

Revisión del proceso siderúrgico de colada continua mediante solidificación rápida. Sistema de dos cilindros de colada conformación^(*)

I. Ibarondo*

Resumen

A la vista de la evolución del mercado siderúrgico mundial, se hace evidente que las instalaciones siderúrgicas deberán desarrollar nuevos procesos siderúrgicos, capaces de producir productos de alta calidad y valor añadido, con menores inversiones de capital, ahorro energético y disminución de emisiones contaminantes. Dentro de este contexto, la tecnología de colada continua por solidificación rápida mediante dos cilindros, se presenta como una de las más interesantes a investigar. En el presente trabajo se realiza una descripción general del proceso de colada continua mediante solidificación rápida así como de sus diferentes etapas; alimentación del sistema y colada, proceso solidificación, etapa de laminación en caliente etc. Se describe, asimismo, mediante modelos matemáticos y físicos, la influencia que, sobre la microestructura, textura, calidad superficial y propiedades mecánicas de los materiales, ejercen los parámetros del proceso de fabricación, con especial mención a la influencia de la rugosidad de los cilindros de colada conformación en el proceso de solidificación. La fabricación de aceros al carbono, inoxidables y chapa magnética puede alcanzarse con inversiones específicas de capital, consumo energético y emisión de agentes contaminantes muy inferiores a los procesos convencionales. Teniendo en consideración todo esto es posible afirmar que este nuevo proceso siderúrgico está llamado a desempeñar un papel importante dentro de los procesos siderúrgicos del siglo XXI.

Palabras clave

Fabricación del acero; Colada continua; Solidificación rápida; Aceros al carbono; Inoxidables y eléctricos.

Review of the continuous casting of steel by strip casting technology. Twin roll method system

Abstract

In order to compete in the future steel market and to maintain market share, the steelmakers will need to use new efficient technologies capable of supplying steel strip products of high quality at low cost. In this way, the strip casting technology by twin roll method is one of the most important research area in the iron and steel industry today. This review makes a general description of the strip casting technology as well as its different steps, such as; metal delivery and casting, solidification process, hot rolling reduction step, etc... Through mathematical and physical models, the influence on microstructure, texture, surface quality and mechanical properties of the materials obtained by this method are described as a function of processing parameters, specially the roughness of the rolls. The manufacturing of carbon, stainless and electrical steels involves smaller capital and operating cost, lower gas emissions, and an opportunity to create new grades due to a faster solidification rate that leads to a different solidification structures. In sight of all this it is likely that Strip Casting technology will make a profound impact on the manufacturing landscape of the 21st century.

Keywords

Steelmaking; Continuous casting; Micromills; Strip casting technology; Carbon stainless and electrical steels.

1. INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica mundial está siendo sometida, en los últimos años, a una transformación radical, proceso éste que ha de verse acrecentado en las próximas décadas^[1-5]. En efecto, el proceso de globalización, que está dando lugar a un mercado más competitivo, con mayores exigencias de calidad y

en constante evolución tecnológica, la competencia de otros materiales como los plásticos, cerámicos y composites, así como la obligación de disminuir el consumo energético y las emisiones contaminantes, derivado esto último del protocolo de Kyoto, han hecho desaparecer las reglas convencionales ó clásicas de competitividad y de mercado que eran costumbre.

(*) Trabajo recibido el día 18 de septiembre de 2007 y aceptado en su forma final el día 12 de mayo de 2008.

* Dto. Física Aplicada I, EUP-(U.P.V.) , C/ Javier Barcaiztegui 21 - 5.B, 20010 - San Sebastián, Spain. e-mail: labuigss@telefonica.net.

Por ello, recientemente, la industria del acero más desarrollada está modificando parcial y progresivamente sus sistemas de producción, transformando las instalaciones propias de una siderurgia integral convencional a nuevas instalaciones con productividades más altas y con menores costes de inversión explotación y mantenimiento, menor consumo energético y disminución en la emisión de agentes contaminantes, mediante la aplicación de las nuevas tecnologías a la industria siderúrgica.

En este contexto, el proceso de tecnología de colada continua mediante solidificación rápida con dos cilindros de colada conformación, Strip Casting Technology (SCT), del que nos ocuparemos en el presente trabajo, puede estar llamado a jugar un papel esencial dentro de este nuevo horizonte que se abre ante la industria siderúrgica.

Para encontrar el origen de este proceso es necesario remontarse al siglo XIX, siendo Bessemer^[6] quien inició los primeros intentos para lograrlo en 1857.

Posteriormente, la introducción de la colada continua convencional (1952), la maduración y desarrollo de esta tecnología convencional^[7 y 8], la crisis en el sector siderúrgico en la década de los setenta, el incremento en la producción de acero inoxidable, así como el desarrollo de las *minimills* (CSP, ISP)^[9-14], deben ser tenidos en consideración como sucesos precursores de los recientes intentos para poner en marcha esta tecnología mediante intensos programas de investigación y desarrollo, considerándose, desde todos los puntos de vista, como una tecnología siderúrgica emergente^[15-21] que, debidamente combinada con otras tecnologías de fabricación de acero en cabecera, puede dar lugar bien a lo que se ha venido en denominar *micromills* ó a un nuevo concepto de siderurgia integral mucho más moderno y versátil.

En dicho proceso^[22-28], un esquema del cual puede verse en la figura 1^[29], el metal líquido es introducido en un molde ó vertedero constituido por unos cierres laterales y un par de cilindros refrigerados girando a altas revoluciones. De esta forma, el material solidifica de forma rápida y en espesor bajo (1-5mm), siendo necesarios, por tanto, sólo unos pocos segundos para convertir el acero líquido en una banda cuyas dimensiones son similares a las de la banda laminada en caliente. En este supuesto, todos los procesos intermedios de tratamiento térmico y de recalentamiento del acero quedan suprimidos, reduciéndose el proceso de laminación en caliente a una sola pasada en continuo en la misma línea de producción, todo lo cual conlleva una enorme simplificación del proceso productivo.

Por todo ello, la tecnología de solidificación mediante colada continua por enfriamiento rápido constituye, actualmente, un concepto completamente

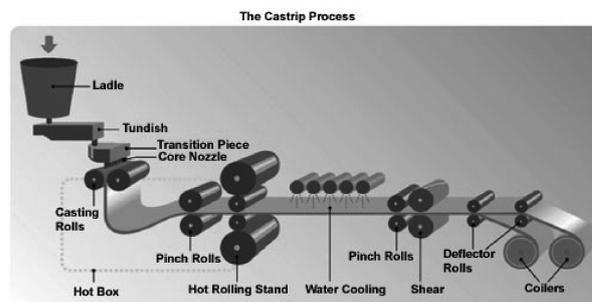


Figura 1. Esquema completo de una instalación de colada continua mediante solidificación rápida.(Castrip" Process)^[29].

Figure 1. General view of the Strip Casting Technology mill (Castrip" Process)^[29].

nuevo y la más reciente innovación dentro del campo de la colada continua, pudiendo obtenerse, mediante este procedimiento, una drástica reducción en inversión de capital, costes de explotación y mantenimiento, espacio de implantación requerido, ahorro de energía y emisión de agentes contaminantes, todo ello, junto a una disminución en el tiempo de respuesta a las demandas de los clientes y la consiguiente disminución en los *stocks* intermedios.

Si a ello añadimos la posibilidad de obtener distintos grados de acero partiendo de la misma composición química, como función de los distintos ratios de enfriamiento, veremos la importancia de estudiar este nuevo proceso siderúrgico. Todo lo cual, constituye el objetivo del presente trabajo de revisión.

2. ESTUDIO DE LAS DISTINTAS ETAPAS DEL PROCESO SIDERÚRGICO DE COLADA CONTINUA MEDIANTE SOLIDIFICACIÓN RÁPIDA

2.1. Descripción general de la instalación

El procedimiento de colada continua mediante solidificación rápida es completamente diferente tanto a los procesos de colada continua convencional como a los de colada de *slabs* de bajo espesor.

En este procedimiento, el acero es colado desde la cuchara a la artesa, seguidamente el acero líquido es introducido, a través de una buza, en el molde ó vertedero de colada.

Este molde, representado en la figura 2 a) y b)^[30 y 31] y cuyo papel es decisivo en el proceso, está formado por dos rodillos, cerrados lateralmente mediante dos superficies planas de material cerámico, que ejercen

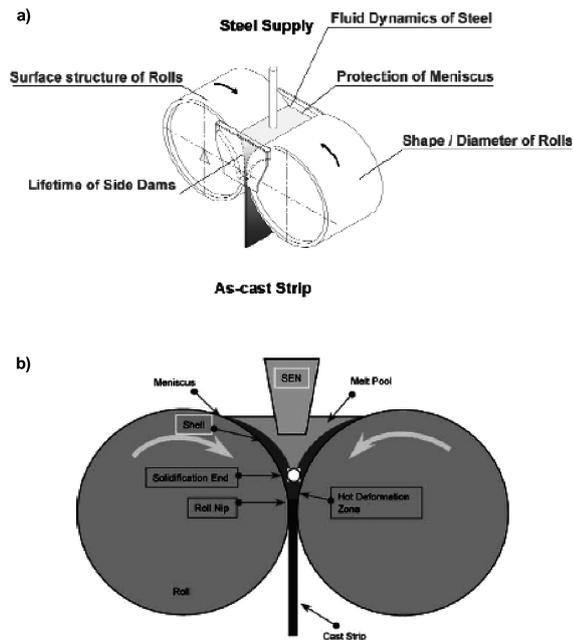


Figura 2. Representación esquemática del molde ó vertedero de colada: Cilindros, cierre lateral y alimentación del molde^[30 y 31].

Figure 2. Schematic representation of the twin-roll strip casting process : Rolls, side dams of the mould and steel supply^[30 and 31].

una presión sobre las superficies laterales de dichos cilindros mediante un sistema hidráulico, conformando de esta manera el molde ó recipiente del que venimos hablando.

Especial atención merece, tanto la composición química de los cerramientos laterales del molde ó vertedero de colada como la presión de apriete ejercidas sobre los mismos, por su incidencia directa en la calidad de la banda en el transcurso de los ulteriores proceso de colada y solidificación.

En ciertos trabajos^[32 y 33] puede verse un estudio completo sobre los sistemas de cierre lateral del molde, en los cuales se incluyen los diversos tipos de refractarios para las distintas zonas del mismo, aquellas que están en contacto con el metal en estado líquido, con los cilindros de colada conformación y con el material parcialmente solidificado.

Asimismo, en dichos trabajos, se efectúa un estudio completo sobre la distribución de temperaturas, desgaste del refractario por fenómenos de abrasión termomecánica etc. De esta forma, es posible lograr una productividad adecuada en el proceso, disminuyendo las interrupciones al objeto de cambiar el refractario y evitando, por otra parte, el sobreenfriamiento en esa zona, así como cualquier posible filtración del líquido entre los cilindros de colada conformación y el sistema de cierre.

La solidificación comienza en lo que se denomina la zona del menisco (Fig. 2 b))^[30 y 31], donde comienzan a formarse dos superficies sólidas en contacto con los rodillos, refrigerados interiormente, que giran de forma síncrona a altas revoluciones y que actúan como sumideros de calor. Por otra parte, el final de la solidificación debe producirse, aproximadamente, a la altura del eje de alineamiento de los rodillos, donde el espesor de la banda es mínimo, al objeto de evitar posibles problemas de calidad en la misma y de los cuales se tratará, posteriormente, con más detalle.

Si el proceso discurre con normalidad, la banda abandona los cilindros de colada conformación a muy alta temperatura moviéndose verticalmente hacia abajo, al mismo tiempo que se modifica gradualmente su curvatura hasta colocarla en posición horizontal. Posteriormente, la banda es sometida a una pasada de reducción en caliente comprendida entre un 20-40 %. A continuación, el material es enfriado y seguidamente bobinado.

De todo lo que antecede, se deduce que este proceso presenta una extraordinaria complejidad ya que coexisten simultáneamente procesos termodinámicos, fluidodinámicos y de transmisión de calor, que tienen lugar de forma simultánea con el proceso mecánico de conformado.

2.2. Etapa de alimentación

Esta fase del proceso es una de las más importantes y la que presenta mayores dificultades técnicas para su realización, ya que el flujo de la vena líquida debe ser distribuido, uniformemente, dentro de la zona de alimentación, a una velocidad suficiente y sincronizada con el proceso de colada.

Si a ello se añade la necesidad de reducir la turbulencia e intentar obtener un flujo estacionario lo más uniforme posible al objeto de dar estabilidad al sistema, especialmente en lo que se refiere a la altura del baño en la zona del menisco^[34-36], confirmaremos que este proceso es extraordinariamente delicado y complejo.

En esta fase del proceso y con base en este planteamiento, merece especial atención, dada su relevancia, el diseño y dimensiones del orificio de colada, así como su composición química por la incidencia que, ésta, tiene en la calidad superficial de la banda^[37] a través de su posible interacción con el baño líquido.

Por lo que respecta a éste orificio de colada, se puede afirmar que, entre los distintos dispositivos de alimentación existentes actualmente, el consistente en un tipo de orificio de colada inmerso en el baño es la solución preferida. De ésta manera es posible orientar el flujo de la vena líquida a las regiones más críticas

de la zona de alimentación, especialmente la zona del menisco, aspecto, éste, estrechamente relacionado con el ancho, forma y homogeneidad en el espesor de la banda, así como con el tipo de flujo, turbulencias y estabilidad del proceso en su conjunto.

En determinados trabajos^[38-41] se realiza un estudio fluidodinámico y energético al objeto de comparar los diferentes sistemas de alimentación en este nuevo proceso. El proceso de simulación se ha realizado, primeramente, mediante modelización y, posteriormente, en una planta piloto.

Para realizar este estudio se ha considerado, en primer término, un flujo del fluido tridimensional y turbulento; así mismo, se han tenido en cuenta los procesos de transmisión de calor teniendo en consideración los procesos de solidificación. Un análisis completo de los supuestos y condiciones bajo los cuales se ha desarrollado este modelo, así como sus limitaciones, puede verse en los trabajos anteriormente mencionados.

En dichos trabajos se han ensayado y estudiado dos formas distintas de alimentación del molde o vertedero. La primera de ellas consiste en una alimentación clásica, con un dispositivo de buza cuyas toberas están dispuestas en sentido horizontal y, en el cual, el flujo de material inyectado se mueve, primero, hacia los cierres laterales del molde o vertedero de colada (*side dam*) y, posteriormente, hacia el centro y en dirección hacia los rodillos de colada. El otro dispositivo consiste en una buza de toberas ranuradas con alimentación vertical, en el cual, el flujo es prácticamente bidimensional con velocidades prácticamente despreciables en la dirección longitudinal de los rodillos o cilindros de colada conformación.

En las figuras 3 a) y b)^[38] puede verse, de conformidad al modelo desarrollado por estos autores, los perfiles de velocidades y flujos del fluido, dentro del molde o vertedero de colada, para ambos tipos de toberas.

En otro trabajo^[42], pueden verse, de forma detallada, las condiciones para que se produzca, a nivel industrial, una adecuada alimentación del sistema, teniendo en cuenta todas las variables que intervienen en dicho proceso así como su interrelación y optimización.

2.3. Etapa de colada

Si consideramos el proceso de colada continua convencional^[43], el acero líquido, una vez dentro del molde, solidifica mediante enfriamiento por contacto con las paredes del mismo, normalmente de cobre y refrigeradas interiormente por agua, formando una capa ó corteza sólida. Al mismo tiempo, el molde oscila verticalmente con el objetivo de evitar, en lo posible, el pegado o adherencia de la corteza externa solidifica-

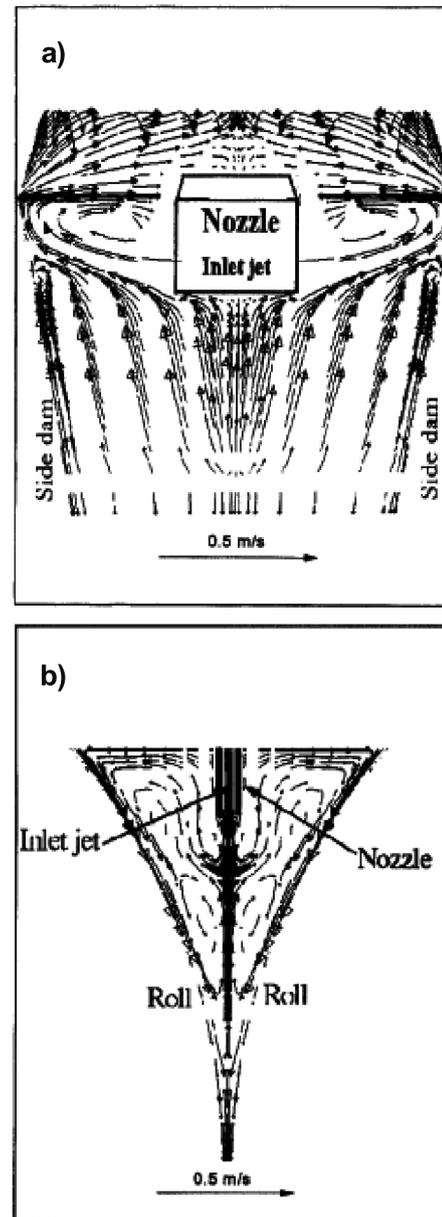


Figura 3. Perfil de velocidades en la instalación con dos cilindros: (a) Tobera tubular; (b) Tobera ranurada. Espesor de la banda 4mm, velocidad tangencial en la superficie de los cilindros 11m/minuto^[38].

Figure 3. Velocity profile for the twin-roll caster: (a) With a tubular nozzle; (b) Slot nozzle. Strip thickness 4mm, roll speed 11m/minute^[38].

da con las paredes del molde, empleándose a este fin lubricantes en la zona del menisco.

Por el contrario, el proceso de colada continua mediante solidificación rápida representa un cambio tecnológico completo (Fig. 4)^[39], con respecto a las coladas continuas convencionales e incluso a las de *slabs* de bajo espesor^[44 y 45].

En primer término, debe señalarse que el proceso de solidificación es completamente distinto. Este, se produce mediante un contacto directo entre el metal fundido y la superficie de los cilindros, que se mueven a la misma velocidad que el material que esta solidificándose, minimizándose de esta forma el rozamiento entre ambas superficies, lo que hace innecesario el empleo de lubricantes, aunque obliga a cuidar, en grado sumo, la rugosidad superficial de dichos cilindros como posteriormente se verá.

Dado que no existe ninguna lubricación, se produce un contacto mucho más eficaz en la interfase sólido-líquido; como consecuencia de todo ello, los procesos de transmisión de calor son enormemente superiores ($8-15 \text{ Mw/m}^2$) [20] a aquellos que se producen en las coladas convencionales, dando como resultado tiempos de colada muy inferiores (100-200 ms) al proceso siderúrgico convencional.

En efecto, este nuevo proceso siderúrgico viene condicionado en muchos aspectos, como se irá viendo en el presente trabajo, por la tecnología empleada en la fabricación y diseño de los cilindros de colada conformación, así como por las condiciones de trabajo de los mismos, ya que son determinantes tanto para la homogeneidad, continuidad y productividad del proceso como para la calidad superficial de la banda; en definitiva, para la viabilidad técnica y económica del proceso en sí mismo.

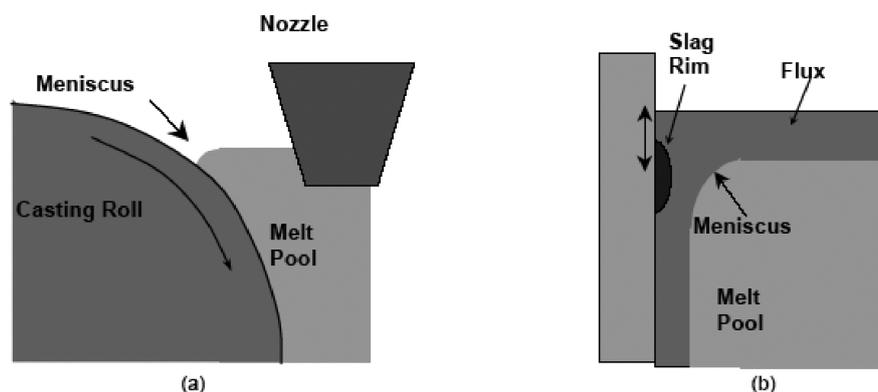
La importancia de estos cilindros en la buena marcha de la instalación se hace evidente a lo largo del proceso ya que, cuando se consideran de forma global y simultánea los procesos de alimentación y colada [46], se deduce que la ecuación de la continuidad presenta una gran cantidad de variables referidas a

dichos cilindros, tales como el radio, longitud y velocidad de rotación de los cilindros de colada, la separación de dichos cilindros en el punto de alineamiento de los ejes, así como la variación en el tiempo de la separación de dichos cilindros, que será función de la presión de apriete ejercida sobre los mismos.

Independientemente de lo anterior, también deben considerarse variables tales como; composición química del material a colar [47], forma y dimensiones del molde, tipo de buza de alimentación, velocidad y temperatura de colada [48], así como la altura del metal líquido en el molde o vertedero de colada (presión ferrostática) y variación en el tiempo de dicha altura.

Volviendo a la incidencia que estos rodillos ejercen en el proceso de colada, ya se ha señalado que, en este proceso, el acero en estado líquido fluye a través del espacio comprendido entre los cilindros de colada conformación, solidificándose en contacto con la superficie de los mismos, estando todo ello condicionado a la forma y presión de apriete de dichos cilindros [49].

Si la presión de apriete no es suficiente, el proceso de solidificación no termina en el punto de alineamiento de los ejes de los cilindros y, como consecuencia de ello, la solidificación se retrasa, pudiendo producirse, por dicha razón, bien roturas en la superficie debido a la presión ferrostática o, incluso, en el caso límite, el derrame de la vena líquida con una dispersión en forma de cono de eyección a la salida de los cilindros de colada conformación. Por el contrario, si la presión de apriete de los cilindros de colada conformación resulta excesiva se puede producir una excesiva deformación de la banda, con la consiguiente aparición de defectos en la superficie de la



Las flechas indican flujos entrantes de calor por convección desde el baño líquido a la corona solidificada y flujos disipativos de calor, donde concurren los procesos de transmisión de calor por conducción: corona-cresta de rugosidad y convección, radiación: cresta de rugosidad - gas circundante.

Figura 4. Representación de los sistemas de colada: a) Colada mediante dos cilindros b) Colada de slabs [38].

Figure 4. Schematic representation of moulds: a) Twin roll strip casting b) Slab casting [38].

misma. En la uno de los trabajos referenciados^[20] puede verse un esquema completo de las distintas posibilidades aquí expuestas.

Asimismo, es preciso señalar que la mayor parte de los defectos e imperfecciones en la banda obtenida mediante este proceso, tienen su origen en estas etapas de alimentación y colada^[50-52]. En efecto, defectos tales como agrietamiento en superficie y bordes de la banda, escorias adheridas, reoxidación del metal^[53] y solidificación prematura están relacionados con la distribución no uniforme del flujo de alimentación, nivel y temperatura del acero líquido en el molde, rugosidad y limpieza de los cilindros de colada conformación, protección frente a la oxidación de la banda mediante gas inerte, etc., pudiendo encontrarse en los trabajos citados un estudio completo de todo ello.

2.4. Etapa de solidificación y conformación de la banda

2.4.1. Transmisión de calor. Modelos matemáticos

A la vista de lo señalado anteriormente, especialmente en lo que hace referencia al proceso de alimentación, se hace evidente y así ha quedado demostrado experimentalmente, que el proceso de solidificación viene condicionado de forma directa por las direcciones de flujo y campos de velocidades que se desarrollan en el interior del molde ó vertedero de colada.

Con base en ello, se puede afirmar que, en el proceso de colada continua mediante solidificación rápida, los fenómenos de transmisión de calor y transporte de materia a través de la interfase existente entre los cilindros de colada y la capa de metal solidificado, en primer término, así como entre ésta y el baño fundido, constituyen un problema no lineal. En efecto, en este segundo caso, capa solidificada - metal fundido, la posición de la interfase no es conocida "a priori" ni tampoco está fija en el espacio, lo cual confiere a este estudio una complejidad extraordinaria.

Por ello, al objeto de poder simplificar la resolución del problema, T. Saitoh *et al.*^[54], basándose en un modelo previo^[55], han desarrollado un modelo bi-dimensional, en régimen estacionario, para el campo de velocidades y perfil de temperaturas, considerando, en todo momento, una interfase sólido-líquido fija y para cuya resolución se han empleado las ecuaciones generales del movimiento del fluido así como las ecuaciones correspondientes a la transmisión de calor.

Más recientemente, diversos autores^[56-61] han desarrollado distintos modelos, físicos y matemáticos, en los cuales se determina y resuelve el sistema de ecuaciones que representa el campo de velocidades en el

fluido, analizando, simultáneamente, la variación de temperaturas que se produce en la fase sólida así como el propio proceso de solidificación, empleando para ello sistemas de análisis por elementos finitos^[62].

Finalmente, puede encontrarse, en diversos trabajos^[63-65], un estudio sobre la transmisión de calor en el transcurso del proceso de solidificación, en el régimen transitorio al inicio del proceso, durante la etapa de alimentación.

En otros trabajos^[66 y 67], puede verse una revisión completa de los distintos modelos matemáticos desarrollados.

Sin embargo, actualmente, se puede considerar que los modelos puramente matemáticos no simulan de forma completa los procesos de transferencia térmica y solidificación que tienen lugar durante el proceso de colada continua mediante solidificación rápida, ya que dicho proceso se inicia en puntos discretos ó discontinuos de la superficie de los cilindros de colada debiendo, por tanto, tenerse en consideración aspectos tales como el tipo de superficie y, muy especialmente, la rugosidad de la misma. De todo lo cual se ocupa el siguiente apartado.

2.4.2. Incidencia de los cilindros de colada conformación en los procesos de transmisión de calor, solidificación y calidad de la banda

2.4.2.1. Rugosidad de los cilindros de colada conformación

Antes que nada, es necesario señalar la enorme importancia que, en la calidad de la banda, viabilidad y productividad del proceso, tienen los procesos de transmisión de calor y consecuente solidificación del material.

En efecto, en los trabajos mencionados^[66 y 67] así como en algún otro^[68] se estudian, de forma global, los procesos de transmisión de calor y solidificación, teniendo en cuenta las numerosas variables que intervienen en el mismo, y que ya se ha señalado, previamente, en el apartado correspondiente a la etapa de colada.

Ahora bien, concretamente, en lo que a los cilindros de colada conformación se refiere, su incidencia, en el proceso de solidificación, es decisiva a través de diversos parámetros tales como material empleado en la construcción de los cilindros de colada conformación, tipo de recubrimiento aplicado sobre los mismos y, muy especialmente, la rugosidad de dicho recubrimiento^[20, 37 y 51], procesos de dilatación en los cilindros debidos al choque térmico cíclico de alta

frecuencia que se produce como consecuencia de las altas velocidades angulares, formación de bolsas de gas debido a la rugosidad de los cilindros, etc.

Ya, algunos trabajos previos^[69 y 70] estudiaron un aspecto muy importante de este proceso, cual es la influencia de la microgeometría de la superficie de los cilindros de colada sobre la superficie de la banda obtenida mediante solidificación rápida, denominando a esto transferencia de rugosidad.

Lo interesante, realmente, es la interpretación de este fenómeno, en el cual se basa el posterior modelo de solidificación que se desarrollará seguidamente. Con base en dicho modelo, si consideramos la primera etapa del proceso de solidificación, los núcleos de la misma aparecen en un principio en la superficie de las crestas o picos de rugosidad de los cilindros de colada conformación. Se hace posible, por tanto, correlacionar la rugosidad media con el número de núcleos de solidificación (ρ) por unidad de área observados, parámetro, éste último, relacionado, a su vez, con el coeficiente global de transmisión de calor^[47].

2.4.2.2. Modelo de solidificación basado en la rugosidad de los cilindros de colada conformación

Posteriores estudios realizados tanto a nivel de laboratorio^[71] como en plantas piloto e industriales^[72 y 73] han desarrollado un modelo en el que se ofrece un tratamiento global del proceso de transmisión de calor, juntamente con las deformaciones de la capa solidificada y su separación de los cilindros de colada, con el subsiguiente progreso del frente de solidificación hacia el interior.

Para ello, se crean unas unidades de solidificación y crecimiento que denominaremos coronas, constituidas por los núcleos de material, discretos ó discontinuos, que han solidificado, en primer término, sobre los picos ó crestas de rugosidad de los cilindros de colada y cuyo esquema de transmisión de calor puede verse en la figura 5^[72]. Dicho esquema incluye flujos entrantes de calor por convección desde el baño líquido a la corona solidificada, así como flujos disipativos de calor, en los que concurren procesos de transmisión de calor por conducción: corona – cresta de rugosidad – cilindro y convección – radiación combinadas: cresta de rugosidad – gas circundante.

Seguidamente, tiene lugar la combinación ó unión de los núcleos de solidificación ó coronas. En este proceso, las coronas van creciendo, dando lugar a la formación de estructuras dendríticas^[74], hasta entrar en contacto unas con otras, dando lugar a la formación de lentes u obleas.

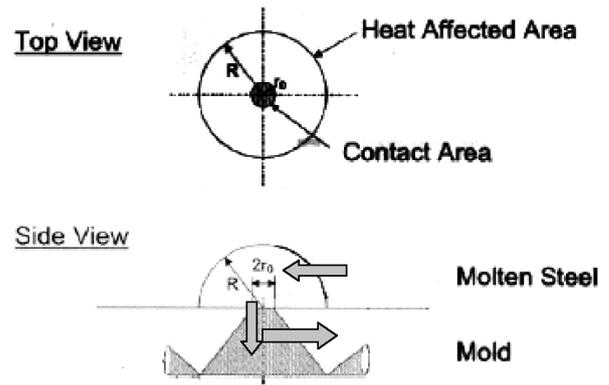


Figura 5. Diagrama del área de contacto y proceso de transmisión de calor durante el proceso de solidificación en el sistema de colada continua mediante solidificación rápida^[72].

Figure 5. Diagram of contact area and heat-affected zone size for solidification against a pyramid-like surface^[72].

En la tercera y última etapa del proceso, el espesor de la capa solidificada se incrementa. Sin embargo, al mismo tiempo, la contracción del material, inherente al proceso de solidificación, juntamente con los momentos dinámicos ejercidos por las fuerzas asociadas al gradiente existente en la presión ferrostática dentro del molde ó vertedero, pueden producir la rotura en los puntos de contacto y por tanto comienza la separación de la película solidificada de los cilindros de colada conformación, tal como puede verse en la figura 6^[72].

2.4.2.3. Calidad superficial de la banda. Procesos de agrietamiento

El proceso de obtención de diversos tipos de acero por el procedimiento de colada continua mediante solidificación rápida presenta las ventajas en el proceso siderúrgico que ya he señalado anteriormente. En contrapartida, se hace absolutamente necesario, especialmente en el caso de los aceros inoxidables, mejorar la calidad de la superficie de la chapa, producida por este procedimiento, para alcanzar los estándares de calidad obtenidos en el proceso de colada continua convencional.

Entre los problemas de calidad superficial más importantes nos encontramos con las grietas en la superficie de la banda ya que pueden deteriorar de forma notable la capacidad de conformación del material así como su resistencia a la corrosión.

Ya, en los estudios previos^[75-77], se demuestra que este fenómeno de agrietamiento está estrechamente

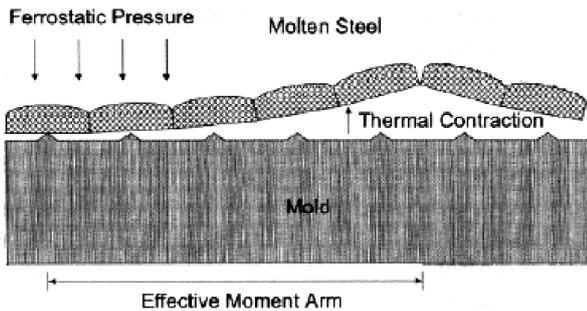


Figura 6. Etapa de separación de las lentes u obleas desde la superficie de los cilindros de colada, de conformidad al modelo de solidificación (SBS)^[72].

Figure 6. Floating stage solidification according to Solidifying shell behaviour simulation system (SBS), where lenses separate from the substrate^[72].

relacionado con la solidificación no homogénea producida durante el proceso de colada continua mediante solidificación rápida, el cual da lugar a concavidades ó depresiones (*tortoise-shell-shaped depressions*) no deseadas en la superficie del material.

De conformidad al modelo de solidificación, coronas-obleas, anteriormente propuesto, estas depresiones ó concavidades y, consecuentemente, el proceso de agrietamiento (Fig. 7) ^[78], son inherentes al proceso de colada continua mediante solidificación rápida, debido básicamente a:

- Rugosidad de los cilindros de colada que conlleva la formación de una película gaseosa entre los cilindros de colada y la superficie de la banda. Un estudio muy detallado de la incidencia de ambas variables, rugosidad y tipo de atmósfera, en el proceso de formación de grietas puede verse en el trabajo de Choo *et al.*^[78].
- Variaciones en el espesor de la primera corteza solidificada debida a la formación, en el transcurso del proceso de solidificación, de capas aislantes de óxidos que dificultan el proceso de transmisión de calor.

Un estudio más detallado de estas capas de óxidos^[79], tanto desde el punto de vista químico como desde el morfológico, nos indica que los mismos están formados, básicamente, por óxidos ricos en manganeso y, en mucha menor proporción, por óxidos de cromo y de silicio.

Como se acaba de mencionar, estos óxidos de manganeso actúan en la superficie de los rodillos como una resistencia térmica entre el baño fundido y los cilindros de colada. Esto da lugar a un retraso en la solidificación de la banda, lo cual conlleva, además, una falta de homogeneidad en la solidificación de la misma. Produciéndose lo que he venido en denomi-

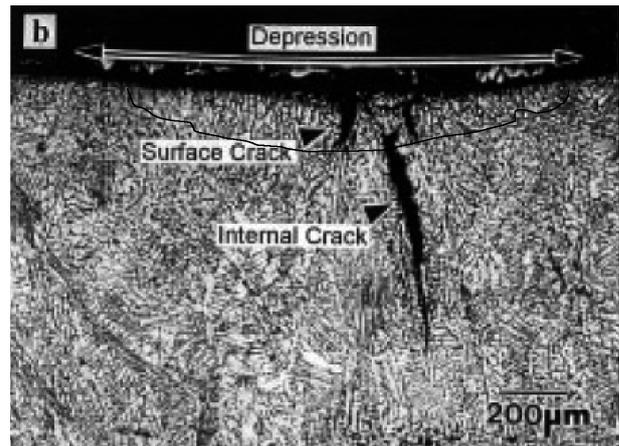


Figura 7. Micrografía en la que puede observarse la concavidad superficial y la grieta interna asociada a la misma^[78].

Figure 7. Optical micrograph showing surface and internal crack and depression^[78].

nar zonas de depresión, siendo estas áreas unas zonas de concentración de tensiones que pueden dar lugar a la formación de grietas en el material.

2.4.3. Proceso de desgaste y deformación de los cilindros

Como ya se ha ido mostrando, los cilindros de colada conformación son componentes esenciales en el proceso de colada continua mediante solidificación rápida, ya que determinan, no solamente la calidad final del producto como se acaba de ver, sino que inciden directamente en el coste de explotación del proceso, ya que éste está condicionado a un proceso en continuo, con el mínimo de paradas necesarias para cambiar los cilindros de colada conformación.

Este proceso de cambio es debido, en primer término, a la erosión^[73 y 80] que produce sobre los mismos el material en los primeros instantes de la solidificación, ya que la separación de las coronas-obleas de los picos ó crestas de rugosidad de los cilindros puede producir un proceso de arrastre de material del cilindro, lo cual da lugar a una erosión del mismo y consiguiente modificación en su rugosidad.

Asimismo, es necesario tener en consideración, tanto en la vida media del cilindro como en su diseño, las deformaciones elasto-plásticas asociadas a las tensiones producidas por el choque térmico cíclico de alta frecuencia, así como el tipo y espesor de su recubrimiento^[81-85].

Todo lo cual, hace que el perfil y rugosidad del cilindro no sean estáticos sino que varíen en función de

la marcha del proceso, convirtiendo la regulación del perfil de la banda a lo largo del proceso en uno de los aspectos más difíciles de controlar en este nuevo proceso siderúrgico.

2.4.4. Proceso de conformación y deformación de la banda

En el proceso de colada continua mediante solidificación rápida, las dimensiones de la banda deben ser controladas dentro de un margen de tolerancias muy estrecho, de forma que las bobinas así obtenidas puedan ser utilizadas directamente ó procesadas sin problemas, en operaciones posteriores tales como laminado en frío, etc.

Por otra parte, tanto el perfil como la uniformidad y tolerancias en las dimensiones geométricas de la banda vienen determinadas por numerosos factores, tales como dimensiones y geometría del molde ó vertedero de colada, diámetro y longitud de los cilindros de colada, presión de apriete sobre dichos cilindros, etc.^[86], pero, fundamentalmente, por el perfil y geometría de los cilindros de colada, la cual depende, a su vez, del estado de tensiones-deformaciones, tanto de origen mecánico como térmico^[87 y 88], vistas en el apartado anterior.

Así, las coladas realizadas con rodillos planos conducen, generalmente, a una chapa con perfil cóncavo, en la cual el espesor en la parte central de la banda es inferior al de los bordes. Esta diferencia en espesores es debida a la contracción en volumen que experimenta la banda al solidificarse en ella el acero líquido existente en el interior. Por ello, los rodillos de colada deben tener una ligera flecha a fin de compensar este defecto que estamos mencionando. Una explicación completa a todo esto puede verse en el trabajo anteriormente mencionado^[87].

Cuando estas tensiones sobrepasan un determinado valor crítico y alcanzan la zona de deformación plástica se producirán deformaciones, dando lugar a ondulaciones en la banda, bien en la zona central o en la zona de bordes, lo que debe evitarse, a toda costa, ya que constituye uno de los mayores problemas técnicos para la fabricación de la banda por el procedimiento de colada continua mediante solidificación rápida.

2.5. Etapa de laminación en caliente y bobinado

En los apartados anteriores se han visto la deformación en los cilindros de colada conformación y su influencia en la configuración geométrica final de la banda.

Al objeto de rectificar la geometría de la banda se instala, normalmente, una sola etapa de laminación

en caliente previa al proceso de bobinado, cuya finalidad es alcanzar tolerancias geométricas equiparables a aquellas obtenidas en los procesos convencionales que incluyen el proceso de laminación en caliente.

Un estudio completo sobre los ratios de reducción, así como las dimensiones finales, especialmente, en lo que hace referencia al espesor, tanto en lo que se refiere a aceros inoxidables grado AISI 304^[30] como en el caso de aceros al carbono^[45], puede verse en los trabajos citados. Un estudio análogo, en el caso de la chapa magnética al silicio, en el que se incluye, además, la evolución tanto de la microestructura como de las características mecánicas en la etapa de laminación en caliente y consiguiente bobinado, puede verse en el trabajo de Zapuskalov *et al.*^[73].

En el libro de M. Ferry^[89] se hace un estudio global y completo de los distintos procesos de colada continua mediante solidificación rápida, especialmente, en lo que se refiere a los aspectos físicos, químicos y metalúrgicos, así como a los procesos termodinámicos y de transmisión del calor.

Para finalizar, al concluir este apartado dedicado al estudio del proceso siderúrgico, es necesario remarcar que el proceso, globalmente considerado, es de una complejidad extraordinaria, dado el gran número de variables y parámetros empleados, la correlación entre los mismos y su incidencia en la calidad final de la banda obtenida. Todo lo cual presenta nuevos retos que requieren de soluciones tecnológicas muy avanzadas, que conllevan la introducción de las nuevas tecnologías, especialmente, de control y automatización, sin las cuales hubiese sido absolutamente imposible el desarrollo de este nuevo proceso. Aunque ello excede del ámbito del presente trabajo, se referencian^[46 y 90-95] algunos trabajos representativos sobre este aspecto del proceso.

3. DESARROLLO DEL PROCESO A NIVEL INDUSTRIAL

Ya se han señalado, en la introducción al presente trabajo, los motivos por los cuales resulta extremadamente interesante, desde el punto de vista económico, el desarrollo de esta nueva tecnología. En diversos trabajos^[96-102] puede verse, desde sus orígenes, una revisión muy completa sobre la evolución histórica en I+D de esta nueva tecnología en los diferentes países y el consiguiente desarrollo de plantas piloto, así como las empresas o grupos de empresas y centros de investigación^[103-105] de los diversos países involucrados en su desarrollo.

En la actualidad, tras el abandono y fusión de diversas empresas, se puede considerar que el desarrollo de

este nuevo proceso está siendo llevado a cabo por los grupos siguientes:

- Grupo Castrip: El consorcio Castrip nació como una colaboración entre las compañías Broken Hill Property Ltd. (BHP) y Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI) ^[106 y 107]. Este proyecto se denominó proyecto M ^[37]. En el año 2000, la empresa Nucor Steel Co. se unió a este proyecto ^[108]. Desde entonces, el objetivo primordial de esta instalación en ha sido la producción de bandas de acero de bajo contenido en carbono, con espesores menores de 1,4 mm y anchos de 1.345 mm.

Una descripción más completa sobre las distintas etapas de la instalación ^[29 y 109-111], expectativas de este nuevo proceso siderúrgico ^[112], especificaciones técnicas ^[86], evolución de la producción, secuencia continua de las operaciones de colada de la cual depende la productividad del proceso y por ello la viabilidad económica del mismo ^[45], ahorro en costes de inversión y explotación ^[28 y 113], así como de los anchos y espesores obtenidos por Nucor en su planta de Estados Unidos, pueden verse en diversos trabajos ^[114-117] que aquí se citan.

Asimismo, se está considerando la expansión de esta tecnología. En este sentido, Nucor está explorando la posibilidad de construir una segunda planta ^[118] y ha firmado también acuerdos con el grupo Danielli ^[119] para el empleo de la patente.

- Grupo Eurostrip; Este grupo está formado actualmente por tres socios; Aceralia-Mittal, Thyssenkrupp – Nirosta (TKN) y VAI (Voest Alpine Industrieanlagenbau) que ya estaban desarrollando esta tecnología por separado. Este consorcio opera en dos plantas. La primera de ellas instalada en Krefeld ^[23 y 120] se ha especializado, principalmente, en la fabricación de aceros inoxidables austeníticos, grado AISI 304, en bobinas de 1.450 mm de ancho y espesores comprendidos entre 1,5-4,5 mm. Una segunda planta, más pequeña, está situada en Italia ^[31] y su misión fundamental es producir bandas en caliente de bajo contenido en carbono en anchos de 1.130-1.350 mm. Una descripción más completa sobre las distintas etapas de la instalación, expectativas de este nuevo proceso siderúrgico, especificaciones técnicas, etc., puede verse en algunos de los trabajos ^[42 y 121-124] aquí referenciados.
- Grupo Japones; En 1985 el grupo japonés Nippon Steel se asoció con Mitsubishi Heavy Industries (MIH) para poner en marcha una planta de colada continua mediante solidificación rápida

para la fabricación de aceros inoxidables austeníticos en un ancho de 760-1.330 mm, con espesores comprendidos en el rango de 2,0-5,0 mm y capacidad de 60 Tm por colada ^[125-128].

- Grupo Coreano; La multinacional coreana Posco ^[129] juntamente con el Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST) ^[103] han investigado y desarrollado equipos industriales de colada continua mediante solidificación rápida, habiéndose producido aceros inoxidables de la gama AISI 304, aceros de bajo contenido en carbono y chapa de acero eléctrico al silicio ^[50, 51 y 130-132].
- Finalmente, en lo que respecta a China, la mayor compañía china para la producción de acero, Shanghai Baosteel Corp., ha firmado un contrato de colaboración con la universidad Carnegie Mellon ^[133 y 134] al objeto de estudiar la implantación de una planta para la fabricación de material mediante el procedimiento de colada continua mediante solidificación rápida, pudiendo encontrarse ^[135] numerosos trabajos relativos al desarrollo de esta nueva tecnología en China.

Una comparación de los principales procesos aquí señalados, con los parámetros productivos más importantes, puede verse en la tabla I.

4. MATERIALES SUSCEPTIBLES DE SER OBTENIDOS POR ESTE PROCEDIMIENTO

Teniendo en consideración todo lo visto hasta el momento presente sobre este nuevo proceso siderúrgico, es evidente que tanto los aspectos termodinámicos como el proceso de solidificación son completamente distintos a los del proceso convencional. Por tanto, no debe sorprendernos que las propiedades encontradas en los productos obtenidos puedan, en determinadas condiciones, ser diferentes a las obtenidas mediante el proceso convencional.

Seguidamente, se va a exponer, de forma muy resumida, los tipos de acero que se están produciendo actualmente por este procedimiento.

4.1. Aceros inoxidables

Ya, desde los comienzos del desarrollo de la tecnología de colada continua mediante solidificación rápida ^[136 y 137], se empezó a procesar el acero inoxidable austenítico correspondiente al grado AISI 304, debido a que este material se presentaba como el más

Tabla I. Estudio comparativo de los tres principales procesos de colada continua mediante solidificación rápida^[123]

Table I. Comparison of three strip cast producers^[123]

Parámetros del proceso	Hikari	Eurostrip®	Castrip®
Diámetro de los cilindros	1200mm	1.500 mm	500 mm
Peso de la bobina	15-20 Tm	20-35 Tm	25 Tm
Grado de acero	Inoxidable AISI 304	Inoxidable austenítico	Bajo en carbono
Ancho	778-1.330 mm	1.430 mm	2.000 mm (max.)
Espesor	2-5 mm	1,4-4,5 mm	0,7-2,0 mm
Peso/por colada	60 Tm	90 Tm	110 Tm
Velocidad de colada	90 m/min (max.)	15 -150 m/min	80-150 m/min
Producción	420.000 Tm/año	500.000 Tm/año	500.000 Tm/año

adecuado por su alta resistencia y conformabilidad en el rango de temperaturas en el cual tiene lugar el proceso de colada y conformación.

Asimismo, es posible producir, de forma rentable, pequeñas cantidades de acero inoxidable en espesores muy adecuados para su posterior deformación en frío, de acuerdo a las exigencias en espesores finales en el mercado de estos aceros^[23].

En lo que hace referencia a la microestructura obtenida en estos aceros, debe señalarse que, este proceso, en función del ratio de enfriamiento, da lugar a una dispersión más homogénea de precipitados y a una disminución en las microsegregaciones^[138 y 139], así como a un afino en la microestructura^[75 y 140], si lo comparamos con el proceso siderúrgico convencional. Todo lo cual posibilita la obtención de una amplia variedad en las propiedades del producto final partiendo del mismo tipo de composición química en la colada original.

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta es el de la textura, que varía con respecto a los procesos clásicos, ya que se produce un flujo de calor muy alto generándose, como consecuencia de ello, una estructura de granos columnares en las zonas adyacentes a las paredes de solidificación con una débil textura tipo fibra, próxima a la $\{001\}\langle uvw \rangle$ ^[141-143].

El material, una vez laminado en frío, presenta una textura caracterizada en la austenita por estructuras del tipo $\{011\}\langle 211 \rangle$ y $\{011\}\langle 100 \rangle$, mientras que la de la martensita puede caracterizarse por estructuras tipo $\{211\}\langle 011 \rangle$ y $\{111\}\langle 211 \rangle$, bastante similares, en este caso, al material obtenido mediante un proceso convencional.

Resultado de todo ello es que, en el caso de los aceros inoxidables, las propiedades finales de estos materiales, mecánicas R, E, A, Δr ^[30] y químicas^[75], son equiparables a aquellas obtenidas mediante los procedimientos siderúrgicos convencionales, tal como lo demuestran los numerosos ensayos realizados y que se resumen en la tabla II.

Una descripción completa del proceso de fabricación de estos aceros por solidificación rápida: parámetros del proceso productivo, grados obtenidos, propiedades mecánicas, dimensiones finales y aplicaciones, puede verse en los trabajos que se citan, tanto en la planta de Krefeld (Eurostrip)^[42 y 120] como en las Hikari (Nippon Steel)^[76, 77, 126 y 127] y Posco^[50, 51 y 130-132].

4.2. Aceros al carbono

La importancia de este tipo de aceros es evidente si consideramos que la producción total mundial, en lo que se refiere a banda laminada en caliente, representa, aproximadamente, el 40 % de la producción global de acero en el mundo^[144], constituyendo el mayor reto, la obtención de propiedades mecánicas similares a las obtenidas en el proceso convencional.

Para alcanzar este objetivo es necesario estudiar, previamente, la microestructura y textura de este tipo de materiales obtenidos por solidificación rápida, para considerar seguidamente las características mecánicas y aplicaciones de los mismos.

En los trabajos previos^[24, 47 y 145] se hace un detallado estudio de la morfología y evolución de estas microestructuras, las cuales dependen, básicamente, de la densidad de centros de nucleación asociada a la rugosidad de los cilindros de colada conformación y de la velocidad impuesta al proceso de enfriamiento.

La evolución de la microestructura en la banda obtenida mediante colada continua por solidificación rápida^[37] es completamente diferente de aquella obtenida en los procesos convencionales. En este caso, se observa una estructura no homogénea constituida por una mezcla de ferrita poligonal irregular, ferrita acicular y estructura Widmännstätten^[99, 146 y 147], pudiendo obtenerse, en el caso de enfriamientos muy rápidos^[109], estructuras bainíticas e, incluso y bajo determinadas condiciones de composición, martensíticas.

Tabla II. Estudio comparativo de las características mecánicas en el caso de los aceros inoxidables^[30]*Table II. Comparison of mechanical properties of stainless steel strip^[30]*

Acero inoxidable Grado AISI 304	Límite elástico, R_p N/mm ²	Carga de rotura, R_m N/mm ²	Alargamiento, A_{80} %
Eurostrip, bruto de colada, e=3mm	230	530	48-50
Eurostrip, con pasada en caliente del 22 % y recocida	280	610	54
Banda convencional laminada en caliente y recocida	255-330	590-690	47-54

(*) Bruto de colada: tal como se encuentra el material después del proceso de solidificación.

Por otra parte, es conocido que la mayor aplicación industrial de los aceros de bajo contenido en carbono es la estampación y la conformación por embutición profunda ó extraprofunda. Por tanto, el estudio de las texturas obtenidas y la forma de optimizarlas en el proceso de colada continua mediante solidificación rápida es un aspecto muy importante a estudiar y tener en cuenta, al objeto de optimizar las características mecánicas (índices de Lankford r_m , Δr , n)^[148], de este material al final de su proceso siderúrgico.

Los ensayos realizados^[149] sobre el material obtenido mediante solidificación rápida, laminado en frío (80 %) y recocido en continuo, a temperaturas comprendidas entre 771-827 °C, muestran un desarrollo moderado de la textura de fibra γ [$\langle 111 \rangle // ND$] {111} $\langle uvw \rangle$, junto a una componente fuerte de textura de fibra α {hkl} $\langle 110 \rangle$. No obstante, esta textura puede ser mejorada sometiendo al material a un precocido (900 °C, con mantenimiento de 1 h) mediante el cual la textura de fibra γ [$\langle 111 \rangle // ND$] se desarrolla de forma mucho más intensa, lo que es muy conveniente para el proceso de conformación por embutición profunda.

En la tabla III se muestran las características mecánicas de los aceros de bajo contenido en carbono obtenidos por solidificación rápida. Asimismo, en un trabajo citado^[109] se comparan las propiedades ob-

tenidas en este material con la requeridas de conformidad a la norma ASTM A1011M Structural Steel Grade 275.

Finalmente, American Society for Testing Materials (ASTM) ha desarrollado recientemente una nueva norma específica para la chapa de bajo contenido en carbono producida por el proceso de colada continua mediante solidificación rápida^[150], dada la posibilidad, señalada anteriormente, de obtener distintas propiedades finales partiendo de la misma composición química.

En este sentido, la CRU^[151] señala los principales campos de aplicación de estos materiales, entre los que cabe destacar, en primer término, la sustitución, en determinadas aplicaciones, del acero laminado en frío por chapa de bajo espesor obtenida por solidificación rápida, así como la fabricación de perfiles estructurales (25x25 mm – 50x50 mm) y tubería de conducción, siendo, en ambos casos, el potencial de mercado muy importante.

4.3. Acero eléctrico

Una de las primeras aplicaciones que se tuvo en consideración, en los inicios de este procedimiento, fue

Tabla III. Características mecánicas de los aceros de bajo contenido en carbono obtenidos mediante colada continua y por solidificación rápida en la planta de KTN^[30]*Table III. Technical data of the KTN Strip Casting Plant^[30]*

Acero inoxidable Grado AISI 304	Límite elástico, R_p N/mm ²	Carga de rotura, R_m N/mm ²	Alargamiento, A_{80} %
Bobina en caliente, cabecera horno eléctrico de arco	300	420	35
Bobina en caliente, cabecera convertidor	255	380	36
Eurostrip, bruto de colada, cabecera horno eléctrico de arco	270	401	27,3
Eurostrip, con pasada en caliente del 30 %	300	395	30,2
Eurostrip, con pasada en caliente del 36 %	316	398	28,7

la fabricación de aceros de alto contenido en silicio 4,5 % - 6,5 %.

Es conocido que la optimización de las características magnéticas^[152] se logra para un contenido de silicio del 6,5 %, que minimiza la cifra de pérdidas tanto por histéresis como por corrientes de Eddy ó Foucault, así como las constantes de anisotropía magnetocristalina y magnetoestricción. Sin embargo, su procesamiento industrial, por los procedimientos siderúrgicos convencionales, resulta extremadamente difícil debido a la precipitación de una fase frágil, durante el proceso de enfriamiento, con los subsiguientes problemas de laminación, tanto en caliente como en frío.

Por tanto, debe mantenerse un control muy riguroso sobre la microestructura obtenida en el transcurso del enfriamiento secundario que se produce una vez que la banda ha abandonado los cilindros de colada conformación.

Normalmente, en este tipo de proceso y con este tipo de aceros al silicio, se obtiene una estructura de tipo *sandwich* con granos alargados en la periferia de la banda y una zona central formada por granos equiaxiales^[153 y 154].

Otro aspecto muy importante a considerar es el desarrollo de la textura asociada con este nuevo procedimiento siderúrgico ya que, como se sabe, este parámetro es clave en el desarrollo de la chapa eléctrica de grano orientado, así como en los modernos procesos de fabricación de chapa eléctrica no orientada pero con textura.

En diversos trabajos^[155 y 156] se estudia la microestructura y textura desarrollada en función la temperatura de colada, habiéndose encontrado un óptimo para material (4,5 % Si, espesor 1,5 mm) colando a una temperatura de 20 °C por encima de la temperatura de fusión, con un desarrollo de la componente de textura {100}<uvw> en la zona muy próxima a la superficie y una textura del tipo Goss {110}<001>, desde la subsuperficie hasta el centro del material.

En lo que respecta a las características magnéticas susceptibles de ser obtenidas por este procedimiento, el autor del presente trabajo ha realizado diversos estudios a nivel de laboratorio en cintas 6,5 % Si (0,75 mm ancho, 33-35 μm espesor) mediante el empleo de una sola rueda, por lo que los resultados obtenidos deben tomarse como orientativos ya que no existe una relación de semejanza completa con el proceso industrial que se está considerando.

En ciertos trabajos^[157-159] se describen los parámetros de las distintas etapas del proceso de fabricación: sinterización, fusión y colada, así como los distintos ciclos de tratamiento térmico^[160-162]: temperaturas, tiempos, atmósferas de tratamiento, así como las características magnéticas finales como función de todo ello.

En diversos trabajos^[163 y 164] se describe el proceso de fabricación en plantas piloto para chapa eléctrica orientada y no orientada, aunque es de prever que su comercialización no será inmediata, habida cuenta de las exigencias de calidad, especialmente, en lo que hace referencia a las tolerancias geométricas y calidad superficial de la banda.

5. COMPARACIÓN CON LAS TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES, EN LOS ASPECTOS ECONÓMICOS, ENERGÉTICOS Y MEDIOAMBIENTALES

De la experiencia adquirida hasta el momento presente, se puede afirmar que las mayores ventajas de la colada continua mediante solidificación rápida hacen referencia a los aspectos siguientes:

- Reducción de los costes específicos de inversión y de explotación desde la fase de colada hasta el producto acabado^[121]. En la figura 8 se muestran los costes específicos de inversión según los diferentes tipos de plantas de producción: convencional, *slabs* de bajo espesor y solidificación rápida.
- Espacios de implantación más pequeños^[30]. El espacio necesario para instalar una planta de esta tecnología es solamente el 15 % del necesario para la instalación de una planta siderúrgica convencional y el 40 % del necesario para instalar una minimill.
- Aumento de productividad^[165], aspecto muy importante en tanto en cuanto condiciona la viabilidad del proceso, lo cual está asociado, básicamente, al tiempo de vida de los cilindros de colada conformación y refractarios de cierre del molde ó vertedero de colada.
- Asimismo, se pueden producir, de forma económica, productos planos con una producción no excesivamente grande y adecuada a un mercado local y especializado^[166] de 500.000 toneladas anuales. Es, precisamente, en este rango de producción donde esta nueva tecnología presenta ventajas considerables con respecto a las plantas siderúrgicas convencionales e, incluso, a las minimills, las cuales deben producir del orden de 4 y 1,5 millones de toneladas/año, respectivamente, para ser económicamente rentables.
- Esta producción es ágil y con rapidez de respuesta frente a los pedidos, lo cual revierte en una reducción de los stocks intermedios.
- Uno de los aspectos más importantes del proceso de colada continua mediante solidificación

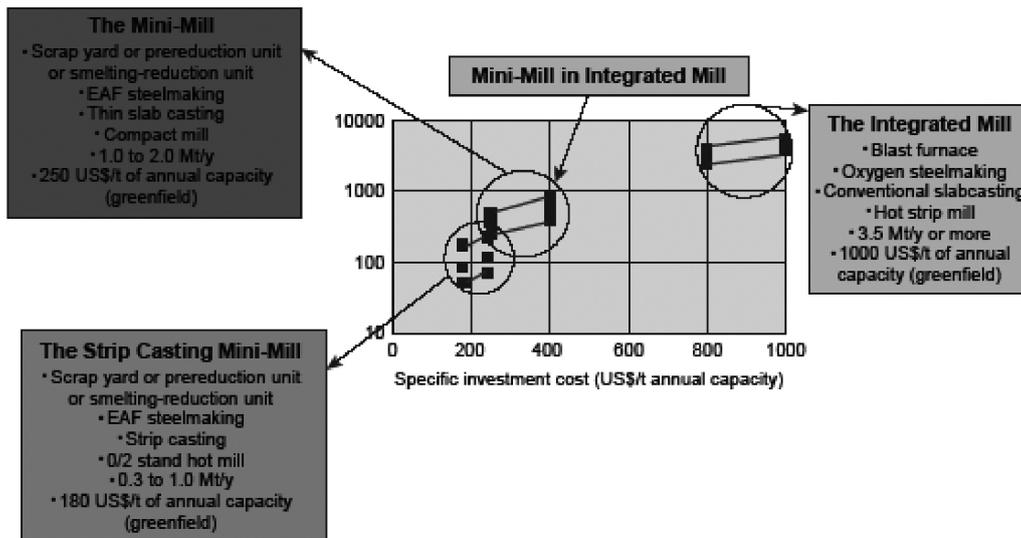


Figura 8. Diferentes procesos para la fabricación de productos planos^[8].

Figure 8. Mill Models for flat products^[8].

rápida es el bajo consumo de energía combinada con una reducción en emisiones contaminantes^[96, 98 y 167-169].

- En efecto, la tabla IV ^[170] muestra los consumos de energía para diferentes procesos siderúrgicos, reduciéndose dichos consumos, desde la cuchara de colada hasta el producto acabado, en un 85-90 % si lo comparamos con el proceso siderúrgico convencional y 25-30 % en el caso de *slabs* de bajo espesor.
- Asimismo, es posible reducir las emisiones a la atmósfera, en dióxido de carbono, CO₂ ^[171 y 172] y dióxido de azufre, SO₂ (70-80 %), así como en óxidos de nitrógeno NO_x. Todo ello, si se compara con una planta siderúrgica integral^[120].

En los trabajos^[88 y 170] se hace un estudio completo sobre los aspectos económicos, energéticos y medioambientales de esta nueva tecnología, comparándola con los procesos siderúrgicos convencionales y estimando los costos y capacidades de producción de cada uno de dichos procesos.

6. PREVISIONES EN EL DESARROLLO FUTURO DE ESTA NUEVA TECNOLOGÍA

Ya, en el año 1988 ^[173], se señalaban los procesos de Continuous Steel Production (CSP) y Strip Casting Technology (SCT) como procesos de futuro, suscep-

Tabla IV. Consumo específico de energía en los procesos de colada convencional y de colada a espesores próximos a los del producto final^[170]

Table IV. Specific energy consumption for near-net-shape casting processes^[170]

Fuente de energía	Colada continua convencional		Colada de slabs de bajo espesor		Colada por solidificación rápida	
	GJ/t	kWh/t	GJ/t	kWh/t	GJ/t	kWh/t
Combustibles fósiles(fuel, gas natural y de batería de coke)	0,93	258	0,09	25	0,06	16,7
Electricidad	0,22	60,59	0,21	58,1	0,09	24,9
Consumo final de energía	1,15	319	0,3	83	0,15	41,6
Total emisiones de CO ₂	75 kg CO ₂ /tm		27 kg CO ₂ /tm		13 kg CO ₂ /tm	

tibles de revolucionar la industria siderúrgica a nivel internacional.

Actualmente, en base a los más recientes avances tecnológicos^[174-177], se han desarrollado plantas de altísima productividad y muy alto rendimiento energético, en las cuales se han combinado los procesos de reducción directa junto con instalaciones para la producción de *slabs* de bajo espesor.

Con base en todo ello, cabe pensar, en un próximo futuro, en el desarrollo de plantas de reducción directa combinadas con la acería eléctrica y con la nueva tecnología de colada continua mediante solidificación rápida (SCT).

Ambas combinaciones van a plantear un panorama completamente nuevo de la industria siderúrgica en la primera mitad del siglo XXI, lo cual obligará a hacer un esfuerzo de adaptación considerable, tanto por parte de los fabricantes de aceros como de los consumidores del mismo.

Todo lo cual constituye, sin duda, una auténtica revolución tecnológica ya que desarrolla un nuevo concepto de planta siderúrgica integral para el siglo XXI.

REFERENCIAS

- [1] International Iron and Steel Institute (IISI), *Steel: The Foundation of a Sustainable Future. Sustainability Report of the World Steel Industry 2005*, Bruselas, Bélgica, pp. 1-51.
- [2] International Iron and Steel Institute (IISI), *World Steel in Figures 2007*, pp. 1-15.
- [3] European Steel Technology Platform, *Vision 2030, Report of the Group of Personalities*, European Commission, Directorate-General for Research, 2004, Bruselas, Bélgica, pp. 1-35.
- [4] L.E.K. Holappa y S. Wang, *Proc. Sohn Int. Symp. Advanced processing of metals and materials, Vol. 2*, San Diego CA, EE.UU., F. Kongoli and R.G. Reddy (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE.UU., 2006, pp. 455-469.
- [5] ThyssenKrupp Stahl AG. Research and Development, *Thinking the Future of the Steel*, 2002, Duisburg, Alemania, pp. 1-35.
- [6] M. Wolf, *Rev. Metall. (París)* 98 (2001) 63-73.
- [7] Iron & Steel Society, *Continuous Casting Series, CD Volumes 1-7*, 1997, I&SS, Warrendale, PA, EE.UU.
- [8] The AISE Steel Foundation, *The Making Shaping and Treating of Steel, 11th Ed., Casting Volume*, A.W. Cramb (Eds.), AISE, Pittsburgh, PA, EE.UU., 2003, pp. 1.1-22.47.
- [9] J.P. Birat, R. Steffen y S. Wilmotte, *European Commission Technical Steel Research, EUR 16671 EN*, 1995, pp.1-63.
- [10] The AISE Steel Foundation, *The Making Shaping and Treating of Steel, 11th Ed., Casting Volume*, A.W. Cramb (Eds.), AISE, Pittsburgh, PA, EE.UU., 2003, pp. 23.1-10.
- [11] M.L. Amarante, L.M. Silva y G. Tavares, *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, Brasil, 12 (2000) 51-76.
- [12] G. Flemming y K.E. Hensger, *AISE Steel Technol. Jan.* (2000) 53-57.
- [13] J. Aylen, *Steel Times*, 229 (2001) 225-234.
- [14] F. Aristegui, J.I. Lángara, I. Lasa, A. Fernández, J. Miñambres y A. Calderón, *Rev. Metall. (París)* 100 (2003) 637-643.
- [15] P. Tolve, R. Tonelli y F. Macci, *Proc. 25th Regular Meeting Committee Technology IISI*, Viena, Austria, 1993, pp. 25-36.
- [16] A. W. Cramb, *Proc. Int. Symp. Near-Net-Shape Casting in the Minimill*, Vancouver, British Columbia, Canada, 1995, J.K. Brimacombe, I.V. Samarasekera (Eds.), University British Columbia, Canadá, pp. 355-372.
- [17] C. Hendricks, *Stahl Eisen* 115 (1995) 75-82.
- [18] R.I.L. Guthrie y M. Isaac, *Recent Res. Devel. in Metallurgy & Materials Sci.* 2 (1998) 25-36.
- [19] K. Shibuya y M. Ozawa, *ISIJ Int.* 31 (1991) 661-668.
- [20] The AISE Steel Foundation, *The Making Shaping and Treating of Steel, 11th Ed., Casting Volume*, A.W. Cramb (Eds.), AISE, Pittsburgh, PA, EE.UU., 2003, pp. 23.10-18.
- [21] J.P. Birat, R. Steffen y S. Wilmotte, *European Commission Technical Steel Research, EUR 16671 EN*, 1995, pp. 77-152.
- [22] G. Thompson, *European Commission Report, EUR 13940 EN*, 1997, pp. 1-79.
- [23] H.U. Lindenberg, J. Henrion, K. Schwaha y G. Vespasiani, *Stahl Eisen* 121 (2001) 97-104.
- [24] P.C. Campbell y R.L. Wechsler, *Proc. Gerald Heffernan Int. Symp. on Innovative technologies for Steel and other Materials*, Toronto, Canada, 2001, J. Guerard y E. Essadiqi (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE.UU., pp. 201-214.
- [25] R. Wechsler, *Rev. Metall. (París)* 99 (2002) 941-948.
- [26] R. Wechsler, *Scand. J. Metall.* 32 (2003) 58-63.
- [27] J. Herbertson, *Proc. Dr. Manfred Wolf Symp. Conf. Report*, Zurich, Suiza, 2002, Main(Eds.), Forch, Suiza, 2002, pp. 60-69.
- [28] P. Campbell, R. Mahapatra, W. Blejde, R. Wechsler y G. Gillen, *Rev. Metall. (París)* 103 (2006) 25-31.
- [29] *The Castrip Process: Castrip LLC*, Charlotte, NC, EE.UU. <http://www.castrip.com>.
- [30] H. Legrand, U. Albert-Früh y A. Flick, *Millenium Steel - Continuous Casting 5* (2004) 140-145.

- [31] Eurostrip International GmbH: Krupp Thyssen Nirosta GmbH, Krefeld, Alemania y Voest-Alpine Industrieanlagenbau GmbH, Linz, Austria. <http://www.nirosta.de> y <http://www.vatech.at>
- [32] G. Guasto y M. Tonelli, *Commissione Europea. Ricerca Técnica Acciaio*, EUR 19362 IT, 2000, pp. 1-37.
- [33] P.W. Bao, P.J. Li, H.S. Di, X.G. Liu y G.D. Wang, *J. Mater. Sci. Technol.* 21 (2005) 526-530.
- [34] G.G. Wen, M.G. Zhu, J.F. He y P.H. Ding, *1st ISS Tech. Conf. Proc.* Indianapolis, IN, EE. UU., 2003, M.A. Baker (Eds.), I&SS, Warrendale, PA, EE.UU., 2003, pp. 475-483.
- [35] B. Wang, J.Y. Zhang, Y. Zhang, Y.D. He, J.F. Fan, Y. Fang y S.G. An, *J. Univ. Sci. Technol. Beijing* 13 (2006) 393-400.
- [36] B. Wang, J.Y. Zhang, J.F. Fan, S.L. Zhao, Y. Fang y S.L. An, *J. Iron Steel Res. Int.* 13 (2006) 14-17.
- [37] W. Blejde, R. Mahapatra y H. Fukase, *The Belton Memorial Symp. Proc.*, Wollongong, Australia, 2000, J. Herbertson (Pub.) I&SS, Warrendale, PA, EE.UU., 2000, pp. 253-261.
- [38] R.P. Tavares y R.I.L. Guthrie, *Can. Met. Qtrly.* 37 (1998) 241-250.
- [39] R.P. Tavares y R.I.L. Guthrie, *Proc. Computer Appl. in Metall. and Mater. Proces.*, Montreal, Canadá, 1998, S.A. Argyropoulos y M. Hasan (Eds.), Met. Soc - CIM, Montreal, Canada, 1998, pp. 204-218.
- [40] R.I.L. Guthrie y R.P. Tavares, *Appl. Math. Model.* 22 (1998) 851-872.
- [41] F. Macci y M. De Santis, *Report European Commission*, EUR 17995 IT, 1998, pp. 1-47.
- [42] G. Hohenbichler, P. Tolve, R. Capotosti, J.M. Damasse y U. Albrecht-Früh, *Steel World* 7 (2002) 40-44.
- [43] B.G. Thomas, *The Encyclopedia of Materials : Science and Technology*, vol. 2, K.H.J. Buschow, R. Cahan, M. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer y S. Mahajan (Eds.), Elsevier Science Ltd., Oxford, Inglaterra, 2001, pp. 1.595-1.599.
- [44] R. Wechsler y P. Campbell, *Proc. Dr. Manfred Wolf Symp. Conf. Report*, Zurich, Suiza, 2002, Main (Eds.), Forch, Suiza, 2002, pp. 70-79.
- [45] P. Campbell, W. Blejde, R. Mahapatra, R. Wechsler y G. Gillen, *Iron & Steel Technol.* 2 (2005) 56-62.
- [46] Y. Park y H. Cho, *Control Eng. Pract.* 13 (2005) 821-834.
- [47] K. Mukunthan, L. Strezov, R. Mahapatra, y W. Blejde, *The Brimacombe Memorial Symp. Proc.*, Vancouver BC, Canada, 2000, G.A. Irons, A.W. Cramb (Eds.), Met. Soc. - CIM, Montreal, Canada, 2000, pp. 421-437.
- [48] X.M. Zhang, Z.Y. Jiang, X.H. Liu, G.D. Wang, L.M. Yang y A.K. Tieu, *Mater. Sci. Forum* 505-507 (2006) 1.315-1.320.
- [49] R. Koop, U. Albrecht-Früh, L. Hentschel, U. Rudolphi, J. W. Schmitz, D. Senk y F. Simon, *Proc. THERMEC '97*, Wollongong, Australia, 1997, T. Chandra, T. Sakai (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE.UU., 1997, pp. 2.201-2.207.
- [50] Y.G. Lee, C.M. Park, H.T. Chung, W.S. Kim, H.K. Moon y T. Kang, *Proc. METEC Congress, Int. Conf. New Develop. in Metall. Proc. Technol.*, 1999, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf, Alemania, 1999, Deutcher Eisenhüttenleute (Eds.), Düsseldorf, Alemania, 1999, pp. 168-175.
- [51] H.K. Moon, D.K. Choo, W.S. Kim and T. Kang and K.S. Kim, *Proc. METEC Congress, 3rd European Rolling Conference*, Düsseldorf, Alemania, 2003, Stahleisen (Eds.), Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf, Alemania, 2003, pp. 13-18.
- [52] G.L. Thompson, S.R. Higson y P.J. Longdon, *European Commission Report EUR 18608 EN*, 1998, pp. 1-48.
- [53] S. Drücker, A.R. Büchner, M. Spiegel, K.H. Tacke, V. Lanteri, G. Lenprice, W. Schmitz, D. Senk y G.L. Thompson, *European Commission Report EUR 20192 EN*, 2002, pp. 1-131.
- [54] T. Saitoh, H. Hojo, H. Yaguchi y C.G. Kang, *Metall. Trans. B* 20 (1989) 381-390.
- [55] K. Miyazawa y J. Szekely, *Metall. Trans. A*, 12 (1981) 1.047-1.057.
- [56] H. Takuda, N. Hatta, M. Teramura y J. Kokado, *Steel Res.* 61 (1990) 312-317.
- [57] C.G. Kang y Y.D. Kim, *J. Mater. Proc. Technol.* 84 (1998) 210-224.
- [58] R.P. Tavares y R.I.L. Guthrie, *Proc. Computer Appl. in Metall. and Mater. Proces.*, Montreal, Canadá, 1998, S.A. Argyropoulos y M. Hasan (Eds.), Met. Soc - CIM, Montreal, Canada, 1998, pp. 114-125.
- [59] M. Shiomi, K. Mori y K. Osakada, *Dynamic Plasticity and Structural Behaviors*, Gordon and Breach (Eds.), Nueva York, EE.UU., 1995, pp. 1.035-1.038.
- [60] Y. Jianwei, D. Yanping y S. Binyu, *Mater. Sci. Forum* 475-479 (2005) 3.207-3.210.
- [61] C.A. Santos, J.A. Spim Jr. y A. García, *J. Mater. Proc. Technol.* 102 (2000) 33-39.
- [62] K. Sarioglu y P. Thevoz, *132th TMS Annual Meeting Light Metals*, San Diego, CA, EE.UU., 2003, P.N. Crepeau (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE. UU., 2003, pp. 747-751.
- [63] M.Y. Ha, K. Kim, K.C. Kim, S.W. Lee, *Int. J. Heat Mass Transfer.* 37 (1994) 2.059-2.068.
- [64] J.D. Hwang, H.J. Lin, W.S. Hwang, y C.T. Hu, *ISIJ Int.* 35 (1995) 170-177.

- [65] J.D. Hwang, H.J. Lin, J.S.C. Jang, W.S. Hwang y C.T. Hu, *ISIJ Int.* 36 (1996) 690-699.
- [66] R. Parreiras, Doctoral These, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 1997, pp. 176-223.
- [67] M. Paretosh, Doctoral These, Departement of Material Science & Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, EE.UU., 2002, pp. 77-100.
- [68] R.P. Tavares, M. Isac y R.I.L. Guthrie, *ISIJ Int.* 38 (1998) 1.353-1.361.
- [69] M. Prates y H. Biloni, *Metall. Trans.* 3 (1972) 1.501-1.510.
- [70] J.P. Birat, P. Blin, J.L. Jacquot, P. Riboud y B. Thomas, *Rev Metall. (Paris)* 86 (1989) 919-930.
- [71] L. Strezov y J. Herbertson, *ISIJ Int.* 38 (1998) 959-966.
- [72] H. Fukase, S. Osada, H. Otsuka y P. Cambell, *Iron & Steelmaker* 30 (2003) 48-58.
- [73] N. Zapuskalov y M. Vereschagin, *ISIJ Int.* 40 (2000) 589-596.
- [74] H. Takatani, Ch.A. Gandin y M. Rappaz, *Acta Mater.* 48 (2000) 675-688.
- [75] H. Takeuchi, S. Tanaka, Y. Yamagami, H. Nakajima, M. Yamada, y R. Hikada, *Nippon Steel Tech. Rep.* 61 (1994) 46-51.
- [76] I. Suichi, H. Nakashima, H. Takeuchi, S. Tanaka, M. Yamada, K. Yanagi, K. Yamamoto, H. Takatani, K. Sasaki y Y. Wakiyama, *SEAI-SI Qtrly* 25 (1996) 23-30.
- [77] T. Arai, M. Yamada, H. Nakashima, H. Takeuchi, S. Tanaka, Y. Yamakami, K. Sasaki y K. Yamamoto, *77th Steelmaking Conf. Proc.*, vol. 77, 1994, Chicago, EE.UU., I&SS, Warrendale, PA, EE.UU., 1994, pp. 357-363.
- [78] D.K. Choo, S. Lee, H.K. Moon, y T. Kan, *Metall. Mat. Trans. A*, 32 (2001) 2.249-2.258.
- [79] M. Ha, J. Choi, S. Jeong., H. Moon, S. Lee, y T. Kang, *Metall. Mat. Trans. A* 33 (2002) 1.487-1.497.
- [80] N.M. Zapuskalov, *Int. J. Cast. Metal. Res.* 9 (1996) 45-49.
- [81] C.M. Park, W.S. Kim y G.J. Park, *Mech. Res. Commun.* 30 (2003) 297-310.
- [82] C.G. Kang y Y.D. Kim, *J. Mater. Proc. Technol.* 67 (1997) 71-77.
- [83] C.G. Kang, Y.D. Kim y S.W. Lee, *Melt Spinning strip Casting and Slab Casting*, E.F. Matthys and W.G. Truckner (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE.UU., 1996, pp. 65-86.
- [84] C.G. Kang y Y.D. Kim, *Metall. Mat. Trans. B* 28 (1997) 1.213-1.225.
- [85] C.G. Kang, Y.D. Kim y Y.J. Chun, *Proc. Thermec'97*, Wollongong, Australia, 1997, T. Chandra and T. Sakai (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE.UU., 1997, pp. 2.193-2.199.
- [86] R.L. Wechsler y J.J. Ferriola, *AISE Steel Technol.*, Sept. (2002) pp. 69-74.
- [87] N. Zapuskalov y M. Vereschagin, *ISIJ Int.* 38 (1998) 1.107-1.113.
- [88] N. Zapuskalov, *ISIJ Int.* 43 (2003) 1.115-1.127.
- [89] M. Ferry, *Direct strip casting of metals and alloys. Processing, microstructure and properties*, Woodhead Pub. Ltd. (Eds.), Cambridge, Inglaterra, 2006, pp.1-275.
- [90] W.H. Hwang, D.S. Lee, y Y.H. Kim, *RIST J. R&D* 11 (1997) 391-403.
- [91] D.S. Lee, M.G. Joo, Y.H. Kim y T. Kang, *RIST J. R&D* 13 (1999) 290-296.
- [92] Y.H. Kim, D.S. Lee, M.G. Joo, C.M. Park y H.N. Chung, *RIST J. R&D* 13 (1999) 385-395.
- [93] M.G. Joo, Y.H. Kim y T. Kang, *IEE Proc. Contr. Theor. Appl.* 149 (2002) 357-364.
- [94] Y.H. Kim, D.S. Lee, M.G. Joo, T. Kang y K.N. Paek, *Proc. ISIE 2001, 6th IEEE Ind. Symp. on Ind. Electronics, vol. 1*, Pusan, Korea, 2001, Piscataway NJ (Eds.), IEEE Industrial Electronics Society, EE. UU., 2001, pp.520-525.
- [95] Y.H. Kim, D.S. Lee, W.H. Hwang y K.N. Paek, *Proc. IASTED Int. Conf. Modelling, Identification and Control*, Innsbruck, Austria, 2002, M.H. Hamza (Eds.), Austria, 2002, pp. 1-7.
- [96] E.E.M. Luiten, Doctoral These, Universiteit, Faculteit Scheikunde, Utrecht, Holanda, 2001, pp. 137-155.
- [97] E.E.M. Luiten y K. Blok, *Energ. Policy* 31 (2003) 1.339-1.356.
- [98] E.E.M. Luiten, H.V. Lente y K. Blok, *Technovation* 26 (2006) 1.029-1.044.
- [99] A.W. Cramb y A. Rollet, *Final Report Strip Casting DE-FC07-97ID13554, AISI/DOE Technology Roadmap Program*, AISI, Pittsburgh, PA, EE.UU., 2001, pp.1-15.
- [100] Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, *Strip Casting: Anticipating New Routes to Steel Sheet*, Washington, EE.UU., 2001, pp. 1-2.
- [101] P. Warrian y C. Mulhern, *Annual Meeting Innovation Systems Research Network*, Quebec, Canada, 2002, D.A. Wolfe (Eds.), McGill-Queen's University Press, Montreal, Canada, 2003, pp. 37-62.
- [102] N. Zapuskalov, *Russian Business* 26 (2003) 1-1.
- [103] Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST), San 32 Hyoja-dong, Namgu Pohang, 790-600 Republic of Korea. <http://www.rist.re.kr/new/english/index.php>.
- [104] Industrial Materials Institute (IMI), NRC Ca-

- nada. Québec, Canada. <http://www.imi.cnr-cnr.gc.ca>.
- [105] Centro Sviluppo Materiali (CSM), Rome, Italy. <http://www.c-s-m.it>.
- [106] Castrip Story: The Original Concept, pp. 1-3, Castrip, LLC, Charlotte, NC, EE.UU. <http://www.castrip.com>.
- [107] W. Blejde, R. Mahapatra, y H. Fukase, *Proc. METEC Cong. Int. Conf. New Develop. in Metall. Proc. Technol.*, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf, Alemania, 1999, Deutscher Eisenhüttenleute (Eds.), Düsseldorf, Alemania, 1999, pp. 176-181.
- [108] Nucor picks partners for strip casting joint venture. <http://www.purchasing.com> (4 may. 2000)
- [109] P. Campbell, W. Blejde, R. Mahapatra, y R. Wechsler, *Metallurgist* 48 (2004) 507-514.
- [110] P.C. Campbell, R.L. Wechsler y W. Blejde, *Proc. AIST Iron & Steel Conf., Vol. II*, Nashville, TE, EE.UU., 2004, AIST, Warrendale, PA, EE.UU., 2004, pp. 1.027-1.031.
- [111] P. Campbell, G. Gillen, W. Blejde, y R. Mahapatra, *Steel World* 7 (2002) 45-48.
- [112] G.J. McManus, *AISE Steel Technol.* 77 (2000) 60.
- [113] B. Nelson, *Forbes Magazine*, April 16 (2001). <http://www.forbes.com>.
- [114] Nucor-Castrip, *News release*, August 25 (2004). <http://www.nucor.com>.
- [115] *Metal producing and processing news*, June 18 (2004) 1. <http://www.33metalproducing.com/archive.php>.
- [116] *Manufacturingtalk* 2004. <http://www.manufacturingtalk.com> (25 jun. y 7 sep. 2004).
- [117] R. Wechsler, K. Pronold y G. Gillen, *Proc. METEC Cong., 3rd European Rolling Conference*, Stahlinstitut VDEh Düsseldorf, Alemania, 2003, Stahleisen (Eds.), Düsseldorf, Alemania, 2003, pp. 20-25.
- [118] *Breaking News, Forecast a publication of Castrip LLC, vol V*, 2005, pp. 1-4.
- [119] *Steel News*, May 06, 2003, AIST, Warrendale, PA, EE.UU., 1.
- [120] M. Walter, G. Stebner, J.M. Damasse, P. Tolve y G. Hohenbichler, *Steel Times Int.* 25 (2001) 33-37.
- [121] H. Legrand, U. Albrecht-Früh y A. Flick, *Metall. Ital.* 94 (2002) 54-59.
- [122] G. Hohenbichler y G. Widner, *Proc. METEC Cong., 3rd European Rolling Conference*, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf, Alemania, 2003, Stahleisen (Eds.), Düsseldorf, Alemania, 2003, pp. 26-34.
- [123] A.W. Cramb, *Strip Casting Steels Current Developments, Encyclopedia of Materials : Science and Technology*, Elsevier Ltd.(Eds.), 2004, pp. 1-4.
- [124] M. Walter, W. Mankau, H.J. Figge, D. Themines, R. Tonelli, y G. Eckerstorfer, *Stahl Eisen* 121 (2001) 83-87.
- [125] Nippon Steel Corporation, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan. <http://www.nsc.co.jp>.
- [126] *Nippon Steel News*, 229 (1991) 1.
- [127] *Nippon Steel News*, 256 (1996) 1.
- [128] M. Yamada, K. Isogami, H. Hosoda, H. Nakashima, M. Okimori, y K. Sasaki, *Steel World* 7 (2002) 49-54.
- [129] *Posco 1*, Koedong-dong, Nam-gu, Pohang Kyongsangbuk-do, Korea. <http://www.posco.com>
- [130] H.K. Moon, W.S. Kim, A. Hetherington, y M. Rushforth, *SEAIISI Qtrly* 25 (1996) 31-40.
- [131] H.K. Moon, C.H. Park, H.N. Cheong, C.G. Lee y T. Kang, *Proc. The Merton C. Flemings Symp. on Solidification. and Mater. Processing*, Cambridge, Massachusetts, MA, EE.UU., 2000, M.C. Flemings, R. Abbaschian, H.D. Brody y A. Mortensen (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE.UU.; 2001, pp.507-511.
- [132] H.K. Moon, D.K. Choo, T. Kang, y K.S. Kim, *Proc. 60th Electric Furnace Conference*, 2002, San Antonio, TX, EE. UU., 2002, D.L. Kanagy y M.A. Baker (Eds.) I&SS, Warrendale, PA, EE.UU, 2002, pp.499-508.
- [133] L. Boselovic, *Pittsburgh Post-Gazette*, March 23 (2004) 1 <http://www.post-gazette.com>
- [134] J. Lin, *Philly.com*, March 22 (2004). <http://www.philly.com>.
- [135] Strip Casting Technology, <http://www.ilib.cn>.
- [136] A. Angelini y P. Tolve, *Proc. European Stainless Steel Conf, Innovation Stainless Steel, vol. 2*, Florencia, Italy, 1993, Associazione Italiana de Metallurgia (Eds.), Milán, Italia, 1993, pp. 2.1-2.14.
- [137] A.L. Robson, G.L. Thompson, P. Longdon y A. Wilkinson, *Proc. THERMEC '97*, Wollongong, Australia, 1997, T. Chandra y T. Sakai (Eds.), TMS, Warrendale, PA, EE.UU., 1997, pp. 2.263-2.277
- [138] X. Zhang, Z. Jiang, X. Liu y G. Wang, *J. Mater. Sci. Technol.* 22 (2006) 295-300.
- [139] X.M. Zhang, Z.Y. Jiang, X.H. Liu y G.D. Wang, *J. Mater. Proc. Technol.* 162-163 (2005) 591-595.
- [140] K. Mukunthan, F. DeSylva, L. Strezov, J. Herbertson, *Metall. Ital.* 94 (2002) 39-46.
- [141] D. Raabe, *Acta Mater.* 45 (1997) 1.137-1.151.
- [142] D. Raabe, *Mater. Sci. Technol.* 11 (1995) 461-468.
- [143] D. Raabe, *Metall. Mater. Trans. A* 26 (1995) 991-998.
- [144] A. Flick y G. Hohenbichler, *Steel Times Int.* 26 (2002) 20-22.
- [145] R. Mahapatra, W. Blejde, G. Gillen, P. Campbell y R. Wechsler, *Proc. SCANMET II – 2nd*

- Int. Conf. Process Development in Iron and Steel-making, vol I*, Luleá, Suecia, 2004, MEFOS (Eds.), Luleá, Suecia, 2004, pp. 161-173.
- [146] W. Blejde, R. Mahapatra, y H. Fukase, *I&SM* 27 (2000) 29-33.
- [147] D. Senk, G.L. Thompson, W. Bleck, P. Vicente, R. Kopp y R. Steffen, *European Commission Report EUR 19364 EN*, 2000, pp. 1-132.
- [148] I. Ibarrondo, *Embutición Extraprofunda*. Ed. Universidad del País Vasco, España, 1985, pp. 1-144.
- [149] K. Banerjee y A.D. Rollett, *I&SM* 30 (2003) 62-68.
- [150] ASTM International, *Norma: A 1039/A 1039M-04*.
- [151] CRU International Ltd., Special Report, *Thin-Gauge Hot-Rolled vs. Cold-Rolled - The Future for Thin-Gauge Hot-Rolled Sheet*, Londres, Inglaterra, 1998, pp. 180. <http://www.crugroup.com>.
- [152] I. Ibarrondo y J.M. San Juan, *Adv. Eng. Mater.* 2 (2000) 518-521.
- [153] B.V. Motilov, N.M. Zapuskalov y A.N. Savvin, *Met. Sci. Heat Treat.* 34 (1993) 555-558.
- [154] N.M. Zapuskalov, *Int. J. Cast. Met. Res.* 9 (1996) 153-156.
- [155] J.Y. Park, K.H. Oh y H.Y. Ra, *Scr. Mater.* 40 (1999) 881-885.
- [156] J.Y. Park, K.H. Oh y H.Y. Ra, *ISIJ Int.* 41 (2001) 70-75.
- [157] I. Ibarrondo, S. Suriñach y J. González, *J. Magn. Magn. Mater.* 112 (1992) 232-234.
- [158] I. Ibarrondo, J.M. San Juan y J. González, *J. Magn. Magn. Mater.* 101 (1991) 83-85.
- [159] I. Ibarrondo y J. Degauque, *Proc. of 40th Mechanical Working and Steel Proc Conf. I&SS, vol. XXXVI*, Pittsburgh, PA, EE.UU., 1998, D.L. Kanagy (Pub.) I&SS, Warrendale, PA, EE.UU., 1998, pp. 499-504.
- [160] I. Ibarrondo y J. Degauque, *Vacuum* 53 (1999) 75-78.
- [161] I. Ibarrondo y J.M. San Juan, *Adv. Eng. Mater.* 2 (2000) 518-521.
- [162] I. Ibarrondo y J. Degauque, *Proc. Thermomechanical Proces. Steels Conf.*, IOM, vol 2, Londres, Inglaterra, 2000, IOM Communications (Eds.), The Chameleon Press Ltd., Londres, Inglaterra, 2000, pp. 557-562.
- [163] S. Fortunati, F. Folliero y S. Cicalé, *Report European Commission EUR 19981 EN*, 2001, pp. 1-76.
- [164] K. Günther, G. Abbruzzese, S. Fortunati y G. Ligi, *Steel Res. Int.* 76 (2005) 413-421.
- [165] E. Worrell, L. Price y C. Galitsky, *Report LBNL-54828*. Energy Analysis Department, E.O. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, CA, EE.UU., 2004, pp. 4-9.
- [166] J. Vaugh, D. Varcoe, *SEAIQ Qtrly* 30 (2001) 46-56.
- [167] Institut Wallon de Développement Économique et Social et d'Aménagement du Territoire Asbl, *Report EAL030701*, Bélgica, 2001, pp. 1-106.
- [168] G. Hohenbichler, H. Legrand y U. Albrecht-Früh, *SEAIQ Qtrly* 31 (2002) 27-38.
- [169] G. Hohenbichler, G. Windner y J. Schnalzger, *SEAIQ Qtrly* 32 (2003) 23-32.
- [170] IFARE-DFIV. E.U.-Project: Assessment on the Air Emissions Impact of Emerging Technologies. Fact Sheet - Ferrous Metals Processing, Strip Casting, 2004, pp. 6-9. <http://www.dfiu.wiwi.uni-karlsruhe.de>.
- [171] L. Ernenputsch, *Proc. Klimazwei – Research for Climate Protection and Protection from Climate Impacts*, Dr. Annette Münzenberg (Eds.), Federal Ministry of Education and Research, Berlin, Alemania, 2007, pp. 10-12.
- [172] IISI, *Climate change and steel, Meeting the challenge*, 2007, pp.1-7.
- [173] K. Tanaka, *I&SM* 15 (1988) 11-15.
- [174] R. Quintero, *Proc. Gorham/Intertech Mini-Mills of the Future Conf.*, Charlotte, NC, EE.UU., 1996, Gorham, Intertech Consulting (Eds.), Portland, ME, EE.UU., 1996, pp. 1-12.
- [175] T. Creamer, *Engineering News*, May 24 (2007), <http://www.engineeringnews.co.za/article.php?id=109698>
- [176] J. Kriechmair, *Proc. Iran's First Int'l Steel and Mines Industries Forum*, Theran, Islamic Republic of Iran, 2003, S. Hussein (Eds.) Iran International, Theran, Islamic Republic of Iran, 2003, pp. 39-62.
- [177] C.P. Reip, W. Henning y R. Hagmann, *Iron Steel Technol.* 2 (2005) 25-32.