

Tratamiento de cementación en hornos de baja presión

Ensayos para la validación y optimización de la
configuración de la carga

Proyecto Final de Carrera

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Enginyeria de Materials

Autor: Josep Masip Castelao
Dirección: Dr. Santiago Suriñach Cornet

Febrero 2014

RESUMEN DEL TRABAJO

Se presentan en este trabajo las metodologías y resultados obtenidos en un ejercicio de optimización y ajuste de la configuración de una carga de tratamiento térmico, ejercicio llevado a cabo en una instalación industrial. De forma más específica, el trabajo expone los ejercicios destinados a validar el ciclo de tratamiento térmico y una propuesta de cambio en la configuración de la carga que eventualmente puede llegar a implementarse en la fabricación industrial de un determinado componente en un horno de tratamiento térmico.

Cualquier propuesta de cambio o modificación en las variables de las operaciones de un proceso de fabricación industrial, requiere una etapa previa de análisis, estudio y validación: los resultados obtenidos a partir de estos ensayos, los cuales se han realizado utilizando instalaciones y condiciones del proceso industrial, aportan información relevante que será utilizada, en caso de que las conclusiones finales sean favorables, para documentar y constituir un dossier técnico de propuesta de cambio en las condiciones del proceso de fabricación.

El procedimiento de validación aplicado considera varias etapas de análisis: en primer lugar la caracterización térmica de una instalación de tratamiento térmico; posteriormente se llevan a cabo los estudios destinados a confirmar la adecuación de la definición del ciclo de tratamiento térmico propuesto para un componente específico; finalmente se llevan a cabo los ensayos para la confirmación de las características metalográficas resultantes del tratamiento. El análisis de los resultados también proporciona información que permite identificar potenciales oportunidades para la optimización y mejora en la definición del proceso de tratamiento térmico.

El trabajo está basado en la experimentación relacionada con el proceso de cementación de un componente que posteriormente es ensamblado en la bomba de inyección de combustible diesel, destinada al sector de automoción.

Todos los ensayos y ejercicios experimentales descritos en este proyecto han sido efectuados en las instalaciones de tratamiento térmico de la empresa *Delphi Diesel Systems*. Los ensayos de caracterización metalográfica se han llevado a cabo en el laboratorio de materiales de la planta.

El equipo multidisciplinar que ha desarrollado este ejercicio ha sido conducido desde la función de ingeniería de procesos. Mi participación en este estudio está determinada por mi posición de responsable de la calidad de los procesos de tratamientos térmicos en la planta de Sant Cugat del Vallés. Como tal, he participado en las etapas de definición, planificación y ejecución de los ensayos que en este trabajo se exponen. Como responsable del laboratorio de materiales, he establecido los procedimientos

de ensayo y las estrategias de muestreo para la caracterización metalográfica de las muestras relacionadas con este estudio, ejecutando los ensayos de caracterización metalográfica y supervisando también el trabajo de otros técnicos que ocasionalmente también han dado soporte en la realización de estos ensayos. La valoración y discusión de los resultados obtenidos y las potenciales evoluciones, cambios de proceso y mejoras destinadas a optimizar la calidad de los componentes o aumentar las capacidades productivas de la instalación, se han efectuado dentro del ámbito del equipo de trabajo.

La tecnología e instalaciones de tratamiento térmico implantadas, y sobre las que se han efectuado los ensayos, es del tipo cementación en baja presión, basada en la inyección de hidrocarburos como medio de cementación. Estos hornos están construidos por el fabricante francés ECM Technologies.

Los ensayos que se presentan, destinados a la validación y optimización de la configuración de carga de tratamiento térmico, se han efectuado sobre uno de los componentes que se ensamblan en la bomba de inyección *common rail* para sistemas de inyección diesel de última generación: este componente de la bomba de inyección se denomina *cabezal hidráulico*.

El tipo de tratamiento térmico aplicado sobre esta pieza consiste en un proceso de cementación superficial, seguida de un proceso de *reheating* o enfriamiento subcrítico y finalmente la etapa de austenización y temple con nitrógeno gas a alta presión. Posteriormente se aplica en proceso de revenido a baja temperatura.

La capacidad de carga máxima establecida por el fabricante de la instalación de tratamiento térmico es de 500 kg brutos (incluyendo piezas y utilajes), y el objetivo de los ensayos que se van a describir se fundamenta en la validación experimental de la cantidad y disposición de las piezas en la carga de tratamiento que se introduce en el horno en cada ciclo, de forma que se garantice la eficiencia del proceso, y considerando un tiempo de ciclo máximo de 6 horas para toda la operación de cementación.

Las normativas internacionales son muy rigurosas en lo relativo a las exigencias de validación de las máquinas e instalaciones destinadas al tratamiento térmico, requiriendo ejercicios de validación que demuestren por una parte la exactitud de los dispositivos de medición, y en particular de los termopares utilizados en estas instalaciones para la regulación de los procesos, y por otra el análisis del grado de homogeneidad térmica del espacio en el que tienen lugar los procesos de tratamiento.

El siguiente diagrama muestra el esquema de trabajo que se ha aplicado en el ejercicio, presentando las diferentes etapas que se han seguido para validar y optimizar el proceso de tratamiento térmico:



El objetivo del ensayo de caracterización térmica de la etapa inicial pretende identificar y cuantificar errores de exactitud en las lecturas de los termopares instalados en el horno, entendidos como desviaciones entre las lecturas obtenidas a partir de sondas de referencia (patrones calibrados) y los termopares instalados en el horno.

A continuación se lleva a cabo el análisis que permite determinar el grado de homogeneidad de la cámara del horno: en este factor tiene un papel muy relevante el adecuado diseño o concepción del horno, tanto desde el punto de vista la geometría de la geometría de la cámara de calefacción como del adecuado reparto y ubicación de las resistencias, siendo ambos factores aspectos básicos para conseguir los resultados requeridos.

Una vez corregidos los errores de exactitud de las lecturas de las sondas de temperatura de la instalación, y caracterizada la homogeneidad térmica de la cámara de calefacción, se efectuarán los ensayos de monitorización de temperatura de la carga en condiciones prácticas reales y de acuerdo a la parametrización del proceso de tratamiento propuesto. Este ejercicio permitirá verificar la adecuación del esquema de ciclo térmico propuesto de acuerdo a la configuración de carga.

Esta parte del ejercicio está basada en la monitorización de las curvas de temperatura real de las piezas de la carga, para lo cual se empleará un dispositivo electrónico *datalogger* que monitoriza y registra señales de temperatura que le transmiten una batería de termopares dispuestos y repartidos estratégicamente en las piezas de la carga.

La última etapa consiste en llevar a cabo los ensayos metalográficos en las piezas tratadas según las condiciones de carga y de proceso de tratamiento térmico representativos de lo que serán las condiciones serie, con objeto de validar y certificar la eficacia del proceso de cementación. Las muestras seleccionadas debe permitir también estimar el grado de dispersión en la carga para cada una de las variables analizadas. De este modo se demuestra el grado de cumplimiento o capacidad estadística del proceso aplicado en relación con los requerimientos o especificaciones técnicas definidas para el componente.

Finalmente, y después de la discusión de los resultados observados, también se plantean y presentan opciones y alternativas que pueden enfocar líneas de mejora del proceso y potenciales desarrollos futuros.

CONTENIDOS

MEMORIA DEL PROYECTO

CAPÍTULO 1

1. Introducción
 - 1.1. Metodología para la validación y optimización de la carga de TT
 - 1.2. Introducción al sistema de inyección *common rail* de Delphi Diesel Systems
 - 1.3. Definición del Cabezal hidráulico
 - 1.3.1. Definición del material
 - 1.3.2. Tratamiento térmico del cabezal hidráulico
 - 1.3.3. Configuración de la carga en el tratamiento térmico
 - 1.4. Validación de la célula de cementación: homogeneidad térmica (TUS)
 - 1.4.1. Método de análisis de homogeneidad térmica
 - 1.4.2. Resultados TUS de las células
 - 1.5. Validación de la cantidad de piezas por carga
 - 1.5.1. Curvas de temperatura: carga de 10 niveles
 - 1.5.2. Curvas de temperatura: carga de 11 niveles
 - 1.5.3. Curvas de temperatura: carga de 6 niveles
 - 1.5.4. Evaluación de resultados metalográficos

Bibliografía capítulo 1

CAPÍTULO 2

- 2.1. Discusión de los resultados del estudio
- 2.2. Conclusiones
- 2.3. Perspectivas y desarrollos futuros

ANEXOS

ANEXO 1. Introducción a los aceros

- A1. Introducción
 - A1.1. Aleaciones hierro-carbono
 - A1.2. Diagrama de fases Fe-C

A1.3. Estructuras martensíticas y bainíticas	
A1.4. Contenido en carbono y propiedades de los aceros	
A1.5. Diagramas de transformación	
A1.6. Templabilidad de los aceros	
A1.7. Clasificación de los aceros	C0. 9
Bibliografía Anexo 1	

ANEXO 2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

A2. Introducción al tratamiento térmico	
A2.1. Tratamientos térmicos superficiales: comparación y criterios de selección	
A2.1.1. Solicitaciones de las piezas mecánicas	
A2.1.2. Características requeridas para responder a las solicitudes mecánicas	
A2.1.3. Criterios de selección del tratamiento superficial	
A2.2. Procedimientos de endurecimiento superficial de los aceros	
A2.3. Tratamientos térmicos localizados: procesos termoquímicos	
A2.3.1. Mecanismos de difusión en los metales	
A2.3.2. Leyes fundamentales de la difusión	

Bibliografía Anexo 2

ANEXO 3. TRATAMIENTO DE CEMENTACIÓN

A3. Introducción a la cementación	
A3.1. Fuentes de carbono en la cementación gaseosa	
A3.2. Atmósferas para cementación gaseosa	
A3.2.1. Gases y vapores principales en la atmósfera del horno	
A3.2.2. Reacciones de los gases en la atmósfera del horno	
A3.2.3. Cálculo de la composición de equilibrio de la atmósfera	
A3.2.4. Disociación del metanol utilizado en tratamiento térmico	
A3.3. Clasificación de las atmósferas para hornos	
A3.3.1. Atmósferas de generación	
A3.3.2. Atmósferas sintética basadas en nitrógeno	
A3.3.3. Ventajas de los sistemas de atmósfera sintética basada en nitrógeno	

Bibliografía Anexo 3

ANEXO 4. TECNOLOGIA DE CEMENTACIÓN EN BAJA PRESIÓN Y TEMPLE EN GAS

A4.1. Descripción de la tecnología de cementación en baja presión

 A4.1.1. Procedimiento de cementación en baja presión

 A4.1.2. Reacciones de descomposición de los gases

 A4.1.3. Parámetros del proceso de cementación

C0. 10

A4.2. Temple en gas

 A4.2.1. Gases de temple

 A4.2.2. Modelos de enfriamiento con aceites y gases

 A4.2.3. Equipamiento de temple en gas

 A4.2.4. Control de la distorsión durante el temple en gas

Bibliografía Anexo 4

ANEXO 5. DESCRIPCIÓN DE UNA INSTALACIÓN TIPO ICBP (ECM)

A5. Instalación de tratamiento térmico tipo ICBP-H600TG/TH (ECM)

A5.1. Descripción del horno de tratamiento térmico

 A5.1.1. Células de alta temperatura

 A5.1.2. Transportador interno

 A5.1.3. Módulo de temple en aceite

 A5.1.4. Módulo de temple en gas

 A5.1.5. Módulos complementarios

 A5.1.6. Gases de proceso

Bibliografía Anexo 5

ANEXO 6. RESULTADOS ENSAYOS TUS

A6. Resultados del TUS para las células de la ICBP

 A6.1. Resultados TUS para célula 2

 A6.2. Resultados TUS para célula 3

 A6.3. Resultados TUS para célula 4

 A6.4. Resultados TUS para célula 5

 A6.5. Resultados TUS para célula 6

Capítulo 1

Ejercicio de optimización
de la configuración de una
carga de tratamiento
térmico

Contenido capítulo 1

1.	Introducción.....	5
1.1.	Metodología para la validación y optimización de la carga de tt	6
1.2.	Introducción al sistema de inyección common rail de Delphi.....	8
1.3.	Definición del Cabezal hidráulico	15
1.3.1.	Definición del material	17
1.3.2.	Tratamiento térmico del cabezal hidráulico	22
1.3.3.	Configuración de la carga en el tratamiento térmico	28
1.4.	Validación de la célula de cementación: homogeneidad térmica (TUS)	31
1.4.1.	Método de análisis de homogeneidad térmica	34
1.4.2.	Resultados TUS de las células	35
1.5.	Incremento de la cantidad de piezas por carga.....	40
1.5.1.	Curvas de temperatura: carga de 10 niveles	45
1.5.2.	Curvas de temperatura: carga de 11 niveles	48
1.5.3.	Curvas de temperatura: carga de 6 niveles	50
1.5.4.	Evaluación de resultados metalográficos	51
	Bibliografía.....	64

1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto clave y fundamental en la industria y por supuesto en los procesos de tratamiento térmico, cualquiera que sea el sector al que vaya destinado el componente tratado, pero particularmente relevante en sectores como la automoción o la aeronáutica, es la calidad del producto suministrado, la cual está en buena medida asociada también a la calidad del proceso de tratamiento que se le ha aplicado.

La elección de los materiales, las especificaciones, la elección de los procesos y las variables que en ellos intervienen forman parte del dossier que configura la operación de tratamiento térmico, al mismo tiempo que el control de las piezas y los procesos.

Con objeto de dar una respuesta óptima a los requerimientos de calidad es necesario llevar a cabo todos los estudios necesarios con el fin de cualificar y optimizar los procesos que participan.

Uno de los parámetros de mayor relevancia del proceso de tratamiento térmico es la temperatura: los estudios que se detallarán en los apartados siguientes persiguen determinar y establecer el grado de dispersión de la temperatura en el proceso de tratamiento térmico, tanto en el recinto del horno en el que éste se lleva a cabo, como en los componentes que configuran la carga, todo ello para la instalación en cuestión y en condiciones de trabajo reales.

Cabe considerar que las variaciones en la temperatura del proceso respecto a los valores teóricos o de consigna, es en la práctica una de las variables del proceso que introduce variabilidad en las características metalográficas resultantes de los componentes. En consecuencia, tanto la propia instalación, como las condiciones que definen el proceso de tratamiento deben ajustarse para asegurar que la dispersión y variabilidad se reduzca en la medida de lo posible.

Los ejercicios se han estructurado de acuerdo a la siguiente estructura:

- Termografía para la caracterización y validación de la instalación.
- Monitorización de la temperatura de las piezas utilizando diversas configuraciones de carga.
- Validación metalográfica de los componentes.

Los resultados obtenidos en estos ensayos prácticos se expondrán en los apartados siguientes, si bien previamente se efectuará una breve introducción al sistema mecánico en el que es ensamblada la pieza que se ha considerado en el estudio, y que en este caso constituye la actual generación de bombas de inyección de combustible de los motores diesel.

1.1. METODOLOGÍA PARA LA VALIDACIÓN Y OPTIMIZACION DE LA CARGA DE TT

Los ensayos o ejercicios prácticos para la validación de la carga se han estructurado de acuerdo al siguiente esquema:

- **Análisis de homogeneidad de la temperatura en la célula de tratamiento:**

En una primera etapa se determina la dispersión de temperaturas de la cámara del horno en vacío, sin piezas.

Los resultados que se obtienen en este ensayo, permiten por una parte identificar discrepancias en la lectura de temperatura de los termopares instalados en la célula respecto a la lectura de un termopar patrón o de referencia, calibrado en un dispositivo de nivel superior y por tanto con incertidumbre de lectura conocida.

Cada célula de la instalación está equipada con un regulador de temperatura digital que permite introducir un offset en las lecturas de los termopares: la determinación del valor de este eventual offset o corrección se determinará a partir del ejercicio anterior.

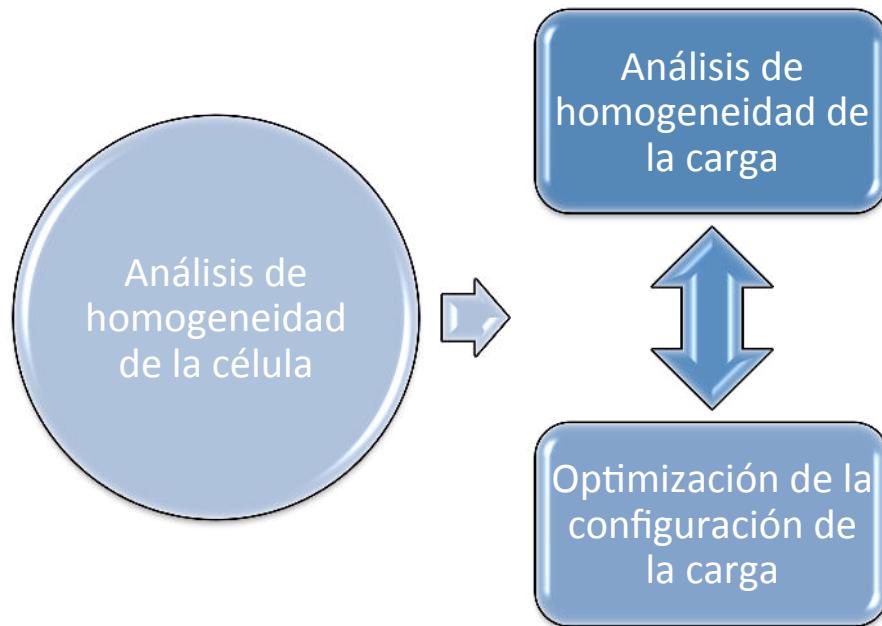
Por otra parte, el ensayo también persigue poner de manifiesto el grado de homogeneidad de la temperatura de la célula que posteriormente alojará la carga de piezas. La instalación considera una única lectura de temperatura a través de un sensor que está ubicado en uno de los laterales de la sección inferior de la célula: a partir de esta señal, el sistema regula de forma automática la potencia de calefacción de las barras de grafito dispuestas en el interior del recinto en forma de anillo y que envuelven la carga.

Debe por tanto conocerse cual es el grado de homogeneidad de temperaturas en todo el volumen efectivo de la célula.

- **Análisis de dispersión de temperaturas resultante en piezas:**

Con las piezas ubicadas en los útiles y bandejas establecidas en el método de carga, se aplicarán ciclos de calentamiento conformes al proceso de cementación definido. Durante el procedimiento, se mapeará la temperatura de diversas piezas, ubicadas en posiciones seleccionadas de la carga.

Este ejercicio se repetirá con diferentes composiciones de carga, con el objetivo de determinar la configuración que ofrece resultados óptimos.



C1. 7

Todos los ejercicios se llevarán a cabo en la instalación de tratamiento térmico ICBP y con piezas y los útiles de montaje reales. Los ciclos de temperatura que se aplicarán también se corresponden con las condiciones de tratamiento térmico de referencia.

Para la monitorización y registro de las temperaturas se utilizará el dispositivo electrónico PTM1020 del fabricante Datapaq, así como el software específico del fabricante: este dispositivo permite conectar y registrar de forma continua la señal de hasta 20 termopares. La electrónica dispone de una batería interna que permite su operación sin alimentación externa. Dado que el dispositivo electrónico debe introducirse dentro del horno para monitorizar los ciclos térmicos, dispone de un cofre o barrera térmica que lo aísla y protege de las elevadas temperaturas evitando que se dañe la electrónica.

Desde un punto de normalización, cabe hacer referencia a la especificación internacional AMS 2750, publicada inicialmente en 1980 y sometida posteriormente a diversas revisiones: esta norma hace referencia a los requerimientos pirométricos que aplican a los equipamientos empleados en el ámbito de los tratamientos térmicos.

1.2. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON RAIL DE DELPHI

C1. 8

El componente que se ha considerado en este trabajo forma parte del sistema de inyección de acumulador *common rail*, tecnología utilizada en la inyección de combustible de las motorizaciones Diesel de vehículos.

Las prescripciones cada vez más estrictas sobre emisiones de gases de escape y de ruidos, así como la consecución de unos niveles de consumo cada vez más bajos acompañados de mayores prestaciones mecánicas, plantean nuevas exigencias a la tecnología de inyección de los motores Diesel.

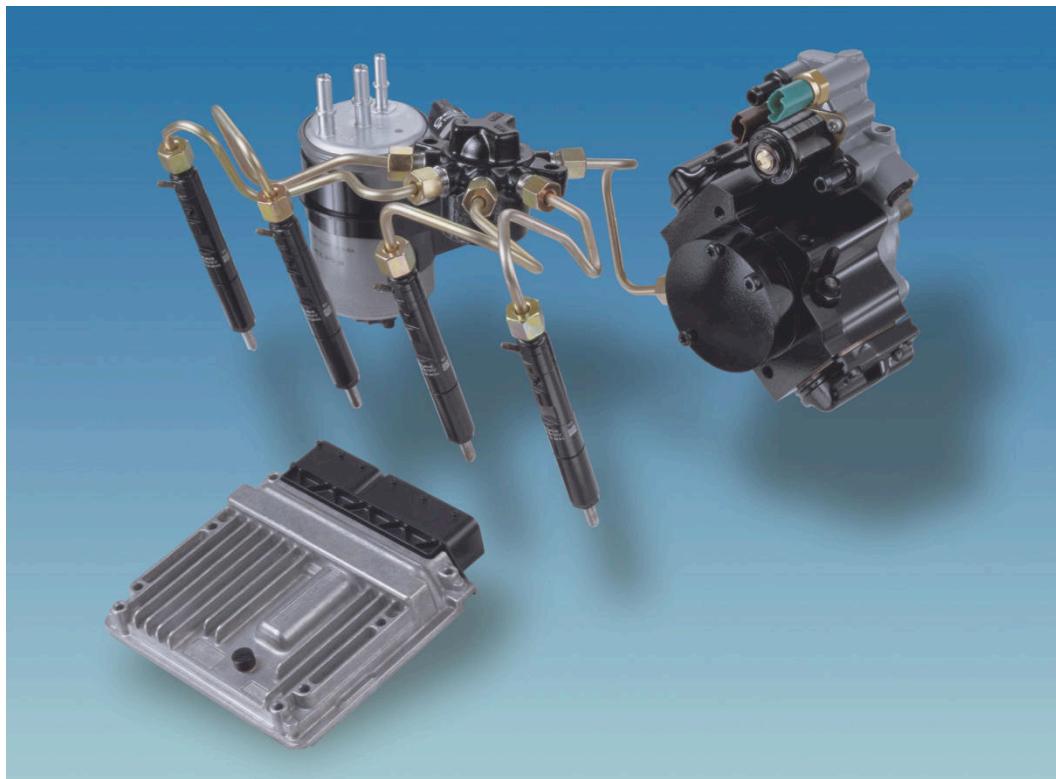
Esencialmente, para conseguir una adecuada preparación de la mezcla, el sistema de inyección inyecta el combustible según el procedimiento de combustión Diesel, con una presión de entre 350 y 2000 bar, debiendo al mismo tiempo dosificar el caudal de inyección con la máxima precisión posible. La regulación depende fundamentalmente de la carga y del régimen de giro del motor, y se realiza a través del caudal de combustible.

Mientras que para motores Diesel convencionales de vehículos industriales, locomotoras y barcos todavía se emplean en preferencia sistemas de inyección regulados mecánicamente, en los turismos, y también ya en vehículos industriales, las regulaciones mecánicas para los sistemas de inyección Diesel han sido sustituidas por la regulación electrónica.

El estado actual de la técnica para los motores Diesel de vehículos motorizados permite que se empleen principalmente sistemas de inyección de alta presión de inyección directa.

El sistema de inyección de acumulador de conducto común, denominado *common rail*, realiza por separado la generación de presión y la inyección. En este sistema una bomba suministra gasóleo a muy alta presión a un conducto común o acumulador del que derivan todos los inyectores. En el momento preciso una centralita electrónica gestionará la apertura de los inyectores que están equipados de electroválvulas o con dispositivos piezoelectrónicos en las más recientes generaciones, suministrando el combustible a los cilindros.

Esta tecnología es en cierta medida similar a la utilizada en los motores de inyección de gasolina, pero adaptada a las características de los motores Diesel de inyección directa, y con la diferencia de que la presión en el conducto común o acumulador es mucho mayor en los motores Diesel que en los motores gasolina.



C1. 9

Figura 1- 1: Sistema de gestión de inyección Delphi tipo **common rail DFP3.** (Delphi)

Los objetivos principales de desarrollo que han dado lugar a los sistemas de inyección Diesel *common rail* son:

- Reducción del ruido
- Reducción de las emisiones contaminantes
- Reducción en el consumo de combustible
- Incremento en la prestaciones

El ruido de la combustión es el resultado del rápido aumento de la presión en el cilindro: la ignición violenta de la mezcla aire/combustible provoca este aumento de presión. El incremento de presión en el cilindro en el momento en el que tiene lugar la ignición del combustible es la causa de que haya más o menos ruido de combustión, dependiendo de la cantidad de combustible inyectada. En el motor Diesel la combustión no se inicia inmediatamente a la inyección del combustible en el cilindro: es necesario por una parte la vaporización del combustible, y por otra la formación de compuestos químicos inestables. Cuanto mayor es el retraso entre la inyección y la ignición, mayor es la cantidad de combustible inyectada en el cilindro, y como resultado de esta mayor cantidad de combustible disponible, más violenta es la ignición y mayor el incremento de presión resultante. Por tanto, se hace necesario reducir el tiempo de ignición para reducir el ruido de combustión resultante. Esta reducción en el tiempo de demora se consigue incrementando la temperatura y la presión en el cilindro, y los

métodos más habituales para conseguir esto son mediante el precalentamiento del combustible y efectuando pequeñas inyecciones de combustible en el cilindro previas al momento de la combustión.

Respecto a la reducción de emisiones contaminantes, las normativas europeas de control de emisiones inciden especialmente en los siguientes agentes contaminantes:

- Óxidos de nitrógeno
- Monóxido de carbono
- Partículas
- Hidrocarburos no quemados

C1. 10

Las sucesivas revisiones de las regulaciones relativas a las emisiones de los motores de los vehículos requieren progresivas reducciones en los niveles de emisiones de las especies arriba indicadas. La tabla siguiente resume los valores límite (expresados en g/km) para cada contaminante requeridos en las distintas revisiones que se han establecido para los vehículos de transporte ligeros:

Norma	Año	NOx	CO	HC+NOx	PM
Euro 3	2000	0,50	0,64	0,56	0,05
Euro 4	2005	0,25	0,50	0,30	0,025
Euro 5	2009	0,18	0,50	0,23	0,005
Euro 6	2014	0,08	0,50	0,17	0,005

Los óxidos de nitrógeno se producen a partir de la oxidación del nitrógeno con el aire, si bien esta reacción sólo ocurre a muy altas temperaturas ($>1800^{\circ}\text{C}$) y cuando existe un considerable exceso de aire.

Con objeto de limitar las emisiones de NOx, se han introducido dispositivos de recirculación de emisiones gaseosas (EGR), reutilizando una fracción controlada de los gases emitidos en los procesos de combustión. La cantidad de gases recirculada debe controlarse adecuadamente, puesto que en caso de que sea insuficiente, la eficiencia del sistema es inadecuada, y se recircula en exceso se genera exceso de humos y hollín, provocando inestabilidad en el motor.

Adicionalmente, se han implementado catalizadores para tratar las emisiones y reducir las emisiones de NOx, produciendo nitrógeno y oxígeno. El combustible diésel puede actuar como catalizador de esta reacción de reducción, por lo que pequeñas cantidad de diésel son inyectadas en el cilindro, justo antes de que la válvula de emisión se abra. Este procedimiento para reducir la emisión de NOx mediante catalizadores DENOX es también conocido como post-inyección.

En referencia a las partículas sólidas de hollín y humos, estos se producen bien cuando la mezcla es demasiado rica en combustible, provocando una combustión parcial, bien cuando la vaporización del combustible es incompleta. Cuando mayor es el tamaño de las partículas de combustible injectadas en el cilindro, mayor es el tiempo requerido para su vaporación completa. Cuando este tiempo es demasiado largo, la parte central de la partícula no podrá vaporizarse, y dado que la temperatura de la cámara de combustión es muy alta, las moléculas de combustible no vaporizadas iniciarán un proceso de cracking. Este proceso físico da lugar a compuestos de carbono sólidos y otras partículas sólidas características de los motores diésel.

Los hidrocarburos no quemados se generan cuando no localmente no hay suficiente oxígeno (distribución del combustible inadecuada) o cuando el combustible es injectado en secciones frías de la cámara de combustión (generalmente en las áreas de las paredes del cilindro en las que el incide la inyección de combustible).

Esto se soluciona en parte mediante el adecuado diseño toroide de la geometría de las cámaras de combustión, combinado con los actuales sistemas de admisión y con la inyección directa: se generan elevados niveles de turbulencia en el cilindro, lo que asegura una adecuada distribución en la cámara de combustión. Adicionalmente, cámaras de combustión compactas también facilitan que no existan zonas frías, previniendo la formación de partículas no quemadas.

Respecto al monóxido de carbono, su presencia en los gases de escape indica oxidación incompleta del carbono procedente del combustible. Esta oxidación incompleta es consecuencia de la combustión de una mezcla demasiado rica, y se corrige incrementando la relación de aire. Un diseño optimizado de la aerodinámica interna de la cámara de combustión también favorece un mayor grado de turbulencias, lo que contribuye a reducir en mayor medida la concentración de CO en los gases emitidos.

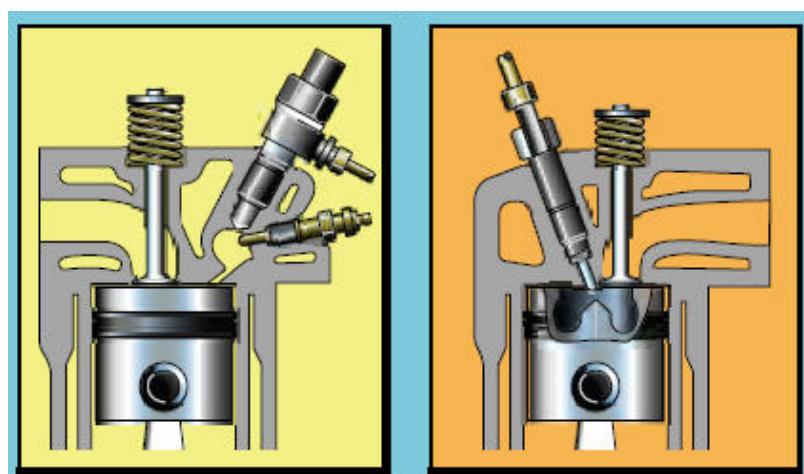


Figura 1- 2: Diferencia entre inyección indirecta –izquierda- e inyección directa –derecha-. (Delphi)

La mayor eficiencia en el consumo de combustible se consigue también a partir de un mayor control de la combustión. Esto se lleva a cabo modificando el coeficiente de aire (coeficiente λ), los caudales de inyección, controlando el adelanto y la presión de la inyección en relación a los requerimientos del motor en todo el rango de utilización.

En comparación con los sistemas de inyección de generaciones anteriores, el sistema *common rail* junto con la gestión electrónica proporcionan mayor flexibilidad de operación, permiten un preciso ajuste del caudal, del tiempo de inyección, cantidad de combustible injectado y mayor rango y control de presión de inyección, ajustado a los requerimientos del motor en todas las condiciones de operación.

C1. 12

Otro aspecto significativo es el incremento en las prestaciones mecánicas que resultan de la gestión y condiciones en las que se efectúa la inyección de combustible: el aumento del par motor a bajas revoluciones requiere de la inyección de mayor cantidad de combustible al más bajo régimen de giro del motor. La cantidad de combustible injectado es proporcional a la duración de la inyección y a la presión. Por tanto, la presión de inyección debe aumentarse para incrementar el caudal de combustible entregado, teniendo en cuenta que el tiempo disponible para inyectar el combustible en el cilindro está limitado.

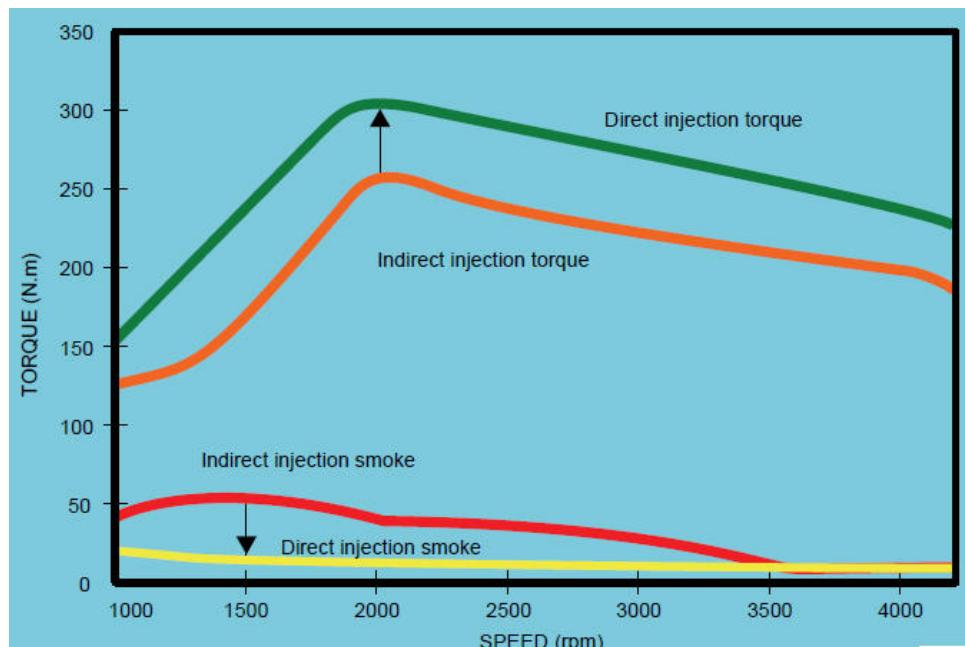


Figura 1- 3: Evolución en las prestaciones mecánicas para las diferentes tecnologías de inyección diesel. (Delphi)

El sistema de gestión de inyección *common rail* está compuesto por los siguientes elementos o módulos funcionales:

- Bomba de transferencia volumétrica (en opción): conjunto integrado en el cuerpo de la bomba de alta presión.
- Bomba de alta presión: recibe el combustible a la presión de transferencia (4 a 6 bar) y lo envía al rail a muy alta presión (1800-2000 bar).
- Rail: actúa como acumulador de combustible a alta presión.
- Inyectores: pueden estar gestionados por solenoides o por elemento piezoelectricos. Pulverizan la cantidad necesaria de combustible directamente en la cámara de los inyectores y en el momento preciso.
- DCU (Diesel Control Unit): gestiona electrónicamente las condiciones de inyección y la presión en el rail en función de las condiciones de operación del motor. También controla otras funciones asociadas del vehículo.
- Diversos sensores que proporcionan información en tiempo real necesaria para controlar el proceso de inyección.

C1. 13

1	IMV	6	Venturi
2	Sensor de temperatura del combustible	7	Válvula HP
3	Bomba de alta presión tipo DFP3	8	Rail común
4	Sensor de presión de rail	9	Filtro de combustible
5	Inyector		

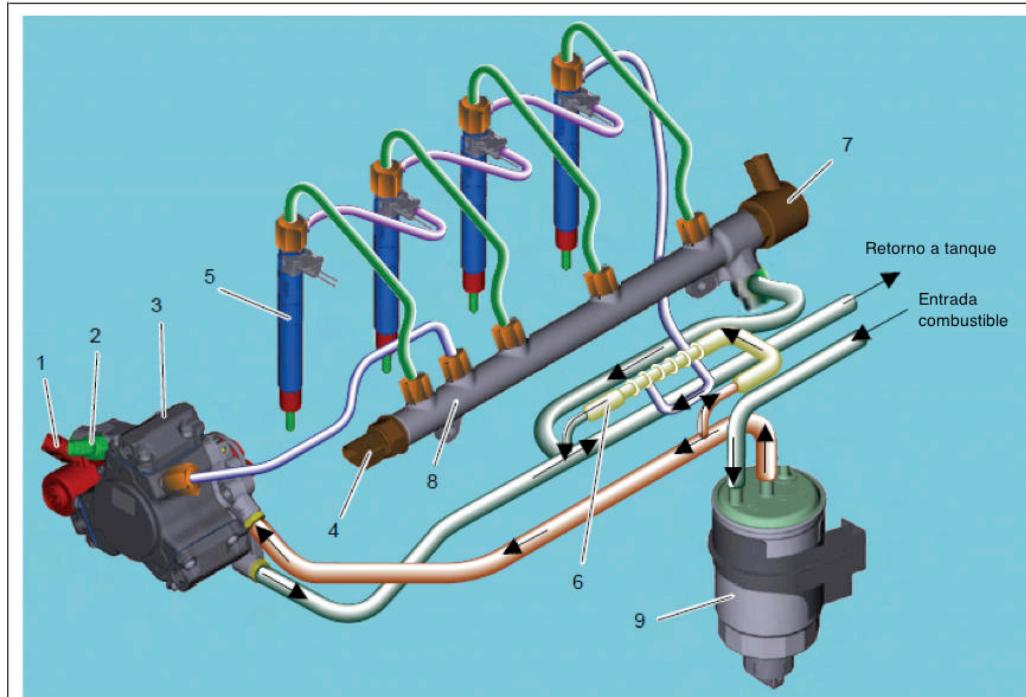


Figura 1- 4: Esquema con los elementos principales del sistema de inyección CR. (Delphi)

La generación de sistema common rail que se considera en este trabajo implementa la tecnología de bomba de alta presión de tipo DFP3 desarrollada por Delphi: el modo de funcionamiento de esta bomba está basado en la rotación de una leva excéntrica solidaria con el arbol de arrastre de la bomba, que a su vez es conducido por la correa o cadena del motor. La transmisión del par de giro del motor le llega a la bomba a través del eje y es transmitido a la leva excéntrica. El movimiento de rotación de la excéntrica provoca la translación de dos o tres pistones situados a 180° ó 120° respectivamente (en función del modelo), comprimiendo de esta forma el combustible que previamente se ha introducido en la cámara de los cabezales hidráulicos y generando así la alta presión.

El combustible es impulsado desde el exterior de la bomba a presión de transferencia y llega al conjunto cabezal hidráulico a través de orificios mecanizados en el cuerpo de la válvula de admisión. La presión de transferencia hace levantar el vástago de la válvula de admisión, permitiendo su circulación hasta la cámara conformada en el cabezal hidráulico.

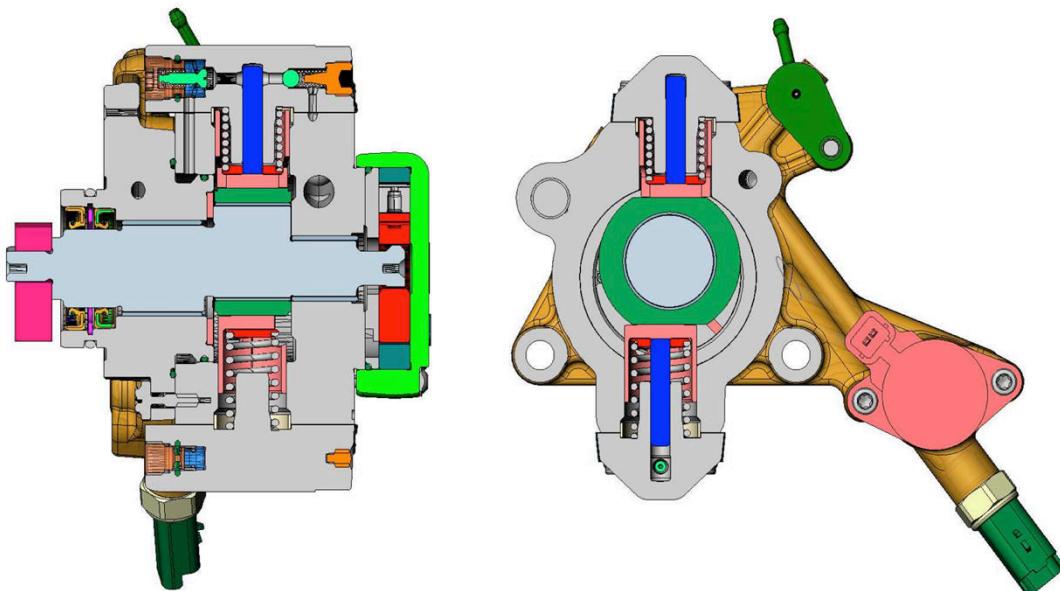


Figura 1- 5: Esquema que muestra en sección un modelo de bomba de inyección directa tipo DFP3. (Delphi)

El movimiento de la excéntrica del eje de transmisión provoca la translación del émbolo en su alojamiento en el cabezal hidráulico, lo que provoca la compresión volumétrica del combustible contenido en la cámara, incrementando la presión hasta niveles de 2000 bar. El combustible comprimido se desplaza a través de la válvula de descarga y se transfiere al conector de salida HP de la bomba, que está conectado con el rail del sistema de inyección.

El volumen de combustible inyectado en cada revolución del motor oscila entre 0,5 y 1,05 cm³.

La apertura y cierre de las válvulas del cabezal hidráulico están en dependencia del movimiento de translación de los émbolos o pistones:

- Durante la etapa de expansión, el descenso del émbolo genera una depresión en la cámara que provoca la apertura de la válvula de admisión y el correspondiente llenado de la cámara del cabezal hidráulico con el combustible. Durante esta fase, la válvula de descarga permanece cerrada por que se mantiene presurizada por la presión del rail.
- En la etapa de compresión, la válvula de admisión se cierra como consecuencia del aumento de presión en la cámara del cabezal hidráulico. La válvula de descarga se abre cuando la presión en la cámara del cabezal es mayor que la presión en el rail.

C1. 15

El proceso de llenado y vaciado de la cámara del cabezal es cíclico y está en relación a las revoluciones del motor. Por tanto, las tensiones mecánicas a las que está sometido este componente son significativas y cíclicas: el rango de fluctuación de presión que experimenta la cámara en cada ciclo puede llegar a oscilar entre 0 y más de 2000 bar, con una frecuencia que en relación a las revoluciones de giro del motor mantiene una relación de entre $\frac{1}{2}$ y 1.

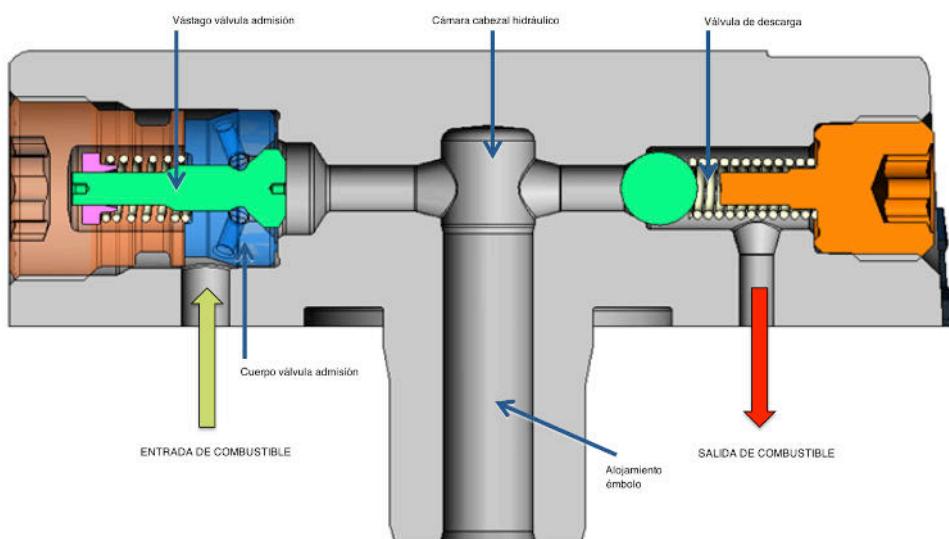
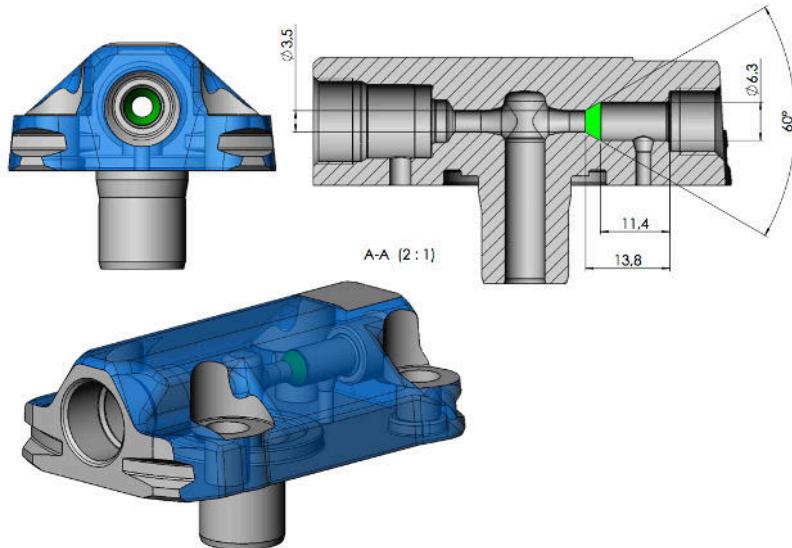


Figura 1- 6: Esquema de la sección del conjunto cabezal hidráulico. (Delphi)

1.3. DEFINICIÓN DEL CABEZAL HIDRÁULICO

El cabezal hidráulico es por consiguiente, uno de los componentes del sistema que están sometidos a mayor solicitud de fatiga mecánica. Por ello, todos los aspectos metalográficos del acero, su tratamiento térmico, así como la configuración geométrica y la calidad de los acabados superficiales

en todo el circuito interno del cabezal son todos ellos factores de gran importancia en la robustez funcional de la pieza en condiciones de servicio.



C1. 16

Figura 1- 7: Modelo CAD del cabezal hidráulico DFP3. (Delphi Diesel Systems, SL)

El siguiente esquema muestra el modelo de elementos finitos en el que se pueden observar la distribución de solicitudes mecánicas en cada sección del cabezal y los sectores en los que estas son más elevadas:

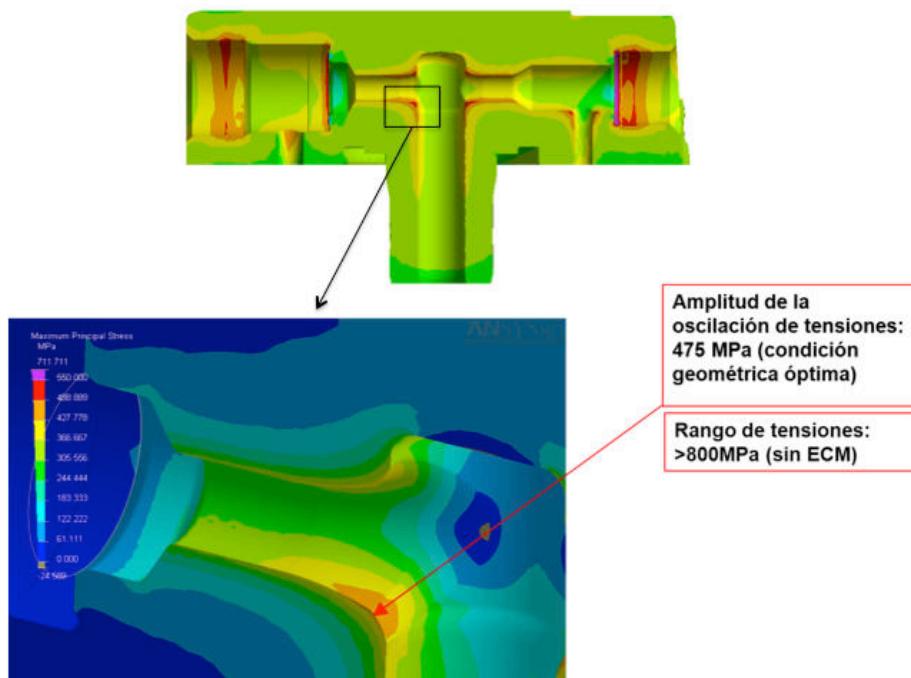


Figura 1- 8: Modelo de FEA que muestra las secciones de mayor solicitud mecánica en el circuito del cabezal hidráulico. (Delphi Diesel Systems, SL)

1.3.1. DEFINICIÓN DEL MATERIAL

El material de construcción definido para el cabezal hidráulico corresponde a un acero de cementación, aleado con cromo y manganeso. La especificación de la composición química del acero corresponde al EN10084:2008 20MnCr5 (1.7149), si bien Delphi define ciertas restricciones y requerimientos adicionales en relación a la especificación genérica del acero.

Los valores de composición química (%) del acero se muestran en la siguiente tabla:

	Carbono	Manganeso	Silicio	Cromo	Fósforo	Azufre	Calcio
Mínimo	0,17	1,20	-	1,10	-	0,010	-
Máximo	0,22	1,40	0,40	1,30	0,025	0,020	0,0015

El contenido en azufre se ha reducido respecto al grado del acero con objeto de limitar la posibilidad de que existan inclusiones de MnS retenidas en el acero que puedan provocar un efecto negativo en el comportamiento a fatiga del componente en servicio.

Los requerimientos relativos a contenido y tamaño de inclusiones no metálicas en el acero se establecen de acuerdo a la siguiente tabla, cuyos índices están referidos a la norma AFNOR NF A04-106:

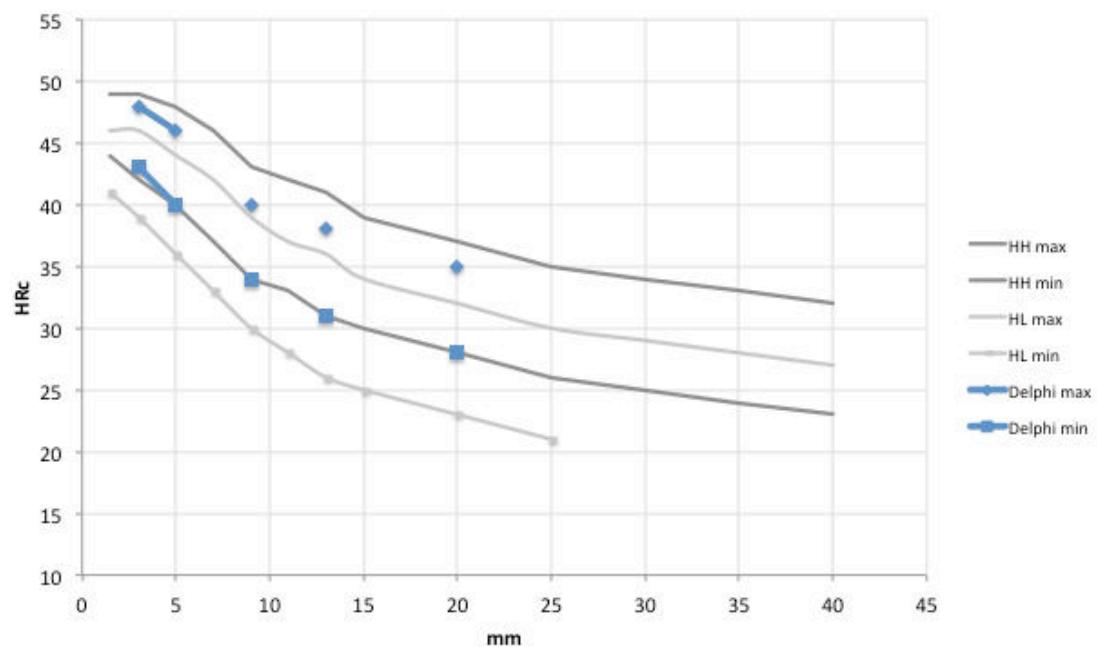
	Tipo A -Sulfuros-	Tipo B - Aluminatos-	Tipo C -Silicatos-	Tipo D -Óxidos-
Serie fina	2,5	1,5	0,5	1,0
Serie gruesa	1,0	1,0	0,5	0,5

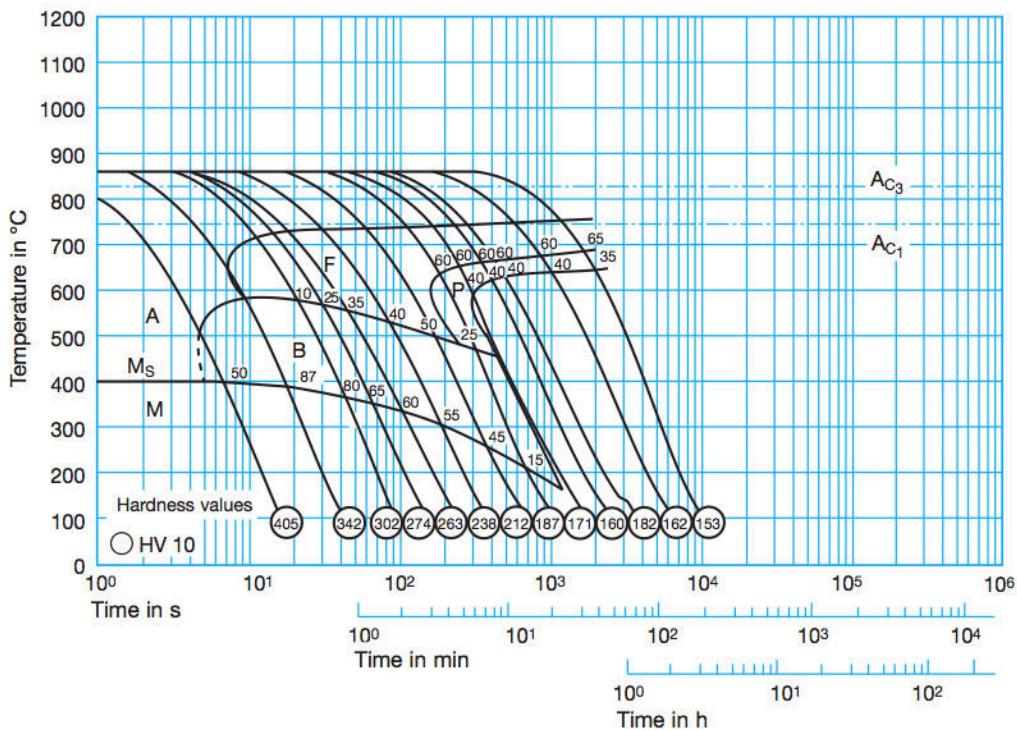
El material de partida se suministra desde la acería, utilizando chatarra como materia prima que se funde en hornos de arco eléctrico. La solidificación del metal fundido, después de las operaciones correspondientes a la metalurgia secundaria, se efectúa según procedimiento de colada continua produciendo palanquillas de sección rectangular (185x185 mm). Estas palanquillas son deformadas en caliente en trenes de laminación para obtener como subproducto barras de sección redonda (billets) y diámetro entre 40 y 45 mm que son torneadas para eliminar residuos y defectos superficiales.

El tamaño de grano austenítico del acero en este estado debe ser de índice 6 o superior, de acuerdo al método ASTM expresado en la norma EN ISO 643.

Respecto a las curvas de templabilidad del acero, obtenidas mediante test Jominy de acuerdo a la normal EN ISO642, Delphi establece criterios de especificación restringidos respecto a lo determinado para este grado de acero. En la siguiente tabla se presentan el rango de templabilidad demandado por Delphi para este material:

mm/HRC	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	C1. 18
HH max	49	49	48	46	43	42	41	39	37	35	34	33	32	
HH min	44	42	40	37	34	33	31	30	28	26	25	24	23	
H max	49	49	48	46	43	42	41	39	37	35	34	33	32	
H min	41	39	36	33	30	28	26	25	23	21	-	-	-	
HL max	46	46	44	42	39	37	36	34	32	30	29	28	27	
HL min	41	39	36	33	30	28	26	25	23	21	-	-	-	
Delphi max	-	48	46	-	40	-	38	-	35	-	-	-	-	
Delphi min	-	43	40	-	34	-	31	-	28	-	-	-	-	





C1. 19

Figura 1- 9: Curvas de transformación por enfriamiento continuo correspondiente al acero 20MnCr55.

Recomendaciones relativas a las condiciones genéricas de tratamiento térmico para este acero:

Tipo de tratamiento	Temperatura recomendada	Enfriamiento
Cementación superficial	880-980°C	Aceite (160-250°C)
Temple directo	880-980°C	Aceite (160-250°C)
Endurecimiento de núcleo	860-900°C	Aceite (160-250°C)
Endurecimiento superficial	780-820°C	Aceite (160-250°C)
Revenido (des tensionado)	150-200°C	Aire
Forja o laminación en caliente	850-1150°C	Aire
Normalizado	840-870°C	Aire
Recocido de ablandamiento	650-700°C	Horno

Las barras procedentes de acería son cortadas y sometidas a un proceso de forja en caliente para conseguir un primer conformado de la pieza así como mejorar las características mecánicas del material: el calentamiento de los billetes cortados se efectúa en un horno de inducción que calienta el material hasta una temperatura en el rango de 1220°C a 1280°C. La operación de forja se efectúa en una prensa

vertical de 1600 Tn en dos etapas. El enfriamiento del producto prensado se efectúa al aire, de forma controlada en el conveyor de descarga.

Una operación de tratamiento térmico posterior a la forja es aplicada a las piezas estampadas: el proceso aplicado consiste en un procedimiento de temple que persigue conseguir una microestructura bainítica-martensítica, con la que optimizar el comportamiento del material durante las operaciones de mecanizado y conformado por arranque de viruta que se le aplicarán con posterioridad a los componentes.

C1. 20

El gráfico siguiente presenta las aspectos básicos del proceso de tratamiento térmico posterior a la forja aplicado a las piezas: esencialmente se trata de un proceso de austenización completa, seguido de un temple en aceite; posteriormente se aplica un proceso de revenido a temperatura sub-crítica para eliminar las tensiones del temple y homogeneizar la estructura.

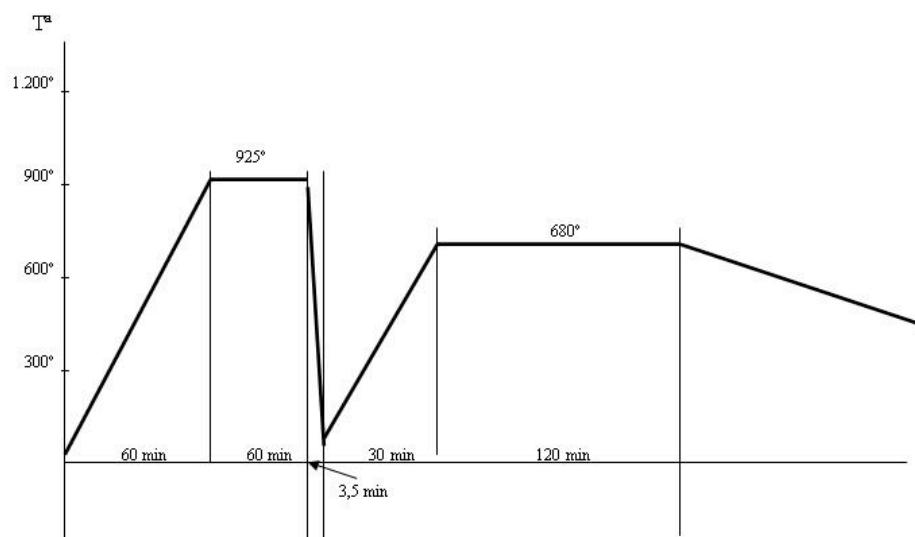
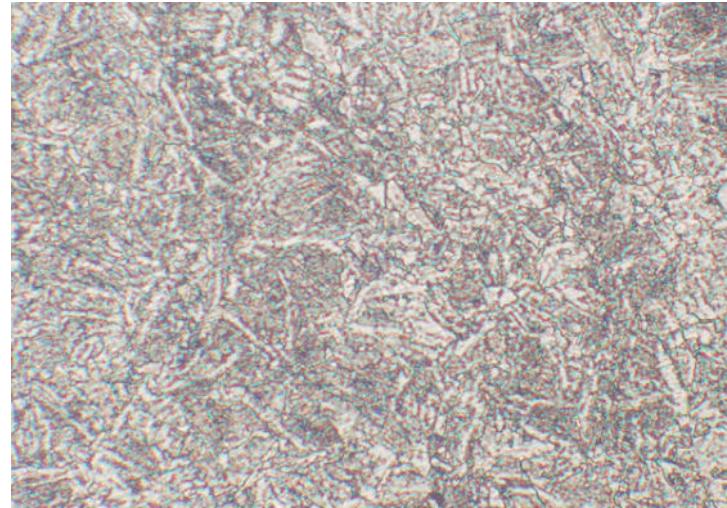


Figura 1- 10: Esquema del proceso de TT post-forja. (Delphi Diesel Systems, SL)

La figura anterior presenta la microestructura típica del componente forjado: consiste en una mezcla de martensitas y bainitas, junto con una fracción menor de ferrita libre. La banda de dureza resultante se sitúa entre 170 y 230HB en la sección del núcleo de la pieza, mientras que en superficie ésta es inferior a 290 HV30.



C1. 21

Figura 1- 11: Microestructura del acero posterior al TT post-forja (500x). (Delphi Diesel Systems, SL)

Finalmente, y previo a los controles de calidad de producto, las piezas reciben un proceso de tratamiento superficial consistente en un granallado con bola de acero, que pretende fundamentalmente limpiar la superficie de rebabas, residuos, óxidos y escorias procedentes de las etapas previas y que puedan incidir negativamente en las posteriores operaciones de procesado.



Figura 1- 12: Dirección de fibra del acero obtenida con el proceso de forja.

(Delphi Diesel Systems, SL)

1.3.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DEL CABEZAL HIDRÁULICO

El cabezal hidráulico es un componente que está sometido a unas determinadas operaciones de mecanizado por arranque de viruta y conformado por mecanizado electroquímico, previas a la etapa de tratamiento térmico. Posteriormente, se le aplican operaciones de rectificado y procesos de mecanizado abrasivo (*honing*), así como pulido electroquímico de la cámara de alta presión y del taladro de salida de alta presión.

La operación de tratamiento térmico, consistente en un proceso de cementación en horno de baja presión con temple en gas, y un revenido posterior a baja temperatura, es una etapa del proceso de fabricación fundamental para conseguir la resistencia y robustez mecánica que garantice la funcionalidad y durabilidad del componente en servicio.

Los principales requerimientos resultantes del tratamiento térmico que se han establecido para esta pieza se resumen en la siguiente tabla:

Requerimiento de especificación

Profundidad de capa (@550HV0.5)	0,35 a 0,75 mm en fase de TT 0,20 a 0,75 mm para los conductos HP
Dureza superficial	700 a 800 HV5 en fase de TT >600 HV5 en superficies mecanizadas después de TT
Dureza en el núcleo del componente	270 a 350 HV10
Microestructuras	Martensitas revenidas en la capa cementada. Contenido en austenita residual inferior al 20%. Bandas de bainitas y perlitas en la capa no son aceptadas. Ausencia de oxidación intergranular en superficie, carburos metálicos visibles a 500x. Ausencia de descarburación superficial o ferrita libre en superficie. En la sección del núcleo se aceptan contenidos de hasta el 20% de ferrita acicular. El tamaño de grano austenítico debe ser homogéneo y con un índice de tamaño 8 o superior (de acuerdo a la norma EN ISO643 -método ASTM E112-).

Los aspectos relevantes del procedimiento de tratamiento térmico son los siguientes:

- Endurecimiento superficial por cementación y temple
- Tecnología de cementación en baja presión
- Medio de cementación: acetileno puro
- Procedimiento de tratamiento térmico con *reheating*
- Temple con nitrógeno gas a alta presión (5 bar)
- Revenido de eliminación de tensiones

La tecnología de cementación en hornos de baja presión y temple en gas, descrita en el capítulo anterior, se ha implementado en los procesos de TT en Delphi por diversos motivos, pero desde un punto de vista de impacto en el comportamiento a fatiga, debido a que evita la presencia de oxidación intergranular en la superficie de los componentes tratados.

El procedimiento de *reheating*, a diferencia del temple directo más habitual, consiste en un enfriamiento lento de las piezas después de las etapas de cementación y difusión hasta una temperatura inferior a la temperatura crítica Ac_1 del acero, con lo que se el acero adquiere una microestructura perlítica en la capa cementada y mixta ferrita-perlita en el núcleo. Inmediatamente se vuelve a calentar la carga hasta una temperatura intermedia entre Ac_1 y Ac_3 , más baja que la temperatura de austenización utilizada en la fase de cementación. Después de homogeneizar la temperatura de la carga, ésta es enviada a temple en gas.

Este procedimiento de tratamiento térmico tiene como efecto un refinamiento del grano austenítico, y como consecuencia, la microestructura de la capa cementada resultante del temple consiste en una martensita fina con una morfología en forma de placas, en contraposición a la martensita más gruesa y en forma de agujas resultante del proceso de temple directo.

Estudios realizados indican también que el refinamiento del grano austenítico comporta una disminución sustancial en la densidad de microfisuras (dificilmente visibles en microscopio óptico) propiciadas por las agujas de martensita y que se desarrollan en las martensitas con altos contenidos en carbono. La presencia de estas microfisuras es significativamente menor en las martensitas más refinadas y en forma de placas que se generan a partir de una austenita de grano más fino. (G.K.Krauss, Principles of Heat Treatment of Steel, 1980)

También se apunta como consecuencia del reheating un efecto sobre los carburos metálicos que se generan cuando el contenido en carbono en la superficie es suficientemente elevado: cuando la temperatura de reheating se sitúa por debajo de la temperatura crítica Ac_m (temperatura que define la frontera entre la región de la fase austenítica y la región de las fases austenita y cementita), esto provoca la esferificación de los carburos que quedan retenidos en la matriz de la austenita de la capa cementada. Como resultado, el contenido en carbono de la austenita se reduce, la temperatura M_s

aumenta, y la microestructura resultante del temple contiene menos austenita retenida. Adicionalmente, las partículas de carburos inhiben el crecimiento del grano y preservan un tamaño de grano austenítico fino. (G.K.Krauss)

Estos refinamientos microestructurales tienen un efecto directo en el comportamiento a fatiga del material: los componentes tratados con procedimiento de reheating muestran un límite de fatiga superior que los sometidos a procedimientos de temple directo, siendo este el motivo por el que se ha implementado este procedimiento en el proceso de tratamiento térmico del cabezal hidráulico de la bomba de inyección.

La definición de la fase de cementación del tratamiento térmico se lleva a cabo en base a los parámetros del tipo de acero utilizado del cabezal hidráulico y parámetros de proceso como temperatura, flujo de carbono y profundidad de capa cementada:

Temperatura de cementación	925°C
Acero, carbono inicial	0,16%
Acero, carbono en saturación	1,4%
Acero, carbono final difusión intermedia	0,96%
Acero, carbono final	0,57%
Flujo de carbono durante la cementación	11,6 mg/h·cm ²
Profundidad de capa teórica (>0,36%C)	0,40 mm
Caudal de hidrocarburo	2500 l/h
Caudal de nitrógeno	1800 l/h

Estos parámetros determinan un ciclo de cementación que establece 6 etapas o impulsos de acetileno que resulta en el siguiente diagrama de pulsos. El cálculo del diagrama de pulsos se efectúa mediante un software específico desarrollado por el fabricante de la instalación, ECM Technologies.

Pulso	Duración	Tiempo difusión intermedia	Tiempo para difusión final	Profundidad capa resultante, mm
1	164	100	400	0,18
2	56	140	688	0,24
3	51	178	1026	0,29
4	48	215	1406	0,33
5	47	253	1836	0,38
6	46	292	2316	0,42

C1. 25

Inicio de pulsos de acetileno: 120 minutos desde inicio calentamiento.

Duración de la etapa de cementación: 1h5'6"

(los tiempos tabulados están expresados en segundos)

Por tanto, la etapa de cementación y difusión alcanza las profundidades de capa requeridas en apenas 1h y 5 minutos para una temperatura austenitización de 925°C.

El perfil de temperaturas de consigna establecidas en la receta del proceso de tratamiento térmico, incluidas las etapas de calentamiento inicial y reheating posterior al enfriamiento intermedio y anterior al temple:

Etapa	Temperatura	Tiempo
Calentamiento	Desde ambiente hasta 925°C	80 min
Estabilización	925°C	40 min
Cementación y difusión	925°C	65 min
Enfriamiento subcrítico	Desde 925°C hasta 640°C	60 min
Estabilización	640°C	50 min
Calentamiento	Desde 640°C hasta 850°C	10 min
Estabilización	850°C	55 min
Tiempo de ciclo total		6 horas



C1. 26

Figura 1- 13: Ejemplo de curvas del proceso de cementación para una carga de cabezales hidráulicos.

La fase de enfriamiento intermedio, previa a la austenización final, se efectúa dentro de la propia cámara de cementación, con lo que la velocidad de enfriamiento de la carga es lenta.

El proceso de temple en gas, posterior a la austenización, se efectúa con gas nitrógeno:

Presión	Tiempo	Agitación turbinas
5 bar	10 min	100%

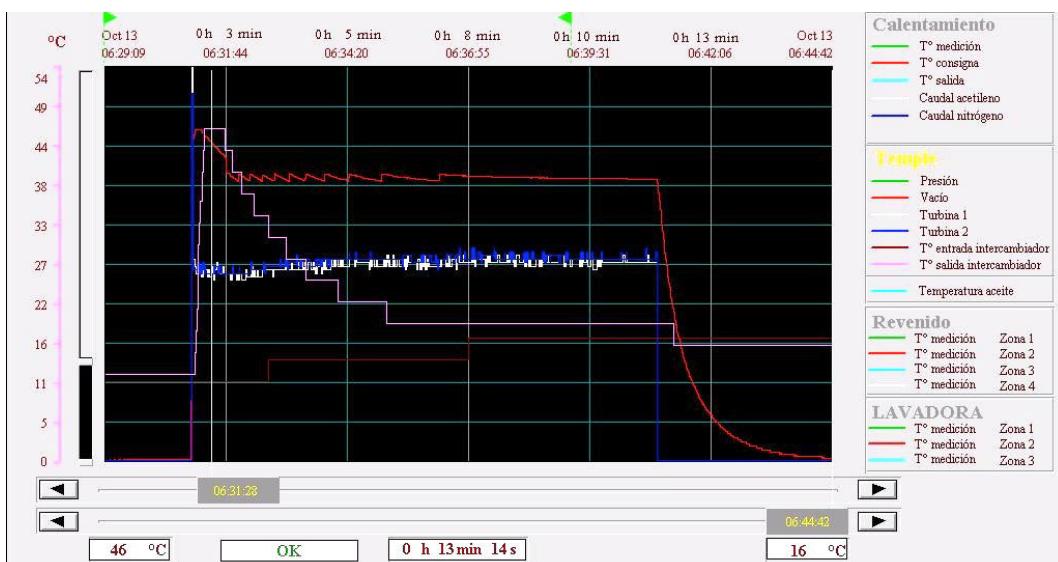


Figura 1- 14: Gráfico de proceso correspondiente a la etapa de temple en gas. (Delphi Diesel Systems, SL)

La siguiente y última etapa del proceso de tratamiento térmico corresponde a la fase de revenido:

Temperatura	Tiempo ciclo total
170°C	3 horas

C1. 27



Figura 1- 15: Gráfico de proceso: monitorización de la temperatura en la etapa de revenido.

(Delphi Diesel Systems, SL)

Este revenido se efectúa en un horno continuo de cinta, el cual tiene definidas siete etapas o pasos de aproximadamente 26 minutos cada una. Consiste en un revenido a baja temperatura, cuya objetivo es eliminar tensiones del temple en la microestructura.

1.3.3. CONFIGURACIÓN DE LA CARGA EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO

La carga de tratamiento térmico comprende tanto las piezas como los útiles y soportes necesarios para soportarlas. Cabe recordar que existen ciertas limitaciones que impone el diseño de la instalación, las cuales son:

- masa máxima de la carga: 500 kg brutos,
- dimensiones exteriores máximas del paralelepípedo definido por la carga: 500 mm de ancho por 660 mm de alto y 960 mm de profundidad.

En la base de la carga se dispone una parrilla o soporte cuya función consiste en dar estabilidad y consistencia a la carga. Este elemento de la carga está construido por fundición y el material empleado es una aleación refractaria de níquel, cromo y aluminio denominada Mancellium® definida por SAFE Cronite, propietaria del diseño.

Encima de la parrilla base se apilan los utilajes que soportan las piezas, específicamente diseñados. Estos utilajes de tratamiento térmico están construidos con una superaleación (AFE Cronite HR4) de níquel, hierro y cromo principalmente, conteniendo también cantidades menores de silicio, manganeso, carbono y tungsteno. Sobre este soporte se colocan las piezas, dispuestas sobre utilajes o bandejas en posición horizontal, de forma que el resalte cuyo diámetro aloja al émbolo queda orientado hacia la parte inferior: las siguientes fotografías ilustran la disposición de las piezas y el ensamblaje de las bandejas para constituir la carga de tratamiento térmico.

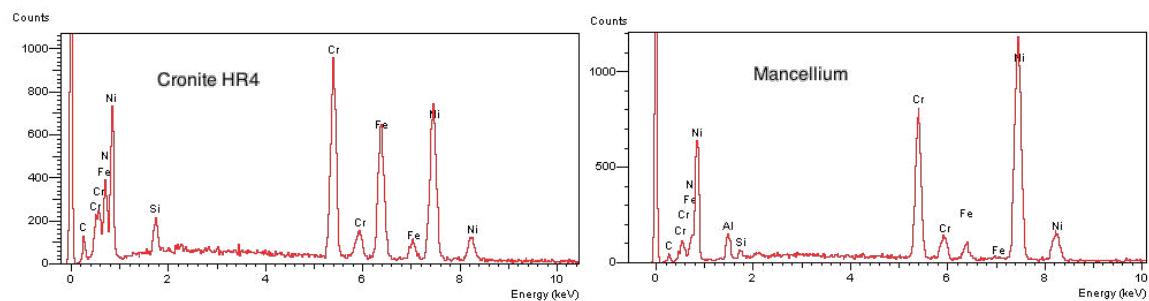


Figura 1- 16: Espectros EDS correspondientes a los materiales de construcción de los utilajes de tratamiento térmico. (Delphi Diesel Systems, SL)

AFE HR 4	0,5% C	18% Cr	52% Ni	1% Mn	1,5% Si
Mancellium	0,1% C	17% Cr	75% Ni	0,5% Mn	0,4% Si 5% Al

(SAFE Cronite)

Cada bandeja admite un total de 18 piezas, y se disponen 4 bandejas en cada piso o nivel de piezas. Estas bandejas son apilables, y la dimensiones y carga máxima del horno admiten hasta 11 pisos de piezas sin que existan interferencias físicas o de peso con los elementos de la instalación.

Las piezas se disponen en las bandejas de forma asimétrica, de forma que cuando se apilan las cargas con múltiples pisos, las piezas no están alineadas en columna, sino alternadas, para optimizar la eficiencia del temple en gas.

C1. 29



Figura 1- 17: Disposición de las piezas en la carga. (Delphi Diesel Systems, SL)

Por tanto, las cargas se conforman de forma que se pueden disponer de hasta 72 piezas/piso. Considerando que físicamente pueden apilarse un máximo de 11 pisos por carga sin que exista interferencia en altura (<660 mm) o en masa, la cantidad límite de piezas es de 792 piezas/carga.

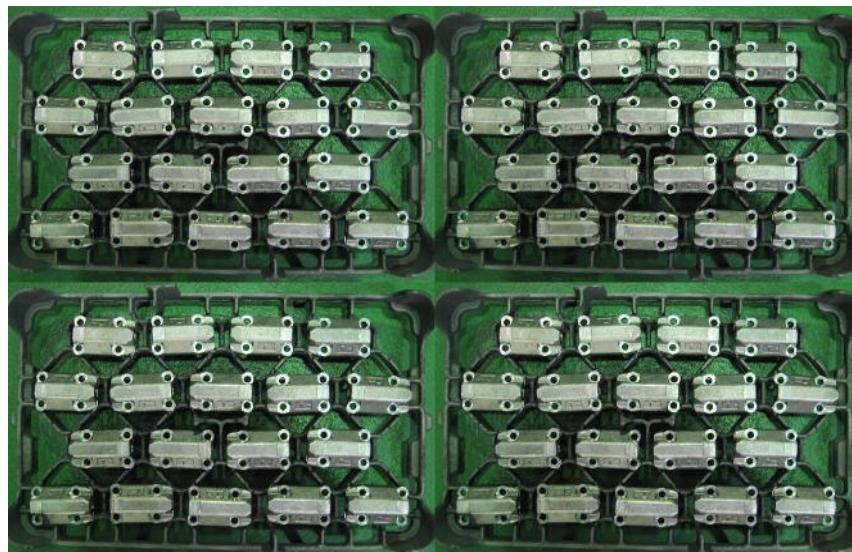


Figura 1- 18: Disposición de las piezas en las bandejas. 4 bandejas constituyen 1 piso. (Delphi Diesel Systems, SL)

Tabla resumen de pesos brutos resultantes para las cargas en función del número de pisos que la configuren:

Pisos	Base		Bandejas		Piezas			Peso Total
	Unidades	Peso kg	Unidades	Peso kg	Unidades	Peso kg	Superficie m2	
5	1	30	20	78,0	360	106,9	4,48	215
6	1	30	24	93,6	432	128,3	5,37	252
7	1	30	28	109,2	504	149,7	6,27	289
8	1	30	32	124,8	576	171,1	7,16	326
9	1	30	36	140,4	648	192,5	8,06	363
10	1	30	40	156,0	720	213,8	8,95	400
11	1	30	44	171,6	792	235,2	9,85	437

1.4. VALIDACIÓN DE LA CÉLULA DE CEMENTACIÓN: HOMOGENEIDAD TÉRMICA (TUS)

C1. 31

Esta etapa constituye una parte del proceso de validación de la instalación de tratamiento térmico: efectivamente, el fabricante de la máquina diseña y concibe la célula de alta temperatura de acuerdo a los requerimientos de las normativas internacionales relativas al sector de los tratamientos térmicos, y posteriormente, durante la construcción y antes de entregar el equipo al cliente final, éste efectúa en la planta de fabricación ensayos que verifican la correcta condición de la célula.

No obstante, esta certificación debe repetirse después de la implementación de la instalación en el cliente final. Y también de forma periódica o después de una eventual intervención o modificación a lo largo de la vida útil de la máquina, para de este modo asegurar su correcto estado, o de lo contrario poder efectuar actuaciones y correcciones sobre el equipo.

El ejercicio que se va a detallar es referido en nomenclatura internacional como TUS (*temperature uniformity survey*): el objetivo consiste en cualificar la zona de trabajo de la célula en el rango de temperatura de la operación de tratamiento térmico. El instrumento que se va a utilizar en este ejercicio consiste esencialmente en un dispositivo que registra y almacena las lecturas de temperatura que le envían hasta 10 termopares.

Este instrumento (Datapaq) consta de tres elementos funcionales:

- Unidad electrónica PTM1020 (*data logger*)
- Barrera térmica TS02 con acumulador de calor.
- Sensores de temperatura (termopares tipo N)



Figura 1- 19: Dispositivo data logger PTM1020. (Datapaq Ltd., 2013)

La unidad electrónica no puede exponerse a las elevadas temperaturas de la cámara de tratamiento térmico, para ello, el dispositivo se introduce dentro de un cofre especialmente concebido que actúa como barrera térmica, manteniendo la electrónica en una temperatura segura.

Esencialmente, la barrera térmica consiste en un receptáculo metálico que contiene un material aislante microporoso. El diseño de este cofre está determinado por factores como la temperatura máxima que debe soportar, la duración o tiempo de exposición en el horno, la atmósfera y condiciones ambientales del horno y restricciones dimensionales fundamentalmente.

C1.32

Adicionalmente, el registrador se protege introduciéndose en un elemento físico adicional conocido como acumulador de calor: esta caja metálica contiene un material que cambia de estado sólido a líquido a una temperatura específica (generalmente 58°C), absorbiendo calor a esa temperatura. Esto ayuda a que el registrador permanezca en su rango de temperatura segura durante mayor tiempo.

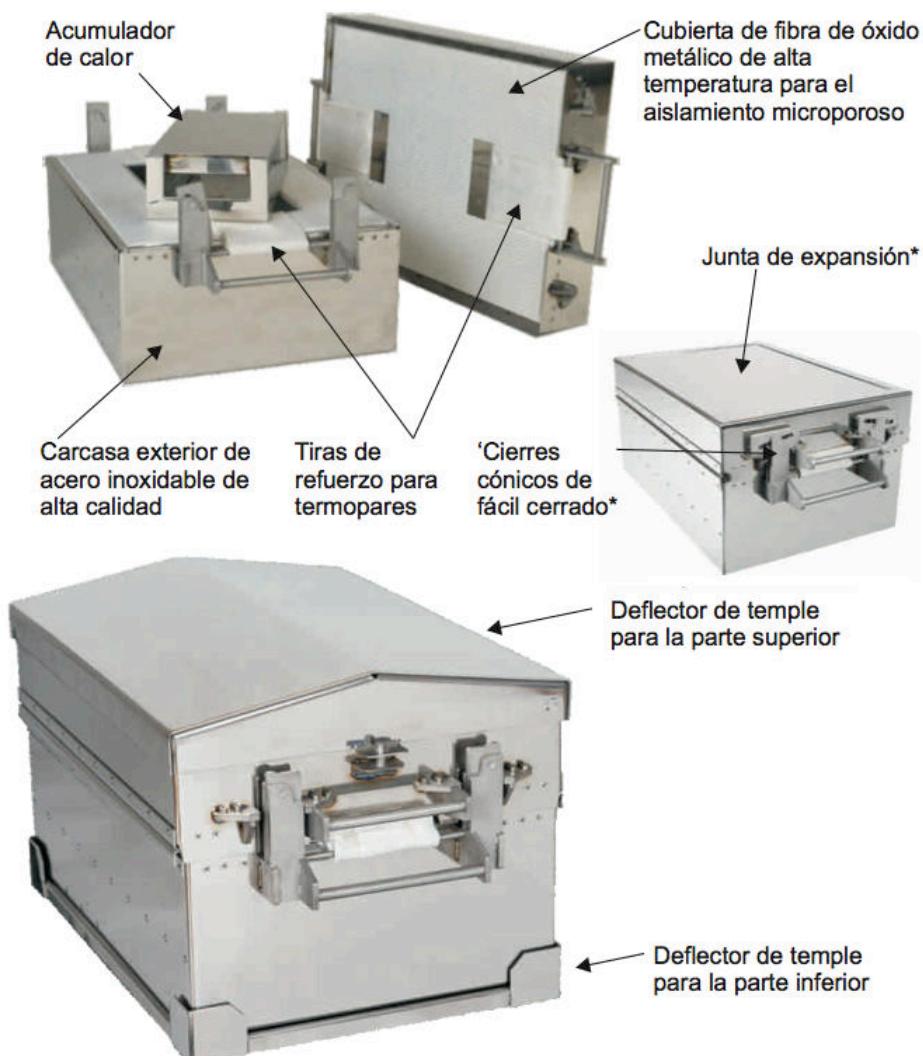


Figura 1- 20: Imagen de las barreras térmicas que protegen al registrador. (Datapaq Ltd., 2013)

El conjunto de termopares utilizados para el ejercicio han sido calibrados previamente en un laboratorio externo acreditado por la entidad certificadora ENAC: esta calibración permite establecer el error y la incertidumbre en las lecturas de temperatura que se asigna a cada termopar de forma individual.

Para el ejercicio efectuado se ha construido un paralelepípedo cuyo volumen es aproximadamente el mismo que ocupa una carga de piezas de tratamiento térmico. Se han dispuesto 10 sondas de temperatura en 10 puntos seleccionados en conformidad con el requerimiento de la norma SAE AMS-2750E: uno sonda en cada una de las esquinas y dos sondas en la sección plana superior, de acuerdo al siguiente esquema:

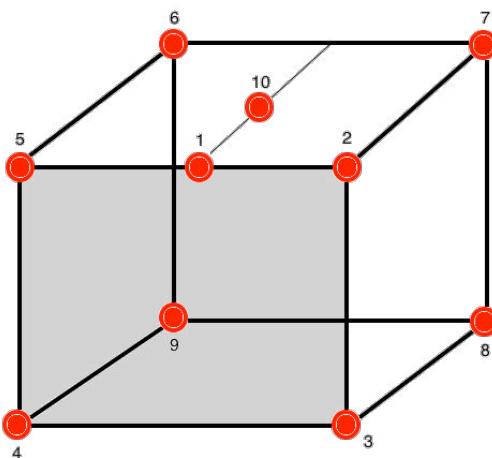


Figura 1- 21: Posición de los termopares en el TUS. La cara sombreada es la que está orientada hacia la puerta de la cámara.



Figura 1- 22: Imagen del montaje TUS, incluyendo en el centro el registrador de temperaturas con la barrera térmica. (Delphi Diesel Systems, SL)

Dado que el tiempo durante el que la barrera térmica puede estar expuesto a altas temperaturas es limitado, los ensayos TUS se han efectuado aplicando un proceso de tratamiento o receta específico, exento de pulsos de acetileno y cuyos detalles se indican a continuación, consistente en

C1. 34

Rampa (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	650	1
28	940	60

El proceso aplicado define una rampa de calentamiento hasta desde temperatura ambiente hasta 940°C en 30 minutos, seguida de una etapa de 60 minutos a temperatura constante. Concluida esta etapa de temperatura constante finaliza la recogida de datos, y el registrador bien se deja enfriar dentro de la célula, bien se envía a temple en gas.

1.4.1. MÉTODO DE ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD TÉRMICA

Para el análisis, se consideran únicamente las lecturas de temperatura del intervalo entre 1h y 1h30min, con un intervalo de registro de 2 segundos. La primera hora se considera destinada al calentamiento de todo el dispositivo y estabilización de la temperatura de la célula y de los artefactos introducidos en su interior.

El análisis de temperaturas correspondiente a ese intervalo se lleva a cabo de la siguiente forma:

- Análisis de homogeneidad durante el intervalo:
 - o Para cada posición monitorizada se establece el rango de los datos de temperaturas registradas, expresada como la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima en el intervalo de 30 minutos.
 - o La diferencia entre la temperatura máxima de las máximas y la mínima de las mínimas se considera que es el rango o amplitud térmica alcanzada en la célula durante el intervalo de 30 minutos.
 - o Este valor de máxima diferencia de temperaturas debe ser inferior a 10°C ($\pm 5^\circ\text{C}$).
- Análisis de dispersión instantánea:

- Para cada instante monitorizado, dentro del intervalo de 30 minutos considerado, se determina el rango en la dispersión de lecturas de las 10 sondas, identificándose la condiciones siguiente
 - Condición de máxima dispersión
 - Condición de mínima dispersión
 - Dispersión media.
 - No es ha establecido un criterio de valor límite específico para este análisis de homogeneidad.
- Error de exactitud:
- Permite determinar el valor del factor de corrección que se programará en el dispositivo regulador de la lectura de temperatura de la célula.
 - Para determinar el valor de este factor, se determina la media de las lecturas registradas durante los 30 minutos para cada termopar, y se calcula el offset existente entre este valor medio y la temperatura de consigna de 940°C. Ninguna posición debe presentar una desviación superior $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
 - El valor del factor de corrección que se aplicará en el regulador de la célula es la media de los desvíos en las 10 posiciones analizadas respecto a la temperatura de consigna.
 - Una vez introducido este factor de corrección, ninguno de los valores de desvío individuales corregidos debe ser mayor de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

C1. 35

1.4.2. RESULTADOS TUS DE LAS CÉLULAS

Todos los termopares utilizados en el ejercicio han sido previamente calibrados y certificados mediante un termopar patrón de rango superior en la cadena de trazabilidad de la calibración: en nuestro caso, la certificación ha sido efectuada por los laboratorios Applus+, para una temperatura de 940°C, la misma temperatura que la consigna del ensayo TUS.

Las desviaciones o errores de lectura observados para el conjunto de termopares se encuentran en el rango de -1,9 a -0,2°C. En consecuencia, los datos que se presentan a continuación ya incorporan estas correcciones en las lecturas.

En las tablas y gráficos siguientes se presentan en detalle los resultados observados para la célula de alta temperatura #1. En tanto que se trata de un ejercicio reiterativo, todos los datos detallados que corresponden a las células 2 a 6 se han agrupado en el Anexo 6 de esta memoria.

CÉLULA 1. REGISTROS DE TEMPERATURA Y ANALISIS DE RESULTADOS

Análisis de estabilidad y homogeneidad:

Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos: rango de lecturas

C1. 36

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	948,2	948,7	946	946,6	946,6	948,4	946,5	944,8	947,2	949,7
Máximo	949,6	950,7	948,5	949,5	949,4	950,9	948,9	947,4	948,9	950,8
Diferencia máxima de temperatura										
	6,1°C			Criterio: <10°C			Correcto			

Análisis de dispersión:

Monitorización de la dispersión instantánea de temperaturas en todo el paralelepípedo durante 30 minutos

Mínimo	2,8°C	Promedio	4,1°C	Máximo	5,4°C

Factor de corrección:

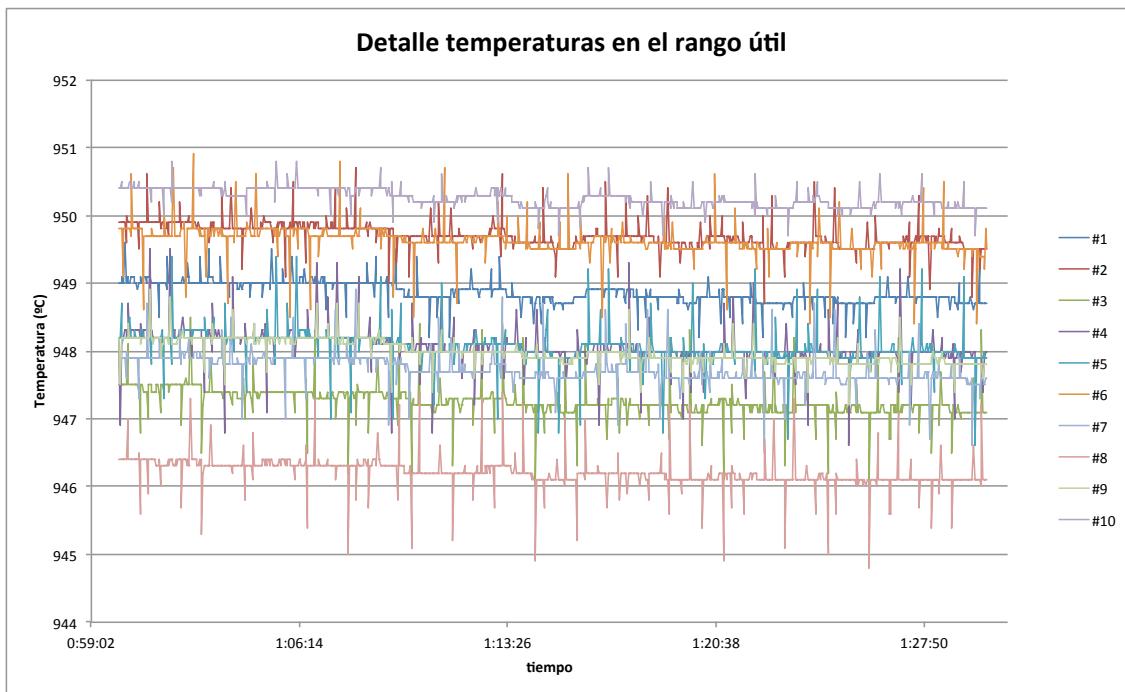
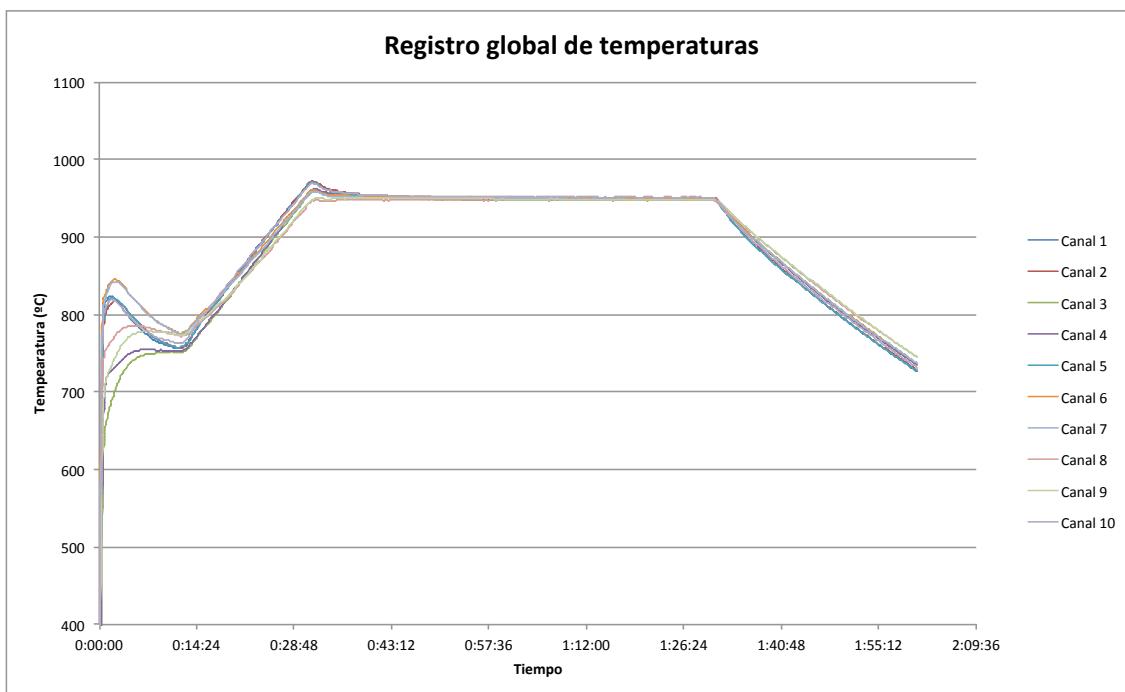
Desviación de la temperatura media observada en cada posición durante 30 minutos respecto a la temperatura de consigna

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio	948,9	949,7	947,3	948,1	948,1	949,6	947,7	946,2	948,0	950,3
Consigna	940	940	940	940	940	940	940	940	940	940
Desviación	8,9	9,7	7,3	8,1	8,1	9,6	7,7	6,2	8,0	10,3
Media desviación - factor corrección				+8,4°C			Criterio: <±5°C			Incorrecto

Valores corregidos

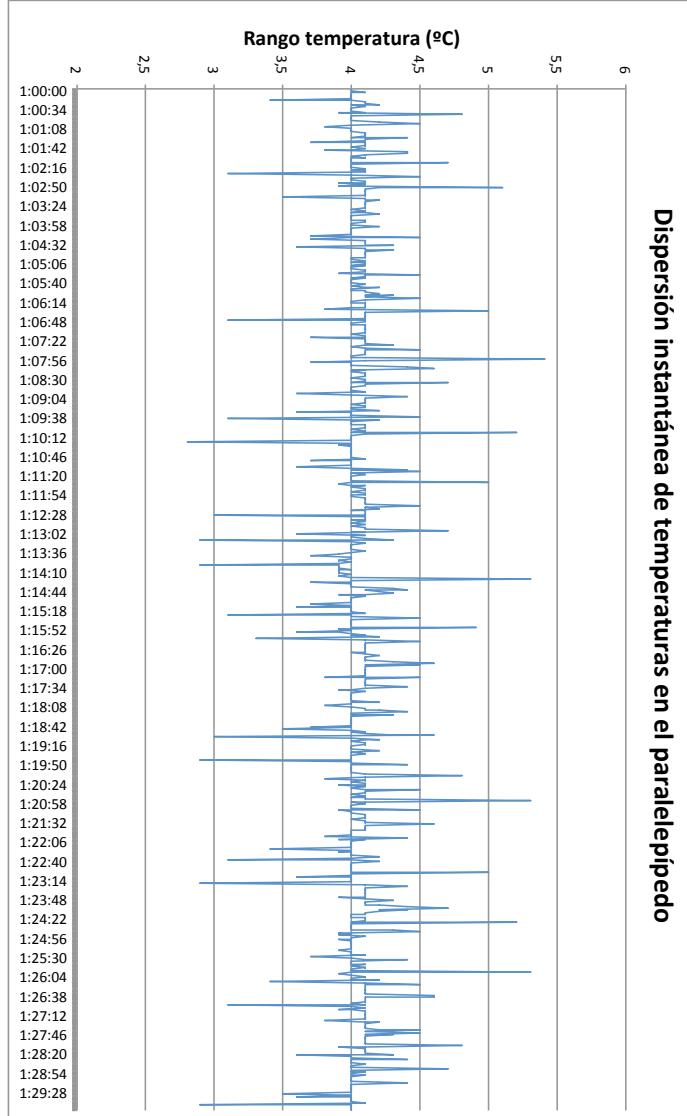
Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	939,8	940,3	937,6	938,2	938,2	940,0	938,1	936,4	938,8	941,3
Promedio	940,5	941,3	938,9	939,7	939,7	941,2	939,3	937,8	939,6	941,9
Máximo	941,2	942,3	940,1	941,1	941,0	942,5	940,5	939,0	940,5	942,4
Desvío 940°C	0,5	1,3	-1,1	-0,3	-0,3	1,2	-0,7	-2,2	-0,4	1,9

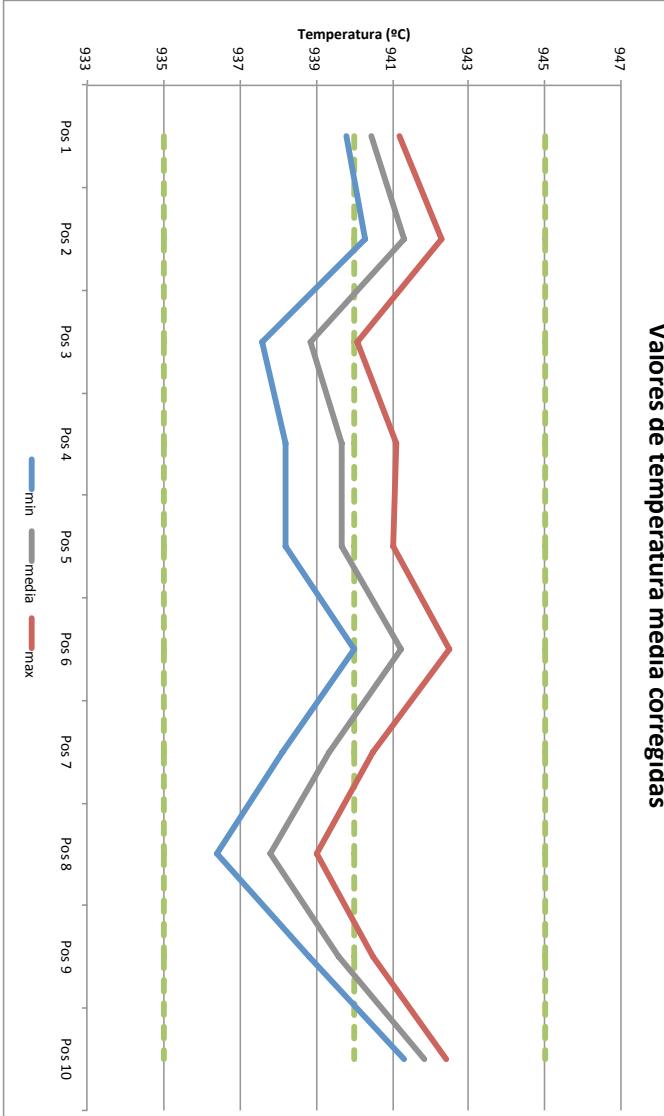


Dispersión instantánea de temperaturas en el paralelepípedo

C1. 38

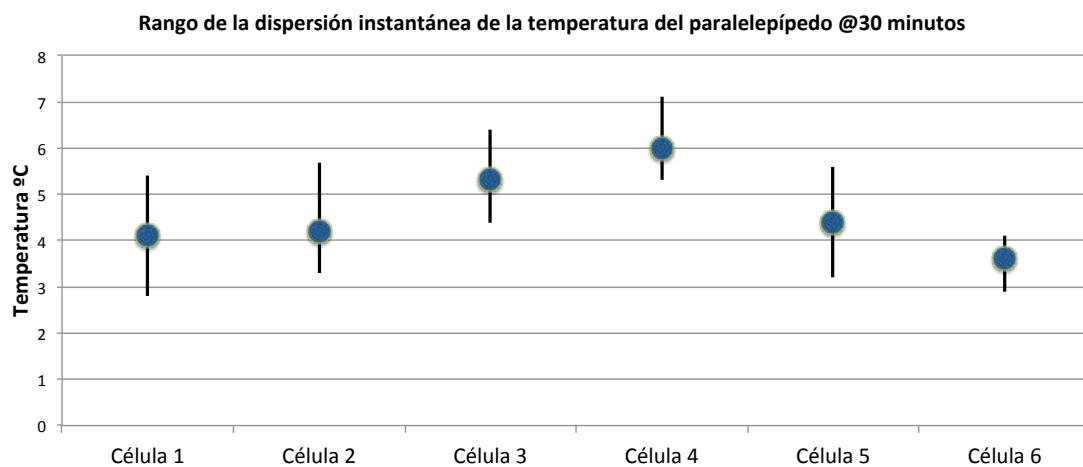


Valores de temperatura media corregidas

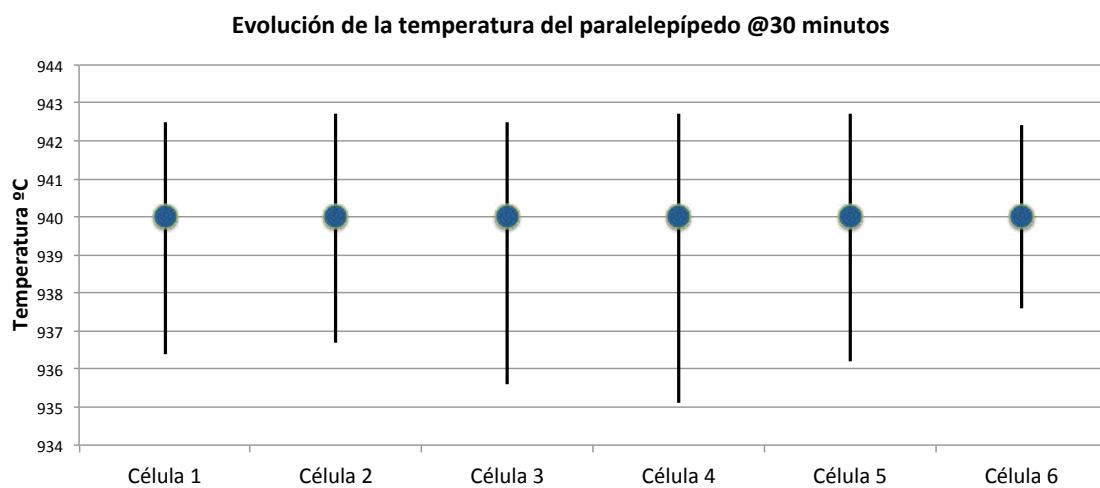


Como resumen a los resultados observados, cabe indicar que los errores o desviaciones en la exactitud de la temperatura de las células pueden ser compensados en parte introduciendo factores de corrección en la lectura del termopar que utiliza el sistema de regulación de cada célula. Sin embargo, los resultados de precisión o homogeneidad de temperatura en la cámara son difícilmente corregibles, en tanto que son inherentes al diseño y al estado actual de las células y sus elementos constructivos. En todo caso, las células deben monitorizarse periódicamente para identificar eventuales derivas o degradaciones propias del uso.

El gráfico siguiente resume el rango de dispersiones de la temperatura del paralelepípedo durante el periodo monitorizado de 30 minutos:



Por su parte, este otro gráfico presenta el rango de variación de la temperatura del paralelepípedo durante los 30 minutos, para una temperatura de consigna de 940°C (inferior a $\pm 5^\circ\text{C}$):



1.5. INCREMENTO DE LA CANTIDAD DE PIEZAS POR CARGA

En esta parte del ejercicio vamos a analizar los procesos de calentamiento y enfriamiento que experimentan las piezas que conforman la carga de tratamiento térmico, así como la homogeneidad térmica durante estos procesos.

Con objeto de ensayar configuraciones de carga con mayor cantidad de piezas, este estudio se efectuará aumentando la cantidad de pisos que conforman la carga (y por tanto la masa total de la misma).

Un factor que no se va a modificar en el estudio es la definición del ciclo de tratamiento, esto es, los parámetros de consigna de tiempos y temperaturas y el modo reheating o doble temple.

En referencia a la configuración de la carga, la disposición de las piezas en los niveles también es una constante, puesto que está determinada por el diseño actual de las bandejas: la variable estudiada es la cantidad de niveles que se apilan en la carga, y que determina la masa total que debe calentarse y enfriarse.

Este tipo de ensayos se efectúan generalmente de forma que el dispositivo registrador de temperatura se dispone junto con las piezas en la carga. El inconveniente en estos casos radica en que el espacio que requiere el cofre de aislamiento térmico merma significativamente la cantidad de piezas que puede incorporarse a la carga: en consecuencia la representatividad del ejercicio queda condicionada por la menor cantidad de piezas introducidas y por la masa del dispositivo introducido.

En este caso, los ensayos con el Datapaq se han efectuado intentando reproducir las condiciones reales de la carga de tratamiento térmico: para ello, el registrador se ha instalado en la parte exterior de la célula, encima de la cargadora interna de la instalación, y los cables de los termopares se han colocado a través de la puerta interna de la célula. De esta forma es posible trazar las temperaturas de las piezas seleccionadas manteniendo la arquitectura de la carga real.

Uno de los objetivos indiscutibles a la hora de definir la configuración del proceso de tratamiento térmico es introducir la mayor cantidad de piezas posibles en cada carga, con objeto de obtener el mayor rendimiento productivo en cada ciclo de tratamiento térmico efectuado. Aún así, el límite queda establecido finalmente por la configuración que asegura que todas las piezas producidas satisfacen los criterios de calidad que se les exigen y que están definidas en las especificaciones de producto.

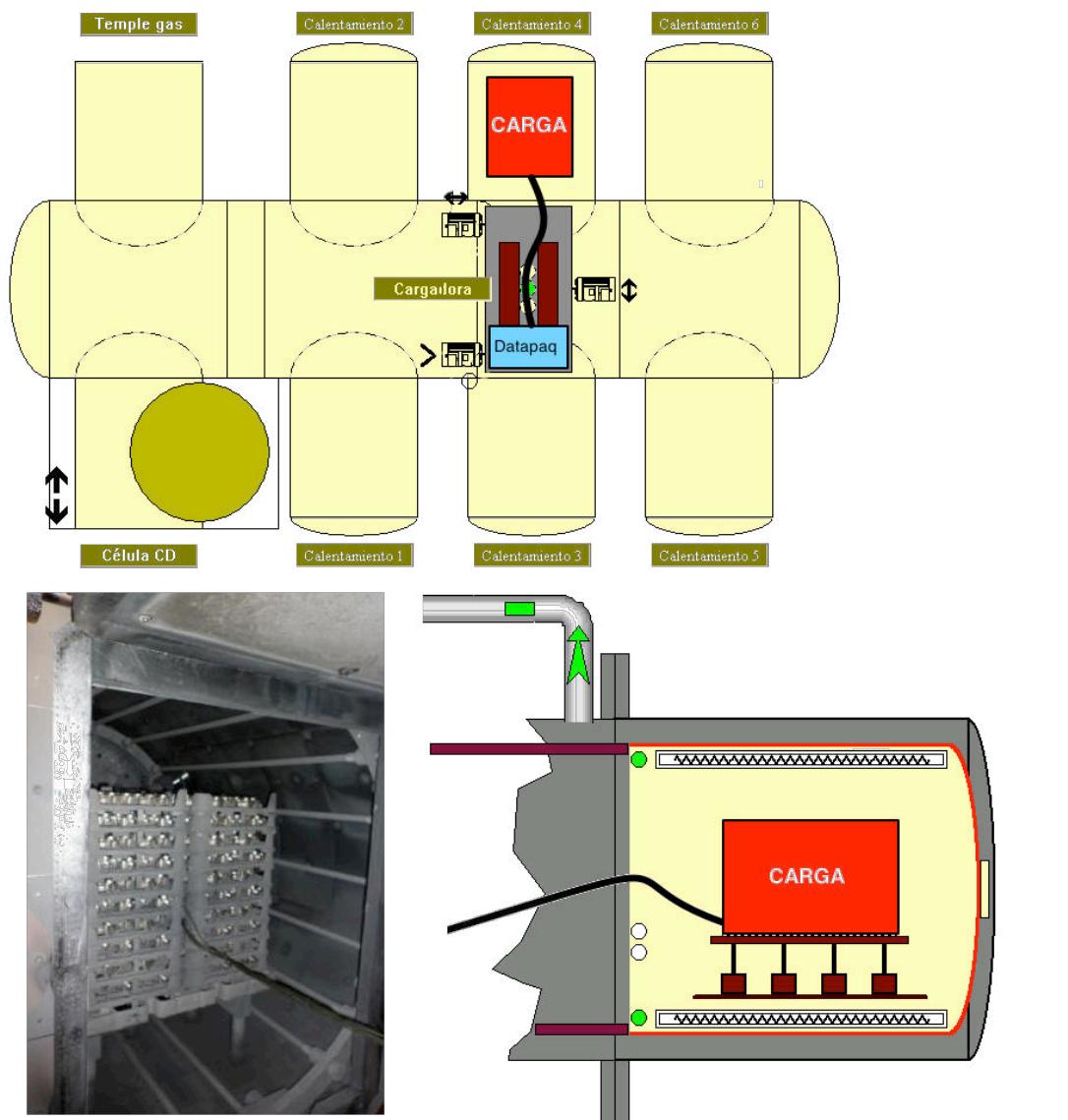


Figura 1- 23: Esquema de la disposición de la carga y el registrador de temperaturas.



Figura 1- 24: Ejemplo de carga configurada con 10 niveles. (Delphi Diesel Systems, SL)

La monitorización de la temperatura de las piezas durante el ciclo de tratamiento térmico se ha llevado a cabo efectuando un pequeño taladro en uno de los laterales de los cabezales, hasta alcanzar la sección del núcleo. Los extremos de los termopares serán introducidos posteriormente dentro de estos taladros, de esta forma la temperatura registrada será la del núcleo de la sección de acero.

El siguiente esquema ilustra la sistemática aplicada:

C1. 42

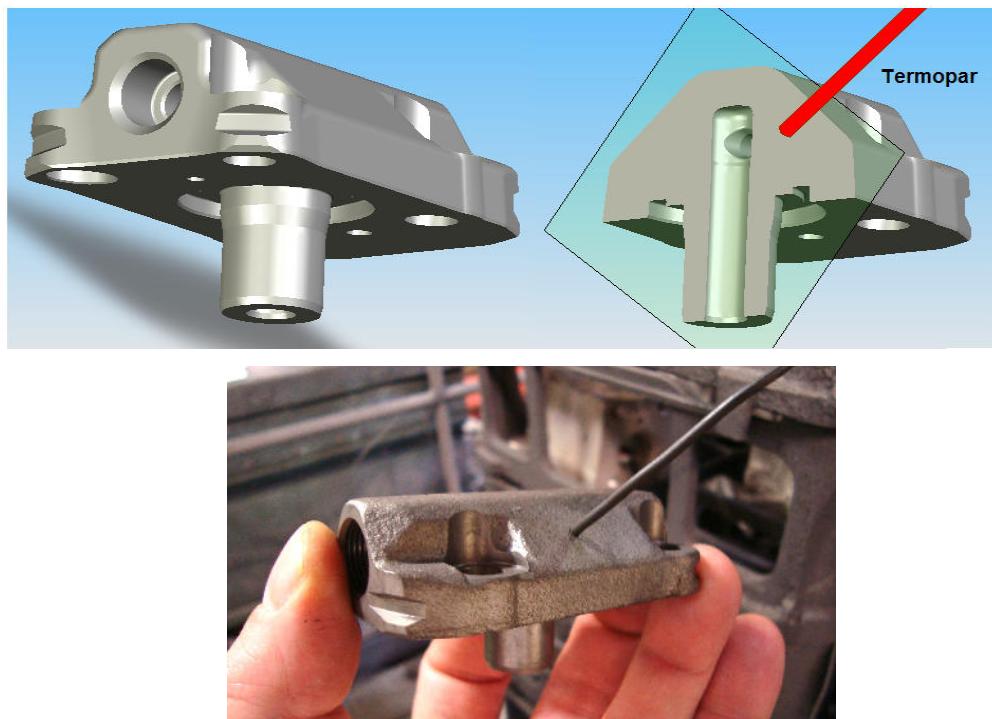


Figura 1- 25: Esquema e imagen ilustrando la ubicación del termopar en la pieza.

Las configuraciones de carga que se establece ensayar han sido las siguiente:

Pisos	Base kg	Bandejas kg	Piezas kg	Total kg	Nº Piezas
6	30	93,6	128,3	252	432
10	30	156	213,8	400	720
11	30	171,6	235,2	437	792

En cada caso, diez sondas de temperatura han sido dispuestas para efectuar el ejercicio en cada una de las configuraciones ensayadas. La disposición de los termopares se establece de forma que se intenta capturar información de piezas que representen todo el rango de condiciones de temperatura

que se puedan dar en la carga, esto es, piezas que están en la periferia y piezas que están en las zonas interiores de los pisos, seleccionando muestras en todos los niveles.

A continuación se presentan los esquemas en los que se identifican las posiciones de las piezas para las que se ha monitorizado la temperatura, para los diferentes ensayos efectuados.

C1. 43

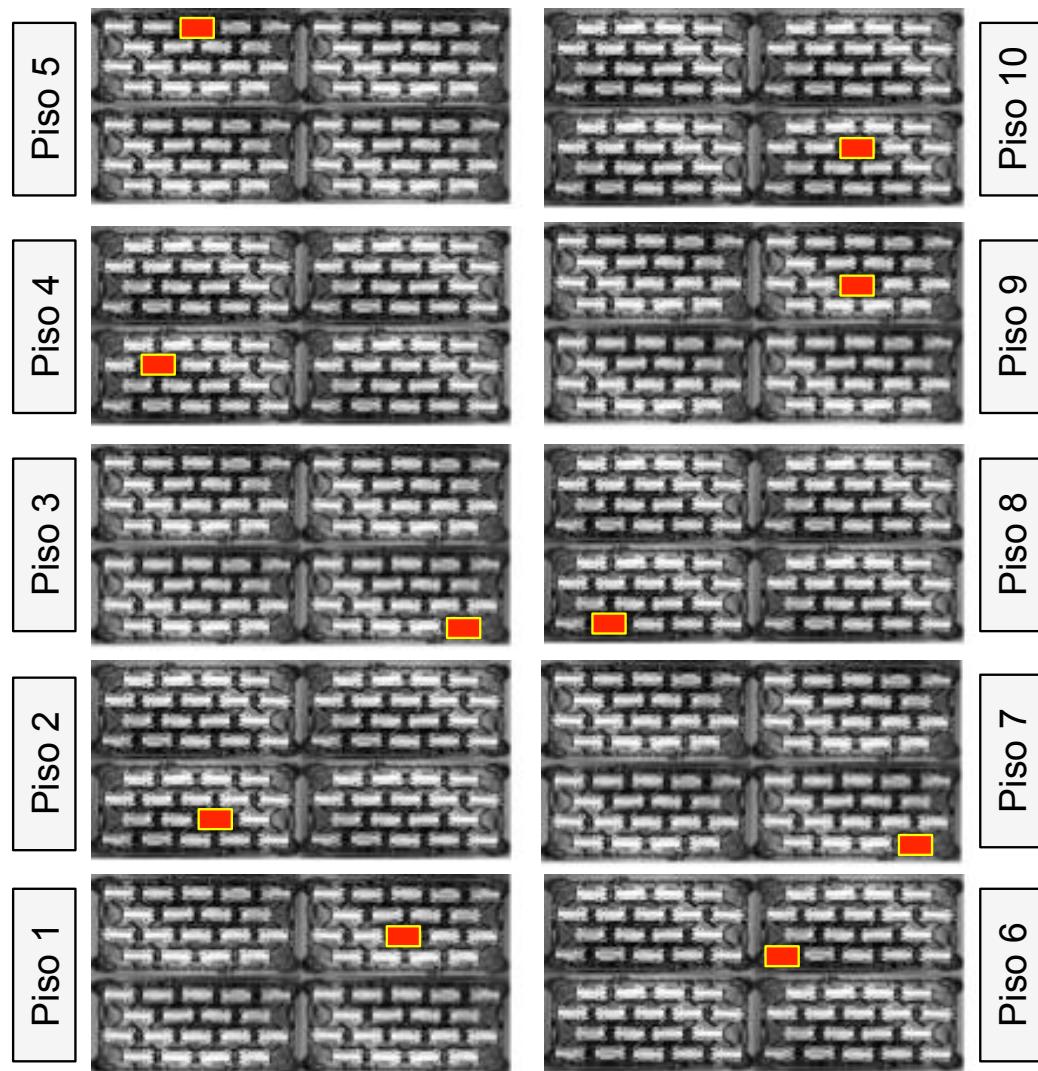
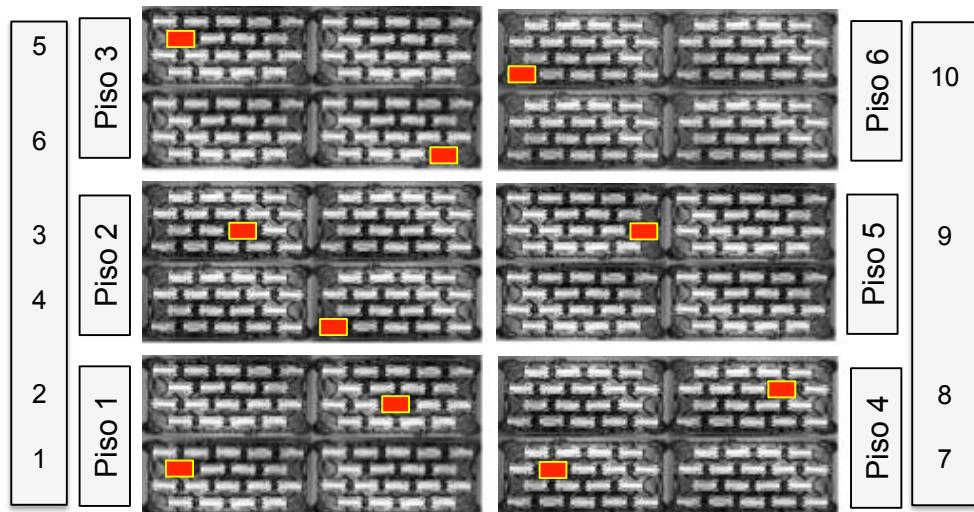


Figura 1- 26: Configuración de carga de 10 niveles.



C1. 44

Figura 1- 27: Configuración de carga de 6 niveles.

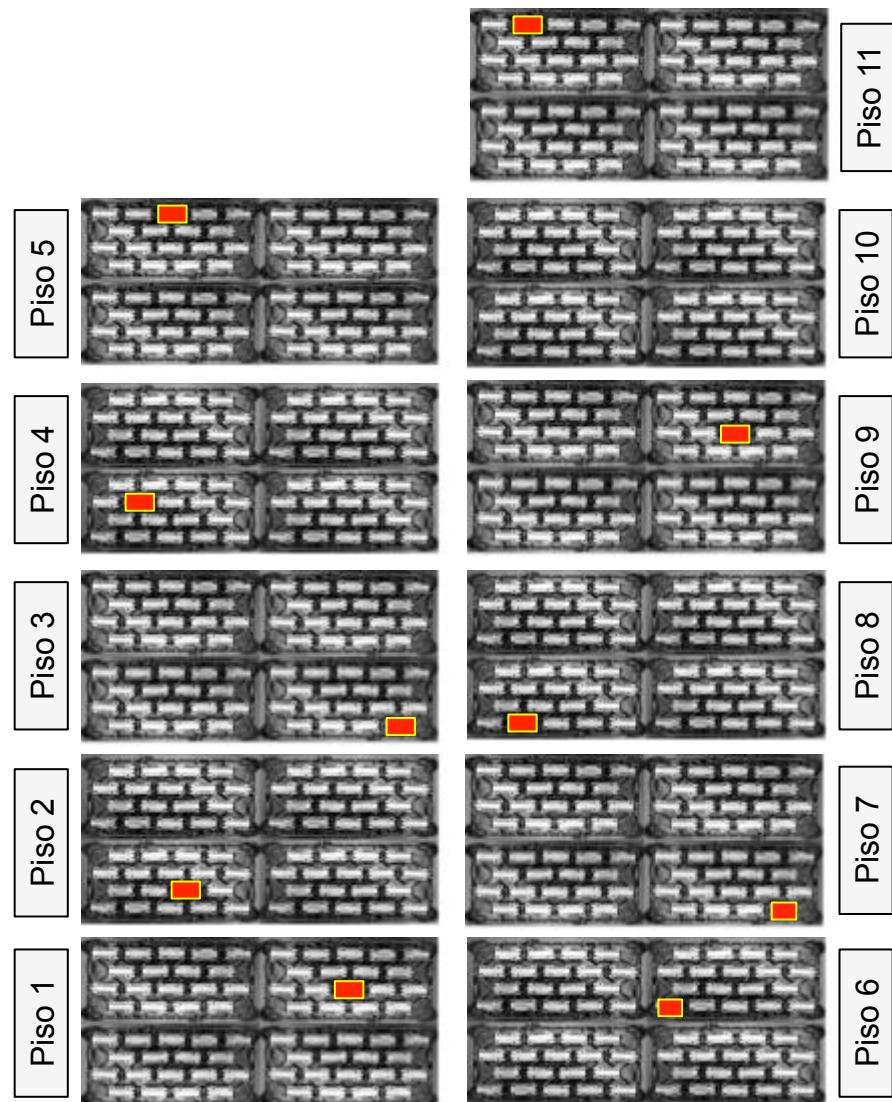
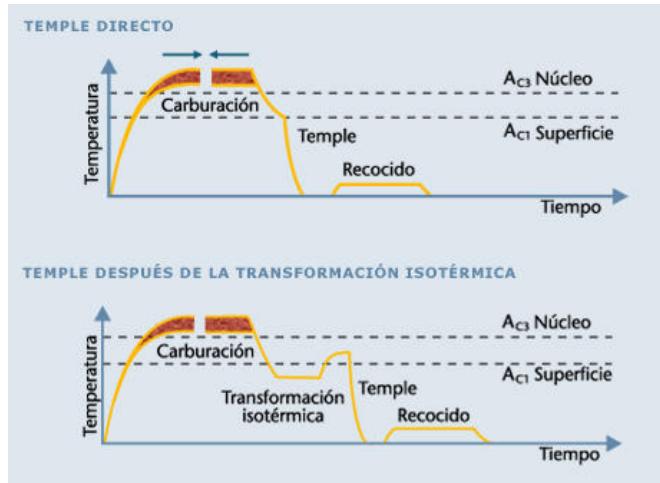


Figura 1- 28: Configuración de carga de 11 niveles.

Recordar que el ciclo de tratamiento térmico que se considera es del tipo reheating: después de la etapa de cementación se establece un enfriamiento lento, dentro de la célula de alta temperatura con transformación subcrítica de la microestructura, seguido de un calentamiento final con transformación incompleta en el núcleo previo al temple en gas.

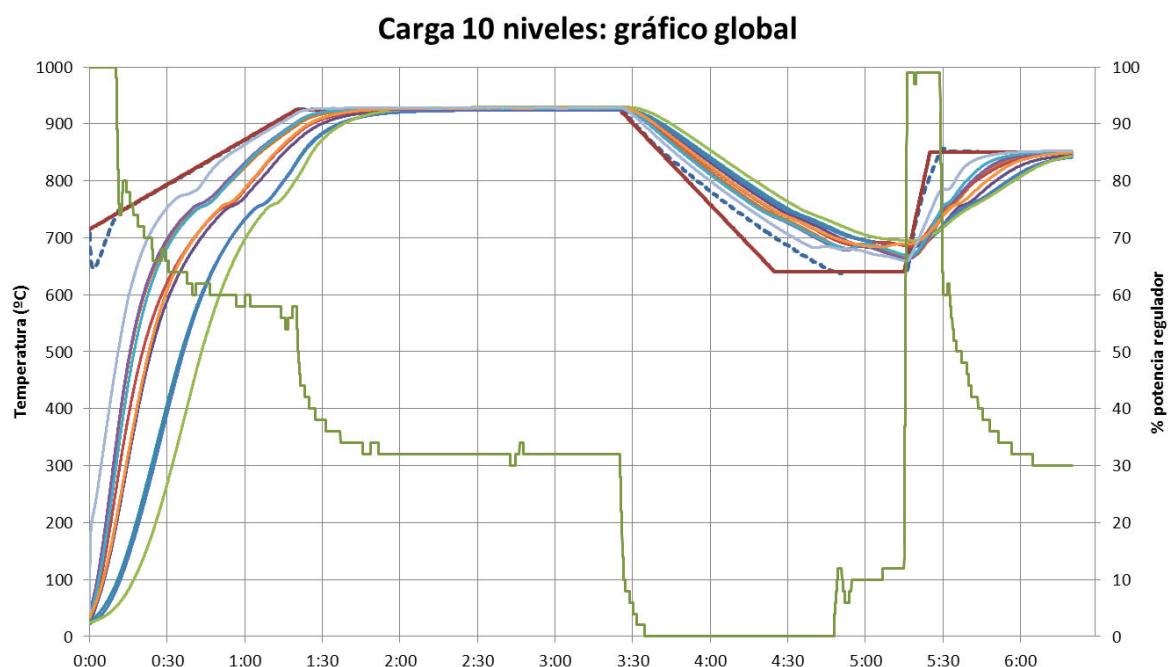


C1. 45

1.5.1. CURVAS DE TEMPERATURA: CARGA DE 10 NIVELES

Tomamos la carga de 10 niveles como la carga de referencia, puesto que esta configuración proporciona un índice de aprovechamiento productivo de la instalación adecuado a la capacidad de las células y a los volúmenes demandados.

El gráfico siguiente presenta las curvas de temperatura de las 10 posiciones monitorizadas y para todo el ciclo de tratamiento térmico.



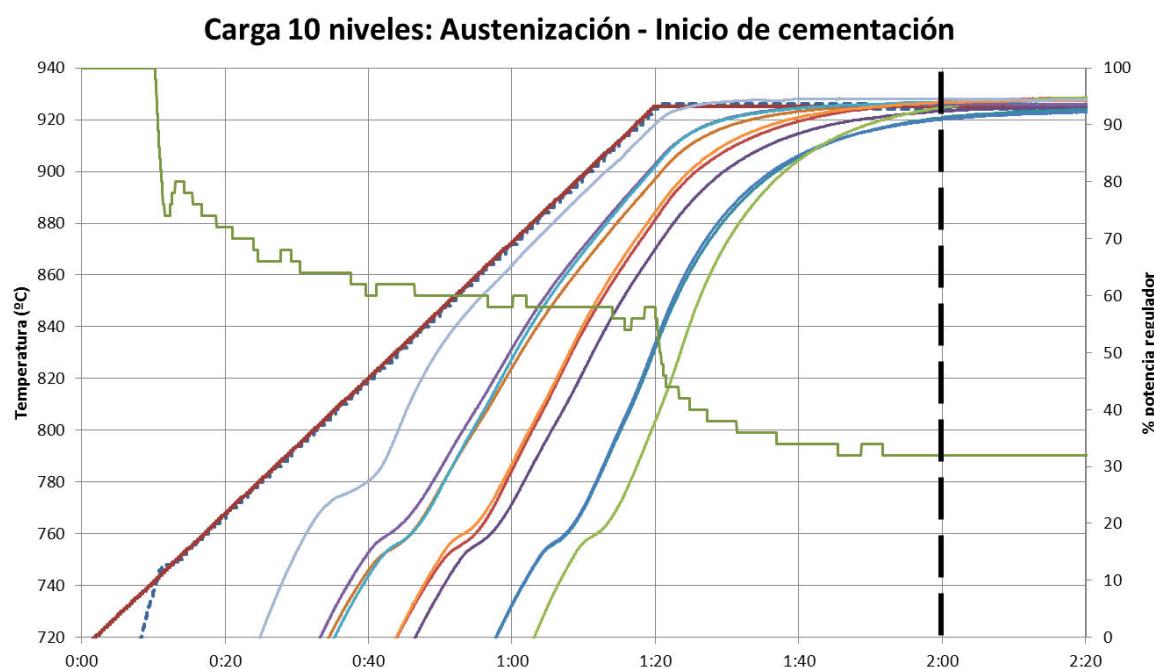
El ciclo de temperatura del tratamiento térmico que se presenta en el gráfico anterior requiere una particular observación en varias de las etapas del ciclo.

En primer lugar, debemos observar la etapa de calentamiento y estabilización de la temperatura de la carga: la temperatura de consigna de la cementación es de 925°C, y el inicio de los impulsos de acetileno tienen lugar exactamente a las 2 horas de iniciarse el ciclo.

C1. 46

En el siguiente gráfico se muestra con mayor detalle la etapa de calentamiento y homogeneización de la carga. En primer lugar se observa la transformación austenítica: esta transformación microestructural no tiene lugar a una única temperatura, como ocurriría por ejemplo si fuese un acero con la composición precisa del eutectoide. Por el contrario, ocurre en un intervalo de temperaturas, en tanto que durante dicho intervalo coexisten las fases austenítica y la ferrita-perlita inicial. Por este motivo, el perfil de la curva temperatura-tiempo define una irregularidad en forma de curva en la rampa de calentamiento.

En una aleación de Fe-C sin otros elementos de aleación, y en condiciones de transformación en equilibrio, este inicio de cambio de fase se observaría a la temperatura de 727°C (A1). No obstante, en nuestro caso la transformación tiene lugar en condiciones de no equilibrio, puesto que el material se ve expuesto a un rápido calentamiento. Y por otra parte, existen otros elementos en la aleación que modifican las curvas del diagrama de equilibrio Fe-C. En consecuencia, en nuestras curvas de calentamiento, la transformación austenítica (endotérmica) se inicia aproximadamente hacia los 750°C, y debería completarse por encima de los 850°C.

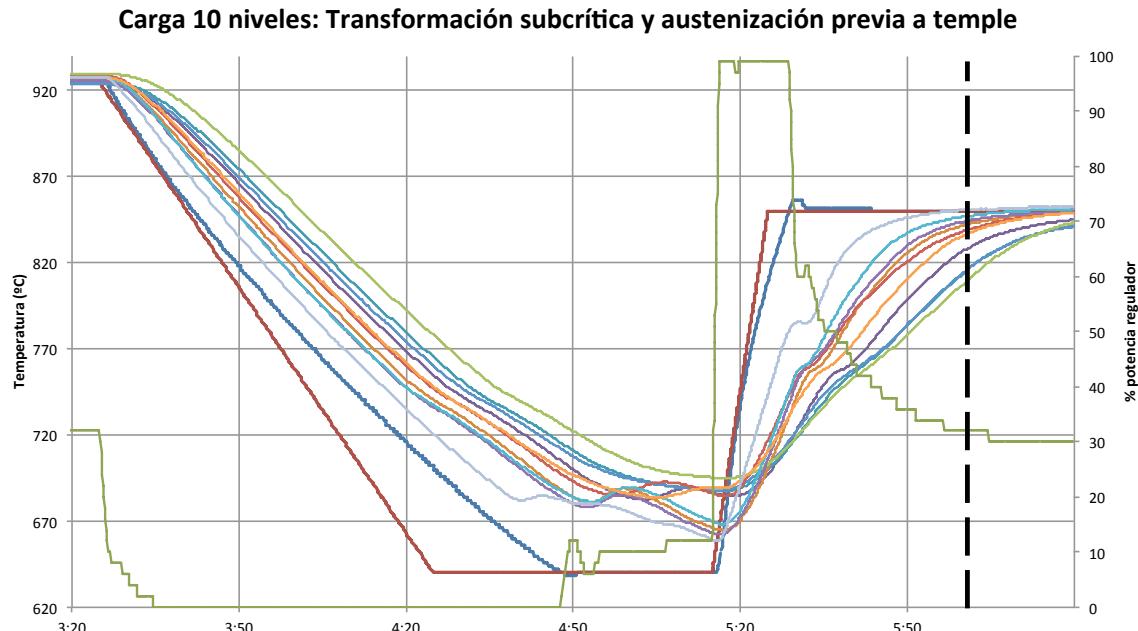


Se observa también como la pieza que tiene un calentamiento más rápido está situada en el piso superior (p10), mientras que la pieza que calienta más despacio se sitúa en el núcleo de carga (p6), seguida de las posiciones p2 y p4, en los pisos inferiores y también rodeadas por otras capas de piezas más externas: esto es lógico en tanto que las posiciones centrales están en cierta medida apantalladas por las piezas que las rodean, y que en consecuencia se ven más expuestas a la radiación de los elementos de calefacción y por consiguiente se calientan más rápidamente.

El otro aspecto a considerar es la homogeneidad de la temperatura de la carga en el instante en que se inician los pulsos de acetileno. Este aspecto es importante, puesto que si la temperatura no es perfectamente uniforme, puede incrementarse el grado de dispersión en los valores de la profundidad de capa resultantes.

En nuestro caso, vemos que la temperatura de las piezas que constituyen la carga, si bien no es perfectamente uniforme, se sitúa en el rango de aceptable de 920 a 928°C.

Finalizada la etapa de cementación se inicia el enfriamiento subcrítico: en este caso, mediante un enfriamiento lento dentro de la propia célula y hasta una temperatura de consigna de 640°C:



La evolución de las temperaturas muestra como la configuración de 10 pisos, con los tiempos de ciclo definidos en la receta, no garantiza la transformación subcrítica de todas las piezas de la carga: en el gráfico anterior se puede observar como una primera transformación se inicia en el entorno de 745°C,

si bien la transformación exotérmica de la austenita hacia una microestructura de ferrita y perlita se completa en el rango de temperatura de aproximadamente 680 a 685°C.

La pieza que enfriá más rápidamente está localizada en el piso 10, mientras que la más lenta corresponde al piso 6: nuevamente la velocidad de calentamiento y enfriamiento está determinada por el grado de apantallamiento con respecto a los elementos de calefacción o con las piezas de alrededor. 3 de las 10 posiciones observadas (p2, p4 y p6) no completan la transformación, debido a que su velocidad de enfriamiento no es suficiente para alcanzar, dentro de la etapa de estabilización subcrítica, la temperatura de final de transformación.

Durante el posterior calentamiento para alcanzar la austenización previa al temple, completa en la capa cementada por su mayor contenido en carbono, pero incompleta en la sección del núcleo, esta transformación se observa en el rango de temperatura de aproximadamente 755 a 760°C en rampa de calentamiento.

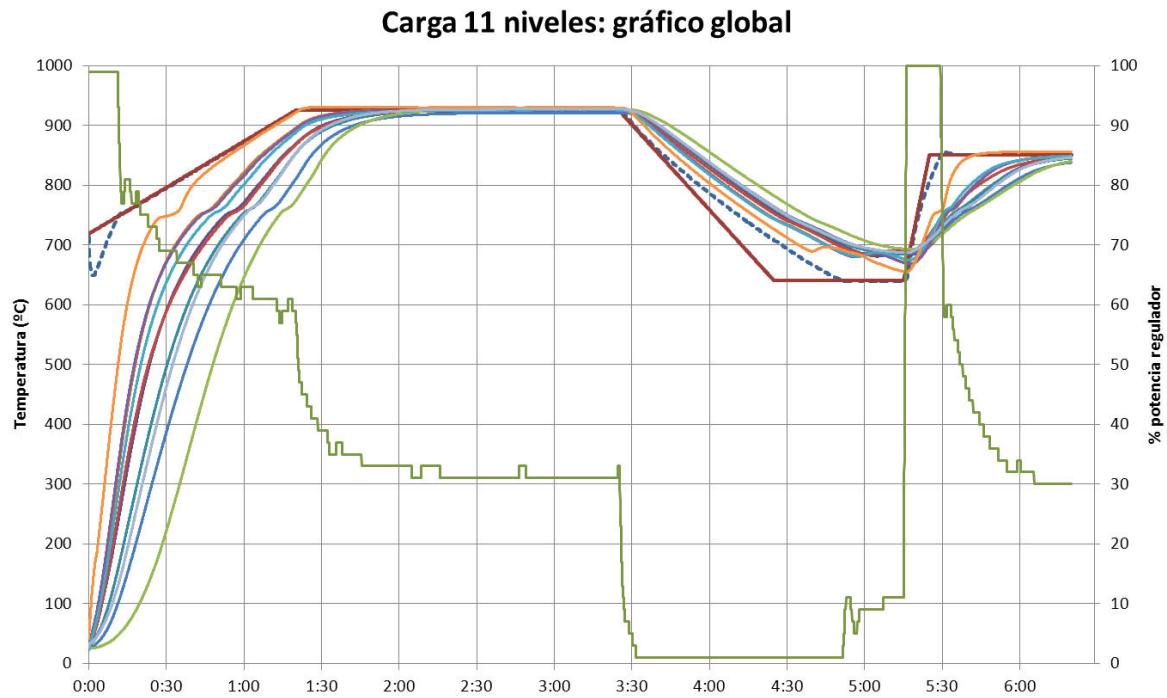
La pieza situada en la posición p10, muestra por lo general una cinética de calentamiento más rápida que las otras posiciones, lo que probablemente sea la causa por la que esta pieza presente alteradas las temperaturas de transformación de fases respecto a los otros componentes. Eventualmente, la causa de este comportamiento diferenciado también podría deberse a un posible problema de inserción del termopar en la pieza.

Observando la evolución de la temperatura de las diferentes piezas durante esta etapa final de austenización puede observarse como la dispersión de temperaturas cuando el ciclo alcanza las 6 horas de duración total es considerable: entre los 810°C de la posición p6 y los 850°C de la posición p10: esta temperatura permite la austenización total de la capa cementada, e incompleta en diversos grados en el núcleo.

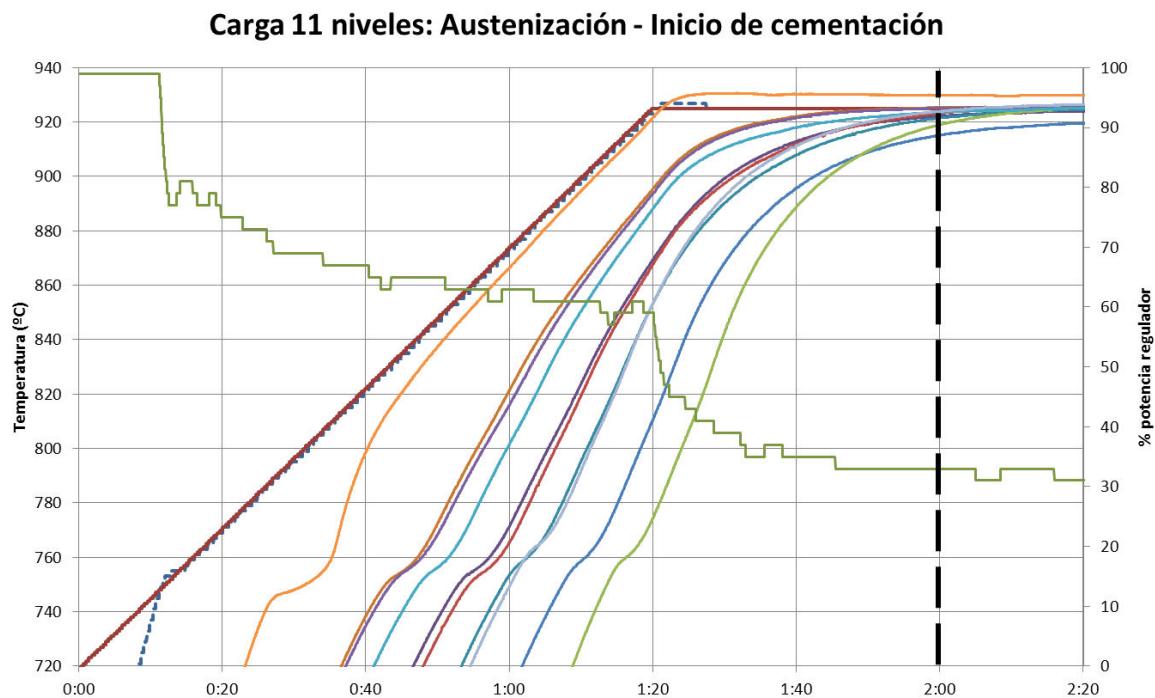
1.5.2. CURVAS DE TEMPERATURA: CARGA DE 11 NIVELES

Aumentando aún más la cantidad de piezas por carga, esto es, incrementando la masa a partir de sumar un nivel adicional, aumenta las inercias térmicas, afectando en cierta medida a la velocidad de calentamiento de la carga, pero de forma más evidente en el enfriamiento no forzado de la etapa intermedia de enfriamiento subcrítico.

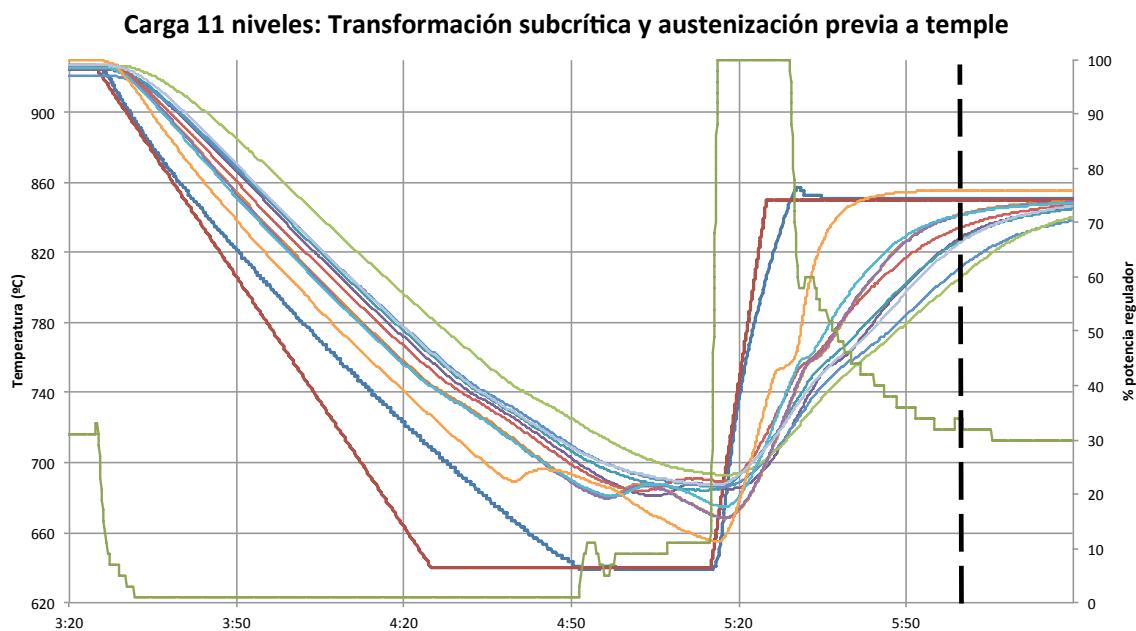
Las curvas que se presentan a continuación corresponden al ensayo efectuado con 11 niveles de piezas:



El calentamiento y estabilización de la temperatura de la carga es sensiblemente más lento con 11 niveles que con 10: esto provoca que en el minuto 120, que es cuando está prescrito que se inicie la cementación a partir de las inyecciones de hidrocarburo, algunas de las piezas de la carga aún estén finalizando su fase de estabilizado en la consigna de 925°C, resultando en una horquilla de temperaturas de entre 915 y 930°C.



Observando a continuación la etapa correspondiente al enfriamiento intermedio, constatamos como la transformación no se completa en una mayor proporción de piezas que en las condiciones del apartado anterior: 4 sobre 10 piezas observadas no completan la transformación, respecto a 3 sobre 10 del ejercicio con 10 niveles de piezas.

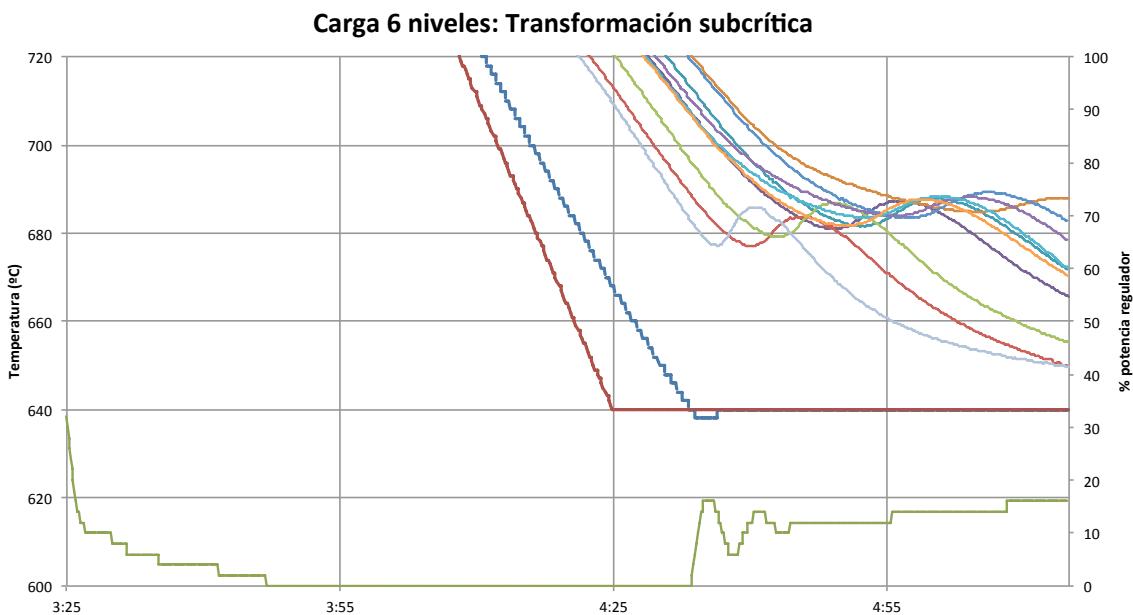


En el instante de enviar a temple la carga, la temperatura mínima observada es de 806°C, suficiente para conseguir el temple de la carga en la zona cementada, y con una condición bifásica (austenita y ferrita) en la sección del núcleo.

1.5.3. CURVAS DE TEMPERATURA: CARGA DE 6 NIVELES

El ejercicio con la configuración de carga con 6 niveles, es decir, una masa total de alrededor de 250 kg, respecto a los 400 y 435 kg de las configuraciones de 10 y 11 niveles respectivamente, se ha efectuado para confirmar la mejora en la transformación de la fase de enfriamiento subcrítico.

Como se observa en las curvas del diagrama siguiente, se constata que prácticamente todas las piezas completan la transformación subcrítica, así como una cierta mejora en el grado de homogeneización o de reducción de la dispersión de las temperaturas observadas entre las diferentes piezas.



Por tanto, esta configuración de la carga con 6 niveles determinaría la condición de carga límite para conseguir una transformación isotérmica más uniforme y homogénea en las piezas tratadas.

La reducción en la masa total también comporta una mayor velocidad en el calentamiento y una consecución de la condición de estabilización, tanto en la etapa de calentamiento inicial, como en la austenización final antes de temple en gas.

1.5.4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS METALÓGRAFICOS

Después de observar el comportamiento térmico de las cargas, se han efectuado ensayos de caracterización metalográfica para determinar las características de la capa de cementación resultantes aplicando la receta base del proceso de tratamiento térmico.

Los parámetros evaluados son:

- Dureza macroscópica en superficie de la pieza, expresada como dureza Vickers HV10.
- Dureza macroscópica en la sección del núcleo, expresada como dureza Vickers HV30.
- Profundidad de capa efectiva (>550 HV0.5), evaluada a partir de la curva de microdurezas Vickers HV0.5
- Observación de las microestructuras resultantes.

Para este análisis se han considerado las configuraciones de carga ensayadas en los apartados anteriores constituidas por 10 y 11 niveles, con 72 piezas por nivel distribuidas tal y como se ha indicado anteriormente y tratada de acuerdo al proceso de referencia de cementación

La localización de las secciones de la pieza sobre las que se efectúan estos controles se presentan en el siguiente esquema:

C1. 52

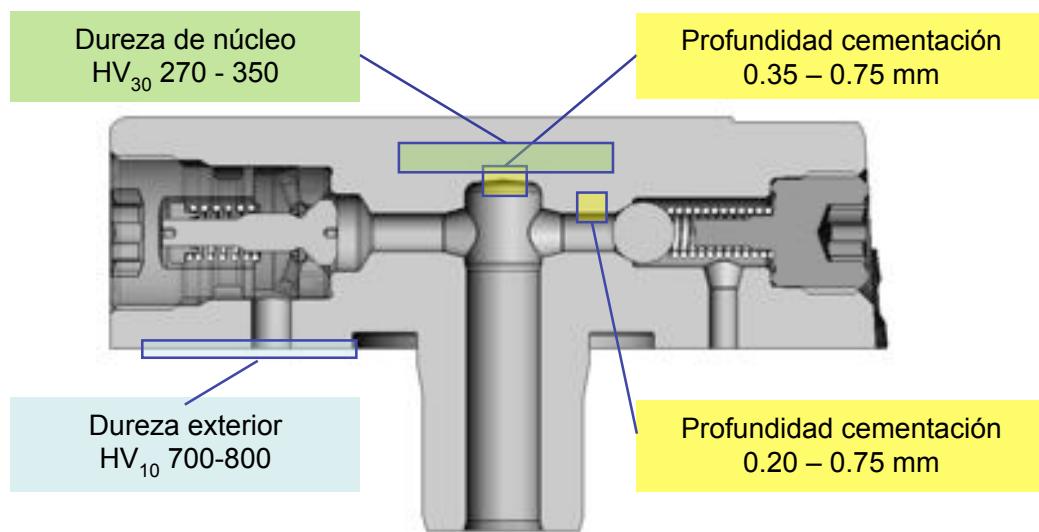


Figura 1- 29: Esquema del cabezal hidráulico en el que se precisa localización de las secciones en las que se efectuará el control metalográfico.

El equipamiento de laboratorio utilizado en esta parte del ejercicio es el que puede encontrarse en un laboratorio de preparaciones metalográficas:

- Cortadora metalográfica de disco (abrasivo de carburo de silicio): Struers Unitom-50
- Embutidora por presión y temperatura, de ciclo automático, para la obtención de preparaciones metalográficas con resina fenólica: Struers Labopress-3
- Dispositivo de desbaste con cintas abrasivas de diversos tamaños de grano
- Pulidora de discos rotativa para el pulido de la superficie con abrasivo (pasta de diamante de 2 micras de tamaño de partícula).

La dureza superficial y de núcleo se evalúa en el durómetro Vickers: Mitutoyo HV-114.

Una vez preparadas y pulidas las probetas con las secciones de los componentes que queremos inspeccionar, la profundidad de capa de cementación se determina efectuando una serie de indentaciones Vickers sobre la sección del componente, empezando en la superficie y penetrando en la

sección del material tratado. El valor de profundidad de capa se establece a partir del límite de dureza >550 HV0.5 (que corresponde a un contenido en carbono de 0.36%).

Para este ensayo se ha utilizado un microdurómetro Vickers automático Struers Duramin-20, equipado con un software de análisis de imagen que permite también la evaluación de las dimensiones de las diagonales de las indentaciones de forma automática.

C1. 53

La definición de la serie de microdurezas debe considerar como mínimo una primera indentación a 100 µm de la superficie exterior, y a partir de esta primera indentación las siguientes a intervalos regulares hasta alcanzar la sección no cementada.

El plano de corte debe pasar por la sección central de la cámara de alta presión, tal y como se presenta en las imágenes siguientes:



Figura 1- 30: Ejemplo de preparación metalográfica. Microdurómetro Struers Duramin-20.

Para revelar la microestructura del acero tratado se utiliza como reactivo de ataque Nital, que está formado por una solución de alcohol etílico sobre el que se añade una proporción de entre el 2 y el 4% en volumen de ácido nítrico concentrado. El tiempo de aplicación de este reactivo es de aproximadamente 5 a 10 segundos.

La observación de la microestructura se efectúa en un microscopio óptico metalográfico Olympus BX-60M.

C1. 54

Los siguientes esquemas definen la distribución de las muestras que se han considerado en esta inspección metalográfica. Los cuadros rojos refieren a la posición de las sondas de temperatura utilizadas en los ensayos térmicos descritos en los apartados anteriores, en tanto que los cuadros amarillos indican las posiciones de las piezas que se han ensayado metalográficamente.

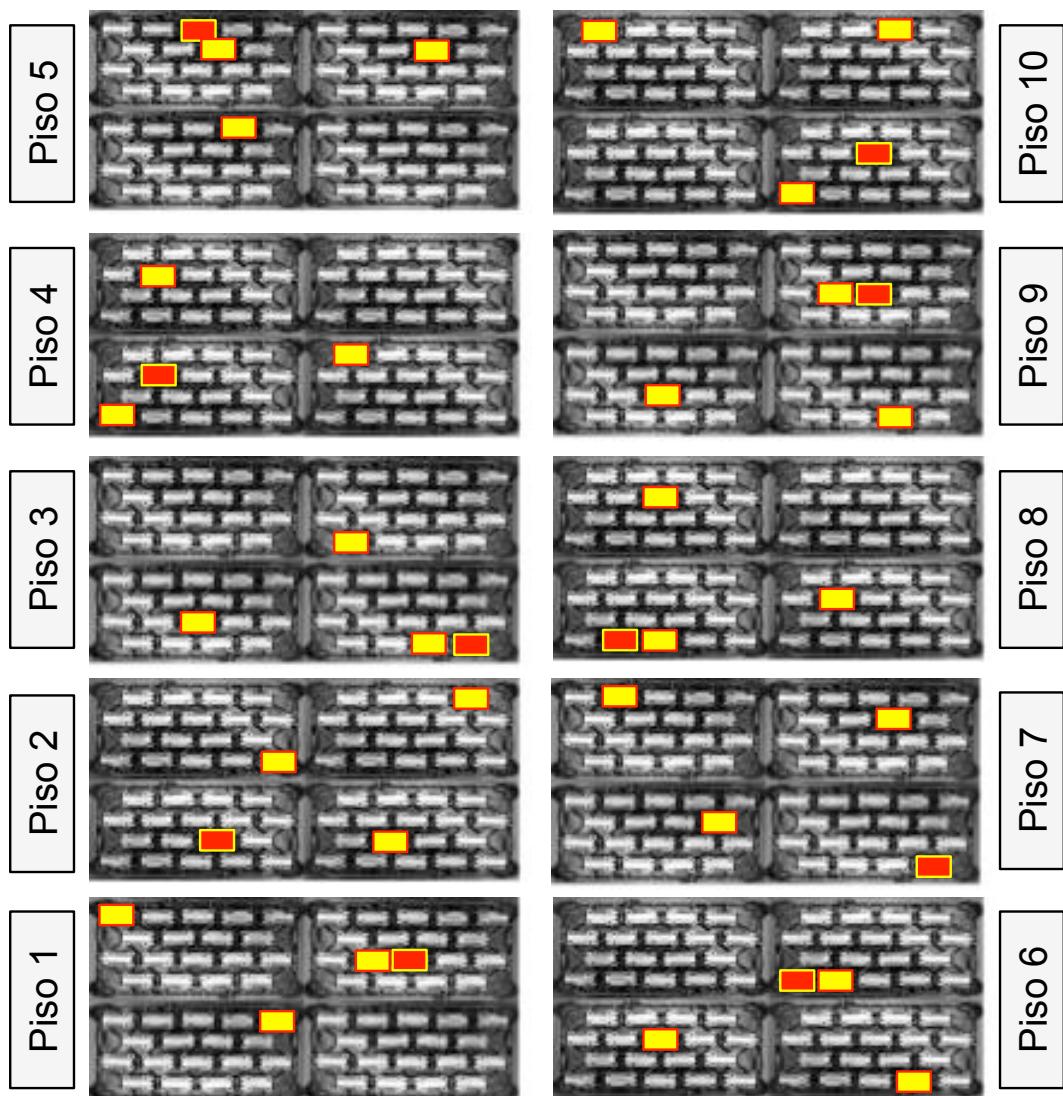
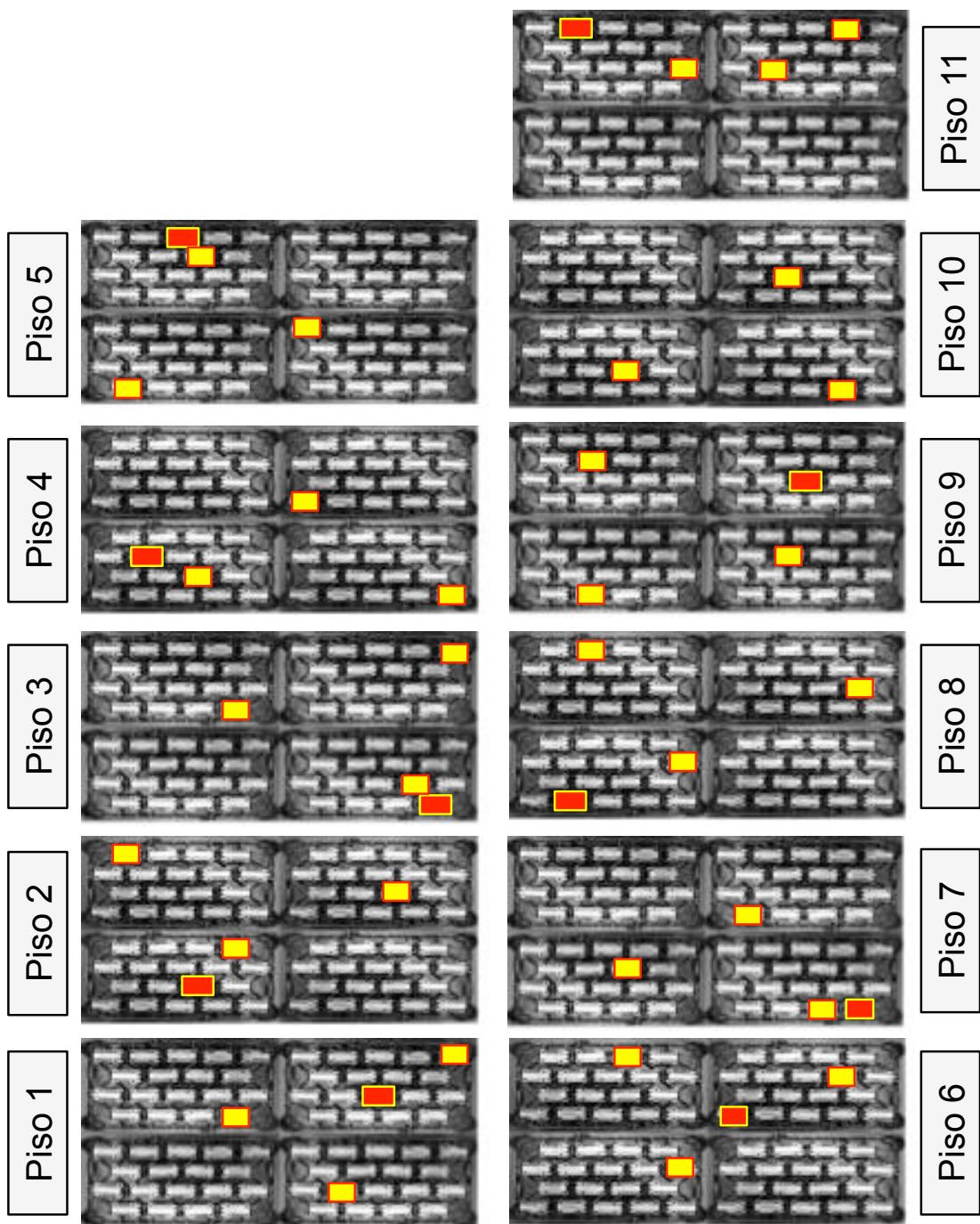


Figura 1- 31: Distribución de muestras ensayadas en la carga de 10 pisos. En rojo las piezas con registro de temperatura, y en amarillo las piezas para control metalográfico.



C1. 55

Figura 1- 32: Distribución de muestras en la carga de 11 pisos.

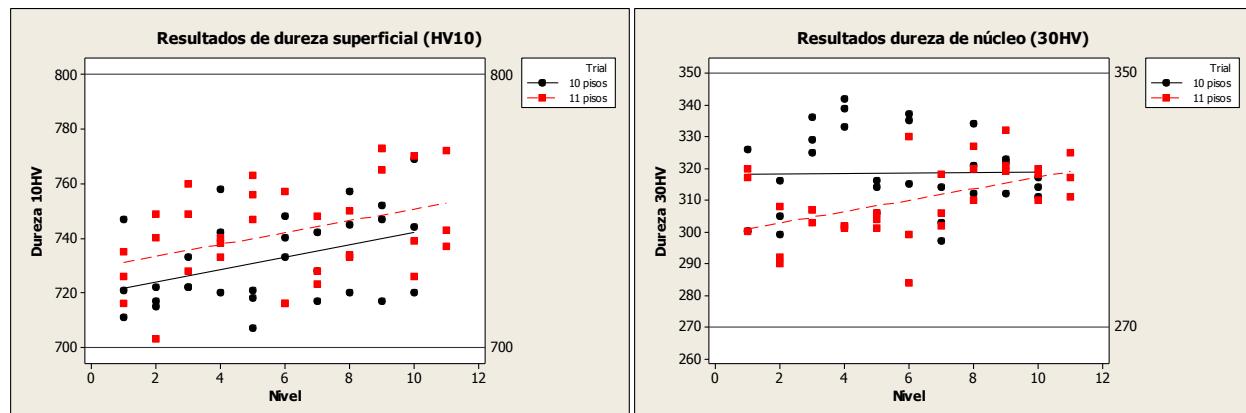
A continuación se presentan tabulados el resumen con los resultados metalográficos obtenidos en cada ensayo y para cada configuración de carga.

Nivel	10 NIVELES				11 NIVELES			
	HV10 Exterior	Taladro mm	Cámara mm	HV30 núcleo	HV10 Exterior	Cámara mm	Taladro mm	HV30 núcleo
1	747	0,57	0,46	300	726	0,46	0,45	300
1	721	0,44	0,49	326	735	0,53	0,47	317
1	711	0,44	0,60	300	716	0,43	0,44	320
2	715	0,48	0,51	299	740	0,46	0,44	292
2	717	0,44	0,54	316	703	0,46	0,44	290
2	722	0,42	0,50	305	749	0,54	0,4	308
3	722	0,47	0,51	325	760	0,51	0,4	303
3	733	0,43	0,50	336	728	0,46	0,47	307
3	722	0,51	0,52	329	749	0,4	0,45	307
4	742	0,42	0,50	339	740	0,51	0,55	301
4	758	0,46	0,47	342	738	0,46	0,52	302
4	720	0,52	0,53	333	733	0,44	0,41	302
5	718	0,49	0,51	316	747	0,47	0,42	304
5	721	0,48	0,54	314	756	0,46	0,46	301
5	707	0,48	0,50	306	763	0,48	0,44	306
6	733	0,47	0,51	335	716	0,46	0,48	299
6	740	0,44	0,48	337	716	0,44	0,41	330
6	748	0,52	0,53	315	757	0,46	0,44	284
7	717	0,47	0,56	303	748	0,46	0,41	318
7	728	0,46	0,56	297	723	0,52	0,53	302
7	742	0,45	0,52	314	728	0,52	0,53	306
8	720	0,51	0,48	312	733	0,49	0,39	327
8	745	0,49	0,51	334	750	0,5	0,49	320
8	757	0,48	0,48	321	734	0,47	0,46	310
9	747	0,54	0,55	323	765	0,53	0,51	332
9	717	0,53	0,60	322	773	0,51	0,47	319
9	752	0,50	0,61	312	773	0,51	0,44	321
10	769	0,54	0,58	317	726	0,55	0,43	318
10	744	0,63	0,58	311	739	0,53	0,46	320
10	720	0,54	0,62	314	770	0,62	0,54	310
11	-	-	-	-	772	0,58	0,63	317
11	-	-	-	-	737	0,54	0,47	311
11	-	-	-	-	743	0,56	0,49	325

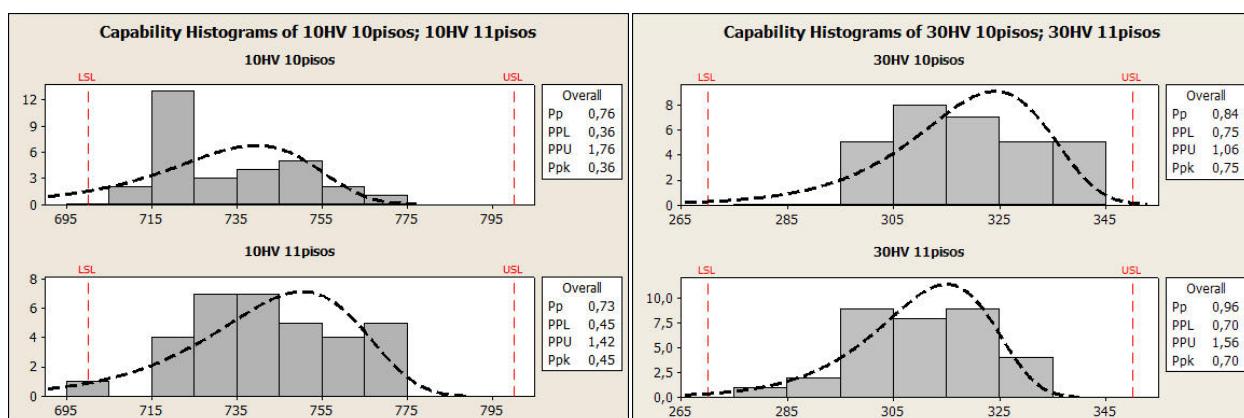
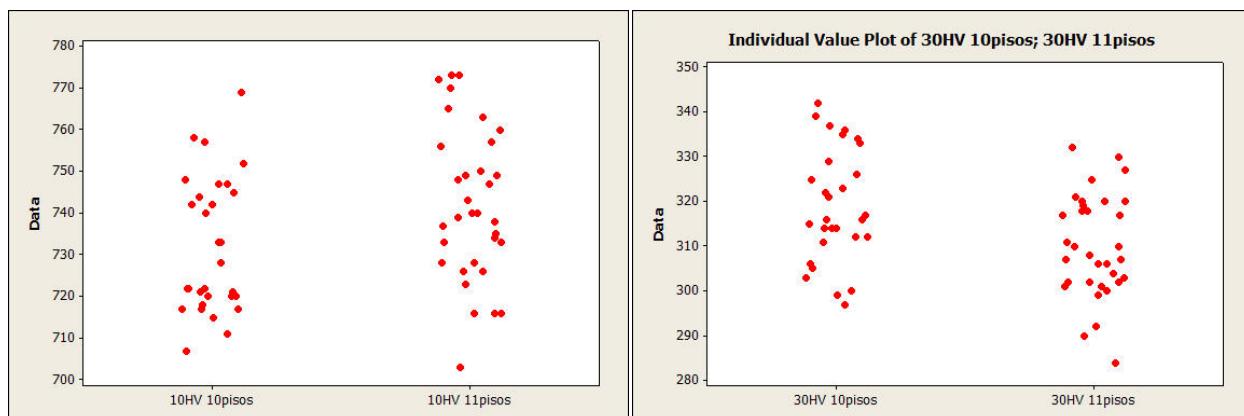
C1. 56

En las siguientes figuras se presentan de forma gráfica los resultados observados, clasificados por característica y por configuración de carga. Todos los valores observados están en conformidad con las especificaciones de producto.

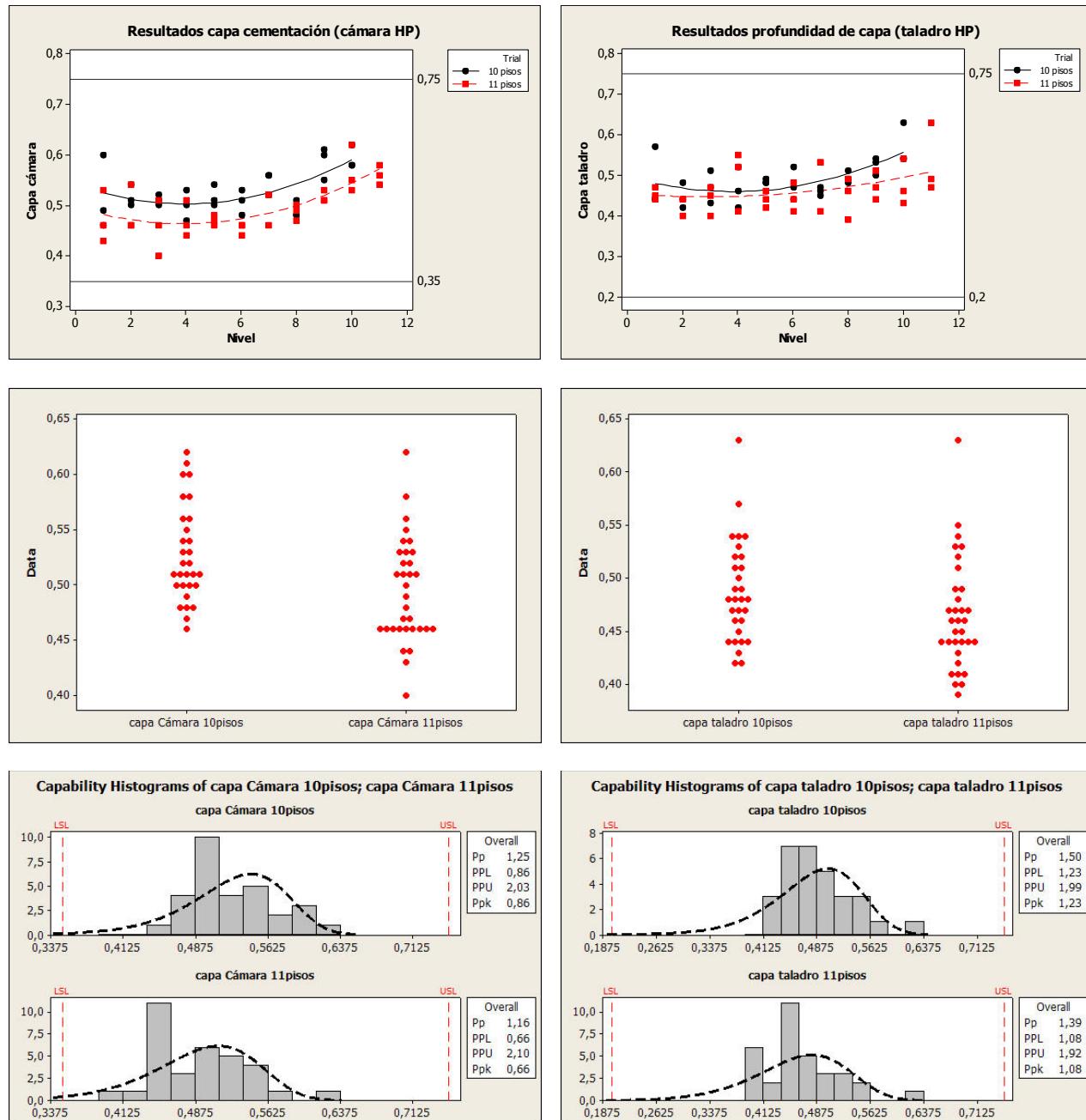
Gráficos de explotación de resultados para la dureza exterior y dureza de núcleo:



C1. 57



Gráficos de explotación de resultados para la profundidad de capa cementada, en las secciones de la cámara de alta presión y en el taladro de comunicación HP:



C1. 58

Los gráficos anteriores muestran el efecto del aumento de masa y de superficie de cementación, resultantes de la mayor cantidad de piezas y utilajes introducidos en la carga de 11 niveles respecto a la configurada con 10 niveles.

Los resultados de dureza superficial son comparables en ambos casos: la dureza resultante depende en gran medida de los porcentaje de carbono en superficie de las piezas y de la drasticidad de las condiciones de temple en gas. Estos parámetros son semejantes en ambos casos, probablemente sensiblemente más desfavorables con la carga de 11 niveles debido a la mayor masa y superficie de intercambio. No obstante, las diferencias reales no parecen ser suficientemente relevantes como para alterar sustancialmente los resultados del temple expresados como dureza superficial macroscópica.

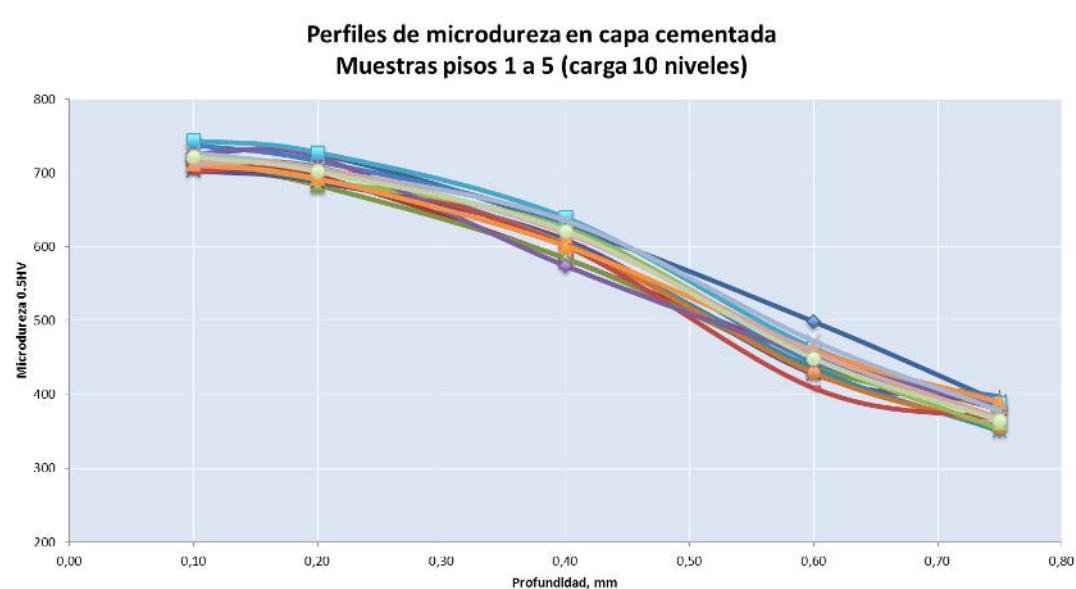
Otro de los factores considerados es la dureza de núcleo: este parámetro estás condicionado a la drasticidad del temple y a la composición química de la aleación. Los resultados observados no apuntan diferencias sustanciales entre ambas familias de datos.

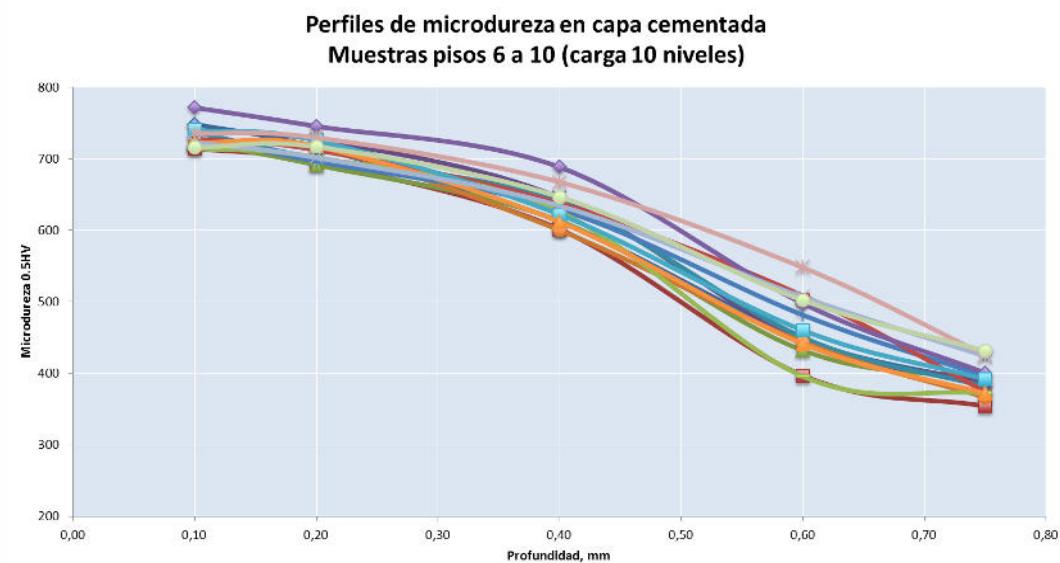
Finalmente, los espesores de capa cementada apuntan una ligera interrelación con el piso del que proceden las muestras: dado que el espesor de capa se evalúa en base a los valores de dureza de la capa, cabe relacionar esta tendencia con la eficiencia del temple, y dado que se trata de un temple en gas dirigido desde la zona superior de la celda hacia el inferior, las piezas de los pisos situados en la zona superior deberán presentar un temple más eficaz que las piezas ubicadas en pisos situados en la zona inferior de la carga, las cuales recibirán un gas relativamente más caliente.

A continuación se presentan las curvas de los perfiles de microdurezas para cada pieza.

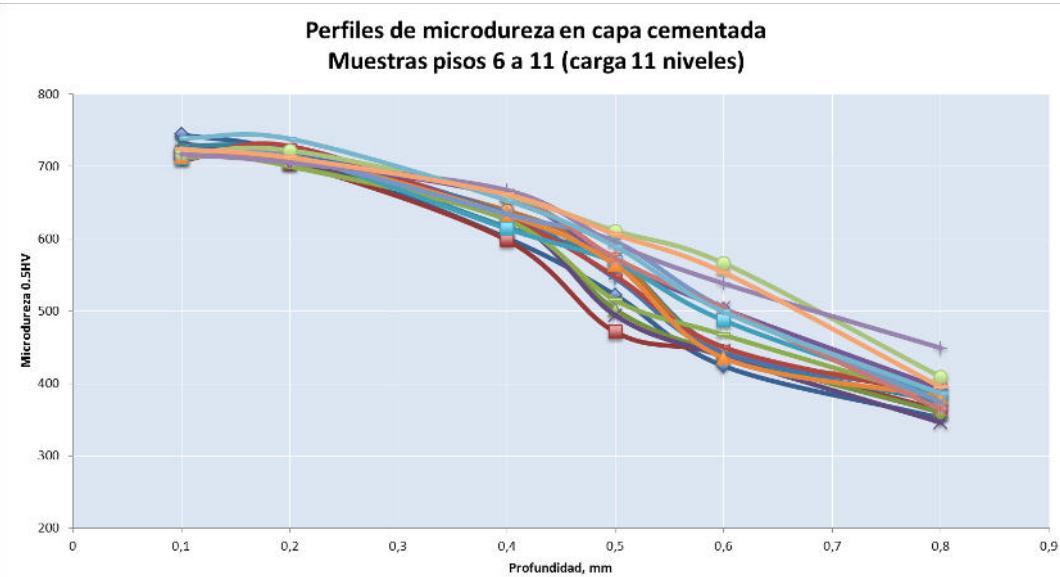
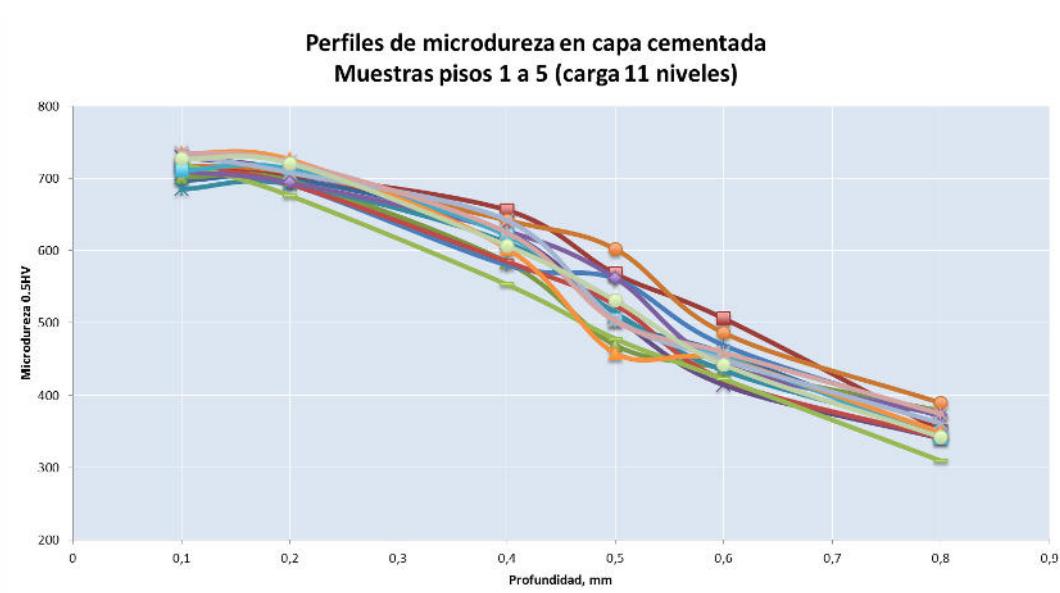
Piezas correspondientes a la carga de 10 y 11 niveles:

C1. 59





C1. 60



El análisis de la microestructura de las piezas tratadas muestra una capa cementada formada a partir de martensitas revenidas. El contenido en austenita residual, si bien no se ha cuantificado de forma precisa mediante difracción de rayos X, aparece bajo el microscopio dentro de los rangos habituales para este proceso de tratamiento térmico y este material. Se estima que el contenido en austenita retenida se sitúa en un rango del 15 al 20% en la zona más externa de la capa cementada.

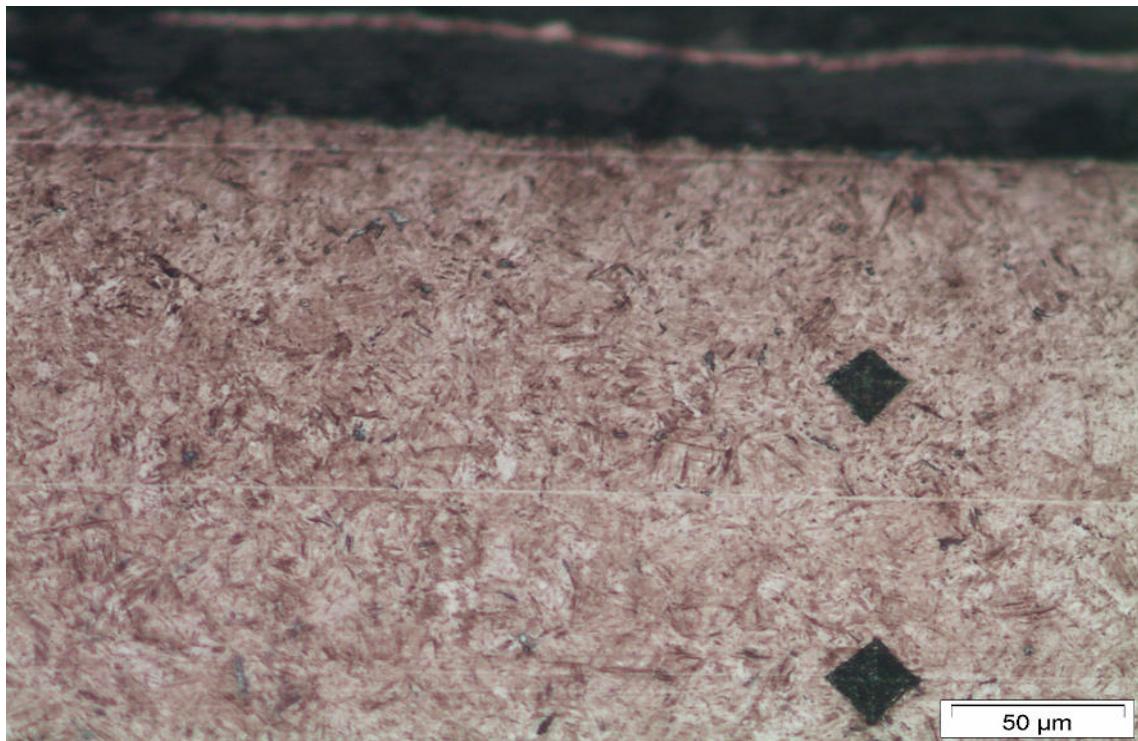
No se aprecian defectos del tipo oxidación intergranular (IGO), carburos metálicos precipitados o cualquier tipo de descarburación. La microestructura también se presenta en su sección cementada sin islas de troostitas u otras fases de transformación intermedia.

Respecto al núcleo, su microestructura es bifásica: el temple de esta sección ha proporcionado martensitas de bajo contenido en carbono, conjuntamente con presencia de ferrita libre

Las siguientes imágenes muestran, a modo de ejemplo, microestructuras de la capa cementada y de núcleo tomadas en la sección de la cámara de alta presión, obtenidas en los procesos de tratamiento térmico del cabezal hidráulico referidos.



Figura 1- 33: Microestructura de la capa cementada (x50).



C1. 62

Figura 1- 34: Detalle de la microestructura en la zona más externa de la capa (x200).



Figura 1- 35: Detalle de la microestructura en la sección del núcleo (x100). Pieza situada en los niveles inferiores.



C1. 63

Figura 1- 36: Detalle de la microestructura en la sección del núcleo (x100). Pieza situada en los niveles superiores.

Las dos imágenes anteriores muestran como la microestructura resultante en la sección del núcleo, y más específicamente su contenido en ferritas libres, está en cierta medida condicionado por la posición de la pieza en la carga. Esto es debido a que las piezas que se ubican en los niveles inferiores, por el efecto direccional del temple en gas, pueden experimentar una velocidad de enfriamiento en el núcleo sensiblemente más lenta que las piezas situadas en los pisos superiores. Esto altera como resultado a la microestructura resultante en el núcleo. No obstante, en nuestro caso, la templabilidad del material utilizado y los espesores de las secciones relativamente pequeños, minimizan este efecto, tal y como se observa en el gráfico de durezas de núcleo diferenciadas por niveles.

Como resumen, puede indicarse que la aplicación de la receta de tratamiento térmico en las condiciones descritas anteriormente, permite que las piezas cementen y templen eficazmente, aún y cuando se configure la carga en condiciones próximas a las dimensiones límite de carga que establece el diseño de las células.

En referencia a la masa total de la carga (incluyendo piezas y utilajes), cercana al límite de 500 kg establecido para esta instalación de tratamiento térmico, los resultados indican que el temple en gas permite todavía templar eficazmente la carga, incluso elevando hasta 11 niveles la configuración de la carga.

BIBLIOGRAFÍA

C1. 64

Datapaq Ltd. (2013). *Datapaq.com*.

Delphi. (2007). Common Rail Manual. Blois, France.

Delphi Diesel Systems, SL. (s.f.). Sant Cugat del Vallés, España.

G.K.Krauss. *Microstructures and Properties of Carburized Steels*.

G.K.Krauss. (1980). *Principles of Heat Treatment of Steel*. American Society for Metals.

SAFE Cronite. (s.f.). www.safe-cronite.com.

Capítulo 2

Discusión, conclusiones y
perspectivas.

Contenido capítulo 2

2.1.	Discusión de los resultados del estudio	5
2.2.	Conclusiones.....	11
2.3.	Perspectivas y desarrollos futuros	13

2.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO

En este capítulo se efectúa la valoración y discusión de los resultados obtenidos en las diferentes fases del estudio.

La etapa inicial del ejercicio ha permitido caracterizar las sondas de temperatura instaladas en las células de horno: es importante iniciar el estudio por esta etapa, puesto que por una parte permite la corrección de los errores de exactitud de medición de temperatura relacionados con el proceso de fabricación del propio termopar, y por otra se evalúan y se compensan eventuales variaciones de temperatura derivadas de la ubicación en la que se instalan las sondas dentro la célula respecto a la temperatura promedio del receptáculo en el que posteriormente se situará la carga de piezas a tratar. Este offset de temperatura se ha calculado para cada termopar tipo K de forma individual y posteriormente se ha programado en el controlador de la sonda dispuesto en cada célula.

Los offset de corrección calculados para el conjunto de los termopares se han situado en el rango de +5 a +10°C, por encima del valor de desviación máxima permitida según requerimientos internos ($\pm 5^\circ\text{C}$): en consecuencia, se han programado las correcciones oportunas de las lecturas de las sondas, eliminando un factor de variabilidad en el proceso.

La siguiente información que hemos obtenido de este ejercicio es el grado de uniformidad de temperatura dentro de la cámara de la célula: la homogeneidad de la temperatura en el horno de tratamiento es un aspecto con una importancia de primer orden, considerado por el fabricante durante el diseño y construcción del equipo, de forma que la adecuada geometría de la cámara y la correcta distribución de los elementos de calefacción permiten obtener los resultados requeridos.

Los requerimientos establecidos por Delphi relativos a la uniformidad térmica de la célula, resultantes de la monitorización de la temperatura en diferentes puntos de la cámara durante 30 minutos, autorizan una desviación máxima de $\pm 5^\circ\text{C}$ respecto a la temperatura de consigna de 940°C.

Los valores que se han observado en la instalación están dentro del rango requerido, tal y como se resume en la tabla siguiente:

Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Célula 5	Célula 6
-3,6°C +2,5°C	-3,3°C/+2,7°C	-4,4°C/+2,5°C	-4,9°C/+2,7°C	-3,8°C/+2,7°C	-2,4°C/+2,4°C

Atendiendo a la especificación SAE ASM-2750E, la cual clasifica los hornos en 6 categorías en función de su homogeneidad térmica, observamos que la instalación se encuadra dentro de la clase 2