Fundición Nodular S.A.
ESPAÑA

Defectos presentados por las nuevas generaciones de cilindros (HSS, MHSS, semi-HSS) y su relación con la dinámica de fluidos en colada centrifugada vertical.

RESUMEN

La colada centrifugada vertical para cilindros de laminación fue desarrollada por primera vez en Francia hacia finales de los años sesenta del pasado siglo. Este avance permitió el rápido desarrollo de los cilindros de hierro en alto contenido en Cromo en Europa. Este desarrollo fue posible con facilidad debido a que la gran cantidad de energía (calor) implicada en la solidificación eutéctica de la aleación permite variaciones brutales de la velocidad de crecimiento de la capa del cilindro durante la colada sin influencia en la estructura finalmente obtenida.
De manera contraria, los cilindros de las nuevas generaciones no presentan, o, si lo hacen, presentan una muy pequeña generación de calor eutéctico y la hidrodináminca natural del proceso genera defectos tales como porosidades de tipo 1 o 2 y también grietas internas en la capa llamadas “Reflectores”.
También son posibles porosidades del tipo 3 cuando la colada del núcleo comienza muy pronto.
Y cuando el núcleo es colado a muy alta temperatura, el “lavado” del metal de la capa introduce elementos formadores de carburos en el núcleo.

Este trabajo describe la hidrodinámica natural del proceso de centrifugado vertical, explica todos los defectos de la capa, tales como porosidades del tipo 1, 2 y 3 y también la generación de grietas internas en la capa de trabajo.
Se presentan los resultados del nuevo proceso de centrifugado vertical con la llamada Ayuda Hidrodinámica (Proceso HARP) para la colada de la capa y el nuevo método patentado para la colada del núcleo, capaz de eliminar completamente el lavado de la capa.

Autores:

Juan Llano: Director Ventas y Marketing
José Luis Gonzalez: Director Técnico
Beatriz Pejenaute: Responsable i+d
J.C. Werquin: Asesor Técnico

1.Características principales de la tecnología de la Colada Centrifugada Vertical tradicional (VSC).

El primer cilindro de hierro alto Cr, colado verticalmente para un tren de bandas en caliente, fue producido en 1969 en Berlaimont (Francia) (Ref. 1) después de una larga investigación tecnológica con una pequeña máquina vertical experimental construida en 1967.
Los conceptos básicos validados durante este período de investigación son actualmente usados por todos los fabricantes de cilindros del mundo, que emplean la tecnología de colada centrifugada vertical. Por esta razón se justifica hablar en este artículo acerca del "método de colada tradicional".

1.1 Tubo de Colada

La colada de la capa sobre la parte superior de la tabla ha sido finalmente adoptada como la mejor solución para evitar defectos superficiales. El mismo principio también ha sido adoptado para la colada del primer núcleo con objeto de mejorar las condiciones de soldadura en el extremo superior de la tabla.
Hay algunas variaciones en el número, dimensiones y el ángulo de los tubos que salen del ladrillo inferior de un fabricante de cilindros a otro, pero la hidrodinámica de la colada de la capa es la misma.

1.2 El Termopar

El conocimiento de la variación de la temperatura de la interfase, después de la colada de la capa, fue pronto considerado como fundamental. La posición vertical de la centrifugadora permitía el uso sencillo de un termopar colocado en una posición fija y comparar el registro del termopar con el análisis térmico de la capa del metal justo antes de colarse. El termopar reconoce perfectamente el solidus de la interfase de la capa y da la señal para la colada del núcleo, por ejemplo, al "ya solidificarse" la capa. Se trata de una clara ventaja del VSC con respecto a otros procesos centrifugados.

Por supuesto, para aquellos materiales de la capa sin o con poca emisión de calor eutéctico, es un poco más complicado optimizar la señal para la colada del núcleo. Con este fin, se usa un método experimental que introduce un "factor forma" que se calcula para las dimensiones de cada cilindro. Es especialmente importante para los cilindros de trabajo de los trenes de chapa, dada la gran longitud de su tabla.

1.3 El flux

La mayoría de los fabricantes de cilindros utilizan un flux con alta temperatura de fusión como el AS72 (Air Liquide) para los cilindros de hierro Alto en Cr, y flux con un punto de fusión relativamente más bajo para los cilindros ICDP. No obstante, hay muchas formas posibles para introducir el flux en el molde: sólido o líquido, a través del tubo de colada o directamente, durante o después de la colada de la capa.

2. Parámetros del balance térmico para la unión capa-núcleo.

2.1 **Temperatura de la Interfase**

Por medio de los registros de temperatura de la interfase se puede elegir con precisión el momento exacto para colar el núcleo. Bien cuando la interfase está ya “consolidada” lo que significa que queda algo de líquido eutéctico residual entre las dendritas. O bien que la capa está ya solidificada (unos grados después del solidus) o que está totalmente solidificada (algunas decenas de grados después del solidus).

Según la calidad del cilindro, el fabricante de cilindros hará la mejor elección a fin de optimizar el balance térmico. Es decir, que la temperatura de la interfase es uno de los dos parámetros que optimizan el intercambio de difusión solida entre los componentes de la capa y el núcleo, tal y como se verá posteriormente.

2.2 Temperatura del Núcleo 1

La temperatura del núcleo es el segundo parámetro clave en el balance térmico. Los fabricantes de cilindros utilizan normalmente una cuchara para el núcleo que dependiendo de la temperatura de la interfase se considera un núcleo frío (liquidus + 50ºC) o caliente (liquidus + 130°C) o muy caliente (liquidus + ≥130°C).

La temperatura del núcleo es también un parámetro clave del lavado de la capa por el núcleo. Un núcleo caliente siempre lava la capa, especialmente la parte inferior de la misma, y si dicho lavado es muy intenso, la contaminación que en el núcleo provocan los elementos formadores de carburos de la capa es muy perjudicial para el núcleo nodular pudiendo conducir a roturas del cilindro o al menos a un nivel muy elevado de tensiones en su interior.

3. La curva del Termopar en relación a la curva del análisis térmico.

3.1 Recordatorio de las curvas del análisis térmico de los materiales de cilindros

Las siguientes gráficas, a modo de recordatorio, muestran las curvas del análisis térmico de los diferentes materiales. La figura 3.1.1 es el material de base hierro de la capa, mientras que la figura 3.1.2 corresponde a los nuevos materiales de base acero.

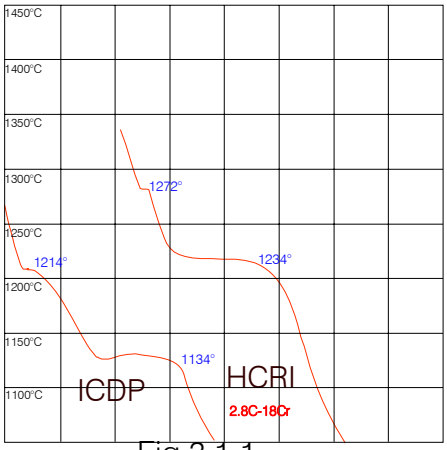


Fig 3.1.1.

Las porosidades y las grietas internas son desconocidas en el primer grupo de materiales (fig 3.1.1) debido a la elevada emisión de energía eutéctica. En el grupo HCrS, el alto contenido en carbono (1.3%) no es sensible a las grietas internas asi como tampoco lo es el grupo de HSS de alto carbono (suficiente líquido eutéctico)

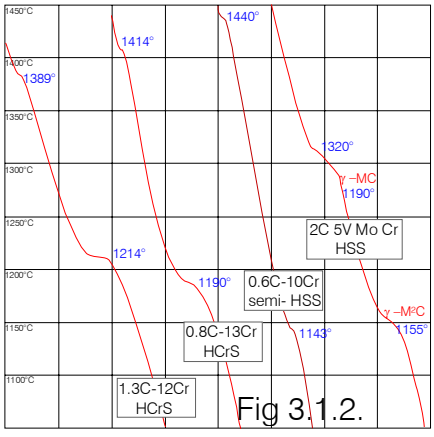


Fig 3.1.2.

La curva del termopar muestra que la temperatura del solidus en el primer grupo (Hierro Alto Cr y Temple Indefinido) es menor que la temperatura real de solidus en la capa de análisis térmico. Esto es debido a la pérdida de calor a través de los moldes de ambos

cuellos. En el segundo grupo (nuevos materiales) la temperatura del solidus, incluso si es visible en la curva de análisis térmico, no es visible en la curva del termopar. Sin embargo, la temperatura de la interfase es perfectamente legible.

4. Las 5 fases del proceso de centrifugado vertical tradicional: La hidrodinámica natural (NHD)

A modo de recordatorio de los conceptos básicos de la centrifugación vertical, examinamos ahora cómo el metal líquido de la capa se distribuye en el molde en rotación. Para ayudar a la comprensión de complejo comportamiento hidrodinámico del metal líquido en contacto con la coquilla, hemos considerado las diferentes fases del metal en movimiento. Lo hemos llamado la “Hidrodinámica natural” o “NHD”.

4.1 Fase 1

El metal de la capa comienza recubriendo el molde metálico. Hemos considerado una capa de pintura de 2 mm. Ayudado por la fuerza de la gravedad, la cobertura es extremadamente rápida. En ciertos casos, cuando se usa pintura de zirconio, es posible observar sobre la superficie de la tabla después del desmoldeo el movimiento helicoidal seguido por el metal líquido contra la capa de pintura (Fig 4.1)

4.2 Fase 2

En esta segunda fase el metal líquido ya no es arrastrado por la coquilla y la mayor parte cae hacia abajo, primero al radio de acuerdo y después al cuello inferior (Fig 4.2.1 and Fig 4.2.2)

4.3 Fase 3

En la tercera fase, el metal líquido del tubo de colada (caliente) continua cayendo parcialmente en el cuello inferior, mientras que el metal procedente del acuerdo tabla/cuello y del cuello inferior (frío) ha adquirido cantidad de movimiento y asciende por la coquilla (Fig 4.3)

4.4 Fase 4

En la última etapa del movimiento del metal de la capa, el metal frío abandona el cuello inferior y asciende por el acuerdo tabla/cuello. Acelera progresivamente y aumenta su presión sobre el cuello inferior, siendo empujado hasta la posición de equilibrio en la coquilla formando el paraboloide de la interfase a 600 rpm, velocidad nominal de la centrifugadora (Fig 4.4)

4.5 Fase 5

El metal del núcleo es colado en la parte superior de la interfase. Puede comenzar el proceso de difusion entre la capa y el núcleo. Pero la mayor parte del metal del núcleo

cae sobre el acuerdo tabla/cuello y sobre el cuello inferior. En este cuello inferior “precalentado” se acumula metal del núcleo hasta que adquiere suficiente cantidad de movimiento y asciende de nuevo hacia la coquilla. En esta fase, si el metal del núcleo está caliente, la parte inferior de la capa es lavada debido al doble efecto de la temperatura del núcleo y de la fricción entre metal de capa y núcleo debido a la diferencia de velocidades.

PROCESO DE COLADA TRADICIONAL

(NHD)

FASE 1

Coquilla cubierta por el metal líquido y formación de una capa de solidificación instantánea de 12-17mm (Instantaneously solidified layer "ISL")

Pintura de 2mm

Capa "conectada"

Límite de la capa de solidificación instantánea.

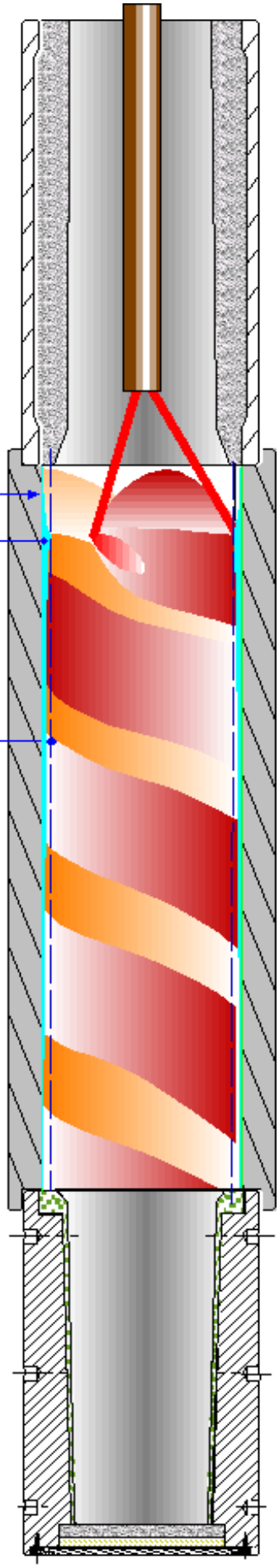


Fig 4.1

PROCESO DE COLADA TRADICIONAL

(NHD)

FASE 2

La capa de solidificación instantánea está completa y cilíndrica. El metal líquido de los tubos ya no es arrastrado por la coquilla (Metal líquido sobre sólido caliente)

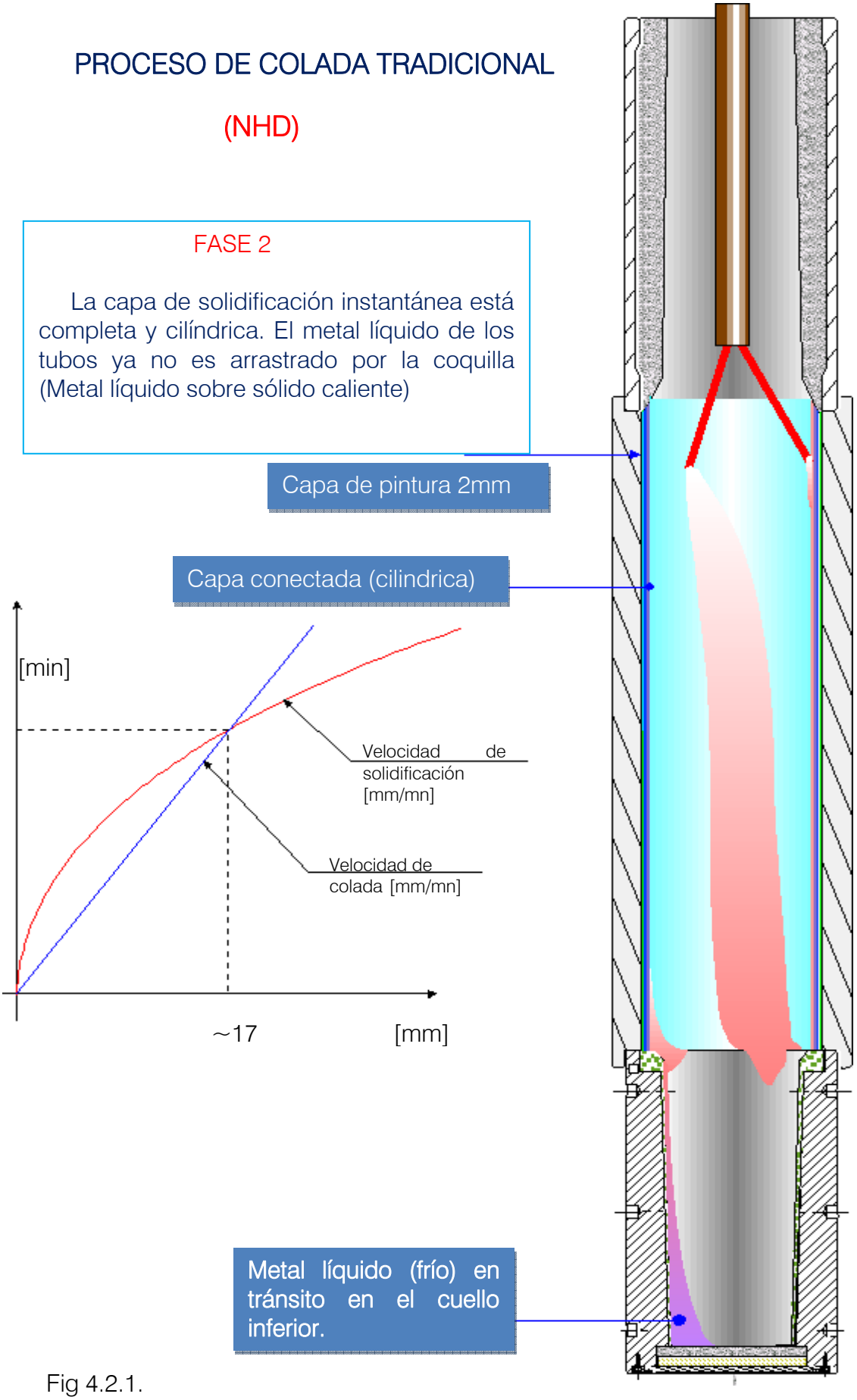


Fig 4.2.1.

PROCESO DE COLADA TRADICIONAL

(NHD)

FASE 3

(Con 3 chorros. Vista desde arriba)

Mientras el metal de la capa en la tabla está en fase de aceleración, parte del metal caliente de los tubos cubre y solapa el acuerdo tabla/cuello inferior y cae en el molde del cuello inferior. Al mismo tiempo, el metal frío proveniente del cuello inferior asciende por el acuerdo tabla/cuello y cubre la tabla. Pero durante esta fase hay una acumulación de metal líquido en el molde del cuello inferior.

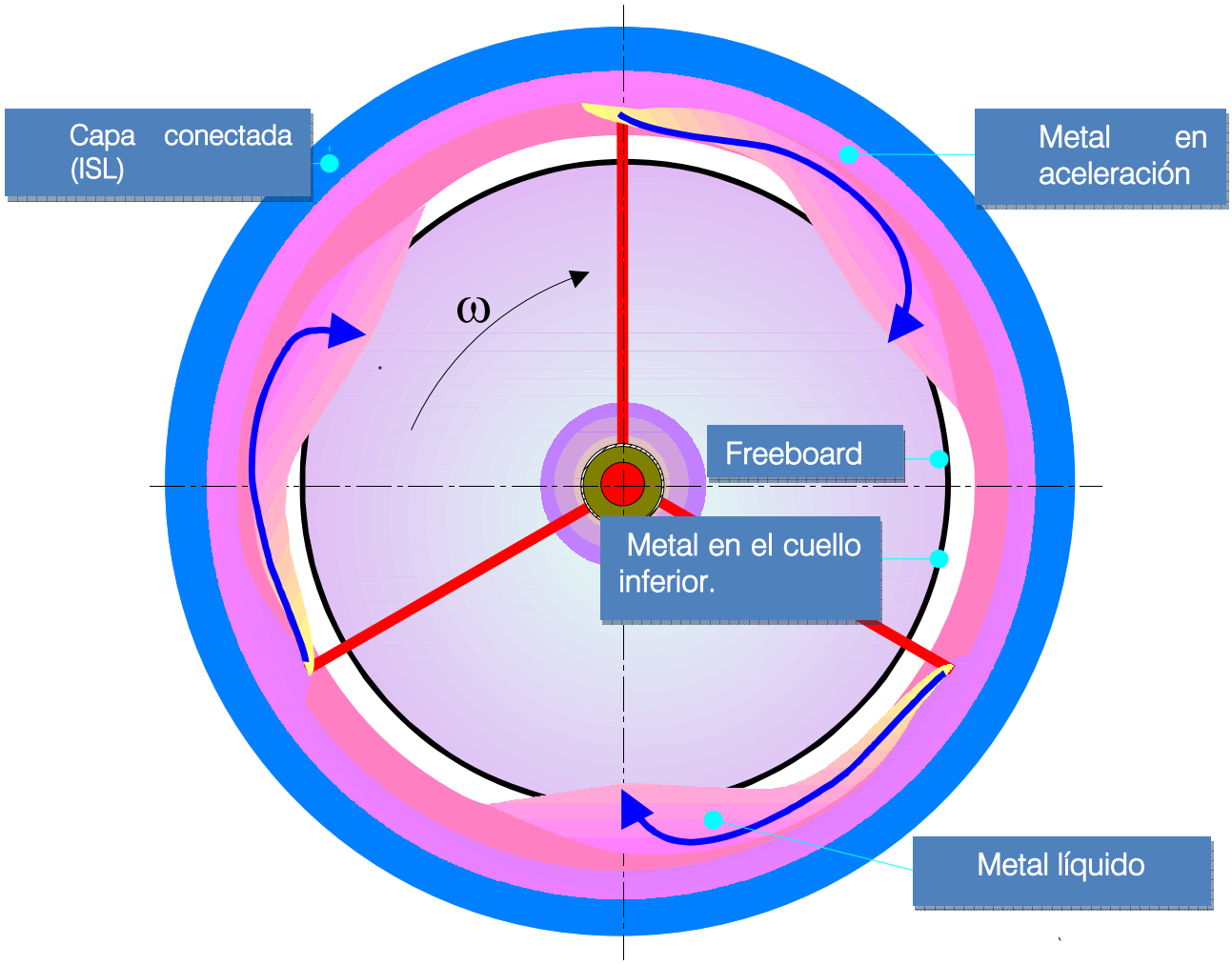


Fig 4.2.2

PROCESO DE COLADA TRADICIONAL

(NHD)

FASE 3

El metal frío proveniente del cuello inferior y también el metal contenido en el radio tabla/cuello inferior asciende de nuevo por la tabla. Pero parte del metal de la capa continúa llenando el molde del cuello inferior.

El ascenso del metal del cuello inferior se completará mucho después del final del vaciado del metal de la capa (Ver la variación de la intensidad del motor).

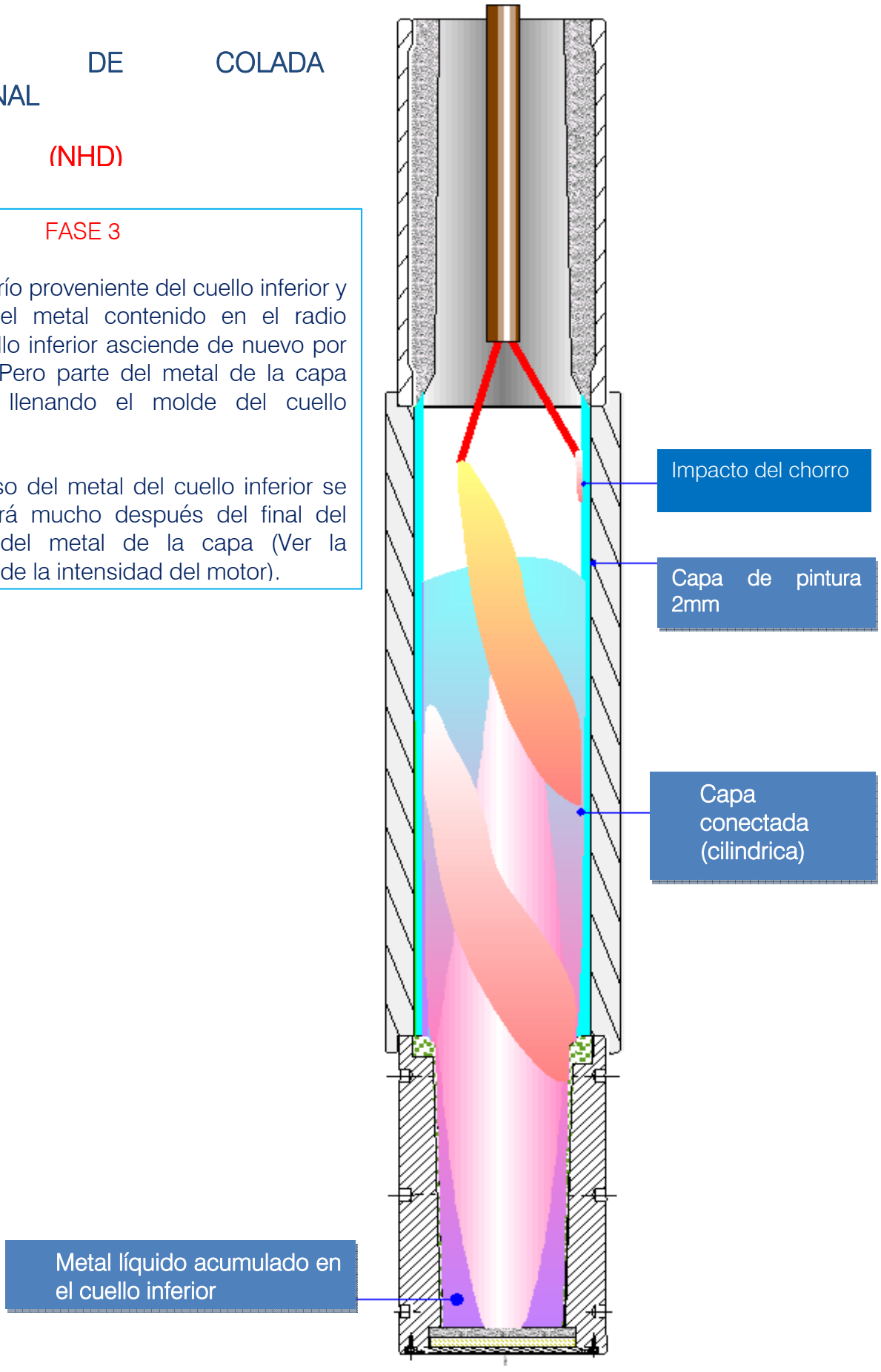


Fig 4.3

PROCESO DE COLADA TRADICIONAL

(NHD)

FASE 4

La última parte del metal líquido procedente del cuello inferior es acelerado progresivamente y la presión se incrementa en la capa conectada. Esta presión es transmitida a través de la fase semi-líquida a toda la capa conectada.

En ese momento, en la parte superior de la capa una parte del metal semi-líquido es empujado desde dentro hacia fuera para generar la parábola de la capa en equilibrio.

Si este metal empujado se encuentra a temperatura del líquidus o un poco más baja (semi-líquido) se pueden generar porosidades llenas de flux líquido en los últimos milímetros de la capa, cerca de la interfase. Estas porosidades son interdendríticas (Porosidades tipo 2)

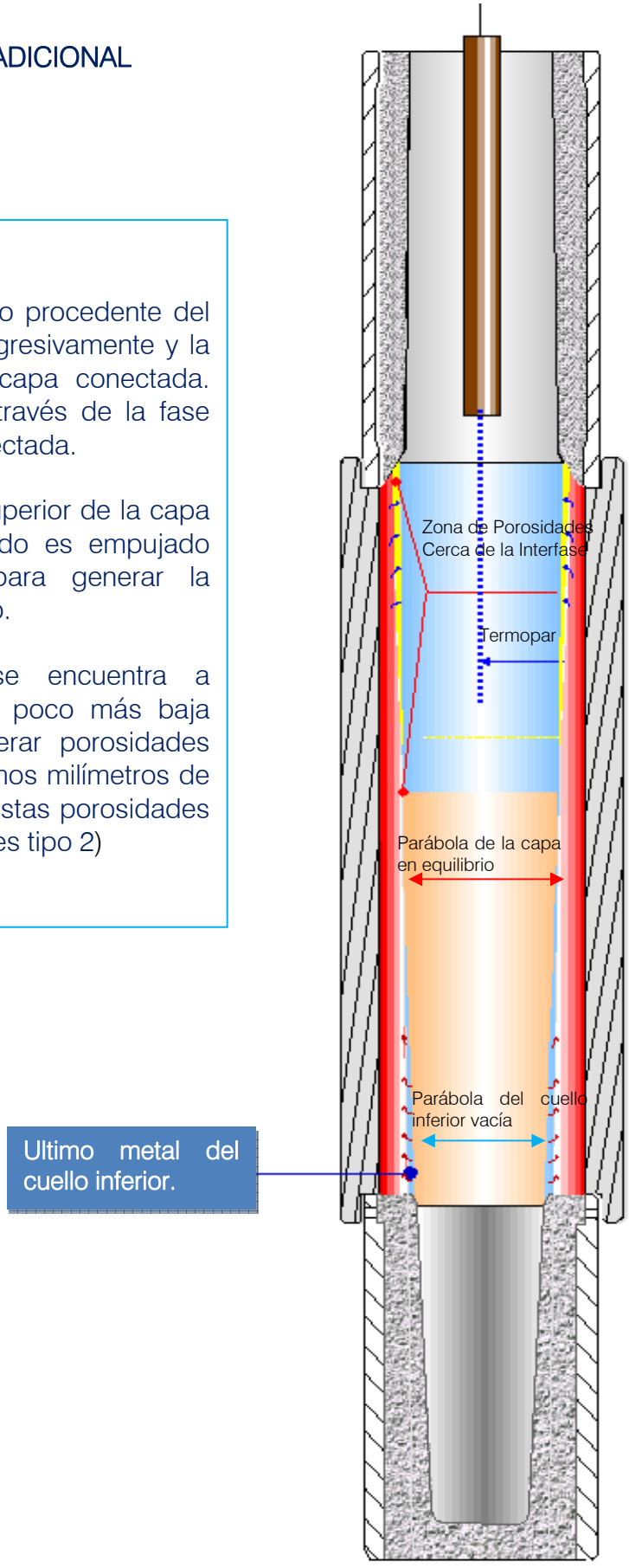


Fig 4.4

PROCESO DE COLADA TRADICIONAL

(NHD)

FASE 5

El material del núcleo es colado en la parte alta de la interfase. El proceso de difusión entre capa y núcleo puede comenzar si los dos parámetros del balance térmico son correctos. Pero la mayor parte del metal del núcleo cae sobre el acuerdo tabla/cuello primero y luego en el cuello inferior.
En este cuello inferior "precalentado", el material del núcleo caliente se acumula y asciende de nuevo.
En esta fase, cuando el material del núcleo está caliente, la parte inferior de la capa es lavada debido al doble efecto de la temperatura del núcleo y a la fricción entre capa y núcleo debido a la diferencia de velocidades.

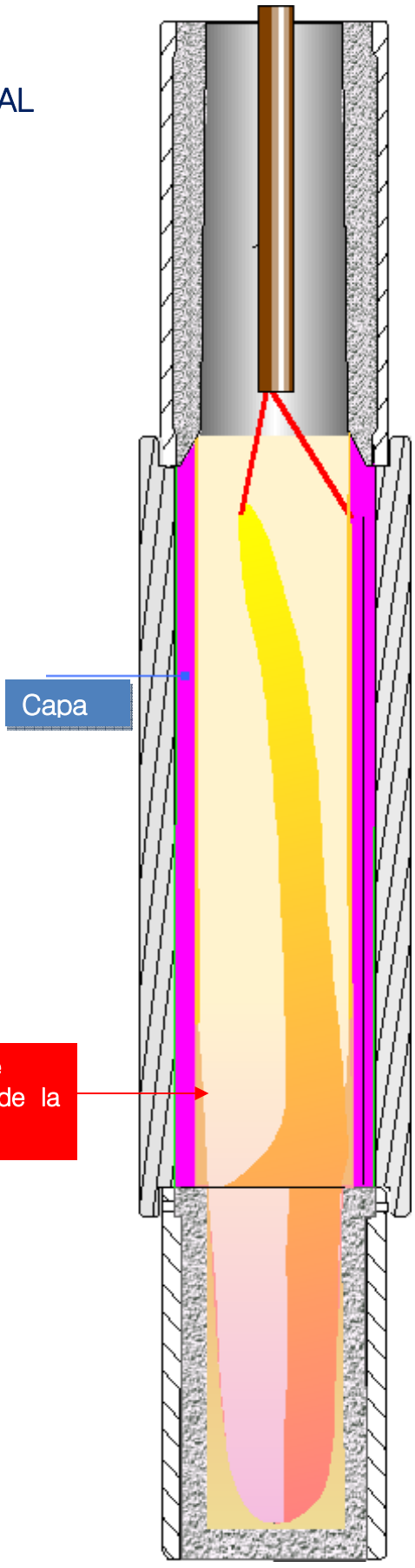


Fig 4.5

5. Formación y descripción de las microporosidades en relación con los pasos del proceso NHD.

En la colada de la capa, tal como se describe en las fases 2 y 3, durante un corto período de tiempo, las dos interfases descritas, especialmente en la parte superior de la tabla, no están cubiertas por metal. Durante este tiempo, la solidificación continúa y la interfase es entonces recubierta con metal frío procedente del radio tabla/cuello inferior (fase 2) o del cuello inferior (fase 3). Este metal frío solidifica muy rapidamente (estructura equiaxial) y si la solidificación que progresa en las dos interfases (transición del crecimiento columnar-a-equiaxial) no se completa, se producen porosidades. Estas son las porosidades tipo 1.

5.1 Porosidades Tipo 1a

Las porosidades tipo 1a aparecen durante la fase 2 con el material de la capa conteniendo nada o muy poco líquido eutéctico, debido a que el metal frío es incapaz de alimentar la contracción en la interfase. Es frecuente hallar este tipo de porosidades en semi-HSS y a veces en cilindros HSS, sobre todo en la parte superior de la tabla (Fig 5.1.1 & 5.1.2.)
Por supuesto, las porosidades tipo 1, siendo porosidades de contracción, son siempre vacías.

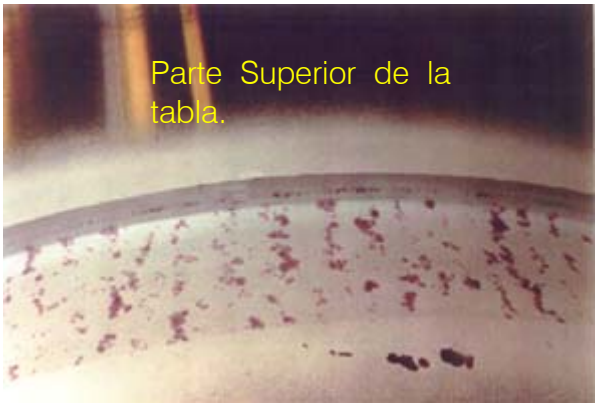


Fig 5.1.1

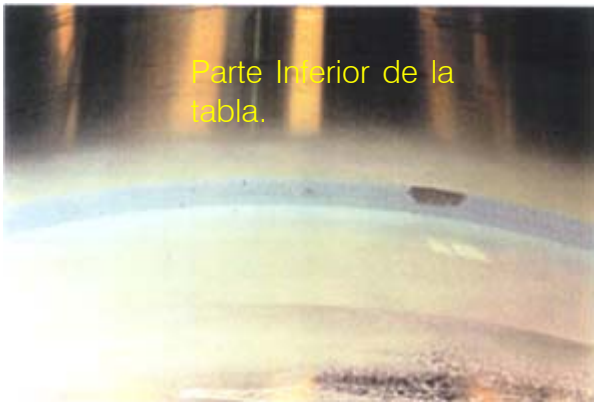
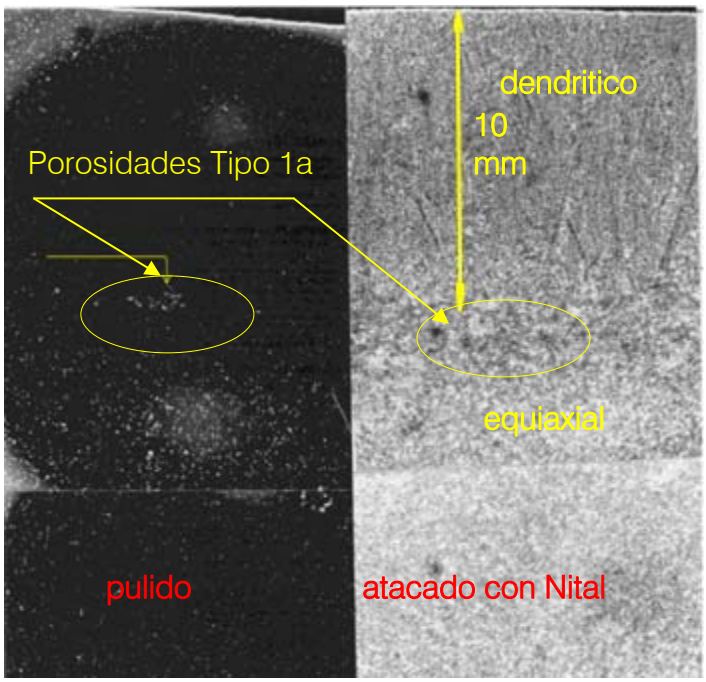


Fig 5.1.2.



5.2 Porosidades Tipo 1b

Las porosidades tipo 1b siguen el mismo mecanismo que las de tipo 1a y son muy similares. Estas están aproximadamente a 35 /45 mm de profundidad cuando la fase 3 está en marcha (Fig 5.2.1 & 5.2.2)

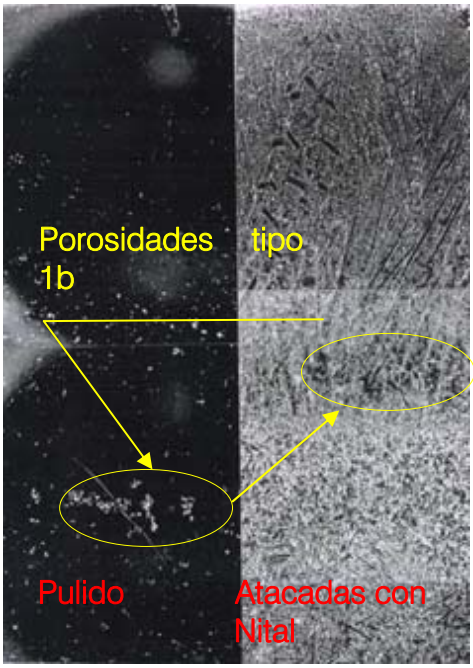


Fig 5.2.1

Fig 5.2.2

5.3 Porosidades Tipo 2

Las porosidades tipo 2 son causadas por la compresion de la interfase pastosa en la parte superior de la tabla, como se muestra en la fase 4. Estas porosidades tipo 2 son interdendríticas y rellenas con flux (Fig 5.3). Son peligrosas para la integridad del cilindro, conduciendo algunas veces al desconche de la capa.

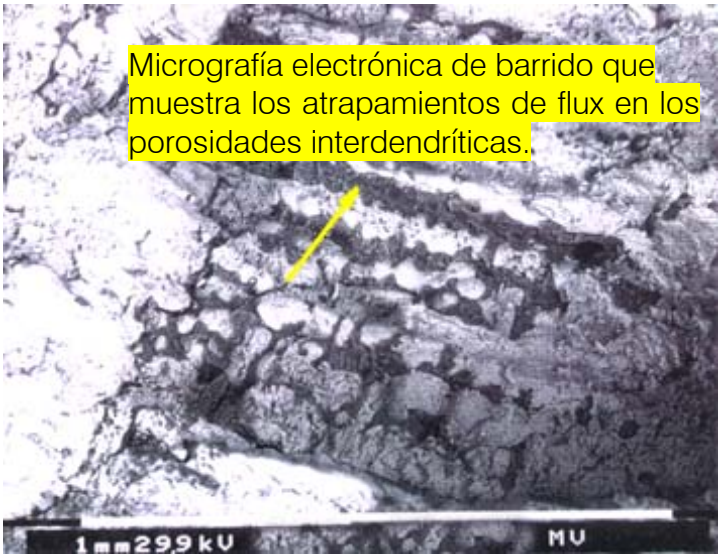
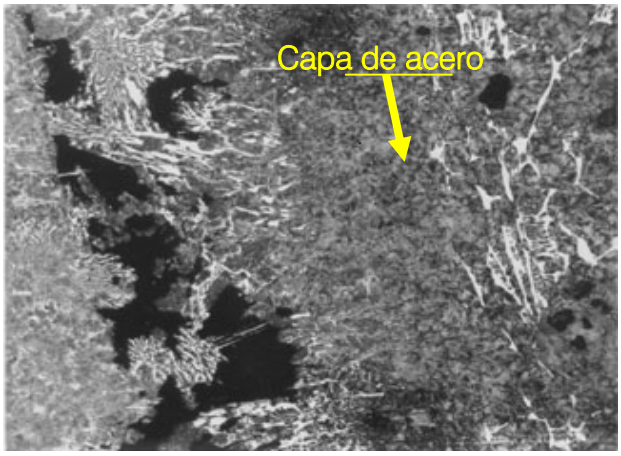


Fig 5.3

Los aceros semi-rápidos son sensibles a este defecto, pero otras calidades, incluyendo el hierro alto Cr, pueden presentar en ocasiones este problema.

5.4 Porosidades Tipo 3.

Las porosidades tipo 3 no están ligadas a la hidrodinámica natural, sino a una mala elección de los parámetros del balance térmico. A veces es posible encontrar este tipo de porosidades en Hierro Alto Cr y con más frecuencia en Acero Alto Cr (sobre todo cuando el contenido en C excede 1.2%). No obstante, es más frecuente encontrar estas porosidades en cilindros HSS (Fig 5.4). Las porosidades tipo 3 son debidas a contracción y por lo tanto son completamente vacías. Están alineadas a lo largo de la línea de unión y su mecanismo de formación es relativamente simple. Debido a la difusion en estado sólido en la interfase capa-núcleo, se genera un tipo de “capa” de acero en su interior. Es debido a la migración del carbono desde el núcleo que encuentra potentes formadores de carburos de la capa. Entonces, si la solidificación de la capa no está completada, se pueden producir porosidades de contracción debido a que esta capa de acero queda inmediatamente solidificada y el líquido residual de la capa no puede llenar los vacíos de contracción.



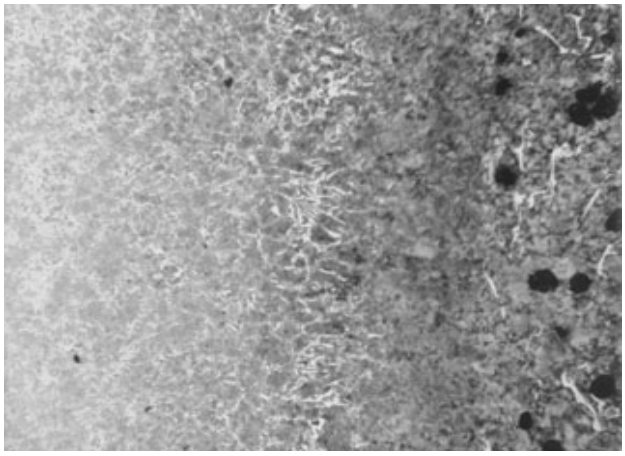


Fig 5.4 Porosidades tipo 3 Unión normal

5.5 REFLECTORES

El reflector es un defecto típico de acero semi-rápido, aunque también es posible verlo en MHSS (Acero rápido matricial) que presenta una fase eutéctica reducida.

El reflector es una grieta interna de tracción en caliente debido a la tensión tangencial centrífuga que se genera cuando la capa solidificada en su contracción se aparta del soporte de la pared interior de la coquilla, y el metal frío del cuello inferior alcanza la interfase. Muy probablemente estas grietas están presentes en muchas calidades pero son normalmente rellenadas con líquido eutéctico y la fina discontinuidad eutéctica es invisible a los ultrasonidos y no tiene influencia en la superficie de laminación. (Es una segregación muy fina pero perpendicular a la superficie del cilindro)

Los siguientes dibujos muestran el mecanismo de formación de un reflector en acero rápido. Un examen detallado de la última capa equiaxial y su espesor nos permite calcular exactamente la cantidad de metal frío procedente del cuello inferior. La formación del reflector está influida también por la velocidad de rotación y por el diámetro del cilindro.

Principales pasos NHD para los cilindros de trabajo bandas en caliente.

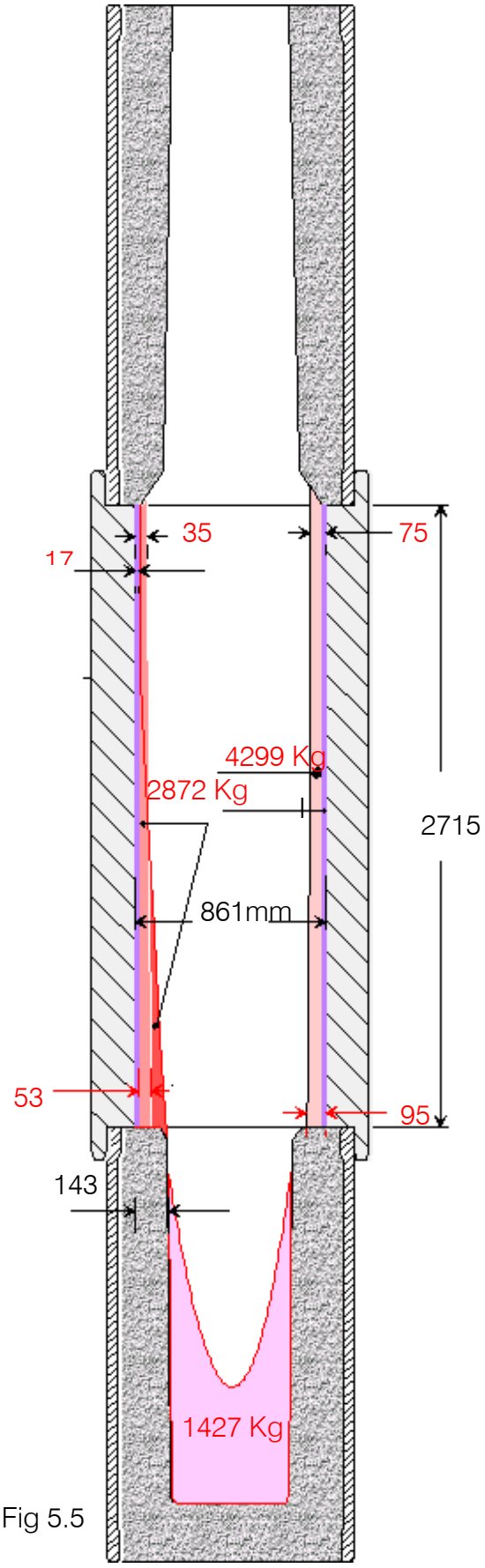
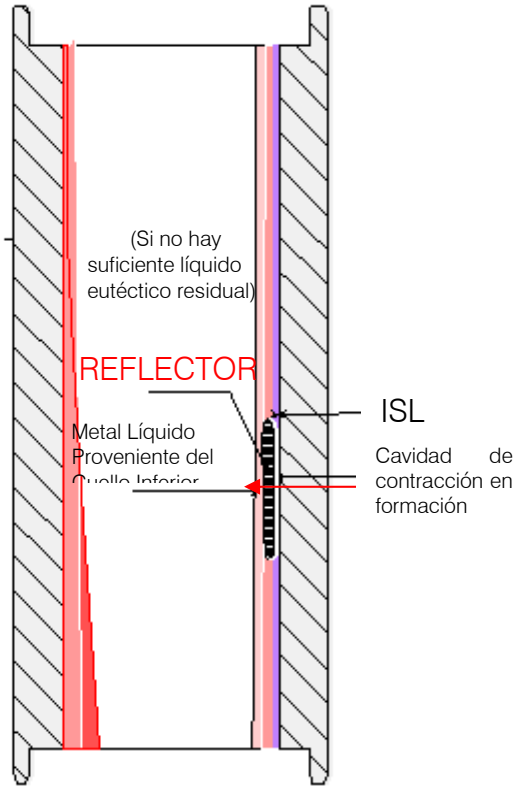


Fig 5.5

Mecanismo de formación de un REFLECTOR



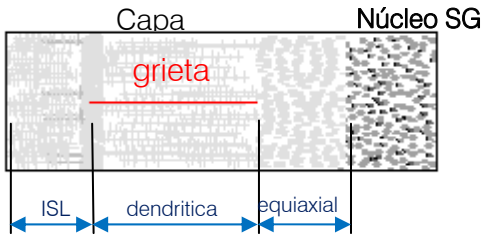
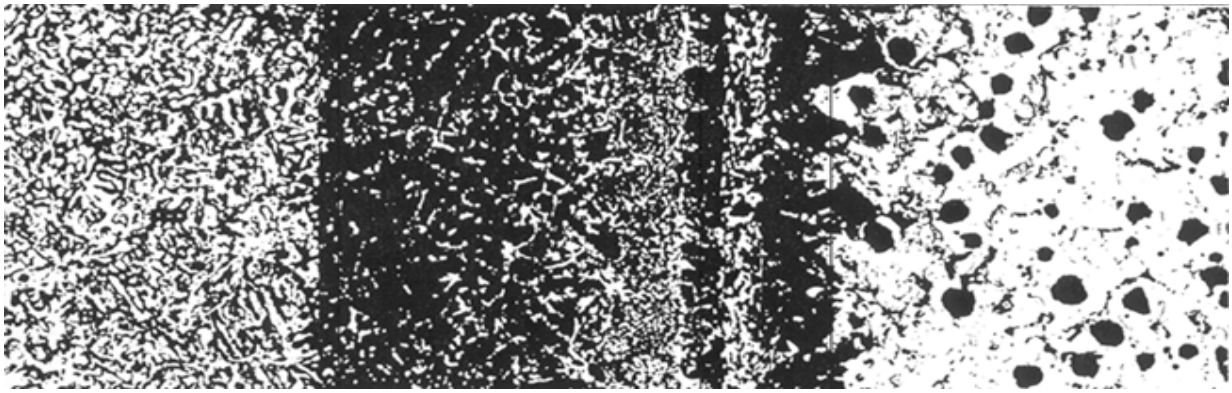


Fig 5.5.2.

Es importante observar la posición de la grieta de tracción caliente en la macroestructura de la capa. La capa ISL (~17mm) rápidamente solidificada y dendritica está completamente solidificada cuando se inicia la grieta en caliente.
Entonces la grieta se presenta sobre todo en la zona dendrítica en formación y se detiene inmediatamente cuando llega a la zona equiaxial (metal frío del cuello inferior). (Fig 5.5.2)

6.Las dos formas de obtener una gran “línea negra” con un núcleo “blando”



CAPA PURA CDZ (Zona de Difusión del núcleo) SDZ (Zona de difusión capa) Núcleo

Aumento C y Si , del núcleo Aumento Cr, V, Mo de la capa

Una buena unión se caracteriza por una fuerte difusión del núcleo en la capa (difusión en estado sólido). Fundamentalmente, el carbono y el silicio del núcleo se difunden en la capa altamente aleada y esta zona de difusión (CDZ), que es más blanda que el metal de la capa, es más oscura atacada con Nital y es por eso denominada “zona negra”. Esta zona o línea negra es visible en la muestra a simple vista. Una buena unión tiene una línea negra de, al menos, 2 mm.

La zona de difusion de la capa (SDZ) es una zona de difusión en estado líquido y puede extenderse hasta la totalidad del núcleo, suprimiendo la ferrita y promoviendo la formación de cementita cuando el lavado de la capa es importante

Ahora examinemos los diferentes efectos de los parámetros del balance térmico.

6.1 Interfase caliente y núcleo frío

- La interfase de la capa “consolidada” o “solidificada” (en ambos casos, existe algo de líquido entre las dendritas de la interfase)

- Núcleo frío.

RESULTADOS
- Buena unión, pero en ocasiones cierta fragilidad en el extremo superior de la tabla.
- Elevado riesgo de porosidades tipo 3 en la interfase (dependiendo del material de la capa)

- Núcleo excelente (no hay lavado, mucha ferrita y ausencia de carburos)

6.2 Interfase fría y núcleo caliente

- La interfase de la capa completamente solidificada.
- Núcleo caliente o muy caliente

RESULTADOS

- Buena unión.
- Ausencia de porosidades del tipo 3.
- Núcleo contaminado (lavado de la capa)
- Cilindro con elevado nivel de tensiones.

6.El nuevo proceso de colada: HARP® (Hydrodynamically Aided Refining Process) o Proceso de Refinado con Ayuda Hidrodinámica

Es sabido que la colada centrifugada, vertical u horizontal, presenta generalmente una estructura heterogénea o no uniforme. El fenómeno de micro-bandas, alternado estructuras equiaxiales o dendríticas, está siempre presente. Desgraciadamente, tales micro-bandas están, a veces, asociadas con microporosidades. Las segregaciones son también otro inconveniente de la colada centrifugada, sobre todo en el proceso horizontal.

En las calidades tradicionales, tales como Temple Indefinido o Hierro Alto Cr, incluso siendo posible observar el micro-banding, no se dan problemas de porosidades.

El estudio de la hidrodinámica natural del proceso de colada centrifugada vertical tradicional muestra aquí su influencia directa en la formación de microporosidades cuando la solidificación eutéctica es térmicamente débil. Esto es así para las nuevas calidades, tales como semi-acero rápido y, en menor medida, para el HSS.

En la actualidad, un proceso de colada completamente nuevo asociado con un nuevo sistema de unión protegido por una patente europea (EP 1 097 753 B) ha sido desarrollado por FUNDICIÓN NODULAR.

Este nuevo proceso de centrifugado vertical fue bautizado como “Proceso **HARP®**”.

HARP®significa “**H**ydrodynamically **A**ided **R**efinement **P**rocess” o Proceso de Refino Ayudado Hidrodinámicamente.

7.1 Comparación entre NHD (Hidrodinámica Natural) y AHD (Hidrodinámica Ayudada)

Los registros de la intensidad del motor principal de la centrifugadora durante la fase de colada de la capa arrojan mucha luz sobre la hidrodinámica natural. Sistemáticamente, la intensidad cae al valor original (debido a las fricciones mecánicas) un cierto tiempo después del final de la colada. Las pequeñas variaciones alrededor del valor medio son debidas al sistema de control de la velocidad del tiristor, más o menos estable dependiendo del equipo.

(De un modo aproximado el tiempo total para alcanzar el equilibrio es el doble del tiempo de colada) (Figura 7.1)
Usando el proceso AHD, la intensidad del motor principal inmediatamente desciende al final de la colada de la capa. No hay metal de la capa que descienda al cuello inferior.

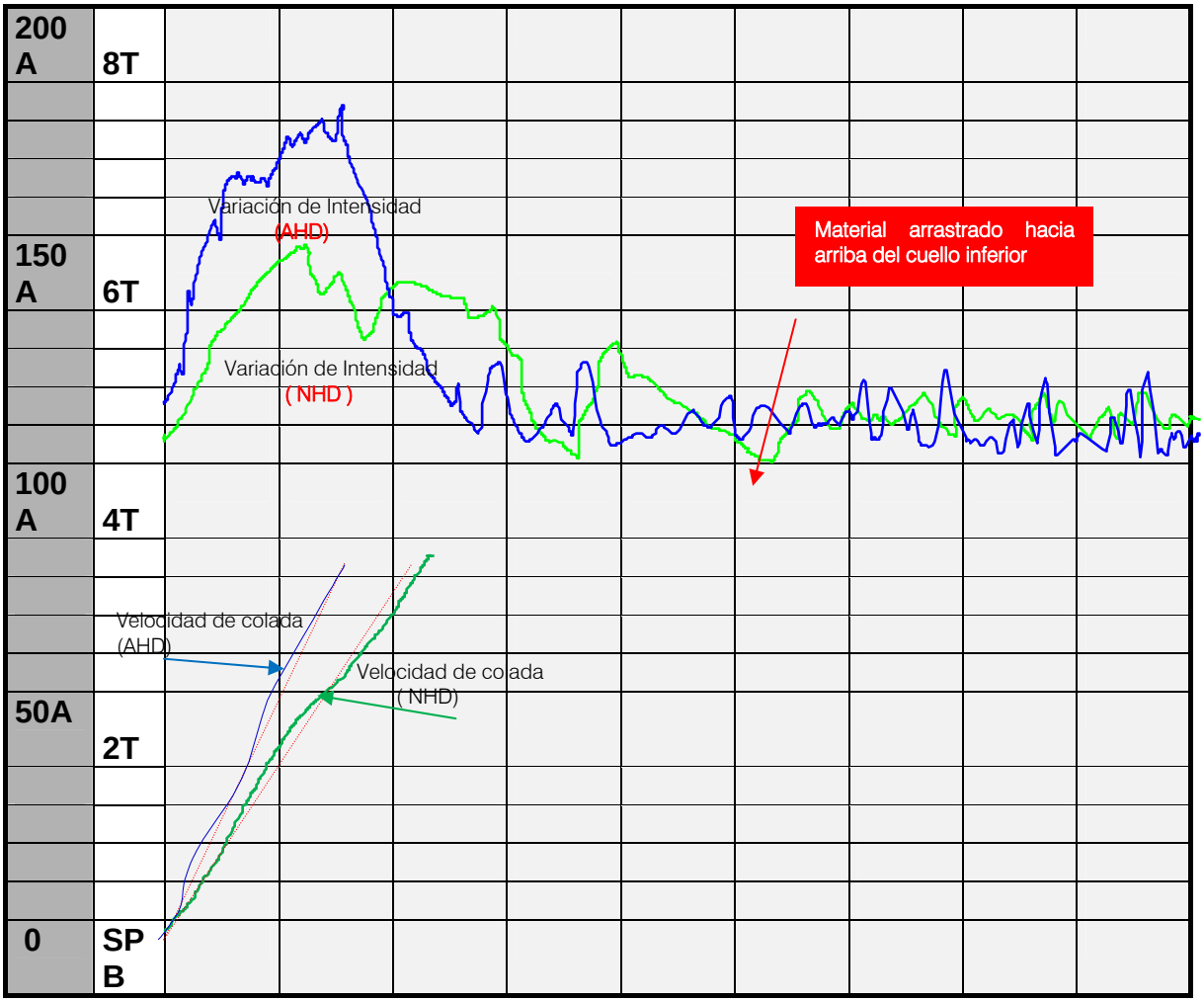


FIG 7.1

7.2 ¿Qué es el Proceso HARP®?

El proceso es una combinación entre un nuevo proceso de colada y un nuevo método de unión patentado (EP 1 097 753 B1). La mejora afecta al cilindro en su integridad. La estructura de la capa es uniformemente refinada y cercana a la estructura que se obtiene con el proceso CPC. La unión es extremadamente fuerte, sin porosidades y con una gran zona de difusion sólida caracterizada por una gran línea negra.

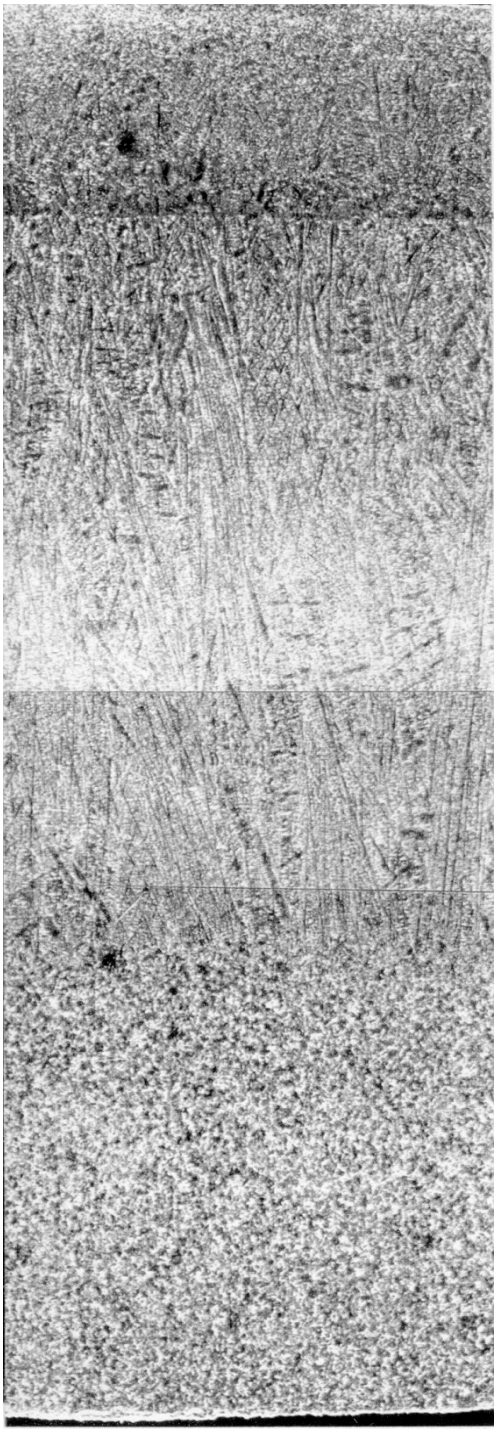
Al mismo tiempo, la integridad del núcleo es también excelente debido a que la refusión de la capa durante la colada del núcleo es absolutamente mínima. (No medible por ensayo ultrasónico).

El núcleo se halla libre de carburos y presenta una gran cantidad de ferrita en estado bruto de colada asegurando, después del tratamiento térmico, un muy bajo nivel de tensiones a pesar del uso de unas temperaturas de austenización y revenido muy elevadas.

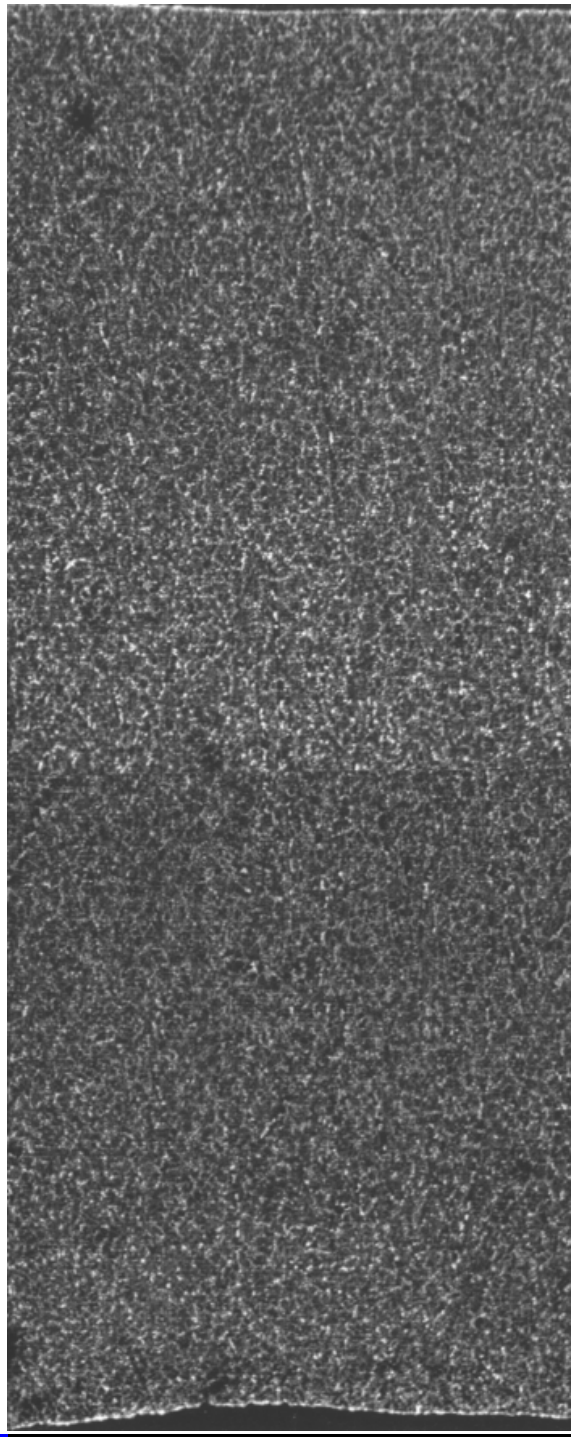
En otras palabras, los cilindros HARP® constituyen una nueva generación de cilindros entre los cilindros centrifugados y los cilindros CPC.

7.3 Resultados prácticos del proceso HARP®. Estructura de la capa.

Las siguientes micrografías (7.3.1 y 7.3.2) muestran la comparación de las dos estructuras: la primera obtenida con el proceso de centrifugado vertical convencional y la segunda obtenida con la nueva tecnología de centrifugado vertical.



CENTRIFUGADO CON NHD x5
FIG 7.3.1



HARP x5
FIG 7.3.2

Se observa una estructura fina y muy uniforme a lo largo de toda la capa. Sin porosidades ni segregaciones. Dependiendo de las temperaturas de fusión y colada, la capa puede ser también completamente dendrítica sin porosidades ni segregaciones.

7.4 Resultados prácticos del proceso HARP®. Calidad del núcleo.

La suma total maxima de ΔCr + ΔMo + ΔV (dilución de los aleantes de la capa) en el núcleo con un material de la capa de 5Cr+5Mo+5 V es **0.2** con un valor medio de 0.08 (muestra tomada del cuello inferior).

Con la misma composición de la capa, las últimas patentes japonesa (**ref. 2**) para colada centrifugada horizontal, la dilución de los aleantes de la capa es alrededor de 0.8 y se requiere un alto contenido de carbono y silicio incrementando el riesgo de formación de grafito deformado.

Debido a este bajo nivel de contaminación del núcleo, no es necesario utilizar un alto nivel de silicio en el núcleo y por tanto se elimina el riesgo de obtener un grafito deformado.

Como ejemplo, la tabla adjunta muestra un resultado de composiciones del núcleo de acero rápido:

posición	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Mg	V
Núcleo puro	2.9	0.15	2.05	0.013	0.039	0.06	0.65	0.01	0.054	0.0
Cuello inferior	3.0	0.27	1.88	0.008	0.011	0.114	0.55	0.065	0.035	0.07
ΔCr,Mo,V =0.179						0.054		0.055		0.070

7.5 Cilindros HARP®

El proceso HARP® se desarrolló para las modernas calidades de cilindros tales como semi acero rápido y acero rápido, para trenes de bandas en caliente y en frío.

El acero semi-rápido, acero rápido matricial o acero rápido para trenes de frío y también para trenes de bandas en caliente deben ser tratados a una elevada temperatura de austenización (≥1100°C) con objeto de activar el mecanismo de endurecimiento secundario que permita alcanzar unos niveles de dureza de 90 Sh C o más. Una vez más, solamente un núcleo no aleado, mayoritariamente ferrítico y exento de carburos es compatible con este tratamiento térmico. Estos grados de bajo carbono, en el rango de 0.6/0.8% de C, no presentan cristalización eutéctica, siendo muy sensibles a las microporosidades. Siendo este defecto, incluso a niveles muy pequeños, no aceptable para aplicaciones de laminación en frío.

La nueva generación de cilindros de Acero Rápido recientemente desarrollada por FUNDICIÓN NODULAR con una nueva estructura y una muy buena distribución de los carburos eutécticos, del tipo MC y M2C, también usa exclusivamente el proceso HARP®
La siguiente micro (Fig 7.5.1) muestra la nueva estructura de la transición capa-núcleo

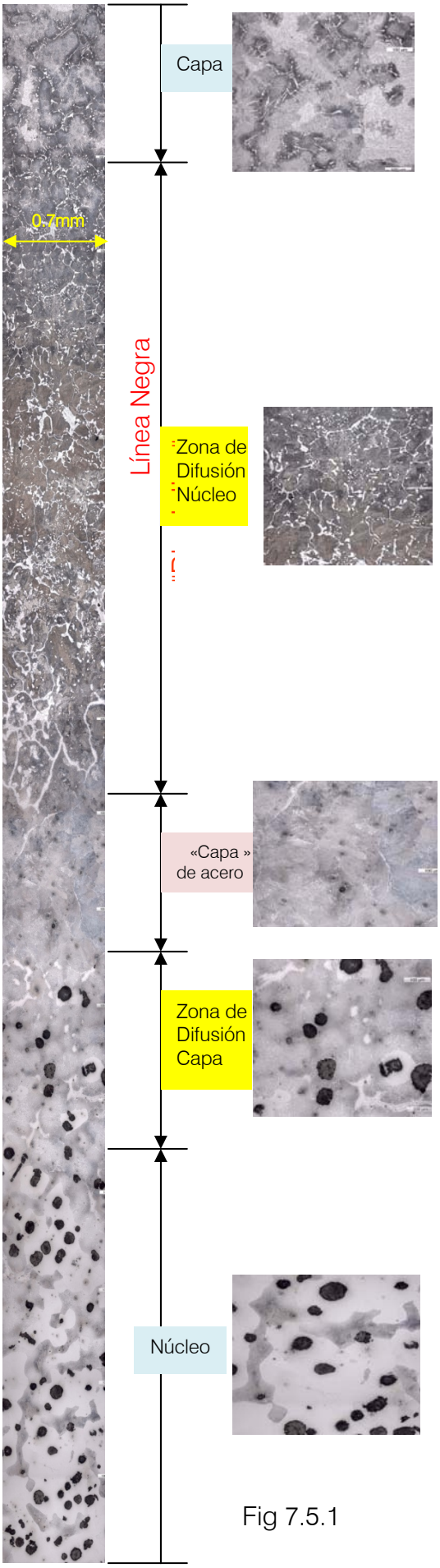


Fig 7.5.1

Es fácil reconocer en esta micrografía 7.5.1 todas las zonas características de una buena unión.

La zona de difusión del núcleo (CDZ) caracterizada por la "línea negra" es muy ancha (varios milímetros) y es debida a la difusión sólida del silicio desde el núcleo muy caliente. La matriz en esta zona es completamente perlítica, mientras que la capa pura muestra algo de bainita (en estado bruto de colada).

La capa de acero (sarcófago) es claramente visible y los carburos relativamente bastos perpendiculares a la interfase, son debidos a la difusión del carbono desde el núcleo caliente y a una transformación de los carburos en la capa.

Resulta interesante señalar que la zona SDZ, debido a la difusión de los elementos formadores de carburo de la capa en el núcleo líquido es relativamente fina (~3mm) presentando algunos carburos M_3C y una matriz perlítica.

Después de la zona de difusión de la capa (SDZ) los carburos M_3C desaparecen rapidamente y la matriz se vuelve entonces fundalmentalmente ferrítica. El núcleo frío que sigue al núcleo caliente no está contaminado por los elementos formadores de carburo.

Con este "núcleo blando" en estado bruto de colada el cilindro puede ser tratado térmicamente a alta temperatura. El núcleo se transformará en perlita fina generando muy bajo nivel de tensiones.

Refiriéndonos ahora a las estructuras de los cuellos en estado bruto de colada, las figuras 7.5.2 y 7.5.3 correspondientes a los cuellos inferior y superior muestran una fase ferrítica. Por supuesto, el cuello inferior contiene siempre menos ferrita que el cuello superior debido a que los aleantes de la capa están más concentrados en el molde del cuello inferior tal y como se explica en la fase 5. Una vez más después del tratamiento térmico esta ferrita será "consumida" y transformada en perlita fina.

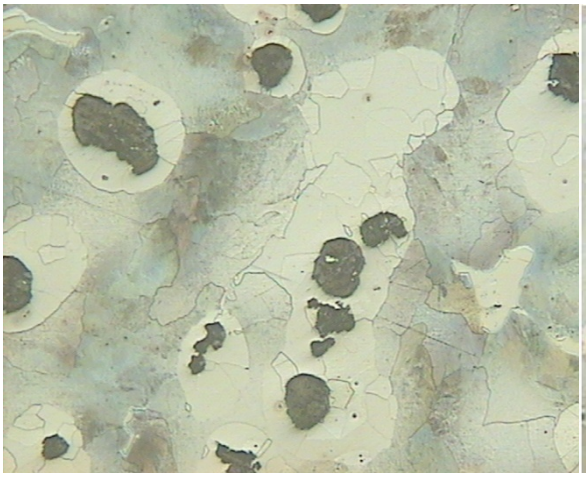


Fig 7.5.2 Cuello Inferior nital x 50

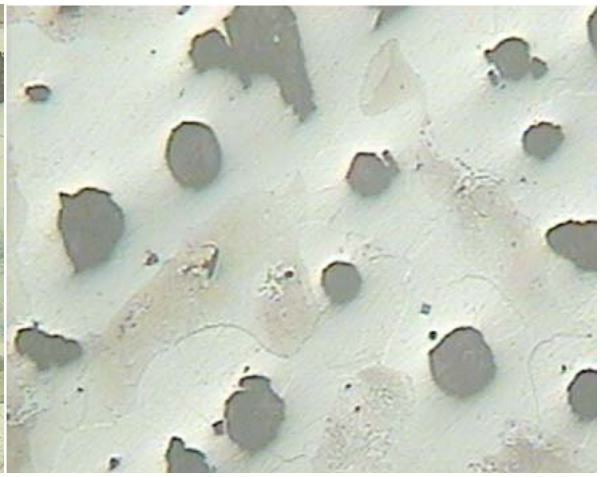


Fig 7.5.3 Cuello Superior nital x50

8.Conclusiones.

El proceso HARP® es una nueva mejora de la Colada Centrifugada Vertical y un gran paso adelante para la industria del cilindro de laminación.

El proceso de Colada Centrifugada Vertical mejorado por **Fundición Nodular presenta las siguientes ventajas:**

- Una capa de trabajo sin segregaciones ni porosidades.
- La capa presenta una estructura uniforme.
- Optimización de los parámetros del balance térmico.
- Una excelente unión para cualquier material de la capa con el núcleo nodular.
- Ausencia de lavado de la capa.
- Núcleo nodular blando en estado bruto de colada.
- Posibilidad de utilización de elevadas temperaturas de austenización.
- Cilindros con un nivel bajo de tensiones.

Ref.1 : 1. J.C. Werquin
Le comportement au laminage de la surface des cylindres de travail des premières cages finisseuses à chaud, à haute teneur en chrome.
(Surface behavior of Hi Chrome iron front stands rolls, during hot rolling.)
Sept 1973. Cercle d'Etudes des Métaux. St Etienne. France.

Ref. 2: PAJ- PN **2007**-029968
PN **2007**-245217