

PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

RESULTADOS DEL PROYECTO:

**DISEÑO DE ETAPAS CLAVE DE LA PLANTA PILOTO DE LAMINACIÓN EN
CALIENTE, RECALENTAMIENTO Y RUTA DE ENFRIAMIENTO**

REFERENCIA Nº: IDI/2016/000290

Entidad Beneficiaria:



Fecha inicio: 01/01/2017

Fecha fin: 31/12/2017

1. INTRODUCCIÓN

La Manzana del Acero es un proyecto estratégico para Asturias que pretende situar a la región como un referente en la investigación y desarrollo de la simulación integral mediante plantas piloto del proceso siderúrgico así como de los procesos de transformación dentro de la cadena de valor de sus productos derivados. La Manzana del Acero surge de la colaboración entre el Centro de I+D de ArcelorMittal en Avilés y Fundación ITMA, que a través de un acuerdo de colaboración concentrarán en un espacio de 10.000 m² en el parque empresarial Principado de Asturias una importante inversión en equipos y maquinaria y a más de un centenar de investigadores capacitados para generar conocimiento en todos los eslabones de la cadena productiva del acero.

Uno de los equipos estratégicos de la Manzana de Acero es la planta piloto de laminación en caliente. La etapa de la laminación en caliente es una de las más importantes del proceso metalúrgico. De hecho, los productos siderúrgicos como chapa gruesa, chapa fina, alambrón, carril y hojalata, tienen en común esta etapa metalúrgica fundamental. Es por esta razón por la que resulta tan interesante disponer de una planta piloto que permita simular la laminación en caliente de diferentes productos; tanto de planos como de largos.

Para poder dotar a la planta piloto de mayor flexibilidad es necesario equiparla con una serie de instalaciones auxiliares como son: un horno de recalentamiento, un camino de rodillos, una mesa de enfriamiento, un horno que simule la temperatura de bobinado o que permita realizar otros tratamientos en línea con los que poder desarrollar nuevos aceros y un método de corte del producto laminado. El objetivo es poder emplear la instalación de la forma más versátil posible de tal forma que se pueda utilizar para simular otros procesos como, por ejemplo, la elaboración de alambrón empleado como fungible para recargues especiales o de chapa gruesa con microestructuras pertenecientes a la nuevas generaciones de aceros avanzados de alta resistencia (como los aceros bainíticos para blindaje, por ejemplo).

2. OBJETIVOS

Los objetivos propuestos para el desarrollo del proyecto son los siguientes:

- Análisis de ventanas de proceso de la planta piloto de laminación en caliente para cada tipo de producto (largo y plano).
- Definición de las instalaciones auxiliares de la planta piloto de laminación en caliente de manera que permitan explotar al máximo su uso tanto en la optimización del proceso de laminación en caliente como en el desarrollo de nuevos productos procesados por la siderurgia secundaria y el sector metal mecánico asturiano.
 - Horno de recalentamiento
 - Mesa de enfriamiento
 - Horno de bobinado o de tratamiento térmico

3. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

3.1 ANÁLISIS DE NECESIDADES (HITO 1)

Uno de los objetivos de la presente tarea es definir las características de la caja de laminación en caliente: potencia del equipamiento, dimensiones máximas de los semiproductos a procesar, dimensiones y tipo de cilindros, etc., que determinaran en gran medida las necesidades de los equipos auxiliares más relevantes: horno de recalentamiento, mesa de enfriamiento y horno de tratamientos térmicos.

La premisa para la caja de laminación en caliente es que esta deberá procesar muestras que resulten representativas del proceso siderúrgico industrial siendo el tamaño de las mismas suficiente para la realización de caracterizaciones completa. Esto permitirá validar los productos y procesos desarrollados a escala planta piloto, y trasladarlos posteriormente al proceso industrial.

Se ha identificado un tren de laminación en caliente tipo DUO reversible, dotado de cilindros intercambiables que permitan procesar formatos de producto de tipo largos y planos, como idóneo para su instalación en la planta piloto de laminación en caliente. El motivo de la elección de esta tecnología es debido a su versatilidad y también al espacio disponible. El espacio necesario para instalar una caja DUO es muy inferior al requerido para línea de laminación en continuo que suelen contar de 4 cajas de desbaste y 8 o 9 cajas acabadoras. Esta configuración requiere varios cientos de metros frente a los 3-4 metros que requiere la instalación de una caja DUO reversible.

La figura 1 muestra dos esquemas representativos de un tren dotado de una caja DUO reversible, y de un tren en continuo con varias cajas de laminación de desbaste y acabadoras.

La gran ventaja de los trenes continuos de laminación es su mayor productividad, respecto a trenes de caja DUO reversible, si bien el objetivo de la planta piloto de laminación en caliente reside en el desarrollo de nuevas calidades experimentales de aceros avanzados, y no en la producción industrial, por lo que la elección de la citada tecnología, no repercute negativamente en las instalaciones.

El objetivo de procesar semiproductos multiformato, tanto largos como planos, en la planta de laminación en caliente, requiere de la posibilidad de intercambiar los cilindros de laminación en caliente, ya que estos difieren en función del formato deseado.

La figura 2 ilustra los esquemas geométricos básicos en función de los formatos: planos o largos, a procesar.

La laminación en caliente en la caja DUO reversible de formatos planos, requiere del uso de un par de cilindros planos, cuyo “gap” o distancia entre ellos va disminuyendo a medida que se realizan las sucesivas pasadas de laminación, con el objetivo de reducir el espesor del semiproducto de partida, y el consiguiente incremento de longitud (el ancho apenas se modifica).

Sin embargo, el proceso de laminación en caliente de formatos largos, requiere el uso de un juego de cilindros de geometrías complejas, dotados de canales que van dando al semiproducto distintas geometrías en las sucesivas pasadas de laminación, hasta alcanzar el formato deseado final.

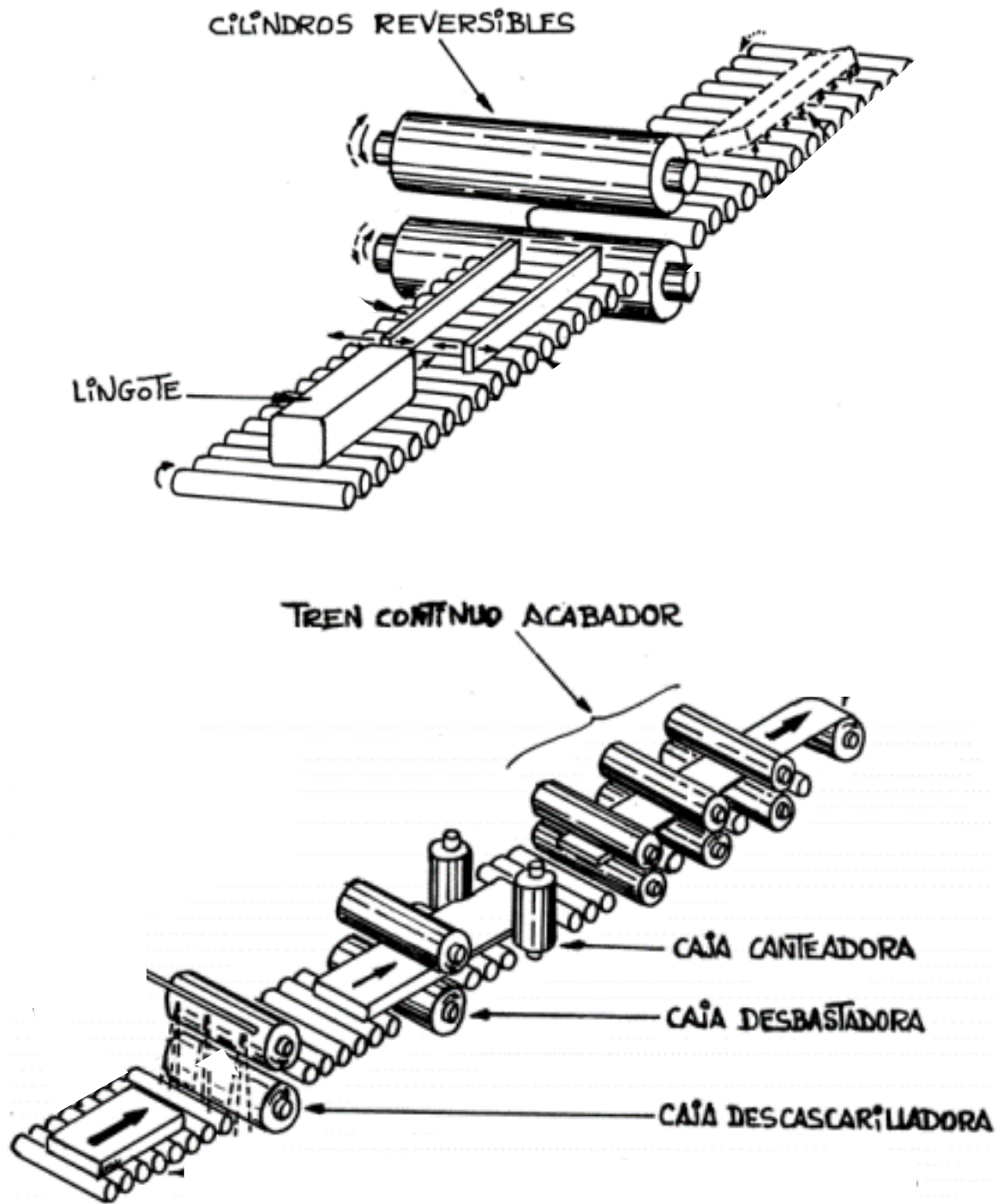


Figura 1. Configuración de un tren de laminación dotado de una caja DUO reversible (sup.) y tren dotado de varias cajas de desbaste y acabadoras (inf.). [1]

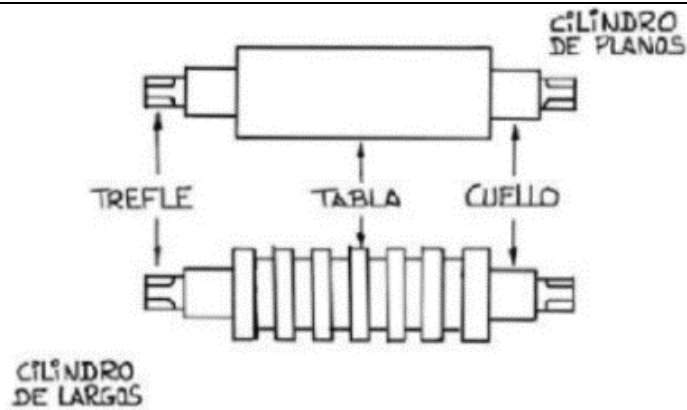


Figura 2. Geometría habitual de los cilindros de laminación para productos planos y largos. [1]

El diseño de las deformaciones requeridas en cada una de las pasadas, y por tanto de las geometrías de los canales de los cilindros de laminación, requiere de complejas simulaciones, específicas para cada una de las calidades y formatos experimentales a desarrollar.

Una vez seleccionada la tecnología del tren de desbaste: caja tipo DUO reversible, dotada de cilindros intercambiables, e identificada la necesidad del desarrollo de complejas simulaciones orientadas al diseño de pasadas, especialmente durante el procesado de formatos largos, a continuación resulta necesario identificar la capacidad o potencia del tren de laminación. En este aspecto, cabe destacar la necesidad de procesar dos tipos de semiproductos: lingotes experimentales procedentes del VIM (“Vacuum Induction Melting”) de la planta piloto de fusión a escala semi-industrial de Fundación ITMA (figura 4), de un peso máximo de aproximadamente 150 kg y longitud inicial máxima 500 mm, y semiproductos procedentes de instalaciones industriales de varios cientos de kilogramos y longitud inicial máxima de varios metros.



Figura 4. Horno VIM (“Vacuum Induction Melting”) disponible en la planta piloto de fusión a escala semi-industrial de Fundación ITMA.

Lógicamente, el factor limitante de cara al dimensionamiento de la potencia o capacidad de la instalación viene determinado por los formatos de mayores dimensiones (asegurando la capacidad de laminación de los formatos procedentes de instalaciones industriales, se satisfacen las necesidades de los formatos más reducidos, procedentes de la planta piloto de fusión a escala semi-industrial de Fundación ITMA).

A continuación, se muestran los resultados de los cálculos preliminares realizados de cara a estimar la potencia requerida por la caja de laminación, basados en los dos escenarios o planteamientos requeridos, en función del formato de los semiproductos a procesar:

- Planteamiento 1: laminación de producto largo.

Dimensiones iniciales: 50 mm x 50 mm x 2 m (semiproductos industriales)

Dimensiones finales: diámetro 25 mm y longitud 10 m

Resultado de la simulación:

Carga máxima requerida= 200 MPa

Par máximo requerida= 100 KNm

Potencia máxima requerida= 300 kW

- Planteamiento 2: laminación de producto plano.

Dimensiones iniciales: 240 mm x 600 mm x 2 m (semiproductos industriales)

Dimensiones finales: 120 mm x 600 mm x 4 m

Resultado de la simulación:

Carga máxima = 500 MPa

Par máximo = 250 KNm

Potencia máxima = 500 kW

Por tanto, los resultados detallados anteriormente, permiten estimar una potencia o capacidad de laminación del tren de laminación de caja DUO reversible, dotado de cilindros intercambiables (planos y largos), superior a los 500 kW. Además las dimensiones de partida de los productos planos define el “gap” o desplazamiento en Z de la caja de laminación, el cual ha de ser de al menos 250mm

Con el objetivo de disponer de un coeficiente de seguridad, podría estimarse una potencia idónea en el entorno de los 750 kW, que aseguraría el procesado de los semiproductos procedentes de las instalaciones industriales, y por tanto de los lingotes experimentales procedentes de la planta piloto de fusión de Fundación ITMA, que poseen unas dimensiones inferiores.

La citada capacidad o potencia identificada como idónea para el tren de caja DUO reversible, dotado de cilindros intercambiables, es el parámetro o característica fundamental de la instalación, si bien existen otros dos factores reseñables: las dimensiones máximas de los cilindros y la velocidad máxima de procesado.

Las dimensiones de los cilindros y la calidad metalúrgica de la que estén fabricados resultan también parámetros críticos. Para determinar el rodillo más adecuado es necesario considerar algunos factores tales como:

- Diseño de las pasadas
- Porcentaje de reducción

- Temperatura de laminación
- Enfriamiento del rodillo
- Temperatura del rodillo
- Rendimiento del rodillo

El diámetro de los cilindros define lo que se conoce como ángulo de mordida que no debe ser superior a los 24° (valores superiores dificultan la entrada del producto a laminar en la caja).

Por lo tanto si la intención es poder laminar semiproductos procedentes de las instalaciones industriales resulta imprescindible la utilización de cilindros con diámetros equivalentes a los utilizados industrialmente (del orden del metro).

Respecto a la velocidad de procesado, este en un valor que se incrementa a medida que se ejecutan las pasadas de laminación. En este caso al tratarse de una caja DUO la velocidad máxima de procesado viene determinada por la reductora acoplada a la caja de laminación y puede utilizarse la misma durante todo el proceso de laminación. Por lo tanto para el tren DUO reversible se consideran apropiadas velocidades máximas del orden de 2 m/s. Velocidades inferiores motivarían la ejecución de pasadas de laminación a velocidades demasiado lentas, no representativas del procedimiento industrial, e incrementar las velocidades de laminación hasta alcanzar los valores industriales de las pasadas acabadoras, implicaría la necesidad de incorporar una reductora con un coste inviable (> 1 M€).

Por tanto, los resultados de la investigación mostrados anteriormente, permiten identificar un tren de laminación de tecnología caja DUO reversible, dotado de cilindros intercambiables (diámetro_{max} = 1000 mm) para el procesado de semiproductos largos y planos, de potencia 750 kW, y velocidad máxima de procesado de 2 m/s, como el equipamiento idóneo para ser incorporado a la planta piloto de laminación en caliente. El citado tren de laminación permitiría procesar semiproductos de dimensiones iniciales máximas: 50 mm x 50 mm x 2 m en formatos largos, y 240 mm x 600 mm x 2 m en formatos planos.

Las dimensiones estimadas de la caja de laminación, en función de las características detalladas anteriormente, podrían estimarse en el entorno de 9-12 m².

Un equipamiento reseñable de las instalaciones de laminación en caliente es el camino de rodillos, necesario para el desplazamiento del material a elevadas temperaturas, desde su salida del horno de recalentamiento, durante las sucesivas pasadas de laminación en caliente, hasta el enfriamiento final. El camino de rodillos requiere un espacio disponible destacable en la instalación, siendo posiblemente el equipamiento dotado de unas mayores dimensiones.

A lo largo del presente trabajo, se ha barajado la posibilidad de dotar a la planta piloto de laminación en caliente de una configuración de dimensiones más reducidas, gracias a la incorporación de un robot manipulador de los semiproductos.

Dicha configuración, permitiría disponer de todos los equipamientos: caja de laminación, horno de recalentamiento, etc. unas dimensiones en el entorno de los 20 m².

Sin embargo, esta opción ha sido descartada ya que únicamente sería válida para el procesado de los lingotes experimentales procedentes de la planta piloto de fusión de Fundación ITMA, con una longitud máxima inicial de 500 mm. Mayores tamaños motivarían que el robot no pudiese asegurar la manipulación del producto a elevadas temperaturas, lo cual no permitiría “alimentar” la planta

piloto de laminación en caliente con semiproductos procedentes de instalaciones industriales, uno de los objetivos de la presente investigación.

Por tanto, resulta indispensable dimensionar un camino de rodillos, tanto a la entrada como a la salida de la caja de laminación, con el objetivo de asegurar el desplazamiento del material a alta temperatura durante todas las etapas del proceso de laminación en caliente.

Una vez conocidas las características idóneas de la caja de laminación, así como las dimensiones de los formatos a procesar en la planta piloto de laminación en caliente, se ha estimado que la instalación requiere de la incorporación de un camino de rodillos con un ancho idóneo de 2 m, y una longitud mínima óptima de 5 m, tanto a la entrada como a la salida de la caja de laminación.

Esta estimación de la longitud de 5 m ha sido calculada en base a la longitud de los semiproductos a procesar. La laminación de lingotes procedentes de la planta piloto de fusión no precisa de longitudes elevadas del camino de rodillos, ya que su longitud inicial será de 0.5 m. Sin embargo, la laminación de formatos de longitud inicial 2 m, como los estimados en los cálculos iniciales, alcanzaran longitudes elevadas en las sucesivas pasadas de laminación, estimándose un incremento del 100% en la misma, hasta alcanzar los 4 m como máximo.

El metro adicional se ha considerado por seguridad y para facilitar la manipulación de los semiproductos con la grúa sin dañar la caja de laminación.

La longitud máxima del camino de rodillos a la salida de la caja de laminación (4 m), resulta una limitación de cara a la longitud máxima final de los formatos laminados en caliente, especialmente en los semiproductos largos, que habitualmente requieren elevadas longitudes.

Esta limitación, puede evitarse, incorporando a la planta piloto de laminación en caliente de un sistema de corte en caliente, que permita cortar rápidamente los formatos (para evitar descensos de temperatura que impidan continuar con las pasadas de laminación), retirar una parte del material, y continuar laminando hasta alcanzar las dimensiones requeridas, en una muestra representativa.

El oxicorte es una tecnología de corte que dota de elevada flexibilidad a la instalación, ya que a diferencia de otras tecnologías como la cizalla en caliente o la sierra en caliente, permite realizar cortes en varias direcciones, y asimismo se puede desplazar a lo largo del camino de rodillos, para realizar cortes en varias secciones.

De hecho, el oxicorte en caliente es la tecnología empleada habitualmente en las instalaciones siderúrgicas, con el objetivo de cortar los semiproductos a la salida del proceso de laminación en caliente.

Una vez definida la capacidad y dimensiones de la caja de laminación, resulta preciso identificar la ubicación y las dimensiones disponibles para los equipamientos auxiliares que requiere la instalación, fundamentalmente el horno de recalentamiento, la mesa de enfriamiento y el horno de tratamientos térmicos.

El horno de recalentamiento resulta fundamental para calentar el material y permitir su conformado en caliente mediante el proceso de laminación gracias al incremento de su ductilidad a elevadas temperaturas, así como para asegurar la puesta en solución de los carburos, previamente al proceso de deformación.

Una vez conformado el acero, dotándole de la geometría y dimensiones requeridas, la mesa de enfriamiento y el horno de tratamientos térmicos confieren al acero la microestructura idónea para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas por los grados de acero experimentales, especialmente en los grados de acero más avanzados, que requieren un control exhaustivo de los ratios de enfriamiento.

La necesidad del horno de recalentamiento para permitir el proceso de laminación en caliente, y de la mesa de enfriamiento, de cara a dotar al material de las propiedades mecánicas (microestructura) objetivo, manifiesta la importancia de estos 3 equipamientos auxiliares de la caja de laminación en caliente, que han motivado el presente trabajo.

Los tres equipamientos auxiliares deberán estar situados en línea con la caja de laminación en caliente, con el objetivo de facilitar el flujo de materiales por la instalación.

Adicionalmente, a los 20 m² estimados para el espacio requerido por la caja de laminación, detallados anteriormente, y a partir del planteamiento inicial de procesar formatos dotados inicialmente de dimensiones máximas: longitud 2 m, ancho 600 mm y espesor 240mm, a priori se estiman unas necesidades de espacio de 8 m² para el horno de recalentamiento, 6 m² para la mesa de enfriamiento, y otros 8m² para el horno de tratamientos térmicos.

Las dimensiones necesarias para el horno de recalentamiento han sido estimadas en base a que se podría disponer de una instalación en la que pudieran calentarse simultáneamente 4 formatos de los de mayores dimensiones, dos apoyados en la base del horno, y otros dos encima de estos, separados por ladrillos refractarios, para asegurar la homogeneidad del calentamiento.

La carga de al menos 3 formatos permitiría optimizar la operación de la planta de laminación en caliente, haciendo varios procesamientos termomecánicos consecutivos.

Los 6 m² estimados para la mesa de enfriamiento, proceden de su ubicación en línea con el camino de rodillos, determinándose un ancho aproximado de 2 m (igual al del camino de rodillos) y una longitud estimada de 3 m, que permita obtener muestras representativas del material sometido a los ratios de enfriamiento requeridos, desestimándose la necesidad de enfriar controladamente longitudes superiores.

Respecto al horno de tratamientos térmicos, se ha estimado que se precisan unas dimensiones idénticas a las del de recalentamiento, ya que al igual que sucede con la mesa de enfriamiento, con dos metros de longitud es más que suficiente para caracterizar completamente el material.

Los posibles cortes en caliente que se hagan, se realizaran durante el proceso de laminación en caliente, ya que las etapas de enfriamiento controlado y tratamiento térmico final deben ser consecutivas para evitar alteraciones térmicas en el material, y por tanto, las dimensiones de los formatos procesados en la mesa de enfriamiento serán los mismos que a continuación se introduzcan en el horno de tratamiento térmico.

Por tanto, a continuación se enumeran las ubicaciones y dimensiones de los tres equipamientos auxiliares más relevantes:

- Horno de recalentamiento: 8 m² en línea con el camino de rodillos a la entrada de la caja de laminación.
- Mesa de enfriamiento: 6 m² en línea con el camino de rodillos a la salida de la caja de laminación.

- Horno de tratamientos térmicos: 8 m² en línea con el camino de rodillos a la salida de la caja de laminación, a continuación de la mesa de enfriamiento.

Tal y como se ha indicado previamente, el camino de rodillos resulta fundamental para poder desplazar el semiproducto desde el horno de recalentamiento hasta su entrada en el laminador, para permitir las sucesivas pasadas de laminación en la caja DUO reversible, así como para desplazar el material laminado hasta la zona de enfriamiento y/o tratamiento térmico final.

Una vez identificadas las dimensiones y ubicaciones idóneas de cada uno de los tres equipamientos auxiliares más reseñables de la instalación: horno de recalentamiento (8 m²), mesa de enfriamiento (6 m²) y horno de tratamientos térmicos (8 m²), a continuación se enumeran los parámetros más destacables a tener en cuenta, durante el diseño final de la planta piloto de laminación y la selección de cada uno de los equipamientos auxiliares:

Horno de recalentamiento:

- Dimensiones
- Tecnología de calentamiento
- Máxima temperatura de operación en continuo
- Control de la atmósfera
- Sistema de apertura y manipulación de la carga
- Conexiones y suministros requeridos
- Coste de inversión y operación
- Prevención de riesgos laborales
- Calidad

Mesa de enfriamiento:

- Dimensiones útiles y totales
- Tecnología de enfriamiento
- Ratios de enfriamiento
- Conexiones y suministros requeridos
- Coste de inversión y operación
- Prevención de riesgos laborales
- Calidad

Horno de tratamientos térmicos:

- Dimensiones
- Tecnología de calentamiento
- Máxima temperatura de operación en continuo
- Control de la atmósfera
- Sistema de apertura y manipulación de la carga
- Conexiones y suministros requeridos
- Coste de inversión y operación
- Prevención de riesgos laborales
- Calidad

A continuación, en el segundo hito, se detallan los requisitos y se definen las características de los 3 equipos auxiliares.

3.2 REQUISITOS Y DEFINICIÓN DE EQUIPOS AUXILIARES (Hito 2)

a) Definición horno recalentamiento

El objetivo principal de la presente tarea es determinar las tecnologías susceptibles de ser incorporadas al horno de recalentamiento con el propósito de calentar los semi-productos hasta la temperatura y tiempos requeridos, asegurando la homogeneidad de la temperatura lo que permitirá su posterior conformado termomecánico mediante el proceso de laminación en caliente.

La temperatura de recalentamiento, habitualmente se denomina temperatura de “empape” (soaking), es la temperatura a la cual debe calentarse el material para por un lado dotarlo de las propiedades mecánicas requeridas para poder ser laminado (suficiente ductilidad para “soportar” la reducción requerida) y por otro adquirir las características metalúrgicas deseadas.

Tal y como se puede observar en la figura 5a, la temperatura la puesta en solución de los distintos carburos varía en función de su estequiometría y composición. Así en el caso de los carbonitruros de titanio esta no se inicia hasta temperaturas superiores a los 1100-1150°C.

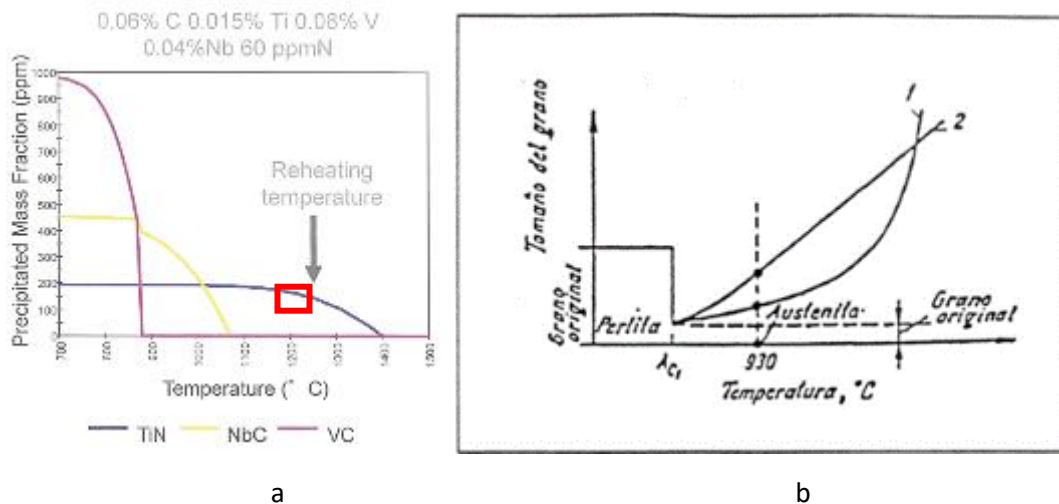


Figura 5. Influencia de la temperatura en a) la puesta en solución de carburos, b) el tamaño de grano. [2]

Por otro lado, y como puede observarse en la figura 5b, la temperatura de empape no puede aumentarse a temperaturas superiores a los 1300°C debido a un aumento excesivo del tamaño de grano (cuanto mayor es el tamaño de grano menor su tenacidad). Por lo tanto las temperaturas habituales para el inicio de los procesos de laminación en caliente (temperatura equivalente a la de empape) se encuentran entre 1150 y 1250°C.

En las instalaciones siderúrgicas integrales, la tecnología de calentamiento empleada habitualmente son los hornos de gas. Estos utilizan gases procedentes de otros procesos siderúrgicos que si no serían tratados como residuos y sin embargo así pueden emplearse como combustible, entre otras etapas, en los hornos de recalentamiento. Este tipo de instalaciones dotadas de siderurgia integral emplean habitualmente como combustible una mezcla de gas de batería de coque y gas de horno alto.

Las instalaciones siderúrgicas no integrales (acerías eléctricas, por ejemplo) generalmente utilizan combustibles “exteriores”, como gasoil o gas natural, y el comburente de los quemadores puede ser aire soplado por un ventilador u oxígeno puro (“oxifuel”).

En el caso de las acerías eléctricas la elección de hornos de recalentamiento dotados de tecnología de gas obedece a criterios económicos, ya que a pesar de precisar del suministro de gases no generados en las propias instalaciones siderúrgicas, esta opción resulta más económica que otras alternativas como los hornos eléctricos.

Existen dos tecnologías de hornos de recalentamiento de gas: “de fosa” o de cámara con recuperación de calor de los humos si el comburente es aire.

Los hornos de fosa (hornos “pit”) están constituidos por cámaras revestidas de refractario en las que se introduce el material a recalentar en posición vertical. Normalmente, el horno se encuentra bajo el nivel del suelo, de forma que la tapa desplazable queda a la altura del mismo.

La figura 6 muestra un esquema de los hornos “pit” o de fosa. Este tipo de hornos de recalentamiento suelen utilizarse en instalaciones industriales en las cuales el material se carga en la fosa inmediatamente después de ser colado. La permanencia del material en los hornos de fosa depende precisamente del tiempo transcurrido desde la finalización del proceso de colada, de las condiciones exteriores y de la composición química del acero, si bien suele oscilar en tiempos de residencia entre hora y media y cuatro horas (tiempo inferior que el utilizado en los hornos con cámara de recuperación).

Los hornos de fosa, actúan además como pulmón regulador entre la acería y los trenes desbastadores en los cuales comienza el proceso de conformado del material durante la laminación en caliente. Este tipo de hornos “pit” o de fosa fueron desarrollados inicialmente para su aplicación en el calentamiento de lingotes elaborados mediante fusión y colada en lingotera. Actualmente tienen un uso residual ya que habitualmente las instalaciones siderúrgicas han sustituido la colada en lingotera por colada continua y el horno de recalentamiento suele utilizar la tecnología de hornos dotados de cámara con recuperación de calor, desarrollada por los hermanos Siemens, durante la segunda mitad del siglo XIX.

En los hornos recuperadores, las llamas de salida del hogar de calentamiento, pasan por unas cámaras rellenas de ladrillos refractarios que adquieren una temperatura elevada. En un momento dado, se hace pasar por ellos el aire comburente que al llegar muy caliente a los quemadores, recupera calor a la vez que eleva la temperatura adiabática de la llama.

La figura 7 muestra un esquema de este tipo de hornos de recalentamiento tipo recuperativos (Siemens).

Hay otro tipo de hornos, variante de los anteriores, que son los de carro o vagoneta, normalmente utilizados en forja y tratamientos térmicos.

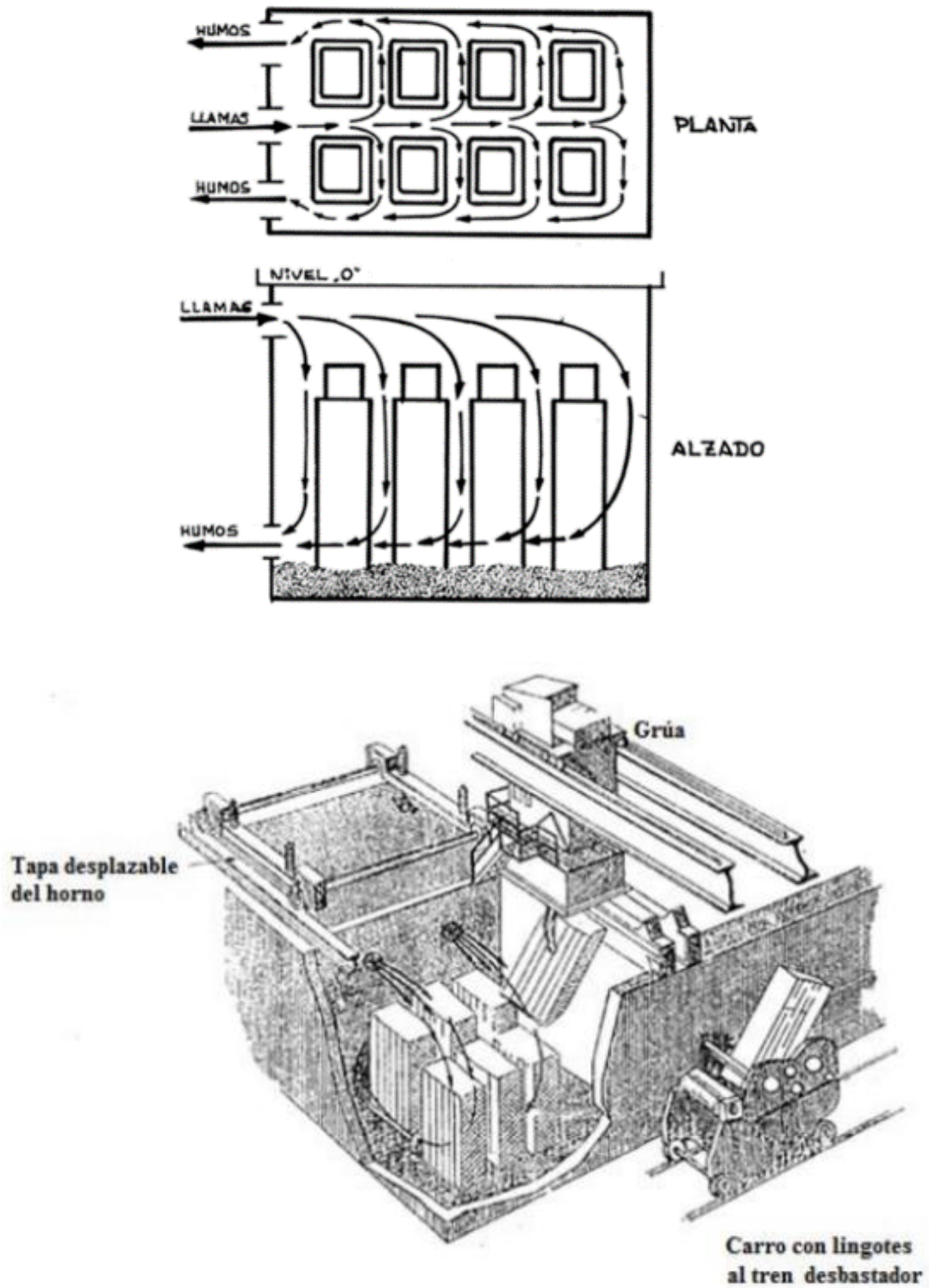


Figura 6. Esquema habitual de los hornos de recalentamiento "pit" o de fosa industriales. [1]

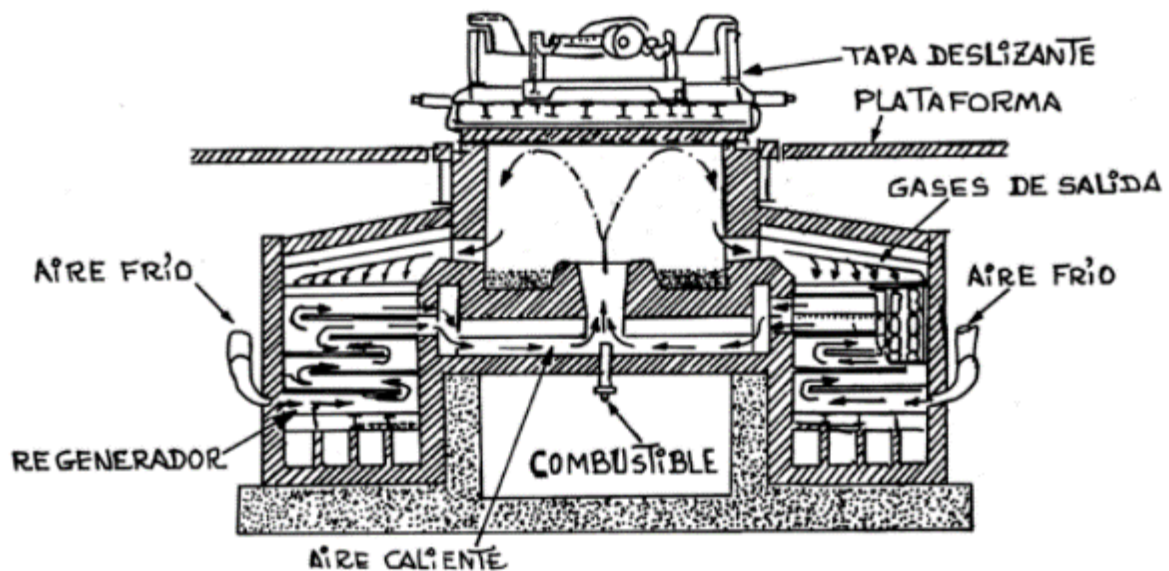
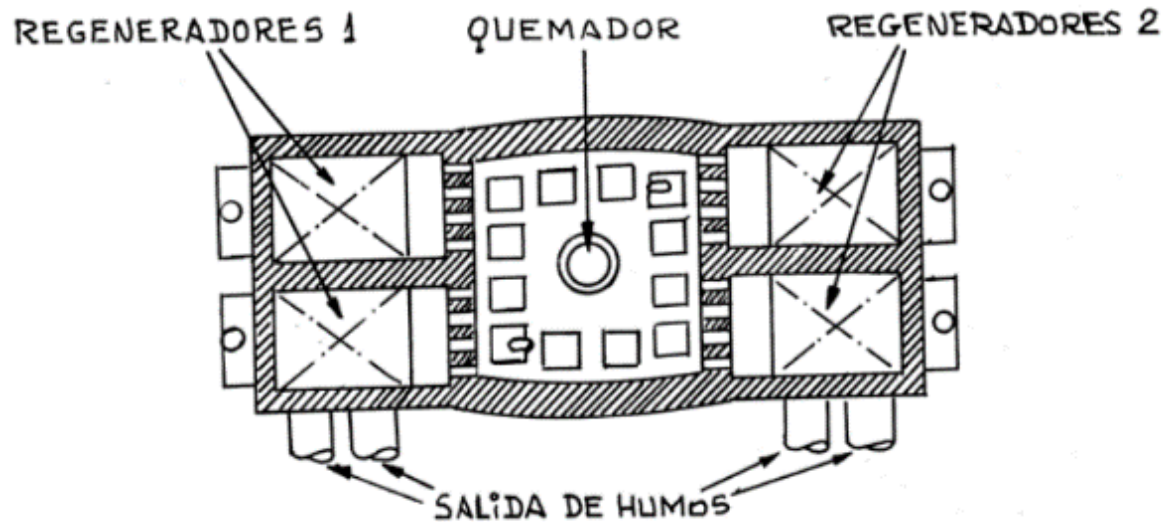


Figura 7. Esquema habitual de los hornos de recalentamiento tipo recuperativos (Siemens). [1]

Cuando el material está bien “empapado”, es decir, cuando se ha alcanzado una temperatura homogénea, superior a los 1150°C en toda su masa, se extraen del horno mediante distintas técnicas (pinzas, empuje, vigas galopantes) para depositarlos en el camino de rodillos que alimenta al tren desbastador.

Durante la operación de recalentamiento, en los hornos industriales generalmente se distinguen 3 etapas: precalentamiento, calentamiento y empapado (“soaking”) u homogeneización, tal y como se muestra en el esquema detallado en la figura 8.

En el caso analizado y debido a la baja productividad requerida y las propias dimensiones de la instalación, se ha considerado un horno de recalentamiento con una única cámara o etapa.

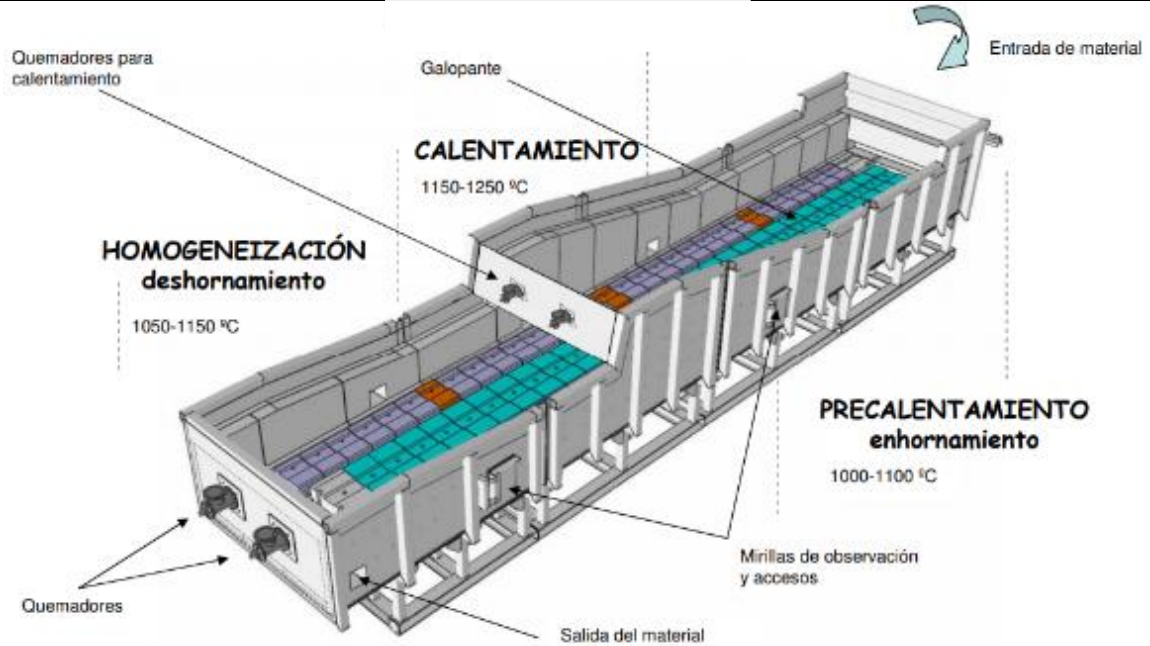


Figura 8. Esquema de las 3 zonas de los hornos de recalentamiento, inherentes a las etapas de precalentamiento, calentamiento y homogeneización. [3]

A pesar de que los hornos de recalentamiento dotados de tecnología de gas son los equipamientos habituales en las instalaciones siderúrgicas industriales, su incorporación a la planta piloto de laminación en caliente ha sido desestimada debido fundamentalmente a la penalización inherente a la ubicación de las instalaciones. Esto es:

- No existe disponibilidad de gases de combustión procedentes del proceso siderúrgico integral.
- El proveedor de gas natural únicamente ofrece la conexión a un suministro de “consumo doméstico” cuya presión y caudal es insuficiente a la requerida para las instalaciones industriales analizadas. Se ha solicitado valoración económica para la conexión de la instalación al suministro industrial resultando completamente inviable (presupuesto superior a los 4,5 millones de €).

Por lo tanto la ejecución de la presente tarea ha requerido un estudio de posibles tecnologías de calentamiento alternativas al gas. Se han identificado tres posibles métodos de calentamiento: la inducción, los infrarrojos, y los hornos eléctricos.

La inducción resulta una tecnología limpia, eficiente y que permitiría alcanzar elevados ratios de calentamiento pero para ello las bobinas de calentamiento han de ser cuidadosamente diseñadas para obtener el máximo rendimiento (estas bobinas son específicas para cada geometría del producto).

Sin embargo el objetivo de la instalación es procesar distintos formatos tanto largos como planos, lo que requeriría disponer de varias bobinas intercambiables en función de cada semiproducto de acero a calentar.

Esto parece enormemente la incorporación de la citada tecnología a la planta piloto de laminación en caliente, ya de por sí cara. Se han realizado consultas a algunos proveedores de este tipo de tecnología (Bielec, GH inductotermia y Ondarlan) sobre el equipamiento necesario y si bien se ha

de considerar como una simple estimación, se considera necesario equipos de potencias superiores a los 150kW con costes entre 250.000 y 350.000€ (coste del equipamiento básico sin considerar las bobinas necesarias para cada subproducto, con un coste estimado de unos 25.000€/bobina).

Adicionalmente, se requeriría una avanzada tecnología de inducción ya que esta tecnología tampoco suele ser utilizada para el calentamiento en sección completa de componentes de fuerte espesor, lo cual encarecería aún más la introducción de la tecnología de inducción.

Los citados inconvenientes de la complejidad técnica requerida para homogeneizar la temperatura del material, y la necesidad de una bobina para cada formato y tamaño de semiproductos a procesar en la planta piloto de laminación en caliente, han motivado que se descarte la incorporación de la tecnología de inducción a la instalación objeto del presente proyecto, debido fundamentalmente a motivos económicos (coste total estimado de unos 500.000€).

La principal ventaja de los hornos basados en calentamiento por infrarrojos es su capacidad de calentar directamente el material. A diferencia de los hornos de convección que calientan aire que a su vez calentará la pieza, los hornos infrarrojos dirigen directamente la radiación hacia el componente logrando un calentamiento más rápido. Su principal limitación es la temperatura máxima de operación.

Estos se emplean habitualmente en procesos de secado, curado, etc., que requieren temperaturas mucho más bajas ($T < 700^{\circ}\text{C}$). El equipamiento con mayor temperatura de operación identificado ha sido un horno de 54kW de potencia, 18 lámparas tipo 3.0kW-8-200V suministrado por Surtec (empresa alemana especializada en el diseño y fabricación de plantas piloto de simulación de distintos procesos siderúrgicos) con una temperatura máxima de trabajo de 900°C pero con tiempos de permanencia a dicha temperatura no superiores a los 10-15 minutos (tiempo y temperaturas insuficientes para el proceso de empape previo a la laminación en caliente).

La elección de la tecnología de horno eléctrico para el horno de recalentamiento de la planta piloto de laminación está totalmente justificada ya que a pesar de que los costes de operación son ligeramente superiores a los hornos de gas (utilizan la electricidad como energía y no gases de producidos en otros procesos siderúrgicos), el coste de los suministros requeridos no resultan comparables. Además ha de tenerse en cuenta que la instalación está destinada a trabajos de i+D y no a producción, por lo que su productividad será muy reducida (un número limitado de pruebas al año).

Una vez identificada la tecnología de horno eléctrico como la idónea para ser empleada en el horno de recalentamiento de la planta piloto de laminación en caliente, se ha analizado cuál de las múltiples configuraciones existentes es susceptible de ser incorporada:

- Hornos eléctricos de pared fría: hornos herméticos al gas y están equipados con calentamiento directo o indirecto dependiendo de la temperatura. Su nombre se debe a que el espacio útil está formado por una retorta hermética al gas que está equipada con una refrigeración de agua en la zona de la puerta para proteger una junta especial. Equipados con los correspondientes dispositivos de seguridad, los hornos de retorta son apropiados para aplicaciones bajo gases reactivos, como el hidrógeno. Son excelentes para multitud de tratamientos térmicos que requieren una atmósfera en vacío, gas inerte o gas reactivo. Permiten temperaturas de operación de hasta 3000°C .

La figura 9 muestra una imagen representativa de uno de estos hornos eléctricos de calentamiento de tipo retorta.



Figura 9. Horno eléctrico de calentamiento de tipo retorta de pared fría. [4]

- Hornos eléctricos tipo cuba y tipo arcón: Ambos tipos resultan idóneos para el tratamiento térmico de piezas largas o pesadas. Asimismo, ambas configuraciones muestran como característica reseñable su apertura por la parte superior, que habitualmente requiere del uso de un puente grúa y cestas de carga para poder realizar las operaciones de carga y descarga de las piezas a tratar en el horno.

A continuación, la figura 10 muestra las imágenes representativas de dos hornos eléctricos de calentamiento, dotados de una configuración que permite su apertura por la parte superior.

- Existe otro tipo de configuración de estos tipos de hornos eléctricos dotados con un sistema de elevación que permite desplazar verticalmente la cámara del horno para ir tratando térmicamente series de componentes que se van desplazando longitudinalmente.

La figura 11 muestra una imagen representativa de este tipo de hornos eléctricos dotados de este tipo de sistemas de elevación.



Figura 10. Horno eléctrico de calentamiento de tipo cuba (sup.) y de tipo arcón (inf.). [4]



Figura 11. Horno eléctrico de calentamiento dotado de sistema de elevación. [4]

- Los hornos de cámara dotados de sistema de apertura mediante compuerta de elevación electro-hidráulica y soporte inferior móvil son otra configuración alternativa de este tipo de hornos de tratamientos térmicos.



Figura 12. Horno eléctrico de hornos de cámara dotados de sistema de apertura mediante compuerta.
[4]

La figura 12 muestra una imagen representativa de este tipo de hornos, en la cual puede apreciarse el sistema lateral de apertura, que facilita las operaciones de carga y extracción del material a tratar térmicamente.

- Por último, una alternativa a este tipo de hornos de cámara serían los hornos de vagoneta, en los cuales, la configuración es análoga a los hornos de cámara dotados de apertura mediante compuerta lateral y soporte inferior móvil.

Difieren de estos en que adicionalmente están dotados de un sistema de desplazamiento de la carga mediante vagonetas, que facilita enormemente las operaciones de carga y descarga de los formatos a tratar térmicamente, previamente a su conformado termomecánico mediante laminación en caliente.

La figura 13 ilustra un esquema de una instalación dotada de dos hornos de tipo vagoneta, en la cual puede apreciarse la configuración del sistema de carga y descarga del material.



Figura 13. Esquema de una instalación dotada de dos hornos eléctricos de vagoneta. [4]

Los modelos de horno eléctrico mostrados anteriormente: retorta de pared fría, arcón, cuba, con sistema de elevación, de cámara, y de vagoneta, son los tipos fundamentales de configuraciones existentes en el mercado, si bien todos ellos pueden disponer de diversas opciones, tamaños, extras, etc.

Analizando las distintas configuraciones, los hornos tipo retorta de pared fría se descartan para su incorporación a la presente instalación de laminación en caliente debido a que se trata de instalaciones complejas, generalmente para el tratamiento térmico de pequeños componentes, expuestos a atmósferas reactivas, lo cual no es el objetivo de los hornos de recalentamiento previos al proceso de laminación en caliente. Además su coste es significativamente superior al resto de alternativas.

Asimismo, la configuración de los hornos eléctricos tipo arcón, cuba o con sistema de elevación no parecen los más adecuados para el propósito de precalentar los semiproductos de acero previamente a su laminación en caliente. El motivo fundamental es el sistema de apertura, por la parte superior en los hornos tipo arcón y cuba, y desplazando verticalmente la cámara en los de sistema de elevación, que motiva una destacable merma de temperatura en el equipamiento durante los procesos de carga y descarga del mismo.

Esta configuración también dificulta el manejo de los semiproductos (este tipo de horno son utilizados principalmente con cestas o accesorios en los que se colocan las piezas a tratar).

La configuración más idónea parece corresponder a un horno de cámara con sistema de apertura mediante compuerta lateral, que permite la apertura parcial durante las operaciones de carga y descarga minimizando las pérdidas térmicas. Las dimensiones del horno han de permitir la carga de al menos tres semiproductos para poder ser laminados en la misma jornada laboral optimizando así la etapa de calentamiento en el horno de empape.

Asimismo sería de gran utilidad dotar al horno de un soporte inferior móvil, lo que facilitaría enormemente la extracción y manipulación de los semiproductos con una grúa. Además su configuración permitiría situarlos en línea con la caja de laminación y el camino de rodillos. El traslado del material se haría levantando ligeramente la compuerta, desplazando el soporte inferior móvil, y cogiendo el semiproducto a procesar con una grúa para situarlo en el camino de rodillos a la entrada del laminador en caliente.

Respecto a las temperaturas de trabajo y en base a lo ya comentado, el horno eléctrico seleccionado debe permitir operar a temperaturas máximas de 1300°C, temperatura ligeramente superior a la temperatura máxima de empape.

Otro aspecto crítico es el sistema de control de temperatura del semiproducto a laminar. Para ello existen dos posibilidades; o bien utilizar la temperatura de control de la regulación del horno o bien medir la temperatura real del semiproducto. Todos los hornos disponen de un sistema de medida de temperatura “indirecto” que generalmente se trata de un termopar colocado en el interior de la cámara de calentamiento.

Si bien esta temperatura puede ser utilizada para la regulación del ciclo térmico, la desviación entre la temperatura de la pieza y esta temperatura de control puede ser significativa. Esto supone que no sea la configuración más adecuada para realizar el proceso de empape, sin embargo este es el método utilizado en las plantas industriales (en este caso los tiempos de mantenimiento son muy elevados asegurando la homogeneización de temperatura de las piezas y también se suelen utilizar métodos de medida en paralelo).

La otra alternativa es realizar una medida de la temperatura real del semiproducto (bien en superficie o en su interior) y utilizar esta señal como control del horno. Para ello la técnica más habitual es la colocación de termopares de contacto. Cabe destacar que se ha analizado también

la posibilidad de colocar cámaras termográficas de alta resolución que pudiesen sustituir a los termopares de contacto al tratarse de un fungible de elevado coste. Entre la amplia oferta disponible se han analizado cuatro cámaras termográficas:

- Cámara de la marca Fluke, modelo Endurace: Con un rango de medida entre 250 y 3200°C. El precio ofertado asciende a unos 2.863€.
- Pirómetro Keller, modelo PA 40 AF21: Con un rango de medida entre 650 y 1700°C, óptica tipo PA20.06 y distancia focal 600mm. Además dispone de un puntero laser para seleccionar la zona de medida. El precio ofertado asciende a unos 3.805€.
- Pirómetro Spot serie R: Con un rango de medida entre 250 y 1800°C. 4300€.
- Termómetro Cyclops 100L Meltmaster: Con un rango de medida de 1000 a 2000°C, distancia focal de 1m a infinito con lentes de cerca opcionales. 3250€.

La opción más prometedora parece ser el modelo Cyclops 100L ya que permite el ajuste de la emisividad compensando el error de la medida debido por un lado a que la medida se realizará a través de la mirilla del horno y por otro a la interferencia de los humos en el interior del horno.

La figura 14 muestra una imagen de la cámara seleccionada.



Figura 14. Termopar sin contacto de alta resolución (Cyclops 100 Meltmaster). [5]

Inicialmente, se ha evaluado la posibilidad de dotar al equipamiento de atmósfera protectora. Esta opción se ha descartado finalmente debido a que con el tipo de horno de recalentamiento seleccionado, horno con abertura de compuerta con capacidad de carga para varios semiproductos (al menos 3), resulta casi imposible asegurar un grado de protección adecuado de las piezas una vez se abre la puerta del horno para extraer sucesivamente los semiproductos.

Asimismo, independientemente de la utilización o no de atmósfera protectora en el horno, los semiproductos inevitablemente se oxidarían durante su traslado al camino de rodillos a la entrada del laminador en caliente, por lo que la opción más recomendable es la instalación de descascarilladores mecánicos o de agua a alta presión a la entrada de la caja de laminación, que retiren el óxido superficial.

Este proceso facilita el procesamiento termomecánico del semiproducto y reduce los daños en los cilindros de laminación. De hecho, el descascarillado es la tecnología empleada industrialmente en las instalaciones siderúrgicas de laminación en caliente, en la cual no se dispone habitualmente de hornos de precalentamiento dotados de atmósfera protectora.

Finalmente durante la presente investigación se ha realizado un breve estudio para detectar la existencia de posibles hornos eléctricos que satisfagan los requisitos comentados y sean disponibles en los catálogos de los proveedores existentes en el mercado. Con ello se evitará la necesidad de incorporar equipamientos a medida con un mayor coste.

Por ejemplo, el catalogo del reconocido fabricante Nabetherm dispone de varios hornos eléctricos de cámara dotados de apertura mediante compuerta, que podrían satisfacer los requisitos de la instalación, tal y como se indica en la figura 15.

Concretamente el horno eléctrico de dimensiones interiores: 2500 mm (largo) x 1500 mm (ancho) x 600 mm (alto), proporcionaría una elevada flexibilidad de carga y la posibilidad de incorporar varios semiproductos simultáneamente (al menos 3), lo cual permitiría optimizar el procesamiento de las nuevas calidades de acero experimental. Según el fabricante, las citadas dimensiones y la necesidad de precalentar los semiproductos hasta una temperatura máxima de 1300°C requieren una potencia eléctrica de 110 kW, que debe ser tomada en consideración durante el diseño eléctrico de la planta piloto de laminación en caliente.

Dimensiones interiores en mm			Volumen en l	Dimensiones exteriores en mm			Potencia calórica en kW ¹	Conexión eléctrica*
anch.	prof.	alt.		Anch.	Prof.	Alt.		
750	1300	750	730	1800	2400	2890	70	trifásica
800	1900	500	760	1740	2700	2650	70	trifásica
800	1400	800	890	1740	2200	3450	70	trifásica
1000	1900	550	950	2060	2700	2780	70	trifásica
1800	1200	600	1296	2860	2000	3020	70	trifásica
1660	1200	750	1490	2720	2000	3350	110	trifásica
1000	1500	1000	1500	2060	2300	3845	95	trifásica
1600	2000	500	1600	2660	2900	2900	110	trifásica
2200	1600	500	1760	3400	2500	2900	110	trifásica
1400	1400	900	1770	2460	2200	3745	110	trifásica
1700	1700	750	2160	2760	2600	3350	110	trifásica
1000	2200	1000	2200	2060	3000	3845	150	trifásica
2500	1500	600	2250	3560	2300	3020	110	trifásica
2500	1200	800	2400	3560	2000	3445	110	trifásica

Figura 15. Especificaciones de hornos eléctricos de cámara del catálogo del fabricante Nabetherm. [4]

La elección final del modelo de horno requiere un estudio adicional para comparar los modelos ofertados por otros fabricantes.

Por tanto, los resultados de los trabajos desarrollados durante la presente tarea, han permitido definir las necesidades de la instalación en relación al horno de precalentamiento: resulta idóneo la instalación de un horno eléctrico de cámara, apertura mediante compuerta lateral y soporte inferior móvil, de dimensiones 2500 mm (largo) x 1500 mm (ancho) x 600 mm (alto), situado en línea con el camino de rodillos a la entrada de la caja de laminación.

Se precisa que el horno alcance 1300°C de temperatura, controlada mediante termopar de contacto sobre los semiproductos, y verificada mediante una cámara termográfica de alta resolución (no se descarta la posibilidad de una vez calibrada y verificado el funcionamiento de esta cámara termográfica utilizar esta señal como entrada de control para el horno). Se ha decidido también que no se precisa de atmósfera protectora, si bien sí será recomendable la instalación de un descascarillador a la entrada de la caja de laminación. Esto resulta indispensable para facilitar el proceso de laminación en caliente y maximizar la vida útil de los cilindros de laminación.

El traslado y manipulación de los semiproductos se realizará mediante la apertura parcial de la compuerta, desplazando el soporte inferior móvil, y haciendo uso del puente grúa disponible en las instalaciones.

b) Definición mesa de enfriamiento

La mesa de enfriamiento resulta un equipamiento indispensable en la instalación de cara a desarrollar nuevas calidades experimentales de acero. El diseño de la ruta de enfriamiento del acero tras ser laminado en caliente permite optimizar sus propiedades mecánicas mediante el control de su configuración microestructural. Estas propiedades no depende únicamente del diseño composicional y de las etapas de laminación en caliente, sino también de esta etapa final de enfriamiento.

Partiendo de la configuración microestructural bruto de colada tras el tratamiento térmico de recalentamiento, durante el proceso de laminación en caliente existen varios fenómenos metalúrgicos que afectan a la microestructura y consecuentemente a las propiedades mecánicas: restauración, recristalización y precipitación principalmente.

Durante la etapa final en la mesa de enfriamiento, los fenómenos metalúrgicos más relevantes que dotan al acero de su microestructura final de laminación en caliente son: descomposición de la austenita, endurecimiento por precipitación y transformaciones de fase.

Estos fenómenos metalúrgicos determinan las propiedades mecánicas del acero, que dependen de los componentes microestructurales producto de estas transformaciones: ferrita, perlita, bainita y martensita, y de sus características, del tamaño de grano ferrítico, temperatura de transformación o del grado de precipitación y endurecimiento por solución sólida.

En los aceros avanzados de alta resistencia, la importancia de la mesa de enfriamiento tras el proceso de laminación en caliente es aún más relevante debido a las bajas temperaturas de bobinado que requieren estas calidades.

Por tanto, la tendencia actual orientada al desarrollo de nuevas calidades de acero de alta resistencia, ha motivado la necesidad de ejecutar modificaciones en las mesas de enfriamiento disponibles en las instalaciones siderúrgicas convencionales.

La figura 16 muestra algún ejemplo de mesas “convencionales” de enfriamiento al aire.



Figura 16. Enfriamiento controlado de aceros avanzados en formato carril. [6]

El aumento de estos requisitos ha supuesto la incorporación de medios de refrigeración con mayor severidad. Habitualmente, la tecnología incorporada a las instalaciones siderúrgicas es el enfriamiento con agua ya que los enfriamientos por aire no suelen alcanzar las velocidades de enfriamiento requeridas. De todas maneras cabe destacar que existe alguna alternativa puntual que utiliza otro medio refrigerante. Por ejemplo el enfriamiento controlado de la cabeza de los carriles de aceros avanzados desarrollado por la compañía Voest Alpine. La configuración de la citada “mesa” de enfriamiento está protegida por patentes y no se dispone de información relativa a sus características fundamentales, si bien es sabido que el enfriamiento de la cabeza del carril se hace mediante inmersión en una resina polimérica, tal y como se muestra en la figura 17.



Figura 17. Enfriamiento controlado de aceros avanzados en formato carril (Voest Alpine). [7]

La configuración y los parámetros de proceso de las mesas de enfriamiento de las instalaciones siderúrgicas industriales resulta información confidencial de muy difícil acceso.

A pesar de ello durante la presente investigación se ha realizado un estudio identificando la documentación disponible más relevante relativa a este tipo de equipamientos que incorporan tecnologías basadas en el enfriamiento con agua.

A continuación, la figura 18 muestra un esquema del proceso siderúrgico de laminación controlada de la compañía siderúrgica Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, ilustrando la evolución microestructural y las posibles configuraciones microestructurales, en función del sistema de la severidad o ratio de enfriamiento alcanzado en la mesa de enfriamiento.

Como es sabido se puede observar como la configuración microestructural final varía con la velocidad de enfriamiento y como a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento la resistencia mecánica también aumenta.

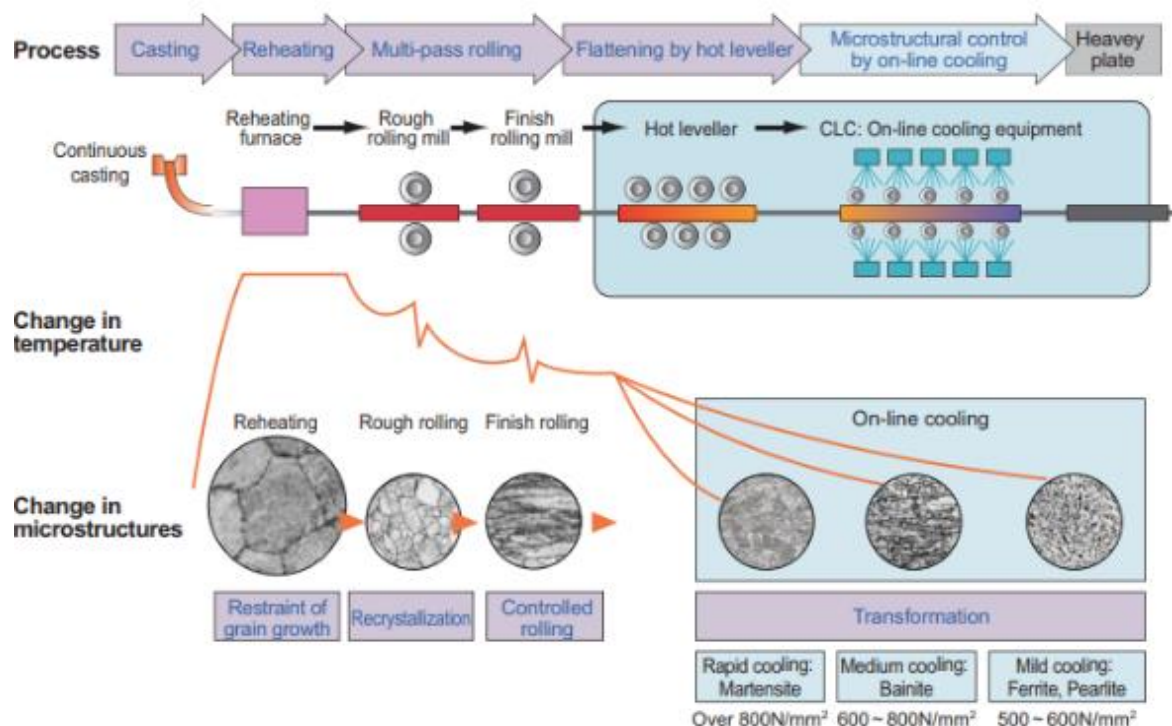
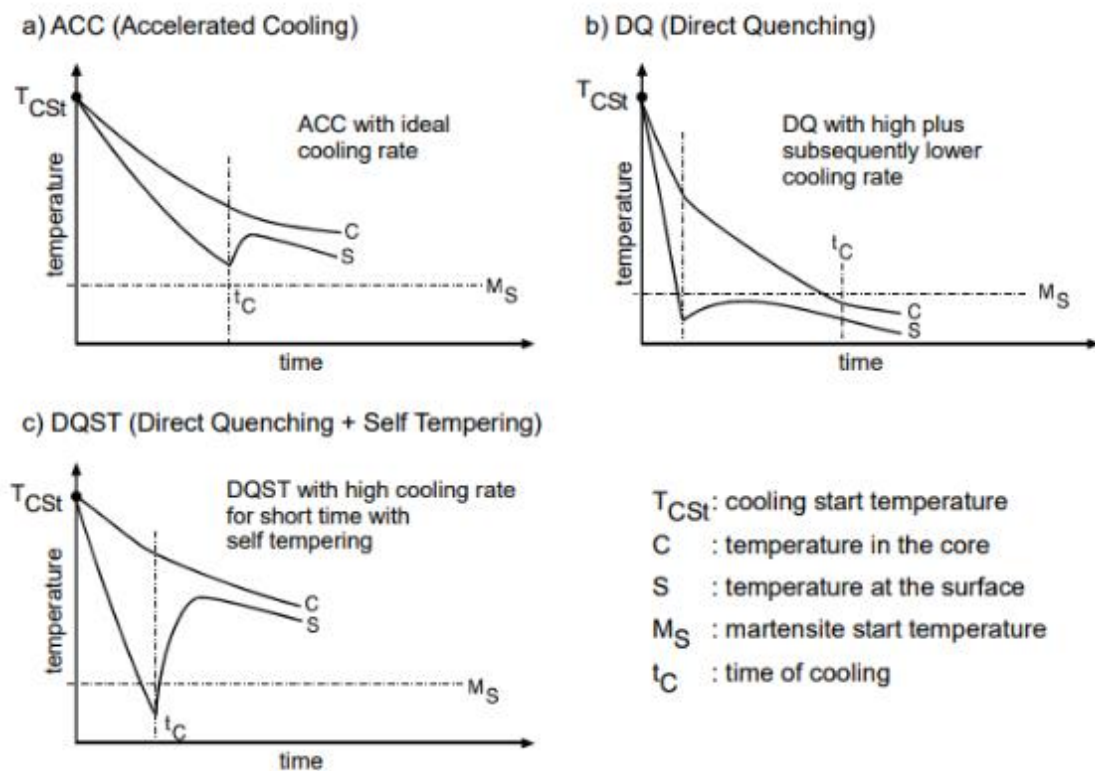
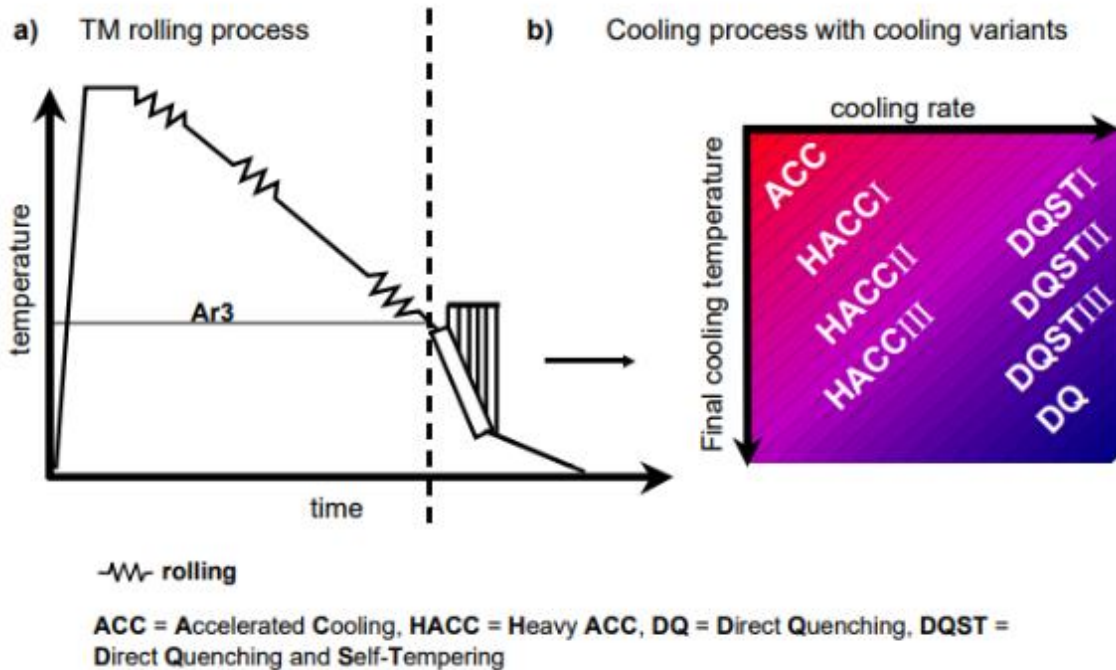


Figura 18. Esquema del proceso de laminación controlada de la compañía Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. [8]

Asimismo, la figura 19 ilustra un esquema de las rutas de enfriamiento requeridas en la mesa de enfriamiento del proceso de laminación termo-mecánica controlada en caliente para la obtención de los aceros de alta y ultra-alta resistencia (información del proceso del fabricante siderúrgico Dillinger).



Design of cooling process - aspects and variants

Figura 19. Ratios de enfriamiento de la laminación controlada de aceros de alta y ultra-alta resistencia de la compañía siderúrgica Dillinger. [9]

Las instalaciones siderúrgicas de la compañía Dillinger posibilitan la ejecución de varios tipos de tratamientos térmicos, en función de los ratios de enfriamiento:

- Enfriamiento acelerado (ACC): ratio de enfriamiento ideal
- Temple directo (DQ): ratio máximo de enfriamiento en la superficie y enfriando el centro por debajo de la temperatura de inicio de la transformación martensítica
- Temple directo y auto-revenido (DQST): el calor latente en la zona central se aprovecha después de un tiempo de enfriamiento extremadamente corto para lograr el auto-revenido.
- Enfriamiento acelerado intenso (HACC): variante del enfriamiento acelerado (ACC), con una temperatura de enfriamiento final más baja y una velocidad de enfriamiento algo mayor.

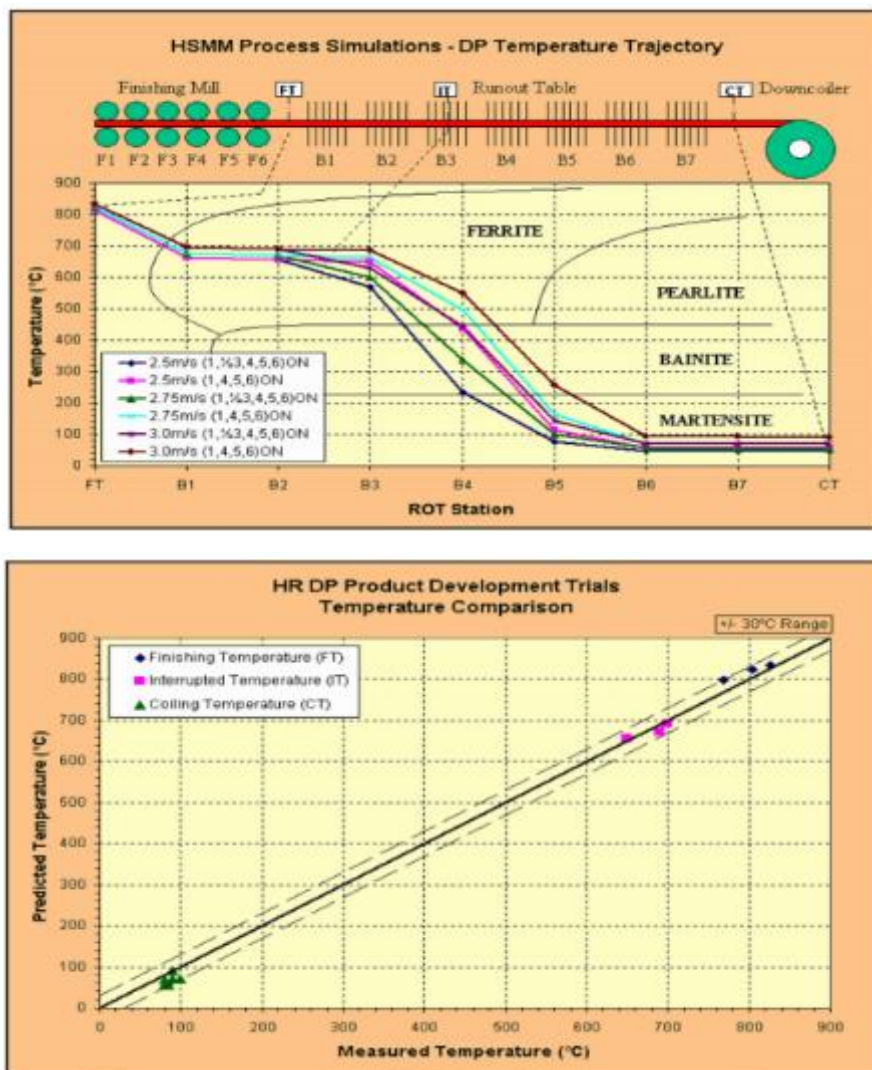
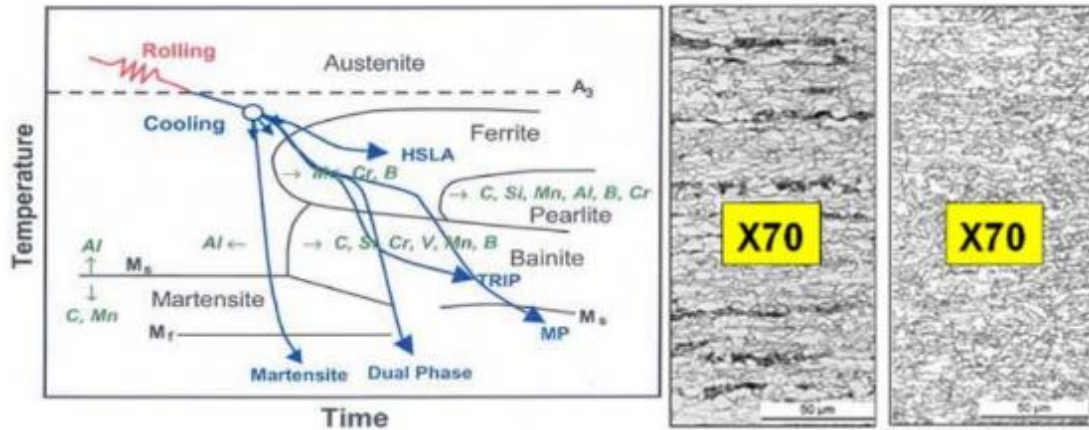


Figura 20. Resultados de un diseño y simulación de una mesa de enfriamiento para aceros de fase dual laminados en caliente, realizado por la compañía INTEG Process Group, Inc. [10]

La figura 20 muestra los resultados más representativos de una reciente investigación realizada por la compañía INTEG Process Group, Inc., orientada a la simulación del desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia (aceros de fase dual laminados en caliente) en un tren de bandas en

caliente usando un modelo microestructural evolutivo. Se puede observar como si no se modifica las condiciones de enfriamiento, una variación en la velocidad de línea proporciona microestructuras diferentes, lo cual debe ser estrictamente controlado para asegurar la calidad metalúrgica de los distintos productos.



	Laminar Cooling	Turbo – Laminar Cooling	Power Cooling
Adjustment range	25–100%	25–100%	7–100%
Cooling rate Structural steel h=6mm	~45°C/s	~64°C/s	~175°C/s
Cooling rate Structural steel h=12.2mm	~24°C/s	~34°C/s	~85°C/s
Cooling rate Structural steel h=25.4mm	~11.5°C/s	~17°C/s	~40°C/s

No. of top and bottom headers	36	„Booster“ operation
Max water flow rate at 3.5 bar	16,200 m³/h	
Pressure at nozzle	max. 3.5 bar	
Water flow rate	~ 7,700 m³/h	„Laminar“ operation
Pressure at nozzle	max. 0.8 bar (supply overhead tank)	
Total length	~ 17 m	

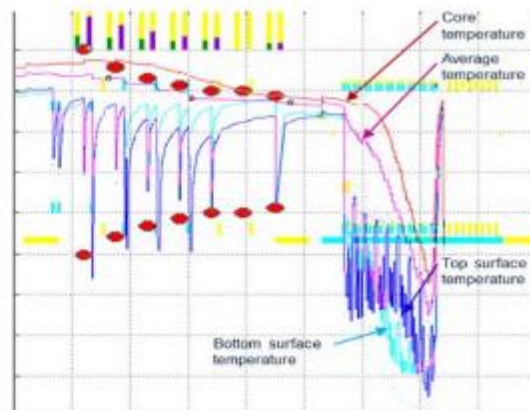


Figura 21. Resultados del diseño de una mesa de enfriamiento para aceros avanzados de alta resistencia, realizado por la compañía Primetals Technologies, GmbH. [11]

La figura 21 muestra algunos de los resultados más relevantes alcanzados por la compañía Primetals Technologies GmbH, en sus investigaciones relativas al desarrollo de las mesas de enfriamiento requeridas para la fabricación de nuevas calidades de aceros avanzados de alta resistencia en chapa gruesa.

En la citada figura se detallan los ratios de enfriamiento requeridos para alcanzar las microestructuras representativas de las distintas calidades de aceros avanzados de alta resistencia (martensíticos, de fase dual, multifase, etc.).

Caben destacar dos aspectos; por un lado que la velocidad de enfriamiento no es constante en todo el intervalo de temperaturas y por otro que las tecnologías de enfriamiento utilizadas en cada una de las etapas también ha de adaptarse (enfriamiento laminar, turbo-laminar o energético).

Se puede observar como con la utilización de las nuevas tecnologías de enfriamiento se alcanzan velocidades de enfriamiento elevadísimas, de hasta 175°C/s

La figura 22 contiene una tabla que muestra las tecnologías basadas en la aplicación de agua en las mesas de enfriamiento disponibles en los trenes de laminación de productos planos (6-100 mm de espesor) de la compañía siderúrgica Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation.

Country	Company mill		Start up	Location of HL (before, after, both side of ACC)	ACC pinching roll	Length (m)	Nozzle		Direct quench availability
							Top side	Bottom side	
Japan	NSSMC	A	1984	Before	○	21	1st part: Slit jet	1st part: Slit jet	○
			2012				2nd part: Spray	2nd part: Spray	
		B	1983	Before	○	20	1st part: Slit jet	1st part: Slit jet	○
			2005				2nd part: Spray	2nd part: Spray	
		C	1986	Before	○	21	1st part: Slit jet	1st part: Slit jet	○
			2009				2nd part: Spray	2nd part: Spray	
		D	1983	After		27	Slit laminar	Spray	
			1979	After		14	Spray	Spray	○
			2010	Both		24	Multi jet	Multi jet	○
	A	A	1983	Both		39	Laminar	Spray	
			1985	Both		22	Slit jet + Laminar	Slit jet + Spray	○
		A	1985	After	○	20	Laminar	Close suction laminar	○
			2004	Both	○	20	Corridor flow	Close suction laminar	○
		B	1983	After	○	40	Rord-like nozzle	Dish-like jet	
			1983	After	○	13	Immerssion + Stir	Immerssion + Stir	○
			2003	Both	○	12	Corridor flow	Close suction laminar	○
	C		1980	After		44	Laminar	Spray	
			1998	Both	○	20	Corridor flow	Close suction laminar	○
Europe	C	A	1986	After		30	Pipe	Pipe	○
	D	A	1984	After		12	Pipe	Pipe	○
	E	A	1984	After		12	Laminar	Laminar	○
U.S.A.	F	A	1995	Both			Mist	Mist	○
Taiwan	G	A	1994	Both		24	Laminar jet	Laminar jet	
Korea	H	A	1989	After		30	Mist + Pipe	Mist + Pipe	○
			2003	Both		24	Pipe	Pipe	○
China	I-O	A-G	2010	Both		24	1st part: Slit jet 2nd part: Spray	1st part: Slit jet 2nd part: Spray	○

ACC: Accelerated cooling

Figura 22. Mesas de enfriamiento en los trenes de laminación de producto plano (6-100 mm) de la compañía Nippon Steel & Sumimoto Metal Corporation. [12]

Los resultados de las investigaciones ponen de manifiesto la notable relevancia de esta etapa en el proceso siderúrgico y como la aplicación de tecnologías basadas en enfriamiento con agua satisfacen los requisitos de la mayor parte de los procesos y productos.

Sin embargo el diseño de este tipo de mesas de enfriamiento, basadas en tecnologías de aplicación de agua, precisa de complejos estudios de fenómenos de transferencia de calor, cuantificando la interacción entre el flujo de vapor y las gotas de agua proyectadas hacia la superficie del material, tal y como se refleja en la figura 23, mostrada a continuación.

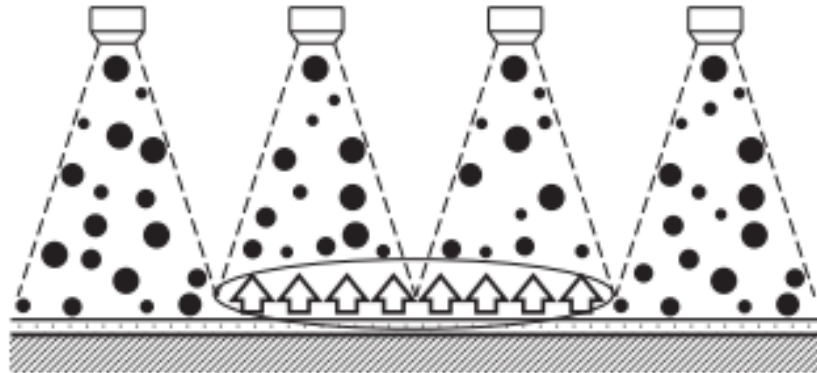


Figura 23. Flujo ascendente de vapor frente a gotas de agua proyectadas en sentido descendente. [13]

En estos fenómenos de transferencia de calor, resulta fundamental el fenómeno de la ebullición, que motiva la aparición de una película de vapor entre la superficie del acero y el agua a las temperaturas más elevadas, lo cual genera una reducción de la capacidad refrigerante de la mesa de enfriamiento.

A medida que se va enfriando el acero, el contacto del agua con la superficie del mismo mejora y se incrementa el ratio de enfriamiento, en la denominada región de ebullición transitoria, idónea para el funcionamiento óptimo de la mesa de enfriamiento. Cuando la temperatura del acero desciende aún más la nucleación de las burbujas de vapor empiezan a jugar un papel primordial.

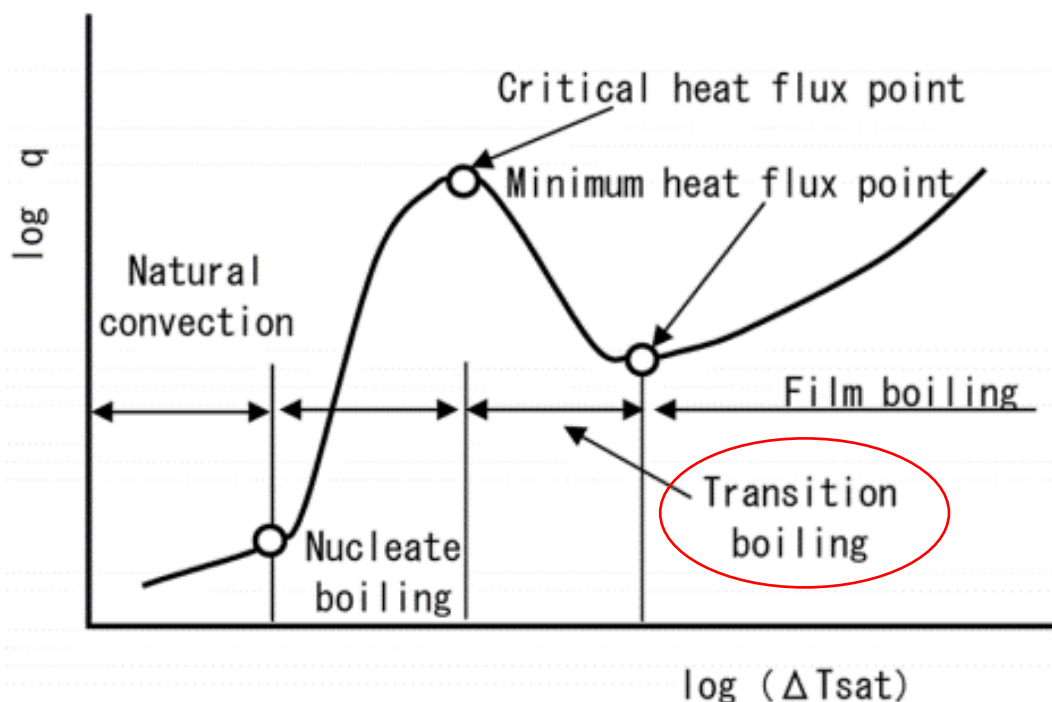


Figura 24. Curva de ebullición del agua. [13]

La figura 24 muestra un esquema representativo de los tres estados en los que puede trabajar una mesa de enfriamiento con agua, si bien resulta fundamental que lo haga en el régimen de ebullición transitorio.

Las diferencias entre las tecnologías de las mesas de enfriamiento basadas en la aplicación de agua reside en la configuración de la instalación: presión de aplicación, número, posición y distancia de las boquillas a la superficie del acero, etc. y esta configuración es totalmente dependiente del formato y dimensiones del componente de acero que se pretende enfriar controladamente.

Resulta lógico identificar la tecnología de una mesa de enfriamiento basada en la aplicación de agua idónea para incorporar a la planta de laminación en caliente, ya que ofrece la posibilidad de procesar distintos formatos de acero, permitiendo ajustar la configuración del equipamiento en función de cada semiproducto (formato y calidad).

Otras alternativas, como la tecnología de inmersión, no resultan idóneas ya que las velocidades de enfriamiento obtenidas son significativamente inferiores, especialmente en la primera etapa del temple en la que se produce la formación de burbujas y en la etapa final, en los que el enfriamiento se produce principalmente por radiación.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, se ha estimado un espacio de 6 m² para ubicar la mesa de enfriamiento (espacio suficiente para albergar los productos obtenidos en el laminador). Esta se colocará a la salida del camino de rodillos en línea con el laminador.

Otro aspecto a tener en cuenta de los sistemas de refrigeración por agua es el poco espacio que requieren (como se comentará posteriormente los equipos auxiliares, que sí presentan un tamaño importante, serán instalados en el exterior de la nave).

La figura 25 muestra un esquema y dos imágenes de un equipamiento experimental similar al que se propone para la instalación objeto del presente estudio, en el cual el material se desplaza en un “porta-slabs” y es sometido a un enfriamiento controlado en función de su formato y geometría.

El objetivo multiformato de la planta de laminación en caliente requiere de la disposición de una mesa de enfriamiento experimental motorizada, análoga a la mostrada en las imágenes de la figura anterior, que permita la posibilidad de ajustar todas las variables que influyen en el flujo de agua depositado sobre la superficie del acero.

El objetivo es ajustar los parámetros de proceso para cada formato y tamaño asegurando que el material enfría según los ratios requeridos para obtener cada una de las configuraciones microestructurales requeridas para dotar al material de las propiedades mecánicas idóneas.

Simultáneamente debe verificarse que se trabaja en un régimen de ebullición transitoria, al menos en las etapas en las que se requieran las mayores velocidades de enfriamiento evitando la formación de películas de vapor que merman el rendimiento del proceso. Por tanto, para cada uno de los formatos y tamaños laminados en caliente será preciso ajustar los parámetros de proceso más relevantes.

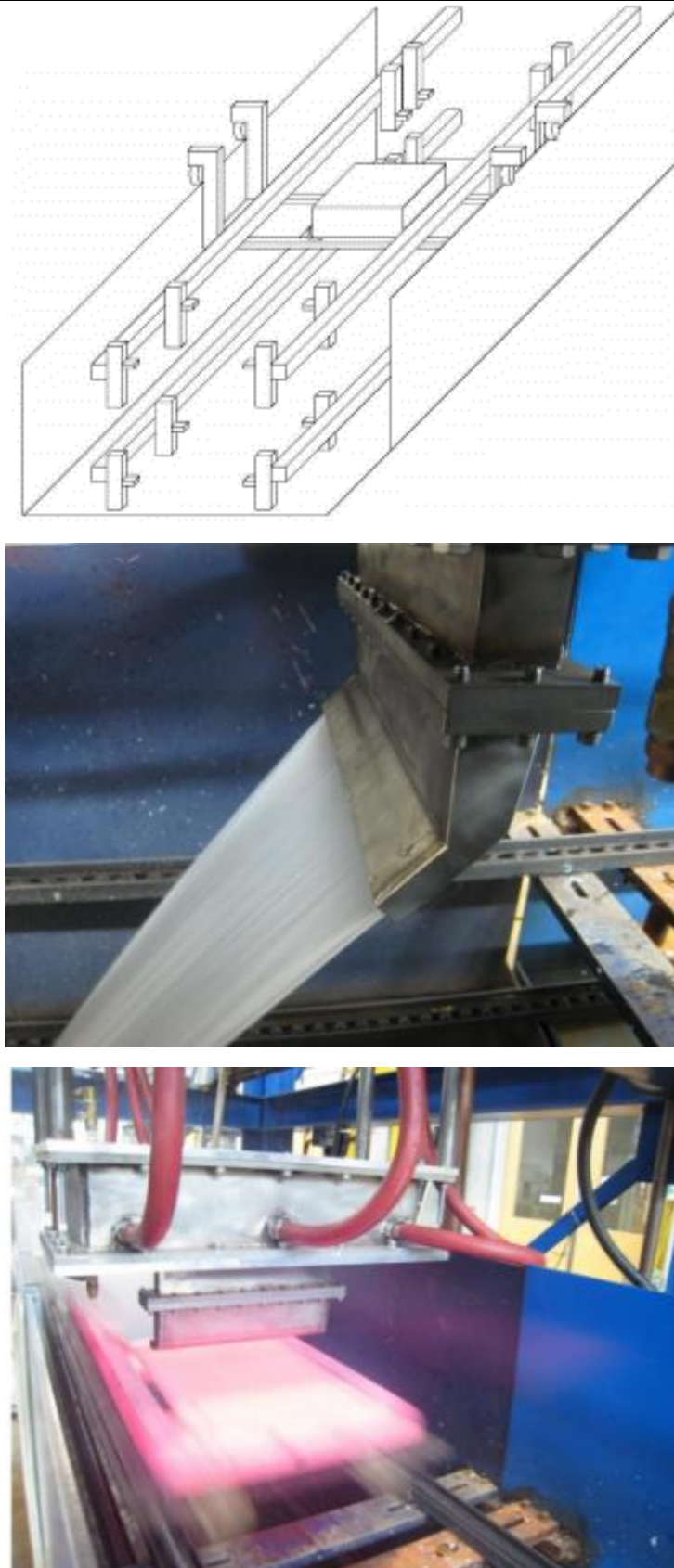


Figura 25. Propuesta de diseño de la mesa de enfriamiento experimental basada en la tecnología de proyección de agua. [14]

A continuación, la figuras 26-30 muestran algunos ejemplos de estudios de la influencia de algunos de estos parámetros: flujo de aporte, ángulo de incidencia, distancia de la boquilla a la superficie, apertura de las boquillas, velocidad del material, sobre una calidad de acero de un determinado formato y dimensiones.

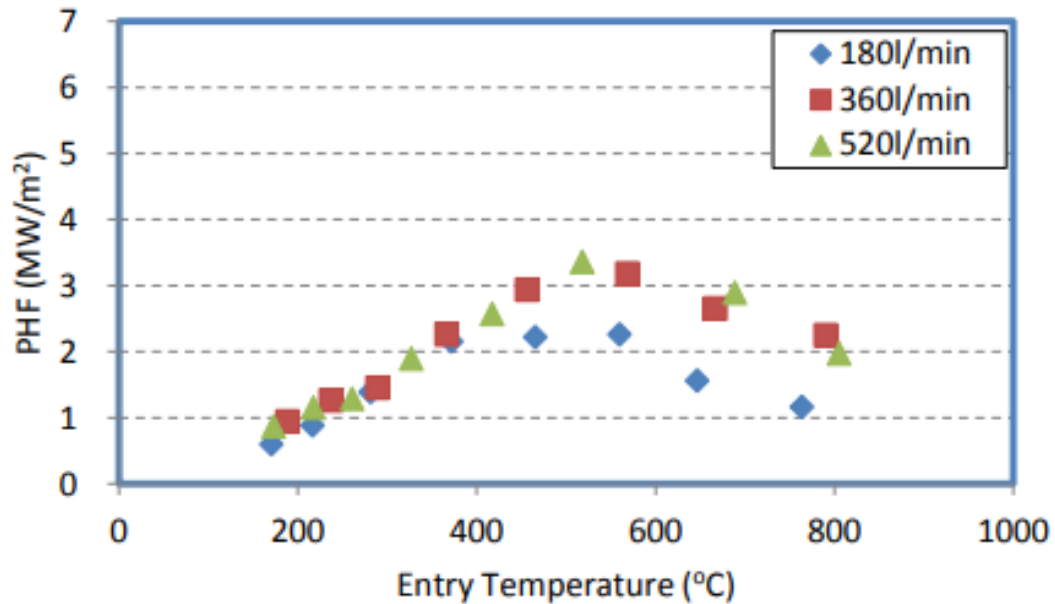


Figura 26. Influencia del flujo de aporte de agua. Boquillas de 3 mm, distancia 60 mm, ángulo de incidencia 15°, velocidad de la muestra 1m/s y temperatura del agua 25°C. [14]

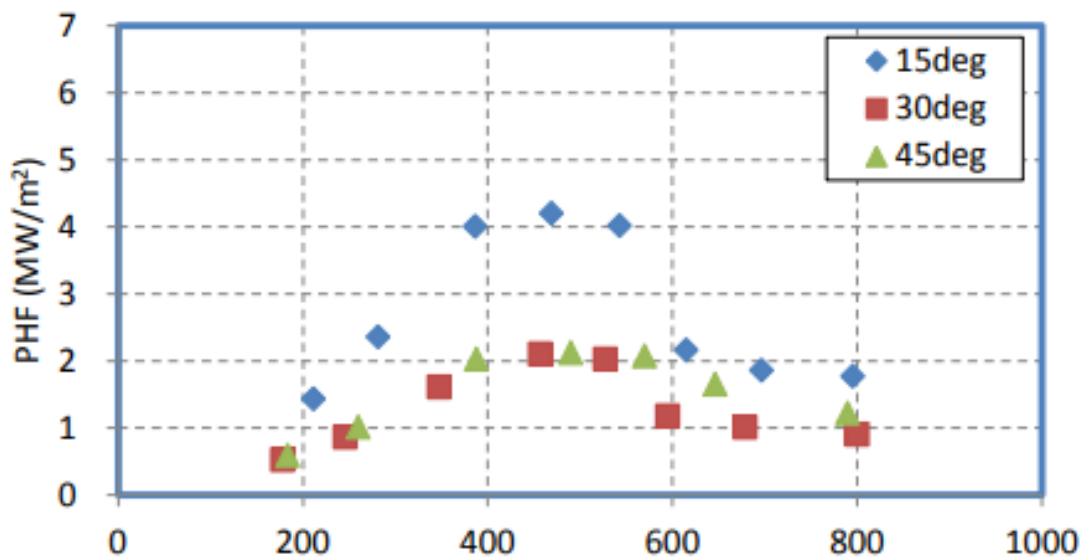


Figura 27. Influencia del ángulo de incidencia. Boquillas de 5 mm, distancia 60 mm, flujo de aporte de agua 180 l/min, velocidad de la muestra 1m/s y temperatura del agua 25°C. [14]

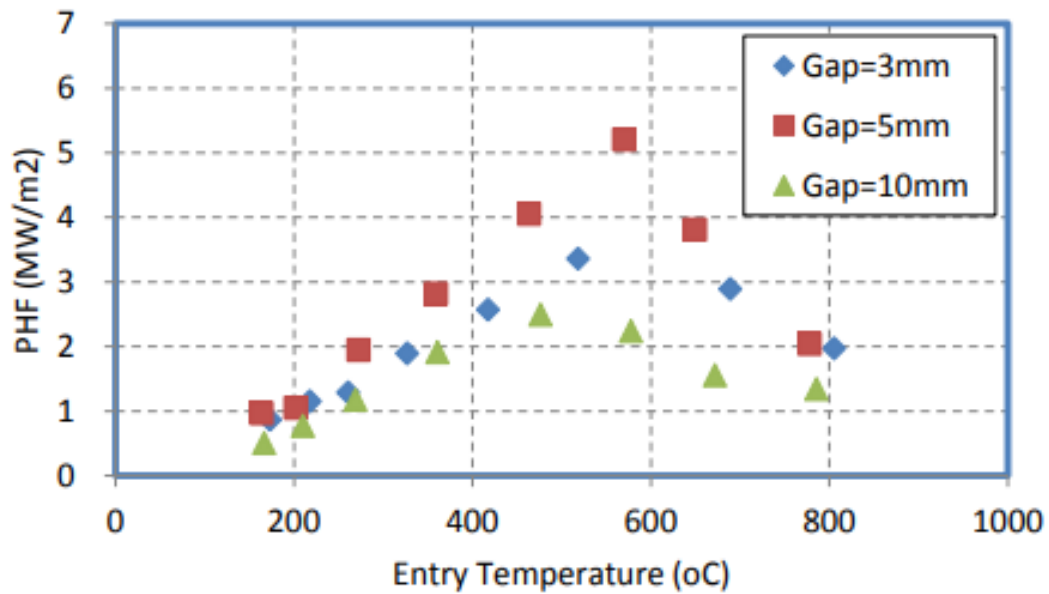


Figura 28. Influencia de la apertura de la boquilla. Distancia 6 mm, ángulo de incidencia 15°, flujo de aporte de agua 520 l/min, velocidad de la muestra 1m/s y temperatura del agua 25°C. [14]

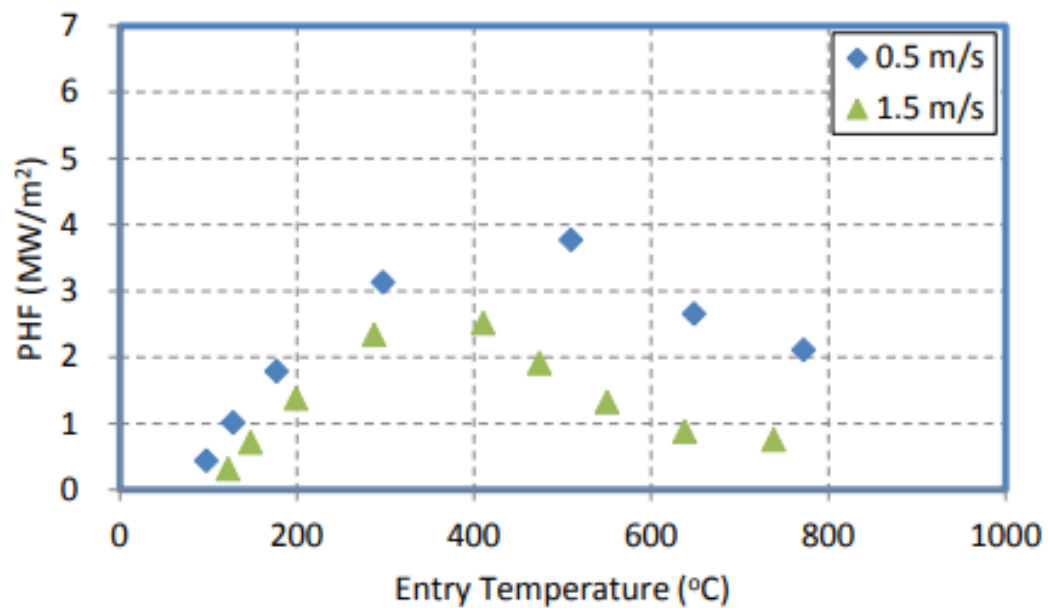


Figura 29. Influencia de la velocidad de la muestra. Boquillas de 5 mm, ángulo de incidencia 15°, flujo de aporte de agua 180 l/min, distancia 60 mm y temperatura del agua 25°C. [14]

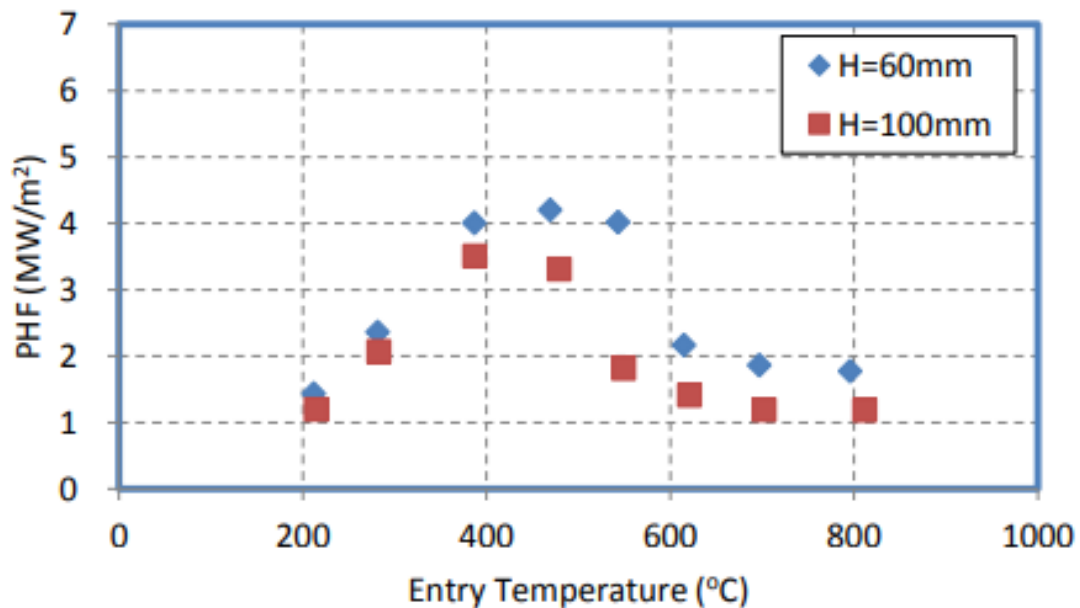


Figura 30. Influencia de la distancia. Velocidad de la muestra. Boquillas de 5 mm, ángulo de incidencia 15°, flujo de aporte de agua 180 l/min, velocidad de la muestra 1m/s y temperatura del agua 25°C.
[14]

Sin duda alguna las boquillas son los elementos más críticos de todo el sistema de refrigeración por agua, especialmente en el caso de flujos laminares.

Dicha tecnología está en mano de los distintos fabricantes y no ha sido posible identificar más información que la puramente comercial.

La figura 31 muestra una imagen de detalle de las boquillas de alta eficiencia de la marca Lechler, así como su montaje en una componente dotado de doble línea de boquillas. En la propia imagen puede observarse los diferentes diseños de las boquillas.

Por último, destacar que se han de considerar otros equipamientos auxiliares imprescindibles para el funcionamiento de la mesa de enfriamiento:

- Un sistema de bombeo.
- Un sistema de filtrado y tratamiento de agua.

Si bien se ha intentado identificar las necesidades reales de estos sistemas de enfriamiento (caudales y presiones de agua, tipo y configuración de boquillas, etc.) nuevamente ha resultado imposible acceder a dicha información al tratarse de Know-how de los fabricantes de dichas instalaciones. Tampoco ha sido posible obtener una estimación económica de dichos equipamientos ya que se trata de equipos a medida y en el estado actual del proyecto aún no se han definido con total exactitud de todas las variables necesarias para ello.

Sin embargo si se ha concluido que el sistema de bombeo, filtrado y el posible depósito de agua requerido por la mesa de enfriamiento se instalaran en el exterior de la nave.

Según recomendaciones de los proveedores consultados sería recomendable que el agua circulase por tuberías por debajo del suelo para evitar interferir con el resto de equipamientos e instalaciones

de la nave, más teniendo en cuenta que en la instalación se procesarán componente a muy elevada temperatura.

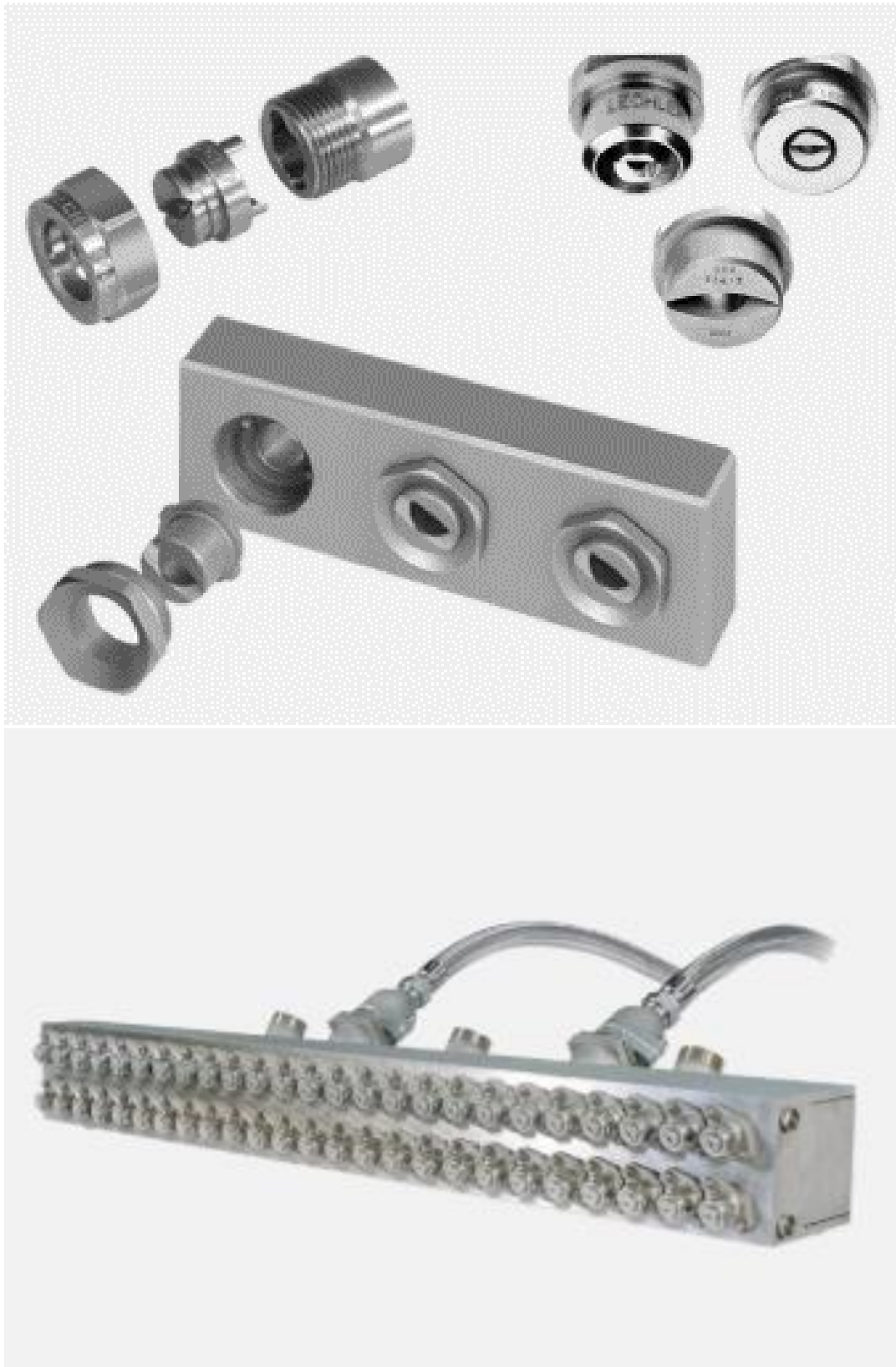


Figura 31. Detalle de las boquillas de alta eficiencia del proveedor Lechler, y montaje en componente de doble línea. [15]

Por lo tanto durante la presente tarea se ha identificado la tecnología de enfriamiento por agua con enfriamiento laminar como idónea para ser incorporada a la mesa de enfriamiento.

Esta tecnología permitirá el desarrollo nuevas calidades de aceros experimentales, cumpliendo los ratios definidos previamente mediante ensayos dilatométricos y caracterizaciones metalográficas, realizadas sobre probetas de escala de tamaño reducido ya que los mecanismos metalúrgicos que rigen las transformaciones de fase no son relación directa del tamaño de la muestra (por ejemplo, una muestra de 4 mm presentará la misma microestructura que una pieza de 100 mm de espesor si se consigue que la velocidad de enfriamiento sea la misma).

Asimismo, se ha propuesto un esquema de la posible instalación que permitiría el enfriamiento controlado de los formatos y calidades procesadas en la planta piloto de laminación en caliente, estimándose un consumo de 40 kW, y ocupando un espacio de 6 m² en línea con el camino de rodillos a la salida de la caja de laminación en caliente.

Los posibles equipamientos auxiliares de almacenamiento, bombeo y tratamiento de aguas se situaran en el exterior de la nave, y las tuberías y conductos de agua irán por debajo del suelo, para evitar interferencias con el resto del equipamiento.

c) Definición horno tratamientos térmicos

Como ya se ha comentado el procesado de los semiproductos de acero en la planta piloto de laminación en caliente comienza con la etapa de precalentamiento, continúa con la laminación en caliente propiamente dicha y posteriormente sometiendo el material a un enfriamiento controlado en la mesa de enfriamiento.

Sin embargo para algunas calidades o formatos podría requerirse de la realización de un tratamiento térmico posterior. El objetivo de este tratamiento es análogo al de la mesa de enfriamiento, optimizar la configuración microestructural y consecuentemente las propiedades mecánicas del material.

Las condiciones de enfriamiento requeridas en ambos equipamientos auxiliares: mesa de enfriamiento y horno de tratamientos térmicos, pueden ser determinadas previamente mediante ensayos dilatométricos realizados sobre probetas milimétricas (10 x 4 mm), complementados con técnicas de caracterización metalográficas y ensayos de dureza.

Este tipo de ensayos dilatométricos permiten identificar la ruta de enfriamiento óptima del material desde la temperatura final de laminación en caliente hasta la temperatura ambiente.

La figura 32 muestra el dilatómetro empleado en los ensayos preliminares necesarios para definir la ruta de enfriamiento idónea para optimizar la configuración microestructural y las propiedades mecánicas del acero. También se muestra un diagrama de enfriamiento continuo determinado mediante dilatometría que permite diseñar la ruta de enfriamiento y con ello la configuración microestructural deseada.

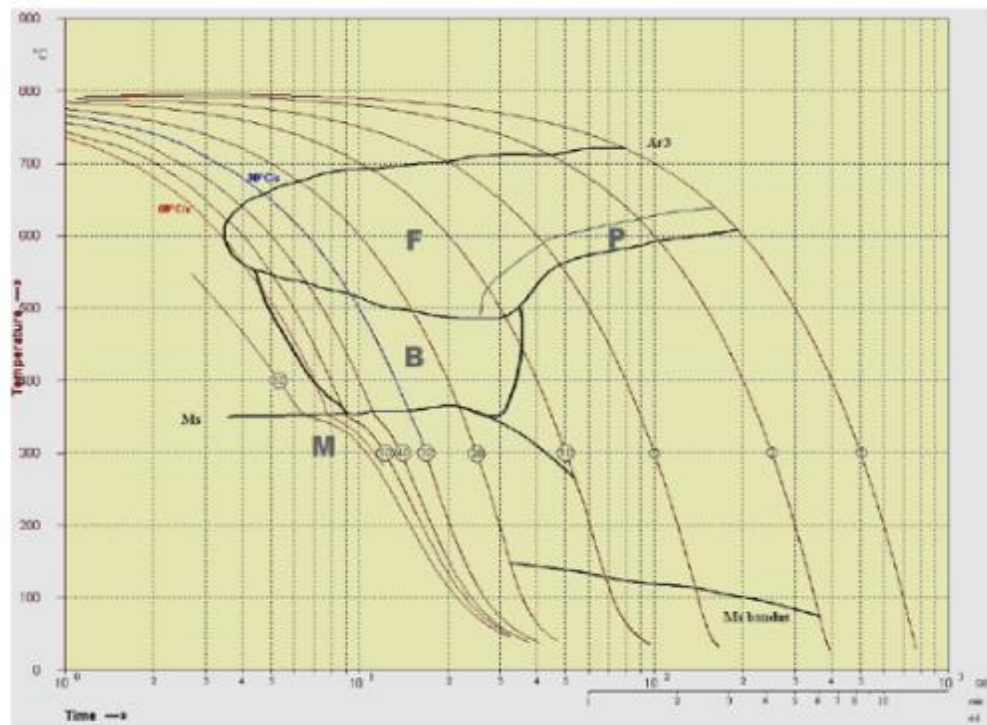
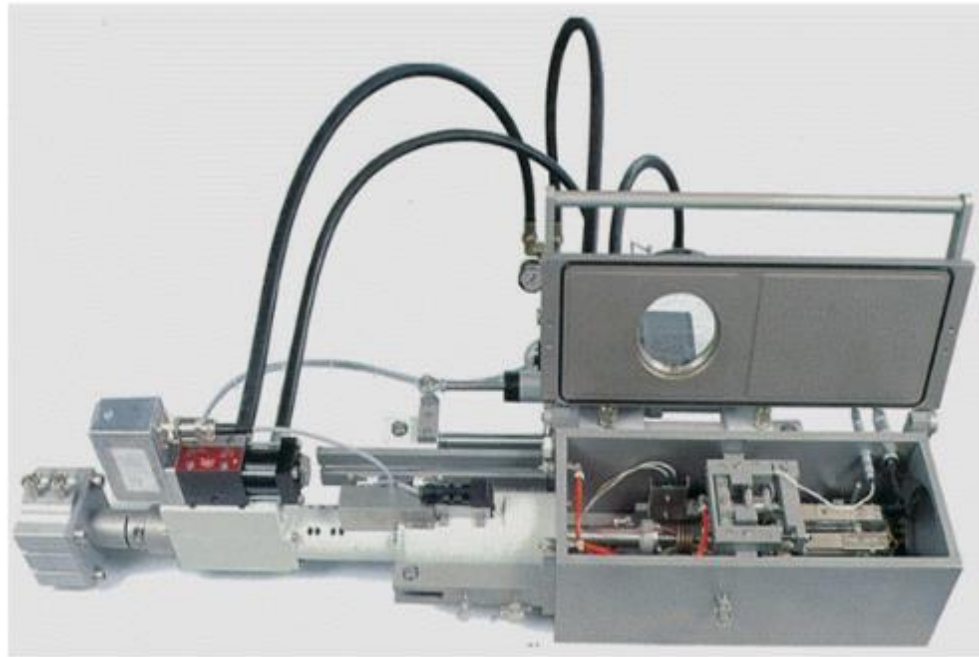
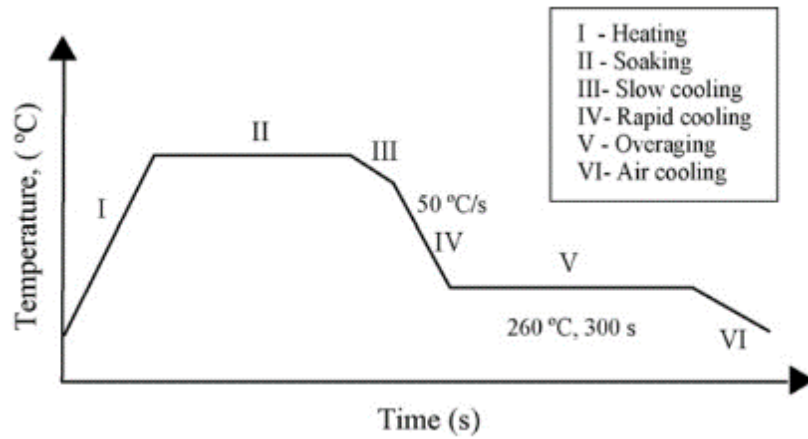
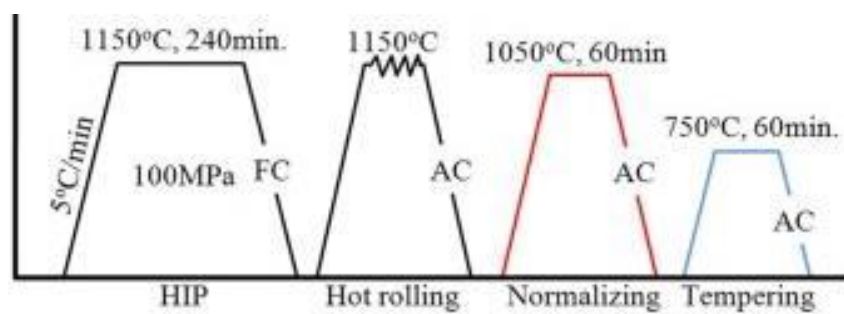


Figura 32. Equipo de ensayos dilatométricos y curvas de enfriamiento características.

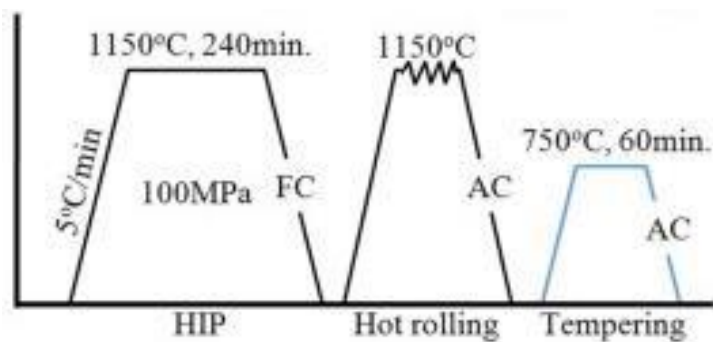
A continuación, la figura 33 muestra un ejemplo de algunos tratamientos aplicados al acero tras el proceso de laminación en caliente en un horno situado en la línea siderúrgica tras la mesa de enfriamiento: recocido continuo, normalizado + revenido, revenido, revenido y enfriamiento en el horno.



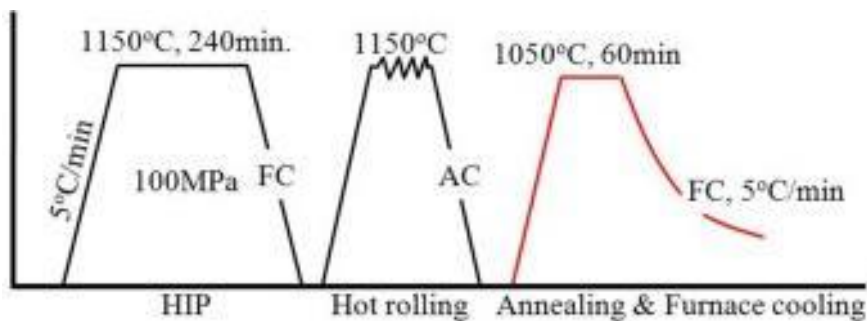
Recocido continuo



Normalizado y revenido



Revenido



Recocido en horno.

Figura 33. Posibles tratamientos térmicos finales tras laminación en caliente y enfriamiento controlado. [16]

Tal y como se ha descrito anteriormente en el apartado dedicado al horno de recalentamiento, existen diversas tecnologías de calentamiento, si bien la configuración y ubicación de la planta piloto de laminación en caliente permiten identificar a los hornos eléctricos como la tecnología más susceptible de ser incorporada a la instalación.

Por tanto, debido a los mismos motivos, el horno de tratamiento térmico idóneo para ser incorporado a la planta piloto de laminación en caliente, estará basado en la misma tecnología seleccionada para el horno de recalentamiento: un horno eléctrico.

Tal y como se ha descrito durante el hito 1 de la presente investigación, relativo al dimensionamiento y la disposición de los equipamientos en la planta piloto, los formatos y geometrías procesadas en la mesa de enfriamiento serán los introducidos posteriormente, en el caso de ser requerido en el horno de tratamientos térmicos, con unas dimensiones máximas de:

- Longitud: 2 m
- Ancho: 0.8 m
- Espesor: 0.24 m

Por tanto, las dimensiones útiles del equipamiento deberán ser análogas a las del horno de recalentamiento: 2500 x 1500 x 600 mm, con el objetivo de permitir el tratamiento térmico en continuo de todos los semiproductos procesados en la planta piloto.

Asimismo, la configuración de horno eléctrico dotada de sistema de apertura mediante compuerta lateral resulta la más idónea para manipular el material, situando el equipamiento en línea del camino de rodillos a la salida de la caja de laminación.

Sin embargo este equipamiento requiere de características específicas. Si bien en el horno de recalentamiento únicamente se tenía que considerar la etapa de calentamiento, en el horno de tratamientos térmicos es la etapa de enfriamiento la que toma mayor importancia.

Lo primero que cabe destacar es que la temperatura máxima de operación en este horno puede ser algo inferior a la requerida en el horno de empape ya que como se ha comentado a dichas temperaturas (1100-1200°C) el crecimiento del tamaño de grano sería excesivo para el posterior tratamiento térmico (véase la figura 34).

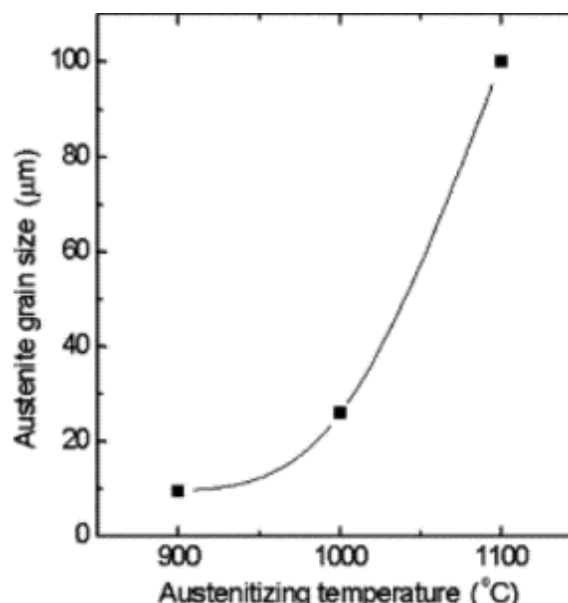


Figura 34. Evolución del tamaño de grano con el grado de reducción y la temperatura. [17]

En el caso del horno de empape, el semiproducto es laminado al salir del horno y este proceso reduce su tamaño de grano tal y como se muestra en la figura 35.

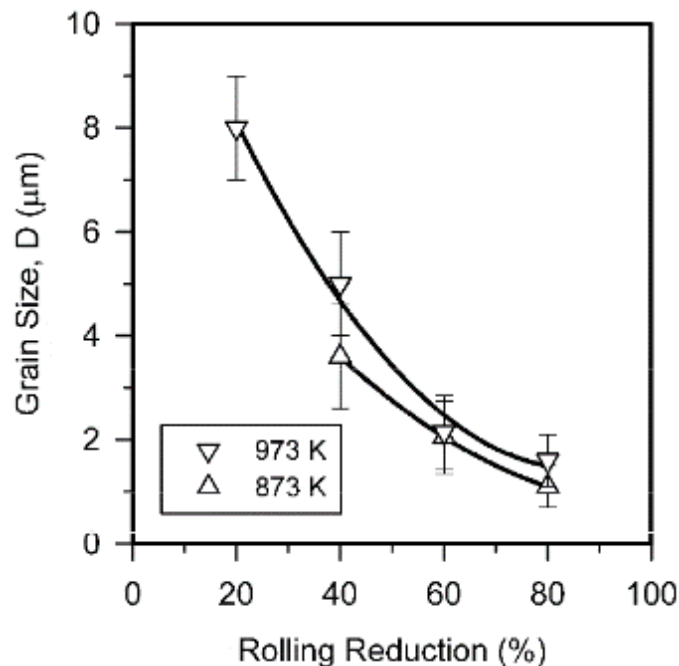


Figura 35. Evolución del tamaño de grano con la temperatura de austenización. [17]

La temperatura máxima del horno de tratamientos térmicos queda fijada por la temperatura requerida para una austenización completa del acero, pero en ciertas calidades también de la cinética de puesta en solución de carburos.

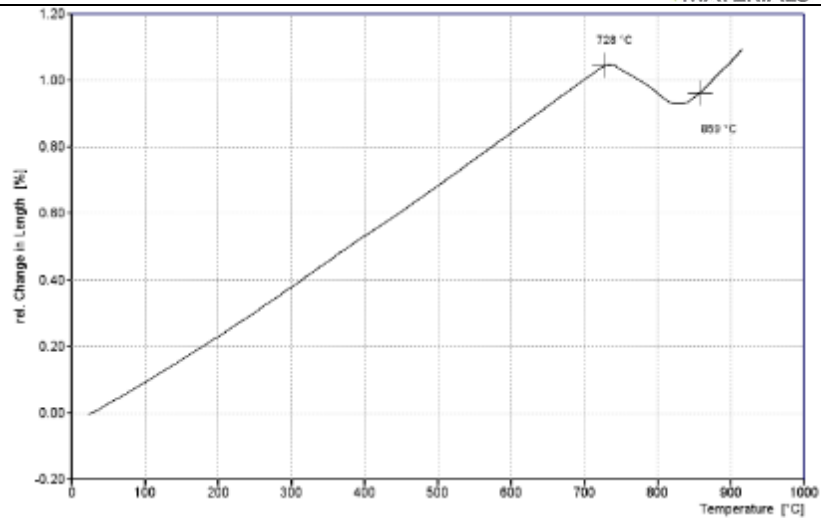
Para poder determinar adecuadamente esta temperatura, se han realizado estudios dilatométricos sobre tres calidades; un acero DP 780 ($\approx 0,1\%C$), un acero eutectoide ($0,77\%C$) y un acero de herramienta semi rápido ($1,5\%C$).

Estas calidades cubren un rango de composición importante (la mayor parte de las aleaciones de acero quedan englobadas en estos rangos de composición).

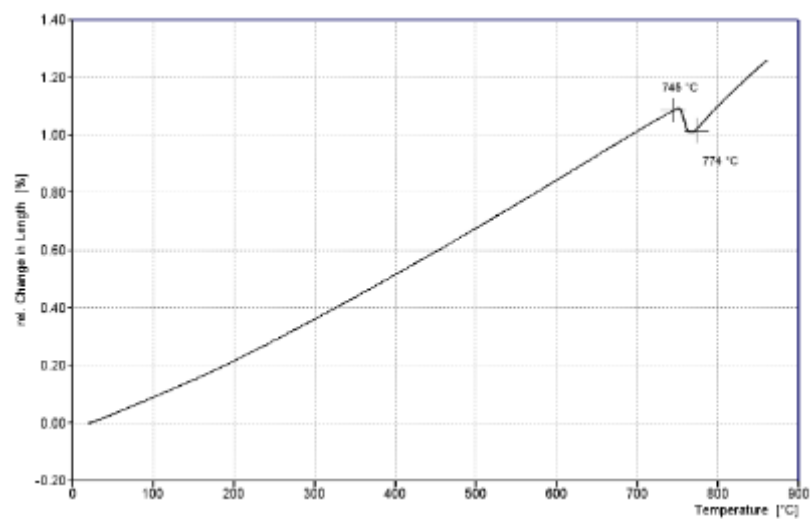
En las curvas dilatométricas correspondientes al calentamiento (figura 36) se puede observar como la temperatura requerida para la austenización completa sí varía con la calidad de acero analizada, pero no de forma muy significativa.

Sin embargo la temperatura de austenización depende también de los procesos metalúrgicos que tienen lugar a temperatura. Este efecto toma especial importancia en el caso de calidades aleadas en la que ha de producirse la puesta en solución de carburos.

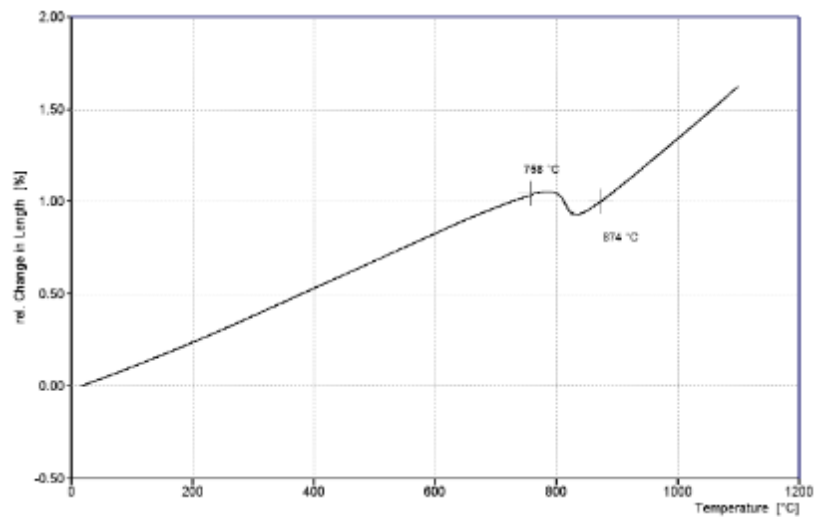
Además de los ensayos dilatométricos se ha realizado un estudio bibliográfico más detallado a nivel normativo para determinar la temperatura máxima requerida para el horno de tratamientos térmicos. Este estudio se ha realizado sobre las calidades de mayor aplicación industrial; aceros al carbono no aleados (10.083-2), aceros al carbono aleados para temple y revenido (10083-3), aceros para aplicaciones a presión (UNE EN 10028-2) y aceros de herramienta (UNE EN 4957).



DP780



AC eutectoide



Ac semi rápido

Figura 36. Evolución de las temperaturas críticas Ac1 y Ac3 para distintas calidades de acero.

Las figuras 37-38 se muestra algún ejemplo correspondiente a dichas normas, concretamente para aceros para aceros de herramienta (figura 37) y equipos a presión (figura 38).

Designación del acero	Composición química ^a , (% en peso)								Dureza en la condición de revenido ^c +A Hb máx.	Ensayo de templabilidad			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Otros		Temperatura de temple ^d °C (± 10 °C)	Medio de temple ^e	Temperatura de revenido ^f °C (± 10 °C)	Dureza HRC ^g mín.
55NiCrMoV1 ^h	0,50 a 0,60	0,10 a 0,20	0,60 a 0,90	0,90 a 1,20	0,35 a 0,55	0,05 a 0,15		Ni 1,50 a 1,20	248 ⁱ	850	0	500	42
32NiCrMoV12-28	0,28 a 0,35	0,10 a 0,20	0,15 a 0,25	1,20 a 1,30	1,30 a 1,50	0,40 a 0,50			120	1.340	0	550	46
X27CrMoV5-1	0,35 a 0,41	0,10 a 0,20	0,25 a 0,50	1,80 a 2,50	1,10 a 1,30	0,30 a 0,50			120	1.020	0	550	48
X13CrMoV5-1	0,35 a 0,40	0,10 a 0,20	0,30 a 0,50	1,80 a 2,20	1,20 a 1,50	0,40 a 0,50			120	1.010	0	550	50
X40CrMoV5-1	0,35 a 0,42	0,10 a 0,20	0,25 a 0,50	1,80 a 2,50	1,20 a 1,50	0,25 a 0,35			120	1.020	0	550	50
50CrMoV13-15	0,45 a 0,53	0,10 a 0,20	0,50 a 0,90	1,80 a 2,50	1,20 a 1,50	0,15 a 0,25			218	1.010	0	550	56
X20WCrV9-3	0,25 a 0,35	0,10 a 0,20	0,15 a 0,45	1,90 a 2,20		0,30 a 0,50	0,30 a 0,50		141	1.150	0	600	48
X35CrMoV5-1	0,35 a 0,40	0,10 a 0,20	0,30 a 0,50	1,70 a 2,20	1,20 a 1,50	1,10 a 1,50			120	1.020	0	550	44
38CrCuWV13-17-17	0,35 a 0,45	0,15 a 0,30	0,30 a 0,50	1,80 a 2,20	0,30 a 0,50	1,20 a 2,30	0,30 a 0,50	Co 0,00 a 0,50	160	1.120	0	600	48

Figura 37. Ejemplo de temperaturas normalizadas para el tratamiento térmico de distintas calidades de aceros de herramienta.

Designación del acero		Temperatura, °C		
Simbólica	Númerica	Normalización	Austenitización	Revenido ^b
P235GH	1.0345	890 a 950 ^a	—	—
P265GH	1.0425	890 a 950 ^a	—	—
P295GH	1.0481	890 a 950 ^a	—	—
P355GH	1.0473	890 a 950 ^a	—	—
16Mo3	1.5415	890 a 950 ^a	—	°
18MnMo4-5	1.5414	890 a 950		600 a 640
20MnMoNi4-5	1.6311	—	870 a 940	610 a 690
15NiCuMoNb5-6-4	1.6368	880 a 960		580 a 680
13CrMo4-5	1.7335	890 a 950		630 a 730
13CrMoSi5-5	1.7336	890 a 950		650 a 730
10CrMo9-10	1.7380	920 a 980		650 a 750
12CrMo9-10	1.7375	920 a 980		650 a 750
X12CrMo5	1.7362	920 a 970		680 a 750
13CrMoV9-10	1.7703	930 a 990		675 a 750
12CrMoV12-10	1.7767	930 a 1 000		675 a 750
X10CrMoVNb9-1	1.4903	1 040 a 1 100		730 a 780

Figura 38. Ejemplo de temperaturas normalizadas para el tratamiento térmico de distintas calidades de aceros para aplicaciones a presión.

Se puede observar como la temperatura máxima es requerida para los aceros de herramienta y alcanza temperaturas máximas de 1150°C. Por lo tanto la temperatura máxima requerida para el horno de tratamientos térmico será de 1200°C.

Como se ha comentado y al igual que ocurría en la mesa de enfriamiento, la etapa de enfriamiento se puede considerar como la etapa crítica.

Por tanto, el horno de enfriamiento debe incorporar tecnologías de enfriamiento acelerado. Al objeto de no duplicar equipamientos y espacios se ha decidido realizado una integración del horno de tratamientos térmicos en línea con la mesa de enfriamiento.

Esto permitirá realizar el enfriamiento en la propia mesa de enfriamiento y consecuentemente utilizar el sistema de enfriamiento por spray anteriormente descrito.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Durante el presente proyecto, se han analizado las tecnologías candidatas a ser incorporadas a los equipamientos auxiliares del laminador de la planta piloto de laminación en caliente, concretamente el horno de recalentamiento, la mesa de enfriamiento y el horno de tratamientos térmicos.

Asimismo, se ha diseñado el Layout de la planta piloto de laminación en caliente, tomando en consideración la ubicación y dimensiones de todos estos equipamientos, en relación a la caja de laminación, y a otros dos equipamientos auxiliares reseñables, como son el camino de rodillos y el sistema de corte en caliente.

Además del diseño del Layout diseñado para optimizar la operatividad de la planta piloto, asegurando el procesamiento de las nuevas calidades experimentales a desarrollar, se han cuantificado las necesidades de suministro más relevantes, fundamentalmente en cuanto a consumo eléctrico, gases y agua de refrigeración.

La disponibilidad de la planta piloto de laminación en caliente permite completar el proceso siderúrgico en la manzana del acero, lo cual permitirá reducir notablemente los plazos necesarios para el desarrollo de nuevas calidades experimentales de acero, posibilitando a las entidades participantes la participación en destacables proyectos y desarrollos que repercutirán notablemente en su competitividad.

5. REFERENCIAS.

- [1] J.L. Enríquez Berciano, E. Tremps Guerra, S. de Elío de Bengy, D. Fernández Segovia, “Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte IV. Laminación”, Manual E.U. de Arquitectura Técnica-Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [2] M. Opiela, A. Grajcar, “Elaboration of forging conditions on the basis of the precipitation analysis of MX-type phases in microalloyed steels”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume12, Issue 4, 2012.
- [3] F. Martín Mora, “REvestimiento refractario en horno de solera galopante”, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [4] <https://www.nabertherm.de/produkte/thermprozessechnik/es>
- [5] <https://www.ametek-land.com/products/portablenoncontactthermometers/cyclopsl>
- [6] <http://www.iruma.es/mesasenfriamiento.php>

- [7] A. Lamik, "The heat treated rails HSH® for heavy loaded tracks", Voestalpine Technical Customer Service, Riyadh, 2014.
- [8] Y. Nomiya, H. Yasui, "Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation", Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No 110, 2015.
- [9] V. Schwinn, P. Fluess, J. Bauer, "Production and progress work of plates for pipes with strength level of X80 and above", International Conference on the Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments", Japan, 2002.
- [10] M. Ibrahim, R. Shulkosky, "Simulation and Development of Advanced High Strength Steels on a Hot Strip Mill using a Microstructure Evolution Model", HSMM Application for AHSS, 2007.
- [11] L. Pichler, K. Weinzierl, S. Samanta, "Power Cooling and Mupic Technology for Hot Rolled flat and Plate Production", 53rd Rolling Abm week, 2016.
- [12] Y. Serizawa, Y. Kadoya, H. Ueno, H. Tachibana, T. Oda, S. Nakagawa, R. Yamamoto, Y. Haraguchi, T. Iwaki, "Plate cooling Technology for the Thermo Mechanical Control Process (TMCP) in Nippon Steel & Sumitomo Metal corporation", Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No 110, 2015.
- [13] M. Gradeck, A. Kouachi, F. Volle, D. Maillet, M. Lebouché, "Boiling curves in relation to quenching of a high temperature moving surface with liquid jet impingement", International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009.
- [14] S. See, V. Prodanovic, M. Militzer, "Study of Characteristics for Plant Slit Jet Cooling on Hot Rolled Plate", Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM), 2015.
- [15] <https://www.lechler.com/de-en/>
- [16] S. Noh, B. Choi, C. Han, S. Hoon, J. Jang, Y. Jeong, T. Kyu, "Effects of Heat Treatments on Microstructures and Mechanical Properties of Dual Phase ODS Steels for High Temperature Strength", Nuclear Engineering and Technology, 2013.