

## Resumen

El acero ha sido, y sigue siendo, un material clave en el desarrollo de nuestra civilización. Es por ello, que la consecución de nuevas calidades es clave en los entornos industriales de este sector.

Este proyecto se encamina a la consecución de una calidad de acero determinada, el tipo y grado S 355 J2 +AR, dentro de un entorno industrial concreto formado por una acería eléctrica seguida de un tren de laminación de perfiles estructurales. Esta calidad concreta plantea ventajas en cuanto a las características de resiliencia a bajas temperaturas lo que la hacen clave para acceder a mercados concretos no accesibles hasta la fecha.

Durante el desarrollo de este proyecto se han planteado diferentes pruebas variando, ya sea la composición química del acero o las condiciones de proceso de fabricación con la intención de alcanzar la citada calidad. Para ello se ha seguido una metodología de mejora continua según la cual, cada una de las pruebas presentadas se planteaba, realizaba, analizaba y estandarizaba una y otra vez hasta alcanzar el objetivo final.

Fue durante la realización de las citadas pruebas cuando nos encontramos con un nuevo problema: la aparición de defectos superficiales en los perfiles laminados en la nueva calidad planteada, lo cual los hacía inservibles para su comercialización. Por este motivo, este proyecto no se quedó únicamente en la consecución del tipo y grado citado sino que se amplió a la eliminación o reducción de dichos defectos superficiales.

Finalmente, con una modificación de la composición química del acero, utilizando tanto titanio como vanadio y aumentando el manganeso de partida, más una variación en las condiciones de procesos de colada continua, se consiguió alcanzar, de una merma estable en el tiempo, el tipo y grado de acero deseado.



# Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSARIO</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>9</b>
2.1. Origen del proyecto.....	9
2.2. Motivación.....	9
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
3.1. Objetivos del proyecto.....	11
3.2. Alcance del proyecto.....	11
3.3. Antecedentes históricos.....	11
3.4. El acero en la industria.....	17
3.5. Proceso siderúrgico.....	20
3.5.1. Métodos de producción del acero.....	20
3.5.2. Siderurgia horno eléctrico.....	21
3.5.3. Siderurgia secundaria. Horno cuchara.....	22
3.5.4. Materias primas utilizadas en la producción del acero.....	23
3.6. Influencia de los diferentes elementos aleantes.....	32
3.6.1. Manganeso.....	32
3.6.2. Vanadio.....	33
3.6.3. Niobio.....	34
3.6.4. Titanio.....	34
<b>4. PROCESO DE FABRICACIÓN</b>	<b>35</b>
4.1. Disposición de la planta.....	35
4.2. Fabricación del acero.....	36
4.2.1. Horno eléctrico.....	36
4.2.2. Horno cuchara.....	39
4.2.3. Colada continua.....	42
4.3. Laminación en caliente.....	44
4.4. Normas de referencia.....	45
4.4.1. EN 10025 Productos laminados en caliente de aceros para estructuras.....	45
4.4.2. EN 10163 Condiciones de suministro relativas al acabado superficial de chapas, bandas, planos y perfiles de acero laminados en caliente.....	47
4.4.3. EN 10034 Perfiles I y H de acero estructural.....	47

<b>5. MATERIAL Y MÉTODOS EXPERIMENTALES</b>	<b>49</b>
5.1. Técnicas de ensayo utilizadas.....	49
5.1.1. Análisis de composición química.....	49
5.1.2. Ensayos de tracción.....	51
5.1.3. Ensayos de resiliencia .....	52
5.1.4. Microscopía óptica .....	52
5.1.5. Microscopía electrónica .....	53
5.1.6. Controles visuales.....	53
5.1.7. Mediciones de temperatura en colada continua .....	54
5.2. Materiales de partida .....	54
5.2.1. Formato. Beam Blank .....	54
5.2.2. Composiciones química.....	56
5.3. Productos finales .....	56
<b>6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b>	<b>59</b>
6.1. Caracterización del material de partida.....	59
6.1.1. Estado de colada .....	60
6.1.2. Estado de laminación.....	61
6.1.3. Propiedades mecánicas del material de partida .....	62
6.2. Uso de Ti como elemento de microaleación.....	63
6.2.1. Resultados de la prueba .....	64
6.2.2. Conclusiones de la prueba .....	65
6.3. Caracterización de los defectos aparecidos .....	65
6.3.1. Descripción del defecto.....	66
6.3.2. Ensayo de tracción de la zona con defecto .....	67
6.3.3. Ensayo micrográfico del defecto en producto final .....	68
6.3.4. Análisis químico de la zona del defecto en producto final .....	70
6.3.5. Decapado ácido y control visual de la superficie del BB .....	70
6.3.6. Análisis micrográfico de la superficie del BB .....	71
6.3.7. Análisis químico de la superficie del BB.....	72
6.3.8. Conclusiones de la caracterización .....	75
6.4. Aumento del Ti a valores estequiométricos .....	75
6.4.1. Resultados de la prueba.....	76
6.4.2. Conclusiones de la prueba .....	77
6.5. Substitución de parte del Vanadio por Niobio y eliminación total del uso del Titanio.....	78
6.5.1. Resultados de la prueba.....	78
6.5.2. Conclusiones de la prueba .....	80
6.6. Combinación de varios elementos aleantes: Titanio, Vanadio y Niobio. ....	80

6.6.1. Resultados de la prueba. ....	81
6.6.2. Conclusiones de la prueba.....	83
6.7. Uso de Vanadio, Titanio y mayor contenido de Manganeso junto con variación de la distribución de aceite en lingotera.....	84
6.7.1. Resultados de la prueba. ....	85
6.7.2. Conclusiones de la prueba.....	88
<b>CONCLUSIONES</b> _____	<b>89</b>
Posibles acciones futuras o vías de continuidad del proyecto. ....	91
<b>AGRADECIMIENTOS</b> _____	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> _____	<b>95</b>
<b>ANEXO I: IMPACTO ECONÓMICO.</b> _____	<b>96</b>
<b>ANEXO II: IMPACTO AMBIENTAL.</b> _____	<b>97</b>
<b>ANEXO III: LISTADO DE FIGURAS</b> _____	<b>98</b>
<b>ANEXO IV: LISTADO DE TABLAS</b> _____	<b>100</b>



# 1. Glosario

*Re*: Límite elástico.

*Rm*: Resistencia máxima.

*%A*: Porcentaje de alargamiento a rotura

*CEV*: Carbono equivalente calculado según la fórmula del IIW (Instituto Internacional de la Soldadura)

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

*S355J2 +AR*: Tipo, grado y condición de suministro de acero estructural

*S355J0+AR*: Tipo, grado y condición de suministro de acero estructural

*BB*: Beam Blank. Formato de palanquilla Near Net Shape fabricada en acería y que posteriormente se lamina para la fabricación de perfiles estructurales.

*Near Net Shape*: Preformas utilizadas en palanquilla que se asemejan al producto final destinado. En el caso de nuestro estudio se trata de los denominados Beam Blanks

*EAF*: Electric Arc Furnance. Horno de arco eléctrico.

*EBT*: (Eccentrically-Bottom Tapping) Agujero en la base del EAF que permite el paso del caldo del horno a la cuchara.

*EN 10025*: Euronorma. Productos laminados en caliente de aceros para estructuras.

*EN 10163-3*: Euronorma. Condiciones de suministro relativas al acabado superficial de chapa, bandas, planos anchos y perfiles de acero laminados en caliente. Parte 3: Perfiles.

*UNE EN ISO 643*: Euronorma. Acero. Determinación micrográfica del tamaño de grano aparente.

*UNE EN ISO 6892-1*: Euronorma. Materiales Metálicos. Método de ensayo de tracción a temperatura ambiente.

*UNE EN ISO 148*: Euronorma. Materiales Metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy.

*Alma*: Parte centras de un perfil o un Beam Blank, perpendicular a las alas del mismo.

*Ala:* Parte lateral de un perfil o de un Beam Blank, perpendiculares al alma. Pueden o no tener las caras paralelas en función del tipo de producto.

*HEB400:* Perfil estructural en forma de H con caras de alas paralelas y altura de perfil de 400mm.

*Sopladuras:* Poros en el acero ya sólido causados por gases formados durante la solidificación del acero.

*Tundish:* También denominado artesa. Deposito donde se acumula el acero vertido de la cuchara y que distribuye el mismo a través de las buzas.

*Buza:* distribuidor del acero de la artesa a la lingotera, disponible en diferentes diámetros permitiendo así controlar la velocidad de salida del acero.

*Lingotera:* Molde refrigerado, generalmente de cobre, donde se vierte el acero del tundish a través de las buzas y que da forma al producto colado.

## 2. Prefacio

### 2.1. Origen del proyecto

El origen de este proyecto reside en una necesidad industrial real. Dada la necesidad de fabricar la nueva calidad citada, S355J2 +AR, ésta debía llevarse a cabo de la forma más eficiente posible, con un coste relativo bajo y sin la presencia de ningún defecto en el producto final para el que era destinada que pudiera impedir el acceso de estos a los mercados objetivos.

Esta necesidad, junto con la motivación intelectual e ingenieril implícita en el desarrollo y mejora de un proceso industrial, llevo a la realización de toda un gran batería de pruebas que, enfrentándose en algunos casos a problemas inesperados, intentaron y consiguieron la consecución de los objetivos que se fijaron al plantear este proyecto.

### 2.2. Motivación

Cualquier mejora de un proceso industrial que de cómo resultado un producto de mayor calidad a un coste adecuado debería ser considerado ya una motivación suficiente para que un futuro ingeniero le dedique su trabajo.

En este caso concreto, la posición dentro de la empresa donde se realizó el trabajo que nos atañe por parte del autor, concretamente dentro del Departamento de Calidad de Celsa, aumentó aún más la motivación para lograr la consecución de una nueva calidad, con unas propiedades y características finales superiores a las que hasta la fecha se fabricaban en las instalaciones utilizadas así como la eliminación de aquellos defectos que pudieran aparecer en los productos finales para los que se diseñó este nuevo acero.

A todo esto hay que unir una necesidad real por parte de la empresa por alcanzar nuevos mercados objetivo que, dada la situación actual de crisis global, pudieran ayudar a paliar esta situación anómala y adversa en la que se encuentra el mercado del acero.



## **3. Introducción**

### **3.1. Objetivos del proyecto**

El objetivo de este trabajo es la consecución de un acero que cumpla con los requisitos de la calidad S355J2 +AR según el estándar europeo EN 10025 y libre de defectos superficiales.

Para ello partiremos de un acero microaleado con Mn y V, fabricado en EAF seguido de un proceso de colada continua y de un posterior trabajo de laminación en caliente hasta conformar diversos perfiles estructurales. Son dichos perfiles los que se espera que cumplan con los requisitos de la calidad S355J2 +AR

### **3.2. Alcance del proyecto**

Durante este estudio tendremos en cuenta no solo la composición química de nuestros aceros sino también las características mecánicas y aspecto superficial de los perfiles laminados, siendo estos dos factores claves en la consecución de los objetivos de este trabajo. Por este motivo, se tendrán en consideración los requisitos en cuanto a calidad superficial marcados por el estándar europeo EN 10163-3

Del mismo modo se tendrán a consideración aspectos del proceso industrial de fabricación dado que el logro del objetivo de este trabajo debe alcanzarse dentro de un entorno industrial específico, el cual se detallará de forma resumida los siguientes apartados.

### **3.3. Antecedentes históricos**

Resulta innegable que la historia y cultura de la civilización corre pareja a la del hierro y el acero y podemos decir, por tanto, que se trata de un material clave en nuestro desarrollo.

Existen pruebas documentadas que ya entre los años 4000 y 3000 antes de nuestra era las gentes del Antiguo Egipto ya contaba con herramientas de hierro, pero es al pueblo hitita al que se considera como la primera civilización en desarrollar procesos siderúrgicos para la producción de acero cuando tomaron la decisión de fabricar todas sus armas de este

material ya sobre el año 1200 a.C. Alrededor del año 1000 a.C. los griegos ya conocían el uso del hierro y lo extendieron a los países de la cuenca mediterránea ampliándose posteriormente gracias al comercio del hierro impulsado por los fenicios.

Además de en su forma meteórica, el encuentro del hombre con el hierro fue seguramente casual, al encontrarlo entre los restos de los hogares ya que, encontrándose este en forma de rocas con alto contenido férrico, la acción del monóxido de carbono pudo haber permitido la eliminación del oxígeno de los óxidos de hierro dejando en los restos de la fogata pequeños trozos de hierro.

Pero la metalurgia del hierro, y por ende la del acero, tuvo que abrirse un duro camino dado que durante cerca de dos milenios la metalurgia del cobre y del bronce habían sido preferidas frente a la del hierro. Desgraciadamente, el hierro que se podía fabricar era un hierro dulce y, pese a que ya se conocían técnicas para convertir la superficie de hierro forjado en acero como por ejemplo, envolver dichas superficie en carbón y mantenerlo durante horas al rojo vivo (cementación), el metal resultante tenía en su gran mayoría peores propiedades que el bronce.

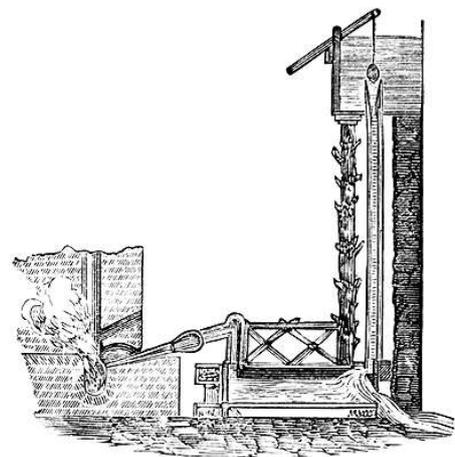
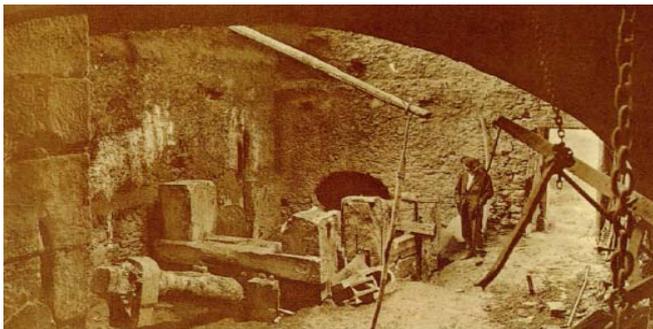
Nuestros antepasados metalúrgicos se las ingenieron para, reproduciendo todo lo que la casualidad les había mostrado, poner a punto la reducción directa del mineral. Rodeaban éste totalmente de carbón de leña y provocaban, de esta forma, el paso del óxido de hierro a hierro. Se ha de advertir que este proceso de reducción directa del mineral, tan simple, se mantuvo en la humanidad durante muchos siglos. De hecho, incluso a principios del siglo pasado, este proceso rudimentario de producción del hierro se ha observado en algunas tribus africanas. Los métodos rudimentarios de que disponía el hombre primitivo para activar la combustión en su pequeño horno, construido en el suelo, no permitían lógicamente obtener una temperatura lo suficientemente elevada para fundir el metal. En su lugar obtenían una masa esponjosa, pastosa, mezcla de hierro y escoria que había que martillar repetidamente al rojo vivo, para así eliminar la escoria y las impurezas. Una pequeña recreación de lo descrito se puede observar en la Figura 3.1, donde se pueden ver los primeros hornos y la forma de trabajar este acero.



*Fig. 3.1 Recreación de la forma de trabajar el acero los antiguos siderúrgicos*

Es a partir de la Edad Media cuando, ya siendo común el uso del hierro, cuando los esfuerzos siderúrgicos se encaminaron hacia la mejora de estos procesos pasando de esos pequeños hornos a procesos indirectos. Por una parte se desarrollaron los hornos hasta llegar a nuestro horno alto, donde más adelante se sustituyó el carbón de leña por la hulla, y más concretamente por el cok. Por otra parte, de forma más paulatina, se fue aumentando las alturas de las hornos, con lo que, y precisamente aprovechando las características resistentes del cok, se podía aumentar las cargas de los mismos y en consecuencia su producción. El tercer paso lo constituye todo el desarrollo para mejorar la marcha del horno mediante el aumento de la ventilación primero y el calentamiento del aire soplado después. De todos estos pasos, resultarían nuestros actuales altos hornos.

En esa época, en nuestro país, cabe destacar el desarrollo en la producción del acero logrado por los árabes que invadieron la Península Ibérica. Es de todos conocido la fama del acero producido en Toledo y, se considera que fue allí donde se desarrollaron las técnicas para alcanzar el también famoso acero de Damasco conocido por su elevada dureza y su filo “casi eterno”. También durante la Edad Media se produce otra gran avance dentro de la siderurgia ibérica, concretamente en dos regiones, Cataluña y País Vasco. Se instalan en estas zonas por un lado las fargas catalanas y por otro las ferrerías vascas gracias en gran medida a la presencia tanto de agua motriz, mineral y combustible. En la Figura 3.2, se muestra una antigua ferrería vizcaína que nos hace tener una idea de la tecnología utilizada en la época.



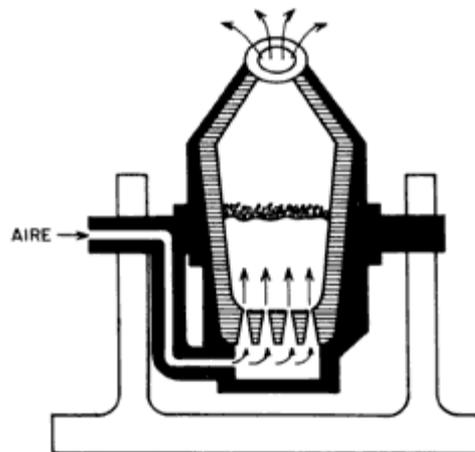
*Fig. 3.2 Antigua ferrería vizcaína (Lebario) y Esquema de una farga Catalana*

Las maseras, bloques de hierro obtenidas en las fargas catalanas posteriormente moldeados y forjados por el “martinet”, así como sus productos resultantes fueron exportados a toda Europa. La propia técnica conocida como forja catalana se extendió por todo el mundo, perdurando en muchos países hasta incluso a comienzos del siglo XX. Otro

tanto ocurría con las agoias obtenidas en las ferrerías mayores vascas. La calidad de sus productos forjados permitió un comercio floreciente de exportación al resto de Europa. Para tener una idea de la importancia de esta industria, basta saber que en el siglo XV existían en Vizcaya y Guipúzcoa más de 300 ferrerías y en Cataluña más de 150 fargas.

Los esfuerzos para llegar a transformar el hierro colado o arrabio líquido en acero fueron realmente notables y un gran avance se produjo durante la Revolución industrial con la aparición del convertidor Bessemer.

En 1855, Sir Henry Bessemer desarrolló lo que en esencia es un una especie de crisol forrado de refractario donde se inyecta aire a alta presión soplado desde la parte inferior. Es este aire que, al pasar a través del arrabio líquido el que logra la oxidación del carbono además de elevar la temperatura por encima del punto de fusión del hierro. Se produce así una reducción del contenido de carbono reaccionando además este oxígeno con las impurezas del arrabio produciendo una escoria menos densa que asciende y flota en la superficie del acero líquido aumentando la calidad de éste.



*Fig. 3.3 Convertidor Bessemer*

A partir del siglo XVIII nuestra estrella comienza a declinar. Seguramente provocado por el poco interés en los altos hornos como alternativa a las excelentes marchas de la farga catalana y de la ferrería vasca.

Bessemer tuvo serios problemas al desarrollar su convertidor a nivel industrial. El arrabio obtenido de muchos minerales nativos de Inglaterra y Europa era rico en fósforo a diferencia del que Bessemer utilizó en sus experimentos. La pared de su convertidor estaba recubierta de refractarios ácidos (ricos en óxido de silicio) los cuales entorpecían la eliminación del fósforo del arrabio. Fue poco después cuando Thomas y Gilchrist, en 1873,

completaron este importante desarrollo al conseguir convertir el hierro colado de alto contenido en fósforo en acero de calidad, utilizando un convertidor similar pero con revestimiento básico.

Los avances en siderurgia se fueron sucediendo como en 1864 con el desarrollo del horno Martin-Siemens, que permite ya la utilización de chatarra en grandes cantidades que el convertidor Bessemer dejaba sin empleo.

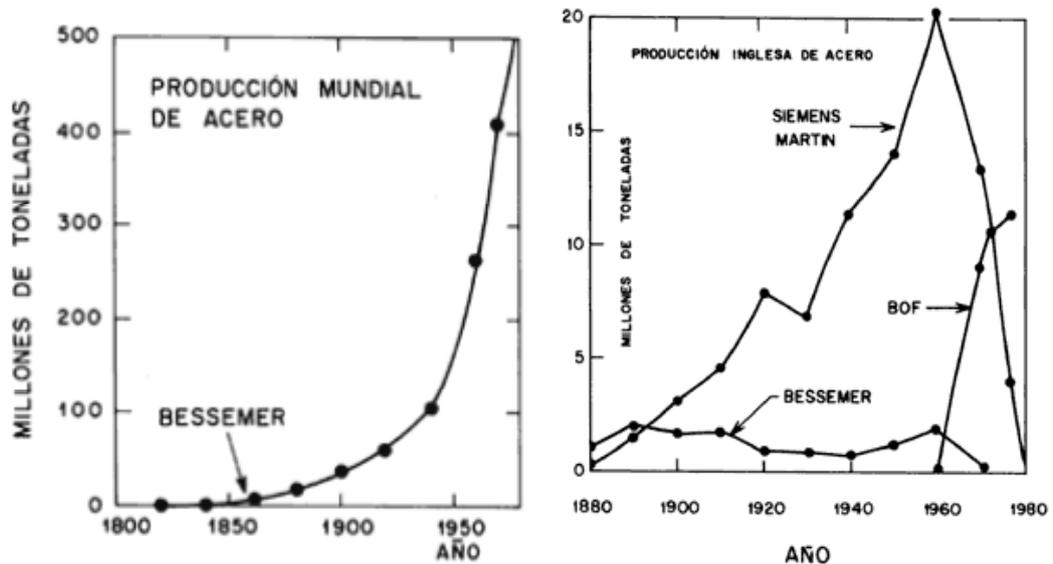


Fig. 3.4 Producción mundial de acero y en Inglaterra hasta los años 80

El siglo XIX fue igualmente fértil en el desarrollo de tecnologías de transformación del acero producido, tales como una amplia serie de técnicas de laminación para obtener productos planos y largos (chapas, vigas, carriles, tubos...), así como en el desarrollo de máquinas y equipos de amplia aplicación en la siderurgia.

Ya prácticamente en el siglo XX, cabe destacar el desarrollo del horno eléctrico de arco, que dadas sus ventajosas características fue variando la posición preponderante de los convertidores más tradicionales.

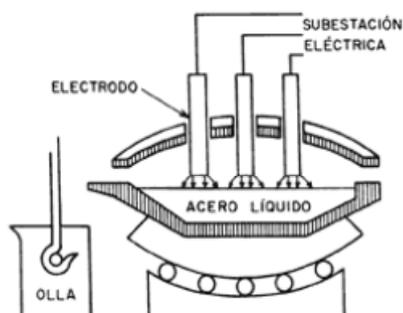


Fig. 3.5 Esquema de un EAF

Volviendo a nuestro país, se tienen datos de que el primer horno alto fue el que funcionó a partir de 1832 en Heredia (Málaga), seguido del construido en Guriezo (Cantabria) por la sociedad bilbaína “Ybarra, Mier y Cia”, los mismos que ganarían, en la Exposición Mundial de París de 1855, la medalla de oro por el hierro fabricado en los hornos altos de la fábrica “Nuestra Señora del Carmen” (El Carmen) de Baracaldo.

Los minerales hematites bajos en fósforo existentes en el anticlinal de Bilbao constituían las mejores minas europeas, y eran especialmente adecuados para el empleo del convertidos Bessemer, estando además excelentemente comunicados por ferrocarril y cable aéreo con los cargaderos de la ría y puerto de Bilbao. En el quinquenio 1866/70 se produjeron un promedio de 159.000 t de mineral/año, producción que llegó a la astronómica cifra para la época de 5.487.000 t mineral/año de promedio en el quinquenio 1896/1900.

El 26 de junio de 1901, las sociedades La Vizcaya, Altos Hornos de Bilbao y La Iberia, esta última dedicada a la producción de hojalata, acuerdan integrarse en una nueva compañía denominada Altos Hornos de Vizcaya (AHV). AHV lideró el sector siderúrgico español hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX. La siderurgia atravesó por etapas de diferente esplendor, llegando a alcanzarse en 1929 la producción del millón de toneladas de acero, que disminuyeron a la mitad en 1940, tras la guerra civil.

El 15 de junio de 1950 el Gobierno dictó un decreto encargando la construcción de ENSIDESA, en Avilés, que arrancó con sus hornos altos en 1957, 1958, 1966 y 1969, pasando a ser la primera siderurgia del país.



*Fig. 3.6 Operarios trabajando en la construcción de la planta de altos hornos de ENSIDESA en Avilés 1955*

Cabe destacar que por otra parte, que en España se instaló en 1904 el primer horno eléctrico para producción de acero en Araya (Álava), casi un año antes de que en Estados Unidos se instalase su primer horno eléctrico en Siracusa (estado de Nueva York). En 1960 arrancó la primera instalación española de colada continua en San Adrián del Besos, Barcelona. Con el horno eléctrico y la colada continua se originó el concepto de miniplanta, principalmente para la producción de redondos para hormigón. La presencia de las miniplantas en España ha significado una importante contribución a la producción global de la siderurgia española.

### **3.4. El acero en la industria**

Las consideraciones técnicas, analizadas desde la Ciencia y la Ingeniería, pueden no bastar para explicar los factores que determinan que un material sea elegido para una determinada aplicación. El campo de aplicación de cada material está en constante evolución y es función de una amplia variedad de criterios técnicos, económicos, industriales, sociales, culturales, geográficos e incluso políticos. La utilización de un material por tanto, vendrá determinada por su capacidad para cumplir, de acuerdo con los criterios antes aludidos, las funciones que el producto final requiere relacionadas con sus condiciones de diseño, fabricación, uso y el cada vez más importante aspecto de su disposición final, por ejemplo el reciclaje.

La elección de un material en la industria se rige por unos puntos básicos tales como sus funciones mecánicas o estructurales (resistencia, deformación, desgaste...), además de otras más técnicas (composición química, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, aislamiento térmico o acústico...) y de la fabricación (maquinabilidad, ensamblaje, soldabilidad, conformación...). No obstante los conceptos económicos (coste unitario, disponibilidad, coste de fabricación, estabilidad de suministro y coste...) o de tipo socioeconómico (seguridad de uso, bajo consumo de energía, reciclabilidad, adaptación a los hábitos culturales...) son cada vez más claves en la decisión del uso de un material.

El acero es uno de los más importante, multifuncional y adaptable de los materiales, estando presente y jugando un papel esencial en infinidad de sectores de aplicación. Este material ha contribuido notablemente al desarrollo y progreso de la humanidad y todo parece indicar que mantendrá esta hegemonía en el futuro.

El acero es un material metálico, concretamente una disolución sólida de carbono en hierro aleado además con otros elementos metálicos (manganeso, titanio, cromo, níquel, molibdeno...) y no metálicos (silicio, fósforo, azufre...). El elemento más importante de aleación es, sin lugar a dudas, el carbono y alterando su contenido y la de los otros elementos de aleación, junto con otras variables, pueden obtenerse las características deseadas del acero.

El acero está presente en todo cuanto nos rodea y ello gracias a sus excelentes atributos entre los que podemos citar:

- Excelentes características mecánicas y estructurales, a considerar en relación con su peso requerido.
- Excelentes características técnicas y de fabricación, que hacen que el material sea fácil de conformar en caliente y frío, fácil de mecanizar y ensamblar por soldadura u otros procesos, fácil de proteger contra la corrosión a través de alteraciones en su composición como los aceros inoxidable o por revestimiento y pintado como el galvanizado, la chapa prepintada, la hojalata o el electrocincado.
- Bajo coste unitario, observable cuando lo comparamos con el de otros materiales alternativos y consideramos los pesos requeridos para obtener iguales prestaciones. De igual manera, precisa de un menor consumo energético (por ejemplo, un 25% del necesario para producir aluminio). A modo comparativo, para obtener prestaciones equivalentes, el aluminio a emplear es 2,8 veces más caro que el acero, y materiales poliméricos 3,8 veces más.
- Alta disponibilidad, siendo su producción 20 veces superior a la totalidad del resto de los materiales metálicos no féreos. El elemento básico, el hierro, constituye del orden del 5,6% de la corteza terrestre, siendo una materia prima de suministro seguro.

- Material comparativamente estable, en lo relativo a la reproducibilidad de sus características, que su controlado proceso de fabricación garantiza.
- Material altamente adaptable a los requerimientos que se precisan. Existen más de 2.000 grados de acero estandarizados, de los que 1.500 se consideran de calidad especial. Importantes controles de su estricta composición, de su proceso y evolución metalúrgica (microestructura, tamaño de grano, proporción y estado de fases...), así como tratamientos térmicos o de otro tipo posteriores, permiten obtener el acero preciso (normalizado o desarrollado específicamente). La industria del acero cuenta con una enorme experiencia acumulada.
- Respetuoso con el medio ambiente, destacando su facilidad para el reciclaje. Su carácter magnético permite su fácil separación y el empleo obligado del acero reciclado o chatarra para la producción de nuevo acero, hace que su tasa de reciclabilidad sea la mayor de todos los materiales.

Por otro lado, las principales desventajas que presenta el acero son la corrosión u oxidación y el desgaste. También se puede destacar como desventaja del acero, la degradación física (pérdida o ganancia de material, aparición de grietas, deformación plástica, cambios estructurales como transformación de fase o recristalización...) debido al movimiento entre la superficie de un material sólido y uno o varios elementos de contacto.

La diversidad de grados de aceros, normalizados o específicos, da idea de la extensión de su ámbito de aplicación y de sus posibilidades de desarrollo para cubrir las diferentes exigencias, en competencia con materiales alternativos. Dichas posibilidades de desarrollo deben considerarse en cada sector de aplicación y en cada caso concreto.

Se podrían analizar muchos sectores de forma detallada, como el sector del automóvil, el del envase y embalaje, los bienes de equipo, la construcción, los electrodomésticos..., en todos ellos se han producido nuevos desarrollos en los procesos de fabricación, que además de mejorar la calidad y reducir el coste, se han traducido en una mejora de los productos fabricados. Basta recordar la reducción de peso de los envases de hojalata, con la reducción consiguiente de su coste unitario, consecuencia de la mejor calidad del acero (características mecánicas, embutibilidad, planitud, constancia de espesor...). La hojalata, como material para la fabricación de los envases, supone habitualmente del orden del 60% de su coste total. Debido a la reducción de espesor de la hojalata, hoy es posible fabricar un 60% más de envases de un tipo corriente (caso de envase para un 1kg de productos alimenticios) por tonelada de hojalata: 13.500 envases actualmente frente a los 6.700 en 1960. Una mejora importante se ha efectuado también en el revestimiento de la hojalata, con reducción del espesor de la capa de estaño. Mejoras de proceso en la fabricación del acero, en la desgasificación, en la colada continua y en la

laminación en caliente y frío, así como el empleo moderno del recocido continuo, han revolucionado el comportamiento de las nuevas hojalatas.

Nuevos procesos de revestimiento (galvanizado, galvanizado prepintado, revestimientos zinc-aluminio...) así como mejoradas calidades del acero base han mejorado infinidad de productos empleados en la construcción y la industria. Aceros estructurales de alta resistencia, elaborados con procesos mejorados de laminación, por ejemplo laminación termomecánica, permiten optimizar las posibilidades de construcción de edificios y estructuras en acero, reduciendo sensiblemente el peso y coste de las mismas, simplificando el montaje y mejorando las prestaciones. El acero puede además formar parte de productos más complejos, desde su esencial contribución al hormigón y al hormigón pretensado, hasta diferentes composites y productos sándwich con materiales aislantes para reducir vibraciones y ruidos.



*Fig. 3.7 Vista aérea de las instalaciones de una acería de Celsa*

## **3.5. Proceso siderúrgico**

### **3.5.1. Métodos de producción del acero**

La reorganización de la siderurgia ha representado una ocasión para desarrollar procedimientos de producción más económicos, mientras se aprovechaban las propiedades del acero. Una de las ventajas del acero consiste en la posibilidad de reciclarlo completamente, sin alterar sus propiedades. Hay que subrayar que más de una tercera parte de la producción mundial de acero procede del reciclaje de chatarras. Desde este punto de vista, no se consideran las chatarras como residuos sino como subproductos, y

luego materias primas. Uno de los principales residuos que se generan a la hora de la producción del acero, son las escorias, que pueden ser reutilizadas en el proceso de producción de cemento o en obras públicas, disminuyendo la tasa de generación de residuos e incrementando la productividad de la propia empresa.

Actualmente, la producción de acero se canaliza mediante los siguientes métodos productivos:

- Siderurgia integral: partiendo del mineral de hierro y siguiendo la secuencia “alto horno – conversión – metalurgia secundaria” llega a la obtención, mediante colada continua o convencional, del acero. Aproximadamente el 60% de la producción mundial de acero se obtiene atendiendo a los planteamientos de la siderurgia integral.
- Acería eléctrica: partiendo de la chatarra o los prerreducidos, como materias primas fundamentales, utiliza el horno eléctrico y la metalurgia secundaria como etapas esenciales del proceso de obtención de acero. El 33% de la producción mundial de acero se extrae según esta alternativa productiva
- Acería Martin-Siemens: aunque ha quedado fuera del mercado en regiones con tecnología siderúrgica avanzada (Unión Europea, Japón, Corea del Sur, USA o Canadá), aún existe en las repúblicas de la antigua Unión Soviética, Polonia, Rumanía, Turquía, India y China. La acería Martin-Siemens puede utilizar como materias primas: chatarra, pre-reducidos o arrabio del alto horno. La participación de esta alternativa en la producción mundial de acero alcanza aún cotas significativas situadas en torno al 7% del total.
- Otros procesos: generalmente alternativos a la reducción del mineral de hierro en alto horno y a la obtención directa del metal afinado en fase líquida. Por el momento, los niveles de producción alcanzados por estas alternativas tan solo alcanzan el 1% de la producción mundial de acero.

### 3.5.2. Siderurgia horno eléctrico

Pese a que tal como se ha comentado existen diferentes vías para la fabricación del acero, nos centraremos, durante este trabajo, en la acería eléctrica dado que es en este tipo de acería en la que se han desarrollado las pruebas que componen la base de este trabajo.

Podemos decir que la principal función del EAF es la fusión de la carga (chatarra) la cual se logra mediante la energía eléctrica aportada gracias a los electrodos del horno así como por la energía química lograda gracias a la inyección de oxígeno y gas natural inyectado a través de quemadores instalados en las paredes del propio horno. Un esquema general de las operaciones realizadas en esta primera etapa sería: carga de chatarra, fusión de la carga, oxidación y desfosforización, calentamiento y colada. Todas estas operaciones así como las posteriores realizadas en el horno cuchara, serán posteriormente tratadas con

mayor detalle en el capítulo 4 centrándonos concretamente en las instalaciones de la planta de trabajo.

### 3.5.3. Siderurgia secundaria. Horno cuchara.

Podemos definir como Siderurgia secundaria al conjunto de procesos que transforman el acero de un horno eléctrico (o convertidor BOF) en un líquido calibrado en composición y temperatura y que se encuentra preparado para la solidificación. En muchas ocasiones se denomina también siderurgia de cuchara dado que estos procesos se desarrollan en el citado horno cuchara.

Es en esta parte del proceso donde se produce un:

- Control de los elementos de aleación
- Control de las impurezas no metálicas (P, S) o de los gases (O, N, H)
- Calibración de la temperatura

Para ello se siguen técnicas de inyección de polvos (elementos de aleación, metales de tierras raras) que actúan como desoxidantes ( $\text{CaSi}_2$ , Mg, Fe-La) o desulfurantes ( $\text{CaC}_2$ ,  $\text{CaSi}_2$ , Mg, Fe-La) así como técnicas de vacío para decarburación y desgasificación.

Se logran beneficios tanto desde el punto de vista productividad y costes como de la calidad química y estructural del acero, tales como:

- Optimización de las operaciones de acería.
- Mayor aprovechamiento de los equipos productivos
- Disminución de los tiempos de colada tap-to-tap
- Flexibilidad óptima
- Trabajo más fácil de las máquinas de colada continua.
- Ahorro de energía gracias al mejor control de la temperatura y el aprovechamiento eléctrico que conlleva.
- Mayor recuperación de ferroaleaciones y posibilidad de utilizar ferroaleaciones más baratas.
- Posibilidad de encajar con precisión la composición química del acero fabricado.
- Capacidad de alcanzar contenidos ultrabajos de carbono.
- Posibilidad de desfosforar a fondo.

Se realizan con gran facilidad las operaciones básicas (desoxidación y desulfuración) de la segunda etapa (fase reductora) de la colada.

Se puede alcanzar, con los equipos adecuados, desgasificación completa. La eliminación del oxígeno ya sea por vacío o por purga permite la eliminación de los óxidos así como la flotación de inclusiones hacia la escoria.

### 3.5.4. Materias primas utilizadas en la producción del acero

Se consideran como materias primas de un proceso a aquellos materiales de entrada al mismo y que, tras su transformación, se constituyen en el producto o material de salida del citado proceso.

A continuación están referidas las materias primas requeridas en los procesos de producción de arrabio y acero, y que son fundamentalmente: las materias primas férricas (minerales de hierro, chatarra y prerreducidos), las materias primas combustibles y agentes reductores (carbón, cok siderúrgico, gases y otros combustibles), las materias primas fundentes (caliza, dolomía, cal elementos para aleación...).

#### 3.5.4.1. Minerales de hierro

El hierro, elemento básico constitutivo del acero, se encuentra en abundancia en la naturaleza bajo la forma de minerales de hierro extraídos en minas. Los minerales del hierro son compuestos de hierro y oxígeno (óxidos diversos o carbonatos de hierro) junto con otros elementos o compuestos que se consideran impurezas (la ganga).



*Fig. 3.8 Mineral de hierro recién extraído de la mina*

El mineral de hierro es una materia prima fundamental para la siderurgia integral, basada en el proceso del horno alto. Es preciso proceder a una reducción de los minerales, con descenso de las impurezas hasta los niveles requeridos.

Existen diversos tipos de minerales de hierro, según varían fundamentalmente los compuestos de hierro y oxígeno:

- magnetita, basada en el compuesto óxido ferroso-férrico  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- hematites, basada en el compuesto  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- limonita, basada en un óxido ferroso-férrico hidratado  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$
- siderita, constituida por carbonato de hierro.

Las riquezas en hierro de estos minerales varían según su composición, así como su aspecto físico, características, impurezas más habituales...

Las reservas mundiales de minerales de hierro garantizan razonablemente la estabilidad de suministro y de precios en los años venideros. La extracción, enriquecimiento y preparación de los minerales son actividades propias de la minería. Se enriquece el mineral reduciendo su contenido en ganga (lavado, separación por flotación, magnética...) y se prepara mediante operaciones de trituración y cribado, obteniéndose:

- Minerales gruesos, que podrían ser usados, en las proporciones y calidades precisas, como materia prima del horno alto. Se exige, además una granulometría controlada, una composición química determinada: ley o contenido de hierro, contenido de álcalis o impurezas (azufre, fósforo...) bajo estrictos límites, composición de la ganga y basicidad de la misma (coeficiente del escorificable ácido y básico), características físico-químicas necesarias (reductibilidad...).
- Minerales finos y concentrados (ultrafinos) destinados a los procesos de aglomeración que a continuación figuran (no pueden usarse directamente en el horno alto). Según el proceso, se precisan controles estrictos de la composición química y de las características físico-químicas y granulométricas, fundamentalmente.

Habitualmente se utilizan minerales diversos y se procede a su mezcla u homogeneización en grandes pilas o parvas de homogeneización, que además cumplen misiones de parques de almacenamiento controlado. Dentro de los procedimientos de aglomeración, se distinguen la sinterización y la pelletización, un ejemplo de ellos se puede ver en la Figura 3.9, donde se puede ver uno de los diferentes tamaños y formas de los pellets más comunes.



*Fig. 3.9 Pellets de hierro extraído del mineral*

Actualmente el comercio mundial de mineral de hierro (básicamente constituido alrededor de la hematites,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y la magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) registra un crecimiento ligeramente

superior a la evolución de la producción siderurgia. Esta tendencia va acompañada por un aumento de la calidad de los minerales importados. Como consecuencia, se registra una devaluación de la yacimientos locales cuya composición (contenido de hierro) o volumen de reservas se alejan de los niveles de rentabilidad establecidos por el mercado.

### 3.5.4.2. Chatarra

La materia prima más utilizada en la industria del acero es la chatarra que cubre del orden del 40% de sus necesidades globales. Su empleo varía según el proceso de fabricación utilizado; en el caso de la fabricación del acero por convertidos LD representa del orden del 20 al 25% de la materia prima, mientras que en el proceso por horno eléctrico puede emplearse hasta en un 99%. En ambos casos se requiere necesariamente utilizar chatarra para fabricar nuevo acero; de ahí que el reciclaje del acero sea muy importante en la producción del nuevo acero. En la Figura 3.10 se pueden ver algún ejemplo de pilas de chatarra utilizadas en procesos de fabricación de acero.



*Fig. 3.10 Pilas exteriores de chatarra*

La chatarra utilizada en la fabricación del acero es a su vez clasificada en diferentes calidades que permiten obtener grados de acero diferentes. La calidad de la chatarra puede definirse por:

- Su contenido en hierro, estrictamente relacionado con su rendimiento metálico en el horno.
- Su contenido en elementos residuales, tales como cobre, cromo, níquel molibdeno, estaño, cinc..., que pueden afectar de diversa manera, según el tipo de acero y producto a fabricar.
- Sus condiciones físicas, tales como densidad, distribución de tamaños...

La chatarra debe cumplir además otros requerimientos, tales como condiciones de seguridad (ausencia de elementos como depósitos cerrados que puedan ocasionar explosiones, carencia de materiales peligrosos e inflamables, no estar radiactivamente contaminada, etc...) y de limpieza (ausencia de elementos estériles no férreos), y encontrarse debidamente separada y clasificada para facilitar su almacenamiento, control y manipulación posterior.

Uno de los mayores problemas lo constituye la evaluación de la calidad de la chatarra (y consecuentemente de los proveedores de la misma). Además de los procedimientos de análisis convencionales, se utilizan métodos de evaluación estadística a partir de los datos de operación de las acerías, así como ensayos de fusión en sus propios hornos eléctricos o empleando hornos eléctricos piloto de varias toneladas de capacidad, o de muy pequeña capacidad en el laboratorio. Para evaluar la calidad de la chatarra se efectúan en estos ensayos balances de masa, considerando todos los materiales de entrada y salida. En la Figura 3.11, se puede ver como una vez clasificada la chatarra se avoca en el foso determinados y separados entre sí para su posterior utilización selectiva.



*Fig. 3.11 Fosos y clasificación de chatarra*

En otras épocas, la siderurgia disponía de cantidades apreciables de chatarra de calidad procedente de rechazos internos (principalmente despuntes de los trenes de desbaste, mermas, etc...). Pero, afortunadamente, se ha producido una sensible mejora de los rendimientos de los diferentes procesos consecuencia de los nuevo procesos de fabricación y de la mejora de las operaciones mejora del control de los procesos, lo que ha requerido aportaciones de chatarra procedentes del exterior y con mayores problemas cualitativos, que no así económicos.

Cabe destacar la chatarra procedente de la recuperación de los materiales férricos que están incorporados en los residuos sólidos urbanos (RSU). Entre estos materiales se encuentran los envases de hojalata. La exclusiva característica magnética del acero hace que las latas usadas puedan ser fácil y eficientemente separadas del conjunto de los RSU por medio de operativos separadores magnéticos. Ello facilita el reciclaje de la hojalata y contribuye a respetar el medio ambiente y la legislación correspondiente.

En función de la procedencia y de la calidad a conseguir, se emplean diversos tratamientos físicos, tales como el desmontaje previo de elementos (como el caso de automóviles usados, electrodomésticos, armas, etc...) la trituración, cribado y separación magnética, compactación... Además, y si la calidad debe aún mejorarse eliminando elementos contaminantes, se puede considerar el empleo de procedimientos químicos tales como métodos electrolíticos, disolución o métodos criogénicos. En cada caso y dependiendo del uso final, será justificable la adopción de uno de estos procedimientos especiales y la oportunidad, o no, de su coste de tratamiento. En la Figura 3.12, se muestra el llenado de una cesta de chatarra tratada, clasificada y específica para la calidad de acero a fabricar posteriormente.

El consumo de chatarra desde finales del siglo XX, ha experimentado un aumento en los principales países industrializados como consecuencia del crecimiento de las acerías eléctricas.



*Fig. 3.12 Introducción de la chatarra determinada dentro de una cesta de carga de horno eléctrico*

### 3.5.4.3. Carbón

El carbón es una roca sedimentaria de estructura heterogénea que proviene de la fosilización. Desde el punto de vista de combustible sólido, el carbón contiene elementos propiamente combustibles como el carbono, el hidrógeno y no combustibles tales como el agua, el nitrógeno y el oxígeno, así como un resto de materias inorgánicas denominadas cenizas. Una clasificación convencional de los carbones fija los tipos de carbones sobre la base de su contenido en carbono, volátiles y potencia calorífica, relacionado con su evolución geológica: antracitas, hullas, lignitos y turbas.

La aplicación actual del carbón en la siderurgia se basa en su empleo como materia prima para la producción del cok siderúrgico y en su inyección por las toberas del horno alto. Otros empleos son cuantitativamente minoritarios: antracita como combustible en plantas de sinterizar, carbón para la inyección en hornos eléctricos, etc...

Para la siderurgia integral es fundamental garantizar el abastecimiento de carbón para la producción de cok. La Figura 3.13 muestra un ejemplo visual de cok. Para la producción de acero se necesita cok siderúrgico como materia prima, que aporta la energía, el gas reductor y el necesario soporte mecánico de la carga férrea en el horno. Desde principios del siglo XXI, se asiste a una drástica reducción del consumo de cok por tonelada de arrabio, debido en gran parte, a la sustitución mediante otros combustibles tales como el gas natural o el fuel-oil, de sus funciones reductora y energética así como de mejoras tecnológicas en el control del proceso.



*Fig. 3.13 Ejemplo de cok siderúrgico*

### 3.5.4.4. Prerreducidos

Los prerreducidos son materiales cuyo contenido en hierro metálico supera el 92%. Son producidos mediante procesos de reducción en fase sólida del mineral de hierro con gases reductores tales como el monóxido de carbono, hidrógeno o gas natural. La gran

mayoría de los prerreducidos se utilizan como materia prima (carga fría) en hornos eléctricos anexos a las instalaciones de reducción directa debido a que durante su transporte, se producen alteraciones físico-químicas de la carga que provocan graves problemas en su manipulación.

#### 3.5.4.5. Escorificante y Fundentes

La ganga de los minerales y las cenizas del cok tienen elevados puntos de fusión (1.700 a 2.000° C) y se tienen grandes dificultades para fundir en el proceso del horno alto. Por ello se añaden otros productos denominados fundentes, con objeto de obtener una escoria de bajo punto de fusión (1.300 a 1.400° C) y reducida viscosidad, que absorba los elementos indeseables que contaminarían, en otro caso, al arrabio producido.

Los fundentes se emplean para obtener, las escorias adecuadas, en procesos como la sinterización, fabricación de arrabio en horno alto, fabricación del acero tratamiento en cuchara, etc... Hay que controlar su composición química, evitando impurezas no deseables, y su granulometría, además de otros aspectos relacionados con las peculiaridades de cada proceso. Los más importantes fundentes son la caliza, la dolomía, la cal, la dunita, así como la bauxita y el espato flúor de composiciones y usos diversos.

La calidad de las especificaciones químicas de los escorificantes ha adquirido en los últimos tiempos gran importancia ya que los bajos contenidos de azufre y fósforo que se exige a los aceros obliga a que las materias primas presenten cantidades mínimas de los elementos citados. Una de las materias más afectadas por esta tendencia es la cal, que es un escorificante típico en la siderurgia, tanto para el horno alto, como para el convertidor, el horno eléctrico o en las operaciones de la metalurgia secundaria. La Figura 3.14 muestra un ejemplo de cal utilizada como elemento adicionado al acero.



*Fig. 3.14 Muestras de cal antes de ser introducidas en el acero*

### 3.5.4.6. Ferroaleaciones

Son aquellos materiales compuestos, ricos en hierro y en otros elementos, empleados para ajustar la composición del acero o alearlo, mejorar sus parámetros del proceso de fabricación, desoxidar el acero...

Materiales tales como el ferromanganeso, ferrosilicio, ferrocromo, ferroniobio, ferrovanadio sirven para algunos de estos objetivos y sus características físicas y químicas serán función de su modo de empleo en cada proceso: fabricación de acero en convertidor LD o en horno eléctrico, metalurgia secundaria, etc... En la Figura 3.15, se muestran diferentes tipos de ferroaleaciones tales como el FeMn, FeSi y el FeV.

En este apartado, se podría aludir a otras materias primas, que aunque no sean propiamente ferroaleaciones, pueden también emplearse con objetivos similares a éstos, como mineral de manganeso, ilmenita así como también elementos desoxidantes como el aluminio y otros elementos de aleación como el níquel.



Fig. 3.15 Muestras de de algunos tipos de ferroaleaciones con diferente granulometría añadidos en la fabricación del acero, como son el FeMn, el FeSi y el FeV

### 3.5.4.7. Refractarios

Los refractarios, aún cuando no son propiamente materias primas, constituyen materiales de gran importancia en los procesos de fabricación del acero y en su coste.

Las reacciones que tienen lugar en los diferentes procesos requeridos para la fabricación del arrabio y del acero se efectúan en reactores, hornos o cucharas sometidos a altas temperaturas. Allí tienen lugar complejos procesos metalúrgicos, con reacciones químicas y fenómenos de todo tipo, que no podrían efectuarse sin el empleo de refractarios que protejan los equipos utilizados en esos procesos y en la manipulación de transporte de materiales a alta temperatura como el arrabio, el acero o las escorias.

Se trata de productos cerámicos compuestos y que son resistentes a las solicitaciones exigidas a alta temperatura. Dependiendo de esas exigencias, tales como niveles de temperatura, resistencia a cargas elevadas, permeabilidad o ataque por gases, resistencia al ataque o disolución por productos como el arrabio o la escoria a alta temperatura, protección o aislamiento térmico, se emplean diferentes refractarios, algunos de ellos de elevada sofisticación técnica y alto coste. Es normal que en determinados reactores como el horno alto, se emplee una elevada gama de estos productos en función de la zona del horno, de las solicitaciones que ahí se exigen y del diseño del mismo, teniendo como partida los objetivos de duración de campaña, coste, sistemas de refrigeración y control o tipo de proceso.

En el caso de las cucharas de transporte de arrabio, convertidores LD, hornos eléctricos y colada continua, se emplean refractarios cuya duración es menor y por tanto su consumo en kg/t de producto puede ser un importante factor de coste. No obstante, la eliminación o reducción de procesos de consumo masivo, como ocurría con los hornos Siemens, la mejora de los diseños de las instalaciones y de sus procesos caso de los paneles de refrigeración en los hornos eléctricos, así como el empleo de nuevos tipos de refractarios, ha supuesto una reducción importante y progresiva del consumo global de refractarios por tonelada de acero producido, con su incidencia en la reducción de costes y en el dimensionado y especialización de la industria de fabricación de refractarios.

Se emplea por tanto para múltiples aplicaciones una amplia variedad de refractarios, de forma o masas refractarias aplicadas por gunitado o colados, constituidos por compuesto óxidos, ligados de diferentes formas y obtenidos a altas presiones, basados en composiciones específicas, como refractarios de sílice, aluminosos, carburos de silicio, de magnesia-carbono, de carbono, de grafito, etc...

La Figura 3.16 muestra algunos ejemplo de estos refractarios, como son los refractarios de sílice y de alúmina.



*Fig. 3.16 Ladrillos refractarios con base de silicio y alúmina*

## 3.6. Influencia de los diferentes elementos aleantes

Existe gran cantidad de elementos que pueden adicionarse al acero como elementos de aleación, muchos de los cuales son adicionados para modificar las propiedades del acero mientras que otros son intrínsecos al material ya sea por las materias primas utilizadas o por el proceso utilizado.

En este apartado trataremos solamente aquellos elementos que hemos considerado claves en el acero que se tratará en este trabajo: Mn, V, Nb y Ti.

### 3.6.1. Manganeso

El manganeso que contienen los aceros procede de la ganga de muchas clases de minerales de hierro, que lo contienen en proporciones variables. Este elemento se elimina parcialmente en el curso de la fabricación del acero, pero dado que su presencia es útil para eliminar el azufre, combinándose con él en forma de sulfuros de manganeso, se añade en muchos casos cantidades suplementarias de manganeso al acero en el curso de su elaboración. El manganeso actúa también como desoxidante absorbiendo oxígeno de la masa del acero fundido y evitando que al desprenderse los gases, en la solidificación, se produzcan sopladuras.

El manganeso favorece el ataque de los refractarios por el acero fundido y por eso se producen muchas inclusiones de partículas de refractario en los aceros con fuerte aleación de manganeso.

El manganeso se incorpora al acero en forma de metal técnicamente puro o en forma de ferromanganeso, silicomanganeso, etc... y se considera como aceros aleados al manganeso los que lo contienen en proporciones superiores al 1,2%.

Los aceros austeníticos al manganeso, adquieren una resistencia al desgaste diez veces mayor a la de los aceros ordinarios de la misma resistencia mecánica a la tracción. Además, en general, el manganeso aumenta la resistencia a la tracción y eleva el límite elástico de los aceros.

Si los aceros no tuvieran manganeso no se podrían laminar ni forjar ya que el azufre presente se asociaría con el hierro formando los correspondientes sulfuros de muy bajo punto de fusión, los cuales a temperatura de trabajo en caliente funden, y al encontrarse envolviendo la estructura granular del acero, crearan zonas débiles y las barras o piezas se abren durante el proceso. En cambio, cuando el acero contiene manganeso, se forma sulfuro de manganeso que a esas temperaturas es plástico y no ocasiona problemas a esas temperaturas. Para tener la seguridad de que todo el azufre a formado sulfuros de

manganeso se suele recomendar que el porcentaje de manganeso sea, por lo menos, de unas cinco veces mayor que el contenido de azufre.

Como principales aplicaciones del manganeso como elemento de adición podemos citar que el manganeso se emplea como elemento de adición en proporciones del 1 al 3% para la fabricación de aceros indeformables. Tiene también una gran aplicación aleado en proporciones de hasta el 12% para la fabricación de aceros resistentes al desgaste (aceros Hadfield) muy utilizados para la fabricación de cruzamiento de vías, mordazas para máquinas trituradoras, revestimientos de molinos de bolas, etc...

### 3.6.2. Vanadio

El vanadio es un fuerte elemento desoxidante que cuya presencia en los aceros procede de su introducción voluntaria como elemento de aleación, aportándose generalmente en forma de ferrovandio. Tiene tendencia a formar partículas finísimas de carburo de vanadio ( $V_4C_3$ ) que quedan repartidas por la masa y que actúan como núcleos de cristalización durante la solidificación ( $Fe\delta \rightarrow Fe\gamma$ ). Una pequeña parte del vanadio que se añade al acero, se disuelve en la ferrita ( $Fe\alpha$ ) a la que endurece sin disminuir su tenacidad.

Como el vanadio ejerce una gran influencia en el crecimiento del grano, produce también una mejora en la tenacidad de los aceros. Ejerce también influencia en la resistencia a la fluencia durante las diez primeras horas, pasadas las cuales, y una vez precipitados los carburos, se comporta como un acero ordinario.

Precisamente por su tendencia a limitar el crecimiento de grano, confiere a los aceros una gran resistencia al sobrecalentamiento, cuando el acero se calienta por encima de la zona de tratamiento térmico (A2).

Este elemento impide el envejecimiento (que implica un aumento de la resistencia, ductilidad, alargamiento y fatiga) de los aceros bajos en carbono, especialmente los efervescentes ( $C \leq 0.18\%$ )

Con bajos contenidos de vanadio ( $V \leq 0.020\%$ ) mejora ostensiblemente la templabilidad de los aceros al carbono; con mayores contenidos, debido a la gran tendencia a formar carburos, con apropiación de carbono del propio material, la templabilidad bajará ligeramente.

Como principales aplicaciones del vanadio tenemos que este elemento se emplea en proporciones de 0,10 a 0,25% en la fabricación de aceros para muelles, de aceros indeformables para muelles y matrices, etc.. y en proporciones de 0,5 a 1% para la fabricación de los denominados aceros rápidos para herramientas.

### 3.6.3. Niobio

El niobio se incorpora a los aceros en forma de ferroniobio, una vez el acero se ha desulfurado perfectamente.

El niobio se emplea para elevar la temperatura límite de viscosidad de los aceros, elevándose por tanto al mismo tiempo, la resistencia en caliente. Con una aleación del 2% de niobio, se consigue elevar la resistencia a 500° de temperatura de un acero de 0,13% de carbono a 50kg/mm<sup>2</sup>, que es la más alta conseguida a esta temperatura.

### 3.6.4. Titanio

Se suelen añadir pequeñas cantidades de titanio a algunos aceros muy especiales para desoxidar y afinar el grano. Se incorpora a los aceros en forma de ferrotitanio, con alguna dificultad debido a su pequeña densidad y su facilidad para oxidarse.

El titanio tiene gran tendencia a formar carburos y a combinarse con el nitrógeno. Es esta tendencia a la formación de carburos lo que hace que el titanio disminuya la templabilidad del acero ya que disminuye el porcentaje de carbono de la austenita, llegando incluso a no templarse totalmente si el contenido de titanio es superior al 4%.

Un porcentaje de titanio del orden de 0,01 a 0,02% afina el grano de los aceros. Además, la temperatura a la que empieza a crecer el grano de los aceros al titanio es más elevada que la de los aceros calmados al aluminio. Un pequeño porcentaje de titanio eleva el límite elástico de los aceros de construcción bajos en carbono.

El titanio es uno de los mejores desnitrurantes conocidos. Como desulfurante puede reemplazar con ventaja al manganeso, equivaliendo 1% de titanio a 3% de manganeso. Sin embargo, como el titanio tiene mayor avidéz de oxígeno y nitrógeno es preciso prever una proporción mayor de la calculada para desulfurar, puesto que parte del titanio se emplea para neutralizar el oxígeno y el nitrógeno. Se emplea por tanto el titanio para purificar el acero de nitrógeno, oxígeno y azufre.

También se emplea el titanio para estabilizar el carbono, introduciendo una cantidad igual a cuatro veces el contenido de éste. Esta propiedad se aprovecha para la fabricación de aceros inoxidable y evitar así la corrosión intergranular que puede originar la presencia de cromo, y para la elaboración de aceros insensibles al envejecimiento después de laminar en frío.

## 4. Proceso de fabricación

Tal como se ha citado anteriormente, el objetivo de este estudio es la consecución de una determinada calidad de acero en un entorno industrial. Es por este motivo que hemos considerado necesario explicar todo el proceso de fabricación que interviene sobre el acero deseado. Será sobre este proceso sobre el que incidiremos al realizar los diferentes ensayos con la intención de optimizar en la medida de lo posible sus factores para conseguir finalmente la calidad de producto deseada.

Dado que la calidad de acero objetivo hace referencia a una calidad de producto final laminado, tendremos en cuenta no sólo el proceso propio de acería sino también el de laminación en caliente.

### 4.1. Disposición de la planta

Para un mejor entendimiento del proceso productivo de las plantas en las que se fabricará el acero motivo de este trabajo, consideramos conveniente representar la disposición de las mismas así como los diferentes procesos que se realizan en cada una de las plantas implicadas.

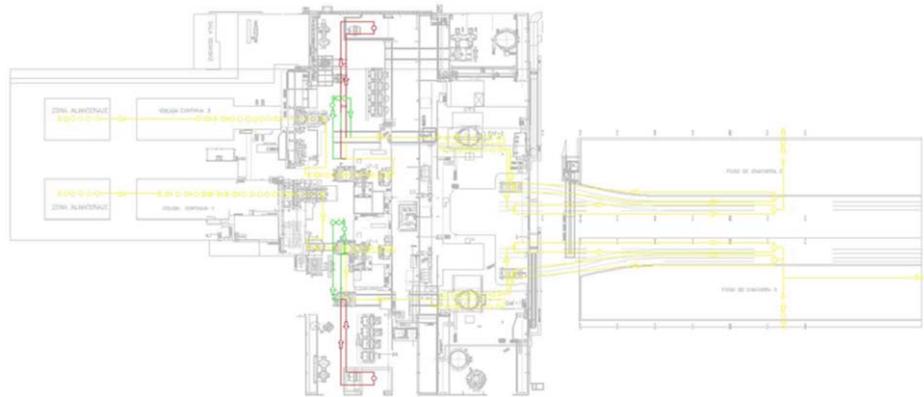


Fig. 4.1 Layout de la Acería

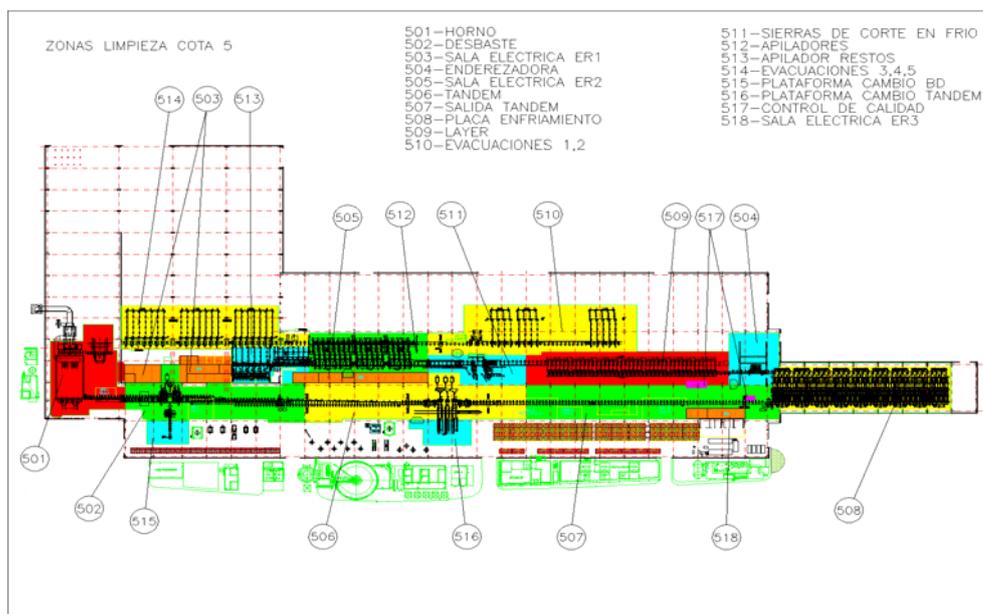


Fig. 4.2 Layout del tren de laminación

La planta industrial en la que se desarrolló este proyecto consta, tal como se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2 de una acería seguida de una laminación. Dicha acería consta a su vez de dos EAF seguidos de los correspondientes hornos cuchara y coladas continuas de seis líneas. El tren de laminación está formado por un horno de recalentamiento de gas, seguido por un conjunto de dos bloques de casetas de laminación con cilindros multicanal que permiten la fabricación de una extensa gama de perfiles estructurales.

## 4.2. Fabricación del acero.

### 4.2.1. Horno eléctrico

El primer paso en la fabricación del acero que nos atañe radica en la fusión de la carga de chatarra dentro del EAF.

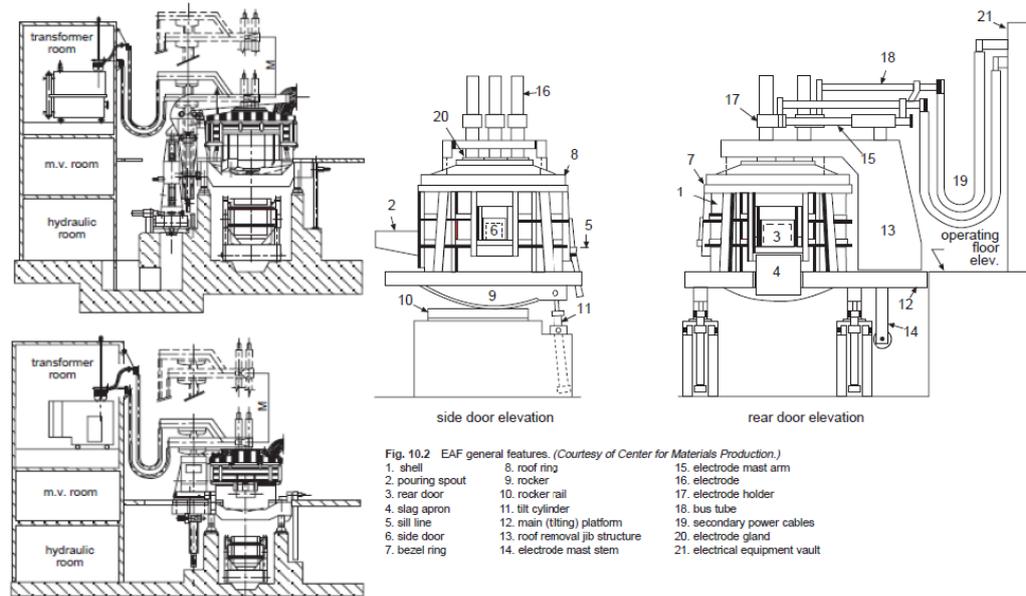
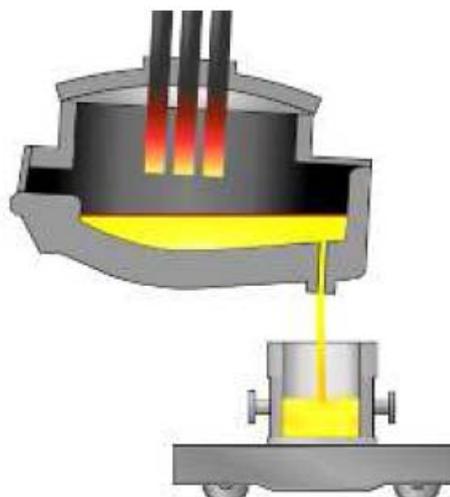


Fig. 4.3 Esquema de los diferentes elementos de un EAF

Dicho horno consta de los siguiente elementos:

- Cuba del horno, con el dispositivo de colada y el sistema de cierre del mismo. La cuba del horno se encuentra recubierta de refractario y, para la instalación de estudio, la capacidad de la misma es de 150t.
- Sistema de vuelco que permite la salida del material a la cuchara.
- Las paredes del propio horno, con paneles refrigerados por agua y fabricados de acero hasta la línea de escoria, donde son de cobre.
- La bóveda del horno, refrigerada también por agua y dotada de un sistema de un sistema de giro que permite realizar una apertura total de la parte superior del horno para permitir la carga de chatarra.
- Los electrodos de grafito, soportados en los brazos portaelectrodos, y que atraviesan la bóveda siendo los encargados de lograr el arco eléctrico.
- Sistema de regulación electrónica y de acondicionamiento hidráulico que permite el movimiento de los electrodos a gran velocidad para regular el arco eléctrico, manteniendo constante la corriente en el mismo.
- Sistema de cables flexibles que transporta la corriente eléctrica hasta los brazos portaelectrodos y unidos al embarrado de cobre que los conecta a su vez al transformador.
- El propio transformador eléctrico que permite la transformación de la corriente eléctrica de alta tensión (30000 V) a los voltajes de trabajo necesarios para formar el arco eléctrico (entre 250 y 1200V).
- La puerta del horno, utilizada para la operación de desescoriado.

- El EBT (Eccentrically-Bottom Tapping) que permite la colada del horno a la cuchara y que es un agujero colocado de forma excéntrica en la base del horno. Pese a que existen otros métodos de realizar el paso del caldo a la cuchara, el uso del EBT permite un paso libre de escoria, manteniéndose un remanente de acero con la escoria dentro del horno.



*Fig. 4.4 Proceso de vuelco a través del EBT*

En un horno como el de nuestro estudio, con una capacidad de 150t, la carga de chatarra realizada por la parte superior de la bóveda se realiza en dos etapas, cargándose primero una cesta que introduce aproximadamente 80t tras la que se inicia el proceso de fundido de la misma y que se sigue con una segunda adición de una nueva cesta con 75t más. Las 5 toneladas que sobran tras alcanzar las 150t son merma y remanente fundido que queda dentro del horno.



*Fig. 4.5 Proceso de carga de chatarra mediante cesta a través de la bóveda del EAF*

Como anécdota diremos que la energía necesaria para fundir la chatarra en un horno como el de la instalación de estudio consume tanta energía como la ciudad de Tarragona.

Además de la chatarra o el hierro prerreducido, las cestas de chatarra incluyen fundentes y agentes carbonosos (cal y carbón). De igual modo, además de la aportación de corriente eléctrica, también se inyecta oxígeno para facilitar la fusión de la chatarra. Muchos hornos cuentan también con quemadores de fuel o gas natural instalados en las puerta y paredes del mismo que contribuyen a facilitar el proceso de fusión.

Este proceso de fusión de la chatarra se completa con la fase de oxidación y defosforación mediante la continua inyección de oxígeno produciendo la formación de óxido de hierro. Este FeO sirve como elemento oxidante para oxidar el silicio, el manganeso, el carbón y el fósforo. Si tenemos una escoria convenientemente básica, el fósforo pasa a la escoria en forma de fosfato tricálcico y tetracálcico, completándose el proceso de defosforación.

Una vez tenemos fundido el caldo, el EAF bascula colando el metal fundido hasta la cuchara a través del citado EBT.

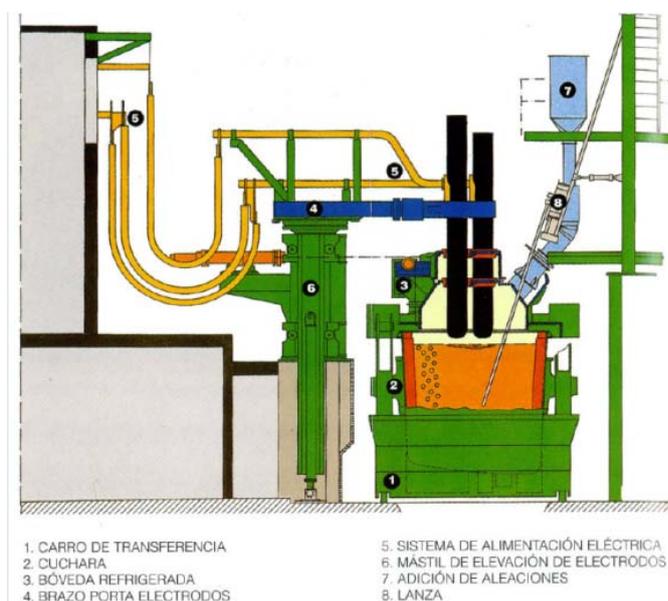


*Fig. 4.6 Vuelco de una colada a la cuchara a través del EBT*

#### **4.2.2. Horno cuchara**

Es en el horno cuchara donde se realizan los procesos de la denominada metalurgia secundaria. Estas operaciones que incluyen desde el ajuste preciso de los elementos, homogenización y control de la temperatura, desoxidación y desulfuración del acero hasta la

mejora de la limpieza del mismo, son necesarias para completar las operaciones de afino del acero que surge tras los 40-60 minutos de trabajo en el EAF.



*Fig. 4.7 Esquema de los equipos de horno cuchara*

Los principales elementos de la instalación del horno cuchara son:

- Equipo de calentamiento, por medio de arco trifásico con tres electrodos y prácticamente igual que la descrita para el EAF con la excepción que, en este caso, la cuba ha sido sustituida por la cuchara y que las potencias utilizadas son sensiblemente menores (alrededor de un 80-85% menores)
- Sistema de inyección de gas inerte, generalmente argón.
- Sistema de tolvas de ferroaleaciones que permiten la incorporación de las mismas al acero durante las operaciones de afino.
- Sistemas de toma de muestras y control de temperatura.

Dentro de las operaciones realizadas en el horno cuchara remarcaremos dos de extrema importancia en la fabricación del acero: la desoxidación y la desulfuración.

#### 4.2.2.1. Desoxidación

La desoxidación se presenta como una de las etapas imprescindibles en la producción de aceros. Esta operación supone la eliminación del oxígeno residual presente en el acero y se realiza después del vuelco de la colada del EAF. La eliminación de este oxígeno se realiza mediante la adición de agentes ávidos por el oxígeno, y por tanto desoxidantes, como el ferrosilicio y el aluminio. Los productos de las reacciones resultantes quedan en el acero líquido, siendo en algunos casos necesaria la eliminación o

desplazamiento de los mismos hacia la escoria usando por ejemplo el tratamiento con calcio del metal líquido. Es por esta razón que el proceso de desoxidación va acompañado de otras operaciones tales como desulfuración, así como de agitación mediante gases inertes que permiten tanto la flotación de inclusiones como el aumento de la superficie de contacto para favorecer las citadas reacciones químicas.

Es durante la etapa de solidificación cuando se denota la importancia de la desoxidación del acero. En caso que un acero no esté bien desoxidado (en cuyo caso se denomina acero calmado) se produce en el lingote una cierta efervescencia debido a la que se produce la siguiente reacción:

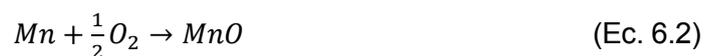


Es este gas el que genera una efervescencia en el acero que causa la aparición de sopladuras dentro del mismo. Estas sopladuras pueden originar defectos posteriores en los productos fabricados con este acero. Cabe destacar que los aceros calmados presentan cavidades o rechupes como resultado de la contracción que experimenta el acero de su estado líquido a su estado sólido, pero el efecto que tienen estas sobre el producto final es nulo, no considerándose una potencial fuente de defectos.

El poder desoxidante de los elementos generalmente más utilizados en siderurgia como desoxidantes se indica a continuación:



Al realizarse la desoxidación de los aceros con estos desoxidantes sólidos, las reacciones clásicas de desoxidación son las siguientes:



#### 4.2.2.2. Desulfuración

Cuando el acero se produce a gran escala, el contenido de azufre solo puede reducirse de forma limitada. Dado que la reducción del azufre en el EAF no resulta económicamente viable, el contenido de este elemento en el acero de la cuchara suele ser bastante elevado, con valores que rondan entre los 0.090 hasta 0.100% dado que la chatarra suele contener cantidades importantes de azufre.

Es por tanto en la cuchara donde se realiza la operación de desulfuración añadiendo elemento con gran afinidad por el S, normalmente cal o compuestos de calcio. Dicha operación se realiza con calentamiento eléctrico simultaneo con agitación, mediante la inyección de gas inerte a través de un tapón poroso, la cual permite incrementar las reacciones entre la escoria y el baño de acero.



Se forman por tanto productos esféricos de compuestos de azufre que en ocasiones son de interesante aplicación para ciertos tipos de aceros.

### 4.2.3. Colada continua

El método de colada continua es el método de moldeo y solidificación más común y extendido en la actualidad. Consiste en la colado del acero en un molde abierto mientras se extrae de forma continua el producto solidificado por el fondo en forma de palanquillas o, como es el caso en la planta de estudio, en forma de Beam Blanks.

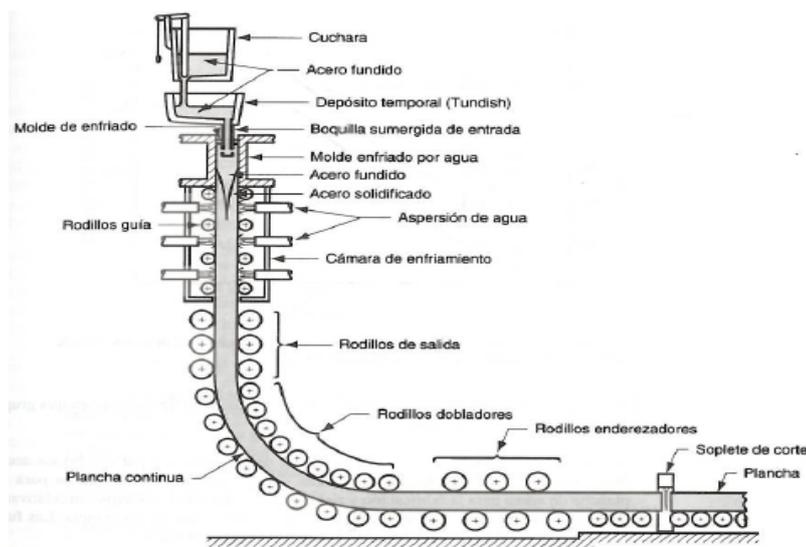


Fig. 4.8 Esquema de una colada continua

Los elementos principales de la instalación de colada continua son:

- La cuchara que contiene el acero, colocada en un alojamiento adecuado para iniciar el colado.
- El tundish o artesa, que se trata de un recipiente intermedio que recibe el chorro de acero de la colada, lo acumula durante un cierto tiempo y lo distribuye entre las distintas líneas que forman la instalación de colada a través de las buzas.

- Las buzas, que son distribuidores de diferentes secciones que permiten a su vez regular la velocidad de vaciado del tundish sobre las diferentes lingoteras.
- Las lingoteras o moldes, generalmente de cobre y de paredes huecas por donde circula agua de refrigeración (refrigeración primaria), es donde solidifica la piel del acero y consecuentemente da forma al producto.
- Sistema de distribución de aceite en lingotera, que añade aceite a las paredes de la lingotera con el fin de facilitar el despegue y lubricación del material dentro de la misma.
- El oscilador, que durante el proceso de colada permite que la lingotera se mueva hacia arriba y hacia debajo de forma alterna con una frecuencia y carrera determinada. Este movimiento tiene por finalidad el despegue de la pared de la lingotera de la camisa cristalizada formada gracias a la refrigeración primaria.
- El sistema de refrigeración secundario, constituido por duchas de agua que enfrían la superficie exterior del acero y continua evacuando el calor hasta la solidificación total del producto.
- Sistema de rodillos de arrastre que conducen y guían el material.
- Sistema de rodillos enderezadores que, como su nombre indica, enderezan el material ya solidificado hasta rectitud.
- Mecanismos de corte, que en nuestro caso lo forman oxicortes para obtener el producto a la longitud deseada.



*Fig. 4.9 Lingotera de Beam Blank*

El conjunto de todos estos elementos forma lo que denominamos una línea de colada continua. Generalmente las instalaciones están formadas por más de una línea siendo posible colar al mismo tiempo diferentes formatos de producto. En la planta de estudio, toda la instalación de colada continua está formada por un total de seis líneas independientes.



*Fig. 4.10 Chorros de acero cayendo sobre lingotera de Beam Blank (formato BB3.1)*

### **4.3. Laminación en caliente.**

Una vez se tiene el acero en forma de Beam Blank, estos pasan a un proceso de conformado mediante laminación en caliente hasta alcanzar la forma final de perfiles estructurales. Son estos perfiles estructurales, ya producto final comercial, los que deben cumplir con las características químicas y mecánicas marcadas en las normas de referencia.

Las partes que forman el tren de laminación de la planta industrial donde se ha desarrollado este trabajo son:

- Horno de recalentamiento de gas, formado por diferentes zonas de calentamiento independientes, controlado electrónicamente. Dispone de un aserie de listones cabalgantes que desplazan a los BB en su interior por las diferentes zonas hasta colocarlos en la zona de salida para iniciar su conformado. El tiempo de permanencia medio de los BB dentro del horno es de 90 minutos y la temperatura de salida objetivo es de 1200°C.
- Descascarillador, situado justo después del horno, a la salida de éste y antes de iniciar el trabajo de desbaste. Formado por una serie de cadenas y sopladores de aire a presión cuya acción elimina la cascarilla (óxidos de hierro) que se forma sobre los BB tras su paso por el horno evitando así la aparición de defectos de superficie.
- Caseta de desbaste, caseta tipo dúo reversible con cilindros multicanal que permite, con pasadas alternas, ejecutar el trabajo que realizarían múltiples casetas. Realiza un primer trabajo sobre el BB acercando la forma al producto final.

- Camino de rodillos: formado por una serie de rodillos motorizados que desplazan la barra laminada entre las diferentes casetas o partes de la planta.
- Caseta tándem, formada en realidad por un conjunto de tres casetas de laminación, una universal de entrada, una caseta duo reversible multicanal y una universal de salida. De nuevo, igual que sucede con el desbaste, esta disposición reversible permite a este grupo tándem una enorme versatilidad confiriendo en cada una de las pasadas alternas el trabajo que realizarían tres casetas reduciendo el espacio necesario en la planta.
- Placa de enfriamiento; es en este punto donde ya se dispone de un producto dimensionalmente acorde con las normas con la excepción de la longitud final del mismo. En la placa de enfriamiento, el material pasa de alrededor de los 900°C, dependiendo del producto, hasta una temperatura inferior a 80°C. Para ello se utiliza un enfriamiento al aire seguido de agua vaporizada que entra en contacto con el material cuando este ya se encuentra a temperaturas inferiores a los 500°C.
- Enderezadora, formado por un total de nueve rodillos que enderezan el material que sale de la placa de enfriamiento hasta la rectitud necesaria para cada tipo de perfil la cual viene indicada en las diferentes normas de referencia.
- Layer o acumulador, situado justo a la salida de la enderezadora y donde se acumulan las barras para su entrada en la zona de corte formando mantos de entre dos a seis barras en función del perfil laminando. Es en este punto donde se realizan los controles visuales del producto, marcándose los defectos sobre el material en caso de detectarse.
- Mecanismos de corte en frío, para cortar las diferentes barras a la longitud final comercial y que, en el caso de la planta de estudio, está formado por un grupo de dos sierras de disco de grandes dimensiones.
- Apiladores, empaquetadores y evacuadores que forman los paquetes de perfiles y los disponen para su evacuación y venta.

#### **4.4. Normas de referencia.**

Dado que tanto los productos como las propiedades de los aceros que atañen a este trabajo están enmarcados dentro de un entorno industrial real, existen una serie de normativa relativa a los mismos que debe ser cumplida. En este caso se trata principalmente de normas europeas y/ normativa ISO.

A continuación detallaremos aquellos aspectos de las mismas que afectan directamente a la consecución de los objetivos de este trabajo.

##### **4.4.1. EN 10025 Productos laminados en caliente de aceros para estructuras.**

Norma europea que hace referencia a las diferentes calidades de acero para estructuras así como de las condiciones de suministro.

Consta de cinco partes, pero para este trabajo nos centraremos en las partes 1 “Condiciones técnicas generales de suministro” y la parte 2 “Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados”

En esta norma se especifica tanto la designación como las horquillas de composición que deben cumplir las diferentes calidades de acero así como los características mecánicas mínimas para cada una de dichas calidades.

A modo de resumen se adjuntan algunas de las tablas que aparecen en esta norma y que tendrán relación directa sobre los resultados de nuestro trabajo:

*Tabla 4.1 Resumen de la Tabla 4 de la EN 10025-2 Composición química del análisis de producto*

Designación		C en % máx. para espesor nominal del producto en mm			Si % máx.	Mn % máx.	P % máx.	S % máx.	N % máx.	Cu % máx.
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40						
Según las Normas EN 10027-1 y CR 10260	Según la Norma EN 10027-2									
S355J0	1.0553	0,23	0,23	0,24	0,60	1,70	0,040	0,040	0,014	0,60
S355J2	1.0577	0,23	0,23	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	-	0,60

*Tabla 4.2 Resumen de la Tabla 7 de la EN 10025-2 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente para productos planos y largos en tipos y grados*

Designación		Límite elástico Re (Mpa) Espesor nominal (mm)		Resistencia a la tracción Rm (Mpa) Espesor nominal (mm)	
		≤ 16	> 16 ≤ 40	<3	≥ 3 ≤ 100
Según las Normas EN 10027-1 y CR 10260	Según la Norma EN 10027-2				
S355J0	1.0553	355	345	510 a 680	470 a 630
S355J2	1.0577	355	345	510 a 680	470 a 630

*Tabla 4.3 Resumen de la Tabla 9 de la EN 10025-2 Propiedades mecánicas energía de flexión por choque KV longitudinal para productos planos y largos*

Designación		Temperatura °C	Energía mínima Espesor nominal (mm)
			≤ 150
Según las Normas EN 10027-1 y CR 10260	Según la Norma EN 10027-2		
S355J0	1.0553	0	27
S355J2	1.0577	-20	27

#### 4.4.2. EN 10163 Condiciones de suministro relativas al acabado superficial de chapas, bandas, planos y perfiles de acero laminados en caliente.

Norma europea que indica cuales han de ser las condiciones de acabado superficial que deben presentar los productos laminados en caliente.

Consta de tres partes pero únicamente nos centraremos en la parte 3 “Perfiles” dado que todas las pruebas realizadas en este trabajo tienen como producto final un perfil laminado.

En lo que se refiere a la consecución de los objetivos de este trabajo, esta norma nos influirá en cuanto a la permisividad máxima a la presencia y profundidad de los defectos superficiales.

Esta norma define como defecto todas aquellas discontinuidades superficiales en las que la profundidad es superior a un valor límite especificado por una tabla determinada en función de la clase definida. Todos los productos que participan en este trabajo quedan encuadrados en la clase C (Aplicaciones generales) que define esta norma.

La tabla siguiente muestra los valores máximos de profundidad de defecto en función del espesor del producto para productos de clase C.

Tabla 4.4 Profundidad máxima admisible de las discontinuidades de clase C (en mm)

Espesor nominal del producto t	Profundidad máxima admisible de las discontinuidades
$3 \leq t < 6$	20% de t
$6 \leq t < 20$	1,2
$20 \leq t < 40$	1,7
$40 \leq t < 80$	2,5
$80 \leq t < 160$	3,0

En el caso de los productos final que se utilizaron en todas las pruebas realizadas durante la realización de este trabajo, el valor máximo de profundidad para los defectos superficiales presentes es siempre de 1,2mm dado que aunque en algún caso se utilicen espesores mayores a 20, se ha marcado este valor como umbral máximo permitido.

#### 4.4.3. EN 10034 Perfiles I y H de acero estructural

Norma europea que establece las tolerancias dimensionales y de masa de los perfiles I y H.

Durante todo el desarrollo de este trabajo haremos referencia a perfiles que se rigen por esta norma en cuanto sus dimensiones máximas permitidas.

Todas las pruebas realizadas durante el proyecto en cuestión, han sido realizadas laminado perfiles HE400 tanto en su forma HEA como en su forma HEB. Las condiciones dimensionales de ambos perfiles quedan recogidas dentro de esta euronorma y se detallan en el apartado de Productos finales dentro del capítulo de Material y Métodos Experimentales.

## 5. Material y métodos experimentales

Dentro de este capítulo se detallarán tanto las técnicas de ensayo y análisis utilizadas así como los materiales y productos, ya sean semi-productos o productos finales que intervienen en este estudio. Todas las máquinas e instrumentos utilizados fueron debidamente calibrados antes de la ejecución de cada uno de los diferentes análisis realizados.

### 5.1. Técnicas de ensayo utilizadas

#### 5.1.1. Análisis de composición química

Se han utilizado diferentes técnicas para la determinación de la composición química de los aceros presentes en este trabajo, las cuales se detallan a continuación

##### 5.1.1.1. Espectroscopía óptica

Técnica utilizada para la determinación de todas las composiciones químicas mediante un espectrómetro de emisión óptica por chispa ARL 4460.



*Fig. 5.1 Espectrómetro*

Este equipo permite dispone de diferentes canales para la determinación de la composición de los diferentes elementos: Fe, C, Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Cu, Sn, Mo, V, Nb, Al, Al<sub>(Soluble)</sub>, As, Co, Ti, W, Pb, Ca, B, Bi, N, Te, Se.

Pese a ello, las determinaciones de C, S y N se realizan mediante el uso de absorción de IR mediante LECCO.

### 5.1.1.2. Absorción de IR de estado sólido

La determinación de C y S se ha realizado mediante técnicas de absorción de IR de estado sólido. Las mediciones que se obtienen presentan una mayor exactitud que aquellas tomadas mediante espectroscopía.

Para la determinación de estos dos elementos se ha utilizado un instrumento de absorción de IR de estado sólido LECCO CS-200 el cual puede observarse en la figura 5.2



*Fig. 5.2 Analizador de C y S Lecco*

### 5.1.1.3. Determinación de conductividad térmica e IR por fusión de gas inerte

Mediante esta técnica se realizaron las determinaciones de N mostradas en las composiciones químicas de las diferentes pruebas realizadas. El equipo utilizado fue LECCO TN-400 y se muestra en la figura 5.3



*Fig. 5.3 Analizador de N Lecco*

### 5.1.2. Ensayos de tracción

Durante todo el desarrollo de este trabajo se realizaron una enorme cantidad de ensayos de tracción para corroborar el cumplimiento de las normas de referencia para la calidad de acero solicitada.

Para ello, se dispuso de diferentes máquinas de tracción así como de extensómetros que permitieron obtener los valores de  $R_e$ ,  $R_m$  y  $\%A$  de cada una de las muestras ensayadas.



*Fig. 5.4 Máquina de ensayos de 100tn*

La máquina utilizada han sido una maquina de ensayos SERVOSIS de 100tn modelo MUE-404/100 mostrada en la figura 5.4 y utilizando un extensómetro digital SERVOSIS modelo MSK1000-0013 que se muestra en la figura 5.5.

Todos los ensayos se han realizado bajo los criterios marcados por la norma UNE EN ISO 6892-1:2010



*Fig. 5.5 Extensómetro digital SERVOSIS*

### 5.1.3. Ensayos de resiliencia

Todos los ensayos de resiliencia presentes en este trabajo han sido realizados siguiendo los procedimientos marcados por la UNE EN ISO 148-1 : 2011, utilizando un péndulo Charpy OTTO WOLPERT-WERKE modelo PW-30.



*Fig. 5.6 Péndulo Charpy*

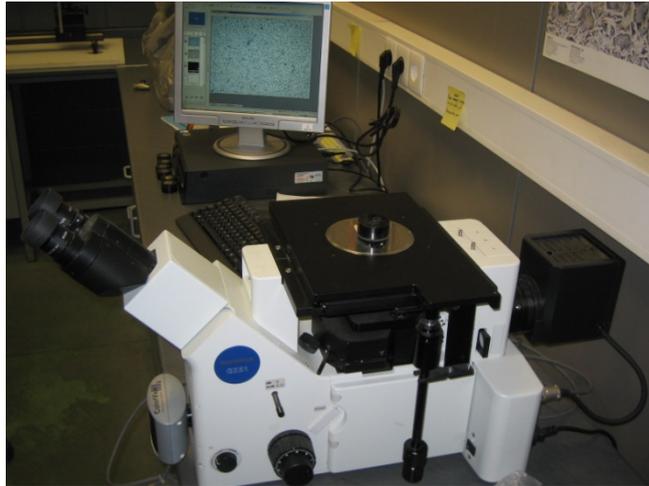
Todas las probetas se han mecanizado con entalla en V y los ensayos se realizaron según la norma UNE EN ISO 148

### 5.1.4. Microscopía óptica

Durante el desarrollo de este proyecto se realizaron multitud de metalografías. Dichas metalografías se prepararon mediante la mecanización de probetas metalográficas

las cuales fueron pulidas hasta superficie especular utilizando diferentes paños de pulido, para poder ser observadas con microscopio óptico.

El equipo utilizado es un microscopio óptico Olympus GX 51 con un rango de aumentos de 50X a 1000X, equipado a su vez con una cámara digital conectada a un ordenador que permite tanto la visión de la muestra on-line como la toma de imágenes (figura 5.7).



*Fig. 5.7 Microscopio óptico Olympus GX 51*

Para poder observar las microestructuras de las diferentes muestras así como el tamaño y forma de los granos y/o de los defectos presentes, se atacaron las muestras utilizando Nital.

#### **5.1.5. Microscopía electrónica**

Pese a no disponerse en las instalaciones industriales donde se desarrolló el proyecto de instrumentos de microscopía electrónica, se contó con los servicios del Centro Tecnológico de Manresa (CTM) para efectuar dichos ensayos.

En dicho centro, se dispuso de microscopios electrónicos de barrido (SEM) con capacidad de realizar mapeos de composición.

#### **5.1.6. Controles visuales**

Durante toda la ejecución de este proyecto ha sido necesaria la evaluación visual de las barra tanto de producto final como de Beam Blank involucradas en las diferentes

pruebas. Para ello se crearon hojas específicas de recogida de datos y se realizó un control visual específico de todas las barras involucradas.

Dichos controles se realizaron en diferentes puntos del proceso en función de la prueba realizada, tomándose mediciones y/o fotografías en los casos necesarios.

Este tipo de control, pese a ser visual y subjetivo a la decisión de la persona de control ha sido necesario e imprescindible, permitiendo segregar el material defectuoso y realizar valoraciones generales de los resultados de las pruebas durante el proceso productivo así como la toma de muestras sobre los diferentes productos.

Todas las personas involucradas en dichos controles fueron formadas en los diferentes parámetros de control establecidos para cada una de las pruebas.

### 5.1.7. Mediciones de temperatura en colada continua

Para la realización de las mediciones de temperatura sobre los BB a la salida de la colada continua, realizadas en gran parte de las pruebas se dispuso de un pirómetro de infrarrojos portátil de EUROTRON INSTRUMENTS Spa modelo Irtec P1300.



*Fig. 5.8 Pirómetro portátil*

Este instrumento presenta un rango de temperaturas de medición de 300 a 1300°C

## 5.2. Materiales de partida

### 5.2.1. Formato. Beam Blank

Existen múltiples formatos en que se pueden fabricar los productos de una colada continua de acero, que pueden ir desde las tradicionales palanquillas cuadradas hasta formatos near net shape como los Beam Blanks, pasando también por otras formas como los Slabs rectangulares.

Las condiciones de reducción de costes patentes en todo el sector industrial han llevado a fabricar semi-productos lo más parecidos posibles a los productos finales para los que van destinados. Es por este motivo, que se crearon los denominados Beam Blanks y son éstos los que hemos utilizado durante todas las pruebas realizadas.

En la colada continua de la planta de fabricación donde se ha realizado el proyecto se es capaz de producir tres formatos diferentes de BB, denominándose estos como BB1.1, BB2.1 y BB3.1 siendo este último el que nos atañe dentro de este proyecto.

El formato de palanquilla Beam Blank BB3.1 presenta las medidas mostradas a continuación en la figura 5.9

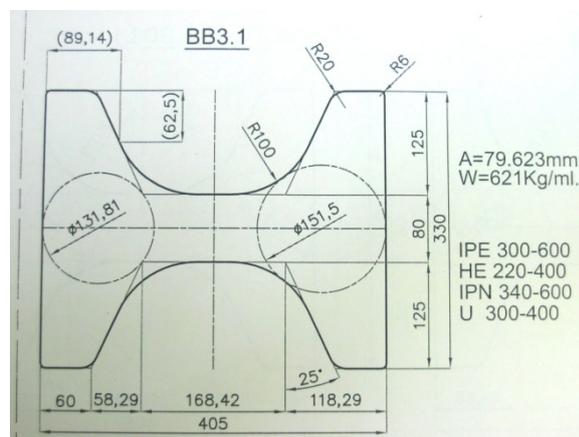


Fig. 5.9 Esquema de un BB3.1

Tabla 5.1 Dimensiones nominales de un BB3.1

Producto	Long. (m)	Peso (kg)	Alma (mm)	Anchura (mm)	Ala (mm)
BB3.1	11.82	7390	80	405	330

Dicho formato se fabrica mediante colada continua utilizando dos buzas cuyos chorros caen en la intersección de ala y alma, distribuyendo el acero dentro de la lingotera de cobre.

Los BB3.1 fabricados presentan diferentes longitudes siempre en función de los productos finales para los que van destinados, con tal de minimizar las mermas de proceso.

A continuación, en la figura 5.10, se muestra una imagen de dicho producto:



*Fig. 5.10 Imagen frontal de una pila de BB3.1*

### **5.2.2. Composiciones química**

El formato de BB3.1 antes citado se fabrica en diferentes composiciones químicas según la calidad de acero final deseada.

En lo que se refiere a este trabajo, la calidad de partida es la denominada HM355, la cual se detalla en punto 6.1 Caracterización del material de partida.

Existen otras calidades de acero fabricadas con este formato de palanquilla las cuales van desde aceros de bajo carbono y poca cantidad de elementos aleantes, hasta aceros más especiales destinados a calidades con requisitos especiales como la composición química final lograda en este trabajo.

### **5.3. Productos finales**

Existe una amplísima variedad de productos laminados fabricados con acero, yendo desde pletinas rectangulares o redondos lisos hasta formas realmente complejas como perfiles alveolados o perfiles irregulares.

Partiendo de los diferentes formatos de BB fabricados podemos alcanzar una enorme gama de productos finales, siendo todos ellos perfiles estructurales. Estos productos pueden ir desde angulares de lados iguales hasta perfiles tipo I, U o H.

En este proyecto se ha escogido como unidad de prueba el perfil HEB400 y será este el que detallaremos a continuación.

Se trata de un perfil tipo H con alas anchas y caras paralelas siendo las caras interiores y exteriores de las alas perpendiculares al alma del perfil por lo que dichas alas presentan un espesor constante. Las uniones entre alas y alma son redondeadas y las aristas de las alas son vivas.

Para un mayor entendimiento de la forma y partes de este producto adjuntamos el siguiente esquema:

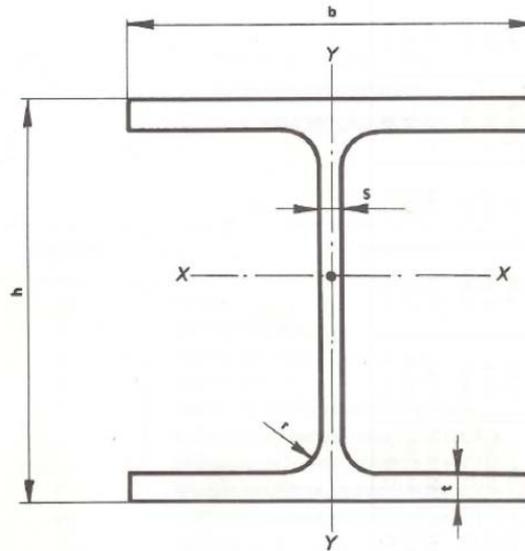


Fig. 5.11 Esquema de un perfil H

Donde se definen las siguientes medidas:

Tabla 5.2 Definición de símbolos en perfiles

Símbolo	Concepto
$h$	Altura de perfil
$b$	Anchura de ala
$s$	Espesor de alma
$t$	Espesor de ala
$r$	Radio de unión entre alma y ala

El perfil con el que se ha trabajado durante todo el proyecto es la HEB400. Dicho perfil es el extremo de gama del tren de laminación donde se desarrolla este trabajo y es, por tanto, el perfil con mayores requisitos en cuanto a potencias de laminación.

Sin entrar a detallar todo su proceso productivo, si detallaremos las medidas nominales de este perfil para permitir una mayor comprensión de las dimensiones del mismo.

*Tabla 5.3 Valores dimensionales nominales del perfil HEB400*

Producto	Kg/m	h (mm)	b (mm)	s (mm)	t (mm)	r (mm)
HEB400	155	400	300	13,5	24	27

## 6. Procedimiento de ensayos y discusión de resultados.

El objetivo de este trabajo es la consecución de un acero que cumpla con los requisitos de la calidad S355J2. Por este motivo, la primera opción que nos planteamos fue la modificación de la composición química del acero de partida para lograr las propiedades deseadas por dureza natural del material. Para ello se realizaron varias pruebas en las que se fue modificando la composición química del acero y realizando ensayos mecánicos y visuales de cada una de las diferentes composiciones trabajadas.

Una opción habitual es trabajar este tipo de aceros añadiendo Al a su composición. Esta vía queda descartada ya de antemano dadas las condiciones tecnológicas de la acería donde se fabrica este acero. El hecho que la acería no disponga de buza sumergida implica que el chorro de acero pasa del Tundish a la lingotera con contacto con el aire. Debido a la alta afinidad del Al por el O<sub>2</sub>, el contacto del chorro de acero con el aire causaría la rápida oxidación del Al presente en disolución formando alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) alrededor de la boca de la buza. Gracias a las propiedades refractarias de esta alúmina se iría progresivamente cerrando el paso de acero hasta el total cierre del agujero de la buza, impidiendo por tanto que se continuara colando el material.

Debido a lo anteriormente citado, la opción elegida fue trabajar con una composición de acero microaleada con Ti, V o Nb o una combinación de varios de estos elementos.

En este apartado se desarrollarán las diferentes pruebas que se fueron realizando hasta la consecución del acero deseado, así como la evaluación del material de partida.

### 6.1. Caracterización del material de partida

El punto de partida para todos los ensayos realizados en este estudio fue la calidad de acero denominada internamente como HM355. Este acero consta de una horquilla de composición tal como se muestra a continuación:

Tabla 6.1 Horquilla de composición química del material de partida

Calidad	%C	%Mn	%Si	%S máx.	%P máx.	%Cu máx.	%V mín.	CEV mín.
HM355	0,08 - 0,10	1,20 - 1,30	0,15 - 0,20	0,03	0,03	0,55	0,065	0,355

### 6.1.1. Estado de colada

Para la caracterización del material de partida en su estado de colada se tomó una muestra del Beam Blank de la cual se mecanizó una probeta a diferentes profundidades del alma del mismo.

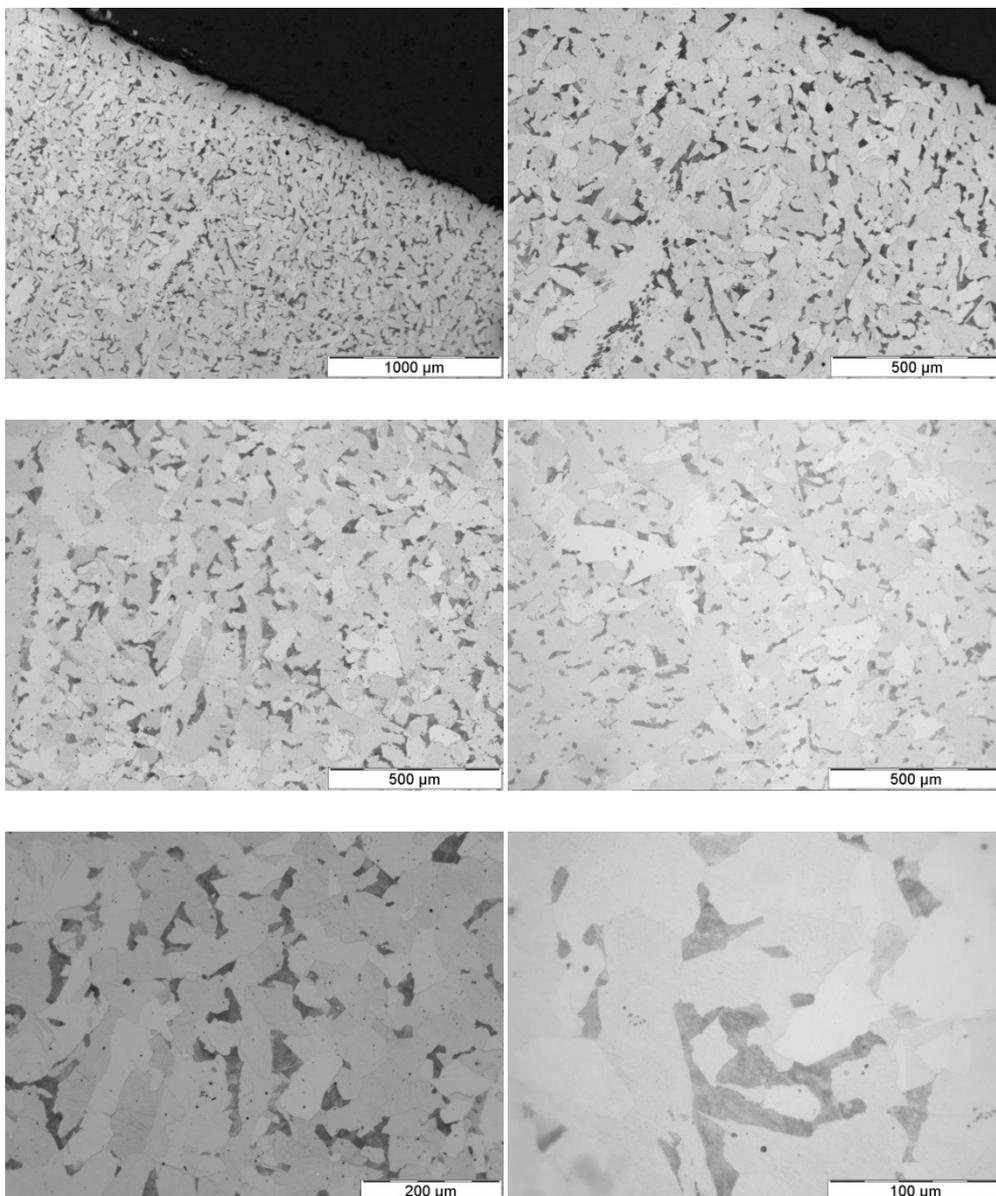


Fig. 6.1 Micrográficas a diferentes aumentos del material de partida en estado de colada

Se observa una estructura ferrítico-perlítica clásica en este tipo de aceros, con una distribución uniforme y sin apenas diferencias en cuanto a la profundidad a la que se realiza la probeta. Se intuye estructura dendrítica típica de solidificación en molde. Puede

observarse también zonas con inclusiones, seguramente sulfuros de manganeso por su forma y color, no considerándose a priori dañinas para el uso previsto para el material.

El tamaño de grano calculado es de 7 según UNE-EN-ISO 643

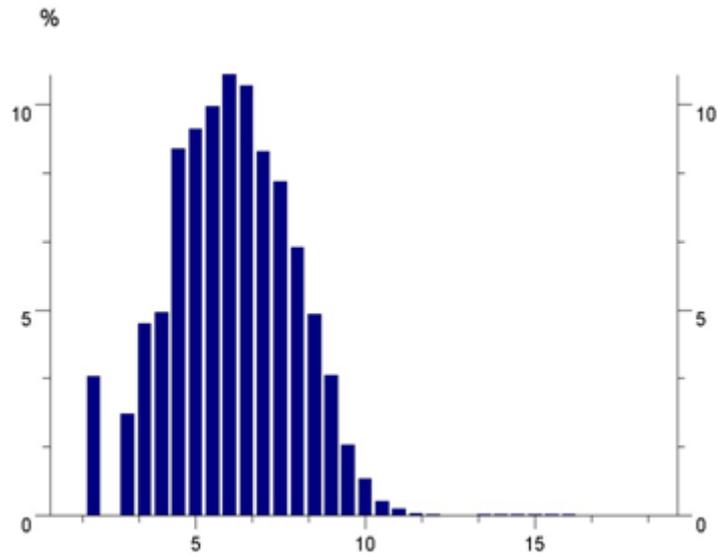


Fig. 6.2 Distribución del tamaño de grano en estado de colada

### 6.1.2. Estado de laminación

Tras el proceso de laminación, se tomaron muestras del producto final. Se mecanizaron varias probetas para la realización de micrografías con la intención de observar su estructura.

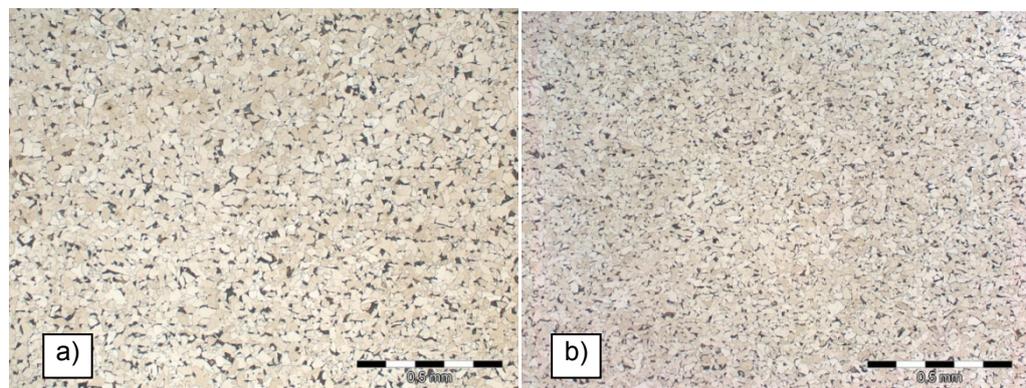


Fig. 6.3 Micrografías estado de laminación: (a) tamaño de grano 8 con 2078 granos/mm<sup>2</sup> (b) tamaño grano 8,5 con 2889 granos/mm<sup>2</sup>

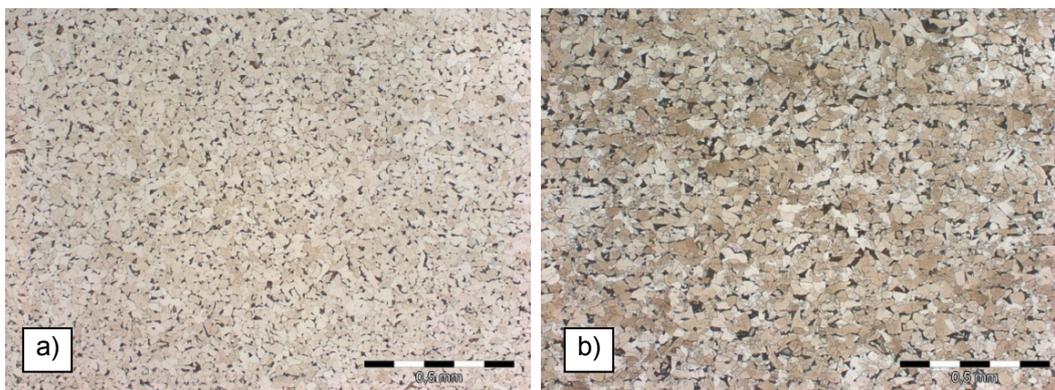
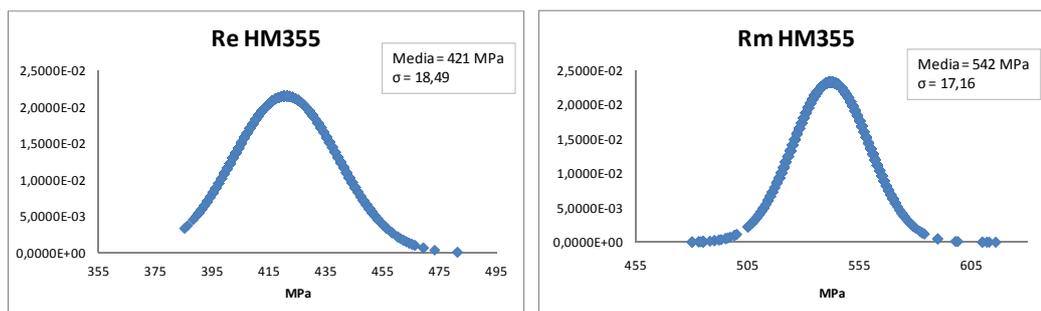


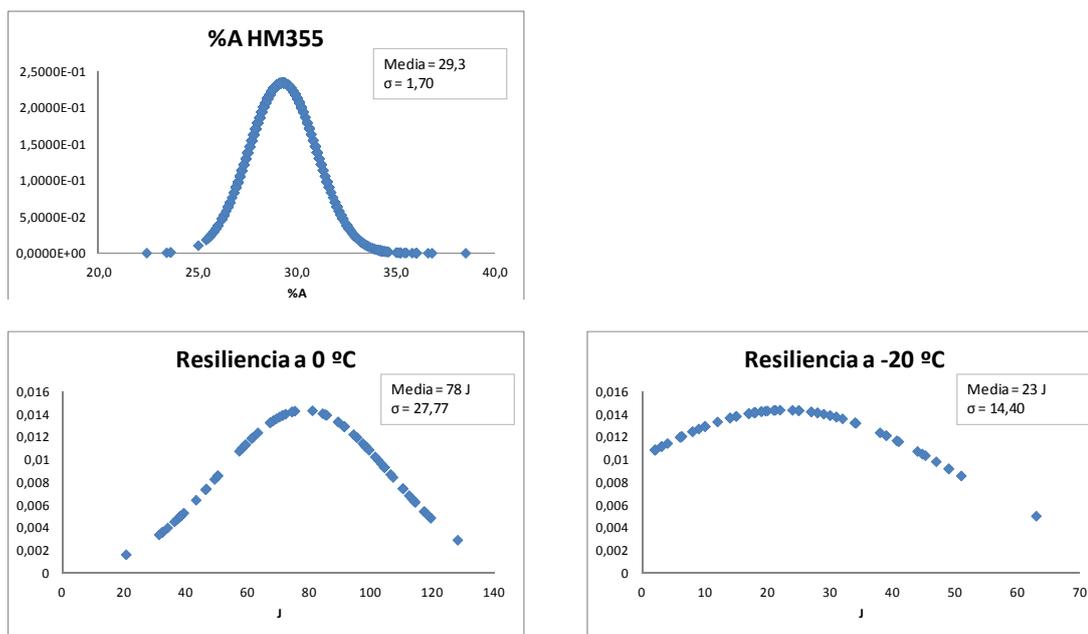
Fig. 6.4 Micrografías estado de laminación: (a)tamaño de grano 8 con 2100 granos/mm<sup>2</sup>  
 (b) tamaño grano 7,5 con 1400 granos/mm<sup>2</sup>

Podemos observar una estructura ferrítico-perlítica característica de este tipo de aceros donde puede apreciarse una ligera fibrosidad causada por el proceso de laminación. Se ha calculado un tamaño de grano que oscila entre 7,5 y 8 según la norma UNE-EN-ISO 643 con una cantidad de granos entre 1400 y 2889 granos/mm<sup>2</sup>.

### 6.1.3. Propiedades mecánicas del material de partida

Se realiza un estudio estadístico de las propiedades mecánicas del material de partida tras haber sido laminado en diferentes productos. A continuación se muestran los resultados estadísticos de dichos ensayos.





Puede observarse que, pese a lograrse de forma amplia el tipo y grado S355J0 no se alcanza el grado J2. Es por este motivo, el hecho que únicamente nos falla una de las propiedades mecánicas requeridas, que tomamos esta calidad como punto de partida.

## 6.2. Uso de Ti como elemento de microaleación.

Se decidió, basándonos en la bibliografía y realizando sesiones de benchmarking con empresas similares que las vías posibles hacia la calidad deseada pasaban ya fuera por el uso de aluminio o de titanio como elementos de aleación. Dada la imposibilidad de nuestro proceso para la fabricación de aceros con contenido de aluminio, la vía que nos quedó fue la del uso del Ti. Por esa razón la primera prueba que se planteó fue la fabricación de 3 coladas con la siguiente composición:

Tabla 6.2 Horquilla de composición objetivo. Uso de Ti

%C	%Mn	%Si	%S máx.	%P máx.	%Cu máx.	%V mín.	%Ti
0,08 - 0,10	1,20 - 1,30	0,15 - 0,20	0,025	0,025	0,35	0,065	0,015 - 0,025

Todo este material se laminó en HEB400, dado que es nuestro perfil de mayor peso/metro y, por tanto, el más extremo en cuanto a características mecánicas.

### 6.2.1. Resultados de la prueba

Se fabricaron tres coladas de las cuales solo los formatos de BB3.1 se consideran dentro del umbral de esta prueba. Dichos formatos se colaron en las líneas 5 y 6 controlándose tanto la velocidad de colada como las temperaturas de alma y ala de los BB a la salida del enderezado. La tabla siguiente contiene los valores medidos:

Tabla 6.3 Parámetros de colada continua. Uso de Ti

Colada	Línea 5			Línea 6		
	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)
CE172476	758	893	1,12	748	888	1,12
CE172477	756	924	1,13	755	920	1,16
CE172478	768	938	1,1	773	934	1,12

La composición química final de las tres coladas ensayadas fue:

Tabla 6.4 Composición química real coladas de prueba. Uso de Ti

Colada	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%V	%Ti	%N
CE172476	0,09	1,24	0,21	0,007	0,015	0,32	0,068	0,02	0,0113
CE172477	0,09	1,29	0,19	0,003	0,014	0,32	0,079	0,025	0,0110
CE172478	0,08	1,27	0,21	0,003	0,014	0,29	0,074	0,023	0,0114

La media de todos los resultados mecánicos obtenidos en los ensayos de tracción y resiliencia (este último realizado a -20°C) realizados sobre cada una de las barras fueron:

Tabla 6.5 Resultados mecánicos. Uso de Ti

Colada	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	%A	R a -20°C (J)
CE172476	325	486	33,0	188
CE172477	329	486	28,9	191
CE172478	321	479	33,1	177

Tras el control visual realizado sobre el total de las barras ensayadas se observa que el 100% de las barras presentan defectos en el alma que superan el máximo permitido por las normas de referencia. Todo el material involucrado en la prueba es rechazado y queda imposible su comercialización debido a la presencia de los defectos citados. A continuación se presentan fotografías de dichos defectos.



*Fig. 6.5 Alma del perfil HEB400 con defectos superficiales*

### **6.2.2. Conclusiones de la prueba**

Tras realizarse el control del material tras su laminación se observa la aparición de unas marcas sobre el alma de los perfiles que no aparecen en el resto de material no involucrado en esta prueba. El total de las barras de la prueba presentan este tipo de defectos que las hace inservibles para su comercialización.

Observamos además, los resultados obtenidos en el ensayo de tracción no cumplen con los requisitos mínimos de la norma de referencia, concretamente en los resultados obtenidos de Re. Ninguna de las coladas implicadas alcanzó valores suficientes de Re como para cumplir con la calidad deseada.

Los resultados obtenidos del ensayo de resiliencia nos confirman que todas las coladas cumplirían ampliamente con este requisito de la calidad S 355 J2.

Se observa que los parámetros finales del proceso de colada no tienen un claro efecto sobre la aparición de defectos.

De forma global podemos decir que esta prueba no ha presentado resultados satisfactorios, incumpliendo con los requisitos mecánicos mínimos para la calidad S 355 J2 y presentando una serie de defectos en el alma hasta el momento desconocidos.

### **6.3. Caracterización de los defectos aparecidos**

Debido a la aparición de marcas en el alma de los perfiles las cuales no aparecían anteriormente en nuestros productos, se procede a la caracterización de dichos defectos.

Para ello se toman diversas muestras de producto final las cuales presentan dicho defecto. Sobre estas muestras tomadas se realizan los siguientes ensayos:

- Ensayo de tracción, tomando la probeta de la zona afectada por el defecto.
- Ensayo micrográfico (microscopía óptica) del defecto.
- Análisis química de la zona del defecto.

Del mismo modo, y en previsión que el origen del defecto se pudiera encontrar en el BB utilizado, se toman muestras de BB con la composición de prueba para realizar los siguientes ensayos:

- Decapado ácido y control visual de la piel del BB.
- Análisis micrográfico de la superficie del BB (microscopía óptica y electrónica).
- Análisis químico de la superficie del BB.

Los resultados de estos ensayos se muestran a continuación.

### **6.3.1. Descripción del defecto.**

Los defectos aparecidos en los productos laminados finales presentan un aspecto de grietas o descohesiones superficiales que parecen no penetrar demasiado en el interior del alma del perfil. Este tipo de defectos se presenta únicamente en el alma del producto, encontrándose centrado en la misma en la mayoría de los casos.

No se observa repetitibilidad ni en forma ni en distancia entre los defectos, lo cual descarta un origen del defecto por problemas mecánicos en la laminación como desconchones en los cilindros, material pegado o arrastres/empujes de material durante las últimas pasadas de laminación, y nos induce a pensar que el defecto tiene un origen en el BB utilizado.

Todos los defectos son longitudinales al perfil y paralelos al sentido de laminación. La morfología del defecto varía entre línea longitudinales, en las que pueden o no observarse ramificaciones, hasta descohesiones en la superficie del material con forma de v de menor tamaño. Se observa también que en algunas de las muestras este tipo de defecto se acumula formando agrupaciones, encontrándose zonas con gran acumulación y otras sin aparentes defectos dentro de la misma barra.

A continuación se adjuntan fotografías de las muestras tomadas.

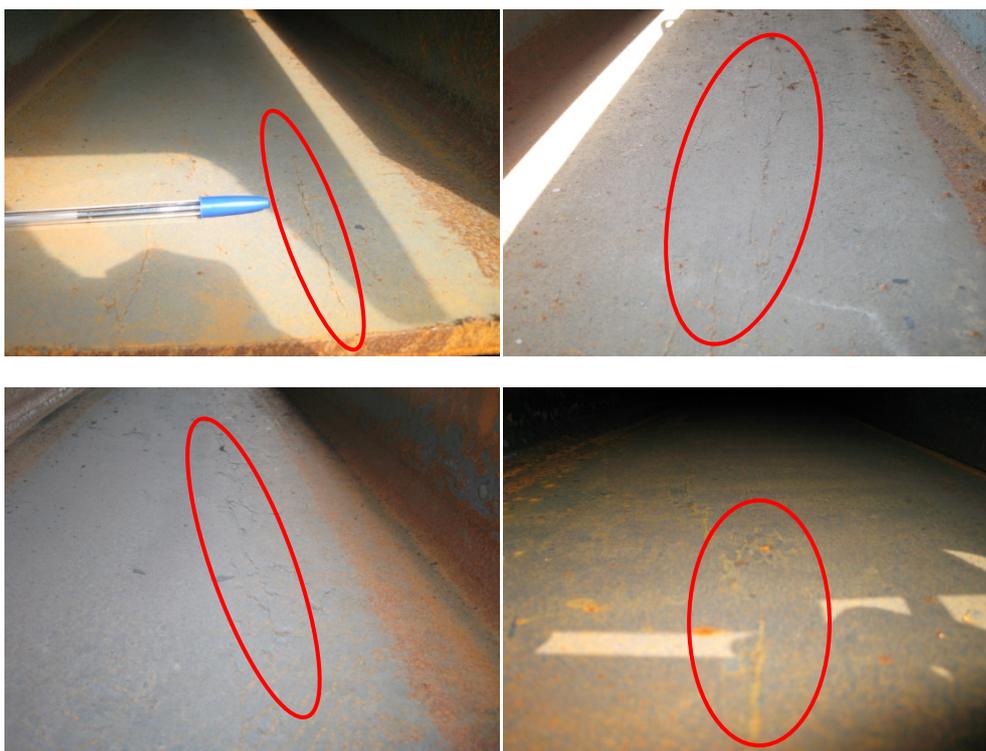


Fig. 6.6 Fotografías de perfiles HEB400 con defectos en el alma

### 6.3.2. Ensayo de tracción de la zona con defecto

Para comprobar su efecto dañino sobre el producto final y su posible repercusión en el uso de perfiles que presenten este tipo de defecto, se tomaron probetas de tracción del alma de los perfiles en aquellas zonas que presentaban defectos superficiales.

Pese a que las normas de referencia indican que las probetas para ensayos de tracción deben tomarse de las alas del perfil, la idea de este ensayo es comparar los resultados obtenidos de probetas tomadas del alma y con defectos frente a los resultados de tracción de las probetas tomadas del ala para una misma muestra. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 6.6 Comparativa resultados mecánicos zona con defecto vs zona sin defecto

Colada	Probeta del ala			Probeta del alma con defectos		
	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	%A	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	%A
CE172476	325	486	33,0	322	482	33,1
CE172477	329	486	28,9	327	478	28,6
CE172478	321	479	33,1	316	471	33,0

Se observa por tanto que no existe apenas diferencia en cuanto a resultados mecánicos. La merma en los mismos provocada por la presencia del defecto es insignificante y se considera por tanto, depreciable.

### 6.3.3. Ensayo micrográfico del defecto en producto final

De las muestras tomadas de producto final que presentaban defectos en el alma se escogen varias de ellas para realizar ensayos metalográficos. Para ello se realizan cortes de sierra transversales al defecto con la intención de valorar no solo la microestructura y posibles inclusiones presentes en las inmediaciones del defecto, sino también la profundidad del mismo ya que es este valor el que puede indicarnos si los defectos analizados estarían dentro de lo permisible según la EN 10163-3.

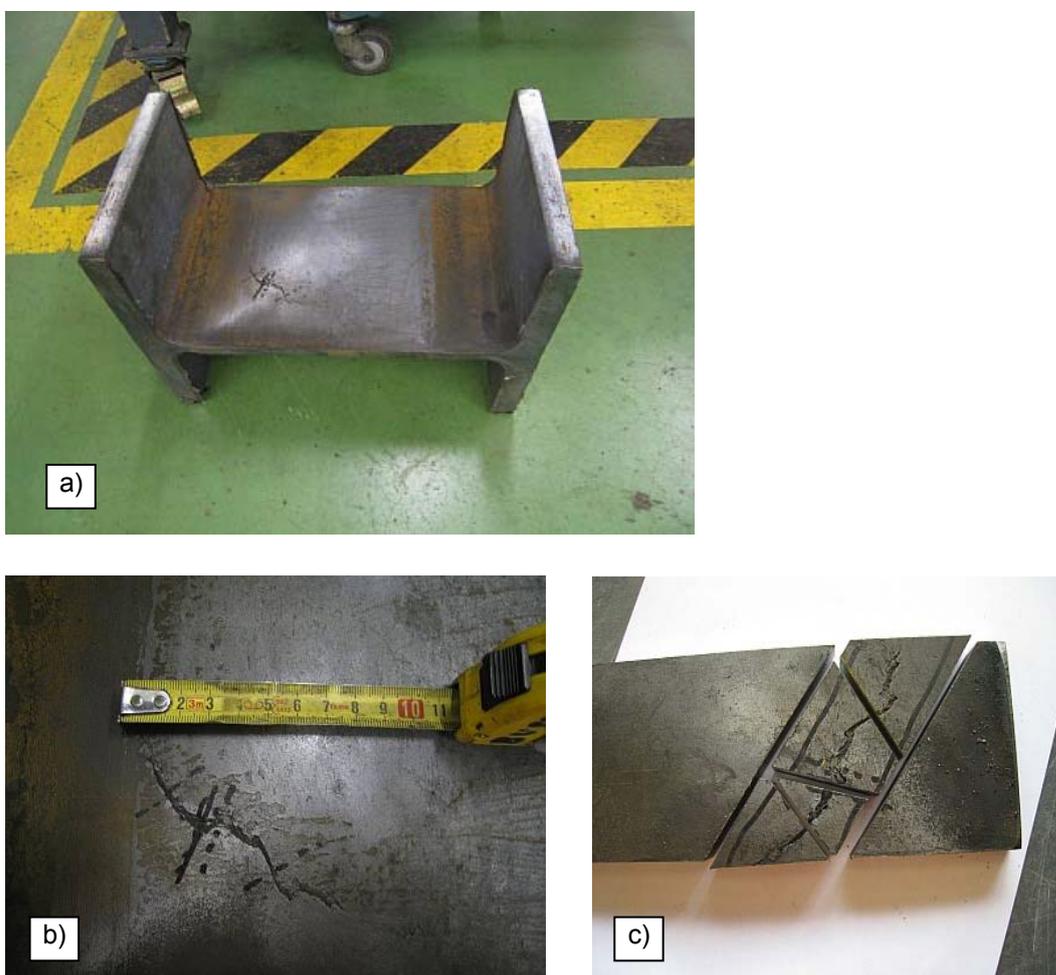


Fig. 6.7 Preparación metalográfica: (a) muestras con defecto; (b) detalle del defecto; (c) detalle del despiece

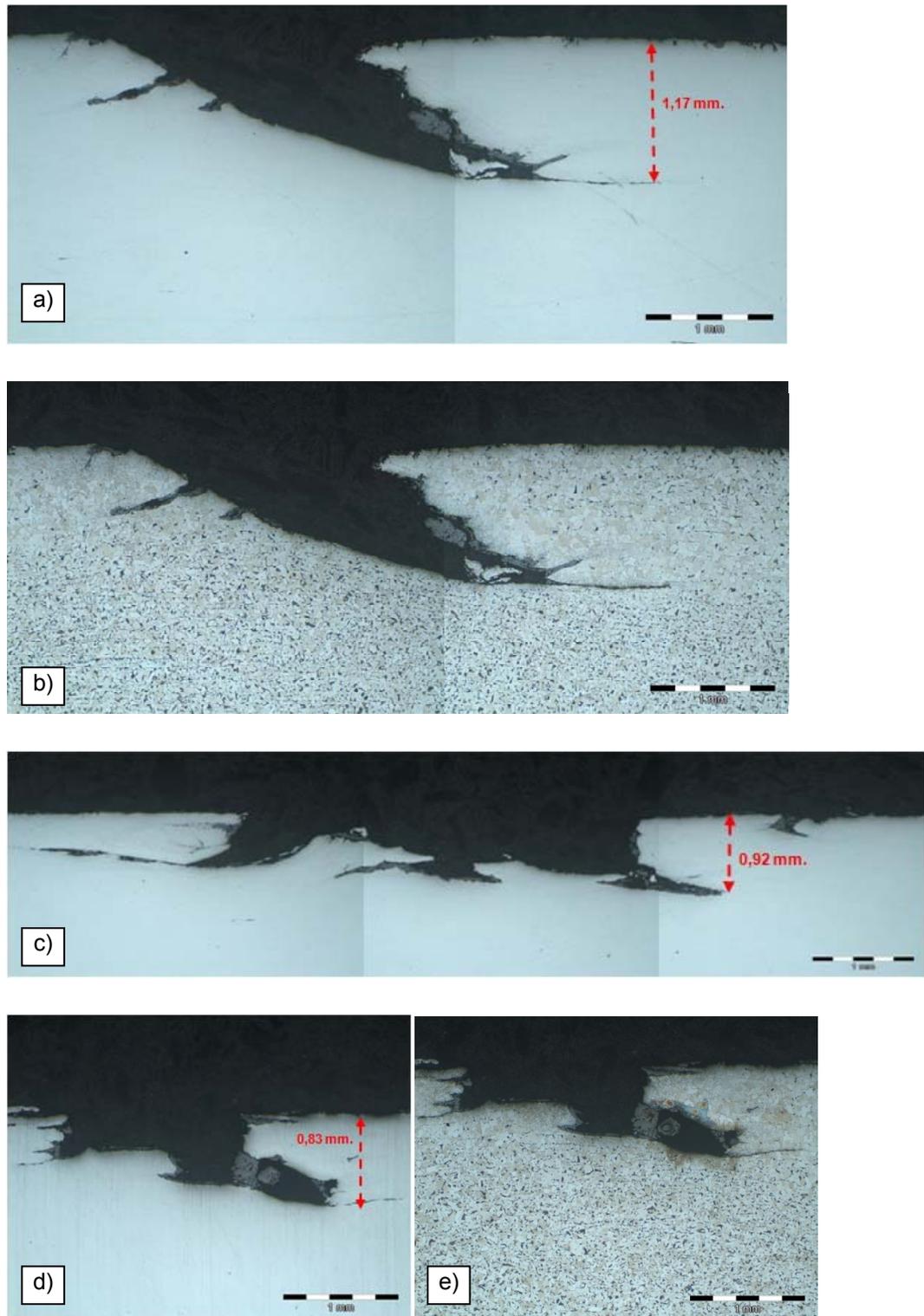


Fig. 6.8 Micrografías del defecto. (a) Defecto de 1,7mm; (b) detalle de la microestructura del defecto (a); (c) defecto de 0,92 mm; (d) defecto de 0,83mm; (e) detalle de la microestructura de la zona del defecto (d)

### 6.3.4. Análisis químico de la zona del defecto en producto final

Se realizaron dos determinaciones de composición química sobre la superficie del material, una en un punto central del alma del perfil y otra justo al lado de la zona con defectos. La intención de esta determinación fue comprobar si existía alguna acumulación de algún elemento que pudiera indicarnos el origen del defecto.

Tabla 6.7 Análisis químico de la zona del defecto frente a zona sin defecto

Colada	Zona	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%V	%Ti	%N
CE172478	Zona alma	0,07	1,27	0,21	0,007	0,013	0,26	0,093	0,025	0,0114
CE172478	Zona defecto	0,07	1,21	0,2	0,007	0,011	0,27	0,09	0,0130	0,0129

### 6.3.5. Decapado ácido y control visual de la superficie del BB

Con la intención de detectar si el origen del defecto estaba ya presente en los BB, se toman muestras de los mismos, cortándose rodajas mediante oxicorte. Estas rodajas son saneadas con un corte de sierra dejando una rodaja con un espesor aproximado de unos 8cm.

Sobre dichas rodajas se realiza un decapado con ácido. Para ello se sumergen las rodajas tomadas en una cubeta que contiene HCl al 28% a 70°C y se dejan en ella durante 60 min. Tras el ataque y la posterior neutralización del ácido, se procede a realizar un control visual de la piel del BB, centrándonos en la zona del alma del mismo, dado que es esta zona la que, tras el proceso de laminación, corresponde al alma del perfil donde aparecieron los defectos. Se observa la presencia de grietas observables a simple vista en la zona del alma del BB. Dichas grietas presentan una apariencia ramificada similar a una telaraña o red. Se observa que estas grietas no aparecen en toda la superficie de la piel sino que se concentran en la zona del alma del BB.

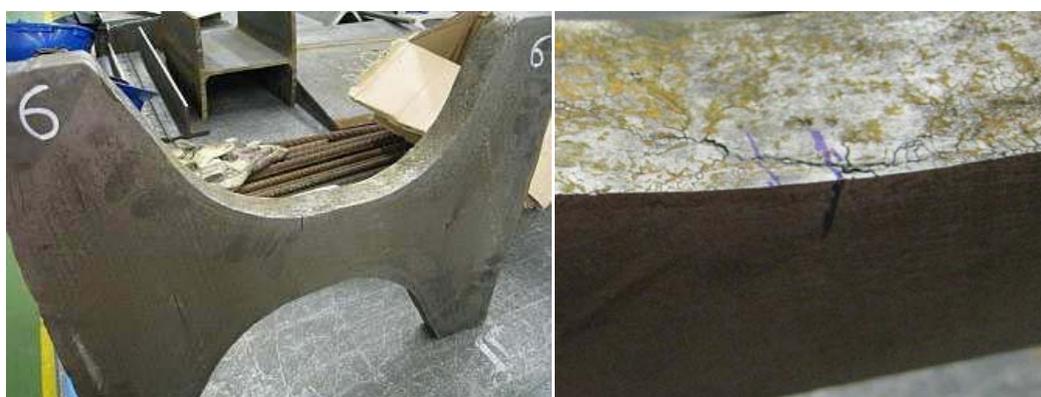


Fig. 6.9 BB decapado y detalle de defecto sobre el alma del BB

### 6.3.6. Análisis micrográfico de la superficie del BB

De las muestras de BB tomadas y decapadas se preparan probetas para observación micrográfica de las zonas de la piel del BB donde se detectan grietas.

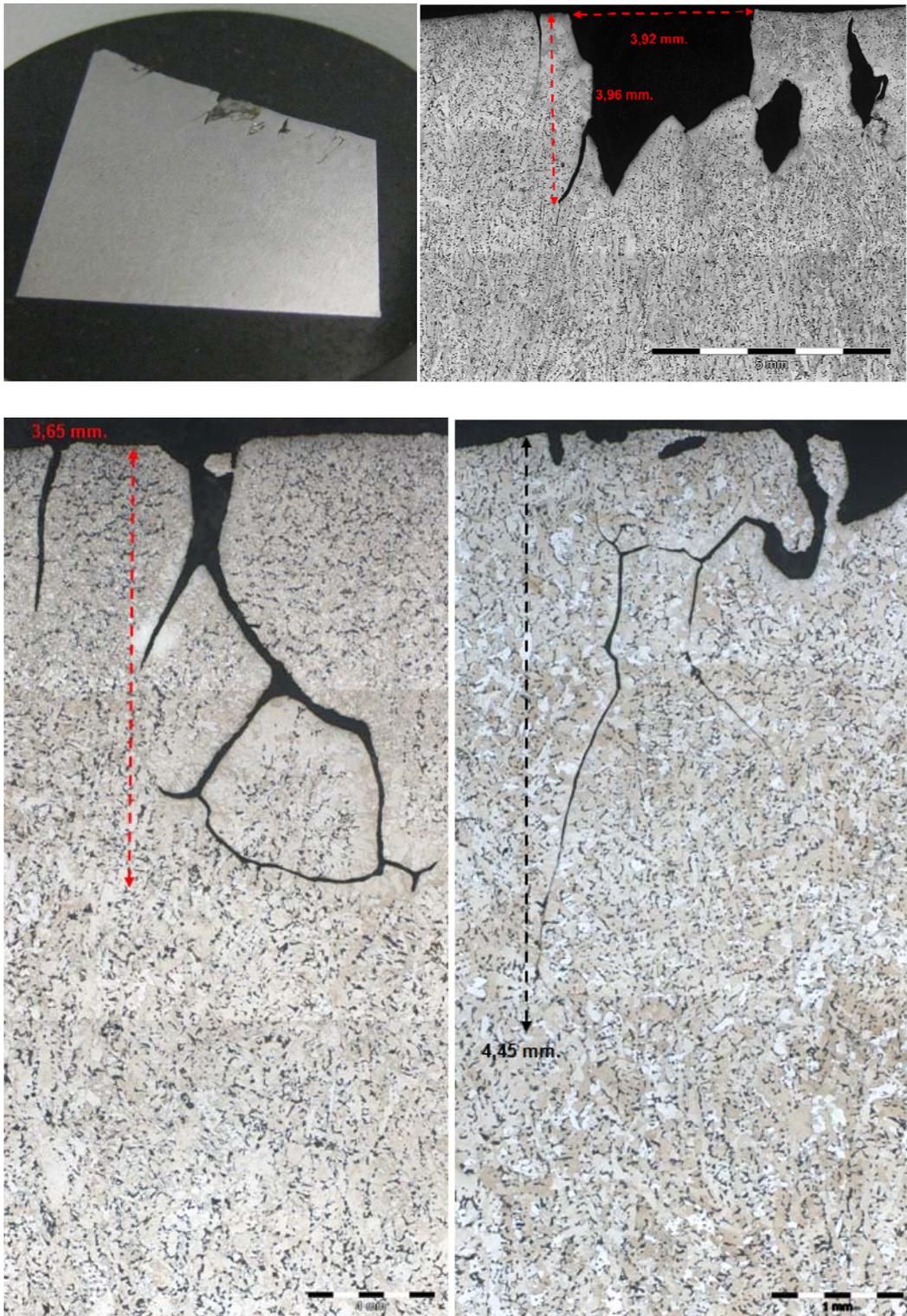


Fig. 6.10 Micrografías del defecto en alma del BB mostrando diferentes profundidades del mismo.

Adicionalmente se toman varias muestras adicionales y se envían para realizar microscopía SEM sobre las mismas. La intención es detectar si existen acumulaciones de defectos internos y/o inclusiones que puedan ser las causantes de la aparición de dichos defectos. Del mismo modo pretendemos determinar si se observa presencia de nitruros de titanio o carbonitruros de titanio distribuidos de forma no uniforme alrededor de la zona de las grietas y que puedan haber causado estos defectos.

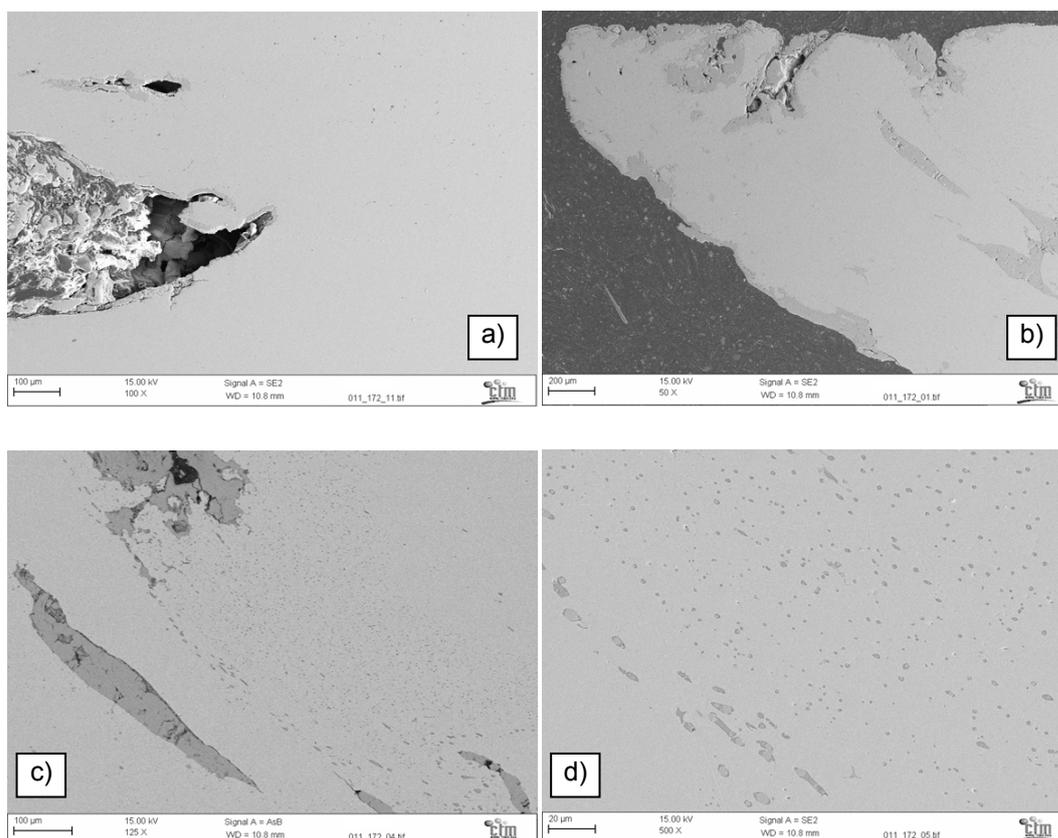


Fig. 6.11 Micrografías SEM de la zona del defecto en BB (a) y (b) zona del defecto; (c) y (d) detalle de acumulación de inclusiones

### 6.3.7. Análisis químico de la superficie del BB

Sobre las muestras enviadas a microscopía SEM se realizaron determinaciones de composición de zonas puntuales, eligiendo específicamente las zonas cercanas a los defectos y las inclusiones detectadas.

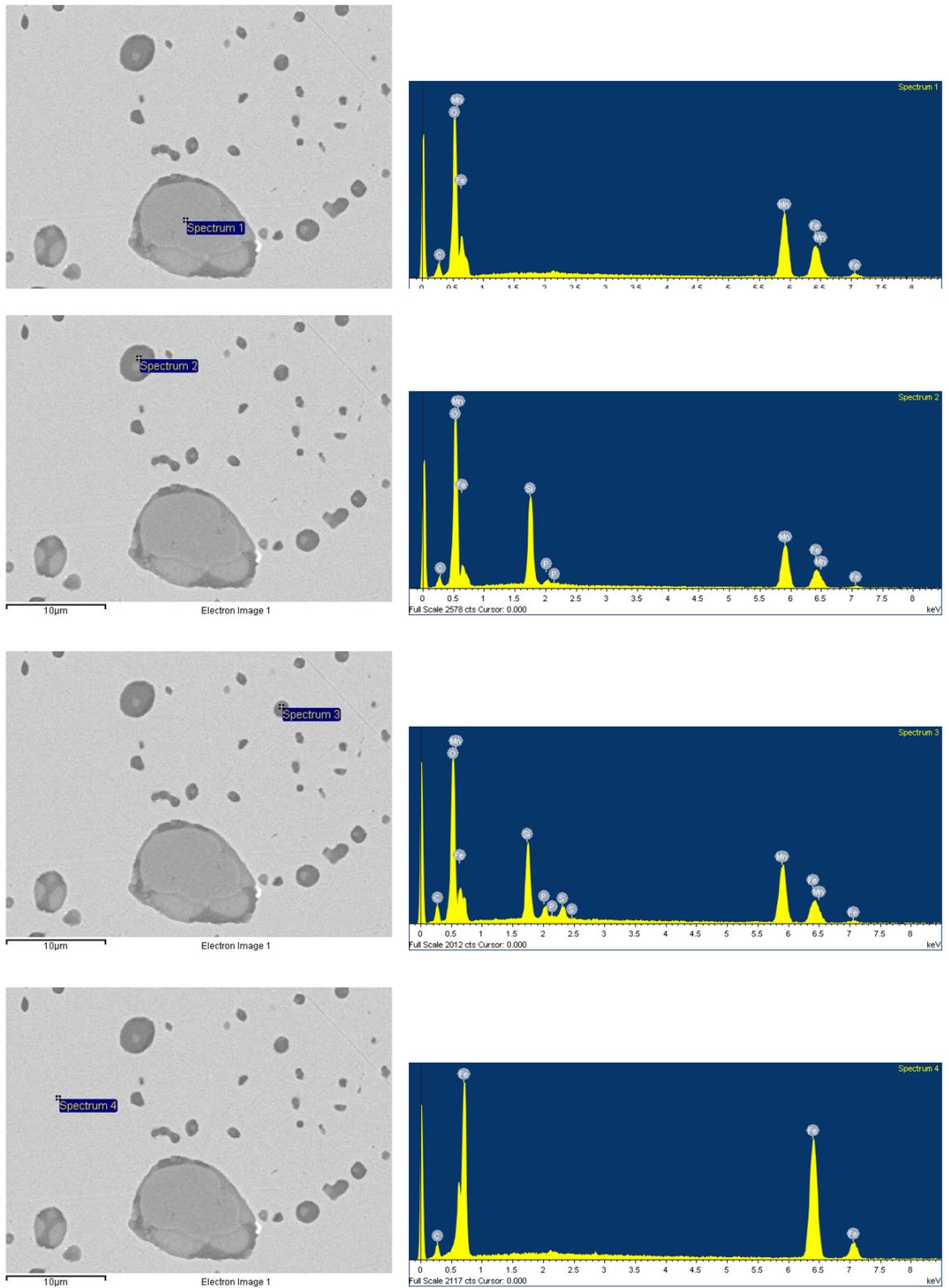


Fig. 6.12 Espectros de las inclusiones detectadas y matriz del material

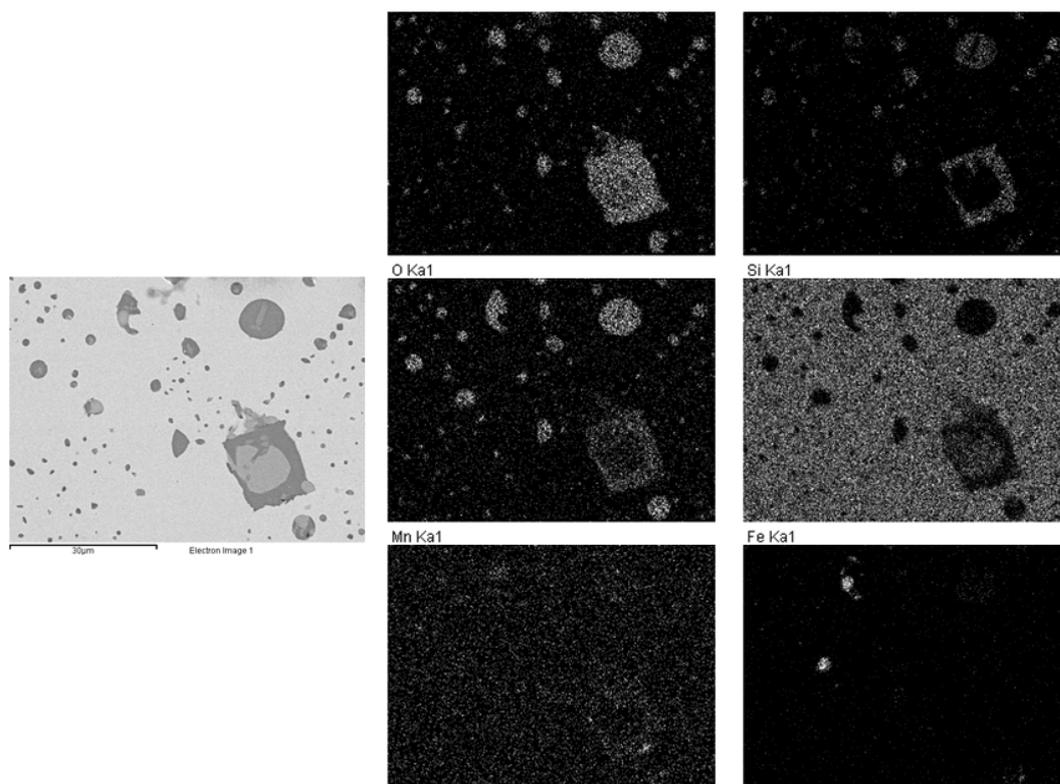


Fig. 6.13 Mapeo de composición sobre zona con inclusiones

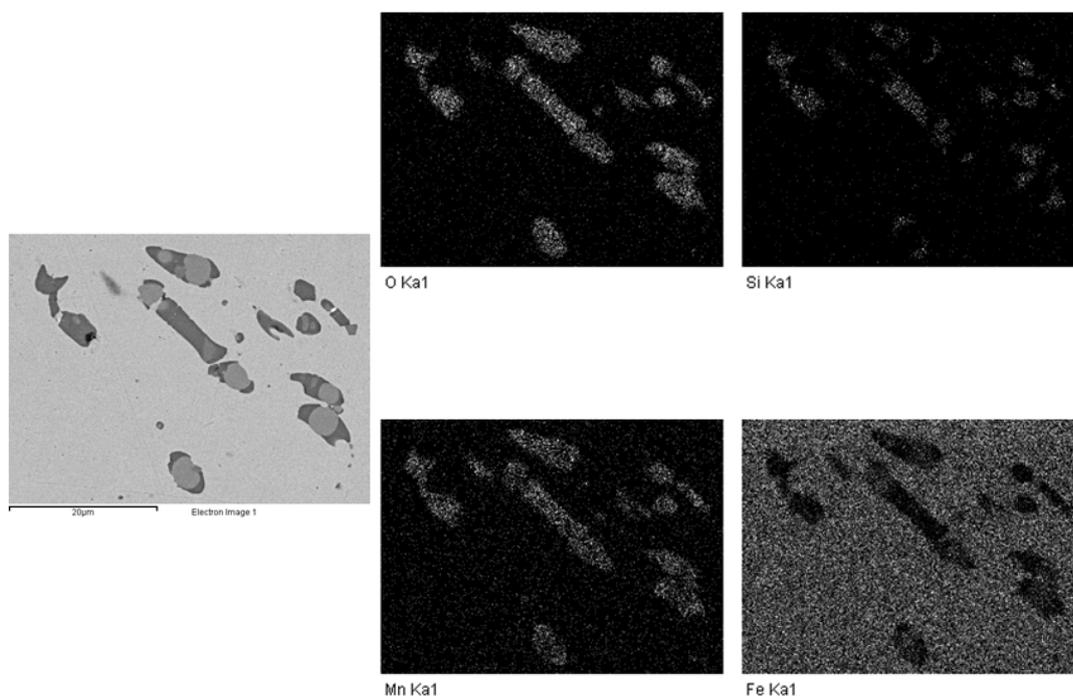


Fig. 6.14 Mapeo de composición sobre zona con inclusiones

### 6.3.8. Conclusiones de la caracterización

Tras los análisis realizados observamos que las marcas aparecidas presentan una morfología inter e intragranular en producto final, con una profundidad que, pese a no superar los máximos permitidos por la EN 10163-3 hacen al material inservible para su comercialización. No detectamos diferencias significativas en la composición química de la zona del defecto respecto al resto del material, quedando descartada la segregación de algún elemento.

Observamos también la presencia de zonas deescarburadas lo cual nos indica que dichas marcas no se han originado durante el proceso de laminación sino que ya estaban presentes en el BB utilizado. Este último punto queda de nuevo demostrado al observar macrográficamente las muestras de BB atacadas. En estas muestras puede observarse la aparición de grietas en el alma de los BB.

Tras el análisis micrográfico de dichas grietas se observa que éstas progresan por lo que en principio parecen los límites de grano austeníticos. Observamos también la presencia de inclusiones en la zona limítrofe a las marcas que, tras su análisis mediante microscopía SEM se observa que se tratan de óxidos de manganeso. Dicha presencia de óxidos, pese a ser masiva en la zona de las marcas, no parece explicar la presencia de las mismas. Consideramos que dichas marcas pueden ser debidas a una pérdida de ductilidad en la zona del alma de los BB durante el proceso de enderezado en colada continua.

Denotamos que no se observa la presencia de ningún TiN acumulados en la zona del defecto, que pudiera explicar esta falta de ductilidad pese a la presencia de Ti en concentraciones importantes en el material.

## 6.4. Aumento del Ti a valores estequiométricos

Vistos los resultados obtenidos en la anterior prueba y en función del análisis realizado sobre los defectos aparecidos, se plantea una nueva modificación de la composición química del acero. En este caso, se aumenta la concentración de titanio con respecto a la prueba anterior hasta valores superiores a los estequiométricos con el contenido de nitrógeno, con la intención de formar nitruros (o carbonitruros) de titanio de mayor tamaño que mejoren las características mecánicas sin perjudicar al material durante el enderezado del BB y que puedan originar los defectos detectados en el producto final.

Es conocido que los aceros con aluminio, niobio o titanio son más susceptibles a desarrollar grietas intergranulares. La aparición de estas grietas transversales en el BB se hace aún más notable si estos precipitados de TiN son de pequeño tamaño dado que dichos precipitados se forman tanto en los límites de grano como en el interior de los mismos pero

dejando zonas libres de precipitados. Estas zonas son más débiles que la matriz, la cual ha sido endurecida por los precipitados. Cuando se aplica una deformación (durante el doblado o enderezado en la colada continua) la tensión se concentra en las regiones débiles promoviendo la nucleación de agujeros y fracturas en los límites de grano.

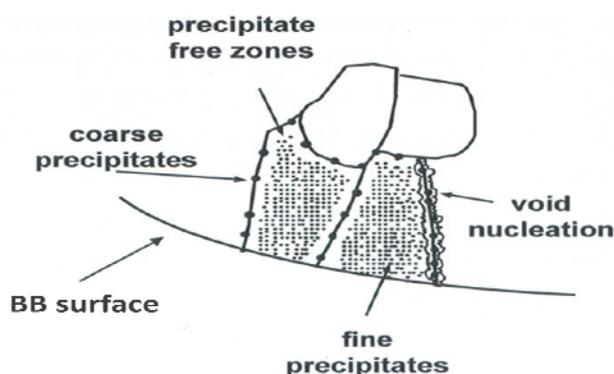


Fig. 6.15 Formación de precipitados finos y gruesos en los granos del acero en BB

Es por esta razón, que nos interesa tener precipitados gruesos y por este motivo el objetivo de esta prueba es lograr una composición similar a la de la prueba anterior pero en que la relación Ti/N sea superior a 3,4. Teniendo en cuenta que los valores de nitrógeno se encuentran alrededor del 0.0110%, se plantea la siguiente composición química:

Tabla 6.8 Horquilla de composición. Ti estequiométrico

%C	%Mn	%Si	%S máx.	%P máx.	%Cu máx.	%V mín.	%Ti	Ti/N mín.
0,08 - 0,10	1,20 - 1,30	0,15 - 0,20	0,025	0,025	0,35	0,065	0,030 - 0,040	3,4

#### 6.4.1. Resultados de la prueba.

Teniendo en cuenta la composición anterior se fabrican un total de dos coladas de las cuales solo el BB3.1 se considera dentro de la prueba. Este formato se coló en las líneas 5 y 6 de la colada continua.

Pese a que se observó en la prueba anterior que los parámetros de velocidad de colada y temperaturas en el momento de enderezado no parecían tener un efecto claro sobre la aparición de los defectos, se considera beneficioso mantener una temperatura alta de enderezado. Por este motivo se fija que esta no debe ser inferior a 910°C. Los parámetros físicos del proceso de colada fueron:

Tabla 6.9 Parámetros de colada continua. Ti estequiométrico

Colada	Línea 5			Línea 6		
	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)
CE553668	773	935	1,06	750	913	1,07
CE553669	733	931	1,04	742	919	1,05

La composición química de las dos coladas mismas se muestra a continuación.

Tabla 6.10 Composición química coladas de prueba. Ti estequiométrico

Colada	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%V	%Ti	%N	Ti/N
CE553668	0,09	1,28	0,22	0,013	0,018	0,29	0,072	0,019	0,0101	1,9
CE553669	0,09	1,29	0,2	0,007	0,015	0,25	0,077	0,04	0,0111	3,6

Puede observarse que una de las coladas no cumplió con los mínimos químicos marcados debido a problemas durante su proceso de fabricación (rendimiento del Ti en el horno cuchara). Por este motivo, sólo las barras de la colada CE556339 se consideran dentro de la prueba.

La colada de prueba se laminó en HEB400 obteniéndose los siguientes resultados mecánicos:

Tabla 6.11 Resultados mecánicos. Ti estequiométrico

Colada	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	%A	R a -20°C (J)
CE553669	336	478	33,5	207

Durante la laminación se observó que prácticamente la totalidad de las barras presentaban defectos superficiales, indistintamente de la línea por la que se hubiera colada el BB. No obstante la profundidad de estos defectos es menor a la de los observados en la prueba anterior.

#### 6.4.2. Conclusiones de la prueba.

Se observa que los valores mecánicos obtenidos en el ensayo de tracción no cumplen con el mínimo requerido por la norma para este tipo y grado de acero. Por esta razón se considera que esta nueva composición no es válida.

Del mismo modo, se siguen observando la presencia de defectos superficiales que, pese a ser de menor profundidad, siguen haciendo imposible la utilización del producto final. Por tanto, entendemos que, pese a encontrarse el Ti en mayor concentración y, por consiguiente formando TiN de mayor tamaño, puede ser que no hayamos logrado el efecto

deseado y/o que existe otro factor que afecta en la aparición de estos defectos. A este efecto, se realiza una revisión de lo BB restantes de la prueba y se observa la presencia de grietas en la piel de los mismos, aunque de menor tamaño a las observadas en la prueba anterior. Por todo ello concluimos que el efecto esperado con la subida del titanio no se ha logrado en el grado deseado.

## 6.5. Substitución de parte del Vanadio por Niobio y eliminación total del uso del Titanio.

Con la intención de descartar definitivamente si el uso del titanio es el origen de la aparición de los defectos superficiales en el alma de los perfiles, se decide probar una nueva composición en la cual sustituiremos el uso del titanio como elemento de microaleación por el niobio.

Según la bibliografía conocemos que el rendimiento o la influencia del niobio sobre las características mecánicas, concretamente sobre el Re y Rm, es el doble que el vanadio. Por este motivo, junto con el hecho que el ferrovanadio tiene un precio considerablemente superior al del ferroniobio, se planteó como opción utilizar Nb, reduciendo la cantidad de vanadio y eliminando totalmente el contenido de titanio. Por tanto, se planteó la siguiente composición:

Tabla 6.12 Horquilla de composición. Uso Nb y V

%C	%Mn	%Si	%S máx.	%P máx.	%Cu máx.	%V	%Nb
0,08 - 0,10	1,20 - 1,30	0,15 - 0,20	0,025	0,025	0,35	0,020 - 0,030	0,020 - 0,030

Adicionalmente se plantea aumentar la temperatura de enderezado en colada continua a 930°C con la intención de minimizar la aparición de grietas transversales en lo BB por efecto de una posible pérdida de ductilidad.

### 6.5.1. Resultados de la prueba.

Se colaron un total de 2 coladas fabricándose el formato de BB3.1 por las líneas 5 y 6. Los parámetros físicos de dichas coladas en colada continua fueron:

Tabla 6.13 *Parámetros de colada continua. Uso Nb y V*

Colada	Línea 5			Línea 5		
	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)
CE174647	763	935	1,08	760	935	1,06
CE174648	767	933	1,09	775	918	1,08

Se observa que la temperatura del alma de ambas coladas se mantuvo por encima de los 930°C marcados como valor mínimo para este parámetro durante la ejecución de la prueba.

La composición química final de estas dos coladas fue:

Tabla 6.14 composición química coladas de prueba. Uso Nb y V

Colada	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%V	%Nb	%N
CE174647	0,08	1,23	0,18	0,03	0,023	0,44	0,026	0,024	0,0106
CE174648	0,09	1,22	0,18	0,025	0,022	0,44	0,025	0,025	0,0082

Se realiza una inspección visual de los BB de la prueba, detectándose grietas en la piel de los BB de poca profundidad pero abarcando prácticamente la totalidad del alma del BB.

Todo el material se laminó en el perfil HEB400, obteniéndose los siguientes resultados mecánicos:

Tabla 6.15 *Resultados mecánicos. Uso de Nb y V*

Colada	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	%A	R a -20°C (J)
CE174647	419	542	26,7	19
CE174648	413	551	25,4	15

Durante la inspección del producto final se detectaron marcas en la totalidad de las barras. Dichas marcas presentan un aspecto de red y, pese a que la profundidad observada durante la inspección visual las sitúa dentro de la tolerancia que permitiría la norma, se descarta el uso comercial del material dado que las exigencias de los clientes superan a la permisividad de la norma.

### **6.5.2. Conclusiones de la prueba.**

Observamos que, pese a que los resultados mecánicos obtenidos mediante el ensayo de tracción se hayan plenamente en tolerancia, todos los ensayos de resiliencia fallaron.

Adicionalmente, se observa también la aparición de marcas superficiales en el alma de los perfiles, por lo que concluimos que el uso del titanio no es la causa raíz de la aparición de este tipo de defectos. Cabe destacar que, pese a que estos defectos han menguado en profundidad, el material nos e considera aún apto para su uso comercial.

Por todo ello consideramos que el uso único del niobio no es una alternativa válida para la consecución de los objetivos de este trabajo.

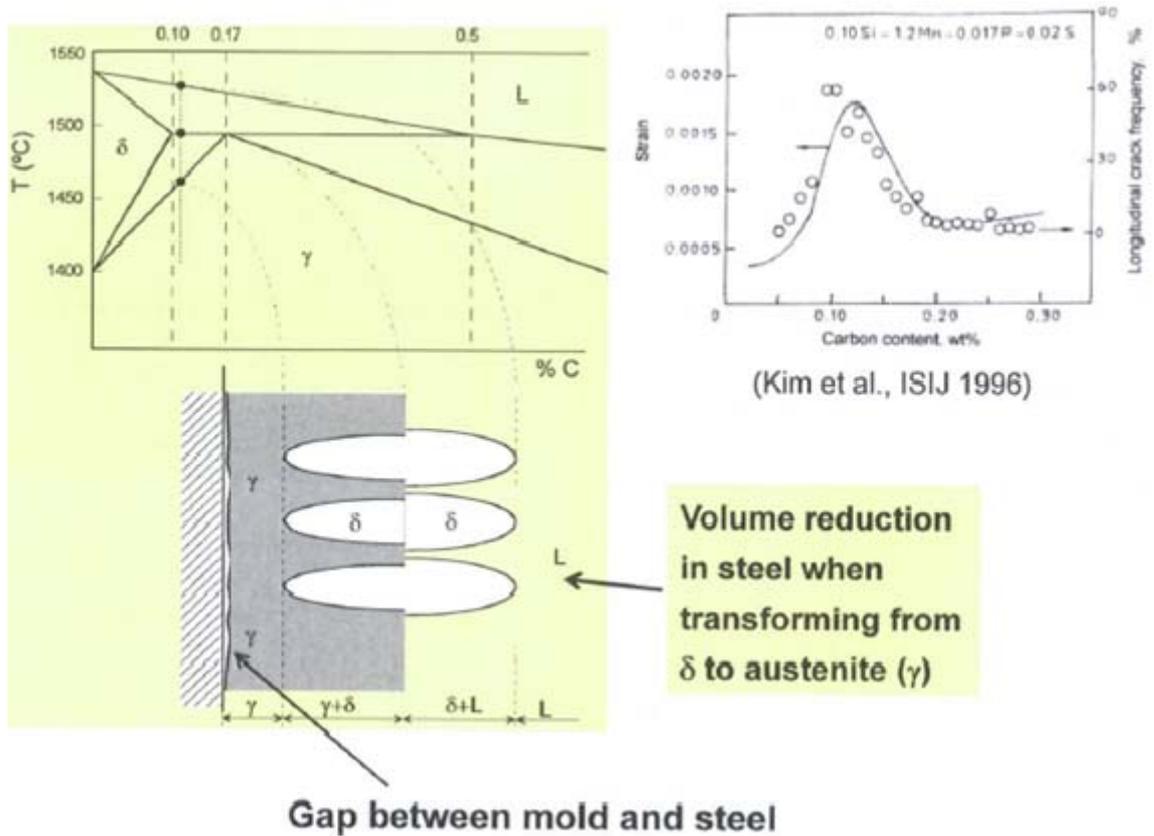
### **6.6. Combinación de varios elementos aleantes: Titanio, Vanadio y Niobio.**

En vistas de los resultados obtenidos en la prueba anterior, queda patente que el uso único del niobio no es suficiente para alcanzar las características mecánicas, concretamente el valor mínimo de resiliencia, deseado para lograr la calidad S 355 J2. Por este motivo y en vistas que el titanio mejora sensiblemente los resultados de resiliencia y teniendo en cuenta la mejora de costes implícita en el uso de niobio frente al vanadio, se plantea una nueva modificación de la composición química utilizando una combinación de los tres elementos citados.

No obstante, hemos observado en la prueba anterior que los valores del ensayo de tracción sí han sido positivos. Dado que también hemos observado experimentalmente que, pese a lo citado en la bibliografía, la presencia del titanio nos reduce ligeramente los valores de Re, planteamos un aumento en la cantidad de manganeso con la intención de elevar dichos valores así como un aumento de vanadio con respecto a la prueba anterior sin llegar a los valores iniciales que planteábamos.

Otra variación que se plantea en esta prueba es una bajada de carbono. Con ello, pretendemos alejarnos de la zona peritética. La reacción peritética se asocia con cambio de volumen de la ferrita delta a la austenita y este efecto de apartarse del molde puede inducir una solidificación irregular de la piel del BB que puede resultar a su vez en la formación de depresiones en el alma las cuales pueden producir grietas longitudinales superficiales. Las grietas que hemos observado en el BB, las cuales combinan tanto grietas longitudinales como marañas de pequeñas grietas todas ellas superficiales, podrían tener su origen en este efecto. Por tanto, con la bajada de carbono, pretendemos influir sobre el CEV

para evitar la posible aparición de estas grietas alejándonos de la zona conflictiva de 0,1% de carbono.



### 6.16 Contracción entre acero y lingotera

A este efecto, se plantea la siguiente composición química como objetivo de esta nueva prueba:

Tabla 6.16 Horquilla de composición. V, Nb y Ti

%C	%Mn	%Si	%S máx.	%P máx.	%Cu máx.	%V mín.	%Ti	%Nb
0,06 - 0,10	1,30 - 1,40	0,15 - 0,20	0,025	0,025	0,35	0,065	0,010 - 0,020	0,018 - 0,020

#### 6.6.1. Resultados de la prueba.

Se fabricaron un total de 2 coladas, con el formato BB3.1 por las líneas 5 y 6 de la colada continua. Igual que en las anteriores pruebas, se mantiene un control de la temperatura y velocidad de colada en la colada continua, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 6.17 Condiciones de proceso. V, Nb y Ti

Colada	Línea 5			Línea 6		
	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)	T Ala (°C)	T Alma (°C)	V colada (m/min)
CE175702	747	908	1,13	727	907	1,07
CE175703	733	905	1,08	733	905	1,09

Pese a no haberse especificado una temperatura objetivo para el alma de los BB, sí que se intentó mantener esta lo más alta posible. No obstante, se observó que, con los mismo ajustes de agua en lingotera para lograr 910°C, la temperatura final de salida de la colada continua fue ligeramente menor.

La composición química final de estas coladas fue:

Tabla 6.18 Composición química coladas de prueba. V, Nb y Ti

Colada	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%V	%Nb	%Ti	%N
CE175702	0,07	1,34	0,24	0,019	0,014	0,32	0,068	0,021	0,012	0,0099
CE175703	0,07	1,31	0,23	0,019	0,013	0,30	0,067	0,019	0,015	0,0096

Los BB3.1 de estas coladas se laminaron en HEB400 lográndose los siguientes resultados en el ensayo de tracción:

Tabla 6.19 Resultados mecánicos. V, Nb y Ti

Colada	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	%A
CE175702	370	513	26,3
CE175703	372	506	26,0

Al realizar los ensayos de resiliencia, se observa una gran dispersión en los resultados individuales. Por esta razón, acompañamos los valores máximo, mínimo y desviación estándar de los promedios de los 8 ensayos realizados. Cabe destacar que cada ensayo de resiliencia se compone de un total de 4 probetas Charpy ensayadas.

Tabla 6.20 Ensayos de resiliencia. Disparidad en resultados. V, Nb y Ti

Colada	N	Resiliencia a -20°C (J)			
		Media	Máx	Mín	Desv R
CE175702	8	19	50	8	14,4
CE175703	8	45	110	11	36,9

Puede observarse que, pese que la media de una de las coladas se encuentra dentro de tolerancia, el valor puede considerarse estable.

Durante el control visual de los perfiles laminados, se siguieron observando defectos superficiales en el alma de los mismos.

### **6.6.2. Conclusiones de la prueba.**

Se observa que los resultados del ensayo de tracción, pese a encontrarse dentro de tolerancia, presentan valores de  $R_e$  relativamente bajos. Asociamos esta bajada de características al descenso del carbono y, por ende del CEV.

A vez, observamos que esta disminución en la concentración de C no ha mejorado la calidad superficial de las barras, por lo que asumimos que la causa de la aparición de estas marcas no se asocia con los cambios de volumen anteriormente citados. Tras los resultados obtenidos, se decide realizar una revisión de las muestras tomadas de BB, observándose una elevada concentración de porosidad en los mismos. Esta porosidad superficial puede ser debida a una cantidad inadecuada de aceite en lingotera. Esta porosidad podría ser parte de la causante de los defectos apreciados en el alma de los perfiles laminados.

Observando los resultados de resiliencia vemos una gran disparidad en los resultados. Pese a que la norma permite que hasta un valor dentro de los 4 que forman un mismo ensayo quede fuera de la tolerancia, siempre que la media alcance el valor mínimo, esta falta de estabilidad unida a que en muchos de los ensayo obtuvimos más de un valor fuera de norma, hace que desechemos esta composición química como material válido. Consideramos que la presencia del Nb ha podido ser la causa de esta gran dispersión de los resultados de resiliencia, dado que este elemento actúa sobre la recristalización estática del acero y que nos se realizó un proceso de laminación con temperatura controlada, éste pudo haber afectado de forma diferente a diferentes zonas del perfil laminado dando esta dispersión en los resultados de resiliencia.

Por todo ello, se desecha el uso de niobio en futuras composiciones así como se recupera los valores hasta ahora utilizados en la composición de C, quedando esta prueba como una composición no válida.

## 6.7. Uso de Vanadio, Titanio y mayor contenido de Manganeso junto con variación de la distribución de aceite en lingotera.

Tras los resultados obtenidos en la última prueba, se desecha el uso del niobio como elemento de microaleación y se retoma la idea inicial del proyecto usando una combinación de vanadio, manganeso y titanio.

Dado que la combinación de estos tres elementos ya ha dado resultados negativos con anterioridad, se decide aumentar los contenidos de estos elementos con la intención de asegurar las propiedades mecánicas. Por ello, se plantea la siguiente composición química objetivo:

Tabla 6.21 Horquilla de composición. V, Ti y Mn alto

%C	%Mn	%Si	%S máx.	%P máx.	%Cu máx.	%V mín.	%Ti
0,08 - 0,10	1,40 - 1,50	0,15 - 0,20	0,025	0,025	0,35	0,09	0,015 - 0,025

Hemos planteado como una de las posibles causas de la aparición de las marcas la porosidad presente en la piel del BB. Esta porosidad, puede tener su origen en la cantidad de aceite añadida a la lingotera. Además, dicha cantidad de aceite influye también en el agarre del acero al cobre de la lingotera y podría originar también las grietas longitudinales que hemos detectado en las pruebas anteriores. Teniendo todo esto en mente, se plantea una comparativa en la cantidad de aceite que se adiciona en lingotera.

Hasta el momento de esta prueba, tanto a la línea 5 como la línea 6 de la colada continua se le adicionaba aceite mediante una bomba de regulación del distribución que funcionaba al 50% lo que implicaba una cantidad de aceite de 10 l/min. En esta prueba, se coloca el distribuidor de aceite al 20% en la línea 6 (lo que implica 4 l/min) y al 50% en la línea 5. De esta manera pretendemos comparar el efecto de esta diferente adición de aceite para una misma composición química y producto laminado y ver su efecto tanto en el aspecto superficial de los BB como en el perfil laminado final.

Para determinar la cantidad de poros en cada una de las condiciones, se decide sacar un BB de cada una de las líneas antes de la primera pasada de laminación pero habiendo pasado por el horno de recalentamiento de forma normal así como por el proceso de descascarillado. Con ello, se pretende observar el aspecto que presentan las barras tras pasar por el horno de recalentamiento y una vez se ha eliminado la cascarilla que se genera en este proceso. Se tomó un metro de BB como unidad de medida y se realizó un conteo de los poros visibles en toda la superficie del BB.

### 6.7.1. Resultados de la prueba.

Se cuela una única colada con el formato de BB3.1 en las líneas 5 y 6. La composición final de la colada fue:

Tabla 6.22 Composición química coladas de prueba. V, Ti y Mn alto

Colada	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%V	%Ti	%N
CE182030	0,07	1,44	0,22	0,017	0,014	0,24	0,093	0,018	0,0097

Se realiza un conteo del número de poros sobre la superficie transversal de una muestra tomada de los BB de cada una de las líneas:

Tabla 6.23 Cantidad de poros en función de la cantidad de aceite

Línea	Distribución aceite	Número Poros
5	50%	61
6	20%	3

A continuación se presentan imágenes de las muestras tomadas de las diferentes condiciones:

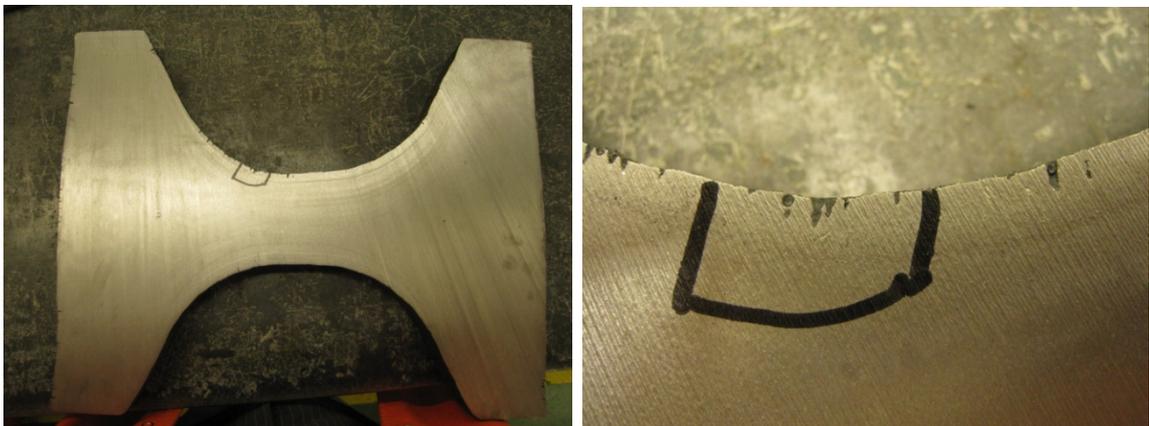


Fig. 6.17 Sección transversal y detalle del BB con 50% de aceite



Fig. 6.18 Sección transversal del BB con 20% de poros



Fig. 6.19 Detalles de los BB tras decapado químico. (a) 50% de aceite (b) 20% de aceite

Se realiza un conteo de los poros de muestras tras el paso de los BB3.1 por el horno de recalentamiento y el proceso descascarillado, pero sin ninguna pasada de laminación. Se toma como muestra un metro de BB3.1, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 6.24 Conteo de poros en los BB tras descascarillado

Línea	Distribución aceite	nº de poros	
		S<1mm	1<S<5mm
5	50%	12818	315
6	20%	2624	48

Realizando un control visual de todos los BB implicados en la prueba, se detecta la presencia de grietas longitudinales discontinuas en los BB de la línea 5, tal como se muestra en la figura 6.20



Fig. 6.20 Detalle grieta en BB de la línea 5

Todos los BB de la prueba se laminan en HEB400. Durante la inspección de las barras se observa el siguiente comportamiento en cuanto a la aparición de marcas:

Tabla 6.25 Barras con defectos en función de la cantidad de aceite

Línea	Distribución aceite	Número barras laminadas	Número de barras con defecto en perfil final
5	50%	6	5
6	20%	6	1

Se realizan ensayos de tracción y resiliencia de las barras laminadas obteniéndose los siguientes resultados:

*Tabla 6.26 Resultados mecánicos. V, ti y Mn alto*

Colada	Línea	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	%A	R a -20°C (J)
CE182030	5	377	484	26,7	187
CE182030	6	362	480	28,9	201

### 6.7.2. Conclusiones de la prueba.

Tras analizar los resultados obtenidos, observamos que tanto los valores mecánicos obtenidos mediante el ensayo de resiliencia (Re, Rm y %A) como los valores del ensayo de resiliencia, son valores dentro de la tolerancia fijada por la norma.

Adicionalmente observamos una clara correlación entre la presencia de defectos en el alma, tano en BB como en producto final, con la cantidad de aceite en lingotera, obteniéndose un mejor resultado a menor cantidad de aceite. No solo observamos una menor cantidad de poros sino que las grietas longitudinales observadas solo aparecen en los BB con mayor cantidad de aceite.

Teniendo en cuenta todas estas observaciones, suponemos que el origen de los defectos detectados en el alma de los perfiles viene fuertemente influenciado por la presencia de porosidad en los BB. A su vez, esta porosidad se origina por una excesiva cantidad de aceite en la lingotera. Consideramos no obstante que otros factores pueden influir en la aparición de las grietas longitudinales, como puede ser una relativa pérdida de ductilidad en la zona del enderezado en colada continua, pero el resultado de esta prueba nos ratifica que la causa principal de los defectos presentes en los perfiles finales es la porosidad en la piel de los BB.

## Conclusiones

Tras el análisis de los datos y conclusiones de cada una de las pruebas realizadas y de acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente podemos decir que:

- Hemos logrado definir una composición química adecuada para lograr el tipo y grado de acero deseado, usando para ello los elementos manganeso, vanadio y titanio como elementos de microaleación.
- Se ha probado y desestimado el uso de niobio que, pese a ser sus ferroaleaciones sensiblemente más económicas que las de vanadio, presentaban los productos finales laminados valores fuera de norma.
- Se asocia la aparición de defectos superficiales a la presencia de porosidad en la piel superficial del Beam blank.
- Se desestima el efecto de los TiN sobre la aparición de defectos superficiales.
- Se observa una influencia clara de la cantidad de aceite en lingotera sobre la presencia de porosidad en el Beam Blank.

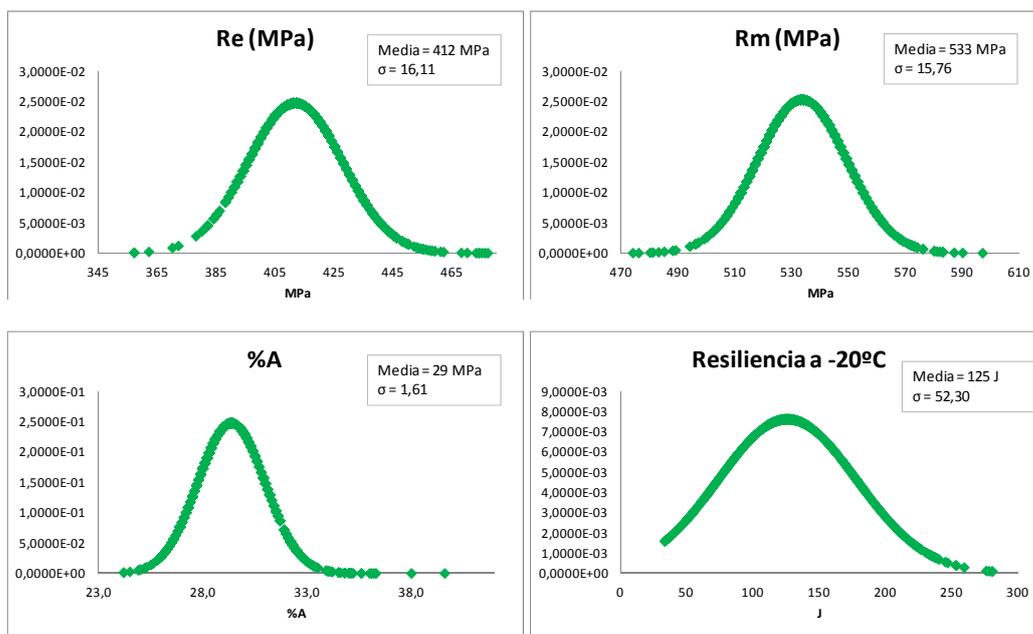
Por todo ello podemos concluir que se han logrado los objetivos planteados en este trabajo, obteniéndose un acero que cumple tanto a nivel químico, como en sus características de calidad superficial con el estándar fijado por la EN 10025-2 y la EN 10163-3 para el tipo y grado S 355 J2 +AR.

El acero obtenido ha requerido el uso de tanto vanadio como titanio así como un aumento en su composición de manganeso con respecto al origen para alcanzar las propiedades mecánicas obtenidas quedando una composición química final tal como se muestra en la siguiente tabla:

*Conclusiones: Composición química final*

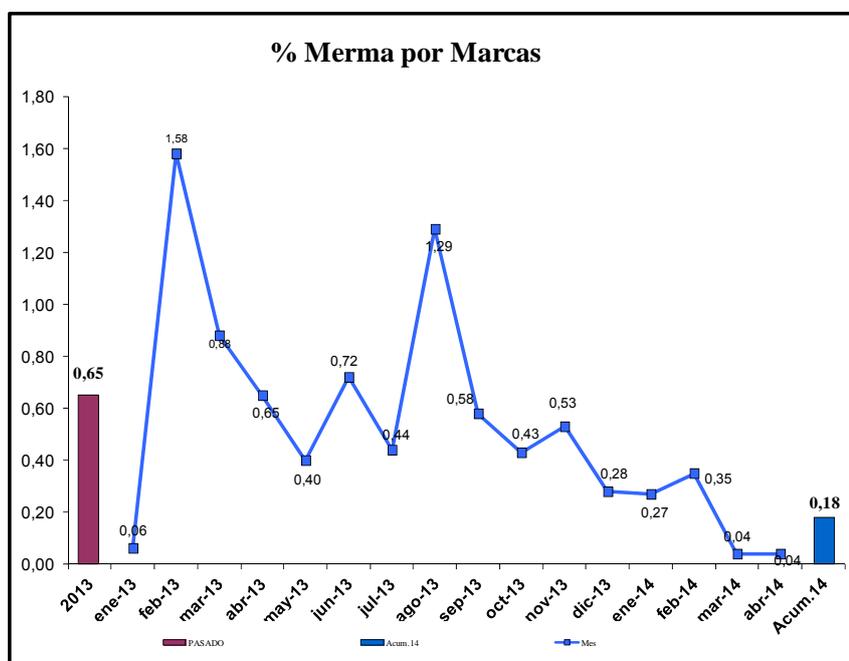
%C	%Mn	%Si	%S máx.	%P máx.	%Cu máx.	%V mín.	%Ti
0,08 - 0,10	1,40 - 1,50	0,15 - 0,20	0,025	0,025	0,35	0,09	0,015 - 0,025

Para asegurar que los resultados obtenidos han sido estables en el tiempo, se presenta un estudio estadístico de los valores mecánicos obtenidos desde la optimización de la composición química presentada hasta el momento de la entrega de este trabajo:



Como puede observarse, todos los valores mecánicos obtenidos se encuentran dentro de los límites marcados para este tipo y grado de acero.

Del mismo modo, se ha logrado minimizar sensiblemente la aparición de defectos superficiales en los perfiles finales, los cuales impedirían la comercialización del producto final laminado.



Ha quedado patente en el desarrollo de las diferentes pruebas que las condiciones del proceso de fabricación, y más concretamente del proceso de colada, son claves para la obtención de estas buenas características superficiales. Se ha establecido como nuevo estándar productivo la reducción de la cantidad de aceite en lingotera hasta un 20% lográndose una continuidad en el buen aspecto superficial logrado.

El impacto económico de esta disminución de defectos hace patente que la mejora obtenida es sustancial y vital para el bienestar de la empresa en los momentos actuales de crisis económica, tanto por la reducción de merma del proceso como por la obertura de nuevos mercados gracias a la calidad obtenida. A continuación se presenta un indicador de seguimiento de la aparición de defectos superficiales (marcas) en los perfiles:

## **Posibles acciones futuras o vías de continuidad del proyecto.**

Pese a que se ha desestimado el uso del niobio como elemento aleante para la obtención de este grado de acero, entendemos que su uso puede volver a ser considerado en un futuro. El motivo principal es la disminución del coste de ferroaleaciones que implicaría la sustitución total o parcial del vanadio por niobio. En vista de los resultados mecánicos obtenidos, queda patente que una sustitución directa de un elemento por otro no sería suficiente para lograr alcanzar los valores necesarios, por lo que sería necesaria una variación en el proceso productivo de laminación que ayudara a dicha consecución.

Esta variación pasaría por la implementación de un proceso de laminación a temperatura controlada conocido como laminación termomecánica. La consecución de este tipo y grado de acero mediante una vía termomecánica queda fuera de los objetivos de este trabajo y perfectamente podría involucrar todo un proyecto en si mismo.

Otra posibilidad en cuanto a variación de los elementos de aleación utilizados sería el uso de boro en la fabricación del acero. Es conocida la afinidad del B hacia el nitrógeno, por lo que el uso de este material también podría ayudar a la eliminación de gases en el acero que, a su vez reducirían la presencia de poros en el BB y por ende, la aparición de defectos en el producto final. Suponemos que la presencia de los BN podrían facilitar el alcance de las propiedades mecánicas deseadas pese a que, por otro lado, la presencia de B en el acero aumenta sensiblemente la templabilidad del material, lo que podría llegar a originar nuevos defectos en la superficie de los perfiles.

Una última vía de continuidad de este proyecto pasaría por la optimización de los parámetros de proceso de fabricación del acero como de colada continua para tanto la eliminación de defectos superficiales como la posibilidad de reducción de elementos de aleación.



## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a todos mis compañeros de trabajo su ayuda durante todo el desarrollo de las diferentes pruebas, especialmente a Juan Jesús Herrera y Anders Cardona, sin la ayuda de los cuales me hubiera sido totalmente imposible llevar a cabo este proyecto.

Igualmente quiero agradecer a mi tutora Jessica Calvo, su ayuda y comprensión durante todo este trabajo.

Por último quisiera agradecer de forma especial a mi familia y amigos su ayuda y motivación durante todo este trabajo; sin ellos seguramente no hubiera encontrado los momentos para poder dedicarme al mismo. En este aspecto quiero hacer una mención especial a mi pareja, Raquel Carrasco, a su hija Anna y a nuestra hija Marina, nacida durante el desarrollo del proyecto, por su enorme comprensión y por darme la motivación que pudo faltarme en algunos momentos.

Seguramente queda mucha gente en el tintero a la que me gustaría dar las gracias y que no aparecen en estas pocas líneas. A todos ellos, que con total seguridad, sois conscientes de vuestra inestimable ayuda, muchísimas gracias.



## Bibliografía

- [1] VÁZQUEZ LÓPEZ, J. *Influencia de los elementos en las características de los aceros y fundiciones*, Madrid: Anales de mecánica y electricidad - ICAI, 1951
- [2] LASHERAS Y ESTEBAN, J. M. *Tecnología del acero*, Zaragoza: 1967
- [3] APRAIZ BARREIRO, J. *Aceros especiales*, Madrid: Dossat, 1966
- [4] RODRIGUEZ-IBABE, J. M.; GUTIÉRREZ, I.; LÓPEZ, B.; IZA-MENDIA, A. *Microalloying for New Steel Processes and Applications*, Switzerland: Trans Tech, 2005
- [5] TAFE, W. *Laminage et Tracé des Cannelures des Cylindres de Laminoirs*, Paris: Dunod, 1931
- [6] LOSANA, L. Y FERRER MORERA, J. M. *Metalurgia*, Barcelona, Manuel Marin, 1951
- [7] BURTON, M. S. *Metalurgia aplicada*, Madrid: Aguilar, 1965
- [8] ENRIQUEZ BERCIANO, J. L. Y TREMPES GUERRA, E. *Monografía sobre tecnología del acero, Partes I, II, III y IV*, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2009
- [9] POLUSHKIN, E. P., *Defectos y fallos de los metales: su origen y eliminación*, Paraninfo, 1960
- [10] APRAIZ BARREIRO, J. *Fabricación de hierros, aceros y fundiciones*, Madrid: Urmo, 1975
- [11] *Basics of Iron and Steel Process*, Documentación interna, 2010
- [12] *Generalidades sobre la fabricación de aceros*, Documentación interna, 1993

## Anexo I: Impacto económico.

En todo momento se ha intentado seguir una política de reducción de costes procurando que el impacto económico de las diferentes pruebas realizadas dentro del marco de este trabajo fuera el menor posible dentro del ámbito de la empresa donde se realizó. Por esta razón, dentro del impacto económico de este trabajo, no tendremos en cuenta el coste de fabricación de los materiales implicados, dado que en su mayoría fueron o bien vendidos o bien reutilizados, sino únicamente aquellos aspectos directamente involucrados en los análisis y controles específicos que se hayan podido realizar. Excluimos también los ensayos mecánicos realizados para la realización de los estudios estadísticos tanto de la caracterización del material de partida como de la comprobación de resultados en el tiempo.

Prueba	Concepto	Unidades	Precio (€/unidad)	Total (€)
Material de partida	Realización de probetas micrográficas	24	93	2.232
Uso de Ti	Mecanizado de probetas de tracción	12	10	120
	Mecanizado de probetas de resiliencia	48	18	864
	Realización de ensayos de tracción	12	37	444
	Realización de ensayos de resiliencia	48	45	2.160
	Análisis químico	3	47	141
	Mecanizado de probetas de tracción	12	10	120
	Realización de ensayos de tracción	12	37	444
	Corte de muestras de BB	3	5	15
Caracterización de defectos	Decapado de BB	3	15	45
	Realización de probetas micrográficas	6	93	558
	Ensayos microscopía SEM (CTM)	2	325	650
	Análisis químico	3	47	141
Ti estequiométrico	Mecanizado de probetas de tracción	8	10	80
	Mecanizado de probetas de resiliencia	32	18	576
	Realización de ensayos de tracción	12	37	444
	Realización de ensayos de resiliencia	32	45	1.440
	Análisis químico	2	47	94
Uso de V y Nb	Mecanizado de probetas de tracción	8	10	80
	Mecanizado de probetas de resiliencia	32	18	576
	Realización de ensayos de tracción	8	37	296
	Realización de ensayos de resiliencia	32	45	1.440
Uso de Ti, V y Nb	Análisis químico	2	47	94
	Mecanizado de probetas de tracción	8	10	80
	Mecanizado de probetas de resiliencia	64	18	1.152
	Realización de ensayos de tracción	4	37	148
	Realización de ensayos de resiliencia	32	45	1.440
Uso de V, Ti y Mn alto	Análisis químico	2	47	94
	Mecanizado de probetas de tracción	4	10	40
	Mecanizado de probetas de resiliencia	32	18	576
	Realización de ensayos de tracción	4	37	148
	Realización de ensayos de resiliencia	32	45	1.440
	Corte de muestras de BB	2	5	10
Consumibles	Decapado de BB	2	15	30
	Análisis químico	1	47	47
	Mateial de laboratorio	---	---	98
Gestión y Análisis de resultados	HCl	---	---	23
	Horas caracterización micrográfica	350	30	10.500
	Horas Ingeniero	700	50	35.000
<b>TOTAL</b>				<b>63.880</b>

## Anexo II: Impacto ambiental.

Durante todo el desarrollo del proyecto se han cuidado los aspectos ambientales implicados en todos los procesos y pruebas realizadas. Estando todo el trabajo incluido dentro de un marco industrial, estos puntos, junto con aquellos que implican a la seguridad de higiene de las personas, son ampliamente vigilados y cuidados.

Algunos aspectos a tener en cuenta en cuanto a los residuos generados son:

- Residuos sólidos referentes a los restos de las muestras tomadas en cada una de las pruebas. La mayor parte de estos residuos han sido reutilizados como chatarra y, por tanto, como materia prima en el proceso de fabricación de nuevo acero.
- Uso de ferroaleaciones. Se ha tendido, tanto por temas medioambientales dado los procesos de extracción de estos materiales, como por temas de costes productivos, a la reducción o el uso menor posible de estos minerales necesarios para la consecución de los objetivos del proyecto.
- Residuos químicos. Debido a la necesidad de realizar decapados químicos de las diferentes muestras así como ataques sobre las probetas mediante la acción de Nital, se han tomado medidas claras para la reducción de su uso así como la recogida de los residuos generados para su posterior procesamiento y/o eliminación.
- Proceso productivo. Durante la realización de las diferentes pruebas, estando todas ellas dentro de un entorno industrial controlado, se ha tenido un estricto control de cualquier emisión tanto a nivel de polvo como de humos, así como restos de refrigerantes o restos de producción. Del mismo modo, todas las aguas de refrigeración, siguen un controlado circuito que las hace pasar por diferentes piscinas decantadoras, así como plantas de tratamiento evitando así su derrame a acuíferos cercanos, ríos o sistemas de residuos estándar de forma descontrolada.
- Impacto sonoro. Tanto el proceso de fabricación del acero en el EAF como en el horno cuchara como el posterior proceso de laminación, generan un gran impacto sonoro debido a los enormes ruidos que se generan. Este tipo de emisiones acústicas han sido también controladas mediante la implantación de pantallas acústicas para evitar o controlar su emisión.

## Anexo III: Listado de Figuras

Fig. 3.1 Recreación de la forma de trabajar el acero los antiguos siderúrgicos.....	12
Fig. 3.2 Antigua ferrería vizcaína (Lebario) y Esquema de una farga Catalana .....	13
Fig. 3.3 Convertidor Bessemer .....	14
Fig. 3.4 Producción mundial de acero y en Inglaterra hasta los años 80.....	15
Fig. 3.5 Esquema de un EAF.....	16
Fig. 3.6 Operarios trabajando en la construcción de la planta de altos hornos de ENSIDESA en Avilés 1955.....	17
Fig. 3.7 Vista aérea de las instalaciones de una acería de Celsa .....	20
Fig. 3.8 Mineral de hierro recién extraído de la mina.....	23
Fig. 3.9 Pellets de hierro extraído del mineral.....	24
Fig. 3.10 Pilas exteriores de chatarra .....	25
Fig. 3.11 Fosos y clasificación de chatarra .....	26
Fig. 3.12 Introducción de la chatarra determinada dentro de una cesta de carga de horno eléctrico	27
Fig. 3.13 Ejemplo de cok siderúrgico.....	28
Fig. 3.14 Muestras de cal antes de ser introducidas en el acero.....	29
Fig. 3.15 Muestras de algunos tipos de ferroaleaciones con diferente granulometría añadidos en la fabricación del acero, como son el FeMn, el FeSi y el FeV .....	30
Fig. 3.16 Ladrillos refractarios con base de silicio y alúmina .....	31
Fig. 4.1 Layout de la Acería.....	35
Fig. 4.2 Layout del tren de laminación.....	36
Fig. 4.3 Esquema de los diferentes elementos de un EAF .....	37
Fig. 4.4 Proceso de vuelco a través del EBT .....	38
Fig. 4.5 Proceso de caga de chatarra mediante cesta a través de la bóveda del EAF.....	38
Fig. 4.6 Vuelco de una colada a la cuchara a través del EBT.....	39
Fig. 4.7 Esquema de los equipos de horno cuchara .....	40
Fig. 4.8 Esquema de una colada continua .....	42
Fig. 4.9 Lingotera de Beam Blank.....	43
Fig. 4.10 Chorros de acero cayendo sobre lingotera de Beam Blank (formato BB3.1).....	44
Fig. 5.1 Espectrómetro .....	49
Fig. 5.2 Analizador de C y S Lecco.....	50
Fig. 5.3 Analizador de N Lecco .....	50
Fig. 5.4 Máquina de ensayos de 100tn .....	51
Fig. 5.5 Extensómetro digital SERVOSIS .....	52
Fig. 5.6 Péndulo Charpy.....	52
Fig. 5.7 Microscopio óptico Olympus GX 51 .....	53
Fig. 5.8 Pirómetro portátil .....	54

<i>Fig. 5.9 Esquema de un BB3.1</i> .....	55
<i>Fig. 5.10 Imagen frontal de una pila de BB3.1</i> .....	56
<i>Fig. 5.11 Esquema de un perfil H</i> .....	57
<i>Fig. 6.1 Micrografías a diferentes aumentos del material de partida en estado de colada</i> .....	60
<i>Fig. 6.2 Distribución del tamaño de grano en estado de colada</i> .....	61
<i>Fig. 6.3 Micrografías estado de laminación: (a)tamaño de grano 8 con 2078 granos/mm<sup>2</sup> (b) tamaño grano 8,5 con 2889 granos/mm<sup>2</sup></i> .....	61
<i>Fig. 6.4 Micrografías estado de laminación: (a)tamaño de grano 8 con 2100 granos/mm<sup>2</sup> (b) tamaño grano 7,5 con 1400 granos/mm<sup>2</sup></i> .....	62
<i>Fig. 6.5 Alma del perfil HEB400 con defectos superficiales</i> .....	65
<i>Fig. 6.6 Fotografías de perfiles HEB400 con defectos en el alma</i> .....	67
<i>Fig. 6.7Preparación metalográfica: (a) muestras con defecto; (b) detalle del defecto; (c) detalle del despiece</i> .....	68
<i>Fig. 6.8Micrografías del defecto. (a) Defecto de 1,7mm; (b) detalle de la microestructura del defecto (a); (c) defecto de 0.92 mm; (d) defecto de 0.83mm; (e) detalle de la microestructura de la zona del defecto (d)</i> .....	69
<i>Fig. 6.9 BB decapado y detalle de defecto sobre el alma del BB</i> .....	70
<i>Fig. 6.10 Micrografías del defecto en alma del BB mostrando diferentes profundidades del mismo</i> .....	71
<i>Fig. 6.11 Micrografías SEM de la zona del defecto en BB (a) y (b) zona del defecto; (c) y (d) detalle de acumulación de inclusiones</i> .....	72
<i>Fig. 6.12Espectros de las inclusiones detectadas y matriz del material</i> .....	73
<i>Fig. 6.13 Mapeo de composición sobre zona con inclusiones</i> .....	74
<i>Fig. 6.14 Mapeo de composición sobre zona con inclusiones</i> .....	74
<i>Fig. 6.15 Formación de precipitados finos y gruesos en los granos del acero en BB</i> .....	76
<i>6.16 Contracción entre acero y lingotera</i> .....	81
<i>Fig. 6.17 Sección transversal y detalle del BB con 50% de aceite</i> .....	85
<i>Fig. 6.18 Sección transversal del BB con 20% de poros</i> .....	86
<i>Fig. 6.19 Detalles de los BB tras decapado químico. (a) 50% de aceite (b) 20% de aceite</i> .....	86
<i>Fig. 6.20 Detalle grieta en BB de la línea 5</i> .....	87

## Anexo IV: Listado de Tablas

Tabla 4.1 Resumen de la Tabla 4 de la EN 10025-2 Composición química del análisis de producto	46
Tabla 4.2 Resumen de la Tabla 7 de la EN 10025-2 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente para productos planos y largos en tipos y grados .....	46
Tabla 4.3 Resumen de la Tabla 9 de la EN 10025-2 Propiedades mecánicas energía de flexión por choque KV longitudinal para productos planos y largos.....	46
Tabla 4.4 Profundidad máxima admisible de las discontinuidades de clase C (en mm) .....	47
Tabla 5.1 Dimensiones nominales de un BB3.1 .....	55
Tabla 5.2 Definición de símbolos en perfiles.....	57
Tabla 5.3 Valores dimensionales nominales del perfil HEB400 .....	58
Tabla 6.1 Horquilla de composición química del material de partida.....	59
Tabla 6.2 Horquilla de composición objetivo. Uso de Ti.....	63
Tabla 6.3 Parámetros de colada continua. Uso de Ti.....	64
Tabla 6.4 Composición química real coladas de prueba. Uso de Ti .....	64
Tabla 6.5 Resultados mecánicos. Uso de Ti.....	64
Tabla 6.6 Comparativa resultados mecánicos zona con defecto vs zona sin defecto .....	67
Tabla 6.7 Análisis químico de la zona del defecto frente a zona sin defecto.....	70
Tabla 6.8 Horquilla de composición. Ti estequiométrico .....	76
Tabla 6.9 Parámetros de colada continua. Ti estequiométrico .....	77
Tabla 6.10 Composición química coladas de prueba. Ti estequiométrico .....	77
Tabla 6.11 Resultados mecánicos. Ti estequiométrico .....	77
Tabla 6.12 Horquilla de composición. Uso Nb y V.....	78
Tabla 6.13 Parámetros de colada continua. Uso Nb y V.....	79
Tabla 6.14 composición química coladas de prueba. Uso Nb y V .....	79
Tabla 6.15 Resultados mecánicos. Uso de Nb y V .....	79
Tabla 6.16 Horquilla de composición. V, Nb y Ti .....	81
Tabla 6.17 Condiciones de proceso. V, Nb y Ti.....	82
Tabla 6.18 Composición química coladas de prueba. V, Nb y Ti .....	82
Tabla 6.19 Resultados mecánicos. V, Nb y Ti .....	82
Tabla 6.20 Ensayos de resiliencia. Disparidad en resultados. V, Nb y Ti .....	82
Tabla 6.21 Horquilla de composición. V, Ti y Mn alto.....	84
Tabla 6.22 Composición química coladas de prueba. V, Ti y Mn alto.....	85
Tabla 6.23 Cantidad de poros en función de la cantidad de aceite .....	85
Tabla 6.24 Conteo de poros en los BB tras descascarillado.....	86
Tabla 6.25 Barras con defectos en función de la cantidad de aceite .....	87
Tabla 6.26 Resultados mecánicos. V, ti y Mn alto .....	88