



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Configuración y análisis de cámaras termográficas para medición en proceso de estampación en caliente. Proceso de inspección y ensayos experimentales

Configuration and analysis of thermographic cameras for measurement in the hot stamping process. Inspection process and experimental tests

Autor

David García Arranz

Director

Jorge Santolaria Mazo

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2022/2023

Resumen

La finalidad de este proyecto es la instalación de un sistema de cámaras termográficas que permita controlar y obtener datos sobre el proceso de estampación en caliente en la planta de Magna Automotive Spain situada en el polígono el pradillo II en el municipio de Pedrola.

En la primera parte se presenta el producto con el que se trabaja, el proceso productivo y los equipos de trabajo con los que se pretenden obtener los datos. A continuación, se explica la influencia de la temperatura y de los tratamientos térmicos en los aceros, ya que es un punto clave del proceso.

El punto central del proyecto es la instalación en las líneas de producción y configuración del software de las cámaras termográficas para posteriormente proceder a analizar los resultados de las medidas.

Este proyecto no está finalizado, por lo que no se han podido analizar datos en cantidad y profundidad como en un principio se planteaba. Sin embargo, se ha avanzado lo suficiente como para observar que sí que existe cierta relación entre la temperatura final de la pieza y la refrigeración de los aceros y las propiedades mecánicas del material, medidas mediante ensayos experimentales en el laboratorio.

El futuro de este proyecto es continuar con el análisis de datos y ensayos en laboratorio para detectar zonas críticas y determinar la correlación existente ente la temperatura y las propiedades mecánicas para intentar desarrollar un detector de anomalías que permita tener un mejor control del proceso de estampación y garantizar así la máxima calidad del producto fabricado.

Índice

Resumen	2
Índice de ilustraciones, tablas y gráficos	4
1. Introducción	6
1.1. Contexto	6
1.1.1. Información sobre el producto	7
1.1.2. Descripción del proceso productivo	8
1.2. Objetivos y alcance.....	9
2. Descripción del proceso productivo, producto y equipos de medida y análisis.....	10
2.1. Línea de Hot Stamping	10
2.2. Descripción del producto	13
2.3. Equipos de medida	14
2.3.1. Cámaras termográficas	14
2.3.2. Máquina de ensayos universales.....	15
2.3.3. Durómetro	16
2.3.4. 3MA II.....	17
3. Influencia de la temperatura en los procesos y materiales.....	18
3.1. Proceso térmico del material	18
3.2. Troqueles para estampación en caliente	23
4. Montaje y configuración de cámaras termográficas	25
4.1. Instalación y ubicación.....	25
4.2. Configuración del software	26
5. Inspección de imágenes termográficas y relación con resultados de laboratorio .	33
5.1. Inspección de imágenes	33
5.2. Ensayos en laboratorio	35
5.3. Relación entre los datos termográficos y los análisis de laboratorio	35
6. Resultados y conclusiones	41
7. Bibliografía.....	42

Índice de ilustraciones, tablas y gráficos

Ilustración 1: Pilares estructurales	7
Ilustración 2: Cross car beam	7
Ilustración 3: Flujo del proceso productivo	8
Ilustración 4: Celda 1, entrada horno	11
Ilustración 5: Línea de estampación en caliente.....	11
Ilustración 6: Blank sobre el troquel antes de la estampación	12
Ilustración 7: Estructura pilar B	13
Ilustración 8: Cámara termográfica	14
Ilustración 9: Instron 5982 Universal Testing Machine	15
Ilustración 10: Durómetro - DuraScan 20.....	16
Ilustración 11: Ensayo 3MA II	17
Ilustración 12: Recubrimiento superficial.....	17
Ilustración 13: Diagrama CCT de la microestructura obtenida durante el proceso de templado.....	19
Ilustración 14: Diferencias en la microestructura producida por la variación de la velocidad de enfriamiento	20
Ilustración 15: Distribución aceros pilar B	24
Ilustración 16: Ubicación cámaras termográficas en la salida y entrada de prensa.....	25
Ilustración 17: Vista genérica de cámaras termográficas en el ordenador de línea	26
Ilustración 18: Prueba creación de recetas	27
Ilustración 19: Emisividad	27
Ilustración 20: Temperatura mínima.....	28
Ilustración 21: Control tasa de conformidad	28
Ilustración 22: Visualización de resultados de configuración.....	29
Ilustración 23: Controles de temperatura área y punto.....	29
Ilustración 24: Configuración punto.....	30
Ilustración 25: Configuración de geometría del polígono.....	30
Ilustración 26: Parámetros de control polígono	31
Ilustración 27: Límites de temperatura y tolerancias	31
Ilustración 28: Discriminación de los píxeles del borde para una mayor fiabilidad de la medida.....	32
Ilustración 29: Lista de áreas y puntos definidos en una pieza o cavidad.....	32
Ilustración 30: Escala cromática y de temperaturas	33
Ilustración 31: Ejemplo de variaciones de temperatura en una pieza tras la estampación y el templado	34
Ilustración 32: Aplicación web para la generación de informes de cada golpe.	34
Ilustración 33: Puntos de análisis.....	36
Ilustración 34: Zonas termografía con dureza NOK	37
Ilustración 35: Acero nuevo marcado en verde	37
Ilustración 36: Zonas termografía con dureza OK.....	38
Ilustración 37: Zona con dureza NOK	39
Ilustración 38: Zona con temperaturas por encima del resto de la pieza.....	40

Tabla 1: Composición química de la aleación de acero 22MnB5	19
Tabla 2: Valores de dureza NOK	36
Tabla 3: Valores de dureza OK.....	37
Gráfica 1: Proceso de austenización del acero 22MnB5.....	18
Gráfica 2: Relación de la velocidad de enfriamiento Vs dureza en función del % de carbono del acero.....	20
Gráfica 3: Tiempos y temperaturas típicas en un proceso de estampación en caliente	21
Gráfica 4: Valores de emisividad para el Usibor 1500	22
Gráfica 5: Temperaturas con acero NOK.....	36
Gráfica 6: Temperaturas con acero OK	38

1. Introducción

El objetivo de este proyecto es la instalación e implementación de cámaras termográficas para el control de la temperatura de las piezas en el momento en el que salen del horno y entran al troquel para ser conformadas y en el momento justamente posterior en el que son liberadas del troquel.

Se busca el procesamiento de toda la información que proporcionan estas cámaras para posteriormente poder analizarla, contrarrestarla con información sobre el comportamiento de los materiales y realizar pruebas empíricas en el laboratorio y facilitar así la toma de decisiones sobre la calidad de las piezas y/o la detección de defectos estructurales.

1.1. Contexto

El lugar donde se ha desarrollado este proyecto es la empresa MAGNA AUTOMOTIVE SPAIN, ubicada en el polígono industrial “El Pradillo II” del municipio de Pedrola, Zaragoza.

MAGNA es una compañía de origen canadiense creada en 1957. Actualmente es uno de los mayores proveedores y líder del sector de la automoción. Diseña y trabaja en la ingeniería y arquitectura del vehículo, innovando en productos, procesos y materiales para minimizar el peso, aumentar la resistencia y la adaptabilidad.

Esta compañía se divide en varias ramas, y la planta de Pedrola pertenece a la rama Cosma, dedicada al chasis y estructura del vehículo.

Detrás de los paneles exteriores de cada automóvil se encuentra su esqueleto estructural, que incluye componentes complejos como cross car beams, pilares y estructuras laterales. Mediante el uso innovador de procesos de fabricación avanzados y materiales de alta resistencia, Magna desarrolla continuamente soluciones estructurales que cumplen o superan las especificaciones del cliente en cuanto a peso y respuesta a choques [1].

1.1.1. Información sobre el producto

En el proceso productivo de la planta se producen diferentes tipos de piezas en función del cliente y el modelo de vehículo al que pertenecen. Pueden englobarse en tres categorías:

- **Pilares:** Forman parte de la estructura principal del vehículo y le aportan robustez y seguridad. En función de su posición tienen diferentes denominaciones.

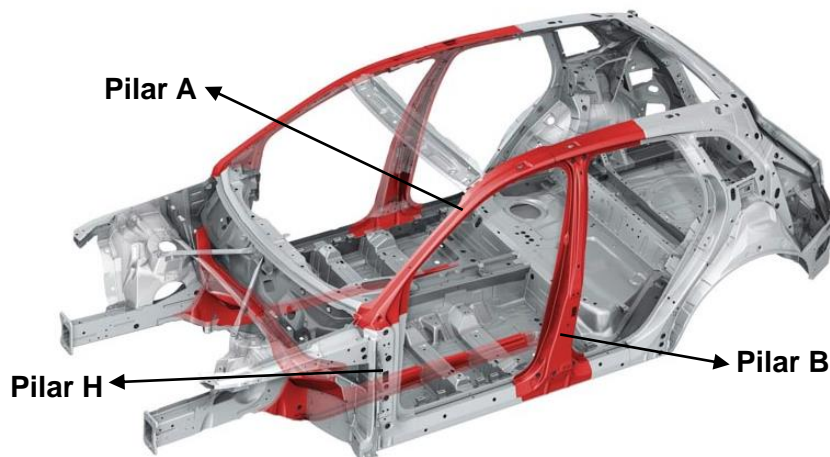


Ilustración 1: Pilares estructurales

- **Cross car beam:** Estructura metálica sobre la que va colocado y anclado el salpicadero y la columna de dirección.



Ilustración 2: Cross car beam

- **Refuerzos:** piezas de menor dimensión que las anteriores que aportan resistencia y seguridad frente a impactos.

Todos estos componentes tienen que cumplir unas determinadas características para desempeñar correctamente la función para la que están desempeñados. En el estudio de este proyecto nos centraremos en el estudio y análisis de la parte inicial del proceso productivo de dos de estos tipos, pilares y refuerzos.

1.1.2. Descripción del proceso productivo

Podemos dividir y diferenciar la planta en tres áreas o focus en función del proceso productivo que se desarrolla en cada una de ellas. A continuación, se muestra un esquema de estos procesos y las operaciones que se les realizan a las piezas recibidas de proveedor desde su llegada a la planta hasta su salida final a proveedor.

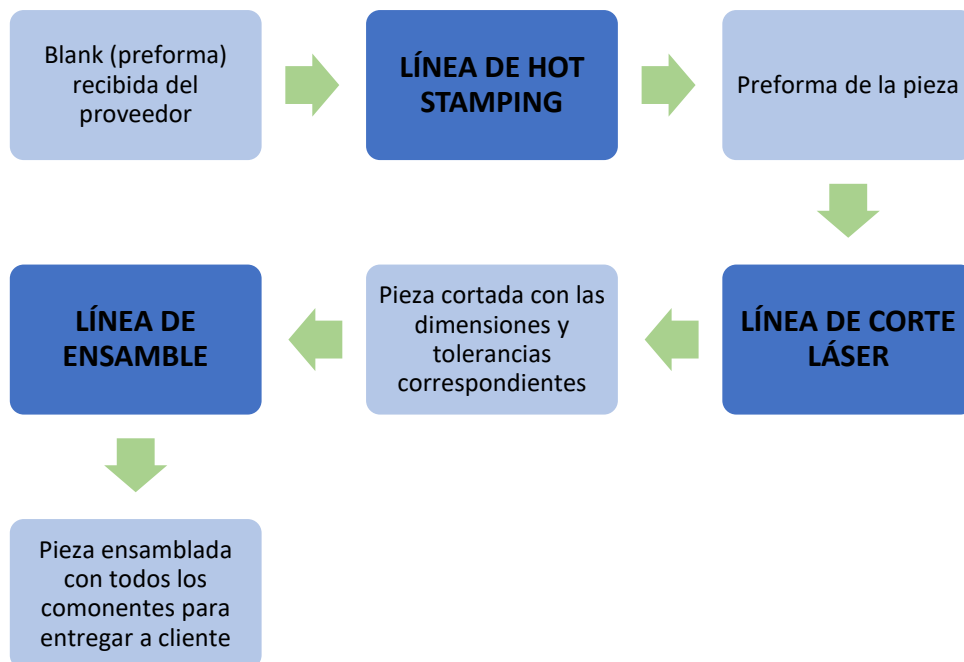


Ilustración 3: Flujo del proceso productivo

- Línea de Hot-Stamping:** Las preformas de acero suministradas por proveedor denominadas blanks, son introducidas en el horno de forma automática y constante por un robot. Los blanks avanzan por el interior del horno gracias a unos rodillos cerámicos que giran en su interior, para finalmente salir a una temperatura de entre 850°C y 900°C. Un segundo robot coloca las piezas encima de la mitad inferior del troquel para que seguidamente descienda la prensa con la mitad superior y conforme los blanks obteniendo estos la forma del troquel. El troquel permanece cerrado y aplicando presión un intervalo de unos 10 segundos. En este tiempo por el interior del troquel circula agua fría que refrigera la pieza rápidamente produciendo así un tratamiento térmico de templado, lo que hace que la pieza conformada adquiera una resistencia y unas propiedades mecánicas determinadas. Por último, un tercer robot retira las piezas del troquel y las deja sobre una cinta transportadora para que un operario las recoja. El análisis de datos y ensayos de este proyecto se va a desarrollar entorno a esta operación de conformado, prensado y templado de las preformas.

- **Línea de corte láser:** después de que los blanks han sido estampados aun no presentan las dimensiones y tolerancias requeridas. En la línea de laser se recorta el contorno de la pieza eliminando el exceso de material y las rebabas provocadas en el proceso de estampación. Además, se cortan diversos agujeros que en la prensa no podrían realizarse con tal precisión. Estos agujeros sirven para la evacuación de pintura, para pasar cables eléctricos o para dejar paso a tornillos.
- **Línea de ensamble:** una vez las piezas han sido cortadas en la línea de laser pasan a la zona de ensamble para unir diferentes partes y obtener el producto final que se envía a cliente. Se une una pieza principal con distintos componentes como refuerzos o tuercas mediante distintos procesos de soldadura como la soldadura por puntos o la soldadura MIG.

1.2. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este proyecto es cruzar toda la información que nos proporcionan las cámaras termográficas instaladas en las dos líneas de prensa con ensayos experimentales en el laboratorio.

Se parte de la información obtenida de las cámaras para cada golpe de prensa. El primer paso es analizar esta información, ver que parámetros son los que resultan útiles y de interés para relacionarlos con los ensayos y proceder a registrar toda esa información automáticamente en una base de datos. Con esta información y la realización de ensayos destructivos y no destructivos en laboratorio se procederá a estudiar cómo afecta la temperatura a las propiedades mecánicas en las distintas piezas y zonas. A partir de esto, podemos establecer un sistema de alertas sobre la calidad de las piezas o detección prematura de defectos en la estampación.

2. Descripción del proceso productivo, producto y equipos de medida y análisis.

En la actualidad, la industria es cada vez más compleja, lo que hace que se genere un gran volumen de datos y parámetros a controlar para que el producto final sea el esperado y cumpla los requisitos para los que ha sido diseñado.

En el entorno industrial, la calidad del producto es uno de los puntos fundamentales a la hora de fabricar. Además, en un sector tan importante como es la automoción, la calidad tiene un valor añadido ya que como en nuestro caso, los productos finales son elementos estructurales del vehículo de los cuales depende la seguridad de sus integrantes.

Como los procesos productivos no siempre se desarrollan de forma ideal, ocurren situaciones y defectos que afectan a dicha calidad. Por lo que el objetivo es disminuir estos casos lo mínimo posible y la mejor medida para hacerlo es anticipándose a las anomalías. La mejor manera para ello es la toma y análisis de datos.

2.1. Línea de Hot Stamping

La planta cuenta con dos líneas de estampación en caliente situadas una junto a la otra. Aunque su instalación y puesta en marcha no ha sido simultánea ambas pueden considerarse iguales, ya que su metodología de trabajo y la mayoría de sus componentes son los mismos.

Para algunas de las referencias, antes de entrar en el horno, el proceso comienza previamente en una línea auxiliar de parches. En esta línea lo que se hace es soldar una serie de refuerzos en los blanks en unas zonas en concreto aumentando así su espesor. Esto se hace para aumentar la resistencia final de la pieza en dichas zonas.

El proceso de estampación comienza con la colocación de los blanks en los “pin pallets”, pallets diseñados para ajustarse a la forma del blank y restringir su movimiento. Los “pin pallets” son colocados con una carretilla elevadora en la celda previa al horno, celda 1. En esta celda los blanks son cogidos por un robot que los lleva a una estación de marcado en la que se les aplica un código de trazabilidad y posteriormente los deja sobre una mesa de rodillos para que entren al horno.

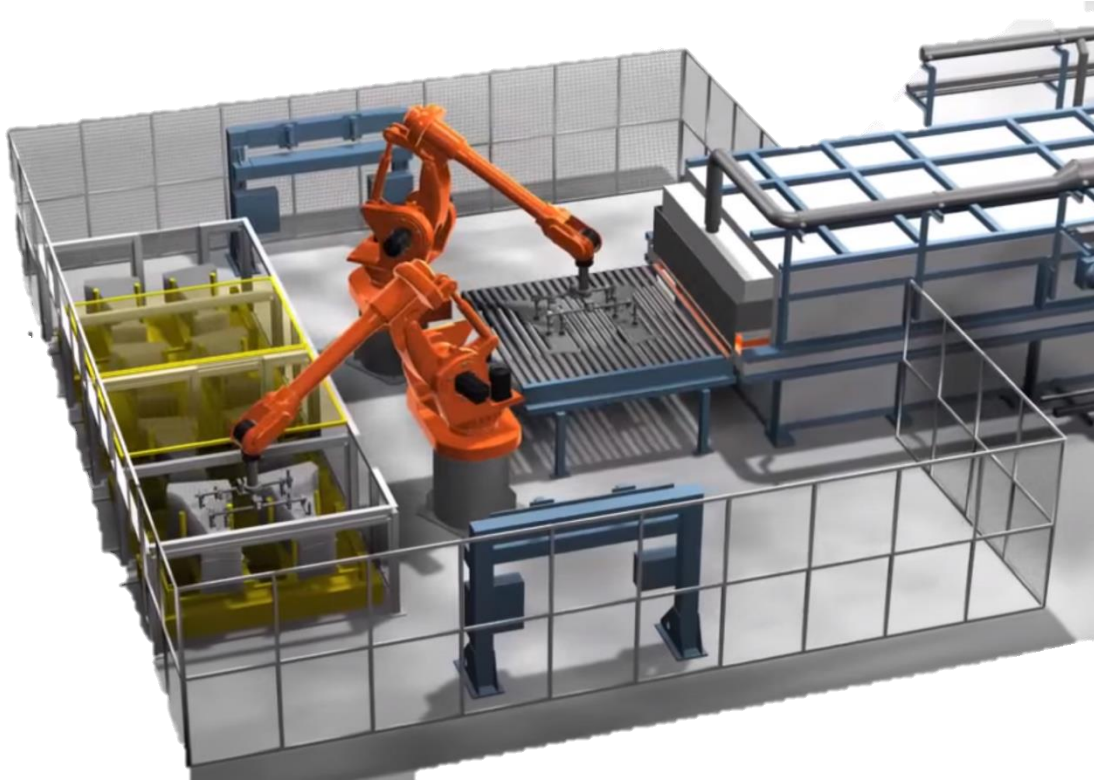


Ilustración 4: Celda 1, entrada horno

El horno está alimentado por gas natural y su interior está formado por un gran número de rodillos que van girando para hacer avanzar los blanks. Estos rodillos son cerámicos para poder aguantar las elevadas temperaturas del interior, entorno a los 800 °C, y no deteriorarse.

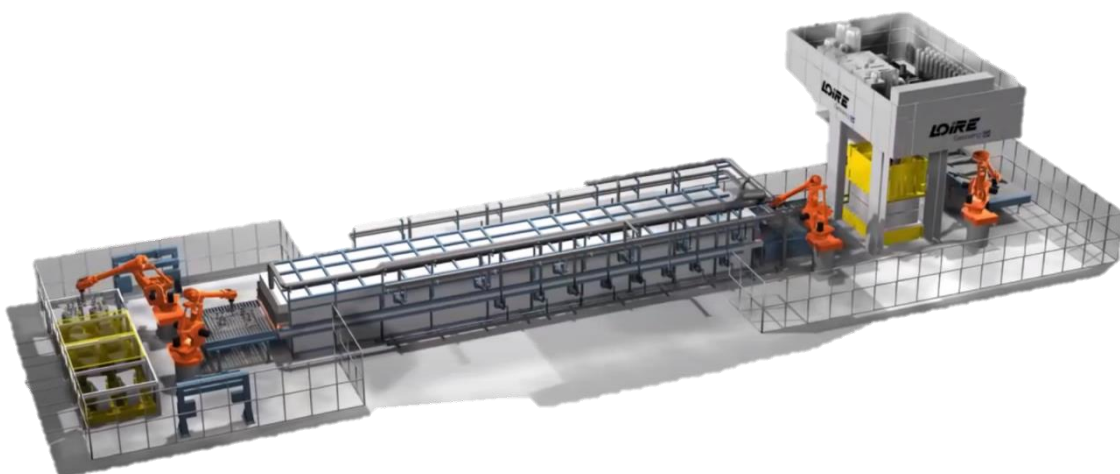


Ilustración 5: Línea de estampación en caliente

Cuando los blanks salen del horno a una temperatura aproximada de 900 °C, un segundo robot los recoge y los coloca sobre la parte inferior del molde. Seguidamente la prensa descende con la parte superior del molde conformando la pieza.

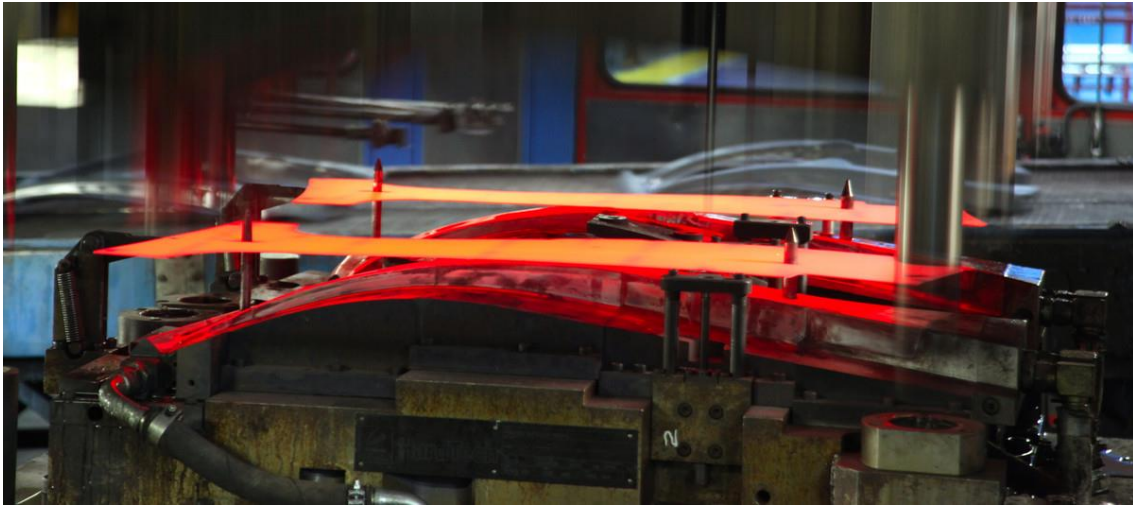


Ilustración 6: Blank sobre el troquel antes de la estampación

Una vez que la prensa ha descendido, el molde permanece cerrado durante un breve intervalo de tiempo en el cual se le continúa aplicando presión a la pieza y además se le realiza un templado gracias a la refrigeración interna por agua que tienen los aceros del troquel. Este es uno de los puntos críticos del proceso, ya que el tiempo que permanece la pieza en el molde determina la velocidad de enfriamiento y esto está relacionado directamente con las propiedades mecánicas y dimensionales de la pieza.

2.2. Descripción del producto

Como se ha mencionado anteriormente, en la línea de estampación en caliente se trabaja con pilares estructurales, pilar A y B, y con refuerzos. Las piezas sobre las que nos centraremos son los pilares, concretamente el pilar B, ya que presentan una mayor dificultad debido a sus grandes dimensiones y necesitan un mayor control de las variables del proceso.

El pilar B es la estructura vertical situada entre la puerta delantera y trasera de un coche y tiene diversas funciones.

- Se encarga de sujetar y dar rigidez al techo del vehículo.
- En caso de accidente absorbe la gran mayoría del impacto lateral.
- En él se anclan elementos como las puertas o los soportes del cinturón de seguridad.

A la hora de realizar la estampación en caliente de esta pieza hay varios puntos críticos a tener en cuenta para finalmente obtener las prestaciones deseadas.

- El pilar B está formado por dos materiales distintos unidos por soldadura laser, lo que hace que se comporten de diferente manera al calentarse y templarse. Los dos haceros de los que se compone son el Usibor 1500 y el Ductibor 500. La finalidad de esta composición doble es que frente a un impacto el Usibor conserve su forma estructural y el Ductibor se deforme absorbiendo las fuerzas del impacto.



Ilustración 7: Estructura pilar B

- Otro de los aspectos a tener en cuenta es la colocación de parches en determinadas zonas para ganar resistencia y espesor. Esto hace que la temperatura de calentamiento y enfriamiento sea distinta a la del resto de la pieza.

2.3. Equipos de medida

Para la toma de datos y la realización de ensayos en el laboratorio se van a usar diferentes equipos. Para la obtención de las temperaturas de la pieza a la entrada y salida del troquel se usarán varias cámaras termográficas situadas de forma fija en las prensas y las cuales realizarán una captura de datos para cada golpe que da la prensa.

Para el análisis de las propiedades mecánicas en el laboratorio se usaran la máquina de ensayos universales, un durómetro y 3MA II.

2.3.1. Cámaras termográficas

El equipo utilizado para la toma de datos son las cámaras infrarrojas inteligentes de la serie IRSX que permiten la captura y procesamiento de imágenes termográficas de las piezas de estampación en caliente.

En cada una de las prensas hay instaladas dos cámaras enfrentadas entre sí para garantizar la fiabilidad de los datos tomados debido a las grandes dimensiones de los troqueles y el campo que tienen que abarcar.



Ilustración 8: Cámara termográfica

Con la implantación de este sistema se busca obtener un mayor control sobre la temperatura y la calidad de las piezas. Con las cámaras se obtiene un mayor control sobre la temperatura de las piezas, ya que el sistema actual consta de un pirómetro que monitoriza únicamente un único punto. Con las cámaras podemos controlar una amplia localización de puntos dentro de la misma pieza así como áreas que nos permiten obtener una temperatura media de la pieza o de una zona en concreto[2].

La configuración de las cámaras nos permite establecer un rango de temperaturas tanto antes como después de la estampación. Si la pieza o alguna

zona de interés se encuentra fuera de este rango nos avisará de que tenemos una pieza NOK.

Se ha programado la lógica de las prensas para que en caso de que la pieza sea NOK por motivos de las cámaras, esta se pare y el operario retire la pieza y la declare como chatarra. Actualmente esta funcionalidad de parada de prensa está desactivada y solamente muestra un mensaje por pantalla. Este modo se implementará cuando se hayan configurado adecuadamente los rangos y la correcta frecuencia de toma de imágenes y contrarrestado con los análisis en el laboratorio para poder determinar realmente que piezas son o no son OK.

2.3.2. Máquina de ensayos universales

Una máquina de ensayos universales está diseñada para probar las propiedades mecánicas de los materiales, en nuestro caso los aceros. Esta máquina es una parte importante del proceso y fabricación de los productos, ya que se utiliza para asegurar que los materiales y el producto final cumplen con las especificaciones requeridas.

En nuestro laboratorio se dispone de la máquina Instron 5982



Ilustración 9: Instron 5982 Universal Testing Machine

Se utilizará para realizar ensayos de tracción en las probetas extraídas de las piezas estampadas. Su gran robustez estructural permite capacidades de carga de hasta 100 kN [3].

2.3.3. Durómetro

La máquina de la que disponemos en el laboratorio es un microdurómetro DuraScan 20. La dureza es uno de los parámetros claves a controlar y uno de los requisitos de los clientes.

Con este microdurómetro podemos realizar ensayos de dureza Vickers [4], comprendiendo el rango de carga entre 0,25 g y 62,5 Kg. La ventaja de este tipo de ensayo es que puede aplicarse sobre materiales muy duros como es nuestro caso.



Ilustración 10: Durómetro - DuraScan 20

La finalidad de realizar estos ensayos es evaluar si las propiedades del material o los tratamientos térmicos que se le realizan son los adecuados y ver las variaciones que van apareciendo para poder relacionarlas con las temperaturas.

2.3.4. 3MA II

La técnica de inspección 3MA (Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis) es una tecnología de inspección no destructiva rápida y rentable que permite determinar simultáneamente varias características de calidad relevantes de los materiales.

3MA es extremadamente versátil y permite obtener datos como la determinación cuantitativa de dureza, la profundidad de endurecimiento, la tensión residual y otros parámetros del material.



Ilustración 11: Ensayo 3MA II

El funcionamiento de esta técnica de inspección se basa en una combinación metódica y técnica de cuatro métodos micromagnéticos: ruido de Barkhausen, análisis armónico de la intensidad del campo magnético tangencial, análisis multifrecuencia de corrientes de Foucault, y permeabilidad incremental [5].

Medidas tomadas con 3MA:

- Dureza: Vickers
- Tracción:
 - RM: resistencia mecánica [MPa]
 - RP: resistencia plastica [MPa]
 - A50: elongación (%)
- Recubrimiento:
 - TLT: capa de recubrimiento total [micras]
 - DLT: capa de difusión [micras]

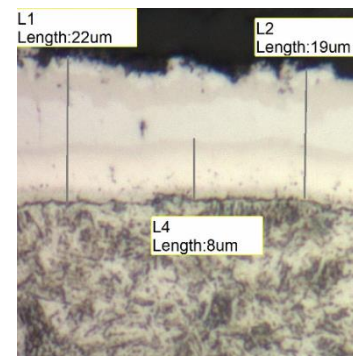


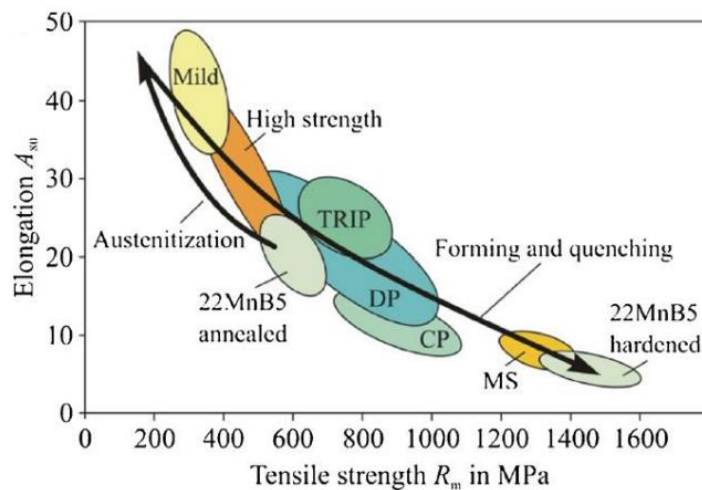
Ilustración 12: Recubrimiento superficial

3. Influencia de la temperatura en los procesos y materiales

La variable más crítica y sobre la que vamos a trabajar es la temperatura que engloba todo el proceso, los cambios que va realizando y como afecta a los distintos materiales y herramientas de trabajo.

3.1. Proceso térmico del material

El proceso térmico del material se puede entender de manera clara a través de las gráficas presentadas a continuación. La grafica 1 resume el proceso de austenización en el acero para estampación en caliente, el cual dota al formato a estampar de gran conformabilidad con poco esfuerzo, disminuyendo la resistencia mecánica a valores inferiores a 200 MPa y el límite elástico a valores inferiores a 100 MPa. De esta manera, se posibilita la estampación en un solo paso de piezas de grandes dimensiones.



Gráfica 1: Proceso de austenización del acero 22MnB5

Es importante destacar que el proceso de estampación en caliente debe realizarse en un solo paso para evitar el enfriamiento de la pieza y los esfuerzos residuales que quedarían en ella. En nuestro caso utilizamos el formato de acero 22MnB5 para la estampación en caliente debido a sus características intrínsecas.

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 [6].

Composición %

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 de acero 22MnB5

El proceso de cocción, denominado austenización, tiene como objetivo llevar al acero a la fase de austenización. Posteriormente, se lleva a cabo el estampado y templado en el troquel refrigerado, denominado "Forming and Quenching", para finalmente dotar a la pieza de la característica buscada: gran resistencia, especialmente en las partes altas de un pilar B para evitar la intrusión.

Quenching – CCT Diagram

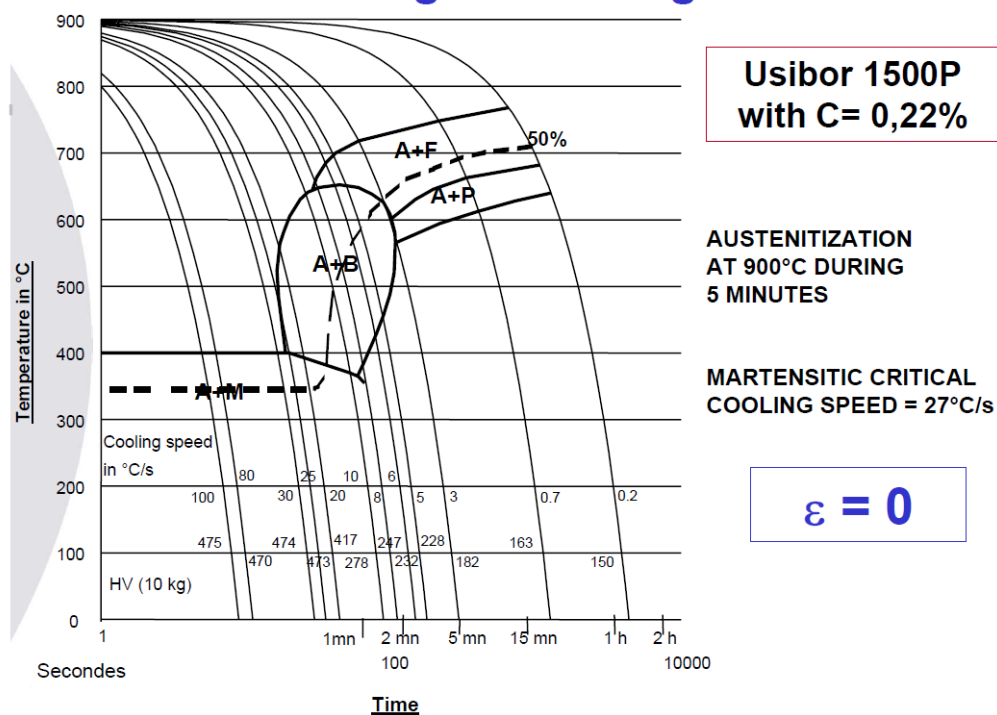


Ilustración 13: Diagrama CCT de la microestructura obtenida durante el proceso de templado

En la gráfica anterior se observa que la velocidad de enfriamiento adecuada para obtener una microestructura 100% martensítica tiene que ser mayor que 27 °C/s. Sin embargo la velocidad óptima de enfriamiento depende principalmente de la temperatura de austenización y el historial de deformación.

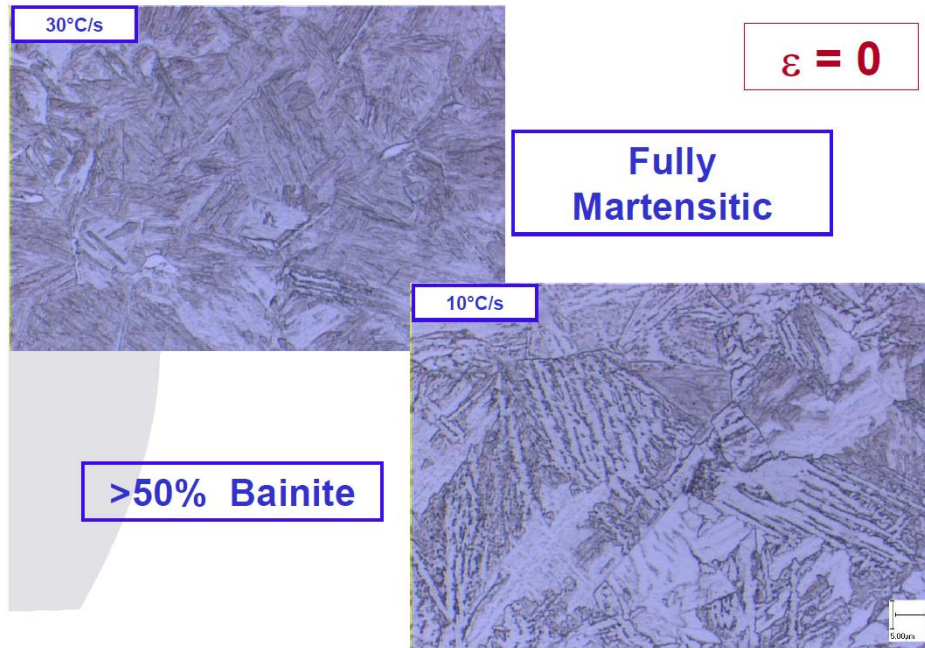
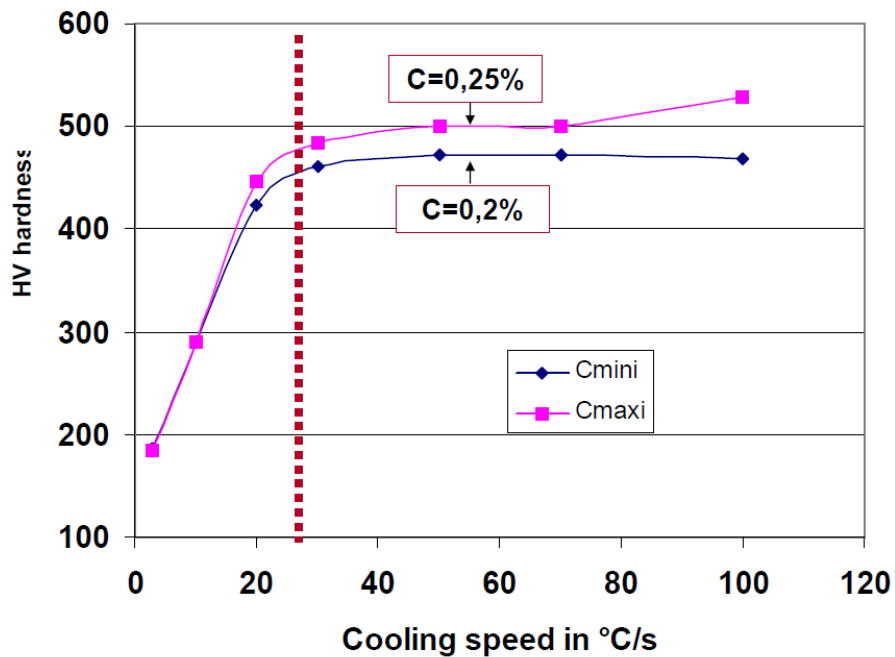


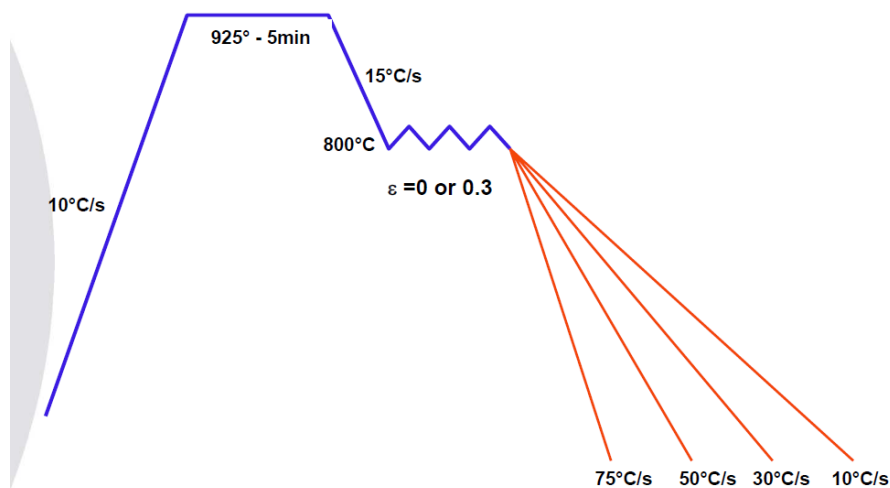
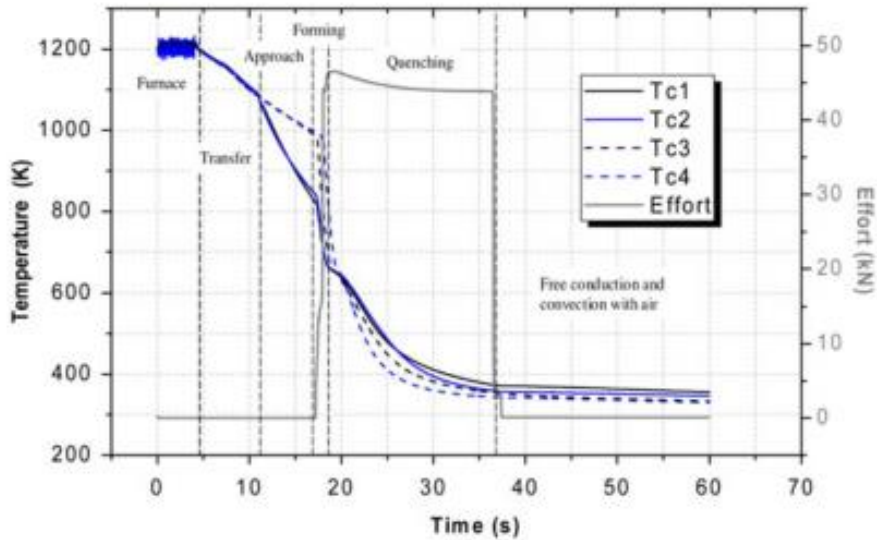
Ilustración 14: Diferencias en la microestructura producida por la variación de la velocidad de enfriamiento

El proceso estándar consiste en calentar el blank en el horno a 900-950 °C durante unos 5 minutos, dependiendo del espesor, y luego transferirlo al troquel para enfriarlo a velocidades mayores que 27 °C/s. Esta velocidad puede variar bastante hacia valores superiores en función del espesor del material y las propiedades mecánicas que queremos obtener. La herramienta de estampado permanece cerrada durante aproximadamente 10 segundos y es refrigerada por agua en su interior [7].



Gráfica 2: Relación de la velocidad de enfriamiento Vs dureza en función del % de carbono del acero

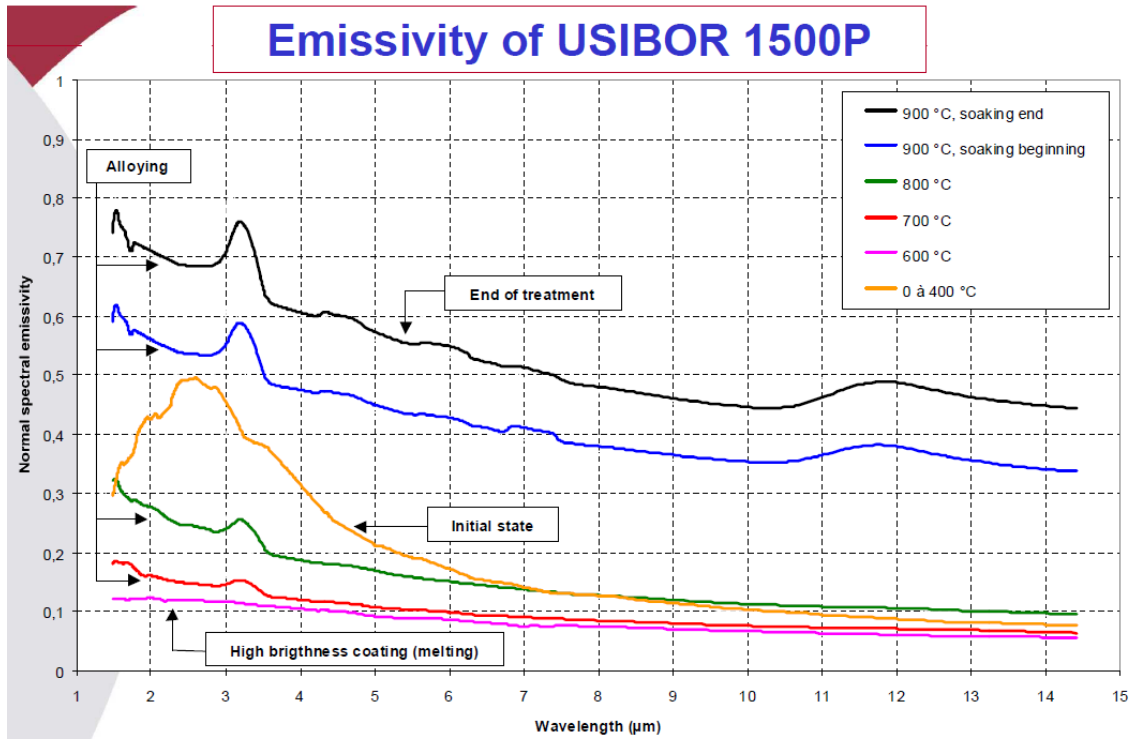
La temperatura de 900°C se considera el límite para evitar el desequilibrio en la disgregación del boro en la matriz, lo que empeoraría los resultados finales. Esta información es relevante para obtener los mejores resultados en el proceso de estampado en caliente del acero.



Gráfica 3: Tiempos y temperaturas típicas en un proceso de estampación en caliente

Otro de los parámetros clave es la emisividad. En función de la temperatura a la que se encuentra el material tendrá un valor de emisividad u otro. Este es un dato importante a tener en cuenta a la hora de configurar las cámaras termográficas.

La emisividad es la medición de la capacidad de un objeto de emitir energía infrarroja. La energía emitida indica la temperatura del objeto. La emisividad puede tener un valor entre 0 (espejo brillante) y 1.0 (cuerpo negro) [8].



Gráfica 4: Valores de emisividad para el Usibor 1500

3.2. Troqueles para estampación en caliente

La estampación en caliente es un proceso crítico que requiere un cuidado especial en todo lo relacionado con los troqueles. Estos componentes están expuestos a condiciones extremas de trabajo, incluyendo altos impactos térmicos y velocidades de trabajo relativamente altas. Además, son responsables de llevar a cabo el templado de la pieza mediante altas velocidades de enfriamiento. Para lograr un adecuado control de la velocidad de enfriamiento, los troqueles para estampación en caliente tienen conductos por los que circula agua. Es crucial que los troqueles tengan un diseño bien elaborado para asegurar la repetibilidad de los elementos fabricados.

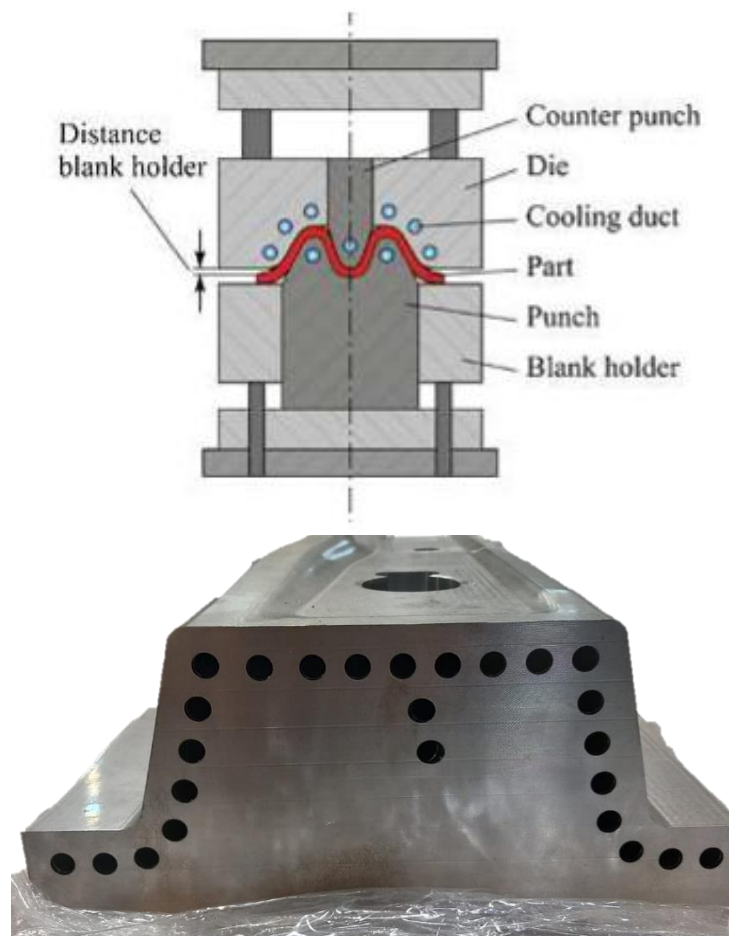


Ilustración 14: Conductos de refrigeración de un troquel

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es el desgaste de los troqueles, debido a las cargas de trabajo comentadas anteriormente, principalmente caracterizadas por una variación de la herramienta tanto por adhesión como por abrasión. Es por esto que los troqueles no se realizan de una sola pieza.

Un troquel está compuesto de diferentes partes que encajan entre sí y su conjunto ensamblado tiene la forma final deseada. Los motivos de que se realice así son diversos. Esta configuración facilita la refrigeración, su manipulación, un

menor sufrimiento con la dilatación térmica debido a las juntas de separación entre aceros, ante desperfectos o modificaciones permite trabajar sobre esa parte en concreto.

Por ejemplo, la sección principal del troquel inferior de un pilar B está compuesto por 5 aceros distintos, con aproximadamente la siguiente distribución.

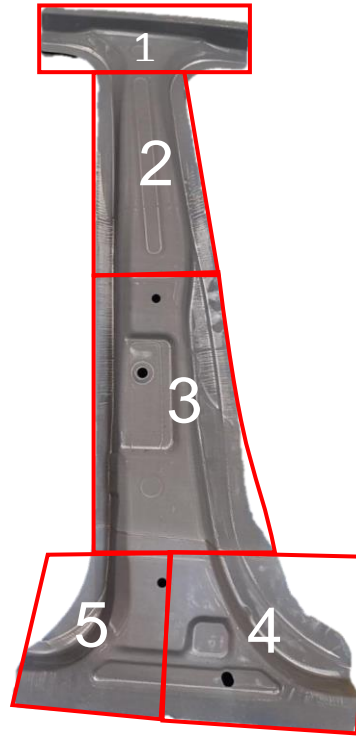


Ilustración 15: Distribución aceros pilar B

4. Montaje y configuración de cámaras termográficas

Este proyecto se está llevando a cabo junto a VISION ONLINE, una empresa especialista en temas de visión artificial. El proyecto se inició con unas cámaras de posicionamiento para comprobar la correcta posición de los bloques y se está ampliando con cámaras termográficas para poder llevar un control de temperaturas de entrada y salida de las piezas.

4.1. Instalación y ubicación

La ubicación ideal para colocar este tipo de cámaras termográficas es justo en la vertical de la zona a medir y a una distancia variable en función del objeto a tratar.

Debido a nuestro proceso esto es imposible, ya que trabajamos con troqueles en constante movimiento. Se han colocado dos cámaras termográficas por línea y se han establecido en disposición horizontal y en lados opuestos del troquel. Esta ubicación ha sido elegida analizando cuidadosamente los rangos de movimiento de los robots y elementos móviles para evitar colisiones e interferencias con cualquier objeto móvil. La razón de instalar dos cámaras termográficas son las grandes dimensiones que tiene la prensa y los troqueles.

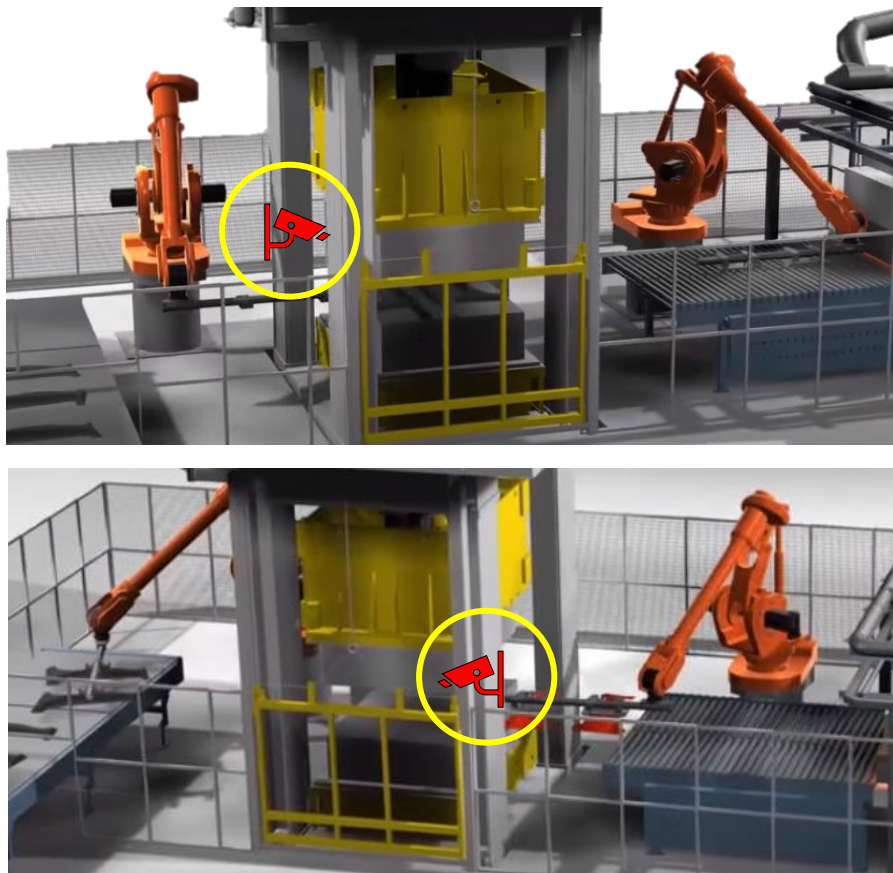


Ilustración 16: Ubicación cámaras termográficas en la salida y entrada de prensa

Los troqueles pueden ser de hasta cuatro cavidades. Esto quiere decir que pueden estamparse hasta cuatro piezas en el mismo golpe. Por lo que con la

cámara de un lado controlaremos las dos cavidades más cercanas y con la del lado opuesto lo mismo, garantizando así la correcta toma de datos.

4.2. Configuración del software

Todo el desarrollo del software ha sido realizado por la empresa VISION ONLINE, sin embargo, una vez instaladas y conectadas físicamente las cámaras en la línea ha de realizarse un proceso de configuración y ajuste.

En el ordenador de línea tendremos una visualización en tiempo real de cada golpe como se muestra en la siguiente imagen. Podemos mostrar una, dos o cuatro imágenes. Correspondiéndose en este caso las dos imágenes superiores, una de cada cámara, al momento justo antes del estampado, y las dos inferiores al momento posterior al estampado y templado.

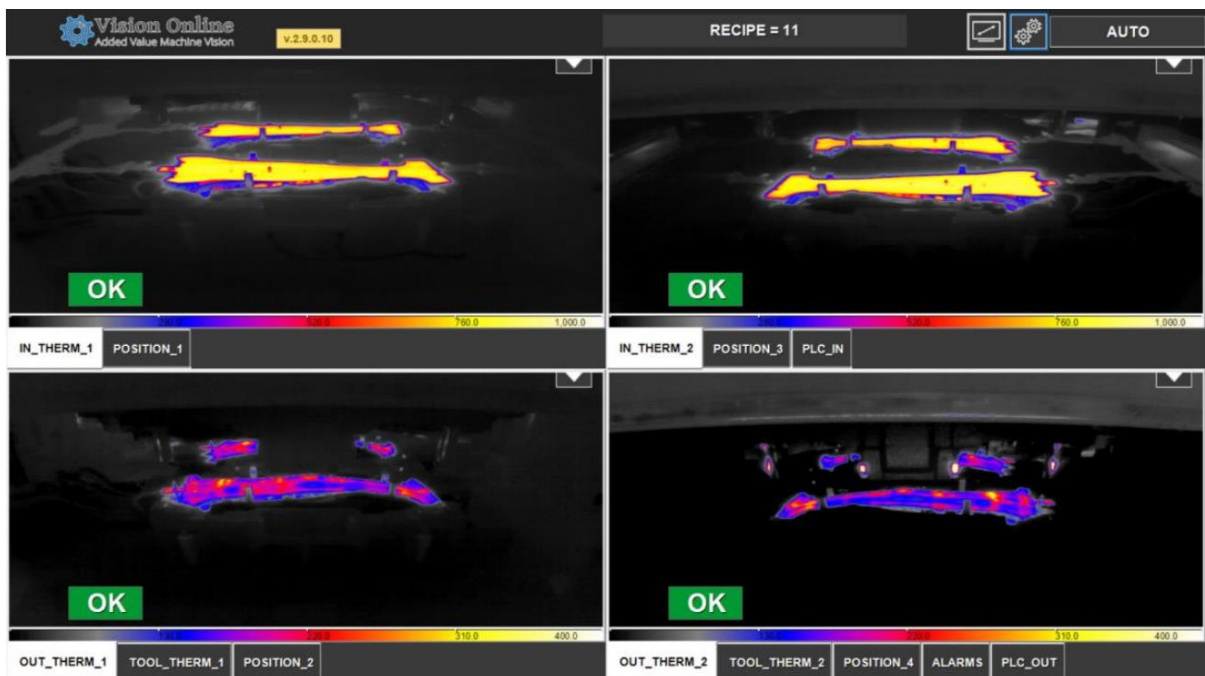


Ilustración 17: Vista genérica de cámaras termográficas en el ordenador de línea

Para poder comenzar a configurar estas imágenes el primer paso es definir las “recetas”.

La receta es el elemento principal que permitirá la conexión entre los controles y las referencias guardadas en producción. Cada receta contiene todas las referencias por troquel. Es la configuración de parámetros que requiere una determinada referencia, por lo que habrá que crear tantas recetas como referencias/piezas con las que trabajemos, en nuestro caso más de 15.

En esta receta se guarda la configuración de parámetros como el tiempo de permanencia de los blanks en el horno, posiciones de cogidas y dejadas de los robots, etc. Lo que a nosotros nos interesa es que cada referencia tendrá unos puntos o zonas de interés que hay que controlar, y esto hay que definirlo para

cada una de las recetas, dentro de la receta en cada una de las cámaras, y dentro de cada cámara para la foto antes y después de la estampación.

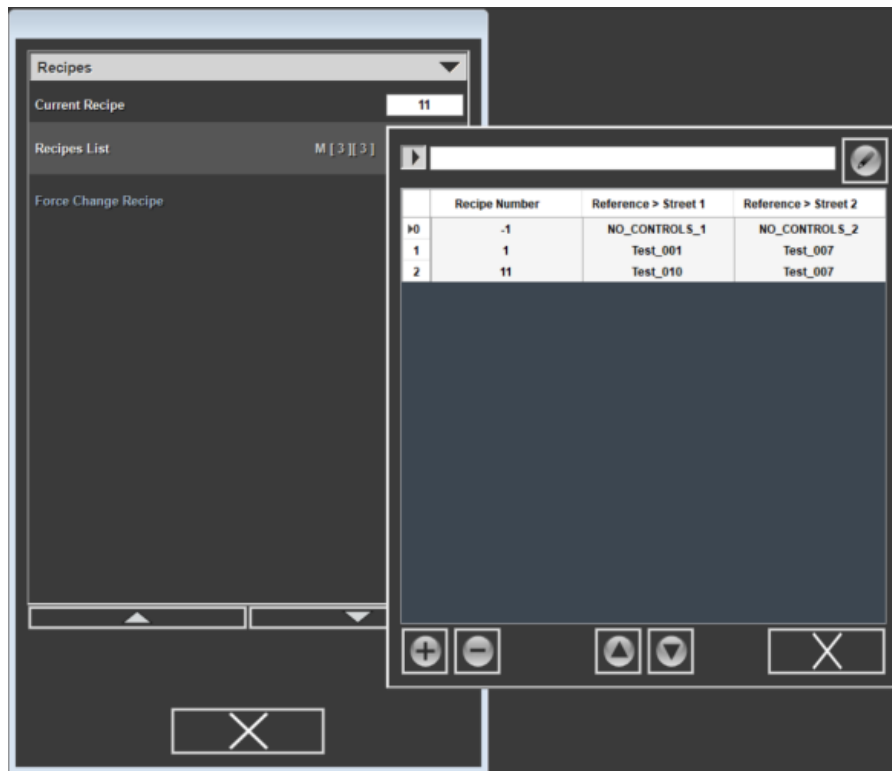


Ilustración 18: Prueba creación de recetas

Una vez generada la lista de recetas hay que configurar los diferentes parámetros. El software tiene una función denominada Auto Teach con algoritmos de autoconfiguración que permiten establecer de forma rápida estos parámetros previamente configurados, aunque posteriormente haya que ajustarlos al proceso.

FASE 1: ENTRADA

- Emisividad: 0.56

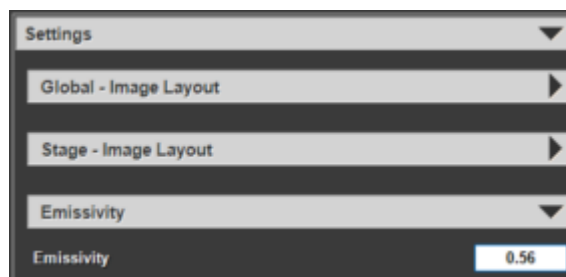


Ilustración 19: Emisividad

-Temperatura mínima de la pieza: 200°C.

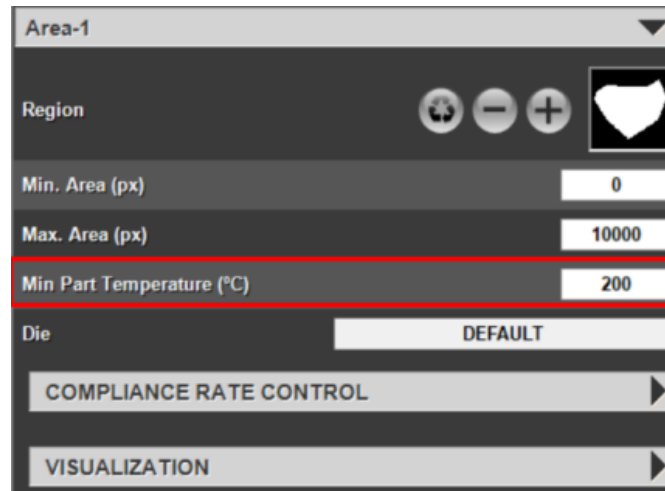


Ilustración 20: Temperatura mínima

- Tasa de conformidad (Compliance Rate): 70%, 650 °C y como valor mínimo aceptado (o Auto).

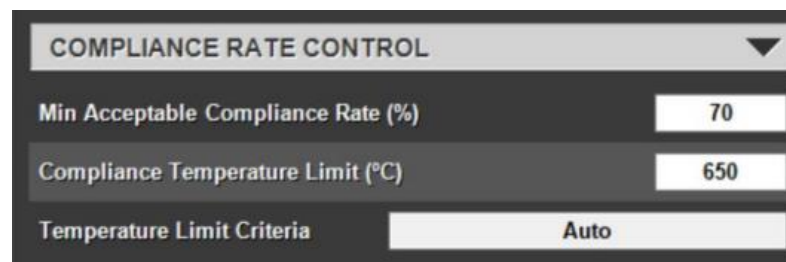


Ilustración 21: Control tasa de conformidad

- Área: Es necesario establecer un valor de área máxima y mínima, donde la pieza se considerará como OK. Esto se debe a que la Tasa de Conformidad es porcentual, y no considera el tamaño de la región.
- Control máximo. Control mínimo y control medio: Estas opciones están desactivadas por defecto. Se pueden activar desde el menú principal de OPCIONES.

VISUALIZACIÓN y RESULTADOS:

Por defecto, la decisión OK/NOK sólo tiene en cuenta la tasa de cumplimiento, aunque el máximo, mínimo, promedio y los puntos seteados se almacenan en la base de datos. El máximo, el mínimo, el promedio y los puntos de medición también pueden considerarse en la decisión si se activan las opciones.



Ilustración 22: Visualización de resultados de configuración

ETAPA 2: SALIDA

Los parámetros por ajustar son los mismos que para la entrada, pero con sus valores y rangos correspondientes.

Basada en las especificaciones y necesidades de los procesos de estampado en caliente, la interfaz gráfica de usuario se había optimizado para lograr una inspección fiable con sólo dos tipos de controles, área y punto.

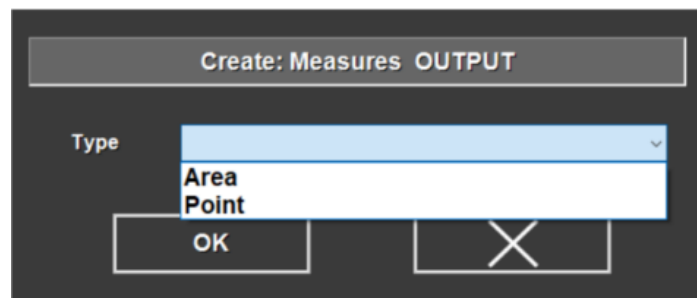


Ilustración 23: Controles de temperatura área y punto

PUNTO

Devuelve y almacena el valor de la temperatura en el punto elegido. Este control mide el valor de la temperatura en el punto definido y lo genera como resultado. En cada punto se establecen unos parámetros de control que determinan la condición de OK o NOK. Estos parámetros son las coordenadas cartesianas del punto y los límites superior e inferior de temperatura.

Point-1	
Upper Limit for Max Temp (°C)	1000
Lower Limit for Max Temp (°C)	0
Point Coords	X 0.0
	Y 0.0

Ilustración 24: Configuración punto

POLÍGONO

Este control permite la configuración de un contorno cerrado, para calcular todos los valores de temperatura contenidos dentro del área establecida.

Para ajustar la geometría del polígono, se establece una secuencia de vectores. Estos vectores son determinados por puntos definidos por el usuario.



Ilustración 25: Configuración de geometría del polígono

La geometría se cierra automáticamente con el primer y el último punto definido, una vez que la edición ha terminado. Este control también devuelve el valor de la temperatura del punto con temperatura máxima dentro del contorno cerrado.

- Parámetros de control

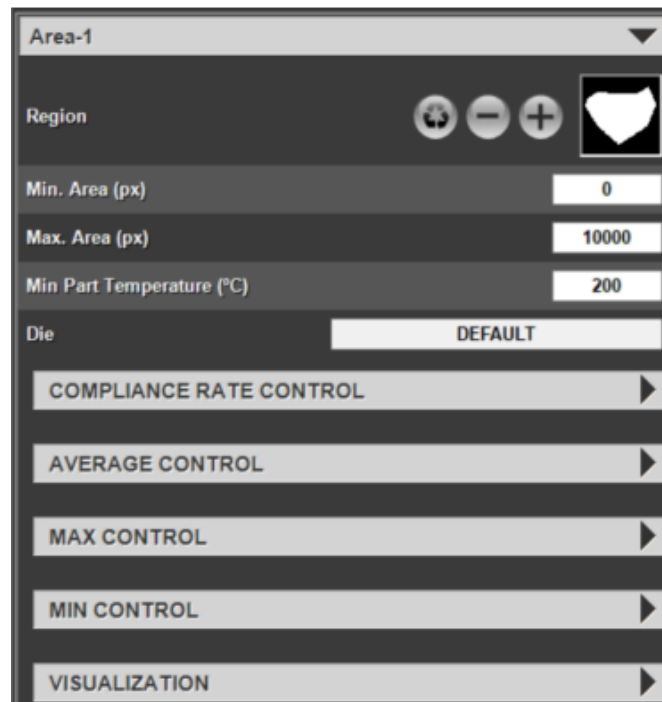


Ilustración 26: Parámetros de control polígono

- Región: Asignación punto a punto del polígono (región) a analizar.
- Temperatura parcial mínima (°C): Valor mínimo de temperatura que permite considerar los puntos como sección de la pieza.
- Control de tasa de cumplimiento: El control habilitado para obtener el control sobre la uniformidad de la temperatura es la distribución a lo largo de las distintas piezas.
- Tasa de cumplimiento mínima aceptable (%): Proporción mínima de piezas que deben cumplir con los límites establecidos.
- Límite de temperatura de compilación (°C): Temperatura fijada como cifra de referencia para calcular la relación de aceptación.
- Criterios de límite de temperatura: Lógica de consideración de las tolerancias.

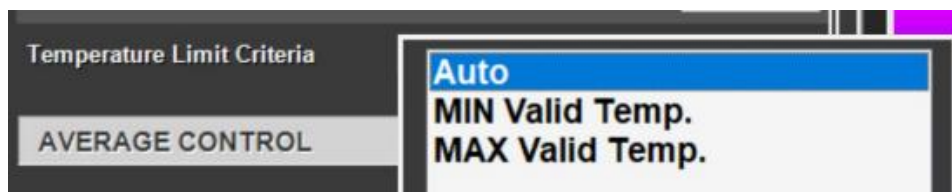


Ilustración 27: Límites de temperatura y tolerancias

- Control de máxima, media y mín: Parámetros aceptados para las temperaturas medidas en cada región. Mínimo, promedio y máximo:
 - Límite superior para la temperatura máxima (°C): Valor máximo aceptado de temperatura.

- Límite inferior para la temperatura máxima (°C): Valor mínimo aceptado de temperatura.

- Remove pixels from border: opción que permite discriminar los bordes de la pieza para asegurar que inspeccionamos el área más homogénea y núcleo central. Teniendo en cuenta que los bordes pueden alterar los resultados de los cálculos, es necesario establecer esta opción adecuadamente para una medición fiable.

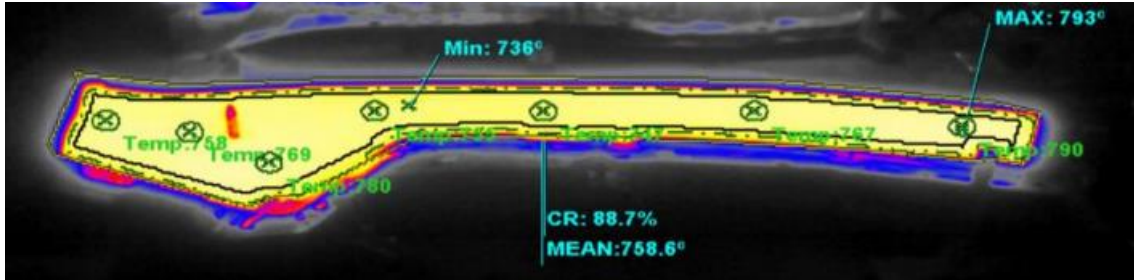


Ilustración 28: Discriminación de los píxeles del borde para una mayor fiabilidad de la medida

Para una misma pieza podemos combinar tanto puntos como áreas para obtener unos mejores resultados. Es el procedimiento que sigue la opción auto teach.

Measures INPUT	
Name	Type
Area-1	Area
Area-2	Area
Point-1	Point

+ CREATE

× DELETE

SAVE

Ilustración 29: Lista de áreas y puntos definidos en una pieza o cavidad

5. Inspección de imágenes termográficas y relación con resultados de laboratorio

En este apartado se van a observar las variaciones de temperatura en las piezas a través de las imágenes obtenidas por las cámaras termográficas y los ensayos que se realizan a estas piezas en el laboratorio.

Como es un proyecto que aún no está terminado y no se realiza todo el trabajo en interno, sino que es en colaboración con proveedores, avanza de forma lenta, por lo que hay aspectos que están por desarrollar o no son plenamente funcionales. Uno de estos puntos que están en proceso es el uso funcional de la base de datos, lo que no permite realizar un análisis masivo de datos o comparar tantas imágenes termográficas con pruebas de laboratorio como nos gustaría.

5.1. Inspección de imágenes

Tras cada golpe de prensa se almacenan todos los datos que recopilan las cámaras termográficas. Estos datos son cuatro fotografías, dos de entrada y dos de salida, y un archivo con los valores numéricos. Podemos acceder a estos datos desde el mismo programa del ordenador de línea o desde el servidor en el que están almacenados.

Revisar estas imágenes directamente en el ordenador de línea es de mucha utilidad para configurar correctamente el “delay time”, instante del ciclo en el que se toma la fotografía, y los puntos o áreas de control.

Podemos revisar las imágenes de forma visual en la carpeta del servidor local para tener una primera impresión de las temperaturas y de los cambios de estas a lo largo del tiempo. En esta comparativa rápida ya podemos ver claramente la diferencia de temperaturas entre unas zonas y otras del troquel y la variación de la temperatura en una misma zona a lo largo del tiempo.

Con este breve análisis visual rápido ya podemos ver que el proceso no es completamente estable y que tiene variaciones (ilustración 23), lo que puede interferir en las propiedades finales de la pieza.

Tanto para la entrada como para la salida se ha establecido una escala de temperatura fija con un rango cromático, lo que facilita mucho ver las oscilaciones térmicas de forma rápida a lo largo del tiempo sin tener que depender de los datos numéricos.



Ilustración 30: Escala cromática y de temperaturas

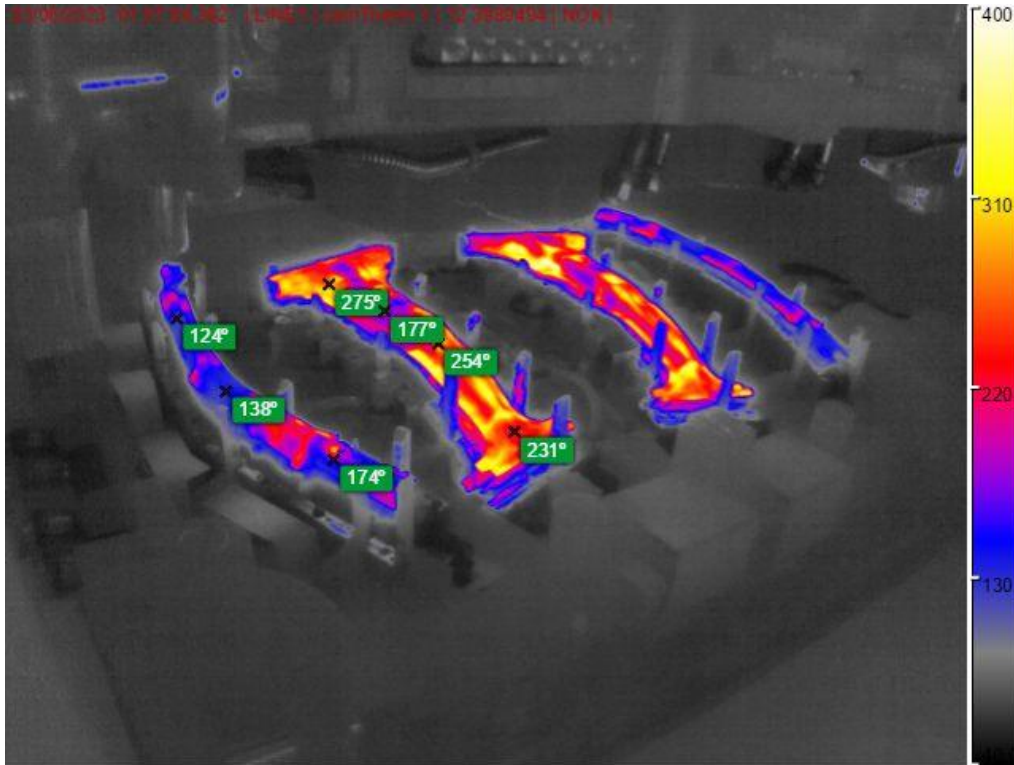
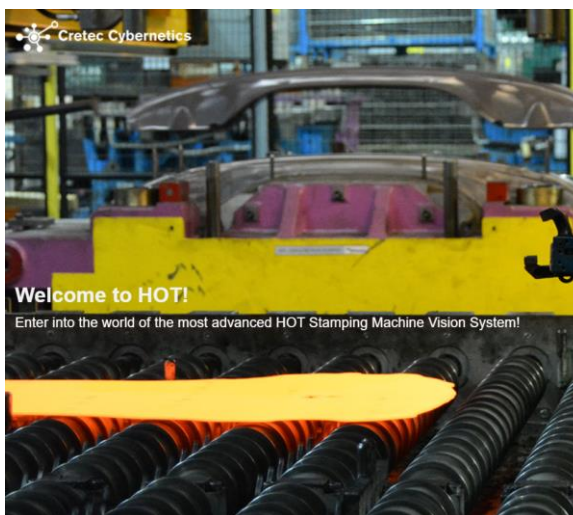


Ilustración 31: Ejemplo de variaciones de temperatura en una pieza tras la estampación y el templado

Actualmente se está desarrollando una aplicación web que permite generar informes de cada golpe con todos los datos mencionados para poder ver los resultados de una manera rápida y sencilla. Todavía es algo que está en proceso y con lo que no hemos podido trabajar.



Please login into your account

User Name

Password

[Login](#)

Ilustración 32: Aplicación web para la generación de informes de cada golpe.

5.2. Ensayos en laboratorio

Para cada producción de una referencia se realizan diferentes análisis en laboratorio y se miden diferentes propiedades como la dureza, la tracción y el recubrimiento. Todas estas medidas quedan registradas en un cuestionario vinculado a una base de datos que permite tener un histórico y realizar un análisis y evolución de los datos.

El método más rápido para realizar ensayos es utilizar la máquina de 3MA II, ya que es un ensayo no destructivo, rápido y fácil de realizar y permite obtener diferentes datos con una sola medida.

5.3. Relación entre los datos termográficos y los análisis de laboratorio

Para poder tener más información y datos a contrastar nos centraremos en una referencia en concreto, pilar B de Citroën, ya que es una referencia que entra en las prensas varios días a la semana y nos permite ver la evolución de los ajustes realizados con mayor frecuencia. También nos centraremos en el ensayo de dureza, ya que es el más fiable, con resultados prácticamente iguales a los que se realizan en destructivo con la máquina de ensayos universales.

Este pilar B está compuesto de ductibor 500 en su zona de talonera y ductibor 1500 en la zona de cabeza (esta estructura del material y su finalidad ya se ha explicado en el apartado 2.2). En este análisis nos centraremos en la zona del ductibor, debido a que tiene que cumplir unos mayores requisitos. Sus límites inferior y superior aceptables de dureza son 420 y 500 respectivamente.

Vamos a analizar producciones concretas en las que hay valores fuera de este rango y también se observan variaciones de temperatura con el tiempo en las imágenes termográficas.

El troquel de esta referencia presenta cuatro cavidades, en dos se conforma el pilar A y en las dos restantes el pilar B. Cada uno de una mano distinta, es decir, en cada golpe se produce un coche, pilar A izquierdo y derecho y pilar B izquierdo y derecho.

Vamos a medir la dureza y la temperatura en 3 puntos de un pilar B derecho en una producción en la que había un problema con la refrigeración de un acero del troquel. Después de solucionar el problema volvemos a realizar las mediciones en los mismos puntos para ver la diferencia. En ambas producciones el tiempo de enfriamiento establecido en la prensa es el mismo.

Valores de medidas más desarrollados en el Anexo.

Los puntos mencionados en los que vamos a realizar las mediciones son los siguientes:



Ilustración 33: Puntos de análisis

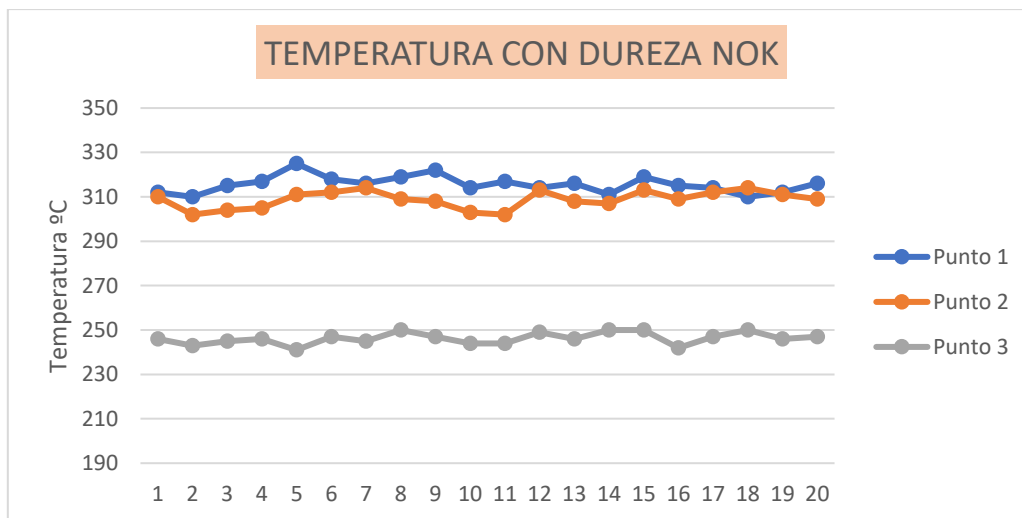
Vamos a tomar los valores de temperatura de veinte estampaciones y a una de esas piezas se le realiza un análisis de 3MA.

La dureza obtenida en estos puntos es la siguiente:

Dureza (HV)		
Punto 1	Punto 2	Punto 3
330	359	456

Tabla 2: Valores de dureza NOK

Teniendo en cuenta que los límites inferior y superior son 420 y 500 relativamente, vemos que los puntos 1 y 2 están fuera de las tolerancias. Ahora vamos a ver las temperaturas que se han registrado en estos mismos puntos.



Gráfica 5: Temperaturas con acero NOK

Vemos claramente que los puntos 1 y 2 están a una temperatura superior al punto 3, aproximadamente entre 70 – 80 °C más.

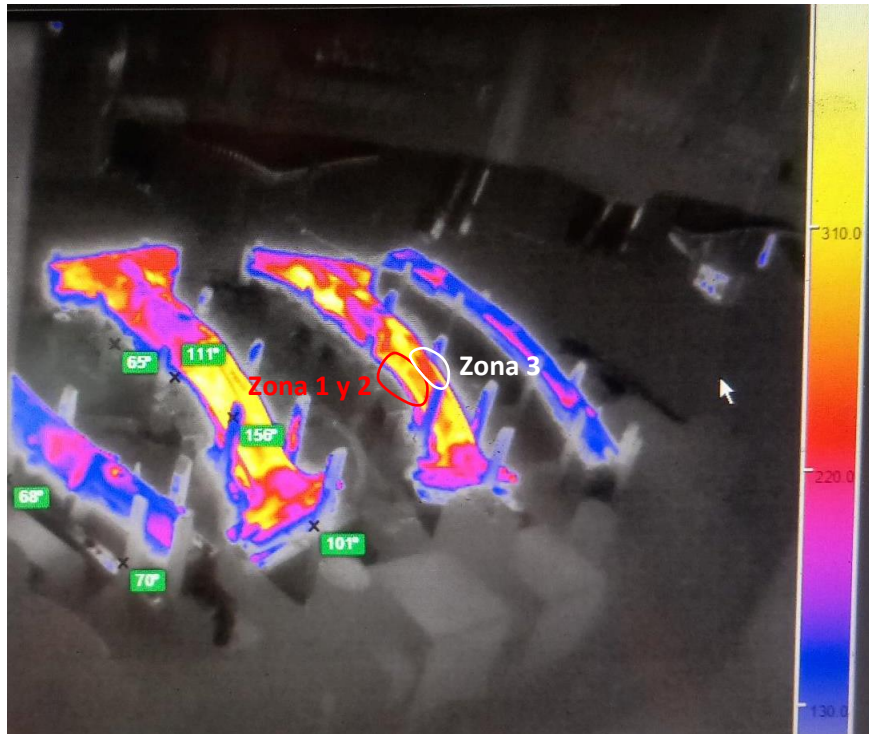


Ilustración 34: Zonas termografía con dureza NOK

Podemos ver que en general la mitad superior del pilar tiene una temperatura mayor. La temperatura en la zona de los puntos 1 y 2 es mayor que en el punto 3, algo que se ve claramente en la imagen térmica.

Después de que los valores de dureza se encontraran fuera de tolerancia se modificó el troquel en el área de matricería cambiando el acero de esa zona por otro nuevo a la espera de mejorar los resultados.

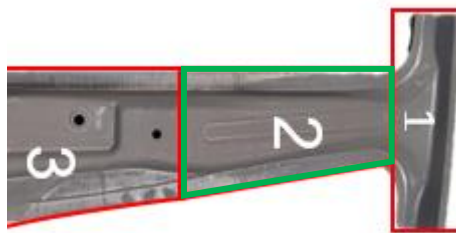


Ilustración 35: Acero nuevo marcado en verde

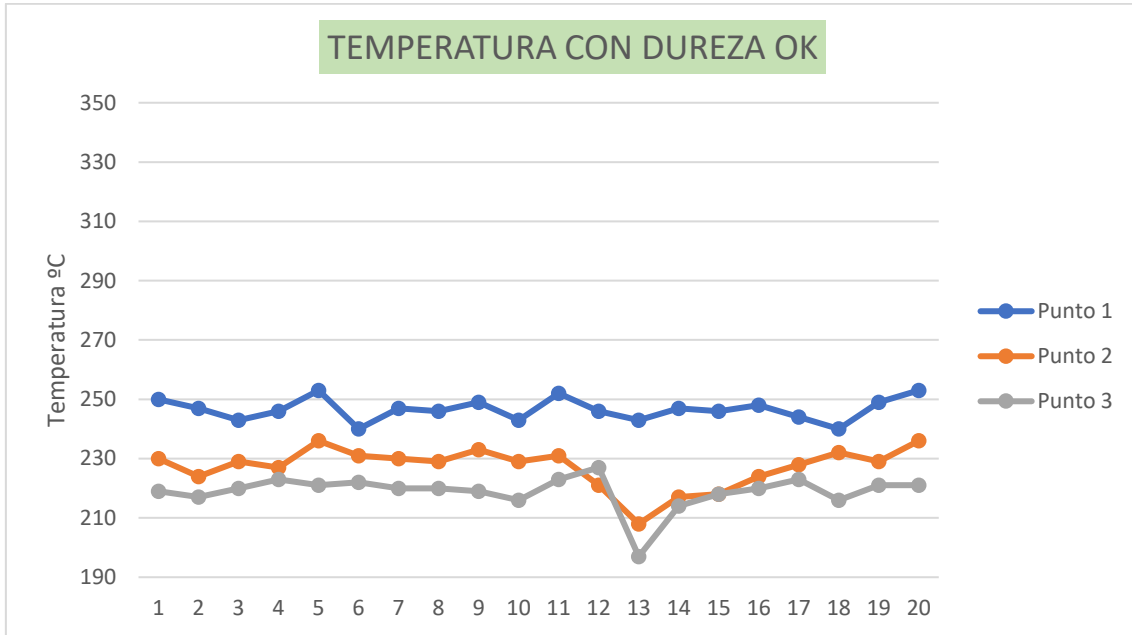
Después de este cambio de acero se vuelven a realizar las mismas medidas de temperatura y dureza en los mismos puntos obteniéndose nuevos resultados.

Las durezas obtenidas en los tres puntos ahora si que están dentro de tolerancias

Dureza (HV)		
Punto 1	Punto 2	Punto 3
469	474	463

Tabla 3: Valores de dureza OK

También se aprecia un gran descenso de las temperaturas en los puntos 1 y 2, de unos 70 – 80 °C, y algo más ligero en el punto 3, entorno a los 20 °C.



Gráfica 6: Temperaturas con acero OK

Vemos diferencias visiblemente apreciables en la fotografía térmica, en la que vemos que cambia considerablemente la zona del acero estudiada.

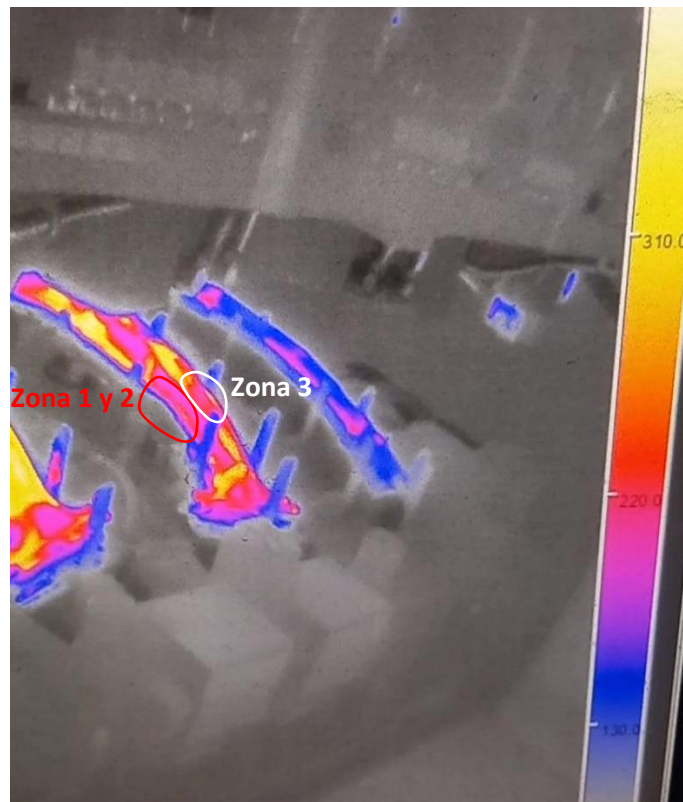


Ilustración 36: Zonas termografía con dureza OK

Según estos datos estamos viendo que una mejora en el enfriamiento del acero del troquel ha favorecido obtener la dureza deseada. En los puntos 1 y 2 el gran cambio de la temperatura (80 °C) ha provocado un aumento y una mejora considerable de la dureza, entrando dentro de especificaciones. En el punto 3 la variación de temperatura no ha sido muy elevada y la variación de la dureza tampoco ha sido excesiva, lo que nos indica que más o menos los resultados tienen concordancia y que existe una relación entre la dureza y la temperatura final de salida del troquel.

Vemos otro caso en el que se ha realizado un análisis de dureza 3MA a esta misma referencia en una producción posterior dando como resultado NOK en otra zona distinta. Zona del usibor que está junto al ductibor.



Ilustración 37: Zona con dureza NOK

En esta zona tenemos un valor medio de dureza de 375 HV. Si observamos las imágenes termográficas vemos que efectivamente esa zona tiene un color más intenso que el resto, es decir, la temperatura en esa zona es mayor.

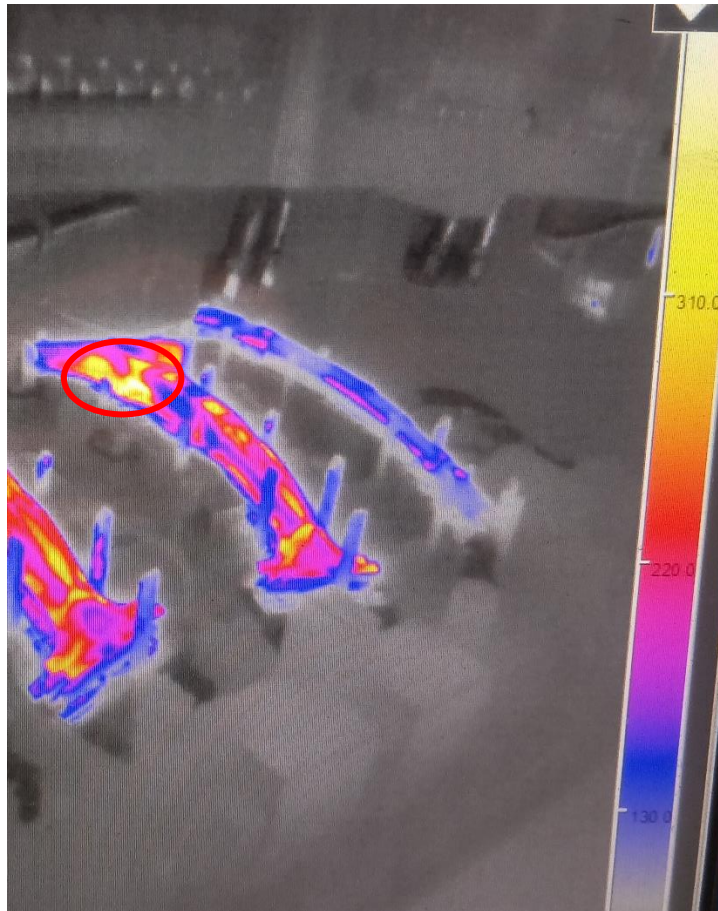


Ilustración 38: Zona con temperaturas por encima del resto de la pieza

En la misma producción del análisis anterior también podemos ver que esta zona ya tenía un valor algo superior al de temperatura, sin embargo los valores de dureza entraban dentro de la aceptación rozando el límite inferior. Ahora vemos que ese valor de temperatura es mayor y efectivamente la dureza ha disminuido. Tenemos valores de temperatura en esos puntos de entorno a 330 °C.

Tras la detección de este problema se intervino en el acero de esta zona realizándole un pequeño calce, lo que hace que el acero se eleve y el contacto con la pieza sea mejor favoreciendo así el enfriamiento.

Después de esta corrección la temperatura en esa zona ha disminuido y el valor de dureza ha aumentado entrando de nuevo en tolerancia.

6. Resultados y conclusiones

El seguimiento y desarrollo de este proyecto de cámaras termográficas ha dado como resultado la instalación de dichas cámaras, su configuración y la generación de documentos donde se detallan los pasos para poder ajustarlas correctamente. También se han empezado a contrastar los datos de temperaturas con ensayos experimentales en laboratorio, aunque en este aspecto solo se ha introducido lo que puede llegar a desarrollarse, ya que las bases de datos para poder contrastar grandes volúmenes de información y tener un histórico todavía no se encuentran operativas y falta configurar y definir más precisamente los puntos y áreas de interés a controlar en cada pieza.

Sin embargo, se extraen unas primeras conclusiones en las que vemos que existe cierta relación entre las propiedades mecánicas de los materiales y la temperatura y tiempo de enfriamiento de la pieza. Se observa que tras el templado, en las zonas con una mayor temperatura a la del resto de la pieza obtenemos resultados de dureza inferiores y que se salen de nuestros parámetros de tolerancia.

La facilidad de inspección de las imágenes nos puede ayudar en la detección de una mala refrigeración de los aceros del troquel o de un mal contacto de la pieza con el troquel en zonas concretas, lo que va a afectar a las características mecánicas finales de la pieza.

La finalidad de todo este proyecto es poder realizar un seguimiento de las piezas para determinar cuales son sus zonas críticas de enfriamiento o cuales son los puntos más conflictivos que pueden llegar a provocar que las piezas no sean válidas.

Como trabajo a futuro y continuación del proyecto se va a seguir trabajando en tener unas bases de datos totalmente funcionales que permitan el registro y almacenamiento de la información de las áreas y puntos definidos para cada pieza en cada golpe. Posteriormente y teniendo ya suficiente información se combinará con los pertinentes análisis de laboratorio para determinar la relación entre la temperatura y las propiedades mecánicas de los materiales, pudiéndose controlar así puntos críticos o llegar a desarrollar un detector de anomalías.

7. Bibliografía

- [1] «Magna - Hechos e historia», *Magna*.
<https://www.magna.com/es/empresa/empresa/hechos-e-historia> (accedido 27 de marzo de 2023).
- [2] «Cámaras termográficas», *AT - Automation Technology*.
<https://www.automationtechnology.de/cms/en/irsx-i-self-contained-thermal-imaging-systems/> (accedido 23 de abril de 2023).
- [3] «Instron 5982 Universal Testing Machine». <https://www.polyu.edu.hk/cnerc-steel/en/research/equipment/784-instron-5982/> (accedido 3 de mayo de 2023).
- [4] «Ensayo de dureza Vickers: ISO 6507, ASTM E384», *Ensayo de dureza Vickers: ISO 6507, ASTM E384*.
<https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-vickers-iso-6507/> (accedido 3 de mayo de 2023).
- [5] B. Wolter, Y. Gabi, y C. Conrad, «Nondestructive Testing with 3MA—An Overview of Principles and Applications», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 6, p. 1068, mar. 2019, doi: 10.3390/app9061068.
- [6] A. Naganathan, L. Penter, y Cummins Engine Company, «Hot Stamping chapter 7 - ASM International», *yumpu.com*.
<https://www.yumpu.com/en/document/read/5291549/chapter-7-hot-stamping-asm-international> (accedido 12 de mayo de 2023).
- [7] Z. Sheng, Y. Wang, T. Chang, R. Miller, y E. Liasi, «Deep Drawing by Indirect Hot Stamping», presentado en SAE 2013 World Congress & Exhibition, abr. 2013, pp. 2013-01-1172. doi: 10.4271/2013-01-1172.
- [8] «Valores de Emisividad para Superficies Comunes | Fluke Process Instruments». <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-non-metals> (accedido 2 de junio de 2023).