



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ÁREA DE
CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA METALÚRGICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010123

**EVALUACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LAS CURVAS DE
ENFRIAMIENTO A TRAVÉS DE LA ADICIÓN DE ADITIVOS EN
TEMPLE DIRECTO**

D^a. Pandal Blanco, Verónica

TUTORA: D^a. Fernández Pariente, Inés

FECHA: JULIO-2018





UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón

ÍNDICE

1. Introducción	8
2. Estado del conocimiento	11
2.1. Descripción del proceso siderúrgico	11
2.2. Definición de chapa	14
2.3. Fabricación de la chapa gruesa	16
2.4. Tratamientos térmicos.....	23
2.4.1. Métodos de tratamiento térmico	23
2.4.2. Mecanismos de transmisión de calor y regímenes de enfriamiento durante los tratamientos térmicos	25
2.5. Equipos y refrigerantes para tratamiento térmico	27
2.6. El agua como refrigerante del tratamiento térmico.....	28
2.6.1. Aditivos para agua refrigerante y modificación del punto de Leidenfrost	28
2.7. Acelerador de enfriamiento para chapa gruesa.....	29
2.8. Metodología de Temple (Quenching).....	30
2.9. Diseño del sistema de Temple	31
2.9.1. Sistema de enfriamiento y método de temple.....	32
2.9.1.1 Enfriamiento Directo.....	32
2.9.1.2 Enfriamiento por Tiempo o Interrumpido	33
2.9.1.3 Enfriamiento por aspersion	33
2.10. Selección de fluido para temple (quenchant).....	34
2.11. Eliminación de Quenchant.....	34
2.12. Requisitos medioambientales.....	34
2.13. Decisión de tratamiento	35

3. Refrigerantes y material.....	36
3.1. Aditivos.....	36
3.1.1. Aditivo A: Polímero sintético soluble en agua.....	36
3.1.2. Aditivo B: Copolímero de óxido de etileno	37
3.1.3. Aditivo C: Solución acuosa concentrada de poliacrilato alcalino	38
3.1.4. Aditivo D: Quenchant polimérico	39
3.1.5. Aditivo E: Tetraborato de dipotasio	41
3.2. Materiales sobre los que se realiza el temple	42
3.2.1. Inconel para ensayo en Ivf Smart Quench.....	42
3.2.2. Acero Inoxidable austenítico 314 para ensayo en piscina.....	44
4. Procedimiento experimental	45
4.1. Equipo de ensayo Smart Quench	45
4.1.1. Dispositivo de adquisición de datos portátil ("unidad manual").....	48
4.1.2. Dispositivo de agitación	49
4.2. Procedimiento de ensayo	50
4.2.1. Calentamiento de horno.....	50
4.2.2. Preparación de la sonda de prueba	50
4.2.3. Preparación de la disolución.....	51
4.2.4. Preparación de la unidad manual.....	51
4.2.5. Medición.....	51
4.2.6. Obtención de resultados.....	52
4.3. Ensayo bañera	53
4.3.1. Obtención de resultados.....	56

5. Resultados	58
5.1. Resultados del Ivf Smart Quench	58
5.2. Resultados del ensayo en bañera.....	64
5.2.1. Obtención de las curvas HTC.....	65
6. Conclusiones	71
7. Bibliografía	72
Anexo A.	74
Anexo B	76
Anexo C	82
Anexo D	89
Anexo E	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema del proceso del proceso siderúrgico	13
Figura 2.2. Microestructura tras el proceso Normalized-rolled.....	19
Figura 2.3. Microestructura tras el proceso Controlled rolled.....	20
Figura 2.4. Microestructura tras el proceso TMCP	21
Figura 2.5. Estrategias de proceso controladas por laminación, control-laminado y termo- mecánicas en el rodillo de acabado para productos largos en acería.....	21
Figura 2.6. Esquema del proceso de fabricación de chapa gruesa	22
Figura 2.7. Diferentes comportamientos de los tratamientos térmicos de laminación en caliente.....	23
Figura 2.8. Curva de ebullición de Nukiyama cuando el agua se usa como refrigerante (Arun Sarasan 2015).....	26
Figura 2.9. Efecto Leidenfrost.....	29
Figura 2.10. Representación de las diferentes fases del Temple.....	31
Figura 3.1. Microestructura de aleación INCONEL 600.....	42
Figura 3.2. Microestructura de acero inoxidable austenítico.....	44
Figura 4.1. Vista general del sistema, Ivf SmartQuenc	46
Figura 4.2. Recipiente portavasos con soporte para facilitar las pruebas de laboratorio	47
Figura 4.3. Contenido del maletín de transporte	47

Figura 4.4. Izquierda: Dimensiones (según norma ASTM D 6482-06). Derecha: Dispositivo de agitación con controlador del motor.....	49
Figura 4.5. Curva de enfriamiento de un aditivo.....	53
Figura 4.6. Bañera utilizada en ensayos	54
Figura 4.7. Colocación de los termopares en la chapa	54
Figura 4.8. Procedimiento de trabajo para introducir la chapa en el horno.....	55
Figura 4.9. Curva de enfriamiento para el ensayo de la bañera.....	56
Figura 4.10. Curva de enfriamiento del aceite a sustituir.....	57
Figura 5.1. Curvas de enfriamiento del Aditivo A	59
Figura 5.2. Curvas de enfriamiento del Aditivo B	59
Figura 5.3. Curvas de enfriamiento del Aditivo C	60
Figura 5.4. Curvas de enfriamiento del Aditivo D	60
Figura 5.5. Curvas de enfriamiento del Aditivo E.....	61
Figura 5.6. Curvas de enfriamiento del Aditivo A en el ensayo de la bañera	64
Figura 5.7. Curvas de enfriamiento del Aditivo C en el ensayo de la bañera	65
Figura 5.8. Variación de la temperatura real y calculada con el tiempo para el Aditivo A	66
Figura 5.9. Variación de la temperatura real y calculada con el tiempo para el Aditivo C.	66
Figura 5.10. Coeficiente de transmisión de calor de los aditivos.....	67
Figura 5.11. Evolución de la HTC (izquierda) y Temperatura (derecha) para el Aditivo A	68

Figura 5.12. Evolución de la HTC (izquierda) y Temperatura (derecha) para el Aditivo C
.....69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características metalúrgicas para aplicaciones de chapa	16
Tabla 4.1. Descripción general de la unidad manual.....	48
Tabla 5.1. Datos calculado con IVF Smart Quench para cada aditivo.....	61
Tabla 5.2. Datos calculados de HTC, por el sistema Ivf Smart Quench.	63

1. Introducción

Las chapas gruesas de acero son productos laminados planos con ciertas propiedades dadas durante su producción. Los principales mercados finales son la construcción, minería, maquinaria, energía y sectores de transporte. De acuerdo con su aplicación en el mercado final, las chapas se clasifican como productos básicos, productos estándar o productos especializados desde una práctica más versátil hasta una más específica.

Las propiedades mecánicas más relevantes del acero están garantizadas para cumplir con las especificaciones del mercado. El contenido en carbono (C) y los elementos de aleación juegan un papel principal en sus propiedades.

Además de la composición química, los tratamientos térmicos también son importantes para ajustar las propiedades. Uno de los tratamientos térmicos más destacados es el enfriamiento rápido; al enfriarse rápidamente, la pieza adquiere dureza y resistencia a expensas de una baja ductilidad. Este tipo de enfriamiento se denomina temple. Existen diferentes tipos de refrigerantes, pero en chapa gruesa, a día de hoy suelen utilizarse aceites, con el fin evitar grandes cambios dimensionales y grietas. La utilización de estos aceites conlleva riesgos, como la inflamabilidad (con el peligro que supone para el operario), y problemas medioambientales que provocan los aceites al desecharlos. Los problemas mencionados han marcado el inicio del desarrollo de nuevos refrigerantes.

La idea y propuesta de este trabajo es evaluar el enfriamiento de chapa utilizando nuevos refrigerantes, aditivos formados a base de polímeros que se añaden al agua, y compararlos con el sistema actual.

El éxito de los estudios podría ser un punto inicial para conseguir mejores propiedades mecánicas del acero destinado a sectores como el de construcción naval, buques presurizados, plataformas offshore, oleoductos...

Durante el desarrollo de este proyecto se desarrollaran los siguientes apartados:

1. Introducción

Donde se hace una breve descripción del contenido a desarrollar durante la realización del proyecto.

2. Estudio del conocimiento

En este apartado recogen los fundamentos teóricos que hay hasta la fecha en este campo, así como la metodología que se va a desarrollar en el proyecto.

3. Refrigerantes y material

Composición química de los refrigerantes utilizados en este trabajo y su aplicación. Además se describen las distintas calidades de materiales utilizados en los ensayos.

4. Procedimiento experimental

En este apartado se detallan el equipo, las condiciones y procedimientos de los ensayos llevados a cabo para conseguir aproximadamente las mismas curvas de enfriamiento que se tenían con el método de enfriamiento utilizado hasta el día de hoy.

5. Resultados

En este apartado se exponen y se analizan los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

6. Conclusiones

Finalmente se enumeran las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados.

7. Bibliografía

En el último apartado se recogen las referencias bibliográficas consultadas para la realización de este trabajo.

2. Estado del conocimiento

2.1. Descripción del proceso siderúrgico

El acero es una aleación de hierro (Fe) y carbono (C) en unas proporciones determinadas. El contenido de carbono debe estar comprendido entre un 0,008% y un 2,11%. Por debajo de este valor se considera hierro puro y por encima, hasta un 6,67%, fundición [1].

La industria siderúrgica se basa en la transformación y el tratamiento de hierro (Fe) y carbono (C). Las materias primas introducidas en el proceso de acero son minerales de Fe, carbono en forma de cok, fundentes, chatarra, agua y gas de sinterización para mejorar la eficacia de la fundición.

El proceso siderúrgico de horno alto, también llamado integral, comienza con el tratamiento del mineral de hierro (Fe), el cual se extrae de minerales poco sulfatados (magnetitas, hematitas, etc.) y se granula antes de ser introducido en el alto horno. Los finos del mineral de hierro junto con los fundentes (caliza) se aglomeran para darles un tamaño apto para su consumo en el horno. Este proceso de conversión se denomina sinterización y el producto conseguido, sinter. Las partículas sinterizadas no exceden los 60 mm de diámetro.

En el horno también se introduce carbón destilado en condiciones anaeróbicas, también denominado cok. El cok siderúrgico es un material duro, poroso y con un contenido en carbono superior al 90 %. Esta mezcla espesa presenta alta resistencia mecánica, tensión de compresión y funciona como combustible en el alto horno.

Esa mezcla de mineral de hierro, sinter y cok se calienta en el horno mediante una inyección de aire caliente. El cok actúa como combustible y elemento reductor del

oxígeno que lleva el hierro. Los fundentes añadidos se encargan de formar la escoria, subproducto que atrapa las impurezas del mineral de hierro.

El producto obtenido en el horno alto es el arrabio, un material con una riqueza en hierro cercana al 95 % y alrededor del 3,5 % de carbono. Para minimizar la cantidad de azufre, un elemento muy negativo para el acero, se le añade posteriormente carburo cálcico. La escoria que también genera el horno está formada por silicio, el manganeso, el azufre y el fósforo. Una vez tratado, este subproducto se utiliza como capa base de carreteras y en la fabricación de cementos.

El arrabio, se separa de las escorias y se lleva a los convertidores, donde el porcentaje en carbono (C) se ajusta mediante la inyección de oxígeno (O_2).

Tras los convertidores, el acero pasa por la metalurgia secundaria de la acería. Su función es ajustar la composición mediante la incorporación de ferroaleaciones y de gases.

El acero se solidifica en la colada continua. En esta instalación se trasvasa el acero líquido a un molde para darle forma de semiproductos. En función de la forma del molde se obtienen desbastes planos (slabs) destinados a la fabricación de productos planos; desbastes de sección cuadrada (blooms) utilizados en la producción de perfiles y carriles; y palanquillas, empleadas en la fabricación de redondos. Estos procesos aprovechan la capacidad de deformación (ductilidad) del acero y se pueden realizar tanto en caliente como en frío.

Cuando la laminación se realiza en frío, el acero sufre alteraciones en su estructura interna por lo que es necesario someter el producto a un proceso de recocido, que permite regenerar esa estructura y mejorar sus características mecánicas.

El proceso siderúrgico, descrito anteriormente, donde se incluye la producción de chapa gruesa se representa en la Figura 2.1; la introducción al alto horno de cok, hierro y sinterización se muestra en primer lugar seguido de la colada continua antes del tratamiento con laminación en caliente.

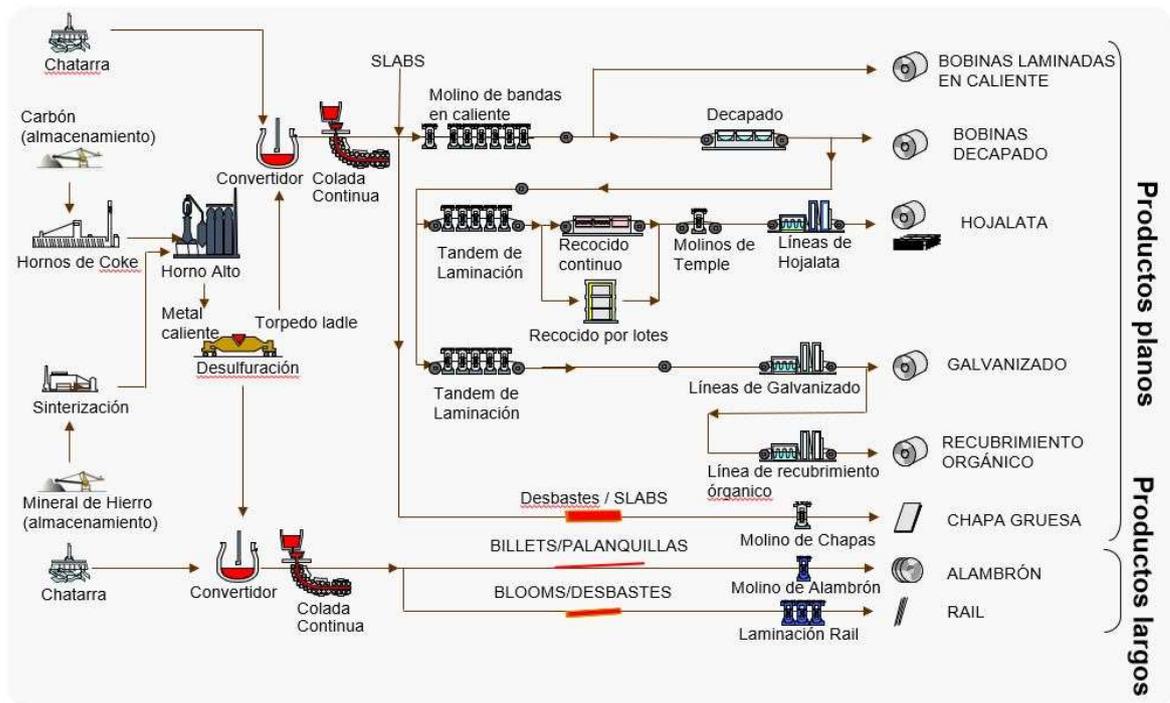


Figura 2.1. Esquema del proceso del proceso siderúrgico

La transformación experimentada por los desbastes después de la colada continua es la laminación en caliente. Para ello se hacen pasar por el tren de laminación, formado por cilindros que giran a la misma velocidad y en sentido contrario [1]. Aquí los desbastes se transforman en chapa gruesa. La presión aplicada durante el laminado es directamente proporcional al alargamiento de la placa. La laminación en caliente ajusta las dimensiones finales de la chapa gruesa.

2.2. Definición de chapa

La chapa es un producto plano de acero al carbono laminado con un ancho que puede ir desde 1 metro hasta 5,5 metros y con espesores comprendidos entre 4,75 mm y 150 mm y una longitud de hasta 38,7 m [2]. El proceso de fabricación de una chapa puede seguir diferentes rutas metalúrgicas en función del producto que se pretenda conseguir, estas rutas son la combinación de una composición química, una deformación a cierta temperatura y complejos tratamientos térmicos que permiten alcanzar unas determinadas propiedades finales.

Las propiedades finales que se buscan durante el proceso de fabricación de una chapa son las siguientes:

- Resistencia, es una propiedad del material que se mide de dos formas diferentes:
 - ✓ Resistencia a tracción [3]: se define como la carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
 - ✓ Límite elástico [3]: es la tensión máxima que un material elastoplástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

El límite elástico es la propiedad que se suele usar como criterio en las condiciones de proyección de estos componentes, pues estas chapas generalmente permiten poca o ninguna deformación plástica a la hora de formar una pieza (por ejemplo puentes, torres eólicas, etc.).

- Tenacidad [3]: es la energía de deformación total que puede absorber o acumular un material antes de alcanzar la rotura en condiciones de impacto, por acumulación de dislocaciones. Se debe principalmente al grado de cohesión entre moléculas. Cualquier pequeño defecto en las piezas puede contribuir a la disminución de la

tenacidad, en cualquier caso, el material no debería dañarse ni destruirse de forma dramática en caso de fallo, dentro de su rango de temperaturas de trabajo.

También se define la tenacidad como la capacidad que tienen los materiales de absorber energía antes de romperse. La energía que absorbe una pieza depende de la fuerza aplicada y de su deformación. Recordando que el trabajo es la fuerza por el espacio recorrido, a igualdad de fuerza aplicada, cuanto mayor sea la deformación de la pieza antes de romperse, mayor será el trabajo desarrollado por la fuerza y, por tanto la energía absorbida por el material. Esta propiedad es la segunda más importante en una chapa.

- Soldabilidad [4]: es la capacidad que tienen los materiales, de la misma o diferente naturaleza para ser unidos de manera permanente mediante procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar alabeos. La Soldabilidad de un material constituye una propiedad del mismo muy compleja y en muchas ocasiones queda condicionada a variaciones metalúrgicas y sus propiedades. Esto significa que un material puede tener buena soldabilidad, cuando se puede lograr una unión soldada con propiedades mecánicas y físico-químicas adecuadas, por cualquiera de los procesos de soldadura y sin necesidad de utilizar técnicas.

La resistencia, tenacidad y soldabilidad son las características más notables para chapa gruesa; estos están acondicionados durante la laminación en caliente. Otras propiedades mecánicas se detallan en la Tabla . de acuerdo con la aplicación del producto. [5].

Aplicación	Características de las propiedades mecánicas
Construcción	Alta resistencia y tenacidad
Minería y maquinaria	Abrasión y resistencia al desgaste y dureza
Recipiente de presión	Alta tenacidad y resistencia, solidez interna y resistencia ambiental.
Tuberías	Moderada a alta resistencia y tenacidad baja temperatura
Trasporte	Alta tenacidad y resistencia moderada

Tabla 2.1. Características metalúrgicas para aplicaciones de chapa

2.3. Fabricación de la chapa gruesa

El proceso de fabricación de una chapa gruesa mediante laminación en caliente, consta de varias etapas que podrían agruparse en dos grandes bloques.

- Recalentamiento

En el proceso de recalentamiento, los desbastes procedentes de la colada continua son introducidos en un horno de recalentamiento. Los desbastes se calientan homogéneamente por encima de la temperatura de austenización, a 1200 ° C aproximadamente.

El propósito del recalentamiento es disolver todos los microaleantes en la solución. La solubilidad del producto es escogida en función de la cantidad de carbonitruros microaleantes que hay en la solución. Además, introduce suficiente plasticidad para hacer el desbaste laminable en el tren y reducir las fuerzas necesarias en la caja de laminación.

Durante el calentamiento el desbaste atraviesa diferentes zonas del horno (precalentamiento, calentamiento e igualación o empapado). La temperatura de empapado controla el tamaño de grano inicial de la austenita. Este tamaño de grano inicial suele estar entre 300 y 1000 μm para desbastes de colada continua. Un excesivo calentamiento causará un crecimiento del tamaño de grano de la austenita, formación de cascarilla, una significativa decarburación y puede dar lugar a un aumento de tiempos en función del tipo de laminación que se precise posteriormente (laminación controlada).

Es preferible un recalentamiento bajo a 1150°C para los materiales que vayan a ser laminados termomecánicamente para obtener una disolución parcial de los carbonitruros y, por lo tanto, limitar el crecimiento de grano de austenita produciendo de esta manera un tamaño de grano más fino y uniforme, ahorrar energía en el horno, obtener un tamaño de grano de la ferrita más fino, reducir los tiempos de espera en la laminación controlada y conseguir mejor tenacidad.

- Laminación.

Los desbastes calentados a la temperatura correcta son deformados en esta etapa hasta alcanzar la geometría y propiedades finales de las chapas. Por tanto se definen las dimensiones de la lámina, primero su ancho y, en segundo lugar, su grosor. Las proporciones finales de la lámina de acero y el tamaño del grano se definen simultáneamente en esta etapa, que se divide en dos, el desbastado (roughing) y el acabado (finishing).

- Desbaste (roughing).

El objetivo es definir el ancho del material y realizar una primera deformación hasta un espesor intermedio. No se hace ningún tipo de control de temperatura y la laminación siempre está en una temperatura diferente a la de recristalización. El desbaste sufre la deformación más severa; su ancho y grosor son muy reducidos.

Los desbastes recalentados y descascarillados (eliminación del óxido de hierro superficial) son sometidos a un número de reducciones (pasadas) en la caja de laminación hasta obtener un preancho. Una vez conseguido el preancho deseado, se gira la chapa 90 grados y se realizan otra serie de pasadas hasta conseguir el ancho final. Finalmente se vuelve a girar la chapa 90 grados.

Metalúrgicamente en esta etapa se debe romper la estructura del desbaste y refinar el tamaño de grano austenítico a través de una recristalización repetida. Esto garantiza la isotropía del tamaño de grano. Es necesaria una reducción como mínimo de 3:1 para asegurar su penetración interna, reducciones más pequeñas conducen a tamaños de grano de austenita grandes y variados, debido a una menor penetración en el centro de la chapa con la consiguiente pérdida de tenacidad. En definitiva, este proceso de laminación no influye notablemente en los granos, se recuperan rápidamente de la deformación por laminación debido a su energía interna retenida después del proceso de recalentamiento.

- Acabado (finishing).

Es la etapa más importante del tratamiento de la chapa donde se emplean los controles de proceso para garantizar que la chapa tenga las propiedades específicas finales. La hoja de transferencia obtenida del desbaste se lamina de nuevo. En este punto, los granos no retienen suficiente energía para poder recuperarse de la deformación por laminación. El tamaño del grano se define mediante el uso de diferentes estrategias, que clasifican, de mayor a menor tamaño de grano, y que se utilizan para las chapas de tipo estándar y especial. Podemos distinguir estas 3 estrategias:

1. Laminación normalizada (Normalized-rolled)

Se utiliza en aceros con niobio (Nb) y vanadio (V). Estos aceros son laminados controlando la temperatura final con el propósito de aumentar la resistencia y tenacidad. En este proceso, los granos de ferrita son más finos, tienen menos cantidad

de carbono (C) y se introduce una espera intermedia antes del acabado. La Figura 2.2, muestra la microestructura de un acero tras la laminación normalizada.

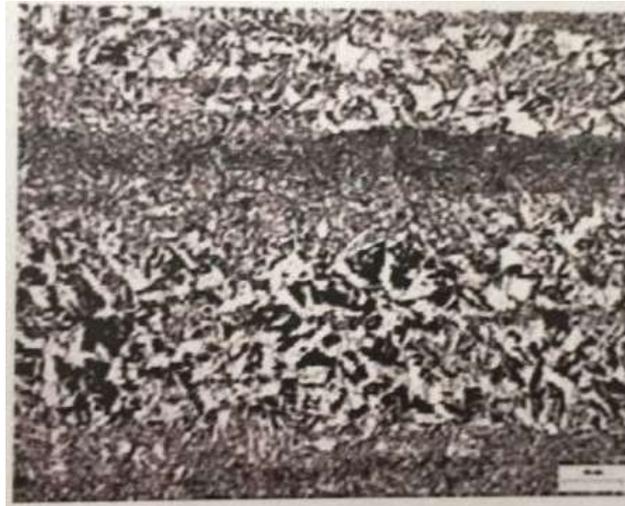


Figura 2.2. Microestructura tras el proceso Normalized-rolled

2. Laminación controlada (Controlled rolled)

Los aceros son laminados empleando mecanismos que no utilizan el enfriamiento acelerado. En este proceso el acabado se termina a una temperatura por debajo de Ar_3 , dentro del rango $\alpha+\gamma$. Se utiliza niobio (Nb), como aleante, por su efecto de recristalización, la precipitación inducida por deformación genera austenita pancake, la deformación continúa por debajo de la temperatura Ar_3 , temperatura que marca el inicio de la región $\alpha+\gamma$, y las dislocaciones se desarrollan dentro de los granos de ferrita.

Una excesiva deformación de la ferrita aumenta el límite elástico pero influye en la tenacidad (DBTT). La Figura 2.3, muestra la microestructura de un acero tras la laminación controlada.



Figura 2.3. Microestructura tras el proceso Controlled rolled

3. Laminación termo-mecánica (TMCP)

Este tipo de laminación persigue condicionar a la austenita para que produzca granos de ferrita más finos y como consecuencia se conseguirá una mayor resistencia y tenacidad usando aleantes en su composición. Para ello se utiliza niobio (Nb) para restringir el tamaño de grano de la austenita.

Después hay que retardar la recristalización de la austenita durante el laminado. La austenita debe experimentar una alta velocidad de nucleación y un bajo crecimiento de grano de la ferrita, esto creará una mayor superficie. Entonces la ferrita nucleará dentro de las bandas de deformación de la austenita, recubriendo los límites de las subestructuras y los carburos y nitruros sin disolver. Además, es necesario garantizar la reducción mínima por pasada durante el acabado para inducir una precipitación de los carburos microaleados. La Figura 2.4, muestra la microestructura de un acero tras la laminación termo-mecánica.

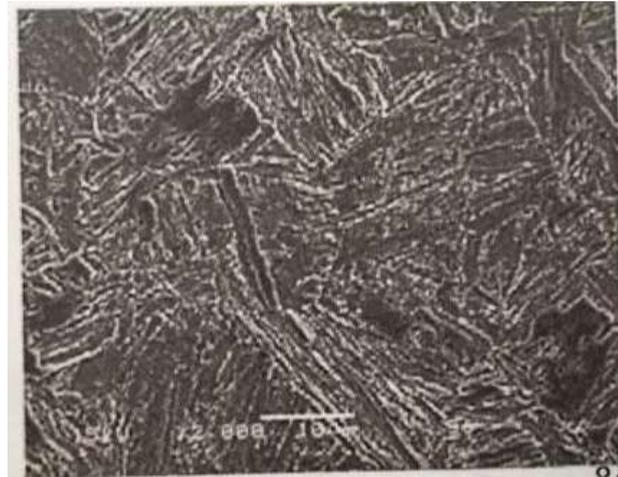


Figura 2.4. Microestructura tras el proceso TMCP

A continuación se muestra una comparativa de los tres procesos de laminación con respecto a la temperatura y granulometría que hay en cada uno. La Figura 2.5 muestra las estrategias de proceso controladas por laminación, control-laminado y termo-mecánicas en el rodillo de acabado para productos largos en acería

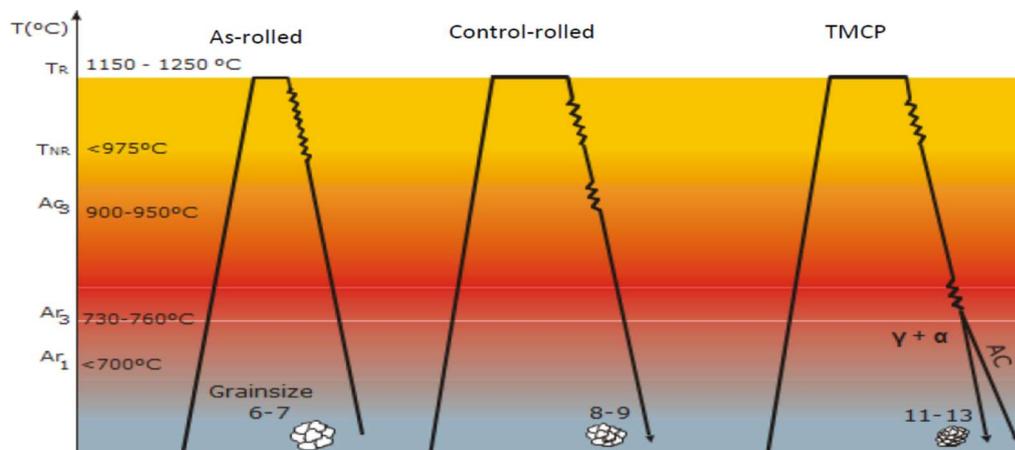


Figura 2.5. Estrategias de proceso controladas por laminación, control-laminado y termo-mecánicas en el rodillo de acabado para productos largos en acería

Finalmente la lámina laminada en caliente se trata térmicamente para controlar la recristalización de los granos al enfriarlos en la mesa de salida. Una vez que se

obtienen las hojas laminadas en caliente, la placa gruesa se endereza para corregir las imperfecciones de ondulación. Una cizalla de corte, corta sus defectos laterales para mantener el ancho nominal, antes de la inspección y la prueba. Las chapas gruesas finales se apilan en el almacén de planchas a la espera de la distribución.

ArcelorMittal fabrica en Asturias 600.000 toneladas de chapas gruesas por año mediante colada continua, a partir de desbastes de 280x1600 mm y 235x1200 / 1400/1600 mm. Recientemente han introducido la producción de desbastes de 247x2130 mm. [6]. Los desbastes son transformados en chapa gruesa en el tren de laminación en caliente. Estos deben ser lo suficientemente resistentes como para resistir las condiciones de servicio durante su funcionamiento, evitando fracturas dúctiles o quebradizas, grietas en las piezas y / o propagaciones de límites. Todo el proceso de laminación en caliente, de chapa gruesa de ArcelorMittal se muestra en la Figura 2.6

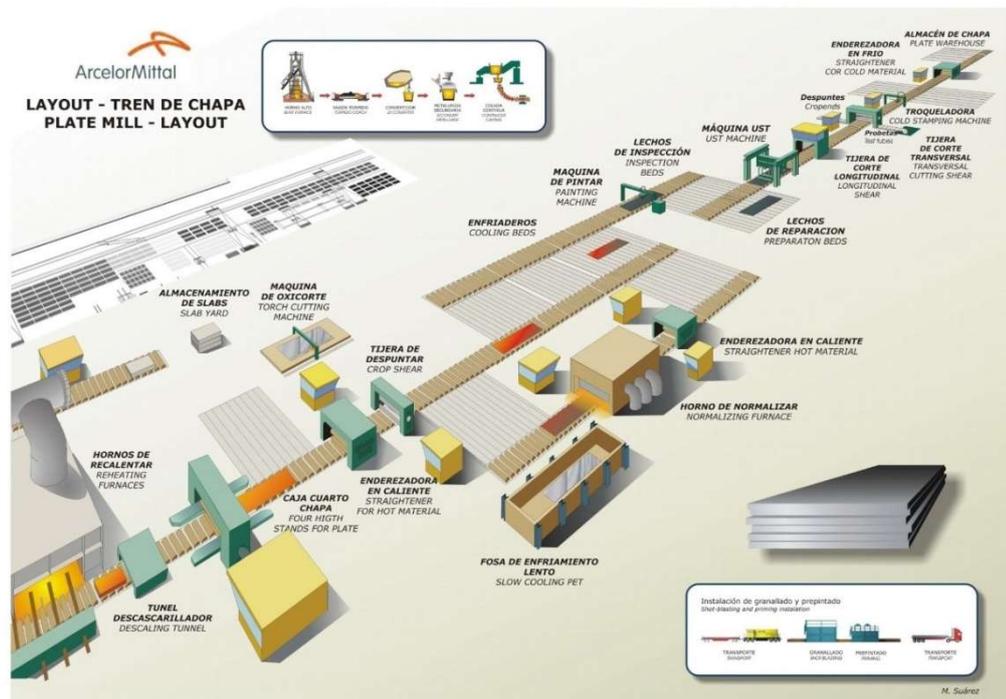


Figura 2.6. Esquema del proceso de fabricación de chapa gruesa

Nota: Las regiones de las fases nombradas en la explicación de la laminación se encuentran en el diagrama Fe-C del Anexo A.

2.4. Tratamientos térmicos

El tratamiento térmico posterior, a la laminación en caliente, enfría la estructura austenítica por encima de A_3 (ver diagrama en el anexo A) en condiciones isotérmicas controladas. Estas condiciones de enfriamiento definen la transformación de la austenita mediante reacciones perlíticas, bainíticas o martensíticas, reacciones que reestructuran la red del acero desde austenita a perlita, bainita o martensita y las consiguientes propiedades relacionadas con cada microestructura.

2.4.1. Métodos de tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos homogeneizan y controlan el tamaño del grano durante la recrystalización. El papel de los tratamientos térmicos no solo limita el tamaño final del grano, sino que también controla el movimiento difusional en su disposición atómica. La velocidad de enfriamiento controlada promueve la reacción austenítica para conseguir diferentes estructuras que determinan las propiedades mecánicas deseadas. La Figura 2.7, representa diferentes enfriamientos en la curva TTT.

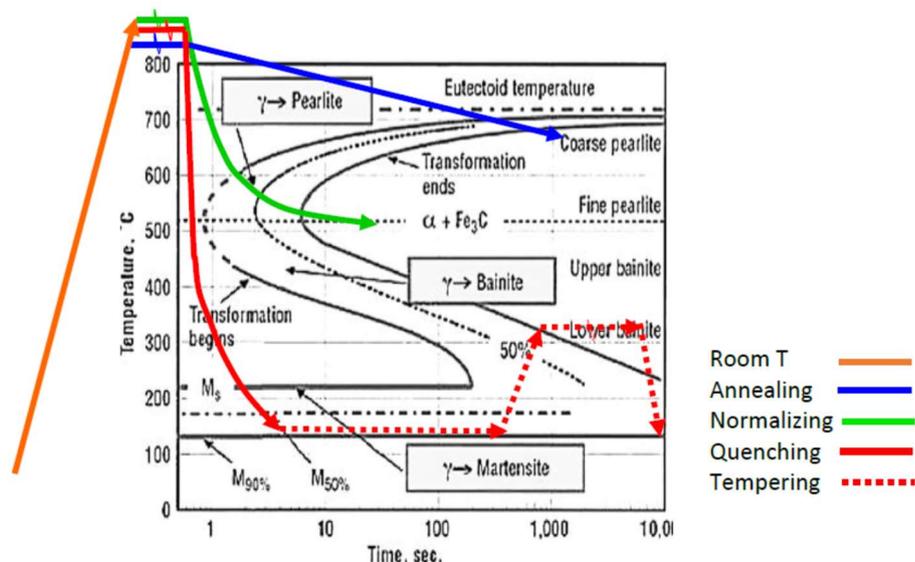


Figura 2.7. Diferentes comportamientos de los tratamientos térmicos de laminación en caliente

La placa fría final tendrá diferentes propiedades mecánicas basadas en el tratamiento térmico aplicado:

- I. Recocido [7]: El recocido es un tratamiento térmico propio de los productos semielaborados y acabados donde está diseñado para reducir al mínimo las tensiones internas creadas durante los procesos de fabricación.

El recocido conlleva austenizar el acero, permitir que se empape durante un periodo de tiempo y, por último, que se enfríe muy despacio en un horno.

Como resultado, se obtiene estructuras que están próximas al equilibrio con tamaño de grano grueso de ferrita, cementita y perlita.

Se pueden diferenciar 3 tipos de recocidos. El primero es un recocido completo, que es el más común. Se calienta la chapa hasta unos 10-30 °C por encima de A3, se mantiene a esa temperatura entre 30 y 60 minutos por pulgada de espesor y después se enfría despacio en un horno.

El segundo es un recocido inter-crítico, más común para aceros con un alto contenido en carbono. Se calienta hasta una temperatura justo por encima de A1, se mantiene a esa temperatura durante mucho tiempo, entre 18 y 24 horas, y se enfría al aire. Como resultado se maximiza la suavidad y la ductilidad.

Por último, está el recocido sub-crítico. El material se calienta por debajo de A1, no se llega a formar austenita, y se deja enfriar al aire. La velocidad de enfriamiento tiene muy poco efecto en las propiedades.

- II. Normalización [8]: consiste en calentar una pieza hasta la austenización (parcial o total), seguido de un enfriamiento a temperatura ambiente. Se utiliza generalmente para las piezas de acero que requieren la máxima resistencia mecánica y resistencia al impacto, es decir se utiliza casi exclusivamente para los aceros de construcción al carbono o de baja aleación.

La chapa gruesa se normaliza dentro de un horno bajo una atmósfera de aire controlable. Las condiciones del aire definen la dispersión de la perlita sobre la estructura y estimulan la cristalización en diferentes estructuras. Esta metodología ofrece un complemento a otros tratamientos de calor.

- III. Temple (Quenching, temple rápido): tras una austenización de la chapa esta se sumerge en agua, aceite, salmueras, etc. para que se produzca un enfriamiento rápido. Tras el temple aumenta la dureza del material disminuyendo su tenacidad y ductilidad. La estructura re-austenítica se transforma rápidamente en una microestructura martensítica completa ya que la difusión atómica está lejos de las condiciones de equilibrio.
- IV. Revenido: cómo se puede observar en el esquema de la Figura 2.7, este tratamiento es la continuación del temple. Tras el temple, el revenido implica un aumento de la temperatura por debajo de la transformación austenítica. Tras el revenido la pieza recupera parte de la dureza y ductilidad perdida durante el temple.

2.4.2. Mecanismos de transmisión de calor y regímenes de enfriamiento durante los tratamientos térmicos

La transferencia de calor depende en gran medida de la temperatura de la superficie de la placa gruesa que se está enfriando, de la temperatura del refrigerante y del contacto entre ambos. La eficiencia del enfriamiento con agua depende de la temperatura en la superficie del material. El agua de enfriamiento sigue el comportamiento de la curva de ebullición de Nukiyama, por tanto, dependiendo de la temperatura a la que se encuentre, la velocidad de enfriamiento variará siguiendo el esquema de la Figura 2.8.

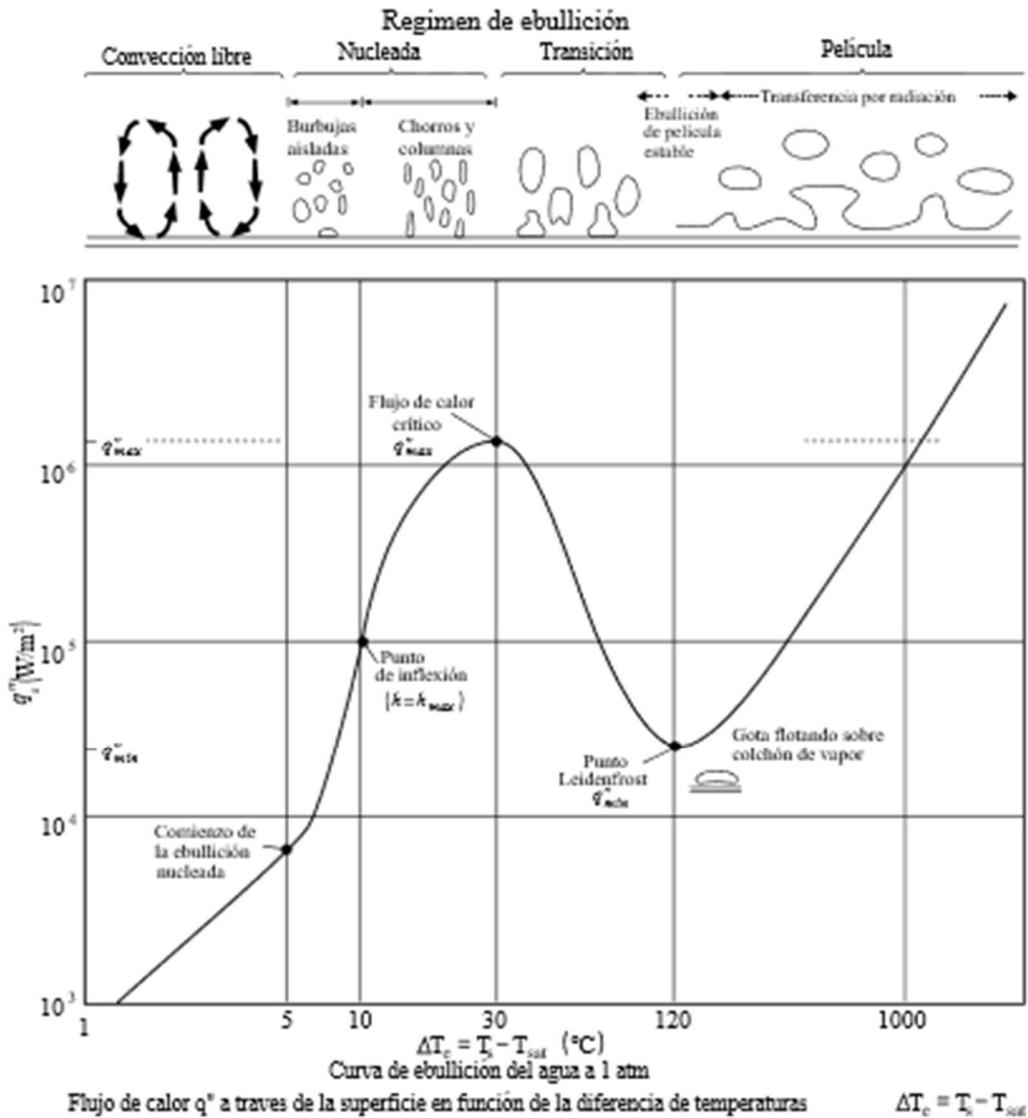


Figura 2.8. Curva de ebullición de Nukiyama cuando el agua se usa como refrigerante (Arun Sarasan 2015)

La curva representa cuatro regímenes diferentes del sistema de refrigeración por convección de un líquido que moja una superficie sólida. Inicialmente, film boiling, no hay contacto sólido-líquido, es decir, no hay contacto entre la superficie del material y el agua, ya que entre ellas hay una película de vapor de agua que impide el contacto. La temperatura disminuye, pero la eficiencia de la transferencia de calor es baja. En la zona de transition boiling, ya existe el contacto entre el sólido y el refrigerante, a pesar

de la turbulencia y las condiciones incontrolables de este régimen, la eficiencia de la transferencia de calor aumenta considerablemente. En la zona de nucleate boiling, las burbujas que se van formando están en continuo movimiento y no quedan retenidas en la superficie, al alcanzar el flujo de calor máximo, comienzan a elevarse sobre la superficie del metal. Esto da lugar a una eficiencia alta y que va disminuyendo con la temperatura. La eficacia de ebullición nucleada depende del efecto de burbujeo; tan pronto como las burbujas colapsan en el líquido, la eficiencia de la transmisión de calor se reduce. Por último, en la zona de convección, no hay ebullición del agua y, por lo tanto, no se generan burbujas, solo hay flujo de agua. La eficiencia es muy pobre.

2.5. Equipos y refrigerantes para tratamiento térmico

Las chapas gruesas se apagan sumergiéndolas dentro de un baño de piscina; pero la controlabilidad de esta metodología es limitada. El baño de enfriamiento depende del contenido del acero: los aceros al carbono con tinción se templean fácilmente en baños de agua, mientras tanto, los productos de acero inoxidable requieren refrigeración en baños de aceites, por lo que la dureza se escarifica para mejorar otras propiedades mecánicas. Sin embargo, las bajas tasas de enfriamiento de los baños de aceite evitan las tensiones internas, producen desechos similares a los lodos que reducen la eficiencia del enfriamiento.

Se estudian nuevos fluidos de temple para mejorar esta tecnología. El tratamiento sería lo suficientemente eficiente como para obtener productos de buena calidad sin fisuras si los rangos de temperatura de trabajo y las propiedades del fluido de enfriamiento son bien conocidos. Algunos estudios promueven el uso de bajos volúmenes de grafeno para mejorar las características superficiales más confiables: la humectabilidad y la rugosidad de la pieza.

2.6. El agua como refrigerante del tratamiento térmico

El objetivo del tratamiento térmico de chapa gruesa es desplazar el flujo de calor crítico (Critical heat flux, (CHF)) a gradientes de temperatura más altos; implicando procedimientos con tasas de enfriamiento más largas. Las condiciones del refrigerante influyen en la eficiencia de cada régimen de ebullición.

Uno de los refrigerantes más comunes utilizados en las acerías es el agua; es fácil de manejar y no es peligroso, es fácil de usar y de bajo coste. Por otro lado, sus propiedades corrosivas limitan la eficiencia convectiva y favorecen el crecimiento microbiológico, motivando la búsqueda de aditivos que podrían mejorar la operación.

2.6.1. Aditivos para agua refrigerante y modificación del punto de Leidenfrost

El efecto Leidenfrost [9] es un fenómeno en el que una gota de líquido, en casi contacto con un sólido, más caliente que el punto de ebullición del líquido, produce una capa de vapor aislante que lleva a dicha gota hasta la temperatura de ebullición rápidamente. Sin embargo, si el sólido se mantiene a una temperatura mucho mayor que el punto de ebullición del líquido, se forma una película delgada de vapor entre el sólido y el líquido. Esta delgada película de vapor evita que el líquido este en contacto con el sólido, lo que inhibe la nucleación de burbujas.

La adición de tensioactivos no solo mejora el contacto líquido-sólido; también pueden cambiar los límites de los regímenes de ebullición. Cuando se calienta un material en una piscina grande con líquido, el flujo de calor normalmente se representa frente a diferencia de temperatura entre la superficie del material y la temperatura de saturación del líquido

La rugosidad de la superficie de acero es un parámetro dominante; controla el comportamiento del punto de Leidenfrost. Si alguna impureza o aditivo precipita en el exterior, la transferencia de calor podría aumentar el efecto Leidenfrost. Los surfactantes como polímeros, sales o aceites, promueven la formación de burbujas durante el enfriamiento y reducen el lapso de tiempo de ebullición de transición mejorando el régimen de ebullición nuclear o la vida útil del régimen de ebullición de la película. Si los aditivos extienden el estado de ebullición nuclear, los cambios en el punto de Leidenfrost promueven la transferencia de calor, se crean más burbujas debido a la reducción del ángulo de contacto entre el sólido y las burbujas, lo que mejora la humectabilidad del sistema de enfriamiento para chapas gruesas [10]. La Figura 2.9, muestra la representación de la evolución del punto de Leidenfrost de una gota.

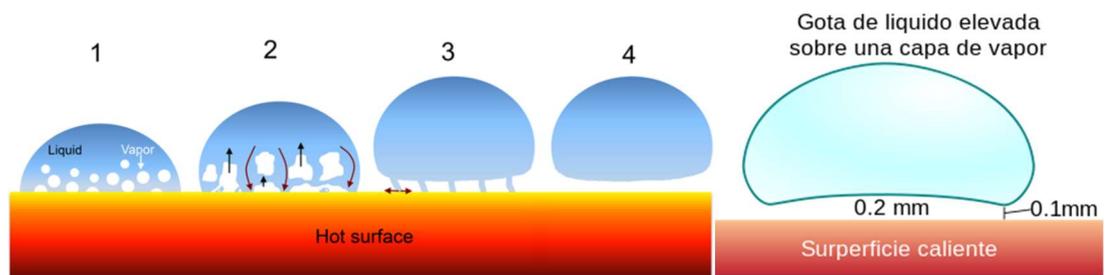


Figura 2.9. Efecto Leidenfrost

2.7. Acelerador de enfriamiento para chapa gruesa

En ArcelorMittal, se está desarrollando un nuevo procedimiento innovador de ACC (Accelerated cooling), para satisfacer las debilidades del sistema actual. Actualmente el equipo somete la placa a un choque de temperaturas, disminuyendo el margen de temperatura de la pieza con un refrigerante en cascada en ambas superficies durante 10 segundos. Después se mueve la pieza para que se enfríe suavemente bajo dos impactos de chorro laminar simétricos. La difusión de calor desde el núcleo a la superficie es proporcional en todas las direcciones. Los chorros de tubería gobiernan la conducción

de calor de la pieza manteniendo constante la temperatura en la superficie, esto pretende homogeneizar tanto como sea posible las microestructuras internas en toda la chapa gruesa.

Lo que se pretende en este proyecto es cambiar el sistema actual, debido a que el refrigerante que se está empleando es aceite, y supone un riesgo para el operario como para el medio ambiente a la hora de deshacernos de él cuando ya no es operativo. La propuesta es utilizar un aditivo biodegradable, es decir que sea respetuosa con el medio ambiente, disuelto en agua, por tanto se evitaran los problemas, de inflamabilidad del aceite, y los medioambientales que surgen al desecharlo.

2.8. Metodología de Temple (Quenching)

La metodología de temple con aditivos disueltos en agua, que es un tipo de tratamiento térmico descrito anteriormente en el punto 2.4.1

Independientemente de las condiciones del temple que se realice, el enfriamiento generalmente ocurre en tres etapas distintas, cada una de las cuales tiene características muy diferentes.

- I. Fase de vapor (vapor phase): La primera etapa de enfriamiento se caracteriza por la formación de una película de vapor alrededor del componente. Este es un período de enfriamiento relativamente lento, cuya transferencia de calor ocurre por radiación y conducción a través de la manta de vapor.
- II. Fase de ebullición (boiling phase): La película de vapor estable finalmente colapsa y el enfriador frío entra en contacto con la superficie de metal caliente, lo que resulta en ebullición nuclear y altas tasas de extracción de calor.

III. Fase de convección (convection phase): La ebullición cesa y el calor se elimina por convección en el líquido. El calor se elimina muy lentamente durante esta etapa.

La Figura 2.10 muestra la evolución de las diferentes fases por las que pasa un enfriamiento de temple.

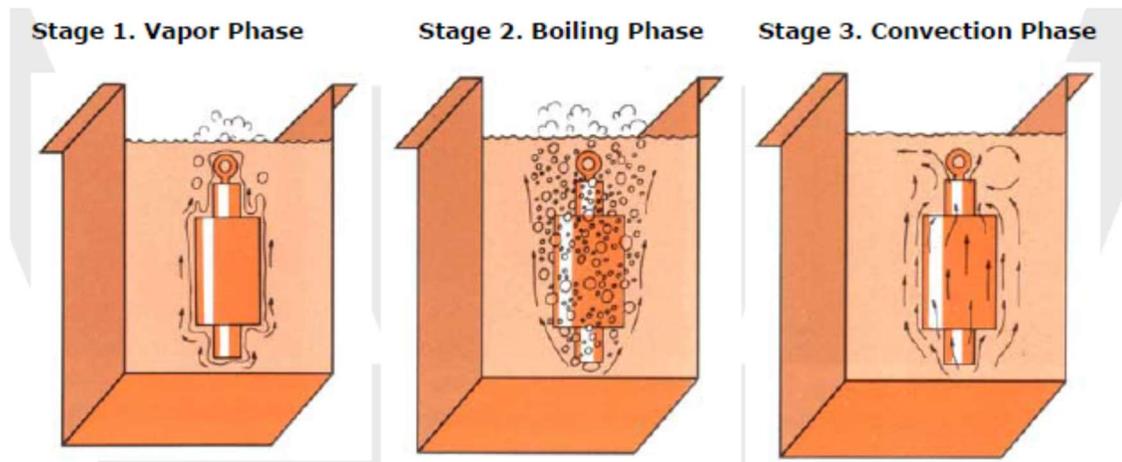


Figura 2.10. Representación de las diferentes fases del Temple

La evolución de la temperatura durante un temple se puede medir usando sondas equipadas con termopares, colocándolas, en la chapa a diferente profundidad, superficie, un cuarto de superficie y centro. [11]

2.9. Diseño del sistema de Temple

Un aspecto importante del enfriamiento que a menudo se pasa por alto es el diseño del sistema de enfriamiento que puede tener un efecto importante en el rendimiento obtenido del proceso.

Hay varios factores que deben tenerse en cuenta al diseñar un nuevo sistema de apagado o modificación de uno existente, y son:

- Manejo de componentes
- Tamaño y capacidad del tanque

- Materiales de construcción
- Disposición del canal de enfriamiento
- Agitación
- Sistemas de calefacción y refrigeración
- Filtración Quenchant
- Almacenamiento de Quenchant

2.9.1. Sistema de enfriamiento y método de temple

El diseño del sistema de temple, especialmente el grado de agitador y el método de circulación del agente de temple, así como el control de la temperatura del fluido, pueden influir en las características de temple obtenidas y, por lo tanto, afectar a la selección del agente de temple.

El método de enfriamiento puede influir directamente en la velocidad de enfriamiento de un determinado agente de enfriamiento y, por lo tanto, en los resultados obtenidos.

Para alcanzar los resultados mencionados, existen varios métodos, como el temple directo, el enfriamiento por tiempo o el enfriamiento interrumpido y el enfriamiento por pulverización.

2.9.1.1 Enfriamiento Directo

El enfriamiento directo es el método más común y se utiliza en muchos tipos diferentes de hornos. El componente va directamente del horno al temple y se retira al final del ciclo de enfriamiento. Es un proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento, generalmente rápido con una velocidad mínima llamada "crítica".

El fin que se pretende conseguir con el ciclo del temple es aumentar la dureza y resistencia mecánica, transformando toda la masa en austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento rápido la austenita se convierte en martensita, que es el constituyente típico de los aceros templados.

El factor que caracteriza a la fase de enfriamiento es la velocidad del mismo que debe ser siempre superior a la crítica para obtener martensita.

La velocidad crítica de los aceros al carbono es muy elevada.

2.9.1.2 Enfriamiento por Tiempo o Interrumpido

El enfriamiento por tiempo es una práctica utilizada para cambiar la velocidad de enfriamiento durante el proceso de enfriamiento. El objetivo del enfriamiento en el tiempo es enfriar la pieza rápidamente a una temperatura por debajo de la nariz del diagrama de transformación, evitando la formación de productos intermedios de transformación más blandos. El componente es entonces transferido del primer quenchant a un segundo quenchant medio con una tasa de enfriamiento más lenta para la transformación martensítica. Por ejemplo, un forjado grande puede primero ser apagado en agua por un cierto tiempo y luego transferido a un polímero para reducir la velocidad de enfriamiento durante la fase de convección. Alternativamente, un polímero quenchant puede ser utilizado como el primer medio de enfriamiento y aire como el segundo. Esta práctica se puede utilizar para reducir el enfriamiento de las grietas y la distorsión.

2.9.1.3 Enfriamiento por aspersión

Este proceso de temple está estrechamente asociado con los procesos de inducción y endurecimiento por llama. El quenchant está aplicado a los componentes a través de boquillas de spray en un quenchant rig, y las características de quenching pueden ser influenciadas por el volumen y la presión del quenchant, y el diseño de las boquillas de spray.

2.10. Selección de fluido para temple (quenchant)

Hay muchos factores a considerar cuando se selecciona el quenchant más adecuado para una aplicación en particular:

- Composición del material y tamaño de la sección del componente
- Requisitos de especificación
- Tipo de horno
- Sistema de enfriamiento
- Método de enfriamiento
- Control de distorsión
- Eliminación de Quenchant (temple)
- Enfriamiento por inmersión
- Requisitos medioambientales

2.11. Eliminación de Quenchant

La eliminación segura del quenchant es de alta prioridad para la industria. El método de tratamiento o eliminación de los residuos puede influir en el tipo de fluido seleccionado, dependiendo de factores tales como la biodegradabilidad del producto, las características locales y la calidad del mismo.

2.12. Requisitos medioambientales

La legislación sobre salud y seguridad es ahora un factor importante en la industria manufacturera actual. Se hace mayor hincapié en los aspectos sanitarios, de seguridad y medioambientales del proceso de temple. El humo y los riesgos de incendio asociados con el temple del aceite pueden eliminarse mediante el uso de agentes poliméricos que, por lo tanto, deben considerarse siempre que sea posible.

2.13. Decisión de tratamiento

Dentro de los tipos de sistemas de enfriamiento descritos durante el apartado, el utilizado durante la realización de este proyecto será el Enfriamiento Directo.

Una vez salida la chapa gruesa del torno de laminación se le realizará el temple directo, con el nuevo tratamiento propuesto, sin alterar las propiedades mecánicas del acero, para conseguir el acabado sin riesgos para el operario, debido a que el actual sistema de refrigeración, aceite, puede causar problemas de inflamabilidad, además de que genera más problemas medioambientales a la hora de ser reciclados los residuos. Por tanto el nuevo sistema resultará beneficioso tanto en seguridad, como en el área medioambiental y además resultará más económico.

3. Refrigerantes y material

3.1. Aditivos

Durante la realización del proyecto se utilizarán diferentes aditivos, para conseguir replicar las curvas de enfriamiento, proporcionadas por las empresas suministradoras. (Anexo B)

A continuación se hace una breve descripción de los aditivos a utilizar.

3.1.1. Aditivo A: Polímero sintético soluble en agua

El aditivo A es un fluido de temple basado en polímeros sintéticos, aditivos anticorrosivos, antioxidantes y humectantes, especialmente diseñado para el temple másico o de inducción de aceros y aluminio.

Aplicación

- Temple de aceros y de aleaciones no férricas, para conseguir una estructura final de máxima transformación con la mínima distorsión del material.
- El aditivo A proporciona una amplia gama de velocidades de enfriamiento estrechamente controladas en función de su concentración. A baja concentración dará velocidades de enfriamiento más elevadas que el agua y a altas concentraciones se consigue una solución con características similares a las de un aceite de temple.
- La multifuncionalidad del producto permite que los aceros de más baja aleación puedan ser tratados con éxito.
- Especialmente indicado para temple por inducción

Beneficios

- Un medio de enfriamiento tan rápido como se precise.
- Una velocidad de temple estable, con curvas de enfriamiento uniformes.
- Uniformidad de durezas en los aceros tratados.
- Se elimina el peligro de inflamación y formación de humos.
- Permite obtener piezas limpias después del tratamiento, eliminando costos de limpieza.
- Más altos índices de producción, al tener un calor específico más elevado que los aceites de temple.
- El uso de este aditivo hace posible conservar el suelo de la planta limpio con un simple enjuague con agua.

3.1.2. Aditivo B: Copolímero de óxido de etileno

El aditivo B es un polialquilenglicol soluble en agua de alto rendimiento, fluido base de lubricante con una viscosidad de 55000 mm²/s a 40 °C. Además muestra una alta estabilidad térmica y de cizallamiento.

La alta viscosidad y la baja volatilidad del aditivo B, lo convierten en un producto muy versátil, adecuado para la lubricación a alta temperatura. Encuentra extensa aplicación en temple, en fluidos para metalurgia e hidráulicos a base de agua, formulaciones de fluidos, demostrando una excelente estabilidad al cizallamiento y proporcionando buena lubricidad a los fluidos acabados. Y es soluble en agua a temperaturas inferiores a 75 °C.

Beneficios

- Elimina el riesgo de incendio debido a la relativamente alta concentración de agua.

- Elimina los residuos de humos, hollín y aceite, creando un ambiente de trabajo más limpio y facilitando el mantenimiento de los equipos.
- Un alto grado de flexibilidad, ya que las condiciones óptimas de enfriamiento para un material o componente específico pueden determinarse mediante el control de la concentración, la temperatura del baño y/o la agitación.
- Minimiza los requisitos de sustitución y control comunes a los refrigerantes de PVA y de aceite soluble debido al deterioro y/o la oxidación.
- Minimiza la tensión residual, la distorsión y las manchas blandas asociadas con el temple en agua de los materiales a base de aluminio.
- Produce componentes limpios listos para su procesamiento posterior - las pérdidas por arrastre se reducen en comparación con el aceite y no es necesario desengrasar.
- El refrigerante es totalmente soluble en agua (por debajo de su punto de enturbiamiento) y se mezcla fácilmente con la concentración de funcionamiento.
- Buenas propiedades anticorrosivas, protegiendo el sistema de temple.
- Vida útil prolongada debido a los bajos niveles de arrastre y deterioro del baño.

3.1.3. Aditivo C: Solución acuosa concentrada de poliacrilato alcalino

El aditivo C es una solución acuosa concentrada de poliacrilato alcalino con total solubilidad en agua. Estas soluciones acuosas, no se separan cuando se calientan durante las operaciones de temple.

El aditivo está libre de aceite, no es tóxico, es biodegradable, no inflamable, y proporciona una amplia gama de velocidades de enfriamiento dependiendo de la concentración seleccionada y la temperatura de la solución.

Aplicación

Los aditivos tipo C, cubren una amplia gama de efectos de enfriamiento. Como resultado, el producto puede ser utilizado no sólo para producir estructuras martensíticas en aceros y fundiciones ferrosas, sino también estructuras no martensíticas, mediante la selección de parámetros adecuados con respecto a la concentración, temperatura y grado de agitación.

El control de concentración de las soluciones, se basa en la viscosidad cinemática.

Beneficios

- El enfriamiento uniforme elimina las bolsas de vapor y la formación de deformaciones suaves asociados con el enfriamiento por agua.
- La flexibilidad de la velocidad de enfriamiento ayuda a minimizar la distorsión y proporciona un excelente control dimensional en una amplia variedad de aleaciones y piezas.
- Apagador a base de agua para eliminar el peligro de incendio y el humo asociado con los aceites de apagado junto con las piezas más limpias.

3.1.4. Aditivo D: Quenchant polimérico

El aditivo D son un quenchant poliméricos no inflamables. Son soluciones acuosas de un polímero orgánico líquido y un inhibidor de corrosión. El polímero orgánico es soluble en agua y produce una solución homogénea. Sin embargo, a temperaturas superiores a 74 °C (165°F), el polímero se separa del agua como una fase insoluble.

La velocidad de enfriamiento se controla ajustando la temperatura del baño de enfriamiento y/o la velocidad de agitación. Estos parámetros, junto con la orientación

del producto, permiten que el aditivo D, funcione uniformemente en el rango de transferencia de calor desde el agua hasta la velocidad media de los aceites.

Aplicación

Los aditivos de tipo D son adecuados para:

- Tratamiento térmico de aceros al carbono y aleados mediante llama, inducción y calentamiento por inducción sumergido.
- En operaciones de hornos discontinuos y continuos que emplean atmósferas de gas y de cementación-carbonitruración.
- Con aleaciones de aluminio forjado .

Beneficio

- Las condiciones óptimas de operación para un metal o pieza específica pueden ser determinadas por control, temperatura del baño y/o agitación.
- Este tipo de aditivo minimiza el control de reemplazo debido a su baja tasa de deterioro y/o oxidación. El mayor requerimiento de maquillaje es para el agua perdida por evaporación.
- Puede eliminar el humo, el hollín y los residuos comunes de los quenchants de aceites. El mantenimiento de los equipos y la limpieza son más fáciles de lograr y mantener.
- Son solubles en agua y resistentes al crecimiento bacteriano.
- Se congelan por debajo de 0°C (32°F). Deben descongelarse a temperatura ambiente y mezclarse antes de su uso. El producto no se verá afectado de ninguna manera.

3.1.5. Aditivo E: Tetraborato de dipotasio

El aditivo E es una solución acuosa de polímero orgánico, inhibidor de corrosión, biocidas y antiespumantes. El polímero tiene una solubilidad normal y una mayor lavabilidad que otros quenchantes sintéticos. Además tiene ventajas reales para temple por inducción o directo. Es adecuado tanto para aplicaciones de inmersión como de temple por aspersión. . [11]

Aplicación

El aditivo E tiene un polímero único de larga duración que resiste las averías químicas, térmicas y mecánicas. Debido a su solubilidad normal, puede utilizarse en un rango de temperatura de funcionamiento más amplio con un arrastre mínimo. Su concentración se controla fácilmente con un simple dispositivo "Shell Cup". Un paquete de aditivos altamente efectivo, libre de nitritos, proporciona una excelente protección contra la oxidación y retarda el crecimiento bacteriano.

Beneficios

El aditivo E, es mejor conocido por ser un quenchantes de polímero que "NO ESTÁ PEGADO", por lo que las tareas domésticas son más limpias y sencillas, y el manejo de las piezas es más fácil. Otra ventaja, es que no tiene mal olor. Además, este polímero avanzado es altamente tolerante a los contaminantes y tiene una larga vida útil en el baño.

Los componentes intrincados hechos de acero al carbono, acero de aleación, acero fundido, acero forjado, hierro fundido, hierro dúctil, hierro maleable, aleaciones de aluminio y otros materiales pueden ser enfriados hasta la profundidad de dureza deseada con una distorsión mínima y sin agrietamiento.

Por último decir que no contiene ingredientes adicionales, que estén clasificados como peligrosos para la salud o el medio ambiente y que, por lo tanto, requieran medidas muy elaboradas a la hora de tratarlo.

3.2. Materiales sobre los que se realiza el temple

En este apartado se describirán los materiales empleados para realizar los temple.

3.2.1. Inconel para ensayo en Ivf Smart Quench

Las probetas utilizadas durante los ensayos, realizados con el equipo Ivf Smart Quench, son de un material denominado Inconel [12]. La aleación INCONEL 600 es una aleación estable de solución sólida austenítica. Las únicas fases precipitadas presentes en la microestructura son los nitruros de titanio, los carburos de titanio (o soluciones de estos dos compuestos comúnmente llamados cianonitruros) y los carburos de cromo. La Figura 3.1, representa la microestructura de acero Inconel 600.

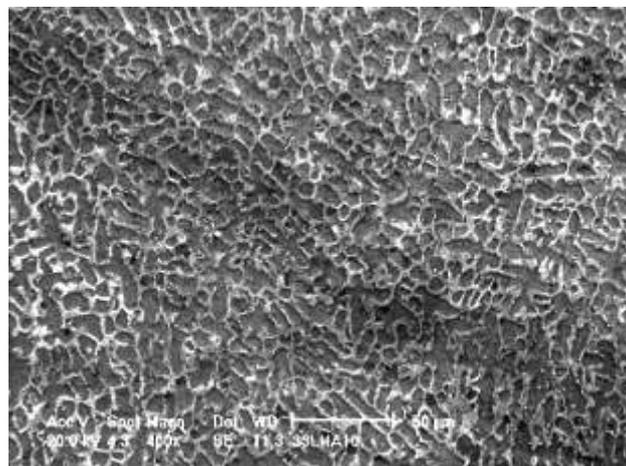


Figura 3.1. Microestructura de aleación INCONEL 600

Los nitruros y carburos de titanio son visibles en micro especímenes pulidos con aumentos de 50x o superiores. Aparecen como inclusiones pequeñas, aleatoriamente dispersas, de forma angular. El color varía de amarillo anaranjado para el nitruro a gris-lavanda para el carburo. Estos nitruros y cianonitruros son estables a todas las temperaturas por debajo del punto de fusión y no se ven afectados por el tratamiento térmico.

A temperaturas entre 1000°F y 1800°F (540°C y 980°C), los carburos de cromo precipitan fuera de la solución sólida. Las precipitaciones se producen tanto en los límites de los granos como en la matriz. Debido a la precipitación en el límite del grano, el comportamiento de corrosión de la aleación INCONEL 600 es similar al de otras aleaciones austeníticas en que el material puede ser susceptible al ataque intergranular en algunos medios agresivos (sensibilizado) por exposición a temperaturas de 1000° a 1400°F (540° a 760°C). A temperaturas superiores a 760°C (1400°F) el carburo predominante es Cr_7C_3 . Por debajo de 760°C (1400°F) también está presente el carburo Cr_{23}C_6 .

Aplicaciones de alta temperatura

La aleación INCONEL 600 es ampliamente utilizada en los campos de hornos y de tratamiento térmico para autoclaves, cajas, muflas, bandas de alambre, chimeneas de rodillos y piezas similares que requieren resistencia a la oxidación y a las atmósferas del horno. La aleación es el material estándar para los contenedores de nitruración debido a su resistencia al nitrógeno a altas temperaturas. Tiene buena resistencia a la carburación y además resiste el ataque de compuestos de azufre a temperaturas moderadas, pero está sujeta a la sulfuración en ambientes de alta temperatura que contienen azufre. El disulfuro de molibdeno, un lubricante que a veces se utiliza para facilitar el ensamblaje de las piezas, no debe usarse si el material se expone posteriormente a temperaturas superiores a 800°F (427°C).

3.2.2. Acero Inoxidable austenítico 314 para ensayo en piscina

Para el ensayo que se realizará en el recipiente, diseñado en el centro de desarrollo de ArcelorMittal, se utilizará una chapa de acero inoxidable.

El motivo de usar este tipo de acero, es poder realizar las pruebas de enfriamiento sin que la pieza sufra cambio estructural, debido a que el acero inoxidable no tiene recalcancia.

La recalcancia es un fenómeno térmico que se manifiesta por un aumento súbito del brillo en el enfriamiento de aceros ricos en carbono.

La Figura 3.2 muestra la microestructura de un acero inoxidable austenítico.

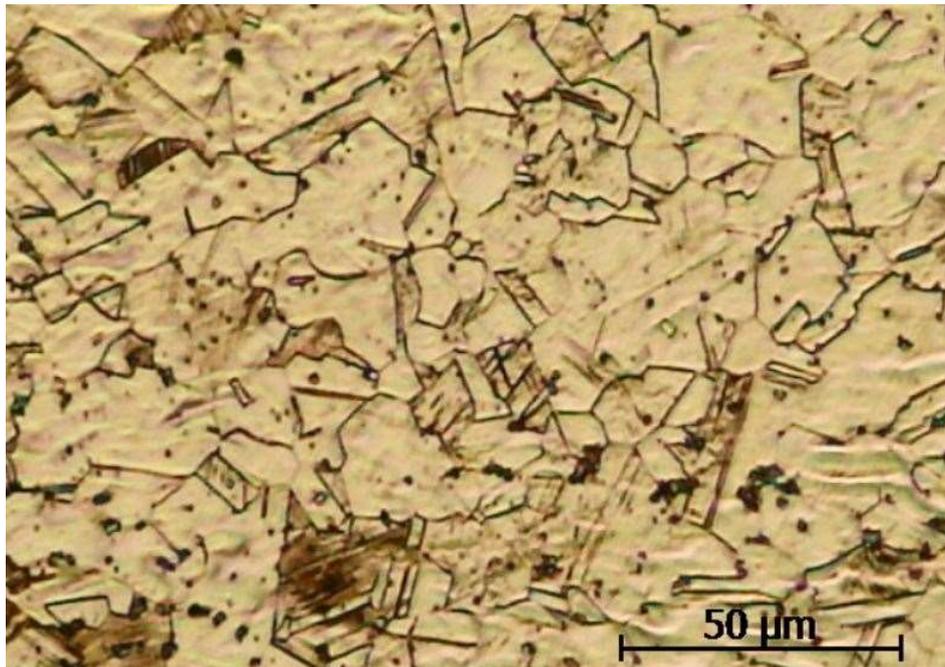


Figura 3.2. Microestructura de acero inoxidable austenítico

4. Procedimiento experimental

Con el fin de evaluar la influencia de los aditivos en la transferencia de calor en los enfriamientos de metales, en este trabajo se ha realizado una serie de ensayos para evaluar aditivos disueltos en agua, variando sus concentraciones para conocer en qué medida se modifica la curva de enfriamiento. Con esa información se pretende buscar alternativas a los baños convencionales. Para ello se van a realizar una batería de ensayos usando un equipo portátil denominado "SMART QUENCH", con el que se puede evaluar dichos aditivos a pequeña escala. En la evaluación se van a registrar parámetros como las velocidades de enfriamiento en diferentes puntos de la curva y tiempos en los que se llega a esas temperaturas. A través de un software integrado en el equipo se podrán también obtener los coeficientes de transferencia de calor (HTC) y predicción de durezas.

Posteriormente, una vez analizados los datos se escogerán determinados productos para realizar ensayos a una escala superior, en lo que denominamos ensayos en bañera.

4.1. Equipo de ensayo Smart Quench

El equipo utilizado consta con de un horno y un recipiente, donde se introducirán los aditivos mezclados con agua para realizar los diferentes ensayos.

El sistema estándar Ivf SmartQuench, consta de los siguientes componentes [13]:

- Una unidad portátil de adquisición de datos ("unidad manual") con cable para la conexión de la sonda.
- Un CD con el software Ivf SmartQuench
- Una llave de hardware USB para proteger el software del uso no autorizado.
- Una sonda de prueba estándar con asa y certificado de prueba
- Una sonda de prueba de referencia con certificado de prueba
- Un cable USB para la transmisión de curvas

- Un adaptador USB Bluetooth
- Un horno para calentar la sonda de prueba
- Un recipiente de 2 litros (o 1 litro) con soporte para facilitar las pruebas en el laboratorio.
- Dos latas de 1 litro de aceite de referencia, con certificado de control
- Un maletín para la unidad de mano, sondas de prueba, llave de hardware, baterías y cables.
- Un manual de usuario.

La Figura 4.1 muestra una imagen del equipo, la Figura 4.2 muestra el recipiente utilizado para realizar ensayos con aceites y la Figura 4.3 muestra el maletín donde se recoge parte del equipo.



Figura 4.1. Vista general del sistema, Ivf SmartQuenc

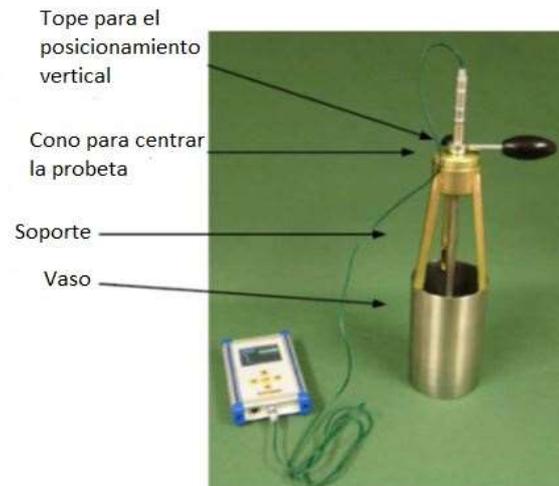


Figura 1.2. Recipiente portavasos con soporte para facilitar las pruebas de laboratorio



Figura 4.3. Contenido del maletín de transporte

Los siguientes elementos son opcionales:

- Dispositivo de agitación para el ensayo de polímeros de temple
- Dispositivo de medición de temperatura portátil con termopar calibrado (para la calibración del sistema de medición de temperatura)
- Tacómetro digital portátil con cinta reflectora (para controlar la velocidad del impulsor del dispositivo de agitación)
- Ordenador portátil

4.1.1. Dispositivo de adquisición de datos portátil ("unidad manual")

La unidad de mano contiene un microordenador con hardware y software para el registro y almacenamiento de los datos de medición. La transferencia de datos al ordenador se puede realizar de forma inalámbrica mediante Bluetooth o cable USB. Para la transmisión Bluetooth, se conecta un adaptador Bluetooth separado al ordenador. El software de la unidad manual se comunica con el software ivf SmartQuench del ordenador. En la Tabla 4.1, se recogen las especificaciones técnicas de la unidad manual.

Datos principales, unidad manual:	
Dimensiones:	167 x 105 x 34 mm
Peso:	700 g
Alojamiento:	Aluminio y plástico
Fuente de alimentación:	4x1,5 V R03/AAA apagado automático de las baterías tras cinco minutos de inactividad
Temperatura de funcionamiento:	0 to +50 °C (+32 to 122 °F)
Visualizar (display):	Pantalla a color AMOLADA de 2.8 pulgadas
Resolución de temperatura:	0.1 °C / 0.1 °F
Capacidad de memoria:	20 mediciones como máximo; hasta 60 000 lecturas por medición.
Termopar:	Tipo K
Tiempo de grabación:	Programable, de 20 segundos a 10 minutos
Frecuencia de muestreo:	Programable, de 1 a 100 seg. -1
Interfaz serial digital:	USB
Radiofrecuencia:	Bluetooth
Alcance Bluetooth:	≥10 m en interiores (dependiendo de las condiciones locales)

Tabla 4.1. Descripción general de la unidad manual

4.1.2. Dispositivo de agitación

El portavasos mostrado en las figuras 4.1 y 4.2, es utilizado con refrigerantes de tipo aceite.

Cuando se prueban los agentes poliméricos de base acuosa, es esencial que el agente de enfriamiento se agite durante las pruebas para obtener resultados consistentes y permitir comparar los resultados de diferentes laboratorios. El dispositivo de agitación está diseñado de acuerdo con la norma americana ASTM D 6482-06, y también de acuerdo con un proyecto de especificación para el ensayo de polímeros, que se está preparando para la Organización Internacional de Normas (ISO).

El diseño y las dimensiones principales se muestran en la Figura 4.4

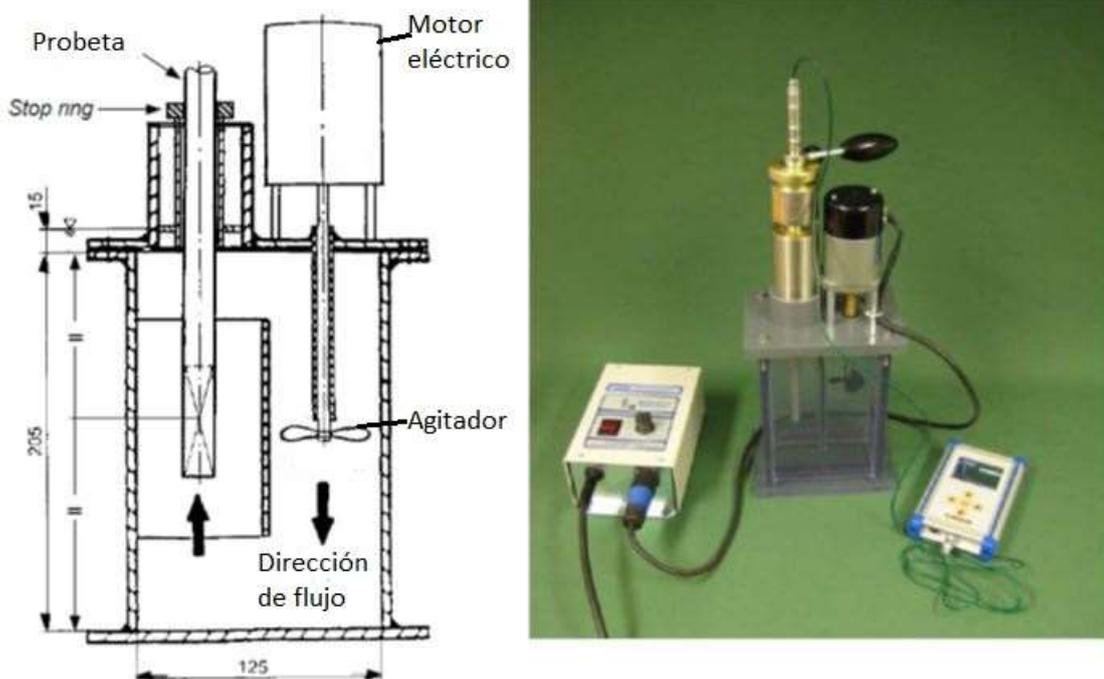


Figura 4.4. Izquierda: Dimensiones (según norma ASTM D 6482-06). Derecha: Dispositivo de agitación con controlador del motor

El dispositivo de agitación consiste en:

- Cámara de prueba transparente con abertura tubular (donde se debe insertar la sonda de prueba calentada)
- Motor eléctrico con regulador de velocidad para mantener 1000 r/min según especificación
- Impulsor normalizado (diámetro 50 mm, 3 palas, ajuste paso 42 mm)

4.2. Procedimiento de ensayo

Para la realización de los ensayos se debe seguir un procedimiento establecido, en este caso se van a utilizar polímeros disueltos en agua, como agentes refrigerantes, por tanto el procedimiento seguido es el siguiente:

4.2.1. Calentamiento de horno

El horno es el encargado de calentar la probeta de Inconel, hasta la temperatura necesaria para realizar el ensayo. En primer lugar, se enciende el horno, el cual se programa para alcanzar la temperatura de austenización determinada (870 °C). El proceso de estabilización del horno durará alrededor de una hora.

4.2.2. Preparación de la sonda de prueba

La sonda de prueba, es la probeta de Inconel, la cual tiene un termopar en su interior que registrara la temperatura que tenga en cada momento del ensayo. La sonda debe tener una superficie limpia y bien acondicionada para la realización de los ensayos. En primer lugar se realizaras 3 ensayos en agua para comprobar su correcto funcionamiento, además que son datos que nos servirán de referente más tarde. Después de cada ensayo se limpiará la superficie de la sonda con papel esmeril, para que no queden restos residuales de enfriamiento y que su recubrimiento de óxido sea uniforme y libre de cascarilla suelta.

4.2.3. Preparación de la disolución

El recipiente para realizar el ensayo, debe estar limpio y seco. Se verterá el agua y la cantidad de aditivo determinado. Se agitará la muestra durante un tiempo determinado para así conseguir una mezcla homogénea. Para que no adquiera temperatura se retirará la agitación hasta que solo falta un minuto para la introducción de la probeta en el líquido.

4.2.4. Preparación de la unidad manual

En primer lugar se conectará la unidad de mano a la sonda de prueba con el cable suministrado con el equipo. A continuación se pulsará el botón Enter para activar la unidad de mano, que estará lista para interactuar.

4.2.5. Medición

Se bajará la sonda en el horno para que descanse en el fondo. El tiempo de calentamiento para elevar la sonda a 855 °C es de unos 7 minutos, si el horno ya está a la temperatura de funcionamiento normal (~870 °C). La temperatura de la sonda se indica en la unidad manual mientras la sonda se está calentando. Pasados alrededor de 6 minutos se conecta la agitación del dispositivo donde se tiene la disolución de agua con el aditivo correspondiente. Una vez pasado el tiempo y alcanzada la temperatura de la sonda se procede a sacarla del horno y rápidamente se introduce en el dispositivo de agitación para que el ensayo tenga lugar.

4.2.6. Obtención de resultados

De cada ensayo el programa suministrado por la compañía Ivf, nos proporciona una serie de datos de los cuales algunos nos servirán para tomar decisiones.

Los datos calculados son:

- **CRmax:** Tasa de refrigeración máxima
- **T (CRmax):** Temperatura a la que se produce la máxima velocidad de refrigeración.
- **t (CRmax):** Tiempo para alcanzar la máxima velocidad de enfriamiento
- **Tvp:** La temperatura para la transición de fase de vapor a fase de ebullición
- **Tcp:** La temperatura para la transición de la fase de ebullición a la fase de convección
- **Theta 1:** La temperatura para la transición de fase de vapor a fase de ebullición, determinado por el procedimiento establecido en la norma francesa NFT 60178
- **Theta 2:** La temperatura para la transición de la fase de ebullición a la fase de convección, determinado por NFT 60178.
- **CR300:** Refrigeración a 300 °C
- **CR550:** Refrigeración a 550 °C
- **Time600:** Tiempo para alcanzar los 600 °C
- **Time400:** Tiempo hasta 400 °C
- **Time200:** Tiempo para alcanzar 200 °C

De todos los datos mencionados los más importantes, es decir, los que nos van ayudar a tomar decisiones, son CRmax, T (CRmax), y t (CRmax).

Una vez obtenida la curva de enfriamiento para cada aditivo, se compara con las curvas proporcionadas por el fabricante del mismo, que se recogen en el Anexo D, para así comprobar que el funcionamiento es correcto. Si todo es correcto entonces se pasará a analizar los datos nombrados en el párrafo anterior.

La Figura 4.5, muestra la curva obtenida en uno de los ensayos.

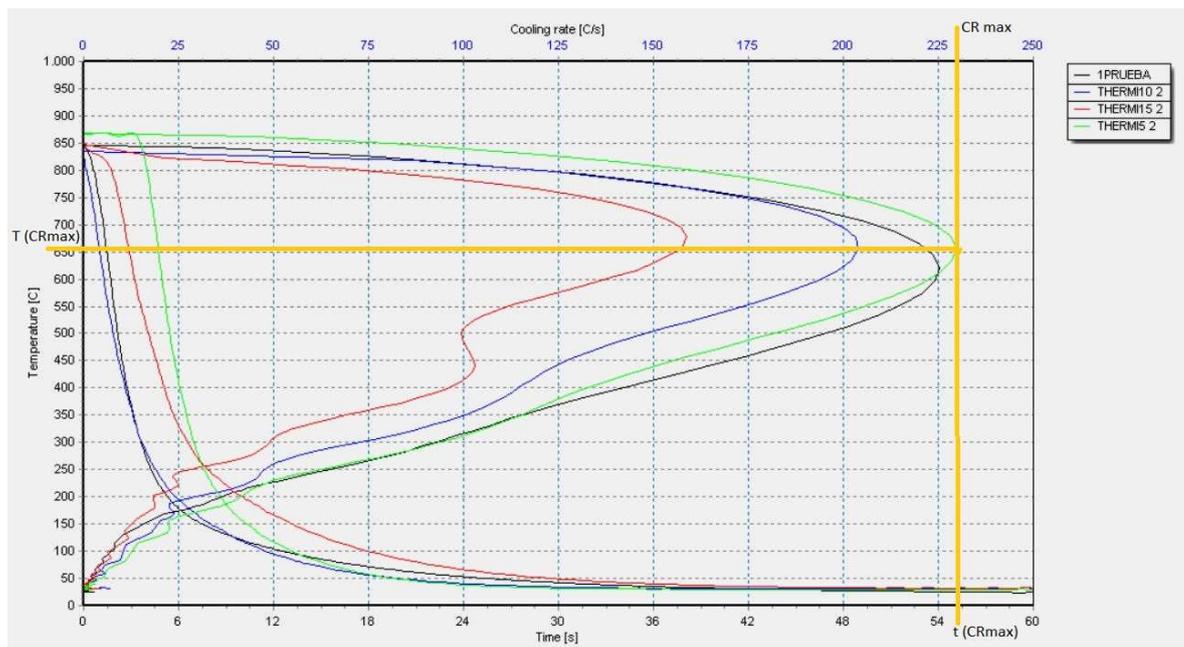


Figura 4.5. Curva de enfriamiento de un aditivo

En la figura se han señalado los datos relevantes que utilizaremos para tomar una decisión. Para cada curva se obtienen esos tres valores, en primer lugar se mira la velocidad máxima de la curva, y en función de este valor se obtiene la Temperatura y el tiempo que tarda en conseguir esa velocidad.

Además de estos datos el propio programa calcula la HTC, para cada curva, la explicación del cálculo que realiza el programa se encuentra en el Anexo B. Todas estas curvas servirán de referente para el posterior ensayo, en la bañera.

4.3. Ensayo bañera

Una vez realizados todos los ensayos con los diferentes aditivos, se escogieron los que presentaban una mayor y menor velocidad de enfriamiento con el fin de realizar ensayos a una escala mayor. Estos ensayos se realizaron en una bañera, con una capacidad de 300 l. En base a esta capacidad se calcula la cantidad de agua y de polímero a utilizar. En la Figura 4.6 se muestra una imagen de la bañera.



Figura 4.6. Bañera utilizada en ensayos

En este caso, las pruebas se realizarán con una chapa de acero inoxidable de dimensiones $300 \times 400 \times 25 \text{ mm}^3$. Además, la chapa en la que se realizarán las pruebas, tiene colocados 6 termopares como se muestran en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Colocación de los termopares en la chapa

El procedimiento para el calentamiento de la chapa es el siguiente: primero se precalienta el horno hasta que llega 1000°C , más o menos tarda una hora, y se mantiene a esa temperatura durante 10 minutos. Después se introduce la chapa en el horno, cuando esta alcanza una temperatura de unos 950°C , se deja que establezca durante media hora antes de proceder a extraerla y sumergirla posteriormente en el

baño. La Figura 4.8 representa la maniobra de introducir la chapa en el horno, con las medidas de seguridad oportunas.



Figura 4.8. Procedimiento de trabajo para introducir la chapa en el horno

Mientras la pieza coge temperatura en el horno se prepara el baño mezclando el agua con el aditivo correspondiente, y en la proporción adecuado, en este proyecto se van a realizar los ensayos al 5% de concentración.

Por tanto teniendo una capacidad total de 300 l, tendremos que introducir:

$$300 \times 0,05 = 15 \text{ l de aditivo}$$

Por tanto de agua introduciremos:

$$300 - 15 = 285 \text{ l de agua}$$

Estas cantidades se introducirán para cada mezcla.

Finalmente la mezcla ha de agitarse para que quede un baño homogéneo.

4.3.1. Obtención de resultados

En el caso del ensayo de la bañera, los datos recogidos a través de los termopares, se almacenaron en hojas de cálculo (Excel), para su posterior tratamiento a través del programa realizado con Matlab®, con el que se obtendrán las curvas de enfriamiento, como las que nos proporcionaba el programa IVF Smart Quench. El programa realizado se encuentra recogido en el Anexo C.

A continuación en la Figura 4.9, se muestra la curva de enfriamiento obtenida en Matlab®.

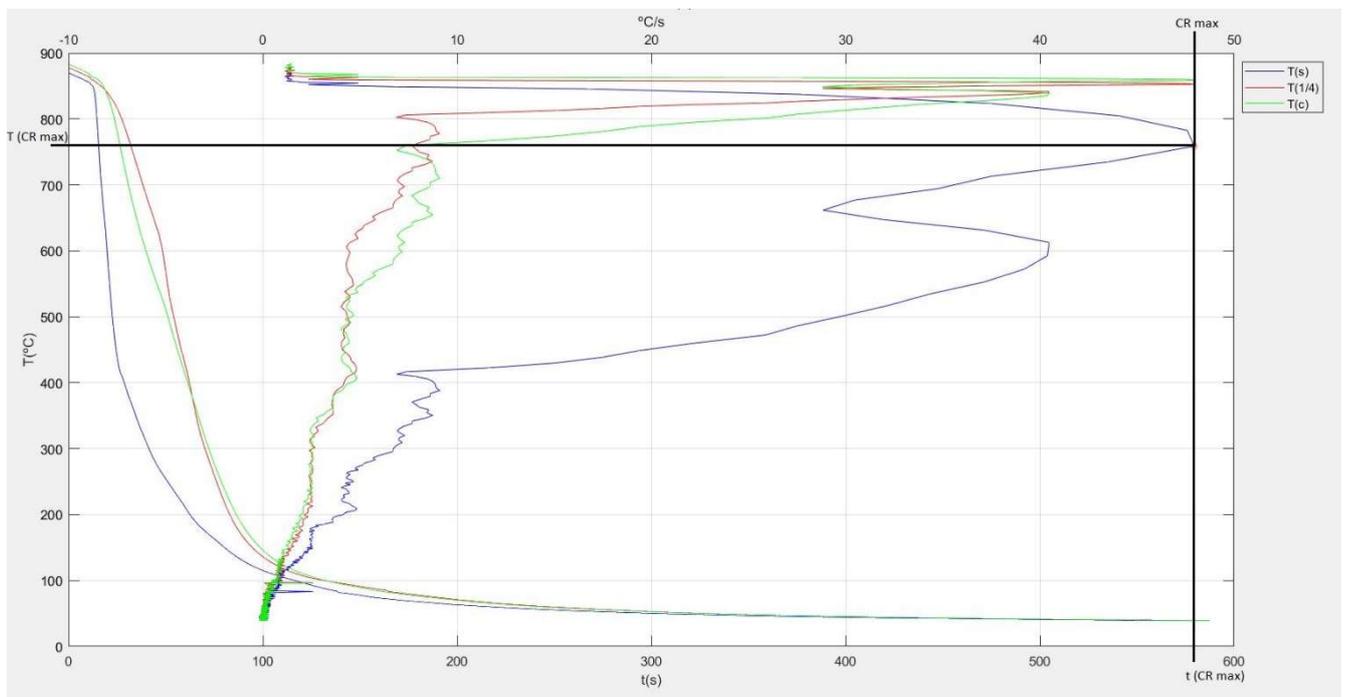


Figura 4.9. Curva de enfriamiento para el ensayo de la bañera

De las gráficas se obtienen los valores CRmax , $T(\text{CRmax})$, y $t(\text{CRmax})$, sobre los que nos basamos para tomar una decisión.

Estos valores así como el comportamiento del gráfico se comparará con la curva de enfriamiento del aceite que se quiere sustituir, que se muestra en la Figura 4.10.

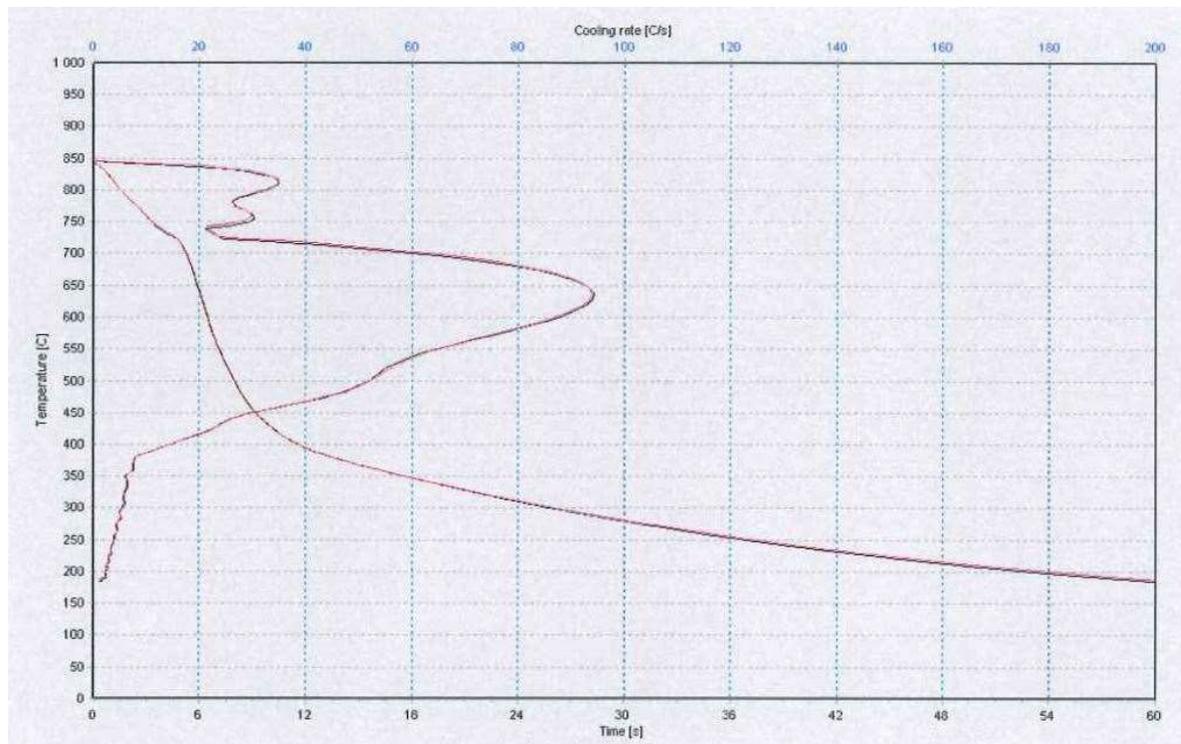


Figura 4.10. Curva de enfriamiento del aceite a sustituir

Además de los valores mencionados, se obtendrán también en Matlab®, las curvas HTC, para los ensayos realizados, las cuales servirán para realizar una simulación en otro programa, COMSOL MULTIPHYSICS®, con el que se simulará el reparto de calor en la chapa, y se podrá así utilizar en otros materiales, distintos a los utilizados.

5. Resultados

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos de los ensayos realizados, tanto los del equipo Ivf Smart Quench, como los realizados en la bañera, para los cuales se utilizará el programa Matlab®, para realizar los diferentes cálculos y representaciones.

5.1. Resultados del Ivf Smart Quench

Una vez realizados todos los ensayos con la muestra de Inconel en el equipo IVF Smart Quench se han obtenido las curvas de enfriamiento para los distintos aditivos a diferentes concentraciones (Figuras 5.1-5.5), en las que además se incorpora la curva de enfriamiento en agua, con el fin de comparar si los aditivos aumentan o disminuyen su severidad.

En cada figura existe un código de colores para identificar cada curva:

- Negro: prueba del agua
- Verde: aditivo al 5%
- Azul: aditivo al 10%
- Rojo: aditivo al 15%

Las Figuras 5.1-5.5, representan las curvas de enfriamiento para cada aditivo utilizado.

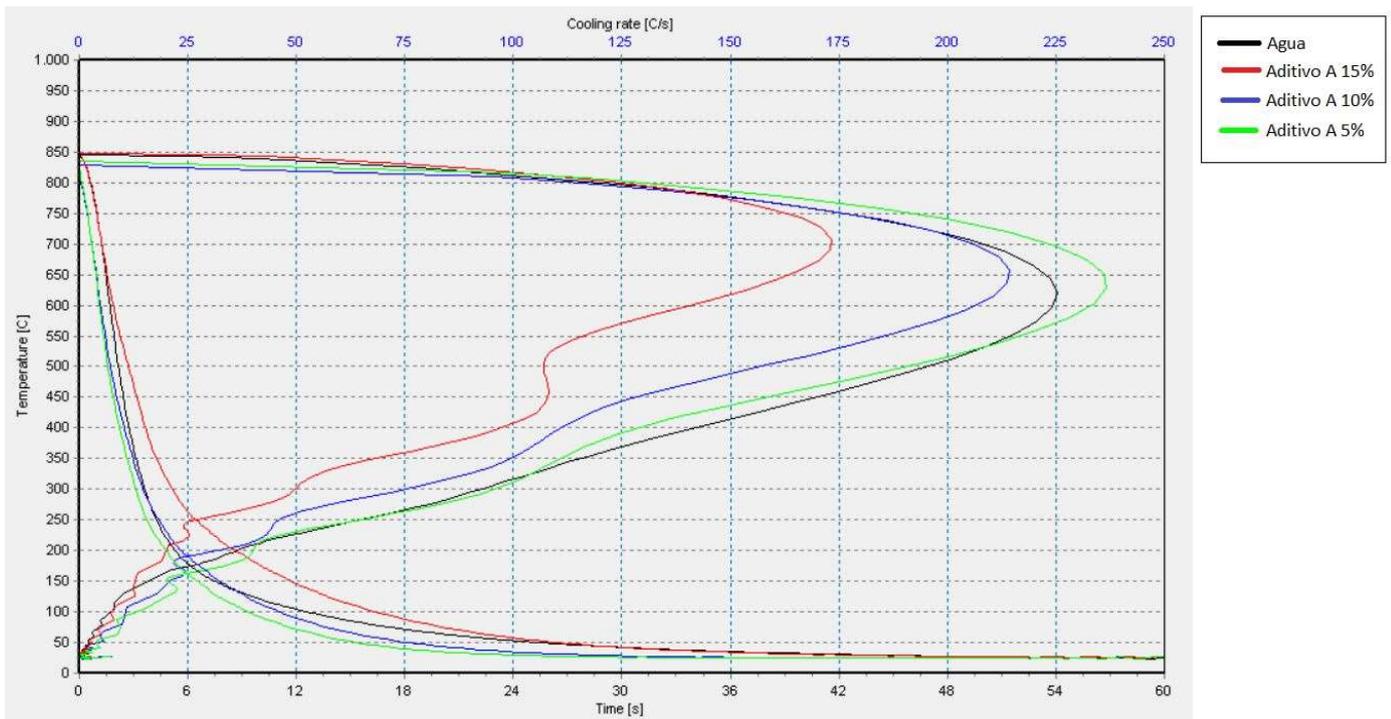


Figura 5.1. Curvas de enfriamiento del Aditivo A

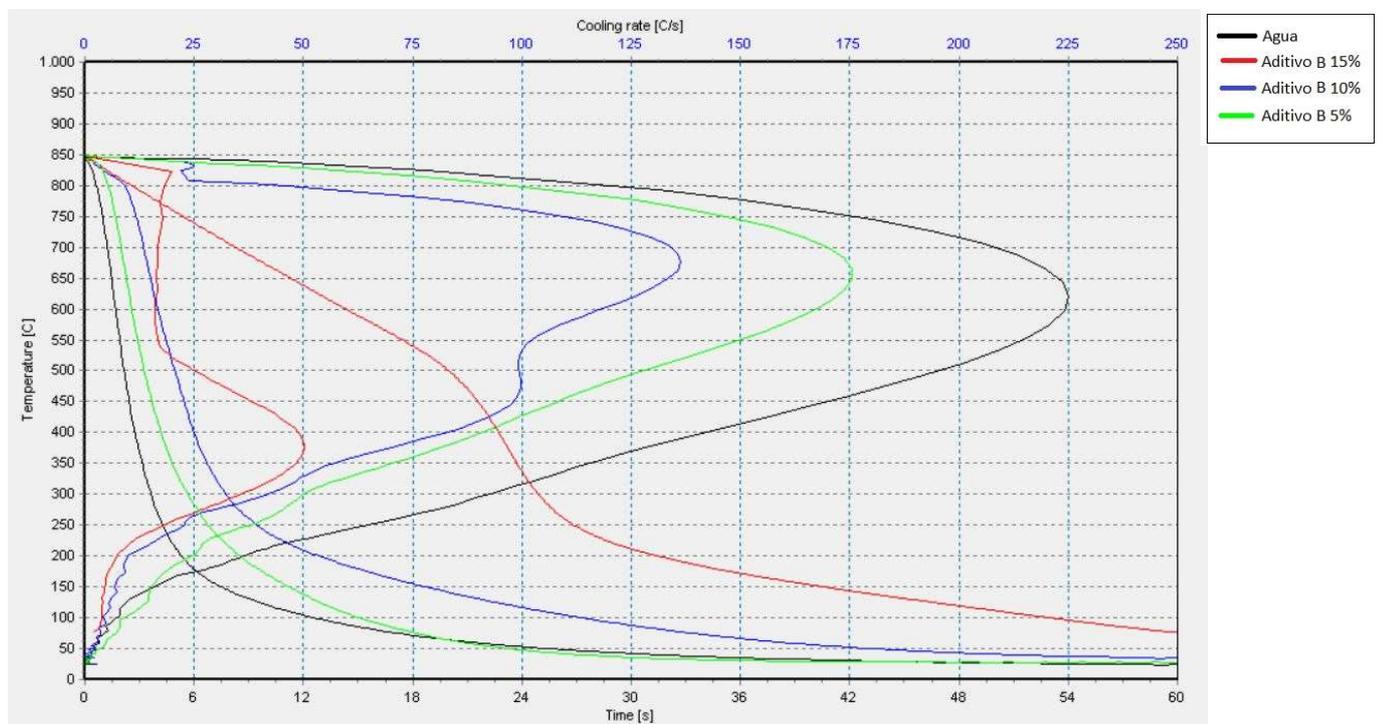


Figura 5.2. Curvas de enfriamiento del Aditivo B

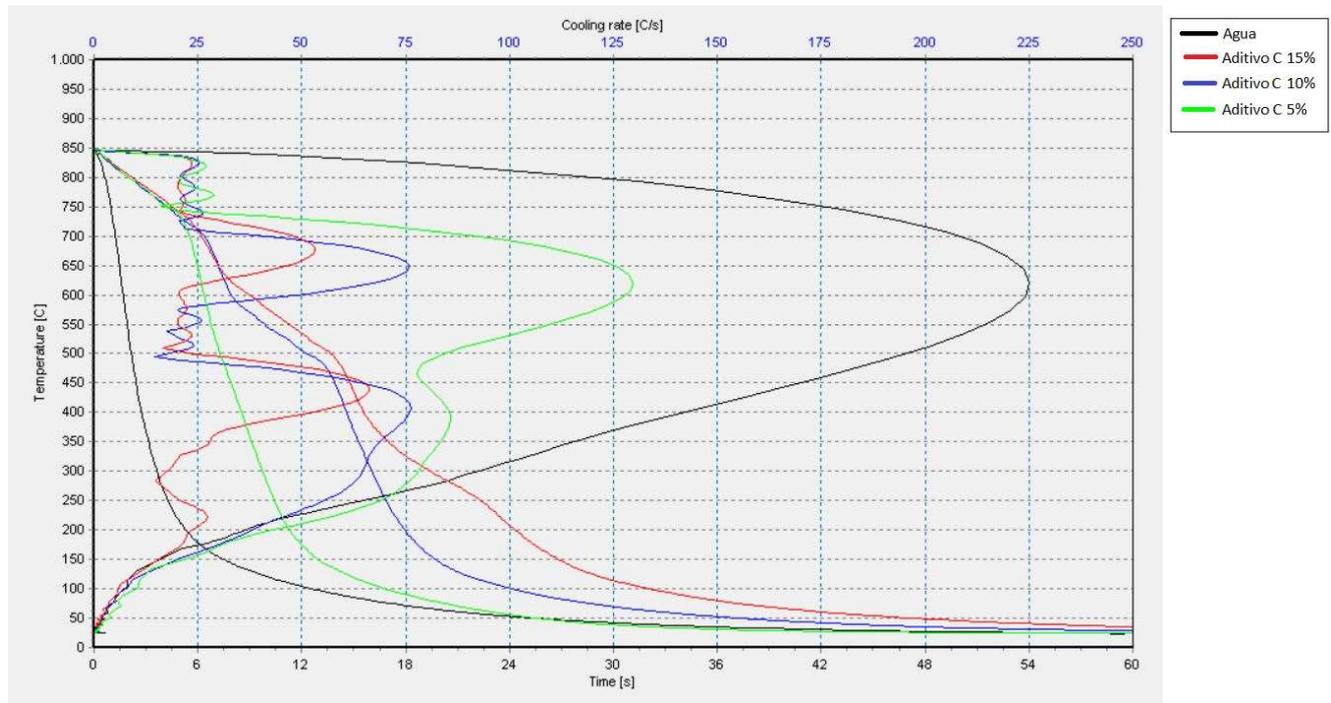


Figura 5.3. Curvas de enfriamiento del Aditivo C

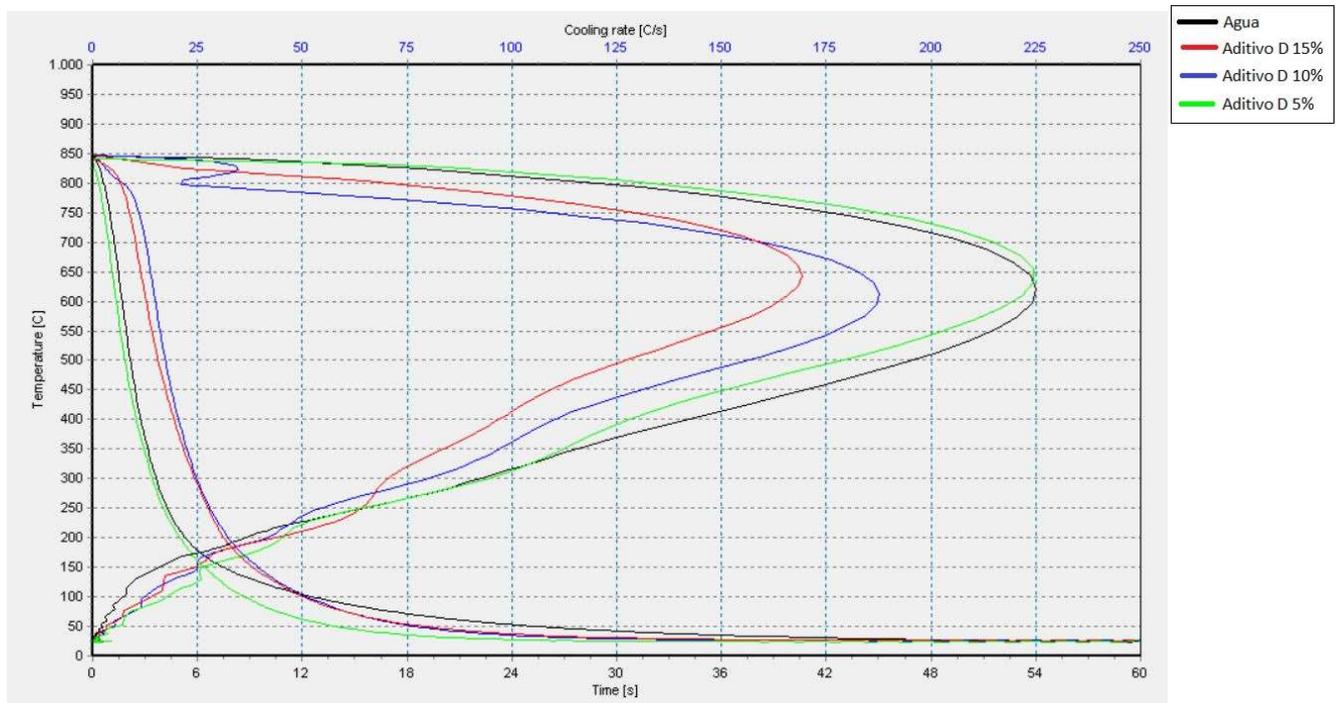


Figura 5.4. Curvas de enfriamiento del Aditivo D

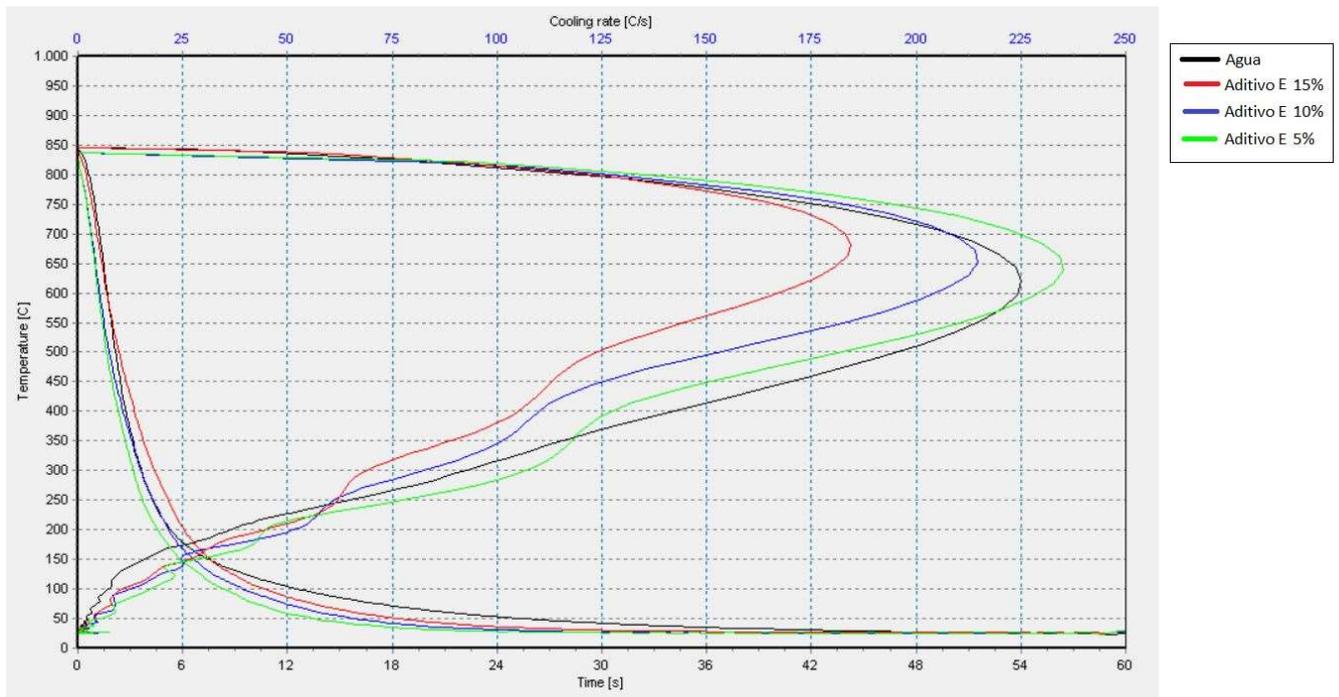


Figura 5.5. Curvas de enfriamiento del Aditivo E

Los datos extraídos de las gráficas interesantes para el análisis de la velocidad de enfriamiento, son C_{max} , $T(CR_{max})$, y $t(CR_{max})$, y se muestran en la tabla 5.1

	Concentración	CR_{max} [C/s]	$T(CR_{max})$ [C]	$t(CR_{max})$ [s]
Agua	-	225,19	617,80	2,61
Aditivo A	5%	236,71	630,73	1,99
	10%	213,93	638,45	1,99
	15%	173,44	702,22	2,24
Aditivo B	5%	175,58	660,33	3,23
	10%	136,26	683,28	4,35
	15%	50,16	375,52	24,22
Aditivo C	5%	129,78	620,14	7,2
	10%	76,22	405,96	15,53
	15%	66,16	442,53	15,90
Aditivo D	5%	224,52	652,45	2,11
	10%	187,57	619,69	4,47
	15%	168,87	634,63	3,85
Aditivo E	5%	235,31	641,87	1,99
	10%	214,80	653,85	1,99
	15%	184,43	675,24	2,24

Tabla 5.1. Datos extraídos del ensayo IVF Smart Quench para cada aditivo

A la vista de los resultados se han seleccionado el aditivo A y el C al 5% de concentración, por ser los aditivos que provocan la mayor y menor velocidad de enfriamiento de la muestra. Con estos aditivos y a la concentración del 5% se procederá a hacer el ensayo en bañera, con probetas de mayor dimensión.

Además se analizaron los coeficientes de transmisión de calor (HTC) a partir de los datos de temperatura de cada curva de enfriamiento, que servirán de referente para los datos extraídos en el ensayo de la bañera.

En la tabla 5.2 se muestran los datos de HTC para cada aditivo.

Aditivo A 5%		Aditivo A 10%		Aditivo A 15%	
T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]
269,7	7623,4	319,4	5746,8	451,3	5145,0
193,9	6081,9	235,6	5146,8	378,0	2694,4
168,5	3586,1	200,9	3265,1	276,4	4707,2
153,4	2410,7	182,2	2209,9	246,3	2065,9
103,8	1869,9	128,0	1629,3	191,8	1169,2
72,1	1790,0	89,5	1702,9	146,3	1199,0
51,8	1862,8	66,1	1487,6	112,5	1119,8
30,5	1574,6	36,8	1486,0	61,8	1030,2
25,5	725,0	26,9	1497,2	37,7	913,2
24,6	147,4	25,0	906,2	29,3	854,6
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Aditivo B 5%		Aditivo B 10%		Aditivo B 15%	
T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]
610,9	2825,4	808,2	323,5	801,2	257,6
362,0	6833,2	671,1	2511,1	776,5	458,1
299,3	3135,1	506,7	3465,0	768,1	155,5
257,1	3034,3	387,1	3695,1	743,7	486,1
178,7	1469,8	249,0	1769,2	701,4	182,5
131,4	1403,3	206,2	698,9	625,9	665,3
97,1	1377,8	178,6	627,9	603,1	1742,8
49,8	1333,1	122,0	589,8	363,8	1453,3
32,5	1056,3	76,1	689,4	185,6	530,3
28,7	442,6	50,4	721,1	137,3	286,4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Aditivo C 5%		Aditivo C 10%		Aditivo C 15%	
T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]
796,8	184,6	785,4	346,7	794,1	257,8
743,8	962,0	767,0	366,7	761,7	605,1
672,4	1410,2	730,8	661,2	723,0	717,7
339,7	3675,8	725,4	110,3	596,8	901,7
157,0	3861,1	555,7	1670,1	549,3	210,8
112,7	1145,2	316,7	2835,1	440,4	1264,7
58,7	1204,5	96,8	1566,2	221,2	1056,0
33,9	1021,9	55,7	289,4	93,4	1141,9
27,0	730,0	38,4	964,7	58,2	338,4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aditivo D 5%		Aditivo D 10%		Aditivo D 15%	
T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]
306,2	7836,2	791,4	131,6	768,0	592,8
212,3	6256,1	668,0	2282,1	468,8	6428,0
174,5	4313,6	362,6	7798,7	357,3	3595,6
152,5	3043,5	264,9	4806,8	272,6	4429,2
93,2	2498,9	153,8	2630,5	146,2	2867,3
62,1	2109,4	103,0	1851,6	100,6	1646,7
45,2	1973,7	71,0	1894,3	71,1	1796,2
28,4	1631,5	36,9	1433,8	39,4	1151,7
24,7	720,0	28,0	806,9	29,2	938,4
24,1	181,1	26,3	203,2	26,7	394,7
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aditivo E 5%		Aditivo E 10%		Aditivo E 15%	
T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]	T [°C]	HTC [W/m ² /K]
412,0	5433,8	281,8	7512,3	326,3	6037,6
314,0	4116,4	193,9	6591,8	247,9	4727,1
244,7	4110,8	152,4	5058,9	191,1	4548,7
190,3	3969,9	137,4	2858,5	155,5	3696,1
118,5	2085,7	89,3	2250,2	104,6	1749,7
86,7	1426,6	58,6	2332,5	74,4	1758,8
65,5	1423,5	43,5	1868,1	54,3	1803,8
38,2	1235,7	29,2	1326,2	32,3	1615,3
29,1	734,9	26,1	254,3	26,5	1164,8
27,0	285,0	25,6	78,4	25,5	550,6
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 5.2. Datos calculados de HTC, por el sistema Ivf Smart Quench

Las gráficas correspondientes a los datos HTC de cada aditivo, se encuentran recogidas en el Anexo E.

5.2. Resultados del ensayo en bañera

El ensayo de la bañera, se realiza con los aditivos A y C, al 5%, como se mencionó anteriormente. En este caso la representación de las curvas de enfriamiento (Figuras 5.6-5.7), se realizó con el programa de cálculo Matlab®.

Para cada gráfico la leyenda representada corresponde a tres termopares colocados en la superficie (s), a un cuarto de la superficie (1/4) y en el centro (c) de la chapa, que nos permitirán ver el cambio de temperatura de una zona a otra.

Las Figuras 5.6-5.7, representan las curvas de enfriamiento para cada aditivo utilizado.

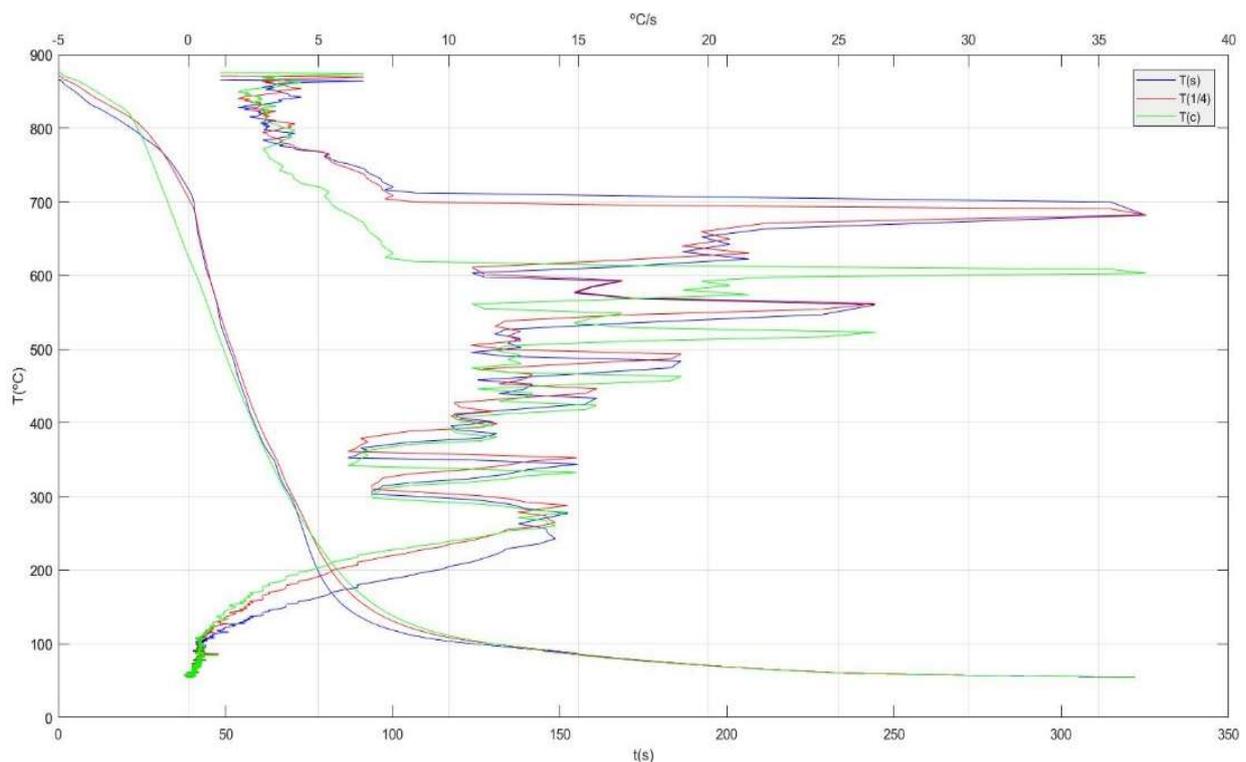


Figura 5.6. Curvas de enfriamiento del Aditivo A en el ensayo de la bañera

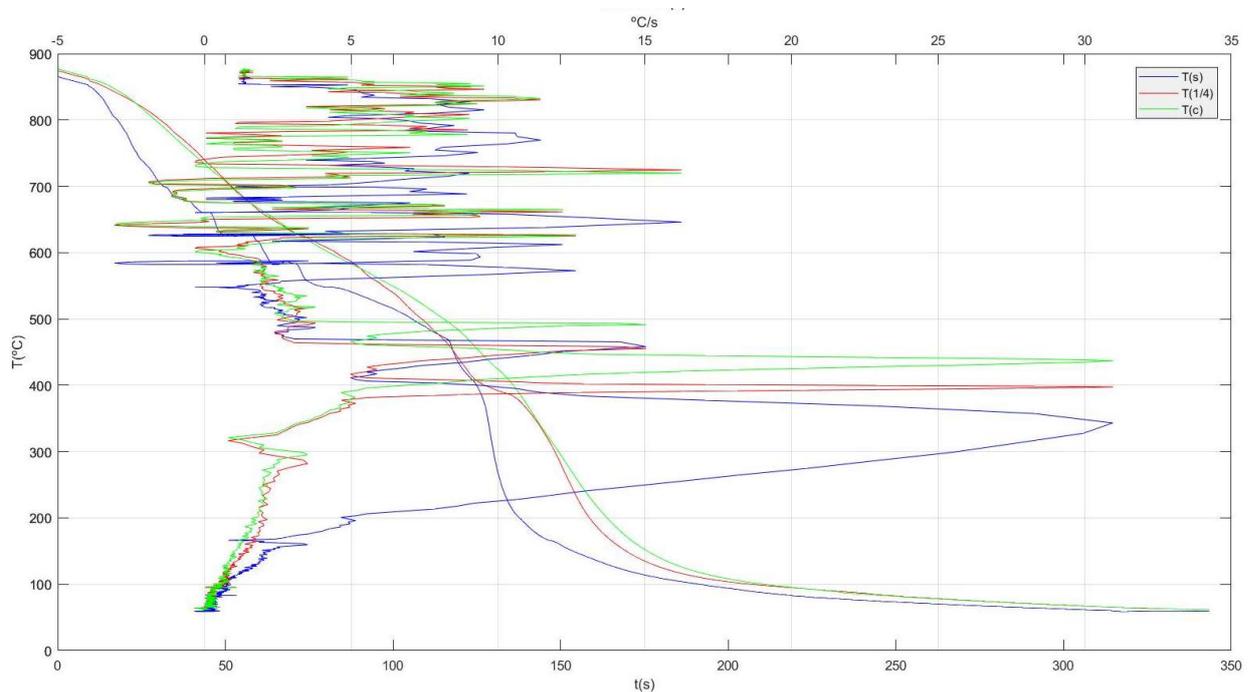


Figura 5.7. Curvas de enfriamiento del Aditivo C en el ensayo de la bañera

A la vista de los resultados obtenidos en las gráficas, se puede determinar que el aditivo C, se asemeja a los datos obtenidos de la curva de enfriamiento del aceite, mostrada en la Figura 4.10.

5.2.1. Obtención de las curvas HTC

En este caso para los datos obtenidos del ensayo de la bañera, se han obtenido las curvas de HTC, con el programa de cálculo Matlab®.

Partiendo de ecuaciones reflejadas en el Método de diferencias finitas [18] para la conducción no estacionaria unidimensional, se llega a una ecuación final con la que se puede obtener los coeficientes de transmisión de calor de cada aditivo, y así poder representarlos en una gráfica, frente a la variación de temperatura. Los datos que se utilizan para calcular los coeficientes de transmisión de calor son los obtenidos a partir de los termopares T3 y T6, representados en la Figura 4.7.

En primer lugar se observará la variación entre los datos obtenidos (reales) y los calculados con el modelo, primero para el aditivo A y después para el aditivo C. La Figura 5.8, muestra las variaciones de los termopares frente al modelo, para el Aditivo A.

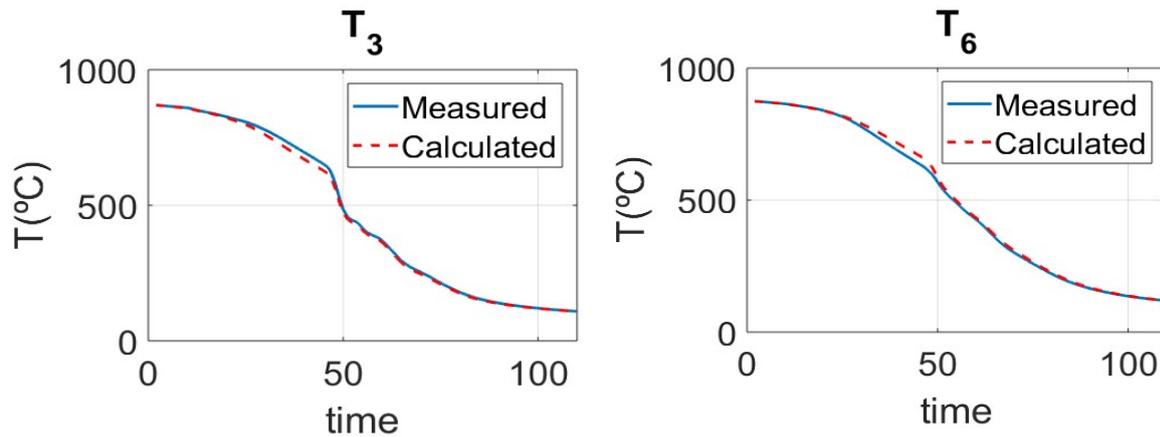


Figura 5.8. Variación de la temperatura real y calculada con el tiempo para el Aditivo A

Como se puede observar la curva azul representa los datos reales y la curva roja representa los datos calculados con el modelo. La Figura 5.9, muestra las variaciones de los termopares frente al modelo, para el Aditivo C.

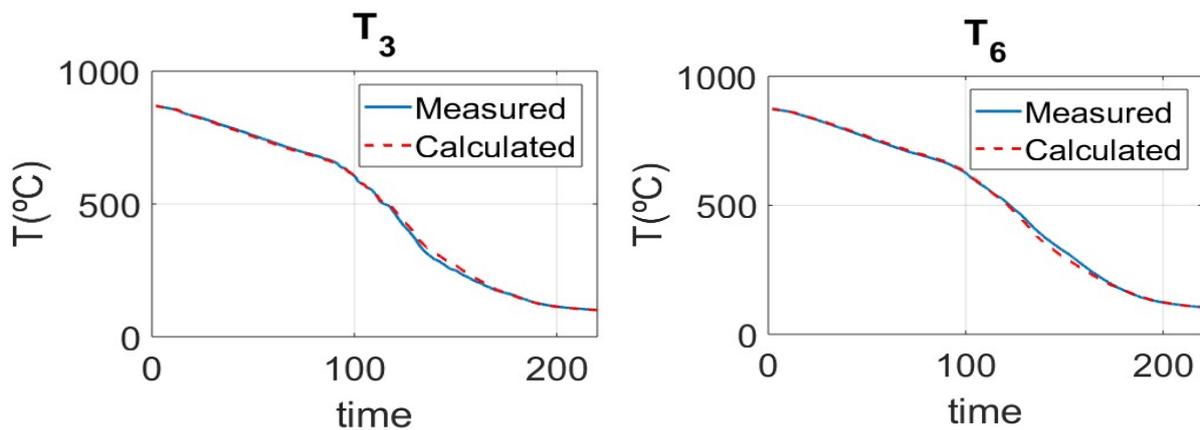


Figura 5.9. Variación de la temperatura real y calculada con el tiempo para el Aditivo C

A partir de estas variaciones de la temperatura frente al tiempo se puede calcular el coeficiente de transmisión de calor, para ambos aditivos como se observa en la Figura 5.10.

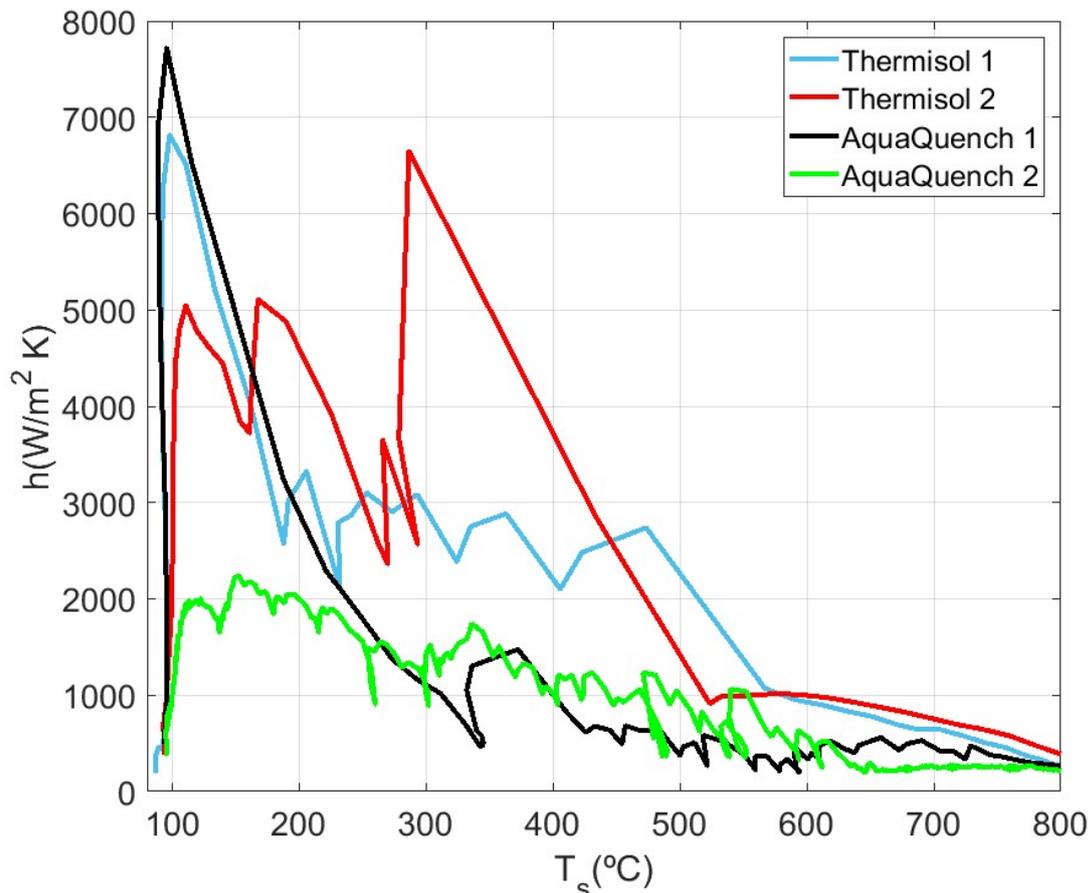


Figura 5.10. Coeficiente de transmisión de calor de los aditivos

Como se observa en la Figura 5.10, los coeficientes tienen variaciones amplias, este problema es debido a no tener agitación continua en la bañera, y por tanto los datos no son todo lo precisos que deberían. Aun así con los resultados de las HTC, se va a simular en el programa COMSOL MULTIPHYSICS®, el reparto de calor en la chapa, para así poder adaptar los resultados a otro tipo de material el cual pueda tener cambios en la microestructura.

En primer lugar se muestran los resultados de la evolución de la HTC y la Temperatura, para el ensayo realizado con el Aditivo A, en el transcurso del tiempo. La Figura 5.11, muestra la evolución en el tiempo de la Temperatura y la HTC para el aditivo A.

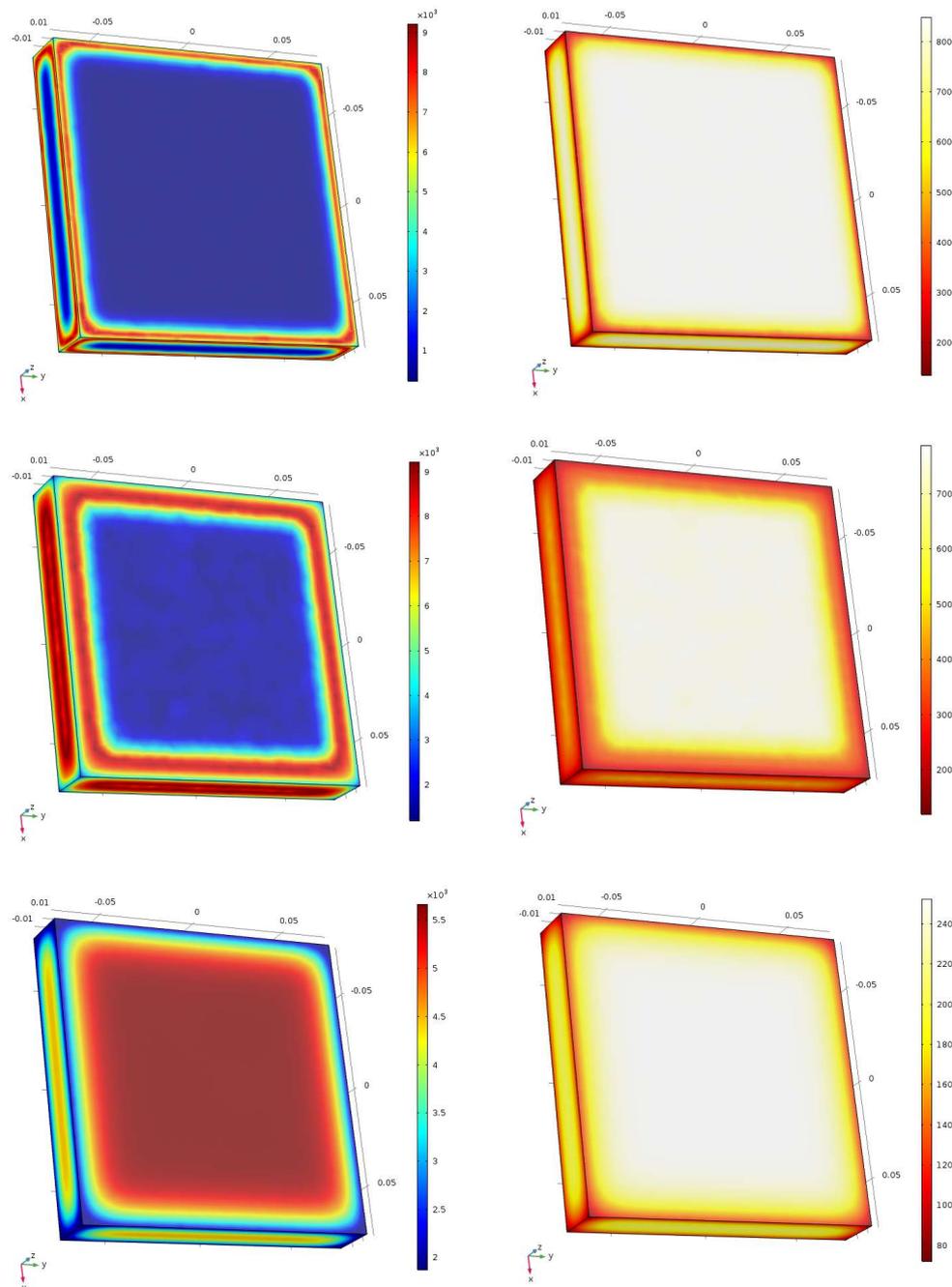


Figura 5.11. Evolución de la HTC (izquierda) y Temperatura (derecha) para el Aditivo A

A continuación se muestra la evolución de la HTC y la Temperatura, para el ensayo realizado con el Aditivo C. La Figura 5.12 muestra la evolución en el tiempo de la Temperatura y la HTC para el Aditivo C.

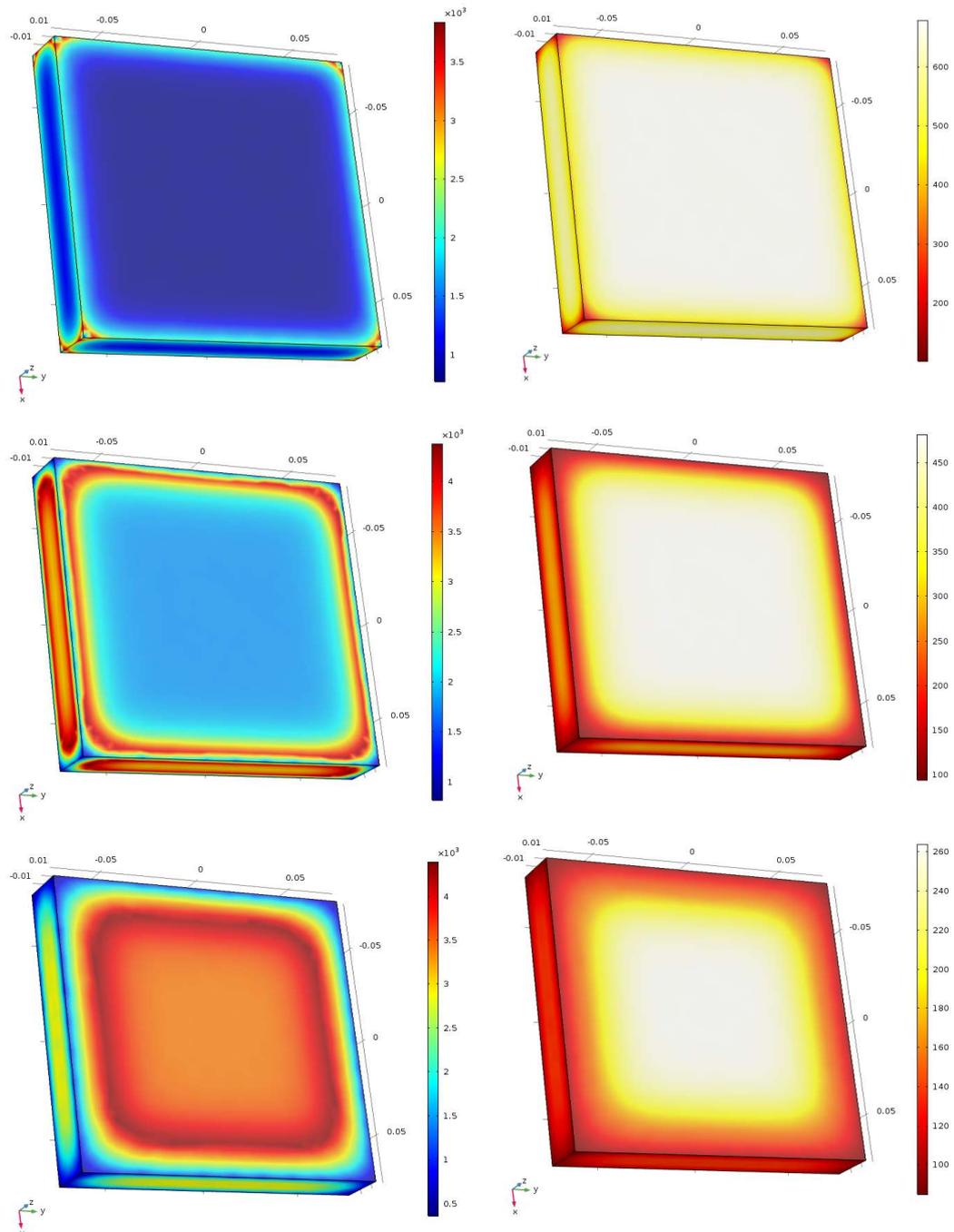


Figura 5.12. Evolución de la HTC (izquierda) y Temperatura (derecha) para el Aditivo C

Como se observa en las Figuras 5.11 y 5.12 los aditivos consiguen absorber el calor de la chapa, y retenerlo, dado que en poco tiempo son capaces de enfriarla. Además se ve claramente como el Aditivo C tiene un retardo apreciable con respecto al Aditivo A.

Todos estos datos nos proporcionan valores, para realizar una simulación previa con otros materiales, para ver el resultado y después tomar la decisión de realizar el experimento o no.

6. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto era sustituir el aceite, refrigerante utilizado actualmente en las plantas siderúrgicas de ArcelorMittal, por el compuesto de agua y aditivo. A la vista de los resultados obtenidos se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

- Los aditivos poliméricos son potenciales candidatos a reemplazar el uso de aceites ya que al estar disueltos en agua no son inflamables. Los usados durante la realización del proyecto, son biodegradables, lo cual significa que son respetuosos con el medio ambiente. Además confieren al acero propiedades similares a la obtenidas tras el temple en aceite.
- De todos los estudiados el Aditivo C, es el potencial candidato a sustituir los aceites de la planta ya que es el que se ajusta mejor a los datos proporcionados por la empresa, respecto al aceite que se quiere sustituir.
- Los ensayos y programas utilizados permiten realizar una simulación del reparto de calor en la chapa tras ser sometida en el baño con aditivo, una vez conocido su funcionamiento es posible extenderlo a otros materiales, facilitando la toma de decisiones antes de realizar los ensayos reales, lo que significa un ahorro económico.

7. Bibliografía

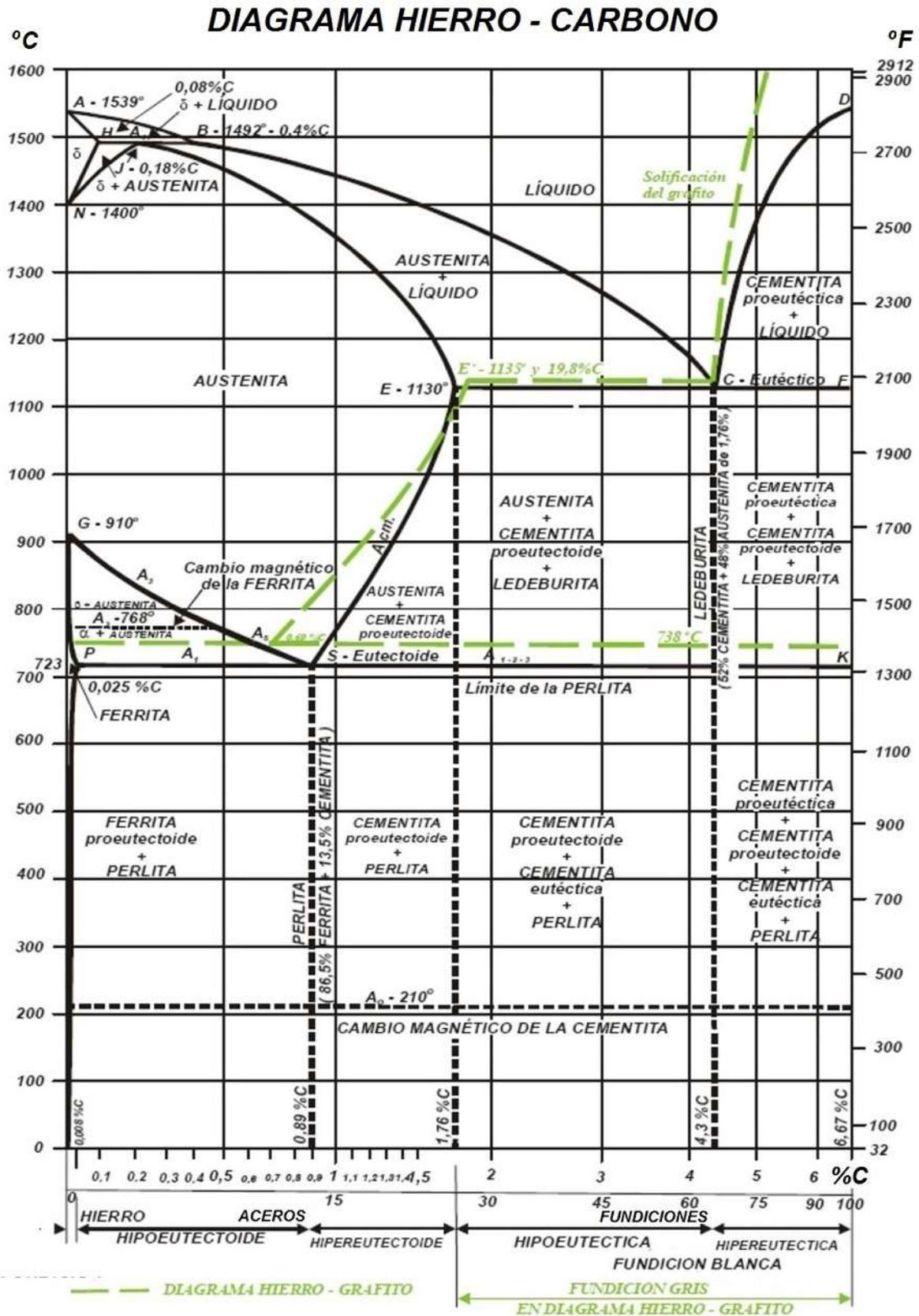
- [1] ArcelorMittal.. EL PROCESO SIDERURGICO. 2o. 1-03-1137. Centro de Formación ArcelorMittal. Asturias - La Toba. 2007^a (Documentación interna)
- [2] AISI (American Iron and Steel Institute) <http://www.steel.org/>(02/2018)
- [3] <https://es.wikipedia.org> (02/2018)
- [4] <https://es.scribd.com/doc/215613920/4-Soldabilidad-de-Los-Materiales> (02/2018)
- [5] Laminación Y Metalurgia. Avilés, Global R&D Centre, 2016. (Documentación interna)
- [6] Introduction to Heavy Plate Production in Asturias, b. Avilés. 2007. (Documentación interna)
- [7]<http://www.ensinger.es/es/semielaborados/informacion-general-sobre-los-productos-semielaborados/mecanizado-de-piezas-semielaboradas/recocido> (02/2018)
- [8]<http://www.bodycote.com/es-ES/services/heat-treatment/annealing-normalising/normalising.aspx> (02/2018)
- [9] <http://fisicaenasis.blogspot.com/2013/11/efecto-leidenfrost.html> (02/2018)
- [10] Houghton Fluid Technology. ‘Houghton On Quenching’. Valley Forge, Pensilvania. 2005. https://www.houghtonintl.com/sites/default/files/resources/article_-_houghton_on_quenching.pdf (02/2018)
- [11] ENDO, Shigeru, and Naoki NAKATA. ‘Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and High Performance Steel in JFE Steel’. 2015.<http://www.jfesteel.co.jp/en/research/report/020/pdf/020-02.pdf>. (03/2018)
- [12]https://www.houghtonintl.com/sites/default/files/resources/article__houghton_on_quenching.pdf.(03/2018)
- [13] <http://heatbath.com/2012/06/polyquench-15xn/> (03/2018)
- [14] www.specialmetals.com (03/2018)

[15] Manuales del sistema estándar ivf SmartQuench.

[16] O.M. Alifanov, Problemas inversos de transferencia de calor, Springer Verlag, Berlín, 223-247,(1994).

Anexo A.

Diagrama de Fe-C, que ayuda a describir las fases nombradas en la Introducción del proceso siderúrgico.



Anexo B

En este anexo se detalla el cálculo realizado por el sistema IVF Smart Quench, para la obtención de las curvas HTC.

El sistema almacenará los datos de tiempo y temperatura, registrados durante la realización de los ensayos. Con ellos se procederá a la determinación de los coeficientes de transferencia de calor (HTC).

El método de cálculo empleado por el sistema SQintegra, para la determinación del coeficiente de transferencia de calor, es el llamado método inverso, para el cual partimos de los siguientes datos iniciales:

- Una curva de enfriamiento, como se registró mediante el uso de una sonda de prueba instrumentada
 - La ubicación del termopar en la sonda de prueba (distancia radial desde la línea central), mm
 - Los parámetros termo-físicos del material de la sonda:
 - La conductividad térmica en función de la temperatura, $k(T)$, W / m / K
 - El calor específico en función de la temperatura, $C_p(T)$, J / m / kg
 - La densidad del material de la sonda, ρ , kg / m³
 - La temperatura del quenchant en el que se ha registrado la curva de enfriamiento, ° C
 - La llamada función de "conjetura inicial" (t , el vector de HTC (t) con m componentes)
-
- **Problema de conducción de calor inverso.**

La estimación del coeficiente de transferencia de calor dependiente de la temperatura (HTC (T)) durante el proceso de enfriamiento de la sonda ISO 9950 requiere la

solución de un problema de conducción de calor inverso (IHCP). ¿Cuáles son los problemas inversos? El Prof. Oleg Mikailivitch Alifanov, el gran proponente ruso de Métodos Inversa, dijo: la solución de un problema inverso implica determinar causas desconocidas basadas en observaciones de sus efectos. Esto está en contraste con el problema directo correspondiente, cuya solución implica encontrar efectos en base a una descripción completa de sus causas [14].

Para la determinación de la distribución de temperatura de la sonda ISO 9500 durante el enfriamiento por inmersión, debe realizarse la solución de la bien conocida ecuación diferencial parcial de Fourier (1):

$$\left(k \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r}\right) + \frac{k}{r} \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + Q = C_p \cdot \rho \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \quad (1)$$

donde r es la coordenada local, t es el tiempo, $T(r, t)$ es la temperatura, k es la conductividad térmica, C_p es el calor específico, ρ es la densidad y Q es el calor latente. La condición inicial (2) para la transferencia de calor axisimétrica es:

$$T(r, t = 0) = T_a(r) \quad (2)$$

donde T_a es la temperatura austenitizante, mientras que la condición de frontera (3)

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = HTC(T)[T(R, t) - T^{am}] \quad (3)$$

Siempre que se den todos los parámetros, así como las condiciones iniciales (2) y de contorno (3), se garantiza la solución exacta. El caso se denomina "método directo" cuando buscamos el efecto (la distribución de la temperatura) al conocer la causa (las propiedades del material, así como las condiciones iniciales y de contorno).

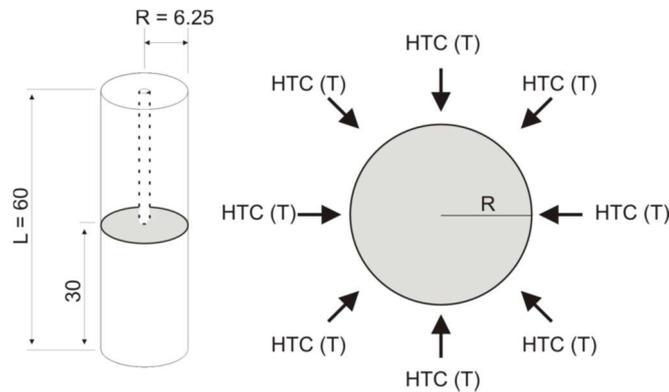


Figura A. Las condiciones de transferencia de calor de la sonda ISO 9950.

La predicción de HTC en el área superficial determinada por la ubicación del termopar en la sonda ISO 9950 (Figura A. Las condiciones de transferencia de calor de la sonda ISO 9950. (teniendo en cuenta solo la transferencia de calor radial dentro de la sonda) puede realizarse utilizando la señal de temperatura del termopar, que es la curva de enfriamiento ($T(t)$). Debemos deducir las causas ($HTC(T)$) conociendo sus efectos ($T(t)$) en contraste con la metodología directa. Este tipo de casos se consideran como problemas "mal planteados", debido a la no linealidad del problema de transferencia de calor. Por este motivo, no se puede usar ninguna metodología directa para lograr la solución, ya que podría usarse para casos de transferencia directa de calor [15].

- **El módulo inverso SQintegra**

El algoritmo inverso incrustado en el programa (pestaña Invertir cálculo de SQ en la ventana HTC) se basa en las siguientes suposiciones. El coeficiente de transferencia de calor se toma en consideración como una función del tiempo, $HTC(t)$, durante el proceso de enfriamiento. La dependencia temporal del coeficiente de transferencia de calor que se produce durante el enfriamiento puede aproximarse mediante funciones poligonales, cada una definida por un conjunto de parámetros (Figura B). Los parámetros de diseño desconocidos pueden expresarse mediante el vector de componentes.

$$\tau = (\tau_1, \dots, \tau_m) = [HTC(t = t_1), HTC(t = t_2), HTC(t = t_3), \dots, HTC(t = t_m),]$$

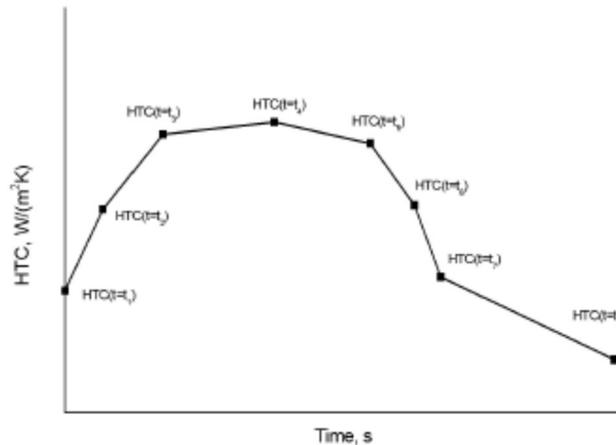


Figura B. Aproximaciones de tiempo de los coeficientes de transferencia de calor.

La temperatura en diferentes instantes de tiempo se mide mediante el termopar en la región sólida, ubicada en r_k (en el caso de la sonda ISO 9950: $k = 0$). Al llamar a T_k^m la temperatura medida, y T_k^c la temperatura calculada numéricamente en la ubicación del termopar, uno puede plantear el problema de obtener los valores de los coeficientes de transferencia de calor τ_i que minimizan la función:

$$S = S(\tau_1, \dots, \tau_m) = \sum_{k=1}^n (T_k^m - T_k^c)^2 = \min \quad (4)$$

siendo n el número total de temperaturas medidas, es decir, el número de puntos multiplicado por el número de mediciones en cada punto. El algoritmo inverso SQintegra predice el conjunto óptimo de τ (el vector de $HTC(t)$) donde la diferencia entre las evoluciones de temperatura medidas y calculadas en la ubicación del termopar es mínima.

Los siguientes parámetros son necesarios para la estimación del coeficiente de transferencia de calor:

- La curva de enfriamiento medida usando la sonda, T_k m (t).
- La ubicación del termopar (distancia medida desde la línea central de la sonda), r_k , (mm).
- Los parámetros termo-físicos del material de la sonda:
 - k (T), la conductividad térmica, (W / m / K).
 - C_p (T), el calor específico, (J / m / kg).
- ρ , la densidad, (kg / m³).
- La temperatura del quenchant en el que se ha registrado la curva de enfriamiento, (° C).
- La llamada función de "conjetura inicial" (τ , el vector de HTC (t) con m componentes).

La función de "conjetura inicial" se da como pares de datos

```
Time_00 [s], HTC_00 [W/m2/K]
Time_01 [s], HTC_01 [W/m2/K]
Time_02 [s], HTC_02 [W/m2/K]
...
...
...
Time_m [s], HTC_m [W/m2/K]
```

Al crear una función de "conjetura inicial", los valores importantes son los pasos de tiempo que se utilizarán en el cálculo inverso (los valores de HTC se pueden establecer en cualquier valor). Hay tres reglas generales que deben tenerse en cuenta al editar una función de "conjetura inicial" existente o al crear una nueva:

- Los pasos de tiempo deben ser más cortos cuando hay discontinuidades en la curva de enfriamiento, como en la transición de fase de vapor a fase de ebullición
- Las áreas con altas tasas de enfriamiento necesitan pasos de tiempo más estrechos

- Demasiados pasos de tiempo o muy estrechos pueden causar problemas de convergencia cuando se utiliza el cálculo inverso.

Anexo C

En este Anexo se muestra el procedimiento de cálculo para el ensayo de la bañera.

Durante la realización del ensayo se extraen datos mediante la utilización de termopares dispuestos a lo largo de la chapa de acero inoxidable. Los termopares recogerán datos de temperatura a lo largo del tiempo. A continuación se inicia el programa Matlab®, donde se ha diseñado un programa para que realice los cálculos pertinente de forma automática y después nos muestre por pantalla el resultado gráficamente.

El programa realizará la $\frac{dT}{dt}$ para obtener así la velocidad de enfriamiento. A continuación representará la temperatura (T (°C)) frente al tiempo (t) y la temperatura frente a la velocidad de enfriamiento (°C/s).

En base al primer programa se construirá un segundo, que evaluará la temperatura (T (°C)) frente a la velocidad de enfriamiento (°C/s), de todos los ensayos a la vez, para así poder tener una comparativa global de todas ellas.

A continuación se recogen los códigos de Matlab®, utilizados para el cálculo de las curvas de enfriamiento, en el ensayo de la bañera.

En primer lugar aparece el código para la representación de la temperatura frente a la velocidad y frente al tiempo, para cada experimento.

```
%Programa para lectura de datos de T frente a velocidad y T frente a  
%tiempo, para cada experimento.
```

```
clear all  
clc
```

```
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC023','A:D','basic');%lee los archivos para el  
para los ensayos T2filt
```



```
t=DATA(:,1); %datos de tiempo
T=DATA(:,2); %termopar de superficie
T2=DATA(:,3); %temopar 1/4
T3=DATA(:,4); %termopar centro

for i=1:(size(T)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev(i)=-(T(i+1)-T(i))/(t(i+1)-t(i));
end

plot (t,T,'b',t,T2,'r',t,T3,'g')
xlabel('t(s)')

%función que nos da dos ejes x, uno en la parte de arriba y otro en la parte de
abajo.
ax1=gca;
ax1_pos=ax1.Position;
ax2=axes('Position',ax1_pos,'XAxisLocation','top','color','none')
xlabel('°C/s')
ylabel('T(°C)')
hold on
plot(dev,T(1:end-1),'b',dev,T2(1:end-1),'r',dev,T3(1:end-1),'g','parent',ax2)

grid on

legend('T(s)','T(1/4)','T(c)')
title ('nombre')
```

A continuación aparece el segundo programa, que sirve para comparar en una misma gráfica todas las curvas de la temperatura frente a la velocidad, correspondientes a todos los experimentos.

```
%Programa para lectura de datos T frente a velocidad (escala global)
clear all
clc

%Experimento EQC001
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC001','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t=DATA(:,1); %datos de tiempo
T=DATA(:,2); %termopar de superficie
```

```
for i=1:(size(T)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev(i)=-(T(i+1)-T(i))/(t(i+1)-t(i));
end

%Experimento EQC002
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC002','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t2=DATA(:,1); %datos de tiempo
T2=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T2)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev2(i)=-(T2(i+1)-T2(i))/(t2(i+1)-t2(i));
end

%Experimento EQC003
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC003','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t3=DATA(:,1); %datos de tiempo
T3=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T3)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev3(i)=-(T3(i+1)-T3(i))/(t3(i+1)-t3(i));
end

%Experimento EQC005
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC005','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t5=DATA(:,1); %datos de tiempo
T5=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T5)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev5(i)=-(T5(i+1)-T5(i))/(t5(i+1)-t5(i));
end

%Experimento EQC006
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC006','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t6=DATA(:,1); %datos de tiempo
T6=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T6)-1) %realiza la deriva dT/dt
```

```
dev6(i)=-((T6(i+1)-T6(i))/(t6(i+1)-t6(i)));  
end
```

```
%Experimento EQC007
```

```
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC007','A:B','basic');%lee los archivos para el  
para los ensayos T2filt
```

```
t7=DATA(:,1); %datos de tiempo  
T7=DATA(:,2); %termopar de superficie
```

```
for i=1:(size(T7)-1) %realiza la deriva dT/dt  
dev7(i)=-((T7(i+1)-T7(i))/(t7(i+1)-t7(i)));  
end
```

```
%Experimento EQC008
```

```
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC008','A:B','basic');%lee los archivos para el  
para los ensayos T2filt
```

```
t8=DATA(:,1); %datos de tiempo  
T8=DATA(:,2); %termopar de superficie
```

```
for i=1:(size(T8)-1) %realiza la deriva dT/dt  
dev8(i)=-((T8(i+1)-T8(i))/(t8(i+1)-t8(i)));  
end
```

```
%Experimento EQC009
```

```
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC009','A:B','basic');%lee los archivos para el  
para los ensayos T2filt
```

```
t9=DATA(:,1); %datos de tiempo  
T9=DATA(:,2); %termopar de superficie
```

```
for i=1:(size(T9)-1) %realiza la deriva dT/dt  
dev9(i)=-((T9(i+1)-T9(i))/(t9(i+1)-t9(i)));  
end
```

```
%Experimento EQC010
```

```
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC010','A:B','basic');%lee los archivos para el  
para los ensayos T2filt
```

```
t10=DATA(:,1); %datos de tiempo  
T10=DATA(:,2); %termopar de superficie
```

```
for i=1:(size(T10)-1) %realiza la deriva dT/dt  
dev10(i)=-((T10(i+1)-T10(i))/(t10(i+1)-t10(i)));
```

end

%Experimento EQC011

DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC011','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t11=DATA(:,1); %datos de tiempo

T11=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T11)-1) %realiza la deriva dT/dt

dev11(i)=-(T11(i+1)-T11(i))/(t11(i+1)-t11(i));

end

%Experimento EQC0012

DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC012','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t12=DATA(:,1); %datos de tiempo

T12=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T12)-1) %realiza la deriva dT/dt

dev12(i)=-(T12(i+1)-T12(i))/(t12(i+1)-t12(i));

end

%Experimento EQC013

DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC013','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t13=DATA(:,1); %datos de tiempo

T13=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T13)-1) %realiza la deriva dT/dt

dev13(i)=-(T13(i+1)-T13(i))/(t13(i+1)-t13(i));

end

%Experimento EQC014

DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC014','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t14=DATA(:,1); %datos de tiempo

T14=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T14)-1) %realiza la deriva dT/dt

dev14(i)=-(T14(i+1)-T14(i))/(t14(i+1)-t14(i));

end

```
%Experimento EQC021
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC021','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t21=DATA(:,1); %datos de tiempo
T21=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T21)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev21(i)=-(T21(i+1)-T21(i))/(t21(i+1)-t21(i));
end

%Experimento EQC022
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC022','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t22=DATA(:,1); %datos de tiempo
T22=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T22)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev22(i)=-(T22(i+1)-T22(i))/(t22(i+1)-t22(i));
end

%Experimento EQC023
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC023','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t23=DATA(:,1); %datos de tiempo
T23=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T23)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev23(i)=-(T23(i+1)-T23(i))/(t23(i+1)-t23(i));
end

%Experimento EQC024
DATA=xlsread('RESUMEN_DQ','EQC024','A:B','basic');%lee los archivos para el
para los ensayos T2filt

t24=DATA(:,1); %datos de tiempo
T24=DATA(:,2); %termopar de superficie

for i=1:(size(T24)-1) %realiza la deriva dT/dt
    dev24(i)=-(T24(i+1)-T24(i))/(t24(i+1)-t24(i));
end
```

```
plot  
(t,T,'b',t2,T2,'g',t3,T3,'y',t5,T5,'r',t6,T6,'c',t7,T7,'b',t8,T8,'g',t9,T9,'y',t10,T10,'r',t11,T11,'c',t12,T12,'k',t13,T13,'m',t14,T14,'k',t21,T21,'m',t22,T22,'-r',t23,T23,'-g',t24,T24,'-c')  
xlabel('t(s)')
```

%función que nos da dos ejes x, uno en la parte de arriba y otro en la parte de abajo.

```
ax1=gca;  
ax1_pos=ax1.Position;  
ax2=axes('Position',ax1_pos,'XAxisLocation','top','color','none')  
xlabel('°C/s')  
ylabel('T(°C)')  
hold on  
plot(dev,T(1:end-1),'b',dev2,T2(1:end-1),'g',dev3,T3(1:end-1),'y',dev5,T5(1:end-1),'r',dev6,T6(1:end-1),'c',dev7,T7(1:end-1),'b',dev8,T8(1:end-1),'g',dev9,T9(1:end-1),'y',dev10,T10(1:end-1),'r',dev11,T11(1:end-1),'c',dev12,T12(1:end-1),'k',dev13,T13(1:end-1),'m',dev14,T14(1:end-1),'k',dev21,T21(1:end-1),'m',dev22,T22(1:end-1),'-r',dev23,T23(1:end-1),'-g',dev24,T24(1:end-1),'-c','parent',ax2)
```

```
grid on
```

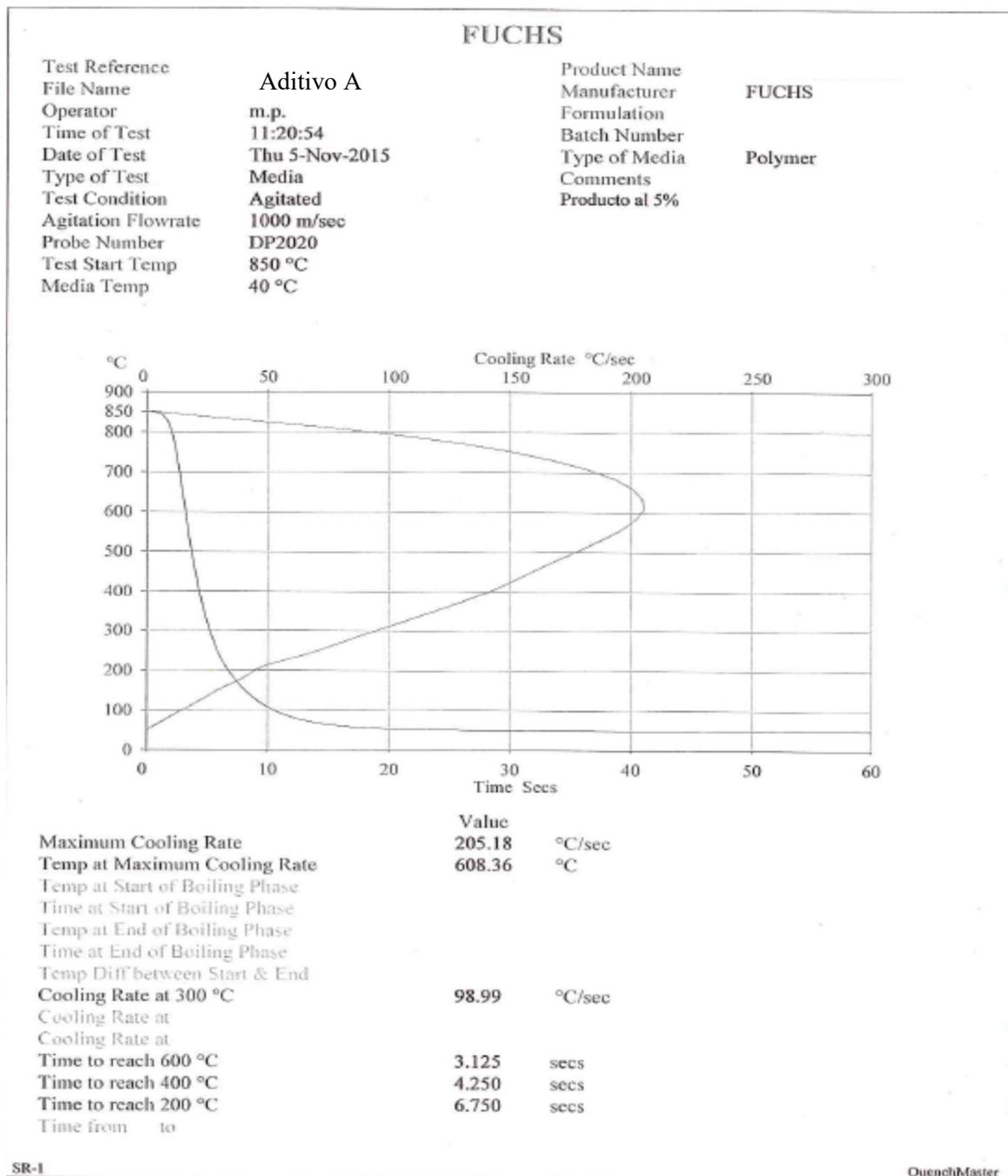
```
legend('EQC001','EQC002','EQC003','EQC005','EQC006','EQC007','EQC008','EQC009','EQC010','EQC011','EQC012','EQC013','EQC014','EQC021','EQC022','EQC023','EQC024')
```

```
title ('RESUMEN TERMOPAR SUPERFICIE')
```

Anexo D

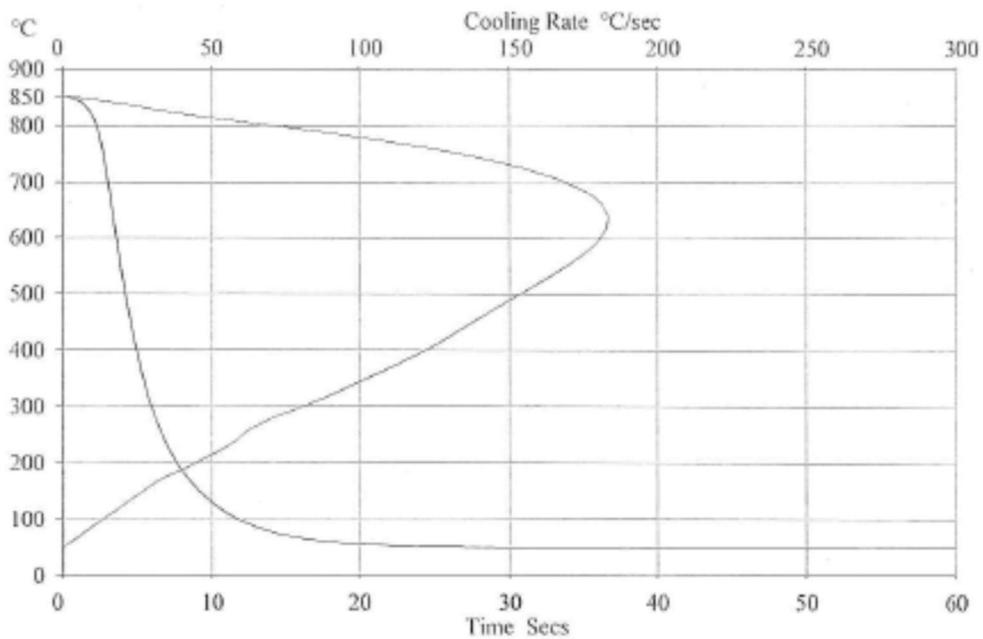
En este apartado se recogen las fichas técnicas, que representan las curvas de enfriamiento de cada aditivo utilizado, durante el periodo de ensayos.

Curvas Aditivo A



FUCHS

Test Reference	THERMISOL 251	Product Name	THERMISOL 251
File Name	Thermisol10	Manufacturer	FUCHS
Operator	m.p.	Formulation	
Time of Test	11:31:53	Batch Number	
Date of Test	Thu 5-Nov-2015	Type of Media	Polymer
Type of Test	Media	Comments	
Test Condition	Agitated	Producto al 10%	
Agitation Flowrate	1000 m/sec		
Probe Number	DP2020		
Test Start Temp	850 °C		
Media Temp	40 °C		



Maximum Cooling Rate	Value	
	183.36	°C/sec
Temp at Maximum Cooling Rate	637.62	°C
Temp at Start of Boiling Phase		
Time at Start of Boiling Phase		
Temp at End of Boiling Phase		
Time at End of Boiling Phase		
Temp Diff between Start & End		
Cooling Rate at 300 °C	83.64	°C/sec
Cooling Rate at		
Cooling Rate at		
Time to reach 600 °C	3.500	secs
Time to reach 400 °C	4.875	secs
Time to reach 200 °C	7.625	secs
Time from to		

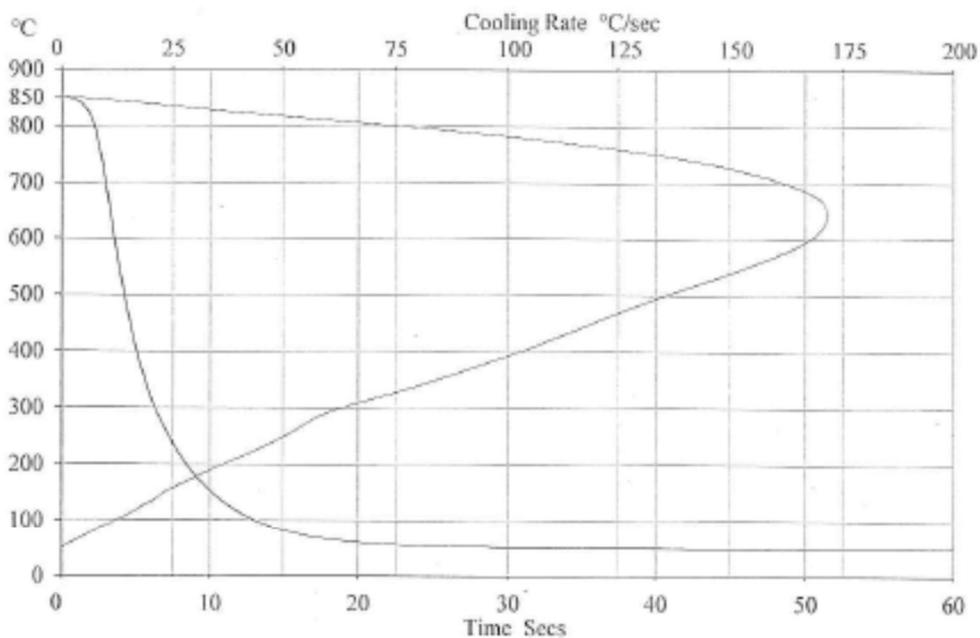
SR-1

QuenchMaster



FUCHS

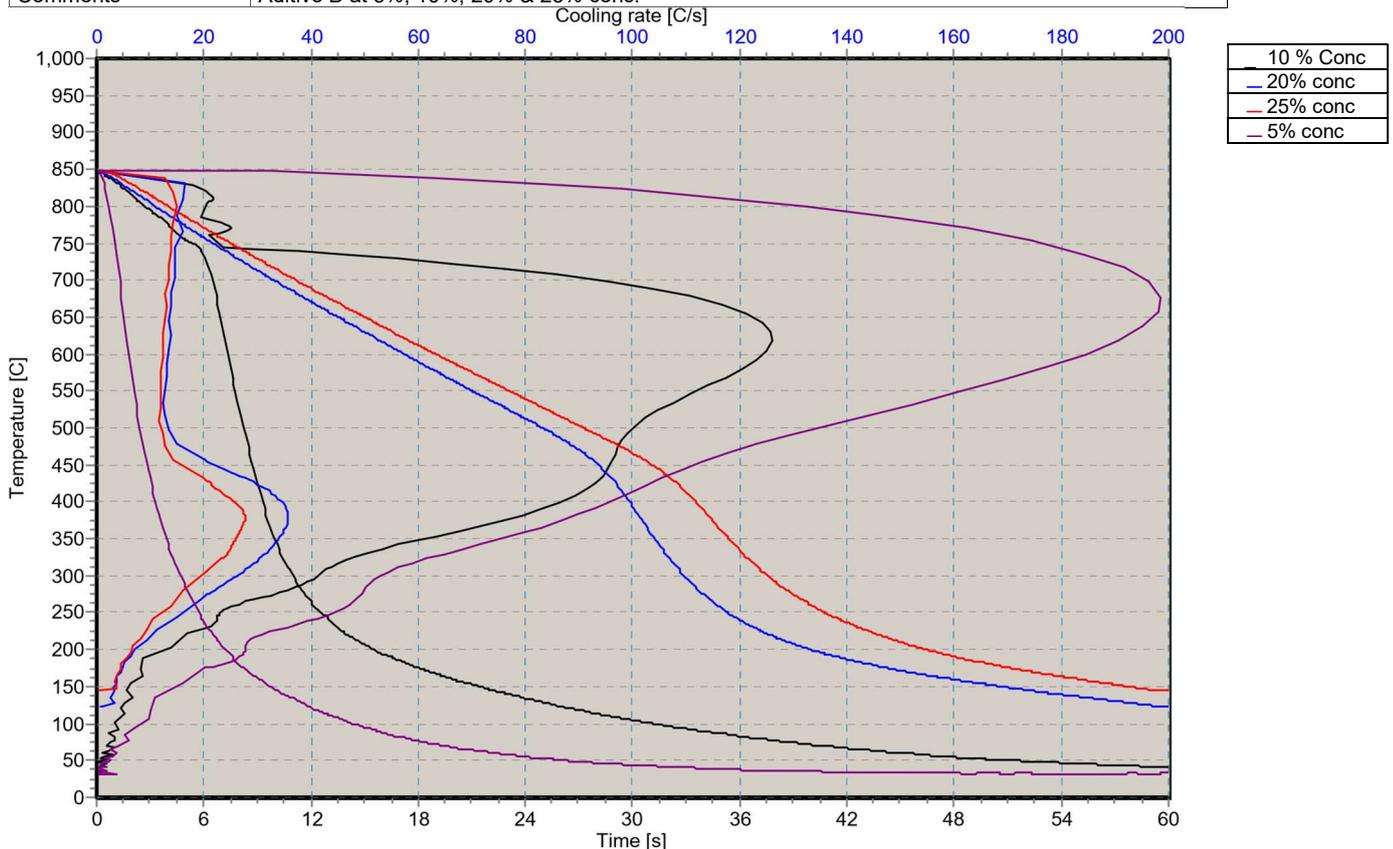
Test Reference	THERMISOL 251	Product Name	THERMISOL 251
File Name	Thermisol15.qdf	Manufacturer	FUCHS
Operator	m.p.	Formulation	
Time of Test	11:43:35	Batch Number	
Date of Test	Thu 5-Nov-2015	Type of Media	Polymer
Type of Test	Media	Comments	
Test Condition	Agitated	Producto al 15%	
Agitation Flowrate	1000 m/sec		
Probe Number	DP2020		
Test Start Temp	850 °C		
Media Temp	40 °C		



Maximum Cooling Rate	Value	
	171.76	°C/sec
Temp at Maximum Cooling Rate	647.58	°C
Temp at Start of Boiling Phase		
Time at Start of Boiling Phase		
Temp at End of Boiling Phase		
Time at End of Boiling Phase		
Temp Diff between Start & End		
Cooling Rate at 300 °C	64.68	°C/sec
Cooling Rate at		
Time to reach 600 °C	3.500	secs
Time to reach 400 °C	5.000	secs
Time to reach 200 °C	8.375	secs
Time from to		

Curvas Aditivo B

Date of report	10/16/2015	Probe No.	441
Report No.	01	Reference probe	440
Date of test	10/16/2015	Product type	Polymer Quenchant
Test site	Chandivali	Medium temperature [C]RT (25)	
Operator	MS	Medium concentration [%]100	
Folder	Polymer Quenchant	Agitation rate [m/s]	Vigorous (900 rpm)
Approved	AC	Ref. to standard	ASTM D6482
Comments	Aditivo B at 5%, 10%, 20% & 25% conc.		



Property	Unit	5% conc.ivf	10 % Conc.ivf	20% conc.ivf	25% conc.ivf
Maximum Cooling Rate	C/s	198.2	125.95	35.73	27.68
Temp. at Max. Cooling Rate	C	660.44	617.8	379.1	376.84
Temp at Start of Boiling	C	849.51	751.39	527.76	484.91
Temp at Start of Convection	C	162.58	212.36	182.9	218.81
Cooling Rate at 300 C	C/s	53.05	41.26	26.16	19.58
Time to 600 C	s	1.8	7.34	17.2	18.98
Time to 400 C	s	3.32	9.29	29.83	33.54
Time to 200 C	s	7.22	15.52	39.98	46.46
Theta 1	C	848.75	750.97	526.55	483.79
Theta 2	C	342.11	279.74	237.69	253.21

Curvas Aditivo C



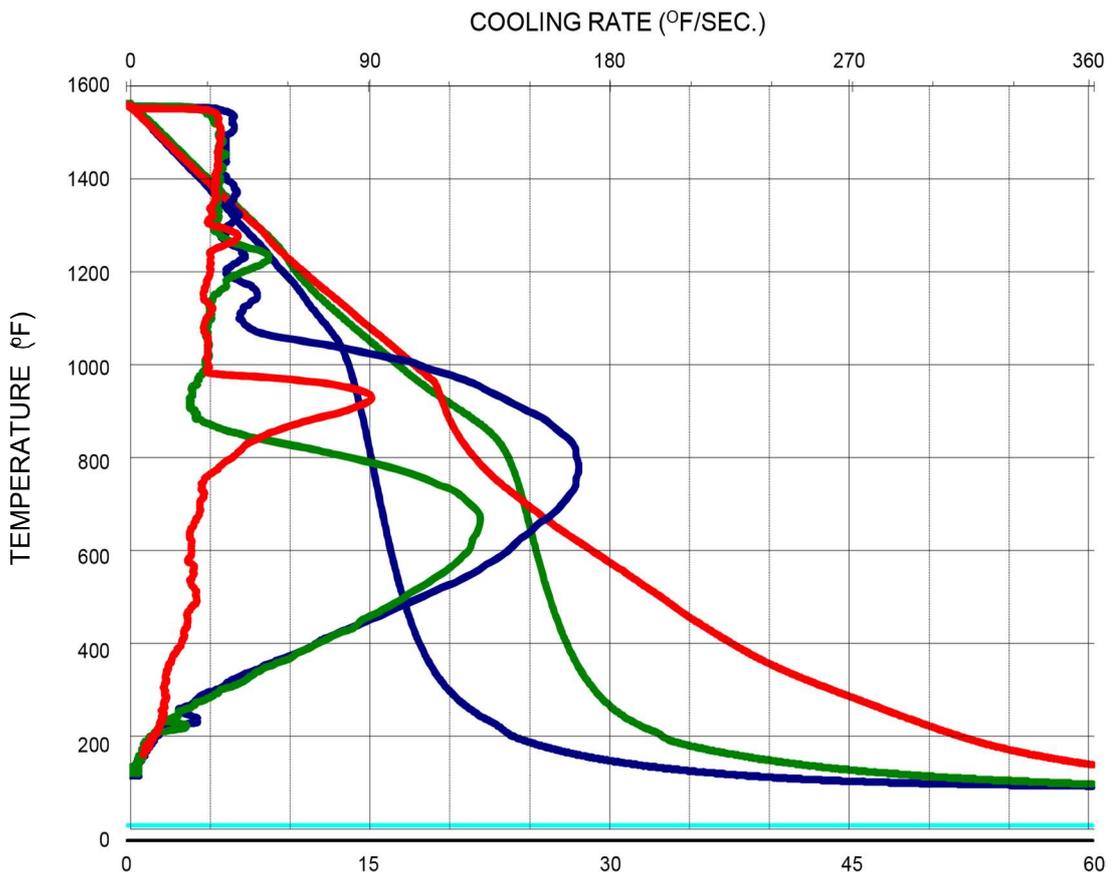
COOLING CURVE ANALYSIS

By IVF Smartquench

Houghton International / Valley Forge, PA

QRS #	Reference	Date Taken:	1/5/2015
		Date Tested:	1/5/2015
Test Parameters:	Sample Size - 1 liter	Bath Temp.-	100°F
	Probe -IFHT Std. Inconel 600	Agitation-	Moderate

- Sample #1-** 5% Aditivo C **Sample #2 -**
10% Aditivo C
- Sample #3 -** 20% Aditivo C



Curvas Aditivo D

Figure 1 ● Concentration Effect on Cooling and Cooling Rate for I Aditivo D
Agitation Rate = 15 L/min.

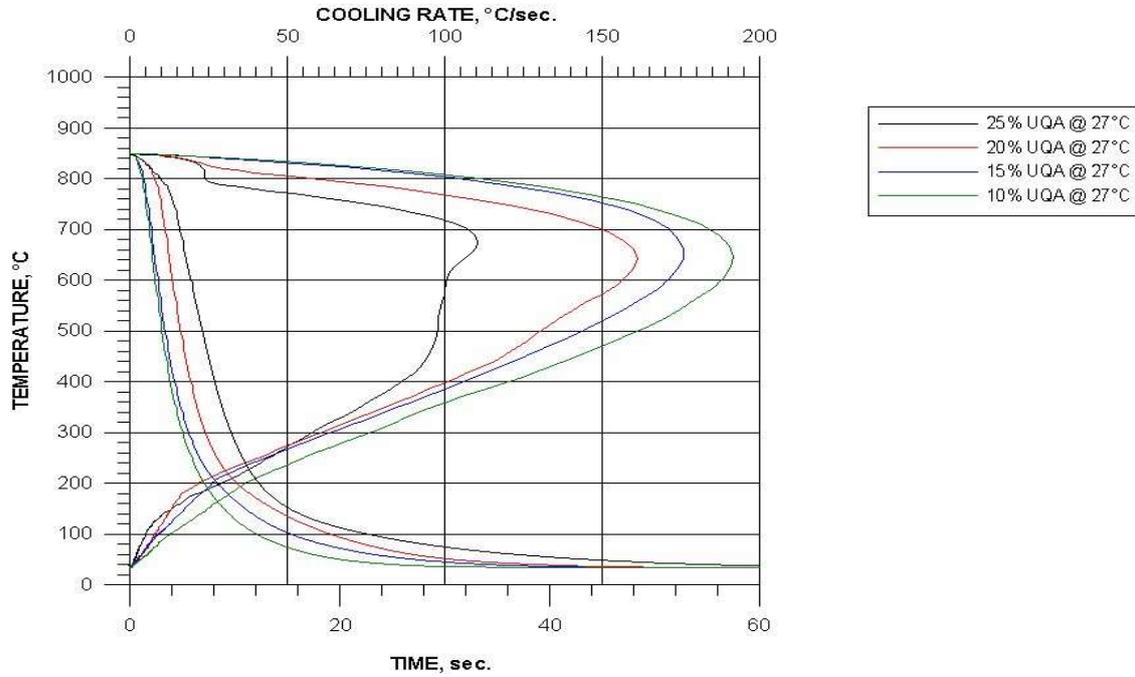
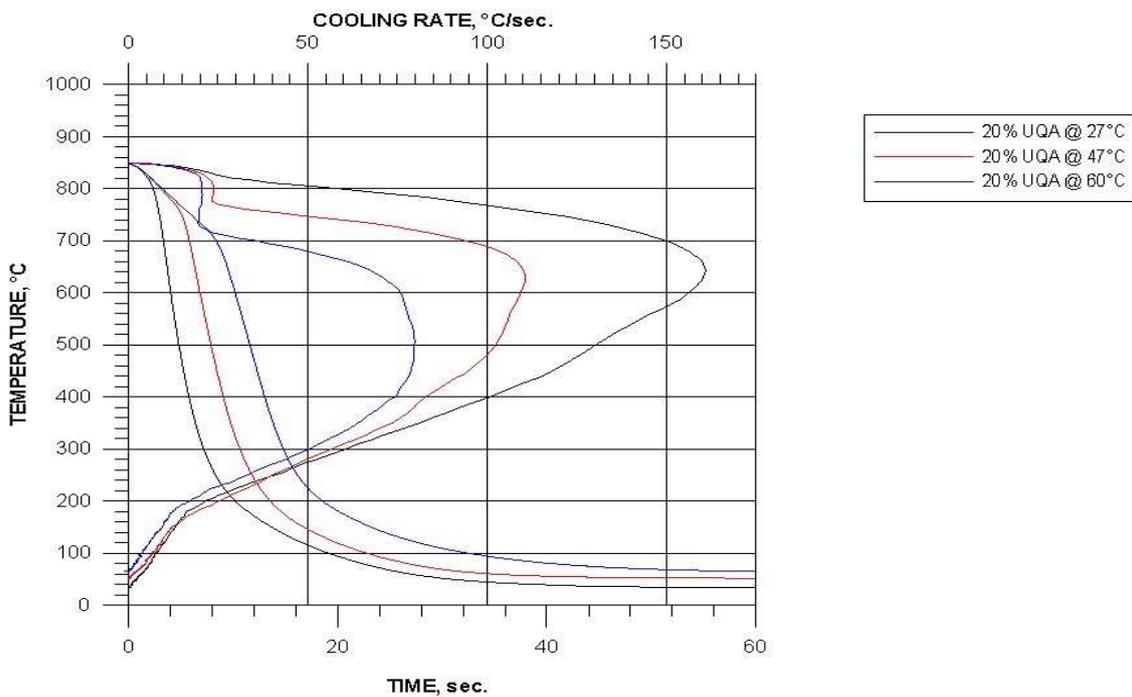
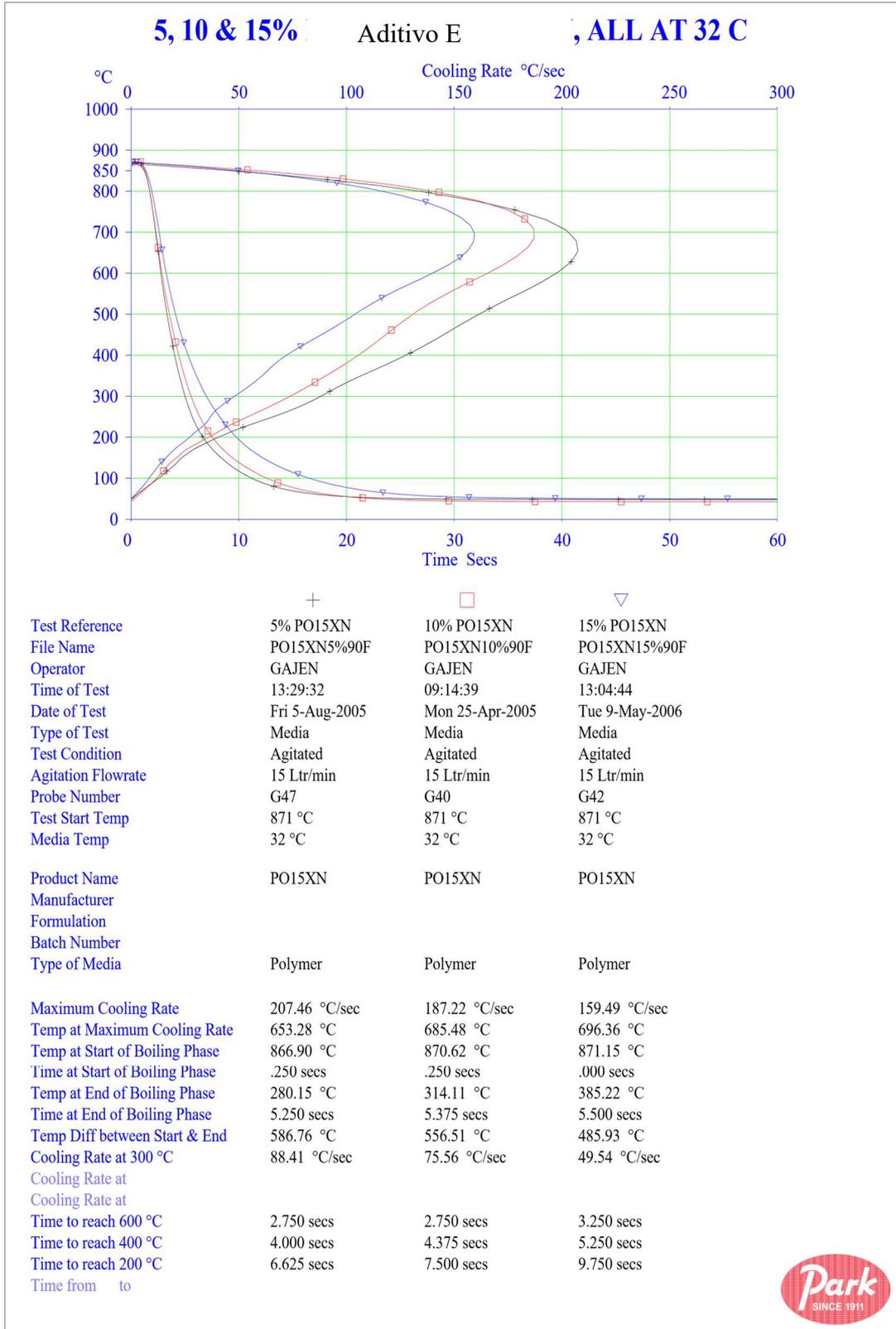


Figure 2 ● Temperature Effect on Cooling and Cooling Rate for I Aditivo D
Agitation Rate = 15 L/min.



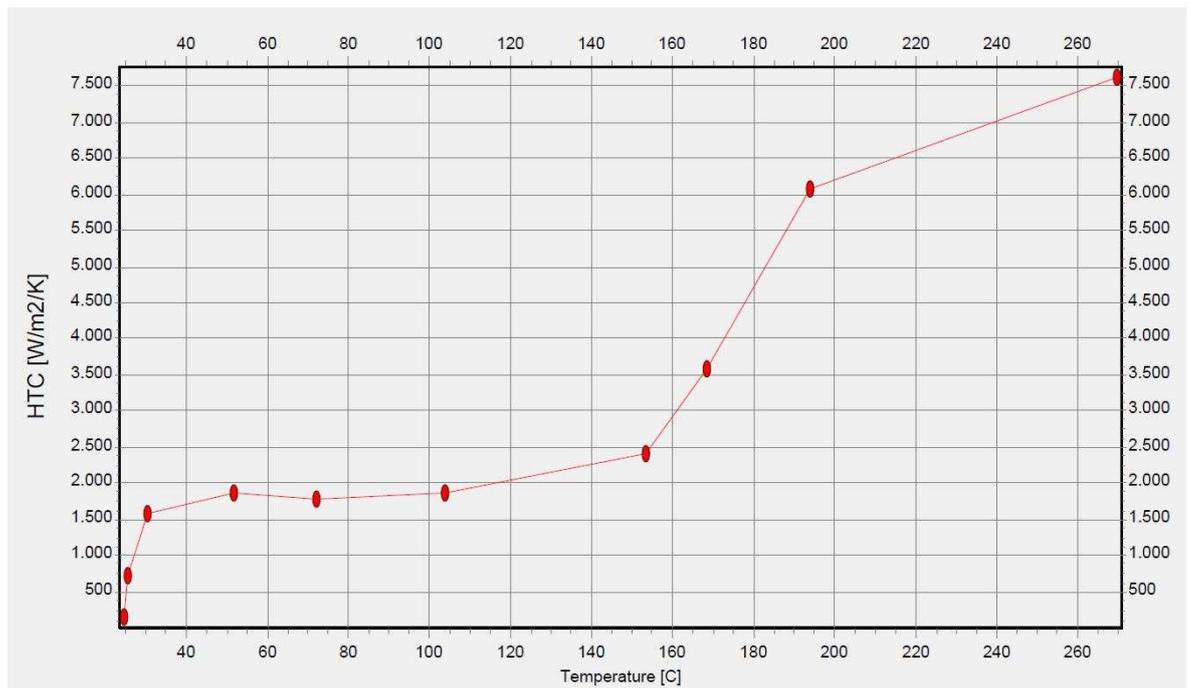
Curvas Aditivo E

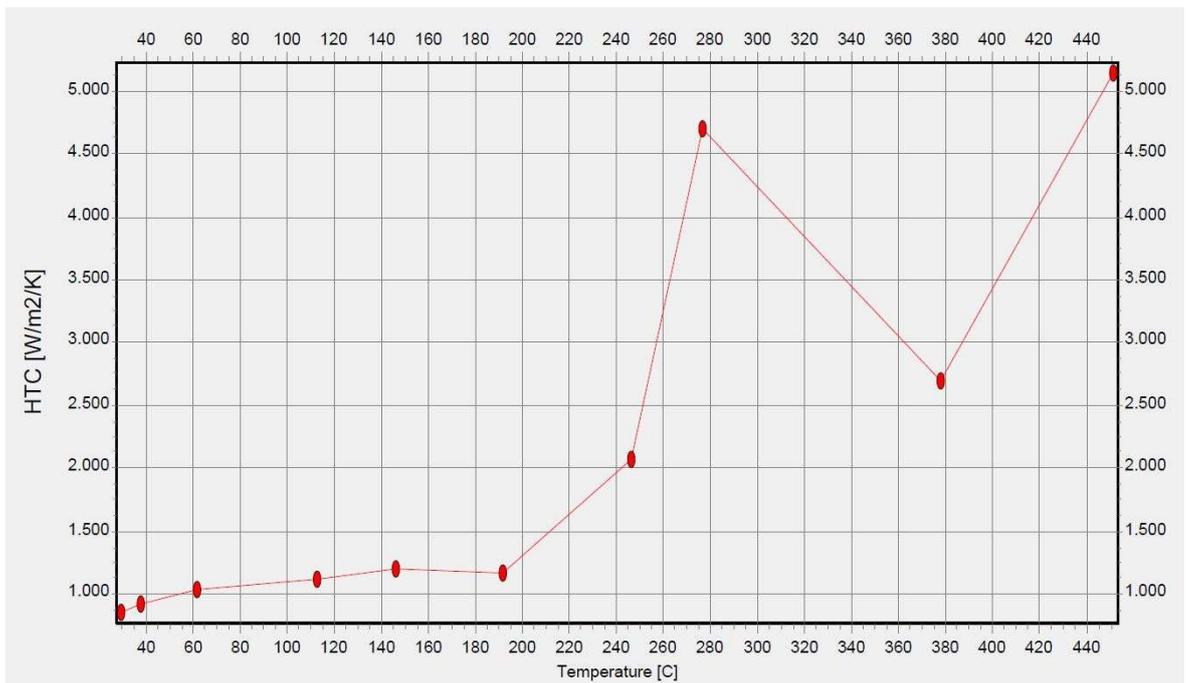
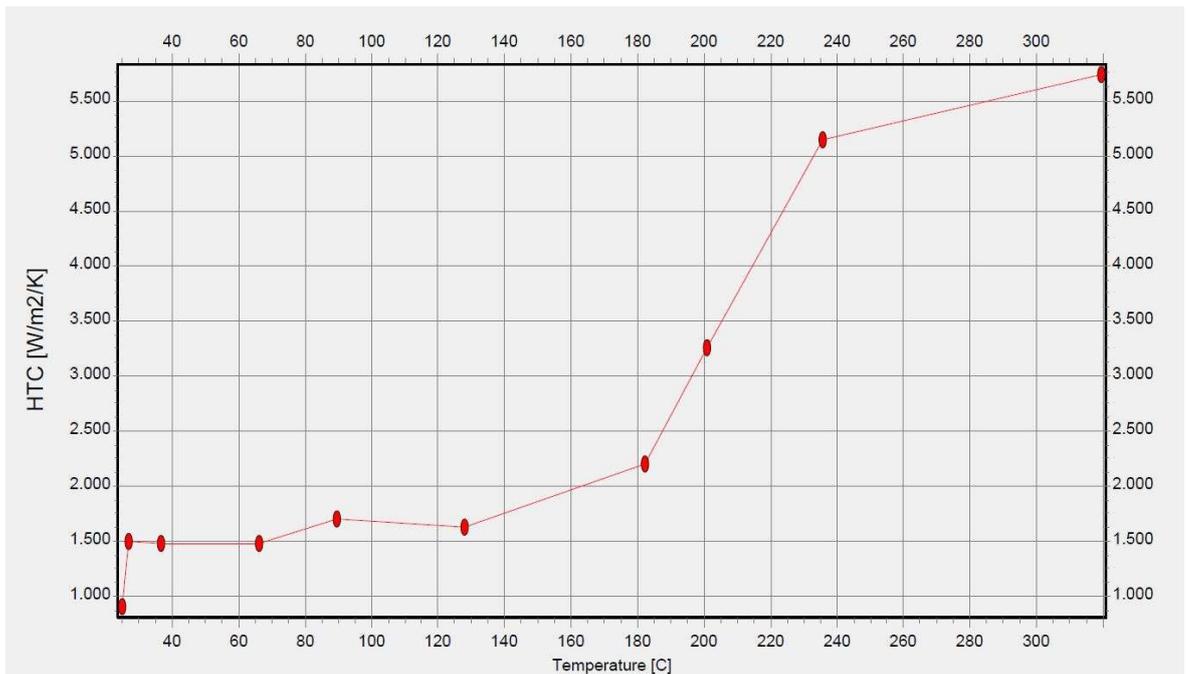


Anexo E

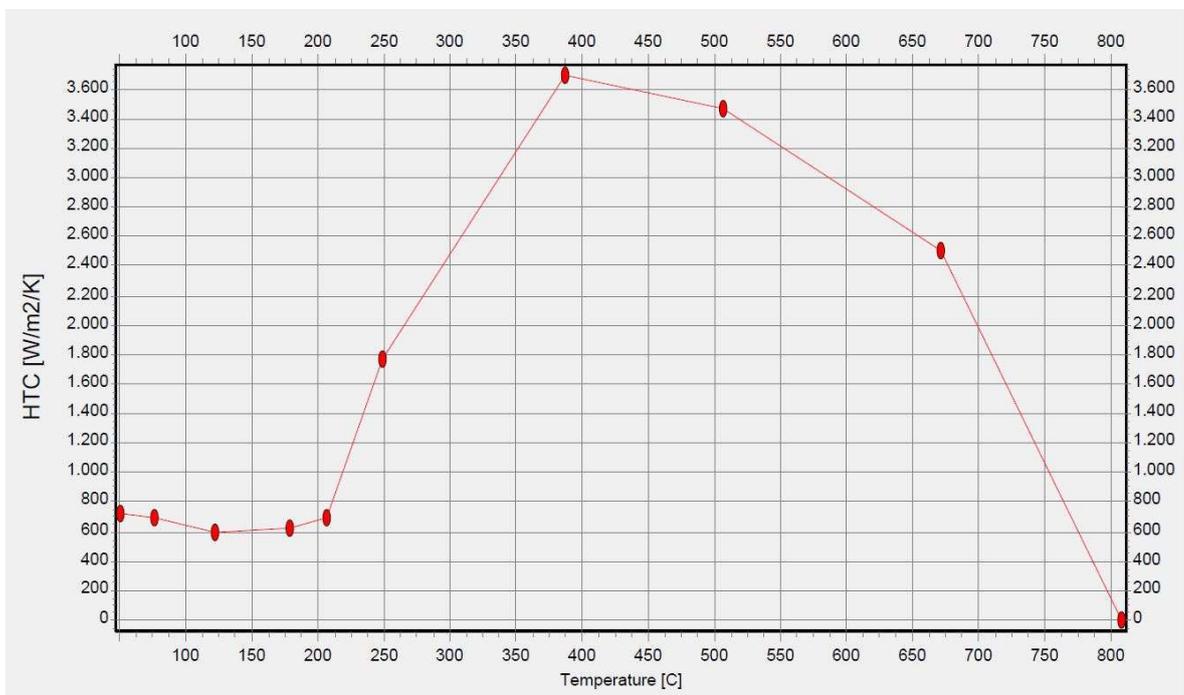
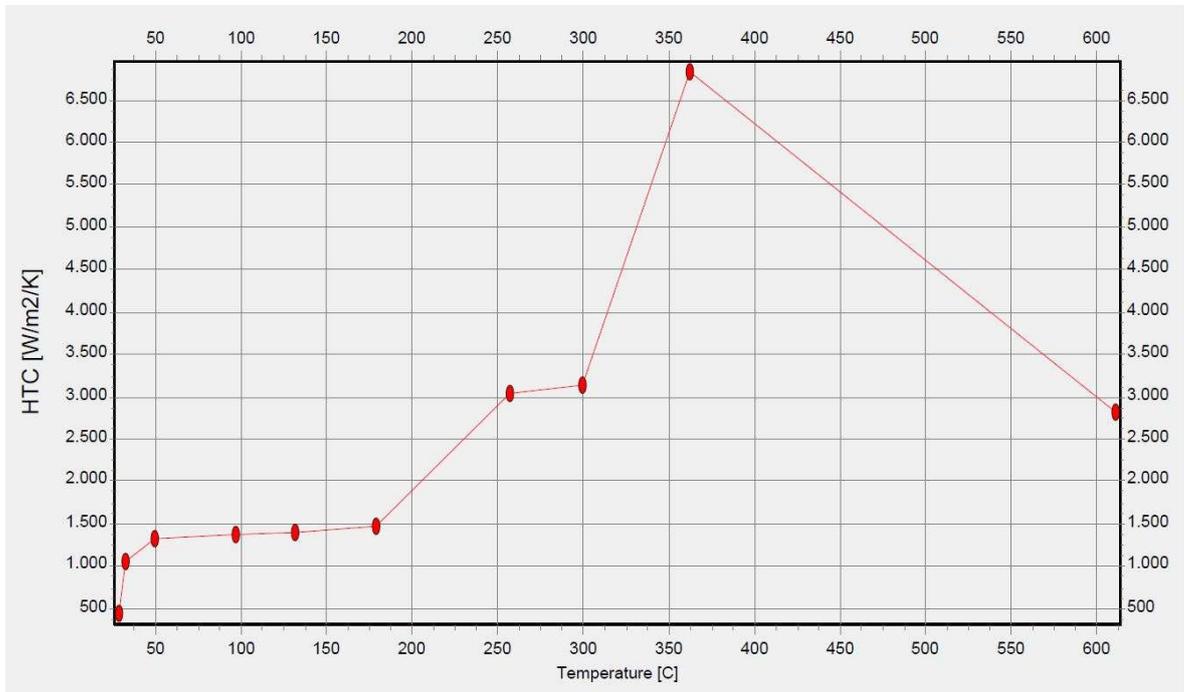
En este anexo se recogen las curvas HTC, para cada aditivo utilizado en los ensayos del Ivf Smart Quench., con concentraciones del 5%, 10 % y 15%.

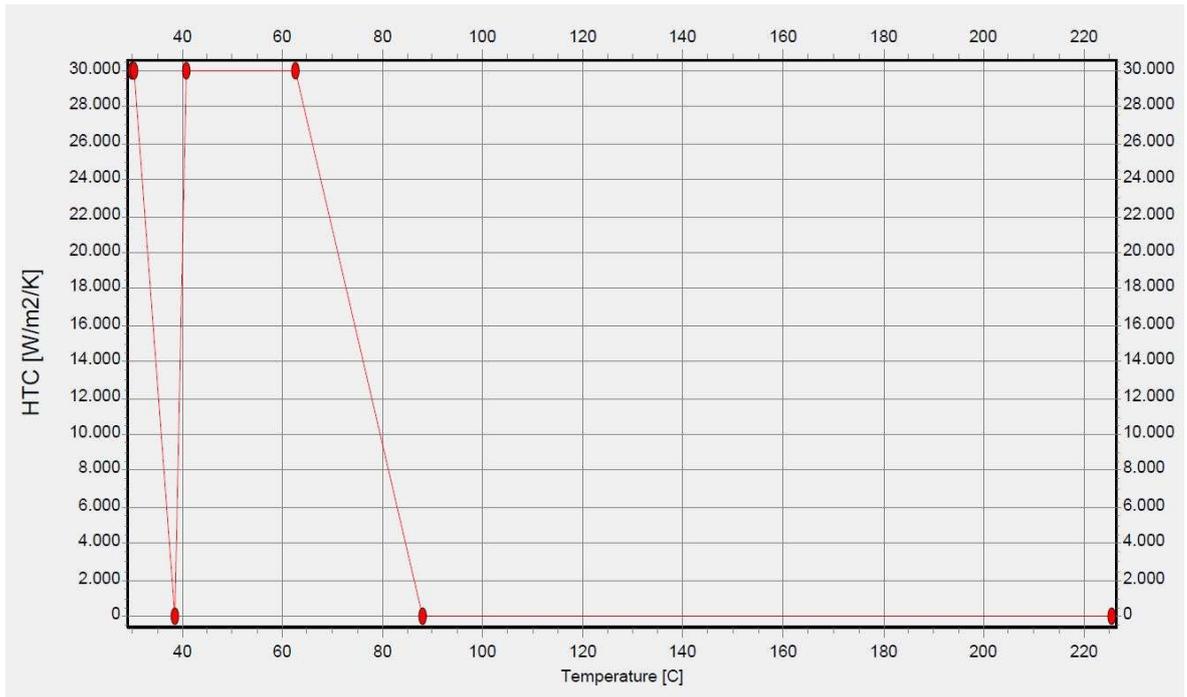
Curvas Aditivo A



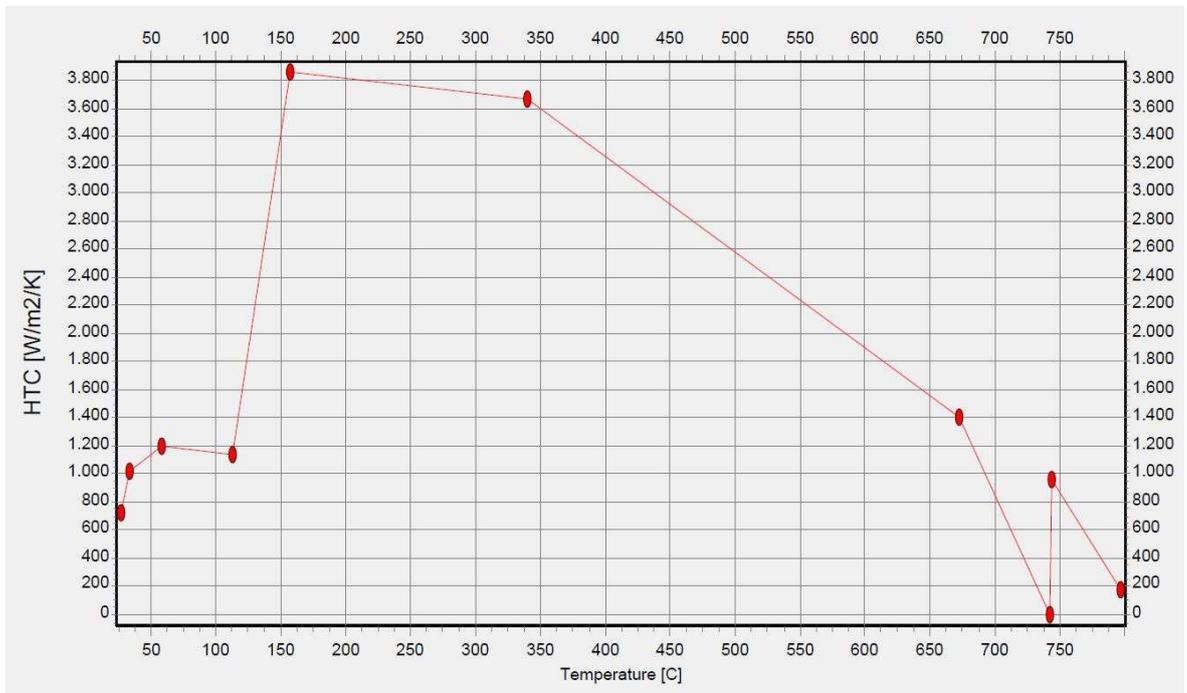


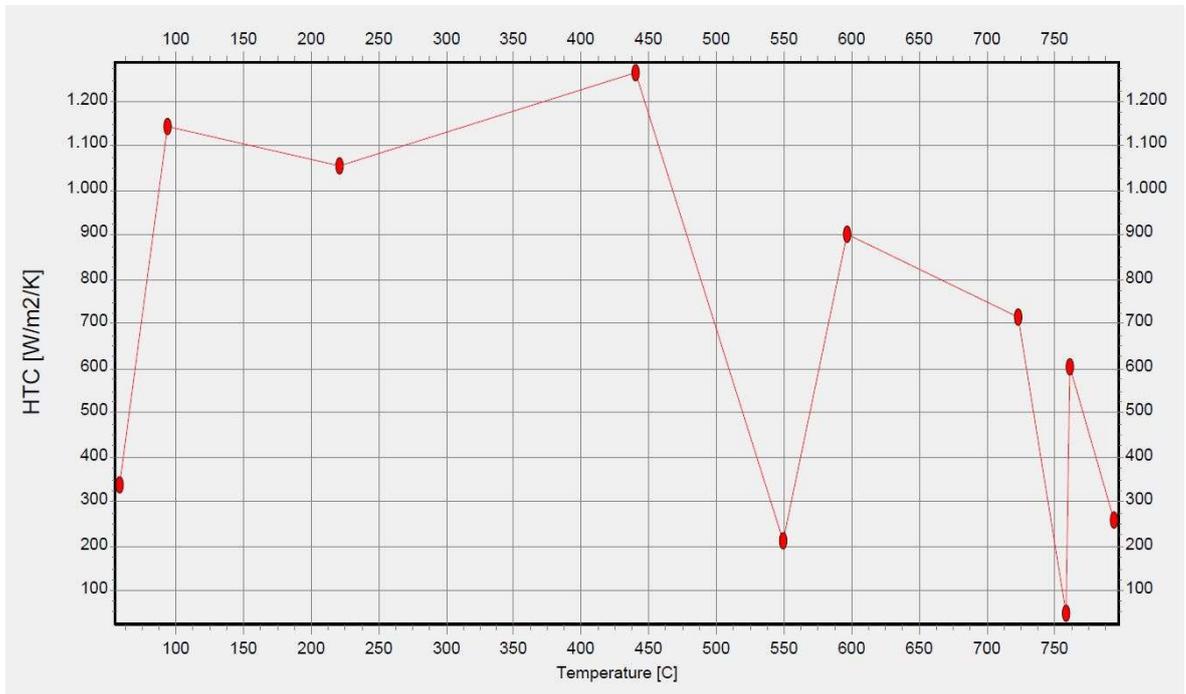
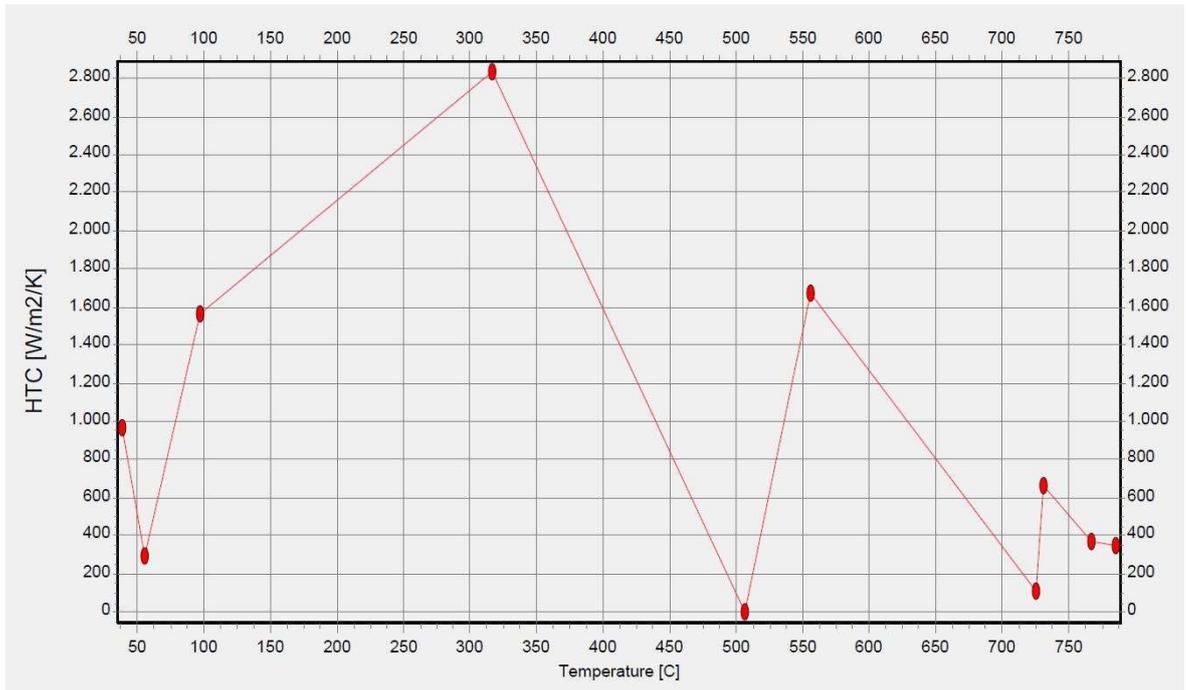
Curvas Aditivo B



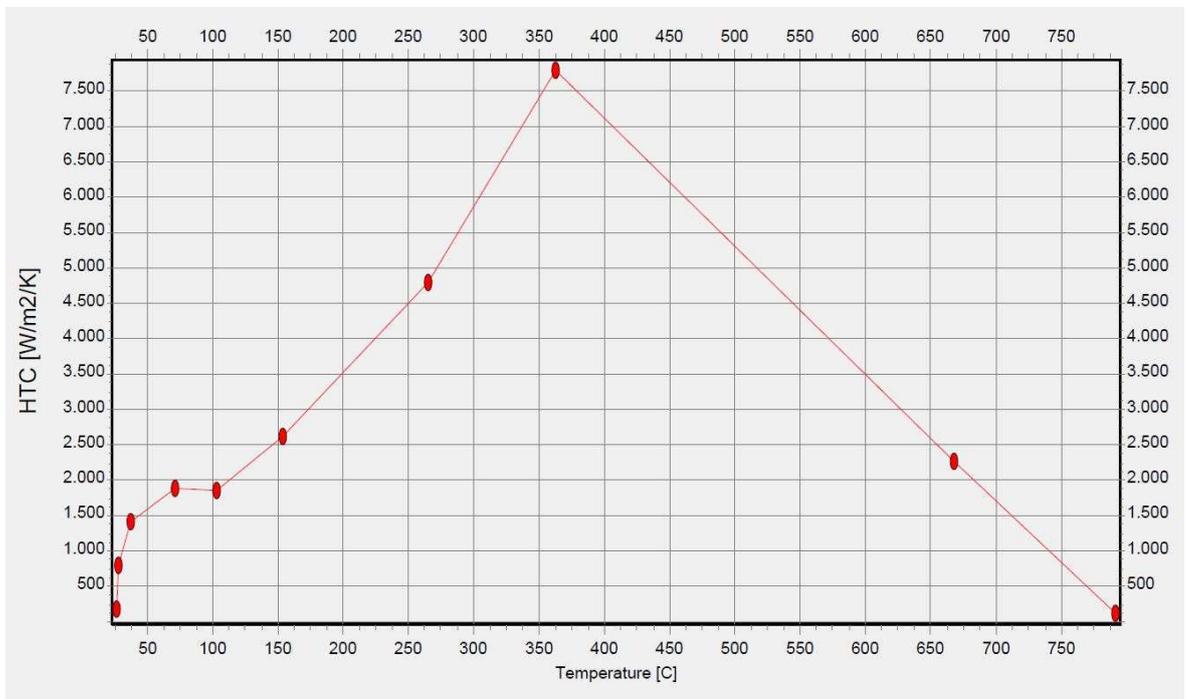
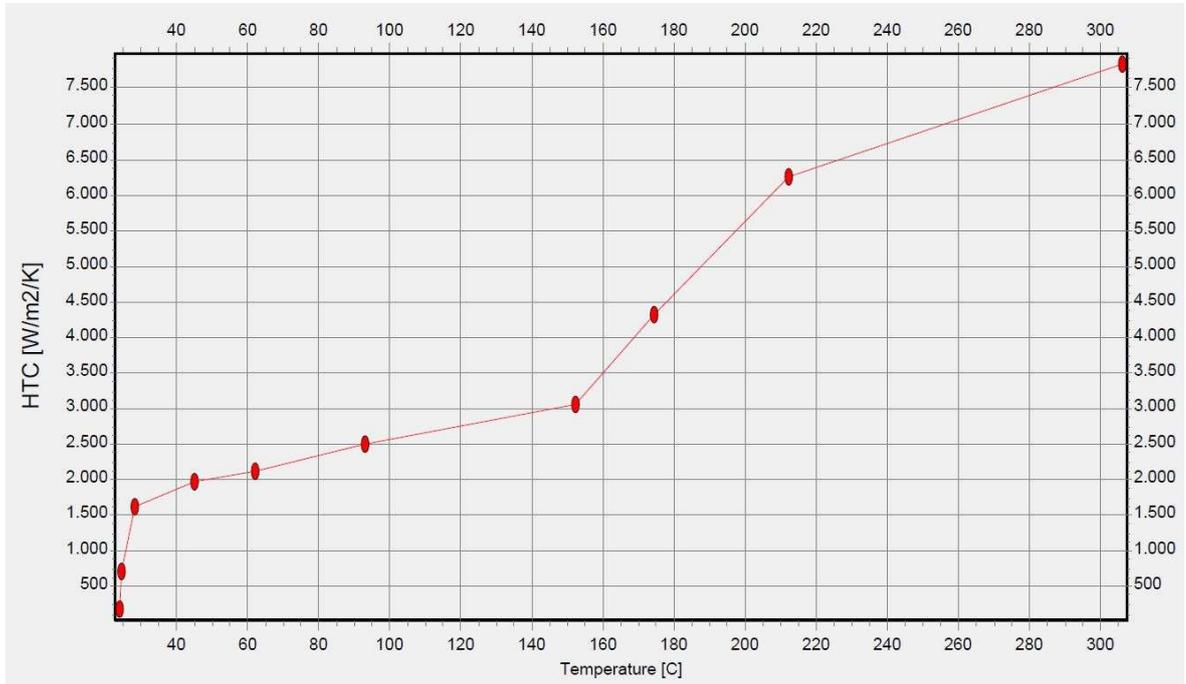


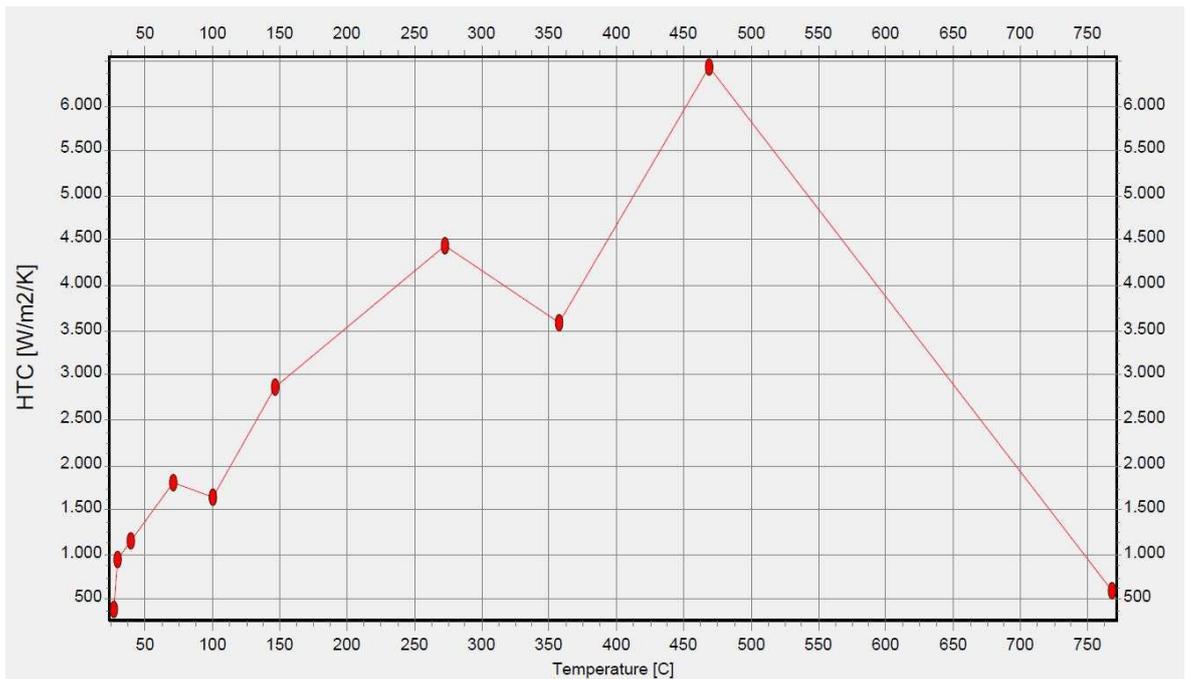
Curvas Aditivo C





Curvas Aditivo D





Curvas Aditivo E

