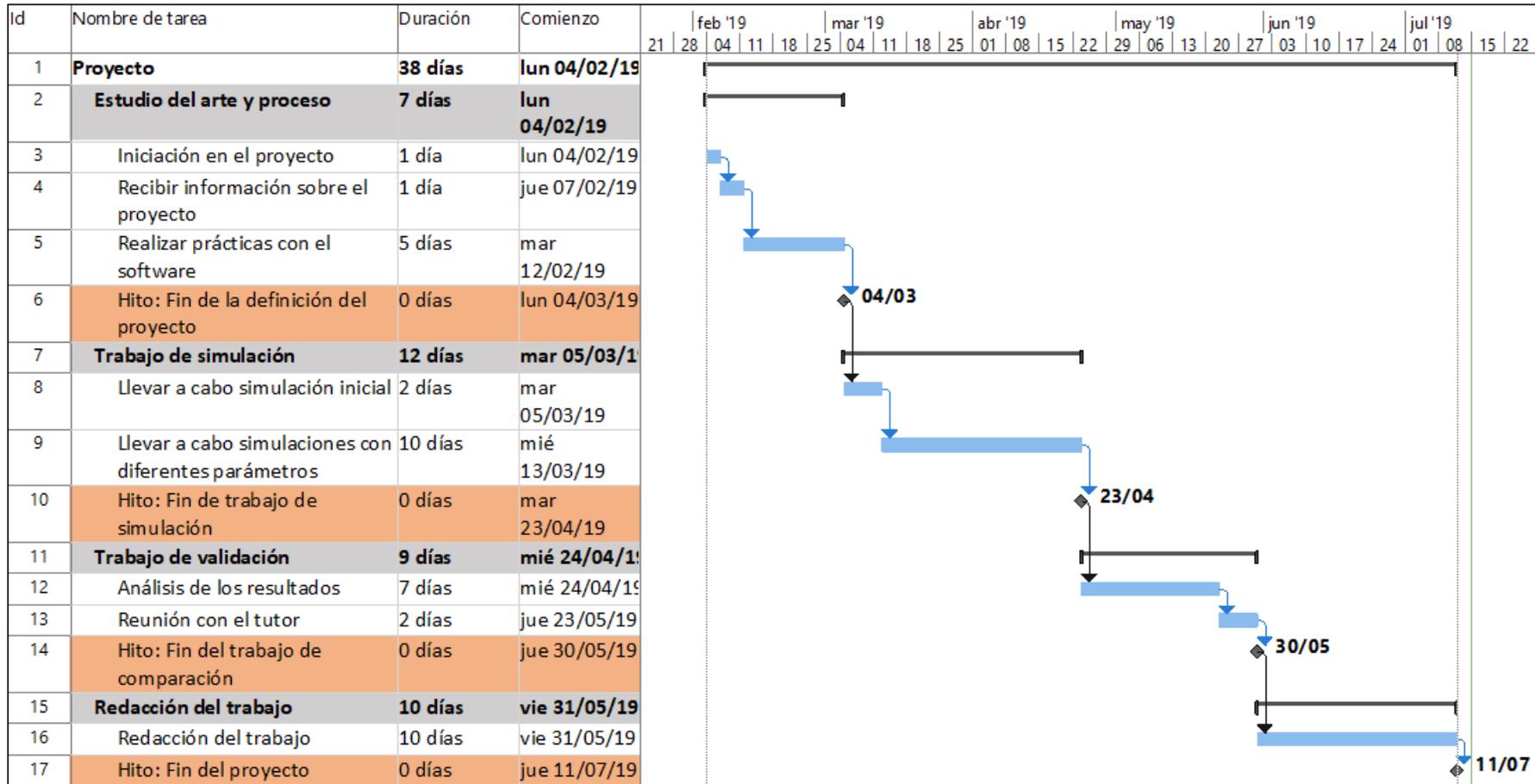


Figura 23. Diagrama de GANTT en el que se reflejan las diferentes tareas llevadas a cabo en el proyecto

9. PRESUPUESTO

En este punto se procederá al desglose del presupuesto necesario para llevar a cabo este proyecto dividido en cada una de las fases de él.

9.1 Coste de recursos humanos

Primero los costes de horas internas invertidas en el proyecto

Tutor del proyecto: Carlos Angulo Duque

Ingeniero al cargo del proyecto: Diego Caballero Lejarza

Horas Internas	Número de horas	Tasa(€/h)	Coste(€)
Tutor del proyecto	20	50	1000
Alumno	220	30	6600
		TOTAL	7600

Tabla 3. Costes de horas internas empleadas en el proyecto

9.2 Coste de recursos materiales

Primero se van a presentar los costes de amortización de software y hardware informático al ser este un proyecto de simulación.

Amortizaciones	Coste total(€)	Horas utilizadas (h)	Horas útiles (h)	Coste parcial (€)
Pam-Stamp	1800	220	5000	79,20
Ordenador	1000	250	7000	35,71
Ms Project	1369	3	3000	1,37
Ms Office	559	50	3000	9,32
			TOTAL	125,60

Tabla 4. Amortizaciones del proyecto

En este caso los gastos, al ser material de oficina y en cantidades reducidas, se han suprimido al ser despreciables frente a las amortizaciones y las horas internas.

9.3 Costes indirectos

A los costes indirectos se les atribuirá un valor del 5% de las horas internas, ascendiendo así a un valor cifrado en 380,00€.

9.4 Costes totales

Aquí presentado queda el presupuesto final:

Concepto	Coste (€)
Amortizaciones	125,60
Horas Internas	7600
Costes Indirectos	380
TOTAL	8105,60

Tabla 5. Costes totales del proyecto

10. ANÁLISIS DE RIESGOS

A continuación, se expondrán los diferentes factores que han sido considerados como posibles inconvenientes a la hora de realizar este proyecto. Primero se clasificarán en la matriz impacto-probabilidad para después ser ordenados por importancia y finalmente se propondrá una solución para cada uno de ellos en función de su clasificación (**Tabla6.**).

Estos son los diferentes riesgos que se han encontrado a la hora de realizar este trabajo:

1. Pérdida de datos por extravío de USB
2. Rotura del disco duro del ordenador
3. Fallos en la implantación del CAD generado en Pam-Stamp

		IMPACTO				
		Muy bajo (0,05)	Bajo (0,1)	Moderado (0,2)	Alto (0,4)	Muy Alto (0,8)
PROBABILIDAD	Muy baja (0,1)	Baja 0,005	Baja 0,01	Baja 0,02	Media 0,04	Media 0,08 2.
	Baja (0,3)	Baja 0,015	Baja 0,03	Media 0,06	Media 0,12	Alta 0,24 1.
	Moderada (0,5)	Baja 0,025	Media 0,05	Media 0,1	Alta 0,2	Alta 0,4
	Alta (0,7)	Baja 0,035	Media 0,07	Media 0,14	Alta 0,28 3.	Alta 0,56
	Muy alta (0,9)	Media 0,045	Media 0,09	Alta 0,18	Alta 0,36	Alta 0,72

Tabla 6. Matriz de Impacto-Probabilidad [6]

Una vez listados y clasificados los riesgos, se procederá a explicar las medidas que se han tomado para que estos tengan el mínimo impacto posible en la ejecución del trabajo.

En primer lugar, el riesgo número dos, pese a tener un impacto importante en el proyecto en caso de que sucediera, se aceptará debido a que la probabilidad de que pase es prácticamente nula ya que no se están tratando simulaciones de extrema precisión y, por tanto, los componentes del ordenador no se calientan en exceso.

En cuanto al riesgo número uno, para que los datos trascendentales de este proyecto no se pierdan, se crearán varias carpetas de seguridad tanto en el centro de cálculo donde se realizan las simulaciones como en ordenador principal donde se redacta este documento.

Finalmente, debido a la incompatibilidad entre formatos de geometrías en los diferentes softwares empleados, importar las geometrías generadas en ANSYS puede ser un riesgo importante retrasando en cierta medida los análisis a realizar. Este inconveniente se solucionará buscando algún profesor que tenga experiencia con Pam-Stamp para que pueda ayudar con la introducción de las geometrías en el programa.

11. CONCLUSIONES

Como punto final a este trabajo se procederá a sacar una serie de conclusiones para destacar los puntos más importantes que han sido desarrollados.

En primer lugar, cabe destacar la gran influencia que esta tecnología tiene sobre el sector del automóvil principalmente, ya que es capaz de generar componentes de una gran relación resistencia/peso con una productividad muy elevada. Como se ha podido apreciar este documento, esta tecnología permite tener un gran control sobre las piezas a procesar ofreciendo una gran flexibilidad a la hora de determinar sus propiedades finales. Por lo tanto, resulta lógico que cada vez más fabricantes de vehículos estén empleando piezas producidas con este proceso y que esta se esté expandiendo otros sectores de la industria.

Por otro lado, como se ha podido observar, el trabajo de simulación realizado se aproxima de manera precisa a los ensayos en el laboratorio obteniendo unos perfiles de temperaturas similares durante el templado de las piezas y un porcentaje de fase de Martensita prácticamente del 100% en toda la chapa, logrando de esta manera los valores de resistencia deseados.

Además, las simulaciones realizadas han resultado ser de gran ayuda para la verificación de las propiedades a obtener en los aceros y pese haberse realizado sobre una geometría simple, es posible extrapolar los resultados obtenidos a otras geometrías más complejas. De esta manera, se tiene la certeza de que las propiedades a obtener serán similares a las de estas simulaciones o incluso, es posible variar los parámetros de diseño mediante Pam-Stamp y predecir las propiedades finales ahorrando tanto tiempo como dinero en la producción de piezas y realización de pruebas de ensayo-error.

En conclusión, esta tecnología que permite producir componentes de gran eficiencia está empezando a tener un gran impacto en el mercado y con este trabajo se espera haber contribuido a su desarrollo mediante las simulaciones realizadas.

12. REFERENCIAS

- [1] A. Naganathan, Cummins Engine Company, L. Penter, 'Hot Stamping Chapter 7' , University of Dresden, Germany 2012
- [2] Karbasian, H.; Tekkaya, A.E. A review on hot stamping. J. Mater. Process. Technol. (2010), 210, 2103-2118.
- [3] Ping Hu · Liang Ying · Bin He, Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body, Springer, 2017
- [4] ESI Group, 'ESI Numisheet Benchmark BM03 Hot Forming Simulation in PAM-STAMP', 2013
- [5] <https://www.cemausa.com/docs/DUREZA.pdf> 'equivalencias entre durezas brinell, rockwell, vickers y shore y la resistencia a la tracción'
- [6] UPV/EHU, 'Apuntes de clase de proyectos de ingeniería', 2019

13. ANEXO: RESULTADOS

13.1 ESTAMPACIÓN A 10MPa

En la segunda simulación realizada la fracción de martensita es algo mayor que en la que se ha desarrollado en la metodología debido a un enfriamiento más rápido causado por la mayor fuerza de estampación aplicada (**Figura 24.**).

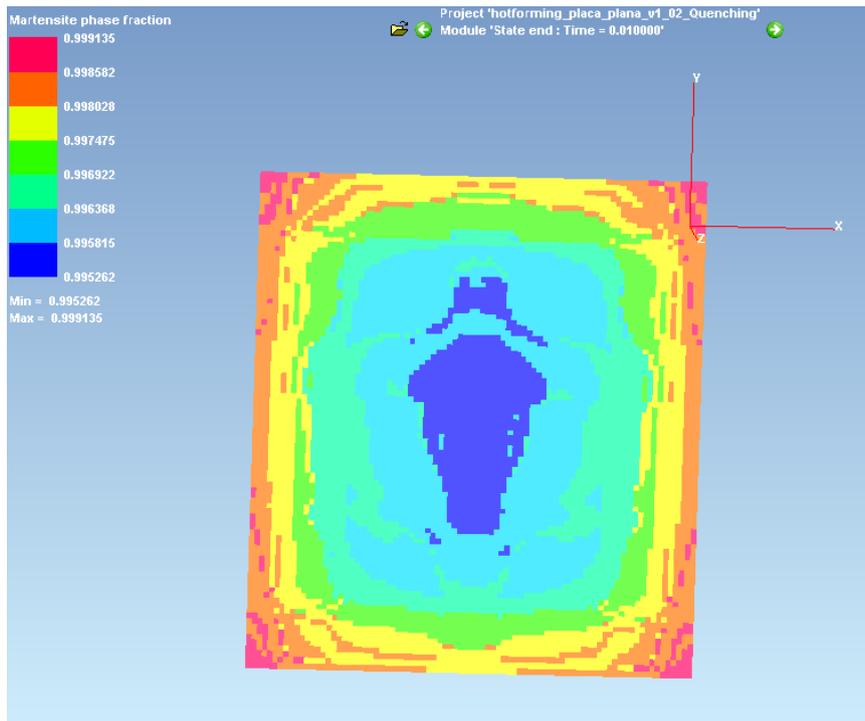


Figura 24. Distribución de la fracción de martensita en el último instante de la simulación a 72kN (10MPa)

Aun así, la diferencia entre los dos ensayos en cuanto a la fracción de martensita es mínima y se puede considerar del prácticamente del 100% en ambos.

En cuanto a la comparación de temperaturas, en esta segunda simulación existe una mayor diferencia que en la anterior en los instantes iniciales y esta puede ser explicada por la diferente probeta empleada en los ensayos la cual puede haber incrementado el efecto de los diferentes factores explicados en la metodología (**Figura 25.**).

Finalmente se pueden observar localmente tanto la evolución de las presiones como la dureza obtenida en la chapa en las **Figura 26.** y **Figura 27.**

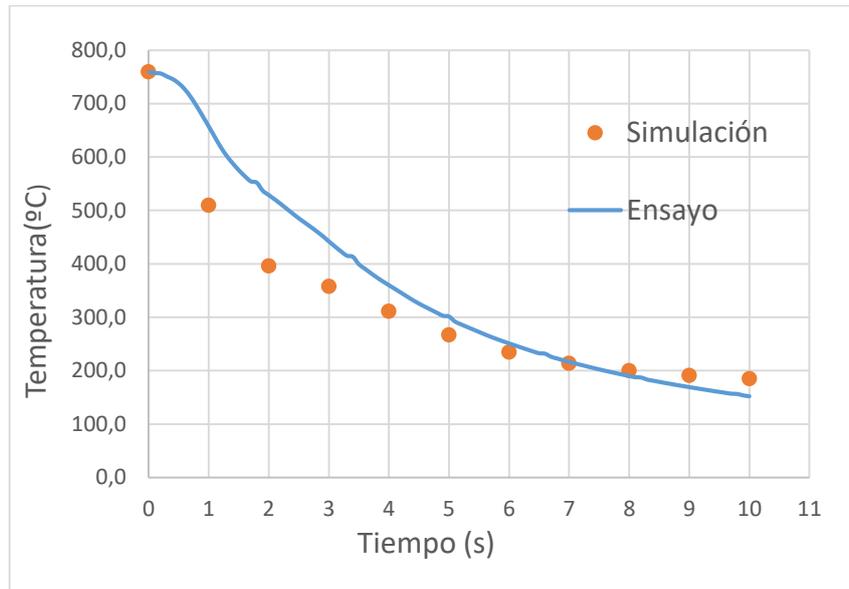


Figura 25. Comparación entre ensayo y simulación a 10MPa de presión

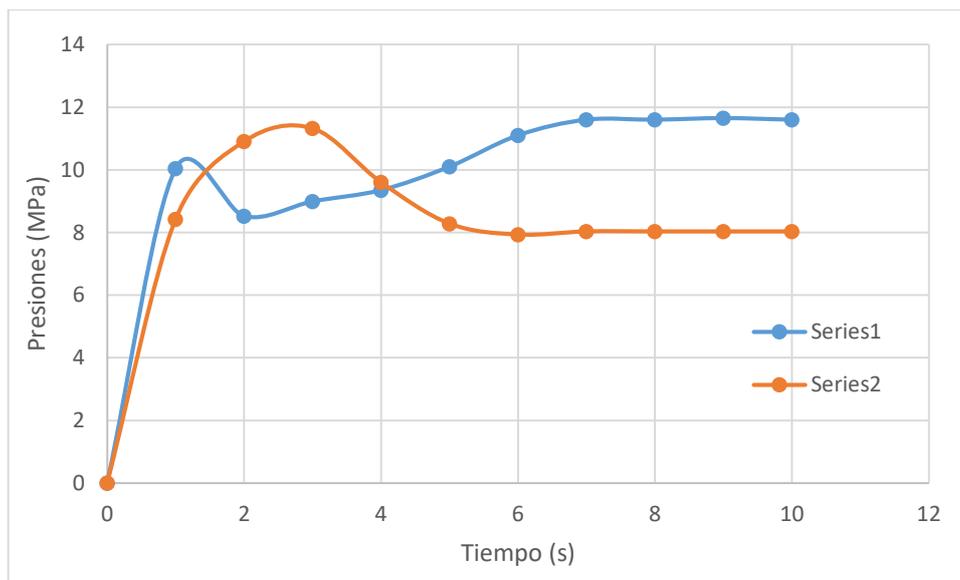


Figura 26. Evolución de las presiones de contacto en diferentes puntos de la chapa durante el templeado a 10MPa de presión nominal

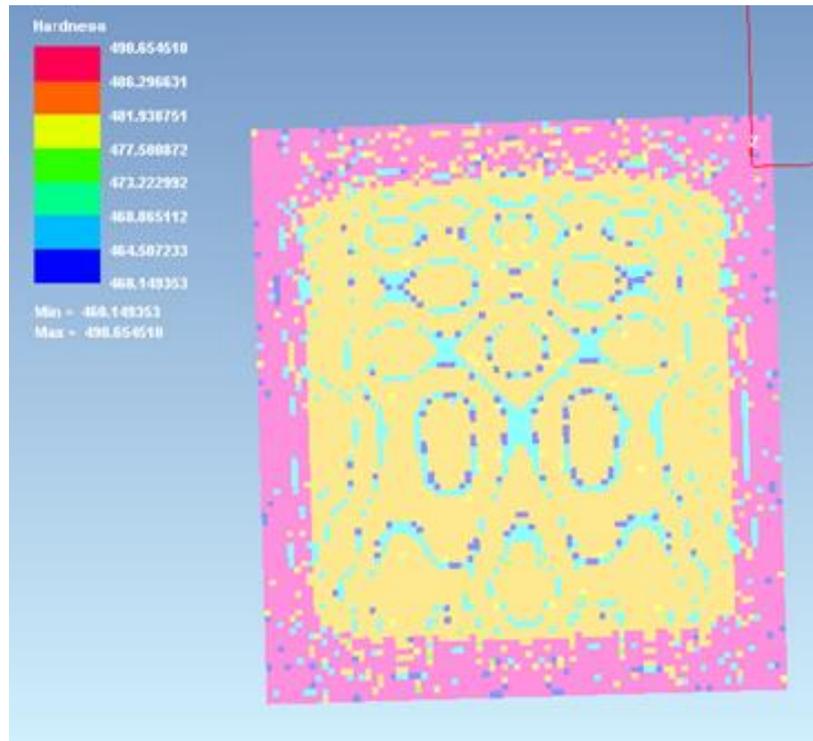


Figura 27. Distribución de durezas Vickers en la chapa simulada a 10MPa de presión

13.2 Comparación entre simulaciones

Finalmente se compararán las dos simulaciones realizadas. Como se puede apreciar en la **Figura 28**, la simulación a mayor presión de contacto obtiene valores de temperatura más bajos en cada instante. Este resultado es lógico ya que cuanto mayor es la fuerza ejercida por el troquel, se genera una mayor transferencia de calor haciendo que la chapa se enfríe más rápidamente.

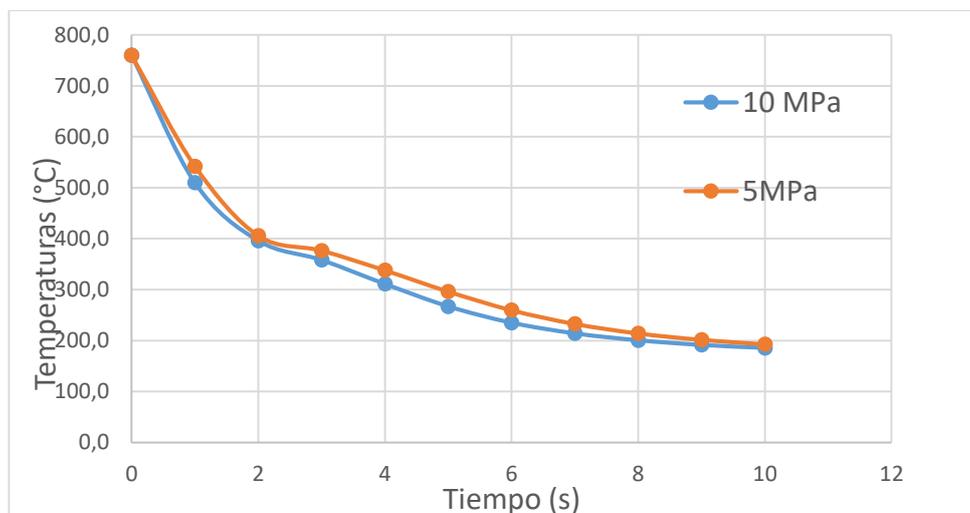


Figura 28. Comparación entre las simulaciones realizadas a 10 y 5 MPa en el punto del termopar