

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad Ingeniería Mecánica

Departamento Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE DIPLOMA

Simulación del proceso de obtención de cilindros de laminación en la empresa “Fabric Aguilar Noriega” de Santa Clara mediante el software ProCAST

Autor: Carlos O’Reilly Llénez

Tutor: MSc. Lázaro Humberto Suárez Lisca

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE DIPLOMA

Simulación del proceso de obtención de cilindros de laminación en la empresa “Fabric Aguilar Noriega” de Santa Clara mediante el software ProCAST

Autor: Carlos O’Reilly Lláneez

Tutor: MSc. Lázaro Humberto Suárez Lisca

Profesor Asistente Dto. Ingeniería Mecánica Facultad Ingeniería Mecánica

lazarosl@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Pensamiento

“No debemos esperar que el mañana ocurra, porque entonces actuaremos siempre tarde ante problemas ya creados u oportunidades que no podemos aprovechar”.

Carlos Matus

Dedicataria

A mi mamá, mi papá y mi hermana, por resistir con fuerza los avatares de esta vida, por amarme como soy, por estar siempre conmigo y porque gracias a ellos hoy cumplimos nuestro sueño.

Agradecimientos

A mi tutor Lázaro Humberto Suárez Lisca por aceptarme y ayudarme.

A mis padres Carlos O'Reilly Echarte y Bárbara Leonor Lláñez Salas y sin dejar de mencionar a mi tía Petronila Valentina O'Reilly Echarte porque si no estuviesen conmigo no estaría graduándome hoy.

A mis amigos, pero no voy a poner más nombres porque quizás olvide mencionar a alguien que ha contribuido de una manera u otra en esta ardua tarea, pero Dios sabe que le agradezco a todas aquellas personas que me han brindado aunque sea un poquito de sus conocimientos, tiempo o simplemente me han escuchado o criticado, para crear o perfeccionar habilidades y así formar el ser humano que soy hoy.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

Los cilindros de laminación de los trenes de bandas en caliente trabajan bajo unas severas condiciones de servicio, teniendo que soportar fuertes desgastes y fenómenos de fatiga térmica que provocan la aparición de grietas superficiales. Para obtener estos cilindros es necesario contar con una tecnología de fundición capaz de lograr un producto final con la máxima calidad posible. En el presente trabajo se expone un análisis detallado sobre el estado de los rodillos de laminación, así como la utilización y el desarrollo de la simulación por el software de fundición ProCAST, en la obtención de piezas fundidas. Por otra parte se propone una tecnología de fundición integral con el fin de obtener los cilindros con la máxima calidad posible. Además se logró obtener una simulación donde se observa el proceso de solidificación de la pieza obtenida en la empresa Planta Mecánica “Fabric Aguilar Noriega” de Santa Clara.

ABSTRACT

Cylinders trains rolling hot strip work under a severe service conditions, having to withstand heavy wear and thermal fatigue phenomena that cause the appearance of surface cracks. For these cylinders is necessary against a cast technology capable of achieving a final product with the highest possible quality. Presently work is exposed a detailed analysis on the state of the lamination rollers, as well as the use and the development of the simulation for the foundry software ProCAST, in the obtaining of fused pieces. On the other hand proposes a comprehensive foundry technology in order to obtain cylinders with the highest possible quality. It also managed to get a simulation where there is the solidification of the product obtained in "Fabric Aguilar Noriega" Planta Mecanica of Santa Clara.

TABLA DE CONTENIDOS

<i>Pensamiento</i>	ii
<i>Dedicatoria</i>	iv
<i>Agradecimientos</i>	vi
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
Organización del informe.....	4
CAPÍTULO 1. Estado de fabricación de cilindros de laminación. El uso de las técnicas de simulación para el control de los procesos de fundición.....	5
1.1 Desarrollo histórico de los trenes de laminación.	7
1.2 Fabricación de cilindros de laminación.....	10
1.2.1 Propiedades mecánicas de los cilindros de laminación	12
1.2.2 Materiales utilizados en los cilindros de laminación.....	13
1.2.3 Demanda de cilindros de laminación	17
1.2.4 Consideraciones sobre el mercado de cilindros	19
1.2.5 Cilindros obtenidos por fundición	20
1.2.6 Principales problemas que aparecen en los cilindros de laminación.	23
1.3 Simulación computacional en los procesos de fundición	24
1.3.1 Simulación de procesos de fundición y sus beneficios para la industria ...	25
1.3.2 Simulación por elementos finitos aplicada a la industria. Evaluación virtual del diseño de productos, estado de maquinarias y equipos para predecir o corregir fallas.	27
1.3.3 Aplicación de FEA a la industria de la ingeniería mecánica.....	34
1.3.4 Tendencias actuales de FEA en la industria.....	36

CAPÍTULO 2. Elaboración de la tecnología de fabricación de cilindros de laminación	39
2.1 Aspectos generales sobre las tecnologías de fundición.....	39
2.1.1 Análisis previo de la pieza	39
2.1.2 Determinación del plano divisor del molde y la plantilla	40
2.1.3 Cálculo de los márgenes de fundición.....	41
2.1.4 Proyección de machos.....	43
2.1.5 Cálculo de las mazarotas.....	44
2.1.6 Cálculo del sistema de llenado	45
2.2 Tecnología de fundición del rodillo de laminación.....	48
CAPÍTULO 3. Simulación del enfriamiento de una pieza.....	53
3.1 Introducción al uso de los MEF en la Industria Metalúrgica.....	54
3.2 Consideraciones sobre el uso del software ProCAST como herramienta de simulación.....	56
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
Anexo I.....	68
Tabla 1.1: Materiales utilizados en cilindros de trenes de laminación	68
Anexo II Caja para Mazarota (Cilindro de Laminación).....	69
Anexo III Caja del molde (Cilindro de Laminación)	70
Anexo IV Dimensiones de la coquilla.....	71
Anexo V Montaje de cajas y la base	72
Anexo VI Base del montaje.....	73

Anexo VII	Vista en 3-D del montaje de las cajas en la base y de un solo montaje.	74
Anexo VIII	Resultados de una fundición	75
Anexo IX	Distribución de temperaturas en el momento del vertido y la solidificación.....	78

INTRODUCCIÓN

Los cilindros de laminación son los elementos principales de los trenes de laminación, cuya misión es deformar plásticamente a compresión los materiales a laminar consiguiendo con ello una reducción de la sección de dichos productos.

Los cilindros de laminación utilizados en la industria para la conformación del metal están sometidos a condiciones altamente complejas y severas. El desgaste, bajo la forma de la abrasión o adhesión metal contra metal, y los fenómenos de fatiga térmica (laminación en caliente) ocasionan la degradación de los cilindros, especialmente cuando se combinan con la oxidación y la corrosión. Este entorno extremadamente agresivo, junto con la exigencia de una mayor productividad con tolerancias más estrictas del producto acabado, obliga a esta industria a desarrollar nuevos materiales constitutivos(Heinrich Schröder, 2003).

Dentro de los mecanismos que causan el fallo de los cilindros se pueden establecer dos categorías:

1. Fallos catastróficos, tales como la rotura de los cuellos, grietas que atraviesen el cuerpo del cilindro y desconches.
2. Deterioro superficial, donde la degradación de la superficie o la disminución del diámetro del cilindro obliga a retirar el cilindro del servicio.

En muchas ocasiones, en los cilindros convencionales se ha sacrificado resistencia al desgaste superficial a fin de asegurar que el núcleo del cilindro tuviese suficiente ductilidad y tenacidad para evitar el peligro de un fallo catastrófico. A partir de esta problemática empiezan a utilizarse cilindros bimetalicos, fabricados a partir de un núcleo tenaz y dúctil y una capa dura y resistente al desgaste, evitando así sacrificar tenacidad por resistencia.

A finales de los 60 se introduce en la industria la fundición centrífuga, el sistema de fabricación más competitivo para la producción de cilindros compuestos para

los trenes de bandas en caliente. Se utiliza un molde rotativo, en el que se cuela en primer lugar el caldo del material que va a formar la tabla del cilindro y aprovechando la fuerza centrífuga, el material se adapta a las paredes del molde, solidificando en la forma deseada. Una vez solidificada la capa externa, se vierte un segundo caldo del material que va a formar el núcleo y los cuellos del cilindro y se deja solidificar ya estáticamente. Es necesario realizar un buen control de las condiciones del proceso en el momento de verter el segundo caldo, con el fin de lograr la fusión completa de la intercara capa-núcleo, evitando al mismo tiempo una mezcla excesiva de ambos productos, para asegurar la formación de una intercara sana y sin defectos.

En general, el deterioro superficial de los cilindros de laminación es función de la condición física y de la composición química de la capa superficial. Concretamente, en el caso de los cilindros de laminación de los trenes de bandas en caliente, el material a laminar se desplaza a lo largo de los cilindros a una velocidad considerablemente menor que en el caso de otros tipos de trenes, por lo que la transferencia de calor a los cilindros es mayor. El enfriamiento continuo con agua al que también están sometidos los cilindros tras abandonar el contacto con el material a laminar, hace que una importante causa del deterioro de la superficie de los cilindros sea la corrosión.

Para combatir estos problemas, una de las técnicas utilizadas en estos casos y en general en todo el mundo, es utilizar programas de simulación los cuales son muy efectivos en el logro de un producto final en la obtención de piezas por fundición. En la actualidad, toda industria competitiva requiere de la simulación de sus productos o procesos, para predecir y/o corregir posibles problemas que se pudieran presentar. El campo de aplicación de la simulación por elementos finitos es amplio, pudiendo utilizarse ya sea en las grandes estructuras de la industria metalmecánica como así también en la verificación de pequeños implantes biomédicos.

La aplicación más difundida del método de elementos finitos es en el diseño de productos. En este caso se tiene la posibilidad de evaluar de manera virtual los

prototipos, permitiendo dejar para la etapa final del desarrollo la construcción y el ensayo, una vez que se ha logrado la configuración ideal.

El análisis de elementos finitos, permite la construcción de diseños enteros, su refinación y la optimización de éstos antes de que el diseño sea manufacturado. Esta poderosa herramienta de diseño ha mejorado en gran forma, ambos, el estándar de diseños en ingeniería y la metrología del proceso del diseño en muchas aplicaciones industriales. La introducción del análisis de elementos finitos ha reducido el tiempo que se toma para llevar productos desde el concepto hasta la línea de producción. A través de la mejora de diseños de prototipos iniciales usando el análisis de elementos finitos se han acelerado, principalmente, las pruebas y el desarrollo. En resumen, los beneficios del análisis de elementos finitos son: una alta precisión, diseño mejorado, y una mejor percepción de los parámetros críticos de diseño, prototipos virtuales, menos prototipos de hardware, y ciclo de diseño más rápido y económico, alza en la productividad y en las ganancias (Heinrich Schröder, 2003).

En la industria cubana la simulación no es muy tomada en cuenta por diferentes razones, lo cual conlleva a que haya pérdidas económicas de gran magnitud. Por lo que es necesario tomar en cuenta la simulación por elementos finitos y así lograr un trabajo más económico, así como un producto con calidad. Por lo que es de máxima prioridad el uso de la técnica de simulación pues permite realizar la optimización en ambiente computacional con mucha velocidad y sin costos de insumos materiales y de energía. Claro que para ello hay que contar con un programa de simulación poderoso, dado que se están representando casos reales en ambiente virtual. Dada la complejidad de esta problemática, se he estado trabajando en conjunto con la Empresa Planta Mecánica de Villa Clara con el objetivo de aplicar la alternativa de simulación en la producción de piezas fundidas y así garantizar producciones con calidad, lo cual será una gran alternativa económica para la empresa y el país. Considerando lo antes expuesto se plantea la siguiente interrogante científica:

Problema Científico: La fabricación de cilindros de laminación conlleva una tecnología con un nivel de precisión alto, debido a su responsabilidad y a las condiciones de trabajo.

Objetivo General: Simular una tecnología de fundición para cilindros de laminación.

Objetivos específicos:

1. Hacer una revisión bibliográfica sobre la tecnología de fabricación de los cilindros de laminación
2. Hacer una propuesta de tecnología de fundición para los cilindros de laminación teniendo en cuenta las condiciones de trabajo de la empresa “Fabric Aguilar Noriega” de Santa Clara, como se conoce Planta Mecánica
3. Hacer una revisión bibliográfica sobre técnicas de simulación del llenado de piezas.
4. Realizar una simulación del enfriamiento de un cilindro de laminación para comprobar la distribución de temperaturas durante el proceso

Hipótesis: Con una tecnología de fundición actualizada para obtener cilindros de laminación se garantiza una adecuada calidad de la pieza a desarrollar.

Organización del informe

El trabajo está estructurado en tres capítulos de la siguiente forma:

Capítulo 1: Estado de la fabricación de cilindros de laminación. El uso de las técnicas de simulación para el control de los procesos de fundición.

Capítulo 2: Elaboración de la tecnología de fabricación de cilindros de laminación

Capítulo 3: Simulación del enfriamiento de una de las piezas a desarrollar, mediante el software ProCAST. Análisis de los resultados

CAPÍTULO 1. Estado de fabricación de cilindros de laminación. El uso de las técnicas de simulación para el control de los procesos de fundición.

Los cilindros son herramientas utilizadas en los trenes de laminación para reducir la sección transversal del material que procesan. El peso de los cilindros puede oscilar entre unos pocos kilogramos hasta las 250 toneladas.

Durante la laminación, el área de contacto entre el cilindro y el metal sufre desgaste, mientras que las demás partes del cilindro (cuerpo y cuellos) deben ser consideradas como partes normales de componentes diseñados capaces de soportar elevadas cargas (ver figura 1). Ello supone que los cuellos no deben experimentar ningún tipo de deformación plástica o fatiga. Sin embargo, en un tren, las cargas no siempre están definidas de forma clara y precisa. Evidentemente, existen reglas para calcular el esfuerzo máximo en los cilindros producido por los límites de diseño para determinado valor de fuerza de separación máxima, par, presión Hertziana, etc., pero dichos criterios son válidos únicamente en las llamadas “condiciones normales de laminación” e incluso éstas cambian constantemente con el progresivo desgaste en la zona de contacto.

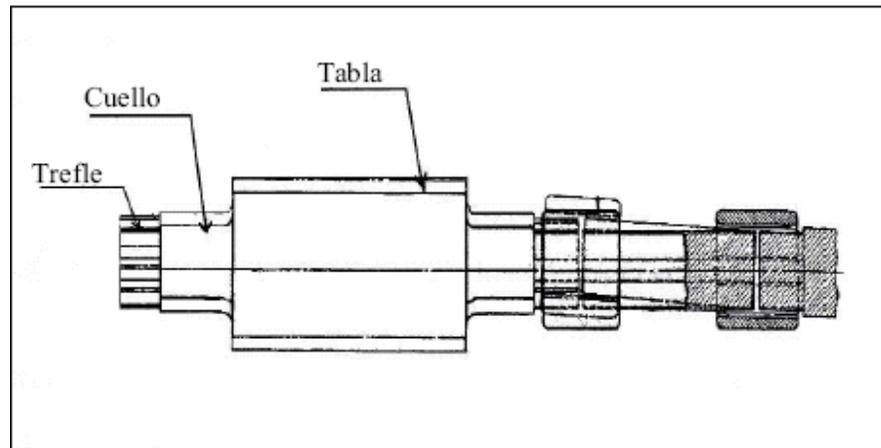


Figura 1.1: Esquema general de un cilindro de laminación

Además de las “condiciones normales de laminación” (un supuesto teórico estable), se producen muchos cambios en las condiciones de laminación de los trenes. Después de un cambio de cilindros o de una parada en el tren, transcurre cierto tiempo hasta que los cilindros alcanzan de nuevo condiciones térmicas estables, cada barra nueva que entra en el tren produce un impacto. A veces se producen accidentes de laminación realmente graves, debido a fallos atribuibles a los operadores, materiales laminados deficientes con defectos internos, o a problemas de diversa naturaleza propios del tren tales como caídas de tensión, problemas mecánicos derivados del transporte o fallos en el sistema de refrigeración. Es imposible calcular este tipo de problemas, aunque repercuten negativamente en todos los programas de laminación, causando además tensiones en los cilindros.

Con respecto a las condiciones “anormales” de laminación (que, en mayor o menor medida, son muy “normales” en los trenes), se producen daños en los cilindros que a menudo repercuten en las condiciones de la instalación y del producto laminado. Evidentemente, es preciso analizar y determinar (o viceversa) las causas que provocan el fallo de los cilindros, con el fin de reducir el riesgo de que se repitan los daños y sus consecuencias o, mejor aún, para eliminar por completo este riesgo. Dichos análisis se llevan a cabo de forma interna pero, a menudo, se recurre al proveedor de los cilindros para que dé su opinión al respecto y, en muchos casos, se plantean reclamaciones en caso de daños en los

cilindros. En estos casos, evidentemente se analizan las condiciones de laminación en términos generales, así como la calidad de los cilindros; se genera una amplia controversia en las discusiones, la cual puede verse aumentada debido a malentendidos derivados de divergencias en los conocimientos e información de las partes (Heinrich Schröder, 2003).

1.1 Desarrollo histórico de los trenes de laminación.

La fabricación a gran escala de productos planos, mediante “trenes de bandas en caliente”, se desarrolló en Norteamérica en la primera mitad del siglo XX, extendiéndose por todo el mundo después de la Segunda Guerra Mundial (O, 1998.).

Para obtener productos planos de acero de forma eficaz y rentable económicamente, se produjeron algunos desarrollos que supusieron un cambio significativo de la tecnología de fabricación. El objetivo era, y aún sigue siendo, disminuir el consumo energético, así como los requisitos de personal, inversiones, etc., reduciendo de este modo los costes de producción y, al mismo tiempo, aumentando el rendimiento (la relación entre el peso de la banda acabada de calidad y el peso del material antes del proceso de laminación) y la calidad del material producido.



Figura 1.2: Tren de laminación de bandas

En un principio, los desbastes se obtenían mediante moldeo en coquilla, pasando con el tiempo a un proceso de colada continua (160-300 mm de espesor). Resultado: se eliminaron los trenes *slabbing*. A continuación, se desarrollaron las máquinas de colada de desbastes finos (35-80 mm de espesor), lo que supone la eliminación de los trenes desbastadores. En la actualidad, a comienzos del siglo XXI, las primeras máquinas de colada de bandas, inventadas hace 150 años y formadas por una única caja y una única pasada, han comenzado a operar para la producción de banda ancha. En los trenes de laminación en caliente convencionales, el espesor mínimo laminado era de 1,5 a 2 mm. En los trenes de laminación con colada continua de desbastes finos, el espesor de la banda laminada es inferior a 1 mm, mientras que en las máquinas de colada de bandas el objetivo es colar material de entre 2 y 1 mm.

En el pasado, el proceso necesario para la producción de bobinas de acero a partir de mineral de hierro solía durar semanas. En la actualidad, en las instalaciones de colada continua de desbastes finos, en su mayoría asociadas a hornos eléctricos que utilizan chatarra como materia prima, el tiempo transcurrido entre la fase de fusión y el bobinado final es inferior a un día. La banda se lamina en una colada, lo que significa que, tras la fase líquida, el material se enfría por completo solamente después de concluido el proceso de laminación.

Para mejorar la forma de los productos planos, se han desarrollado constantemente nuevas tecnologías, tales como el sistema de flexión de cilindros (*roll bending*) de trabajo y de apoyo, cajas sexto, el sistema CVC (de variación constante de la corona). Todos estos cambios han repercutido significativamente en la distribución de cargas en los cilindros.

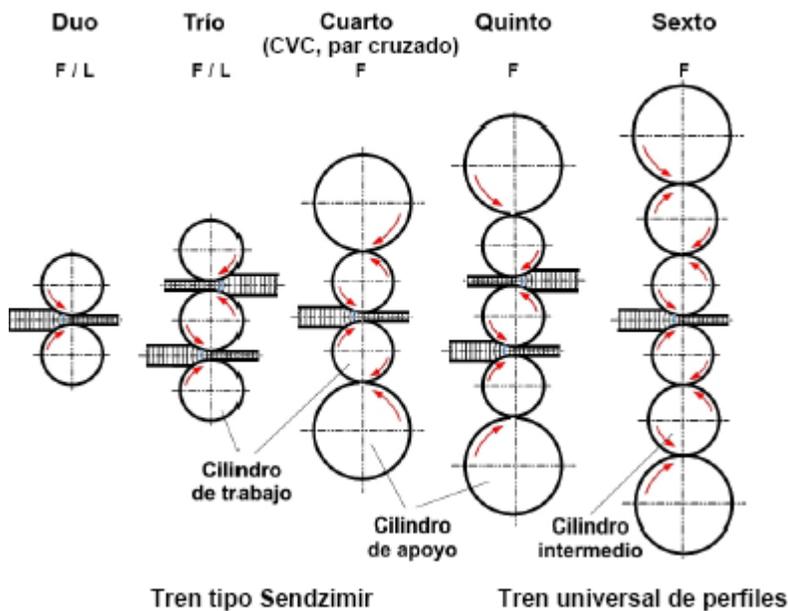
En el ámbito de los productos largos, el desarrollo ha sido similar: colada de *blooms* por moldeo en coquilla; colada continua de barras con formato pre-formado (hueso de perro), eliminando la necesidad de cajas rompedoras; uso cada vez más extendido de “trenes universales” para la fabricación de productos

largos, en lugar de los tradicionales trenes abiertos con cilindros acanalados, generalmente con una pasada un canal.

Lógicamente, los trenes de laminación en frío y las tecnologías asociadas a éstos también se han visto mejorados. Se han desarrollado nuevos trenes para obtener una “mejor banda” trenes sexto, CVC, cilindros de apoyo hinchables, etc. y laminación continua (sin fin).

El mercado del acero es altamente competitivo y los precios por tonelada de productos laminados han ido reduciéndose desde hace tiempo, a pesar de la inflación, las variaciones en los costes energéticos, costes de personal, etc. Las empresas que no introduzcan nuevos desarrollos técnicos tendrán que enfrentarse a serios problemas en el futuro (BILMES, 2000).

En la Figura 3 se representan algunas características de los diferentes tipos de cajas de laminación.



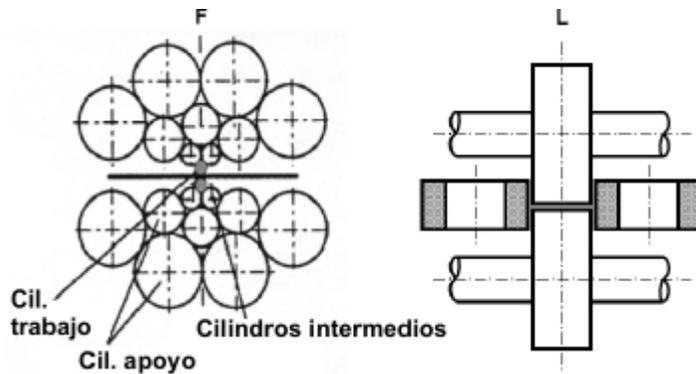


Figura 3: Cajas de laminación con diferente distribución de tensiones y carga específica. (F: Productos Planos; L: Productos Largos)

1.2 Fabricación de cilindros de laminación

Existe una amplia variedad de cilindros, aplicaciones, procesos tecnológicos de fabricación, así como de grados de cilindros, para los que no existen normas. Se trata de un campo reservado a los especialistas a la vez que es un mercado muy reducido. La mayoría de los fabricantes de cilindros son pequeñas empresas (a menudo de menos de 300 trabajadores), mientras que los usuarios forman parte de grandes conglomerados industriales del sector del aluminio y acero. Por su parte, los cilindros son solamente herramientas, pero son absolutamente necesarias.

En condiciones normales de laminación y sin “problemas en los cilindros”, solamente un número muy limitado de especialistas son responsables de los cilindros, siendo éstos unas herramientas tan importantes. Pero en el momento en que un cilindro se desintegra en el tren, por el motivo que sea, o quizás cuando el producto laminado no cumple los requisitos, inmediatamente cualquiera se convierte en un experto en cilindros. Y se comienza a debatir sobre las propiedades de éstos, su fabricación, las pruebas a las que son sometidos, olvidando que en muchos casos lo que se ha producido es un accidente de laminación (Fernández A.A., 2000).

Los cilindros pueden ser:

- Fundidos

- Forjados
- Sinterizados (o fabricados en prensas isostáticas en caliente, HIP)

Todas las tecnologías tienen sus ventajas, desventajas, y limitaciones en cuanto a la producción.

Dichos límites pueden deberse a:

- Dimensiones de los cilindros
- Grados de los cilindros (contenido de C, elementos aleantes)
- Requisitos de dureza o resistencia al desgaste
- Costos de fabricación

Evidentemente existen áreas en las que se produce un solape, en las que se dispone de cilindros fabricados con diferentes tecnologías pero no existe una máxima general del tipo “fundido mejor que forjado” o viceversa. La competencia siempre es dura y solamente el resultado final en términos de “costo de los cilindros en relación con el acero laminado” influye en la decisión final. Se producen conflictos en relación con los cilindros de apoyo, en especial para laminación en caliente de productos planos y algunos cilindros para trenes de perfiles sometidos a altos esfuerzos.

El elemento crucial no es tanto la tecnología de fabricación de cilindros, sino el control de dicha tecnología, pues es preciso controlar en todo momento el procedimiento. Ello depende del cuidado en la aplicación de la tecnología y del grado de conocimientos por parte de los fabricantes de cilindros. Esta afirmación resulta evidente si se realiza una comparación entre los índices de achatarramiento de los diferentes fabricantes (un secreto muy bien guardado), o cualquier otro dato de calidad. La fiabilidad, la reproducibilidad no es una mera cuestión de tecnología de fabricación de cilindros, sino de control del procedimiento utilizado.

Desde hace tiempo, ha ido reduciéndose el radio de costo de cilindros por tonelada de material laminado, por diversos motivos:

- Mejoras tecnológicas en los trenes
- Mejoras en el rendimiento de los cilindros

Pero no por haber reducido los costos asociados a los cilindros para poder desarrollar cilindros con mejores niveles de rendimiento e introducir nuevas tecnologías de fabricación, los fabricantes deben obtener beneficios. ¡A la larga, los cilindros de “bajo precio” resultan contraproducentes (N.D.Titov, 1981).

Entre los conocimientos técnicos de los fabricantes de cilindros se incluye:

- Conocimiento de la aplicación de los cilindros (carga, velocidad, refrigeración)
- Selección del material óptimo
- Producción de cilindros sólidos, sin defectos
- Selección del tratamiento térmico adecuado (resistencia, dureza, tensiones residuales)
- Capacidad para mecanizar los cilindros de modo que se cumplan los requisitos de las especificaciones y huellas
- Y, por último aunque no por ello menos importante, capacidad para hacer frente a los cambios en los requisitos del mercado.

1.2.1 Propiedades mecánicas de los cilindros de laminación

A la hora de seleccionar los materiales para la producción de cilindros de laminación es importante tener en cuenta algunas propiedades:

Dureza: esta propiedad se relaciona directamente con la resistencia al desgaste. Está comprobado que cuanto mayor es la dureza, menor va a ser el desgaste de los cilindros, siendo éste una de las principales causas de deterioro e inhabilitación de los mismos.

Resistencia a compresión: es normalmente directamente proporcional a la dureza en la mayoría de los materiales de base hierro.

Resistencia a tracción: es importante, no solo en el material de la capa sino también en el material del núcleo y en la intercara de separación con la capa, que los cilindros tengan una alta resistencia a tracción, para evitar fracturas espontáneas producidas por elevados gradientes de temperatura que aparecen durante el proceso de fabricación. La manera más fácil de evitar esto es minimizar estos gradientes, lo cual puede conseguirse utilizando buenas estrategias de fabricación, tratamientos térmicos y correcto manejo de los cilindros

Resistencia a fatiga: solo la experiencia permite estimar la resistencia a fatiga de los cilindros en las condiciones de trabajo. Los ensayos realizados sobre muestras estándar para conocerla, son prácticamente inútiles por no poder considerar las condiciones reales de cada cilindro en cada momento, como su tamaño, concentradores de tensión, condiciones de servicio, condiciones ambientales etc.

Desgaste: las condiciones de laminación tienen mucho que ver con el desgaste del cilindro. Por ejemplo, los cilindros con alto contenido en cromo se desgastan muy poco en los trenes de laminación en frío y sin embargo se desgastan mucho más rápidamente en los trenes de laminación en caliente (fatiga térmica). Básicamente, la resistencia al desgaste de un material aumenta con la dureza. Para una misma dureza, la resistencia al desgaste aumenta con el porcentaje de carburos.

Coefficiente de fricción: El coeficiente de fricción está más influenciado por las condiciones de la laminación que por las propiedades del material del cilindro. En aquellos casos en los que las condiciones de refrigeración de los cilindros durante el servicio son eficientes, las diferencias entre los coeficientes de fricción de distintos materiales no son apreciables, a menos que exista grafito libre en la microestructura del cilindro, que debido a su efecto lubricante, disminuye significativamente el coeficiente de fricción (BILMES, 2000).

1.2.2 Materiales utilizados en los cilindros de laminación

En el siglo XIX, el material utilizado para la fabricación de cilindros era principalmente fundición gris no aleada -modificada únicamente por diversos equivalentes de carbono y diferentes velocidades de enfriamiento (moldes de

coquilla de fundición gris o moldes de arena)-, y acero forjado. Los grados de fundición comprendían calidades que iban desde “ligeramente duras” a “semi-duras”, a “fundición templada”, en cuyo caso la tabla de los cilindros presentaba una capa de hierro blanco (sin grafito) y núcleos y cuellos de fundición gris debido a la reducida velocidad de enfriamiento. Este tipo de cilindros se utilizó para la laminación de productos planos sin refrigeración de cilindros en “trenes de hojas”, mientras éstos existieron (finales del siglo XX). Posteriormente, se desarrollaron cilindros de acero fundido con un contenido en carbono de hasta 2,4%, con o sin grafito, que en la actualidad continúan produciéndose.

Hacia 1930, se inventaron los cilindros ICDP (de doble colada de temple indefinido) para laminación en caliente, especialmente para cilindros de trabajo del acabador de trenes de bandas en caliente, utilizados también en muchas otras aplicaciones, tales como cajas desbastadoras de trenes de bandas y cilindros de trabajo de trenes de chapa. Durante muchos años estos cilindros se convirtieron en el estándar a nivel mundial, con variaciones muy limitadas. Hasta la fecha, ningún otro material ha podido sustituir este material en determinadas aplicaciones. A finales de los noventa, la calidad ICDP mejorada con carburo permitió finalmente mejorar el rendimiento de los cilindros, iniciando una nueva fase para este grado que, a pesar de su antigüedad, continúa siendo utilizado con éxito en cilindros de trabajo de las primeras cajas del acabador de trenes de laminación en caliente (en sustitución de hierro al cromo alto y HSS, véase más adelante) y en trenes de chapa. Hacia 1950 se desarrolló la fundición nodular, incorporándose a la fabricación de cilindros, tanto en la opción no aleada como, a menudo, con aleación de (Cr) Ni, Mo, ofreciendo al mismo tiempo adecuadas propiedades anti-desgaste y resistencia.

El uso de “hierro con un alto contenido en cromo” (2-3%C, 15-20% Cr) trajo consigo nuevos materiales, de mayor resistencia al desgaste y cierta “indiferencia” con respecto a los cilindros. Pero éste solamente era uno de los pasos en el camino hacia una mayor productividad de los cilindros.

En 1985 comenzó una nueva fase con la introducción de materiales como los aceros rápidos para herramientas (HSS), que han evolucionado hacia los denominados “semiaceros” para herramientas. Superados los problemas iniciales, todos estos cambios trajeron consigo nuevas oportunidades de mejora del rendimiento de los cilindros. A raíz de la introducción de nuevos grados en los trenes, a menudo fue necesario modificar o mejorar las condiciones de laminación. Sin embargo, tras cierto tiempo los cilindros también mejoraban, eliminando los problemas asociados a los nuevos grados y obteniendo un mayor rendimiento.

Todas estas calidades de cilindros se utilizan en la fabricación tanto de productos planos como de largos. Adicionalmente, también se emplean grados nuevos, incluso más sofisticados desde un punto de vista técnico, en los pequeños cilindros utilizados en los trenes de alambrón; a la vanguardia se situarían los cilindros de carburo sinterizado, mientras que se están comenzando a probar los cilindros cerámicos. Sin embargo, existen aún ciertas limitaciones en términos de tamaño en cuanto a la fabricación de este tipo de cilindros, ya que aún no se dispone de equipos para la producción de piezas de mayores dimensiones.

También se han mejorado los cilindros de acero forjado para laminación en frío, para lograr una mayor penetración de la dureza tras el tratamiento térmico mediante el aumento en el contenido de aleantes. Básicamente, el contenido en cromo pasó de 2% a 5% y se cambió a endurecimiento por inducción (principalmente). El cromado de los cilindros de trabajo posterior al rectificado y el granallado han aumentado la vida de la necesaria rugosidad superficial.

En realidad, los cilindros son herramientas para la conformación de metales, y por tanto el desarrollo de materiales adecuados para los cilindros es paralelo al desarrollo de otras herramientas de la industria de los metales, tanto para aplicaciones de corte como de nocorte. Los cilindros son herramientas de tamaño relativamente grande con una prolongada vida pero, en último término, son solamente herramientas (Caballero, 2003).

En la Tabla 1 se incluye un resumen de los materiales utilizados para la fabricación de cilindros (Caballero, 2003).

Aceros con alto contenido de cromo.

Los cilindros de acero con alto contenido en cromo fueron introducidos en el mercado a principios de 1.980 por Chavanne-Kétin y son actualmente usados universalmente.

El cromo es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados. Se suele emplear en cantidades diversas, desde 0,3 a 30%, según los casos. Aumenta la dureza y la resistencia de los aceros, mejora la templabilidad, disminuye las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidableidad, etc.

En presencia de una cantidad suficiente de carbono, el cromo tiende a formar carburos, y, en cambio, cuando el acero es de muy bajo contenido en carbono, es soluble en la ferrita. Los carburos formados por este elemento no son siempre carburos simples; con bastante frecuencia se presentan asociados con el carburo de hierro y a veces, forman carburos complejos de dos o más elementos. La naturaleza de estos compuestos depende del porcentaje de carbono y del contenido en elementos de aleación.

En general, los carburos que forman los diferentes elementos de aleación son duros y frágiles, y en especial los de cromo y vanadio son más duros y resistentes al desgaste que los demás.

El cromo, desde un 5% en peso, aumenta la resistencia a la oxidación del hierro en atmósfera seca. Por eso, para un satisfactorio comportamiento en atmósferas oxidantes, a temperaturas de hasta 750°C, los aceros utilizados suelen ser de alto contenido en cromo. Simultáneamente, contenidos crecientes de cromo en solución sólida en el hierro, disminuyen la conductividad térmica de éste, y por tanto le confieren refractariedad.

La presencia del cromo en el acero, además, al formar una película superficial de su óxido, modifica la posición del hierro en la serie electroquímica. Así el hierro, que sin cromo es anódico, pasa a comportarse catódicamente en medios acuosos cuando el porcentaje de cromo es superior al 12% en peso. Por este motivo los aceros con más de 12% de cromo reciben el nombre de aceros inoxidables. Esta

resistencia a la corrosión resultará tanto peor cuando mayor sea el contenido de carbono debido a la presencia de carburos de cromo. En las zonas contiguas a estos carburos, disminuye el contenido de cromo (porcentajes inferiores al 12%) formándose aureolas descromadas que pasan a ser anódicas y son atacadas.

Otra cualidad interesante del cromo es su efecto sobre las temperaturas críticas de transformación del hierro. El cromo amplía la estabilidad del hierro delta, y también incrementa la temperatura de transformación del hierro γ y en hierro α , es decir, tiene un carácter alfégeno.

El cromo también tiene cierta incidencia en la templabilidad de la austenita: la hace más estable a las transformaciones durante el enfriamiento continuo, disminuyendo su temperatura de inicio de formación en martensita Ms. Por ello, en los aceros con altas proporciones de cromo, a pesar de ser enfriados lentamente, puede no tener lugar la transformación perlítica de la austenita, que requeriría descensos de temperatura aún más lentos y aquella austenita se transformará parcialmente en martensita y quedará, a temperatura ambiente, una cierta proporción de austenita residual sin transformar. Materiales utilizados en cilindros de trenes de laminación Tabla 1 de los anexos (Caballero, 2003).

1.2.3 Demanda de cilindros de laminación

El acero es el material metálico más utilizado actualmente; en el mundo se producen anualmente más de 700 millones de toneladas, la mayoría de productos laminados planos o largos.

Por su parte, el aluminio también es un material importante, el cual se lamina principalmente para obtener productos planos (para envases, láminas y componentes de la industria aeronáutica y del automóvil). En lo que a este documento respecta, nos centraremos principalmente en la laminación de acero.

Los cilindros son herramientas que se ven sometidas a todo tipo de esfuerzos, cargas asociadas a las condiciones normales y anormales de laminación que varían a medida que los cilindros se van desgastando a lo largo de la campaña. La función de los cilindros es realizar un enorme trabajo de reducción necesario para

la laminación, tanto en caliente como en frío. Lo ideal sería que los cilindros nunca sufriesen roturas, desconches o desgaste, que proporcionasen un rendimiento excelente y que nunca produjesen ningún problema. Pero sucede que cualquier tren es susceptible de deteriorar un cilindro; los trenes son instalaciones muy robustas, en las que muchas operaciones, incluso en trenes totalmente automatizados, pueden fallar.

En la mayoría de las aplicaciones, la carga de las cajas de laminación es muy compleja:

- Es necesario transmitir el par de los motores de accionamiento.
- Las fuerzas de separación producen deflexión en las cajas de laminación.
- El diseño de los cilindros y los productos laminados pueden hacer que aumenten los esfuerzos.
- Durante la laminación de productos planos en trenes trío (cuarto, quinto, sexto o más) se produce una elevada presión Hertziana, cuya distribución no es equitativa de un extremo a otro de la tabla.
- La carga lineal (t/m) entre el cilindro y la banda varía ampliamente según el material laminado y las estrategias del programa de laminación.
- Existe siempre cierto deslizamiento y fricción entre el cilindro y el material laminado, que varían extremadamente en los cilindros para trenes de perfiles, dando lugar a diferentes modelos de fricción.
- La superficie de los cilindros sufre cambios bruscos de temperatura (grietas de origen térmico).
- El medio en la zona de separación entre cilindro puede estar formado por varios agentes químicos con o sin componentes mecánicos, lo que puede causar un fuerte impacto en las propiedades de desgaste.
- Las condiciones de la superficie de un cilindro varían a lo largo de una campaña de laminación debido por “pulido”, “grietas de origen térmico”, “desgaste”, etc.

- Incluso la forma de un cilindro puede variar como consecuencia de un desgaste no uniforme.

De forma regular, es preciso reacondicionar los cilindros para restaurar la forma deseada y eliminar de la superficie aquellas zonas con desgaste, grietas térmicas y fatiga, por lo que se puede decir que la duración de los cilindros nunca es tan prolongada como los usuarios quisieran.

Hace ya muchos años que se viene trabajando en la investigación y el desarrollo de grados de cilindros y el avance continúa. El objetivo final en cualquier caso es aumentar la calidad de los productos laminados acabados (tolerancias, superficie) y, al mismo tiempo, aumentar la duración de las campañas, mejorar el rendimiento de los cilindros y reducir los riesgos de daños en los cilindros.

Existe una amplia variedad de cilindros en cuanto a sus dimensiones; los cilindros más pequeños pesan unos pocos kilogramos, mientras que las piezas de mayor tamaño pueden alcanzar las 250 t. La variedad de grados utilizados en su fabricación es también muy amplia, desde fundición dúctil a carburo de tungsteno, incluyendo todo tipo de aceros para herramientas y aceros especiales, utilizados exclusivamente en cilindros. Los cilindros de acero forjado se consideran tecnología punta en el ámbito de la laminación en frío, mientras que los de fundición se emplean en múltiples aplicaciones, así como los cilindros de carburo de tungsteno sinterizado y cilindros “recubiertos” o ESR (véase la Tabla 1).

El grado de todos los cilindros así como la calidad de los cilindros de cualquier fabricante debe estar justificado por el uso y el rendimiento de los cilindros, si se dispone de los suficientes datos. En último término, el costo de los cilindros por tonelada de acero laminado es un factor decisivo. Pero los fabricantes y los usuarios de los cilindros deben saber que están haciendo, que esperan de los cilindros y cómo deben gestionar sus herramientas (Heinrich Schröder, 2003).

1.2.4 Consideraciones sobre el mercado de cilindros

Aspectos generales

La industria siderúrgica es un mercado de lento crecimiento, si se analiza a largo plazo. Medido en t/año, este crecimiento representa aproximadamente un 3% anual. Se están construyendo nuevas capacidades fuera de los países tradicionalmente industrializados. Por su parte, los precios han seguido una tendencia a la baja desde hace tiempo.

Por diversos motivos, la productividad de cilindros está creciendo. Dicho crecimiento podría suponer aproximadamente un 5%. (En la actualidad, se está reduciendo el consumo de cilindros para productos largos, de 10-15 kg/t a 1-4 kg/t; en el caso de los productos planos, se está pasando de 4-6 kg/t a 1-2 kg/t; con el proceso de colada de banda fina, el consumo es aún mucho menor).

Para una producción anual de 600 millones de toneladas de acero y un consumo de cilindros del orden de 1 kg/t, se obtiene un volumen anual de cilindros de 600.000 t.

En este punto, es preciso diferenciar entre cilindros forjados y cilindros de fundición:

Los cilindros forjados, al menos las piezas en bruto, solamente pueden ser fabricados por grandes empresas, que requieren fuertes inversiones (instalaciones de acería, grandes forjas, instalaciones de tratamiento térmico, etc.), que, al mismo tiempo, producen otro tipo de productos forjados (muy pocas forjas producen solamente cilindros).

Se pueden producir cilindros de fundición en instalaciones pequeñas, el equipo tiene un bajo coste y es fácilmente accesible en el mercado.

1.2.5 Cilindros obtenidos por fundición

A nivel mundial, existen casi 50 empresas de fundición de carácter internacional dedicadas a la fabricación de cilindros (aunque no todas desarrollan sus operaciones a escala global) así como un número desconocido de fabricantes de cilindros a nivel nacional, por ejemplo en China (solamente en la República Popular de China, del orden de 100 o incluso 400 fabricantes) y la antigua Unión Soviética (N.D.Titov, 1981).

Existe una única gran empresa dedicada a la fabricación de cilindros de fundición (más de 50.000 t/año), un número limitado de medianas empresas (20.000-50.000 t/año) y muchas pequeñas empresas así como fabricantes que “también” se dedican al sector de cilindros de fundición (Ángel, 1983).

El principal problema del sector es que es necesario reducir capacidades cada año, a pesar de que la producción de acero sigue aumentando.

El éxito de las empresas de fundición se basa en:

- la calidad de los cilindros, su rendimiento
- el servicio
- la innovación
- los márgenes comerciales

El margen comercial equivale a la diferencia entre el precio de venta y el costo de fabricación. En Europa, los costes de personal representan entre un 30% y un 50% del precio de venta, lo cual es también aplicable a las empresas con altos niveles de productividad. El porcentaje de los costos de personal aumenta a medida que se reduce el peso de los cilindros. En algunos países con “mano de obra barata”, estos costos representan menos del 10% del (mismo) precio de venta. Para reducir dicho porcentaje, a menudo es necesario aplicar mejoras técnicas, nuevas tecnologías y fuertes inversiones.

1 Cilindros de bajo nivel tecnológico, cilindros estándar.

Existen algunas calidades o dimensiones de cilindros que “cualquiera” puede producir, los denominados cilindros estándar (commodities). Esto se aplica en el caso de la fundición nodular y aceros hiper-eutectoides para (pequeños) trenes de perfiles, así como a anillos de estos grados de cilindros y de fundición templada para trenes de alambre y alambrón.

Si el objetivo es obtener cierto beneficio, es imposible fabricar y comercializar cilindros estándar desde países con altos costes laborales, ni siquiera contando con excelentes equipos.

2 Cilindros de ultra-tecnología

En el otro extremo del rango de calidades, opuesto al de los cilindros commodities, se encuentran los productos con propiedades muy especiales, obtenidos a partir de los avances en la investigación y el desarrollo, aplicando nuevas ideas e instalaciones de fabricación, y a menudo bajo la protección de patentes. Un ejemplo muy típico de este tipo de cilindros serían los HSS, productos mediante el proceso de “revestimiento” o el proceso “HIP”.

Por lo general, estos desarrollos implican elevados costos y requieren grandes inversiones en nuevos equipos, sin saber si se obtendrán resultados positivos o no, y, en ocasiones, suponen una pérdida de dinero.

Solamente las grandes empresas pueden llevar a cabo este tipo de desarrollos, siendo Japón el único país en el que las grandes empresas siderúrgicas operan instalaciones de fundición de cilindros.

La mayoría de las empresas siderúrgicas (además de las de Japón y China) han vendido o cerrado sus instalaciones de fundición de cilindros debido al reducido volumen de actividad en este ámbito.

Sin embargo, incluso en Japón resultaría mucho más eficaz apoyar nuevas ideas y asumir el costo que supone la investigación y el desarrollo que operar muchas fundiciones de cilindros que tienen dificultades para lograr beneficios.

3 Cilindros de nivel tecnológico intermedio

Los cilindros para laminación de productos planos no son componentes de bajo nivel tecnológico, sino que se sitúan en la vanguardia de la técnica en todo el mundo, incluso en el caso de los cilindros de trabajo compuestos de doble colada.

Está claro que los cilindros de apoyo y de trabajo para cajas desbastadoras no son productos estándar, aunque quizá lo sean en el futuro.

Existe una fuerte competencia en el mercado de las “tecnologías de nivel intermedio”, en lo que al precio se refiere, con grados mejorados de cilindros, ICDP con carburo mejorado, cilindros altos en cromo con carburo mejorado,

cilindros de aceros para semi- herramientas, HSS, cilindros de apoyo con mayores niveles de aleación (5% Cr).

El rendimiento de los cilindros también está mejorando. Los usuarios desean acelerar el desarrollo tecnológico del mejor proveedor para hacer frente a la competencia y lograr un precio más bajo, obtener productos de alto nivel tecnológico, todo ello en un contexto de reducción del volumen del mercado (Alejandro, 1999, Heinrich Schröder, 2003).

1.2.6 Principales problemas que aparecen en los cilindros de laminación.

- 1 Muchos cilindros sufren daños/se destruyen en los trenes, por lo que es preciso un conocimiento mutuamente compartido de las causas de estos fallos en aras de una cooperación a largo plazo entre el usuario y el fabricante de cilindros. ¿Quién es responsable de los daños? ¿Quién debe hacerse cargo del coste que suponen? Los análisis técnicos, o un detective, pueden dar la respuesta a estas preguntas, ¡pero los resultados deben ser aceptados por todas las partes!
- 2 La carga de diseño de los cilindros en un tren nunca es realmente la carga media aleatoria. Por lo general, los cilindros están sometidos a menos esfuerzos de los que permite su diseño, pero en caso de que se produzcan accidentes de laminación, los esfuerzos pueden ser muy superiores.
- 3 Se pueden describir las condiciones de laminación en general; sin embargo, nunca son estables, ya que pueden cambiar en cada campaña, pasando de buenas a peores (en términos de desgaste), lo cual sucede a menudo.
- 4 A menudo, aparecen problemas (Ej., “desconches en bordes” y/o “formación de bandas”) en algunos trenes, que no se reproducen en trenes de similares características. Ciertamente no es un problema relacionado con los cilindros, pero en cualquier caso se recurre al fabricante de éstos para que preste asistencia en la resolución del problema. Y aun cuando dos trenes puedan ser exactamente iguales, el modo en que son operados seguramente es diferente,

lo que da lugar a diferentes índices de rendimiento o a diferentes tipos de problemas.

- 5 La clasificación de los cilindros se basa en el rendimiento, partiendo de la base de que las estadísticas igualan todas las experiencias diferentes sufridas por un cilindro a lo largo de su vida. Pero, ¿realmente es así? ¿Se puede manipular el rendimiento? Claro que sí, como ya se ha demostrado, aunque quizá no a propósito sino involuntariamente. En cualquier caso: los cilindros “malos” no siempre son malos y los cilindros “buenos” no siempre son buenos.

Los fabricantes de cilindros de alta tecnología tratan de mejorar de forma constante el rendimiento de sus productos con el objetivo de seguir compitiendo en el mercado, pero el volumen de éste se reduce, aunque la producción del acero (y el aluminio) esté creciendo. Ello se debe a que el rendimiento de los cilindros en los trenes es cada vez mejor (Helio).

1.3 Simulación computacional en los procesos de fundición

A través de un estudio realizado por el Centro de Mecánica del INTI (**Instituto Nacional de Tecnología Industrial**) de Argentina en el área de la fundición de metales ferrosos y no ferrosos se pudo comprobar cierta deficiencia en los procesos productivos relacionados con la adecuación e introducción de técnicas modernas de simulación, las cuales permiten optimizar los procesos de fundición en ambientes computacionales reduciendo al máximo la técnica prueba-error. Este conjunto de técnicas, cada vez más utilizadas internacionalmente, permiten simular los procesos de fundición mediante sistemas computacionales como Soporte Computacional en Tecnología de la Fundición (SCTF) o Casting Simulation.

En la actualidad existe una considerable franja de pequeñas y medianas empresas fundidoras que no están en condiciones de introducir dentro de su operatoria de producción el SCTF como una herramienta más en la temática de la tecnología de la fundición. Esto obedece esencialmente a dos factores: al alto costo de compra o alquiler de los programas de origen extranjero y a la falta de infraestructura y

conocimientos de base necesarios para ejecutar esta clase de programas de simulación. Para optimizar sus procesos de fundición, dichas empresas deberán contar con programas de simulación correspondientes, programas gráficos de generación de sólidos (CAD) y el equipamiento computacional adecuado (2002.).

Ante este cuadro de situaciones el INTI decidió crear el Laboratorio de Fundición bajo las siguientes directrices tecnológicas:

- Brindar soporte computacional a las empresas del área de la fundición.
- Difundir y capacitar en la temática de la simulación computacional a la industria.
- Apoyar la actividad industrial de la fundición en todos los problemas tecnológicos que excedan la capacidad del laboratorio mediante la vinculación con organismos estatales (nacionales y provinciales), universidades y laboratorios privados del área.
- Realizar actividades de investigación tecnológica aplicada.

1.3.1 Simulación de procesos de fundición y sus beneficios para la industria

La simulación de procesos de fundición consiste en reproducir en un ámbito computacional todas las etapas involucradas en el proceso de obtención de una pieza, tanto para materiales ferrosos como no ferrosos.

- La generación del modelo,
- La generación del molde,
- El proceso (por gravedad, inyección u otra técnica).

Esta novedosa técnica conlleva los siguientes beneficios:

- 1) Detección en forma virtual de posibles defectos de fundición (ferrosos y no ferrosos), entre otros, micro y macros rechupes, porosidad gaseosa y mal llenado de las piezas.

- 2) Ensayo de soluciones en forma interactiva y rápida antes de fundir.
- 3) Minimización de la técnica prueba-error, cada vez más desestimada por antieconómica.
- 4) Obtención de información de variables físicas (presión, velocidad, temperatura) en zonas que por lo general es casi imposible medir en un proceso real.
- 5) Permite visualizar como sería el llenado del molde, cosa imposible en la práctica.

La inserción de los programas de simulación computacional en los procesos de fundición establece una nueva forma de encarar el diseño de las piezas. Ahora debe incluirse dentro del esquema productivo una nueva etapa: la simulación, la cual tendría como herramienta fundamental el programa de simulación.

Bajo este nuevo esquema, se establece un flujo de información interactiva entre las divisiones o sectores involucrados en los procesos de fundición que redundaría en una optimización del proceso y por ende en la reducción de costos productivos.

La técnica prueba-error es costosa pues el diseño del proceso es probado en condiciones normales: esto implica insumo de materiales, gastos energéticos y de operación. Si aparece un error, la pieza debe volver a la oficina de diseño, ser modificada y luego probada nuevamente. Cuantos más ciclos se involucren en el proceso, más costos se generan.

La técnica de simulación permite realizar la optimización en ambiente computacional con mucha velocidad y sin costos de insumos materiales y de energía. Claro que para ello hay que contar con un programa de simulación poderoso, dado que se están representando casos reales en ambiente virtual (Delannay, 2004).

1.3.2 Simulación por elementos finitos aplicada a la industria. Evaluación virtual del diseño de productos, estado de maquinarias y equipos para predecir o corregir fallas.

El método de elementos finitos comenzó a utilizarse hace más de 30 años. En un principio se utilizaba solamente para el análisis estructural, los modelos eran muy simples y las condiciones de carga que se podían considerar eran limitadas.

Posteriormente, y debido al avance por una parte de los conocimientos, y por otra de la capacidad de las computadoras, el método comenzó a aplicarse en otros problemas de la física. Así podemos citar por ejemplo, transferencia de calor, dinámica de fluidos, magnetismo, acústica, etc. Además se incrementó notablemente el “realismo” que se podía lograr en las simulaciones (2002.).

El Método de Elementos Finitos (MEF) fue al principio desarrollado en 1943 por R. Courant, quien utilizó el método de Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo para obtener soluciones aproximadas a un sistema de vibración. Poco después, un documento publicado en 1956 por M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp estableció una definición más amplia del análisis numérico. El documento se centró en “la rigidez y deformación de estructuras complejas”. Con la llegada de los primeros ordenadores instaura el cálculo matricial de estructuras. Éste parte de la discretización de la estructura en elementos lineales tipo barra de los que se conoce su rigidez frente a los desplazamientos de sus nodos. Se plantea entonces un sistema de ecuaciones resultado de aplicar las ecuaciones de equilibrio a los nodos de la estructura. Este sistema de ecuaciones se esquematiza de la siguiente manera:

$$f = K * u \quad 1.1$$

Donde las incógnitas son los desplazamientos en los nodos (vector u) que se hallan a partir de las “fuerzas” o “solicitaciones” en los nodos (vector f) y de la rigidez de las barras (matriz de rigidez K). Conocidos dichos desplazamientos es posible determinar los esfuerzos en las barras. La solución obtenida es exacta (R, 2005).

Uso práctico del método hacia 1950:

Cuando se produce la llegada de los primeros equipos de cómputo en la década de 1950, el cálculo de estructuras se encontraba en un punto en el que los métodos de cálculo predominantes consistían en métodos iterativos (métodos de Cross y Kani) que se realizaban de manera manual y, por tanto, resultaban bastante tediosos. El cálculo de una estructura de edificación de varios pisos, por ejemplo, podía llevar varias semanas, lo cual suponía un coste sustancial de tiempo en detrimento de la posibilidad de invertir este en la optimización de la estructura.

La llegada de la computadora permitió el resurgimiento del método de los desplazamientos ya conocidos en siglos anteriores (Navier, Lagrange, Cauchy), pero que eran difíciles de aplicar dado que al final conducían a la resolución de enormes sistemas de ecuaciones inabordables desde el punto de vista manual.

De 1960 a 1970:

Cuando las aplicaciones prácticas de elementos finitos crecieron en tamaño, los requerimientos de tiempo de cálculo y memoria de los ordenadores crecieron. En ese punto el desarrollo de algoritmos más eficientes se volvió importante. Para la resolución de los sistemas de ecuaciones se potencia el estudio de la adaptabilidad de los algoritmos ya conocidos (Gauss, Cholesky, Crout, Gradiente conjugado, etc.). El ahorro de tiempo es impensable y con ello el uso del método matricial se extiende. Este desarrollo se hace especialmente notable en estructuras de edificación donde la discretización de los pórticos en barras, es prácticamente inmediata a partir de las vigas y los pilares.

Sin embargo, y a pesar de desarrollarse modelizaciones de elementos superficiales mediante barras (losas con emparrillados, elementos curvos mediante aproximaciones de elementos rectos, etc.), se plantean grandes dificultades ante estructuras continuas (superficies y volúmenes) y con geometrías complejas. De ahí que sea precisamente dentro del campo aeroespacial donde comiencen a desarrollarse las nuevas técnicas del MEF. Dada su generalidad el método se amplió a otros campos no estructurales como la conducción de calor, la

mecánica de fluidos, etc. donde compitió con otros métodos numéricos como el de método de las diferencias finitas que aún siendo más intuitivos, tenían de nuevo dificultades de planteamiento para geometrías complejas. Con la llegada de los centros de cálculo y los primeros programas comerciales en los años 60, el MEF a la vez que se populariza en la industria refuerza sus bases teóricas en los centros universitarios.

En los años 70 se produce un gran crecimiento de la bibliografía así como la extensión del método a otros problemas como los no lineales. En esta década, el MEF estaba limitado a caros ordenadores centrales generalmente poseído por las industrias aeronáuticas, de automoción, de defensa y nucleares. Se estudian nuevos tipos de tipos de elementos y se sientan las bases matemáticas rigurosas del método, que había aparecido antes como técnica de la ingeniería que como método numérico de la matemática.

A partir de 1980:

Por último, a partir de la década de los 80, con la generalización de los ordenadores personales, se extiende el uso de los programas comerciales que se especializan en los diversos campos, instaurándose el uso de pre y postprocesadores gráficos que realizan el mallado y la representación gráfica de los resultados. Se continúa en el estudio de la aplicación del método a nuevos modelos de comportamiento (plasticidad, fractura, daño continuo, etc.) y en el análisis de los errores.(Ramos Morales et al., 2007)

Así se ha dejado la aplicación del MEF para el análisis de elementos continuos tipo losa o pantalla, mientras que los pórticos siguen todavía discretizándose en barras y utilizando el método matricial. Y desde el rápido declive en el coste de los ordenadores y el fenomenal incremento en la potencia de cálculo, el MEF ha desarrollado una increíble precisión. A día de hoy, los superordenadores son capaces de dar resultados exactos para todo tipo de parámetros.

Este método se basa en que la región o pieza para la cual se busca la solución es considerada como un ensamble de varias pequeñas regiones interconectadas entre sí, las cuales se denominan elementos finitos. En cada una de esas sub.-

regiones se aproxima su comportamiento en una manera simplificada, cuya formulación dependerá del problema de la física que se esté analizando. Luego, al estudiar el comportamiento de toda la región, se obtiene un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas. El hecho de que para encontrar la solución del problema aparezcan ecuaciones algebraicas simultáneas puede parecer complicado. Pero afortunadamente, la solución de las mismas es una de las tareas de las cuales se ocupan las computadoras.

A pesar del relativamente corto tiempo de utilización del método, se podría decir que las bases del mismo son más antiguas. Consideremos por ejemplo la técnica usada por los antiguos matemáticos para encontrar la circunferencia de un círculo. Esto lo consiguieron aproximando su geometría como un polígono. Entonces, se podría decir que cada lado del polígono era un “elemento finito”. Además, cuantos más lados tenía el polígono mucho más aproximada era la solución, en forma similar a lo que sucede en una simulación al incrementar el número de elementos.

En la actualidad, toda industria competitiva requiere de la simulación de sus productos o procesos, para predecir y/o corregir posibles problemas que se pudieran presentar. El campo de aplicación de la simulación por elementos finitos es amplio, pudiendo utilizarse ya sea en las grandes estructuras de la industria metalmeccánica como así también en la verificación de pequeños implantes biomédicos.

La aplicación más difundida del método de elementos finitos es en el diseño de productos. En este caso se tiene la posibilidad de evaluar de manera virtual los prototipos, permitiendo dejar para la etapa final del desarrollo la construcción y el ensayo, una vez que se ha logrado la configuración ideal. A pesar de que gran parte de la simulación por elementos finitos está orientada a analizar partes de máquinas o equipos, no existe mayor inconveniente en simular cualquier otro componente.

Otra aplicación muy interesante es la evaluación del estado de equipos o componentes que han estado en servicio o que han sido sometidos accidentalmente a sobrecargas. También se puede evaluar, antes de su puesta en

servicio, el comportamiento del equipo en caso de modificar las condiciones de operación o realizar reparaciones o alteraciones al mismo. En ese caso se puede utilizar la historia de la operación del equipo y la información obtenida en las inspecciones de mantenimiento para definir el modelo y las cargas. Incluso se pueden identificar las probables causas de fallas en servicio, tal como en el recipiente encamisado con elementos de refuerzo.

Finalmente, la utilización del método de elementos finitos se presenta como una valiosa herramienta, tanto para el diseño, como así también para evaluar equipos o componentes en servicio. El mismo permite no solo representar geometrías complicadas, sino también considerar las más variadas condiciones de carga como así también propiedades mecánicas del material como ser comportamiento elástico, plástico, hiper-elástico, creep, materiales compuestos, etc.

Desde el año 1995 el Centro de Córdoba del INTI brinda asistencia técnica en simulación, cálculo y optimización utilizando el programa ABAQUS (Standard/ Explícit / CAE), uno de los programas de elementos finitos para análisis estructural no lineal más potentes que existen en la actualidad. Este software es utilizado ampliamente en la industria para mejorar sus productos y procesos, acortar los ciclos de diseño, y reducir la cantidad de pruebas o ensayos.

La información de partida para realizar una simulación por elementos finitos es la geometría de la pieza ó equipo, para lo cual se pueden utilizar planos, croquis, archivos 2D ó 3D, o en casos que no se posea dicha información se puede relevar dimensionalmente la pieza para construir el modelo geométrico. Además se deben definir las cargas actuantes, las cuales pueden ser cargas normales de servicio o también se pueden considerar condiciones extremas de carga para identificar condiciones críticas de trabajo o de falla de la pieza. Finalmente, se debe conocer el tipo y grado del material, de manera de definir sus propiedades. Si no se conoce el material o sus propiedades se pueden realizar ensayos químicos para identificar el material y en caso de ser necesario ensayos físicos para determinar las propiedades mecánicas (E.A., 2002).

Desarrollo de los elementos finitos.

El análisis por elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés para: (*Finite Element Analysis*) es una técnica de simulación por computador usada en ingeniería. Usa una técnica numérica llamada Método de los elementos finitos (FEM).

Existen muchos Paquetes de software, tanto libres como no libres. El desarrollo de elementos finitos en estructuras, usualmente, se basa en análisis energéticos como el principio de los trabajos virtuales

El análisis de elementos finitos desde su enfoque matemático fue desarrollado en 1943 por Richard Courant, quien usó el Método de Ritz del análisis numérico y el cálculo variacional para obtener soluciones aproximadas para sistemas oscilatorios. Desde un punto de vista ingenieril, el análisis de elementos finitos se origina como el método de análisis estructural de matrices de desplazamiento, el cual surge luego de varias décadas de investigación, principalmente en la industria aeroespacial inglesa, como una variante apropiada para computadores. Para finales de los años de la década de 1950, los conceptos claves de matriz de rigidez y ensamble de elementos existe en las formas como se conocen hoy en día, la demanda de la NASA repercutió en el desarrollo del software de elementos finitos NASTRAN en 1965.

En estas aplicaciones, el objeto o sistema se representa por un modelo geoméricamente similar que consta de múltiples regiones discretas simplificadas y conectadas. Ecuaciones de equilibrio, junto con consideraciones físicas aplicables así como relaciones constitutivas, se aplican a cada elemento, y se construye un sistema de varias ecuaciones. El sistema de ecuaciones se resuelve para los valores desconocidos usando técnicas de álgebra lineal o esquemas no lineales, dependiendo del problema. Siendo un método aproximado, la precisión de los métodos FEA puede ser mejorada refinando la discretización en el modelo, usando más elementos y nodos (R.D, 1989).

Comúnmente se usa FEA en determinar los esfuerzos y desplazamientos en sistemas mecánicos. Es además usado de manera rutinaria en el análisis de muchos otros tipos de problemas, entre ellos Transferencia de calor, dinámica de

fluidos, y electromagnetismo. Con FEA se pueden manejar sistemas complejos cuyas soluciones analíticas son difícilmente encontradas.

La Ingeniería asistida por computadora (CAE, del inglés: *Computer Aid Engineering*) es la aplicación de programas computacionales de ingeniería para evaluar componentes o ensambles. Contiene simulación, validación y optimización de productos y herramientas de manufactura. La aplicación principal de CAE, usada en ingeniería civil, mecánica, aeroespacial, y electrónica, se trata de FEA al lado del Diseño Asistido por Computador (CAD).

Análisis por elementos finitos

En general, hay tres fases en cualquier tarea asistida por computador:

Pre-procesamiento. Definir el modelo de elementos finitos y los factores ambientales que influyen en él.

Solución del análisis. Solucionar el modelo de elementos finitos.

Post-procesamiento de resultados usando herramientas de visualización.

Pre-procesamiento

El primer paso en FEA, pre-procesamiento, es construir un modelo de elementos finitos de la estructura a ser analizada. En muchos paquetes de FEA se requiere de la entrada de una descripción topológica de las características geométricas de la estructura. Ésta puede ser 1D, 2D, o 3D. El objetivo principal del modelo es replicar de manera realista los parámetros importantes y características del modelo real. La manera más sencilla para conseguir similaridad en el análisis es utilizar planos pre-existente, modelos CAD, o datos importados de un ambiente FEA. Una vez se ha creado la geometría, se utiliza un procedimiento para definir y dividir el modelo en "pequeños" elementos. En general, un modelo de elementos finitos está definido por una malla, la cual está conformada por elementos y nodos. Los nodos representan puntos en los cuales se calcula el desplazamiento (análisis estructural). Los paquetes de FEA enumeran los nodos como una herramienta de identificación. Los elementos están determinados por conjuntos de nodos, y definen propiedades localizadas de masa y rigidez. Los elementos también están

definidos por la numeración de la malla, la cual permite referenciar la correspondiente deflexión o esfuerzo (en análisis estructural) para una localización específica.

Análisis (cómputo de la solución)

En la siguiente etapa en el proceso de análisis de elementos finitos se lleva a cabo una serie de procesos computacionales que involucran fuerzas aplicadas, y las propiedades de los elementos de donde producir un modelo de solución. Tal análisis estructural permite la determinación de efectos como lo son las deformaciones, estiramiento o *estrés* que son causados por fuerzas estructurales aplicadas como lo son la fuerza, la presión y la gravedad.

Post-procesamiento (visualización)

Estos resultados entonces pueden ser estudiados utilizando herramientas visuales dentro del ambiente de FEA para ver y para identificar completamente las implicaciones del análisis. Herramientas numéricas y gráficas permiten la localización precisa de información como esfuerzos y deformaciones a ser identificadas (Gould, 1998).

1.3.3 Aplicación de FEA a la industria de la ingeniería mecánica

Una variedad de especializaciones bajo el ámbito de la ingeniería mecánica tal como lo es la aeronáutica, biomecánica, y las industrias automotrices, todas comúnmente usan el análisis de elementos finitos integrado en el diseño y desarrollo de sus productos. Varios paquetes modernos de FEA incluyen componentes específicos como el térmico (termal), electromagnético, fluido y ambientes de trabajo estructural. En una simulación estructural el análisis de elementos finitos ayuda a producir visualizaciones de rigidez y fuerza y además ayuda a minimizar peso, materiales y costos. El análisis de elementos finitos permite una detallada visualización de en donde las estructuras se doblan o tuercen, e indica la distribución del esfuerzo y los desplazamientos. Los programas computacionales de análisis de elementos finitos proveen un amplio rango de opciones de simulación para controlar la complejidad de ambos, el modelado y el

análisis de un sistema. De forma similar, el nivel deseado de precisión y los requerimientos de tiempo computacional asociados pueden ser manejados simultáneamente para atender a la mayoría de las aplicaciones de ingeniería.

El análisis de elementos finitos, permite la construcción de diseños enteros, su refinación y la optimización de éstos antes de que el diseño sea manufacturado. Esta poderosa herramienta de diseño ha mejorado en gran forma, ambos, el estándar de diseños en ingeniería y la metrología del proceso del diseño en muchas aplicaciones industriales. La introducción del análisis de elementos finitos ha reducido el tiempo que se toma para llevar productos desde el concepto hasta la línea de producción. A través de la mejora de diseños de prototipos iniciales usando el análisis de elementos finitos se han acelerado, principalmente, las pruebas y el desarrollo. En resumen, los beneficios del análisis de elementos finitos son: una alta precisión, diseño mejorado, y una mejor percepción de los parámetros críticos de diseño, prototipos virtuales, menos prototipos de *hardware*, y ciclo de diseño más rápido y económico, alza en la productividad y en las ganancias (Gould, 1998).

Ingeniería asistida por computadora (CAE) y el FEA en la industria

La habilidad de modelar un sistema estructural en 3D puede proveer un poderoso y preciso análisis de casi cualquier estructura. Los modelos tridimensionales, en general, pueden ser producidos usando un rango de paquetes comunes de diseño asistido por computadora. Los modelos tienden a entrar en un rango amplio variando en complejidad y en formato de archivo, dependiendo del programa computacional (software) de creación del modelo en 3D y en la complejidad de la geometría del modelo (Hidalgo, 2005).

Ha habido muchas cosas que han restringido el desempeño y finalmente la aceptación y utilización de FEA en conjunción con el CAD en las etapas de diseño del producto y su desarrollo. Las separaciones en compatibilidad entre los formatos de archivos de programas de CAD y FEA limitaban el grado en que las compañías podían diseñar fácilmente y probar sus productos usando la combinación de CAD y FEA respectivamente. Típicamente, los ingenieros usan

software CAD especializado en el modelado en el diseño del producto, y después se exporta ese diseño a un paquete de FEA para ser el análisis.

Pero, esos ingenieros que dependen del intercambio de información a través de traductores o estándares de intercambio tales como IGES o STEP citan problemas ocasionales en la fiabilidad los cuales causan intercambios poco exitosos de geometría Así es que la creación de muchos modelos externos al ambiente de FEA se consideran como problemáticos en el éxito de análisis de elementos finitos. La tendencia actual en el software de FEA y la industria en ingeniería ha sido la creciente demanda por la integración entre el modelado sólido y el análisis de elementos finitos.

Durante el diseño y desarrollo de productos, los ingenieros requieren actualizaciones automáticas entre sus últimos modelos en los ambientes de CAD y FEA. Todavía hay una necesidad de mejorar la relación entre CAD y FEA, haciéndolo técnicamente más cercanos y unidos. Aunque la demanda de una integración CAD-FEA unida con las mejoras en los desarrollos de ordenadores y software ha introducido una tendencia más colaborativa y robusta donde los problemas de compatibilidad empiezan a ser eliminados. Los diseñadores están ahora introduciendo simulaciones en computadora capaces de usar archivos preexistentes de CAD sin la necesidad de modificar y recrear los modelos para acoplarse a los ambientes de FEA (Gould, 1998).

Uno de estos programas con análisis de elementos finitos integrado es SolidWorks de la compañía SolidWorks Corporation, que es una herramienta de diseño de medio rango que ofrece un nivel introductorio al programa de FEA llamado CosmoExpress. Entre los módulos más avanzados para SolidWorks está COSMOMotion que simula las colisiones cinemáticas de diversos cuerpos y maneja más avanzadas simulaciones lineales estáticas (2003).

1.3.4 Tendencias actuales de FEA en la industria

Modelado Dinámico

Hay una creciente demanda por modelado dinámico en FEA en la industria de vehículos pesados. Muchas compañías de vehículos pesados se están alejando del tradicional análisis estático y están haciendo uso de software de simulación dinámica. La simulación dinámica incluye la aplicación de FEA en un sentido más realista para tener en cuenta los efectos complicados de analizar varios componentes y ensamblajes con características reales.

Modelado de ensamblajes

La simulación dinámica, usada en conjunción con el modelado de ensamblajes, introduce la necesidad de unir componentes de distintos materiales y geometrías. Así que, las herramientas para la ingeniería asistida por computador deben tener capacidades comprensivas para utilizar fácilmente fiables conectores en los modelos, los cuales pueden incluir uniones que permiten movimiento relativo entre los componentes, remaches, y soldaduras.

Modelos típicos de MSS están compuestos de cuerpos rígidos (ruedas, ejes, cuadros, motores, cabina, y remolque) conectados por uniones ideales y elementos de fuerza. Las uniones y los eslabones pueden ser modelados como eslabones rígidos, resortes o amortiguadores para así simular las características dinámicas de los componentes de un camión real.

La transferencia de fuerza a través de los componentes de un ensamblaje por conducto de conectores, los hace susceptibles a esfuerzos altos. Es más sencillo y fácil el idealizar conectores como uniones rígidas en estos sistemas. Esta idealización provee un estudio básico del comportamiento del ensamblaje en términos de entender las características del sistema; los ingenieros deben modelar uniendo parámetros como lo son las piezas de enlace en forma precisa para cuando se realice el análisis de esfuerzos puedan determinarse posibles fallas.

"El representar conectores como uniones rígidas asume que los conectores transfieren las cargas a través de los componentes sin deformarse ni sin ellos pasar por estrés. Esta idealización no realista lleva a predicciones incorrectas de estrés en las regiones locales a los conectores, exactamente las cuales son los lugares donde más posiblemente la falla se iniciará." Comprensiblemente, la

inclusión detallada de cada punto de conexión y/o mecanismo en un ensamble es impráctico para ser modelado, Así es que representaciones mejoradas de conectores que son simples de usar y fiables deben ser investigados para su uso caso por caso. Técnicas actuales de modelado en la industria

Ingenieros en varias compañías automotrices actualmente moldean sus vehículos usando especializado software dinámico de FEA. Cada modelo contiene un cuerpo y chasis flexible, resortes, barras de rodaje, ejes cabina y suspensión del motor, el mecanismo de dirección y viraje y cualquier componente dependiente en la frecuencia como lo son las montas hechas de hule. Detalles adicionales como los frenos y fuerzas de un motor fuera de balance pueden ser incluidas en una forma dependiendo a "como se requiera".

La simulación dinámica de FEA permite que una variedad de maniobras sea probada con precisión. Pruebas como lo son cortando la esquina, volcado, cambio de línea en tránsito, vueltas en J, análisis de vibración, colisiones y frenado en línea pueden ser llevados a cabo en forma precisa utilizando la simulación dinámica en el análisis de elementos finitos.

Cargas con variables tiempo y no lineales permiten a los ingenieros hacer avanzados y realistas análisis de los elementos finitos, así permitiéndoles localizar las condiciones críticas y determinar características en el desempeño.

Como un resultado de las capacidades de prueba dinámica mejoradas, los ingenieros pueden determinar las características óptimas e ideales (*ultimate performance*) de desempeño del diseño del vehículo sin la necesidad de tomar riesgos físicos. Como un resultado de FEA dinámico, la necesidad de costosas pruebas destructivas se ha minorizado en gran forma (Gould, 1998).

CAPÍTULO 2. Elaboración de la tecnología de fabricación de cilindros de laminación

2.1 Aspectos generales sobre las tecnologías de fundición

Los cilindros o rodillos de laminación de función deben presentar una dureza más alta en su superficie y menor en el núcleo y el cuello del cilindro, adecuados a la resistencia mecánica y a la alta temperatura de trabajo. Si en la zona de la superficie de rodillo, la dureza se garantiza por las cementita existente en la estructura, el núcleo del cilindro debe tener grafito para asegurar la característica deseada. Uno de los parámetros, que determinan la estructura del material de los cilindros de laminación es su composición química, que garantiza las características de la explotación de cada cilindro en el laminador.

El empleo de las composiciones químicas de colada, óptimas, puede ser una manera técnicamente eficiente de asegurar las características de la explotación; el material de fabricación de los cilindros juega un papel importante. Aunque la fabricación de cilindros es objeto de una mejora continua, los requisitos de la máxima calidad de los cilindros no se cumplen totalmente, en muchos casos, lo que impide la obtención de la calidad que podría obtenerse si dicha calidad de los cilindros fuera la adecuada (Ángel, 1983).

2.1.1 Análisis previo de la pieza

El rodillo de laminación obtenido en Planta Mecánica está en el grupo de fundiciones grises el cual presenta un peso neto de 802 kg, y una longitud de 1.85cm lo que se considera una pieza larga en lo que respecta a fundiciones por colada. Este presenta una mayor dureza en la parte media de la pieza ya que es por donde estará el contacto con las altas temperatura en la vida útil. En cuanto a las condiciones de trabajo estará sometido a muy altas temperatura lo cual debe

presentar muy buenas propiedades mecánicas con el objetivo de lograr la mayor vida útil posible. Para obtener dicha pieza se debe tener en cuenta cada uno de los aspectos a tomar para lograr una fundición con todos los requerimientos de calidad (Alejandro, 1999).

Elección del método de moldeo.

Para poder saber si una pieza puede ser producida por fundición, se debe conocer que por este proceso es posible la producción de piezas, desde unos gramos hasta decenas de toneladas y de cualquier aleación; ahora bien el método de moldeo dependerá de la cantidad de piezas a producir.

Dentro de los métodos de moldeo tenemos lo siguiente:

A). Moldeo manual.

Se emplean en producciones unitarias y en pequeñas series de piezas fundidas de todas las aleaciones. La exactitud del método no es muy grande y el costo de producción es elevado en función de la cantidad de piezas.

B). Moldeo a máquina.

Se aplica en producciones en serie y en masa para todas las aleaciones las piezas son de gran complejidad y son de mayor exactitud en función con la exactitud del modelo.

Los cambios de diseño propuestos tienen que ser sobre la base de que la pieza no deje de ejercer la función para la cual fue diseñada y que lógicamente facilite el proceso de su obtención y en caso de no ser posible el cambio, el tecnólogo debe aplicar todos sus conocimientos para su obtención (N.D.Titov, 1981).

2.1.2 Determinación del plano divisor del molde y la plantilla

Conjuntamente con el análisis de la colocación de la pieza para el llenado se determina la línea de división del molde y la plantilla. El plano divisor se determina teniendo en cuenta las características de la pieza y el método de moldeo elegido (G.E.Belay, 1970).

Para determinar el plano divisor se tienen en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Debe asegurarse la fácil extracción de la plantilla.
- La cantidad de planos divisores debe ser mínima y preferiblemente recta.
- La cantidad de partes sueltas de la plantilla debe ser mínima y en las producciones seriadas se sustituyen estas por machos.
- La cantidad de machos debe ser mínima, sustituyendo a varias de ser posible.
- El plano divisor debe asegurar la uniformidad de moldeo, montaje de macho, pintado y control de las dimensiones del molde.
- Debe asegurar la salida fácil de los gases de la cavidad del molde (Alejandro, 1999).

2.1.3 Cálculo de los márgenes de fundición

Los márgenes de fundición se les llaman a una serie de criterios que se rigen para asegurar la obtención de la pieza fundida; dentro de los márgenes de fundición tenemos:

- Márgenes de maquinado.
- Márgenes de Indicación.
- Márgenes de contracción.
- Márgenes tecnológicos.

El margen de maquinado según la norma cubana 10-07 es el exceso de material que se adiciona a la superficie de las piezas fundidas, para llevarlas mediante el maquinado a su dimensión nominal o sea su dimensión de acabado.

El valor de la sobre medida de maquinado se establece teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Precisión de la producción y masividad.
- Confección de la plantilla.

- Dimensión básica.
- Dimensión determinada.
- Posición de la superficie durante el llenado

La precisión de la producción la establece la norma cubana en función de la calidad de producción, la precisión de la plantilla y se establecen 3 grados de precisión A, B, C.

El grado de presión "A" se aplica cuando el moldeo es mecánico y la plantilla es construida con desviación grado "A".

El grado de precisión "B" se aplica cuando el moldeo es mecánico y la plantilla es construida con desviación grado "B".

El grado de precisión "C" se aplica a la producción de las piezas fundidas moldeadas manualmente con plantilla de grado de precisión "C".

Dimensión Básica

Se establece como la máxima medida que tiene la pieza entre superficies paralelas maquinadas.

Dimensión Determinante

Se establece como la máxima dimensión contenida en el plano perpendicular a la dimensión básica.

Margen de contracción

Se conoce por contracción el cambio en las dimensiones que sufre la pieza durante la solidificación y enfriamiento de la pieza fundida.

La contracción como sabemos ocurre en tres etapas antes, durante y después de la solidificación, a los efectos de la tecnología del molde es importante la contracción que ocurre posterior a la solidificación pues a partir de este dato es que se construye el modelo adicionándole esta medida, esta contracción se conoce como contracción lineal y se determina por la fórmula:

$$\% C = \frac{l_m - l_b}{l_p} * 100 \quad 2.1$$

Donde:

%C = Contracción de fundición

l_m = Longitud del modelo

l_p = Longitud de la pieza fundida

Esta contracción para determinarla hay que tener en cuenta si durante el proceso de enfriamiento de la pieza, ya sea por los salientes o machos (corazones) o por la relación de espesores en diferentes partes de la pieza se produce el frenado de la contracción, una vez determinado en tablas se puede determinar después su valor para diferentes aleaciones.

Margen de Inclinación

Si en la pieza no existen inclinaciones que permiten la fácil extracción de la plantilla entonces debemos adicionarlos. La inclinación se le adiciona a la pieza en las paredes que sean perpendiculares al plano divisor.

La magnitud de la inclinación de salida según la norma cubana 10-08 se establece en función de la altura de la pared y de las características de la misma, así como del tipo de moldeo.

Margen Tecnológico.

Es un margen que se adiciona a la plantilla con el objetivo de facilitar la producción de la misma y que posteriormente se elimina durante la limpieza o durante el maquinado (Helio).

2.1.4 Proyección de machos.

Este punto no lo tratamos porque la pieza no requiere de machos.

2.1.5 Cálculo de las mazarotas

Las mazarotas se utilizan durante la elaboración de piezas fundidas estas son utilizadas para la alimentación de piezas en el período de solidificación, con el fin de compensar las contracciones del metal, y evitar la formación en las piezas de rechupes y porosidades.

Las mazarotas se colocan sobre las partes más densas, los nudos térmicos de las piezas, en las cuales, como resultado de una solidificación lenta, se forman los rechupes y se manifiesta una aguda porosidad. El elemento que más influye en el volumen de contracción en los aceros es el carbono el cual a medida que aumenta, hace mayor la contracción.

Teóricamente, la mazarota debe compensar la contracción volumétrica y contener metal líquido hasta la total solidificación de la pieza, o del nudo alimentado. En los cálculos teóricos de las mazarotas, se toma en cuenta este volumen mínimo de contracción de metal líquido. Las dimensiones reales de las mazarotas dependen de su colocación y tipo.

Elección del tipo y lugar de instalación de mazarota.

Al elegir el lugar donde deben colocarse las mazarotas, y establecer sus tipos, la cantidad, forma y dimensiones de estas, es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- Los rechupes se forman en los puntos de la pieza que se enfrían de último, como son, las partes más densas, los engrosamientos locales, los nudos, articulación de las paredes y también los puntos de las piezas de los que se dificulta la extracción de calor.
- Los rechupes tienden a formarse en la parte superior de la pieza.
- Las mazarotas que se colocan en la pieza realizan diferentes funciones entre ellas; actuar como reserva de metal líquido para las diferentes partes de la pieza hasta el fin de la solidificación, propiciar la evacuación de gases y recolectar las inclusiones no metálicas que penetran en el molde.

- Para una acción efectiva de la mazarota, es necesario garantizar el principio de solidificación dirigida, o sea, que la temperatura aumente en el sentido de la mazarota (el metal más caliente debe estar en la mazarota).
- Si la pieza posee varios nudos térmicos, separados por paredes finas, cada una de ellas debe tener su propia mazarota, sin embargo debe tratarse de alimentar con una mazarota el máximo de nudos posibles.

Para las piezas fundidas pequeñas y poco profundas de acero, el sistema de alimentación puede ser eliminado y el molde puede llenarse a través de una mazarota si la pieza fundida se llena usando una cuchara. En el caso de llenar el molde con una cuchara grande de vertido por el fondo, esto no puede hacerse debido a la alta velocidad de la corriente de metal. Debe tenerse en cuenta que las mazarotas hay que eliminarlas después de fundir las piezas (G.E.Belay, 1970).

Los resultados pueden verse en el anexo VIII b)

2.1.6 Cálculo del sistema de llenado

La pieza fundida se obtiene al llenar con metal fundido, la cavidad del molde para fundición, su enfriamiento en el molde y posterior endurecimiento. En el proceso de llenado, o colada, la masa fundida penetra en la cavidad del molde por los canales de colada. El sistema de canales por los cuales el metal llega al molde se llama de llenado.

El sistema de llenado se compone del embudo de colada, el bebedero, los canales y los ataques, por los cuales la masa fundida pasa al molde. Pertenece también al sistema de llenado el respiradero. Éste último sirve para la salida del aire y gases del molde y para controlar el llenado del molde. Después el metal se solidifica y se enfría, el molde se destruye, y la pieza fundida se saca de la arena de moldeo.

Un sistema de llenado correctamente construido debe asegurar un buen llenado del molde con la masa fundida y la alimentación de la pieza en el proceso de su solidificación, contribuir a la obtención de una pieza de dimensiones exactas, sin defectos superficiales (atascamientos, inclusiones de escoria y otros) y una

solidificación dirigida de la pieza, y además el gasto de metal para el sistema de ataques debe ser mínimo.

Al elegir el modo de suministrar el metal fundido al molde y diseñar la estructura del sistema de llenado, se debe tener en cuenta que el metal fundido debe llegar al molde suavemente, sin chocar con sus paredes ni con las de los machos, sin remolinos, con una velocidad de ascensión en el molde determinada, así como también asegurar una sucesiva expulsión del aire y gases del molde. Además, el modo de suministrar el metal fundido debe asegurar una solidificación dirigida de la pieza, teniendo en cuenta su estructura y las propiedades de la masa fundida.

La forma más clásica de obtener un cilindro de laminación se puede apreciar en el anexo VII.

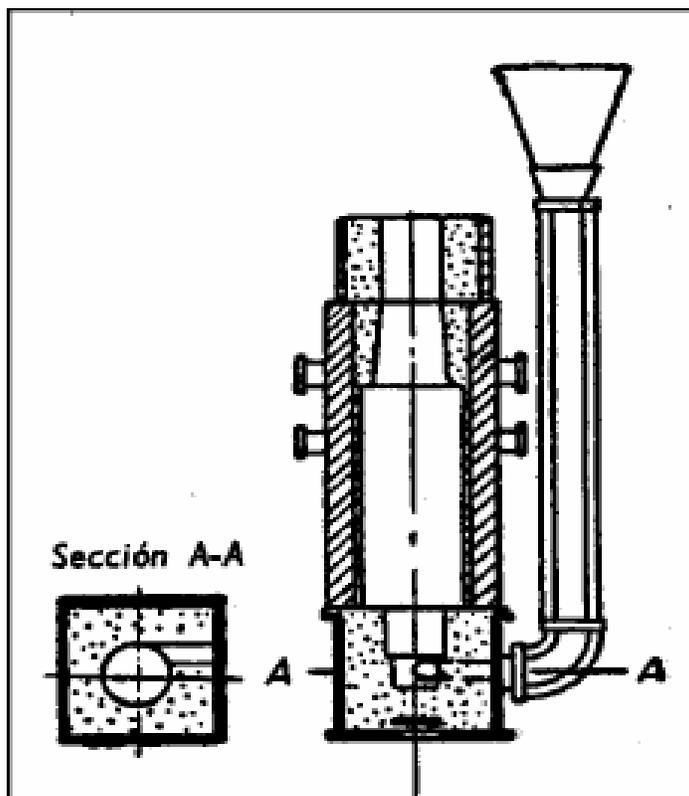


Figura 2.1: Vista transversal de la caja de moldeo con su sistema de alimentación.

Como se puede apreciar el llenado se realiza por la parte inferior de la pieza.

Elección del tipo de mezcla

En la actualidad entre las mezclas más usadas en la producción de moldes y machos se encuentran las del tipo autofraguante. Ello obedece en primer término a razones de costos y por otro lado, a las cada vez más rigurosas regulaciones medioambientales pues, en estos casos los procesos de endurecimiento ocurren a temperatura ambiente, sin la necesidad de calor.

Entre las mezclas autofraguantes para machos, se estima que de ellas, las que emplean el proceso silicato-CO₂ representan alrededor del 80 %. Ello se debe a que el proceso silicato de sodio-CO₂ permite obtener machos rígidos, de dimensiones precisas y capaces de cumplir los requisitos de especificaciones más exigentes y tolerancias cada vez más estrechas. Esto, unido a la economía, limpieza, flexibilidad general inherente a este proceso y su reconocida compatibilidad con el medio ambiente, le han permitido trascender hasta nuestros días.

Sin embargo, el proceso silicato-CO₂ presenta como principal inconveniente su reconocida mala desmoldeabilidad, o sea, el alto trabajo de desmoldeo que se requiere realizar para separar los moldes y machos de las piezas fundidas. Se sabe que esto provocó el desuso de estas mezclas y su sustitución por otras que usan diferentes procesos en base a resinas. Sin embargo, los elevados costos de estos aglutinantes y su alta toxicidad entre otras razones motivaron el resurgimiento del silicato de sodio como aglutinante. Además, se conoce que la desmoldeabilidad de las mezclas.

Con silicato de sodio puede ser mejorada significativamente con el empleo de aditivos desarenantes. Entre los más usados se encuentran el azúcar de caña, la melaza y sustancias carbonosas.

Se ha demostrado que el principal inconveniente de los aditivos azucarados es su alta higroscopicidad, es decir, su alta capacidad para absorber la humedad medioambiental, lo cual aumenta la cantidad de gases que se generan durante el vertido del metal líquido en los moldes y eleva significativamente la probabilidad de aparición de sopladuras y porosidades en las piezas fundidas.

Para el caso de los cilindros de laminación producidos en Planta Mecánica se decide usar la mezcla con denominación MCE-4 cuyas características se muestran en la tabla 2.1.

Uso de la mezcla	Moldeo de piezas de acero	
	Moldeo de piezas de gran tonelaje (hasta 15 T)	
Propiedades	Humedad en verde	2-3.5 %
	Permeabilidad en verde	≥80
	Resistente a la compresión en verde	≥0.04 kg/cm ²
	Resistente a la compresión en seco	≥7 kg/cm ²
	Resistente a la tracción en seco	≥2.5 kg/cm ²
Componentes de la mezcla	Arena de Cromita	95%
	Hidróxido de Sodio	Se usa si el modulo del silicato es mayor que 2.3
	Silicato de Sodio	5%
Instrucciones para la preparación	Si contiene NaOH se mezcla este con la arena durante 0.5 min y luego con el silicato y se mezclan por 2 min	
Tiempo de permanencia	Conservada con sacos húmedos 16 h	
	En los moldes 5 días	

Tabla 2.1: Propiedades de la mezcla usada en la obtención del cilindro.

2.2 Tecnología de fundición del rodillo de laminación

PESO BRUTO PARA 4 PIEZAS	3920kg
PESO BRUTO PARA 1 PIEZA	970kg

PESO ACABADO		802 Kg.	
CONTRACCIÓN		1%	
TEMP. DE VERTIDO		1280-1240°C	
TIEMPO DE VERTIDO		29seg	
TIEMPO DE DESMOLDEO		24 horas	
TIEMPO DE PERMANENCIA		24 horas	
DIAMETRO DE LA BOQUILLA		450mm	
% DE EFIC. TECNOLÓGICA		83%	
CAP. DE LA CUCHARA		6 ton	
PINTURA PARA EL MOLDE		1.5 Litros	
PINTURA PARA LA COQUILLA		1.8 Litros	
DIMENSION DE LAS CAJAS (VER DOCUMENTACIÓN)			
MEZCLAS DEL MOLDE	MEZCLA DE CARA		MEZCLA SISTEMA DE ALIMENTACIÓN
	DENOM	KGS	DENOM KGS
	MCE-4	360	MCE-4 150
			CARRETES 14u

Tabla 2.2: Datos de la tecnología de fundición del rodillo terminado.

Márgenes de maquinado

Diámetro	Inferior	Superior	Altura
Margen de Maquinado	10mm	15mm	15mm

Para aplicar mazarota con recubrimiento de mezcla seca se toma.

$$Hm = q \cdot dt + 0.12 \cdot Lt$$

2.2

q – coeficiente dependiente de la resistencia

Térmica del molde (en coquilla pintada $q=0.8$)

dt=diámetro del tambor

Lt=largo del tambor

$$Hm = 0.8 (230) + 0.12 (1940) = 413\text{mm}$$

Tomamos una mazarota de 420mm

$$Dm = \text{Diámetro superior del rodillo} \cdot 1.1$$

$$Dm = 253\text{mm se toma } 260\text{mm}$$

Diámetro de la Mazarota	Altura de la Mazarota
260mm	413mm

Del manual de rodillos se establece que

Para rodillos pequeños y medianos. Espesor=120-180mm

Para rodillos grandes. Espesor=180-260mm

$$E = 0.18Dt + \Delta H$$

2.3

Donde D_t es el diámetro del tambor

$\Delta H = 80 - 120$ (Margen de la profundidad de transición)

$E = 0.18 \cdot 326 + 100$ Se toma $\Delta H = 100$ mm

$E = 158.68$ mm

Se toma un espesor promedio de 180 mm para la coquilla.

Material de la coquilla	Espesor
Fg18	158.68 mm

Materiales empleados

Molde inferior, mezclas elaboradas con arena de cromita con silicato endurecida con CO_2 . Pintada con pintura base de cromita.

Molde superior, mezclas elaboradas con arena de sílice con silicato endurecidas con CO_2 . Pintada con pintura de circonio.

Sistema de alimentación

Los alimentadores fueron elaborados en la base conformada con ladrillos de chamota. El tragadero fue elaborado con carretes realizados de arena de cromita con silicatos endurecidos con CO_2 .

Para las mazarotas se utilizó mezclas con arena sílice con silicato endurecido con CO_2 .

Se recomienda flamear el molde después de confeccionado y pintado para disminuir humedad.

Temperatura de la coquilla

La coquilla es precalentada con tratamiento térmico en el horno a una temperatura a $200^\circ C$. Se pinta la coquilla con una pintura base de melaza, bentonita y grafito negro.

En el momento de vertido la coquilla tiene una temperatura de 130 a 150 °C (G.E.Belay, 1970).

CAPÍTULO 3. Simulación del enfriamiento de una pieza.

En cualquier aleación, la solidificación envuelve a un conjunto de fenómenos físico-químicos dentro de los subsistemas: molde, sólido, zona pastosa, y líquido, presentados en la figura 3.1 [1-3]. En esta figura, se esquematiza el desarrollo de la solidificación unidireccional, desde la derecha hacia la izquierda, de una masa líquida donde se visualiza la presencia de varias intercaras. Esas intercaras separan los subsistemas: molde-sólido, sólido-región bifásica conocida como zona pastosa, y región bifásico-líquida. La zona pastosa que es una interfase, es importante de ser estudiada, porque en su interior se da origen a absolutamente todas las características microestructurales de vaciado y a la creación de la mayoría de los defectos, que en conjunto fuertemente tienen influencia sobre las propiedades de servicio de los productos solidificados. Cada uno de esos subsistemas tiene características muy particulares, y como se aprecia en la figura 3.1, están separadas del adyacente mediante una interfaz. Es de esperarse que, obviamente esas características particulares deban tener influencia sobre la naturaleza de esa interfaz.

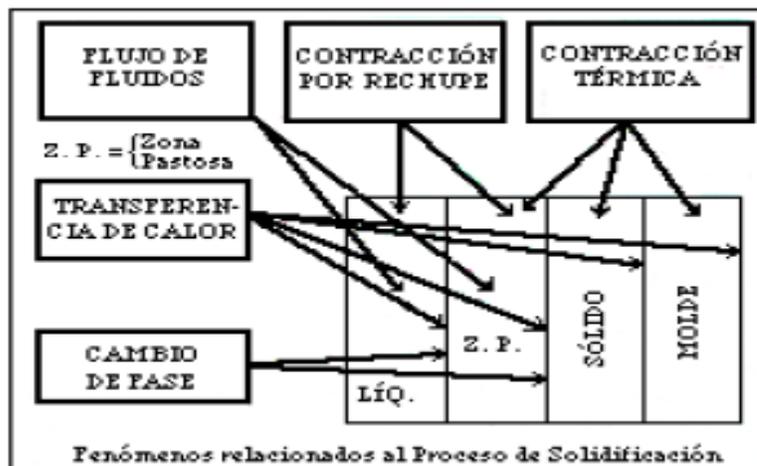


Figura 3.1: Eventos que suceden durante la solidificación de aleaciones.

De la descripción anterior se deduce que la predicción numérica de la microestructura generada durante la solidificación, es extremadamente compleja. Para poder predecirla es necesario disponer de facilidades computacionales que simultáneamente permitan resolver todo un conjunto de ecuaciones diferenciales que, bajo específicas condiciones de borde, matemáticamente describan dichos fenómenos físico-químicos. Para ello, se requiere adquirir software extremadamente costoso e inalcanzable para nuestros recursos económicos (Quintero Sayago, 2008).

3.1 Introducción al uso de los MEF en la Industria Metalúrgica

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Este se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito

puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla».

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos (Hidalgo, 2005).

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para, en algunos de los casos calcular la temperatura y el flujo de calor en problemas térmicos, a través de ecuaciones diferenciales no lineales. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones (Gould, 1998).

3.2 Consideraciones sobre el uso del software ProCAST como herramienta de simulación

ProCAST es una suite para simulación de procesos de fundición 3D basado en análisis por el método de elementos finitos además es un programa de cómputo para simular procesos de fundición y analizar su comportamiento en la solidificación del flujo térmico y del comportamiento metalúrgico, puede ser usado en fundición por presión, gravedad, con machos de arena, colada continua, cera perdida, etc.

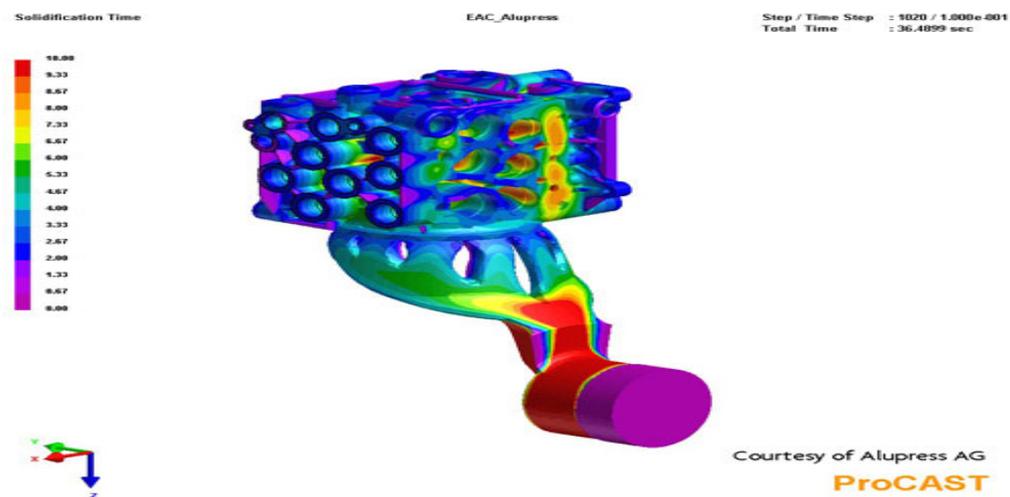


Figura 3.2: Imagen resultante de la utilización del ProCAST y su postprocesador.

(Fuente: <http://www.3dcadportal.com/procast.html>)

ProCAST incluye un lector de geometría CAD, manipulación, librería de materiales, mallado con un algoritmo tetraédrico. Además un solver térmico para predecir flujo dentro del molde con lo que se puede estimar gases, turbulencia y erosión del molde de arena, oxidación, etc. Así como un sorber para concentración de esfuerzos para estimar comportamientos mecánicos, fatiga, etc.

Ofrece una solución completa para todo tipo de procesos incluyendo fundición continua y semicontinua, es posible estimar condiciones de inicio y final del proceso, así como sus condiciones en estado normal. Se puede determinar la temperatura en cualquier instante del proceso y encontrar las zonas frías para

poder hacer mejores predicciones incluyendo llenado, solidificación, diseño de molde.

La porosidad se forma durante la solidificación, la cual depende de las condiciones de llenado y de transferencia térmica. Así, para obtener una buena predicción de porosidad, es necesario tener una buena modelización numérica del llenado y de la historia térmica.

ProCAST, un líder en software de solidificación basado en Elementos Finitos, posee el método más apropiado para capturar los detalles finos y las paredes estrechas que son comunes en los moldes de fundición. La figura 3.3 muestra la distribución de temperaturas en un molde de fundición a alta presión. Los ciclos también se tienen en cuenta como se muestra en la figura 3.4, para obtener una distribución de temperaturas exactas en el molde. La figura 3.5 muestra una secuencia del llenado. Debido a que el cálculo del flujo de calor está totalmente acoplado con el de flujo, es posible predecir zonas de solidificación prematura, así como cortes por flujo frío o zonas sin llenar.

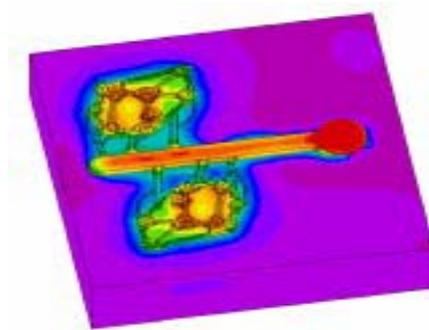


Figura 3.3: Distribución de las temperaturas en una pieza y en el molde inferior.
Inyección a alta presión.

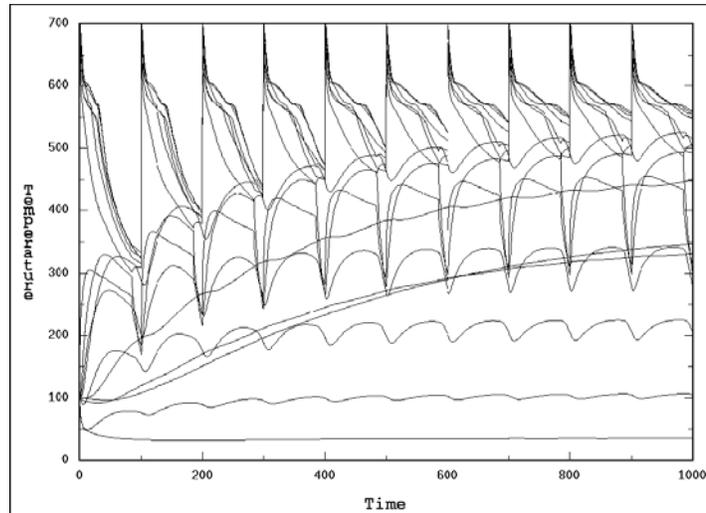


Figura 3.4: Evolución de la temperatura en la pieza y en el molde durante varios ciclos. Se puede apreciar cómo se alcanza la estabilización del molde y como el tiempo de solidificación es influenciado por el calentamiento del molde.

3.2.1- Modelizado de la porosidad

La porosidad se forma durante la solidificación como resultado de la contracción del sólido (debido a las diferencias de densidades) y a los gases disueltos en el líquido.

Para hacer una buena modelización de la porosidad, hay que tener en cuenta la caída de presión en la zona pastosa, la segregación de gases (ej.: hidrógeno en aleaciones de aluminio) durante la solidificación, el límite de solubilidad de los gases en función de la segregación de los componentes de la aleación, además de la nucleización y la física del crecimiento de los poros.

Revisando la literatura científica reciente en este campo, uno puede apreciar que no existe un modelo matemático hoy en día que englobe completamente toda la física que gobierna el problema de la predicción cuantitativa de la micro porosidad. Así, nos debemos apoyar en criterios o simplificaciones aproximadas.

El criterio más simple es estudiar la evolución de la zona pastosa durante la solidificación. La fig.4 muestra, en dos instantes diferentes, el líquido que permanece sin solidificar en la pieza que el material solidificado ha quedado

transparente. Se pueden apreciar las bolsas de material líquido aislado donde se puede producir el fenómeno de porosidad.

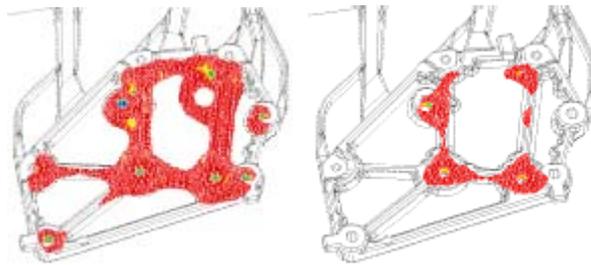


Figura 3.5: Visualización de la fracción de líquido en dos instantes diferentes. Para ver las bolsas de líquido, el metal con una fracción solidificada por encima del 30% se ha mantenido transparente.

Para tener una respuesta más cuantitativa, se tienen que usar criterios y modelos matemáticos más avanzados. El conocido “Criterio de Niyama”, está implementado en ProCAST, además, el propio usuario puede definir sus propios criterios por sí mismo. Adicionalmente, ProCAST tiene implementado un modelo matemático avanzado para la predicción de porosidad teniendo en cuenta la densidad como función de la temperatura. Este modelo “PoroS”, permite tener una visualización en términos de cantidad de la porosidad.

La figura 3.6 muestra los resultados del análisis utilizando del modelo “PoroS”. Así es posible en un vistazo tener una idea de la ubicación de la porosidad, y si está localizada o no en un punto crítico de la pieza. Además del resultado de la función PoroS, es posible identificar por qué se ha formado la porosidad y cómo se puede solucionar el problema, mediante el estudio de la evolución de la fracción de sólido (es decir, la evolución de la solidificación)., ver figura 3.5. Si el molde no está correctamente diseñado, se pueden ver las bolsas de aire atrapado que pueden producir problemas de porosidad de otra naturaleza. Aunque las causas y la forma de este defecto son completamente diferentes de las producidas por la porosidad tradicional, (normalmente no se llama porosidad), también tiene una gran importancia para la calidad final de las piezas.

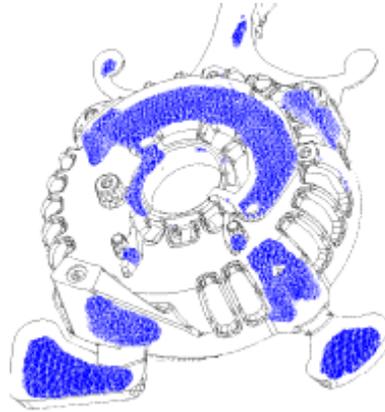


Figura 3.6: Visualización del resultado de PoroS. Se muestran en azul las zonas de probable aparición de microporosidad

ProCAST tiene un modelo matemático incluido para la simulación del aire atrapado. El usuario puede situar fácilmente sobre el modelo FEM los puntos de salida de aire (vientos), y así el software tiene en cuenta el escape de aire que se produce durante el llenado del molde. Cuando un punto de salida de aire es cubierto por el metal, se desactiva automáticamente y el aire tiene que escapar por otras salidas (si existen). Esto puede llevar a aumentos de presión en el aire y a una contrapresión en el líquido, que afectará a la forma de llenado. Este modelo es especialmente útil para la optimización de sistemas de llenado en vacío. La figura 3.7 muestra los resultados de la simulación del aire atrapado. La figura 3.7a muestra un molde llenado al vacío, mientras que la figura 3.7b muestra el mismo molde llenado con aire y sin salidas de (vientos). Se pueden apreciar claramente las bolsas de aire así como la contrapresión producida en el líquido.

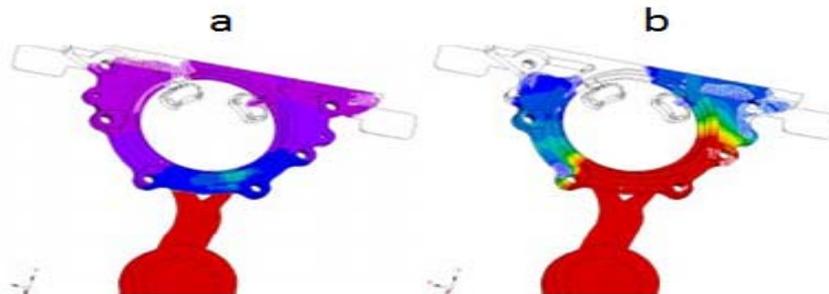


Figura 3.7: Simulación de aire atrapado. Arriba (a) el llenado se ha realizado en vacío. A la derecha (b) la cavidad se ha llenado con aire en el interior y las salidas de

aire no están bien situadas. Los colores muestran la presión en el metal (rojo=presión más alta). Se puede apreciar claramente el efecto de los vientos y de la contrapresión en la superficie libre del líquido. Se muestran las bolsas de aire atrapado.

Por tanto con ProCAST aunque se utilicen modelos simplificados, es posible obtener resultados de gran valor para la predicción de porosidad, se debe observar el hecho de que una buena simulación del llenado y solidificación son fundamentales para obtener una buena predicción de la porosidad (Gould, 1998).

Materiales	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg °C)	Conductividad térmica (J/s m °C)	Entalpía (J/kg)
Arena	1500	830	0.655	
Coquilla	7200	510	0.6789	
Metal fundido	7200		Anexo XII	Anexo XII

Tabla 3.1: Datos utilizados para la corrida del programa

Los principales resultados se pueden ver en el anexo IX

3.3-Análisis económico

3.3.1- Costo de las herramientas y materias primas a utilizar

Herramientas	Cantidad	Precio (\$)
Cajas para las partes cilíndricas	2	740.80
Caja para mazarota	1	183.20
Coquilla	1	43.68
Base	1	86.40

Tabla 3.2: Ficha de costo de las herramientas a utilizar.

Descripción	Unidad de medida	Precio en MN	Precio en CUC
Arena Sílice	ton	12.62	16.93
Arena Cromita	ton	66.02	1132.82
Miel final (Melaza)	T/M	-	75.35
Silicato de Sodio	ton	315.01	70.78
Grafito en Polvo	T/M	-	515.72
Chatarra de hierro	ton	30.00	30.00
Gas carbónico líquido CO2	T/M	142.97	146.72

Tabla 3.2: Ficha de costo de la materia prima a utilizar.

CONCLUSIONES

1. Se realizó una detallada revisión bibliográfica sobre las técnicas de fabricación de cilindros de laminación donde se pudo constatar el desarrollo paulatino de las técnicas de fabricación de los rodillos.
2. Teniendo en cuenta las condiciones de Planta Mecánica se propuso una nueva tecnología de fundición la cual presenta un detallado análisis sobre cada uno de los aspectos que se tienen en cuenta para una tecnología de fundición.
3. En cuanto a las técnicas de simulación de llenado así como lo referente a simulaciones por elementos finitos se realizó una detallada revisión bibliográfica notando el gran desarrollo y utilización del software ProCAST en este tipo de técnicas en la industria actual.
4. Los resultados que se aprecian en la simulación del enfriamiento destacan la validez de la tecnología propuesta.

RECOMENDACIONES

- 1 Seguir con el estudio de la aplicación de los MEF y la simulación en el campo de la Industria Metalúrgica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2002. *Introducción al método de elementos finitos* [Online]. Available: <http://www.urbana.mie.uc.edu/yliu> [Accessed 14 junio de 2016].
2003. Metal cutting machine tool and equipment. *AWS*, 2-86.
- ALEJANDRO, G. C. R. L. I. 1999. "Fundición parte III. Tecnología del molde", Méjico.
- ÁNGEL, G. C. R. G. R. 1983. "Guía para proyecto de curso en tecnología de fundición" III. Las villas.
- BILMES, P. 2000. El análisis y prevención de fallas metalúrgicas en la ingeniería de los materiales. *In: HABANA, M. D. I. T. C. I. T. M. C. (ed.)*.
- CABALLERO, M. R. G. 2003. Producciones de aleaciones fundidas. *UCLV*.
- DELANNAY, L., DOGHRI, I., LANI, F., T. VAN ROMPAEY, JACQUES, P. J., T. PARDOEN 2004. Multiscale constitutive model for the simulation of forming operations on TRIP-assisted multiphase steel. *Proceedings ESAFORM. Conference. Trondheim*.
- E.A., B. 2002. "Análisis de elementos finitos del flujo de calor en la soldadura por arco de una simple pasada". *Welding Journal*, 121-s...125-s.
- FERNÁNDEZ A.A. 2000. Práctica y problemas de siderurgia. *Fundación Luis Fernando Velasco*, 172.
- G.E.BELAY 1970. Guía tecnológica de fundición. Facultad de Tecnología: Universidad Central de Las Villas.
- GOULD, L. S. 1998. *El Estudio de Fragmentos más pequeños por Elementos Finitos (FEA) conduce a la Optimización de Piezas*. [Online]. Available: <http://www.LSGould.com>.
- HEINRICH SCHRÖDER, K. 2003. *Descripción básica de los fundamentos mecánicos de los cilindros de laminación*.
- HELIO, G. P. L. M. R. "Tecnología de la fundición II". Editora ISPAJED.
- HIDALGO, B. M. 2005. *Estantería 3D mallada con elementos BEAM, SHELL y TRUSS*.

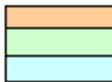
- N.D.TITOV, Y. S. 1981. Tecnología del proceso de fundición. *Editorial Mir* Moscú: Impreso en la URSS.
- O, Q. 1998. Principios de la Tecnología de Fundición. *In: FUNDICIÓN, M.-. (ed.). Dpto. Ciencia de los Materiales, Material de apoyo en docencia de la asignatura: Caracas (Venezuela): Universidad Simón Bolívar.*
- QUINTERO SAYAGO, O. D., P 2008. Evaluación microestructural de solidificación usando perfiles numéricos T vs t. X Congreso iberoamericano de metalurgia y materiales IBEROMETCartagena de Indias (Colombia).
- R, A. 2005. “*Método de elemetos finitos para diseño mecánico*”. “*Elementos Finitos en Estática*” [Online]. Available: <http://www.iberisa.com/libros.htm#FEM/FEA>.
- R.D, C. 1989. Concepts and applications of finite element analysis. *John Wiley*, 630.
- RAMOS MORALES, F., DUFFUS SCOTT, A., RODRÍGUEZ PÉREZ, M., DÍAZ CEDRÉ, E., POZO MOREJÓN, J. & ORIA., J. M. 2007. Modelo de elementos finitos para determinar el campo de temperatura en una costura de filete

Anexos

Anexo I

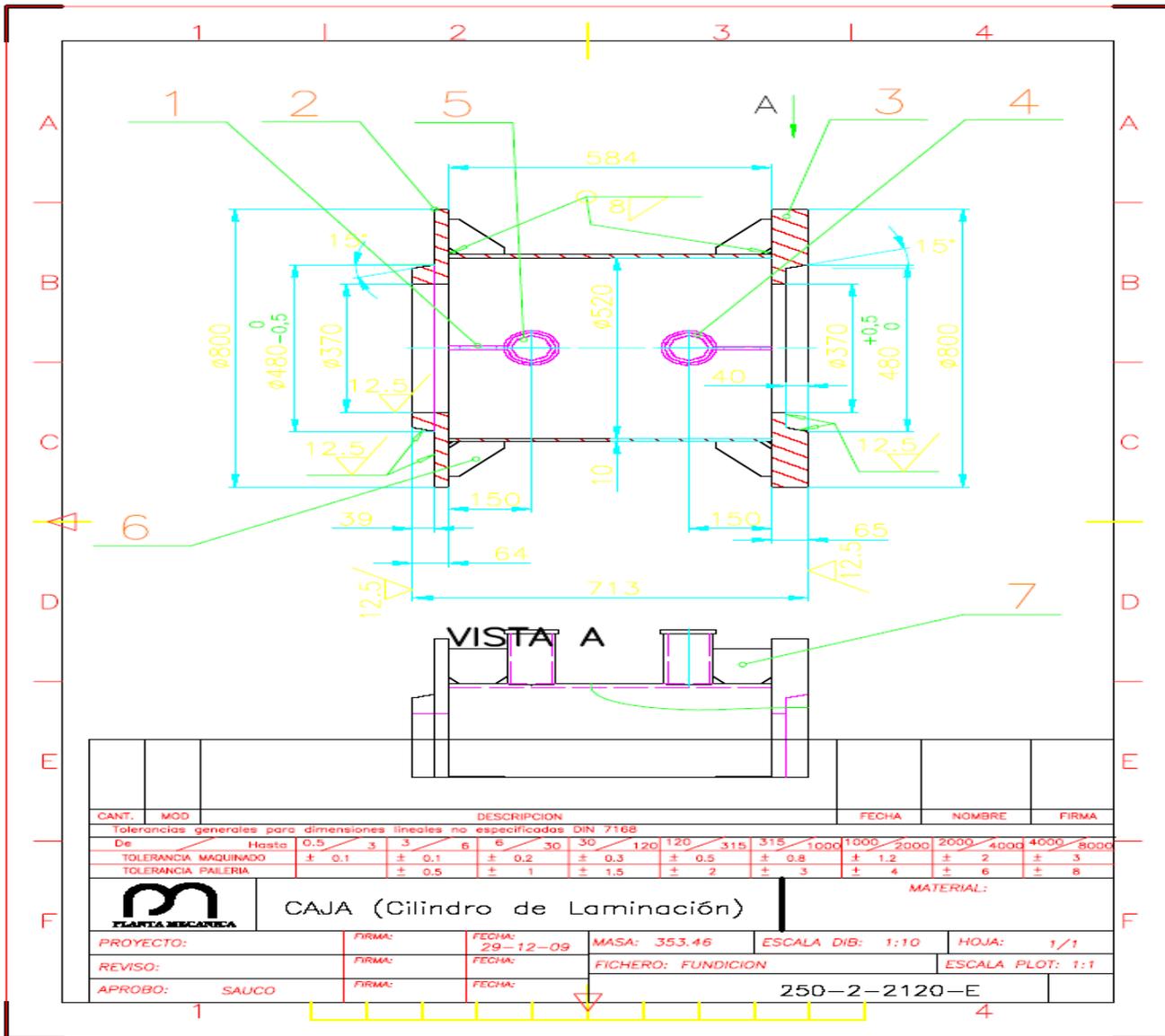
Tabla 1.1: Materiales utilizados en cilindros de trenes de laminación

Cerámicos	2000	---	Si ₃ N ₄	---	---	---	---	---	Otros	Camisas	?	¿Diámetro máximo?
Carburo sinterizado	1970	8-15	---	5-15 (Co)	---	---	---	---	Otros	Camisas	2-5	Diámetro máximo: 450
Antiguos grados de fundición gris (ligeramente duro/semi-duro)	1850	1-3	<3	---	---	---	---	250-450	C	M	0	Productos largos
Fundición nodular	1960	3-6	---	---	---	---	---	280-500	C	M	3-4	
Fundición con alto contenido en cromo	1965	14-22	?	<0,5	20-30	---	---	500-700	C (y otros)	C (M)	8-9	Cilindros de trabajo en trenes de lam. en caliente
ICDP, carburo mejorado	1995	6-9	1-4	30-40	---	---	---	600-700	C	C	7-8 (10)	Cilindros de trabajo en trenes de lam. en caliente, trenes de chapa, ST
ICDP	1930	2-10	---	30-40	---	---	---	600-900	C	C	7-8	
GHM ("Carburo fundido")	2000	2-10	30	30-40	---	---	---	600-900	C	M	?	?
CC (Fundición templada)	1870	---	---	40-50	---	---	---	500-650	C	M	1	Trenes de chapa (prácticamente obsoletos), camisas de pequeño diámetro
Fundición de acero grafitico	1950	0,8-2,0	2-5	?	5-15	✓	---	300-450	C ((F))	M (C)	2-3	Trenes de perfiles pesados, desbastadores en TBC, pr. largos
Acero alto en cromo	1980	1-22	8-12	<0,5	?	10-20	---	500-700	C	C	4-7	Cilindros de trabajo en TBC, desbastadores, F1, F2
HSS (acero rápido)	1990	0,4-0,8	<6	8-15	?	---	---	600-750	C, F, otros	C(M)	?	Cilindros de trabajo en TBC, productos largos, trenes de alambón
Adamite (acero hipereutectoide)	1920	0,4-1,0	<4	<0,5	6-15	---	---	300-450	C ((F))	M	4	Productos largos
Semi-HSS	1995	0,3-1,0	5-8	5-10	2-5	---	---	500-700	C (F)	C	3	Desbastadores en TBC, F1, F2, ? Rompedora, ?? Universal
Acero hipoeutectoide	1870	0,4-1,0	1-6	<0,5	0-2	---	---	180-700	F/C	M/C	10	Cil. trabajo, CSM; cilindros de apoyo para TBC/CSM; cajas rompedoras, ...
Material	Utilizado desde	C (%)	Si (%)	Σ (Cr, Mn, Mo, Ni, Co) (%)	Σ (V, W, Ti, Nb) (%)	Carburos (%)	Grafito (%)	Dureza de la tabla (HV)	Forjado (F), Colado (C)	Monocladada (M) Colada compuesta (C)	Peso en el mercado/consumo (de 0 a 10, máximo: 10)	



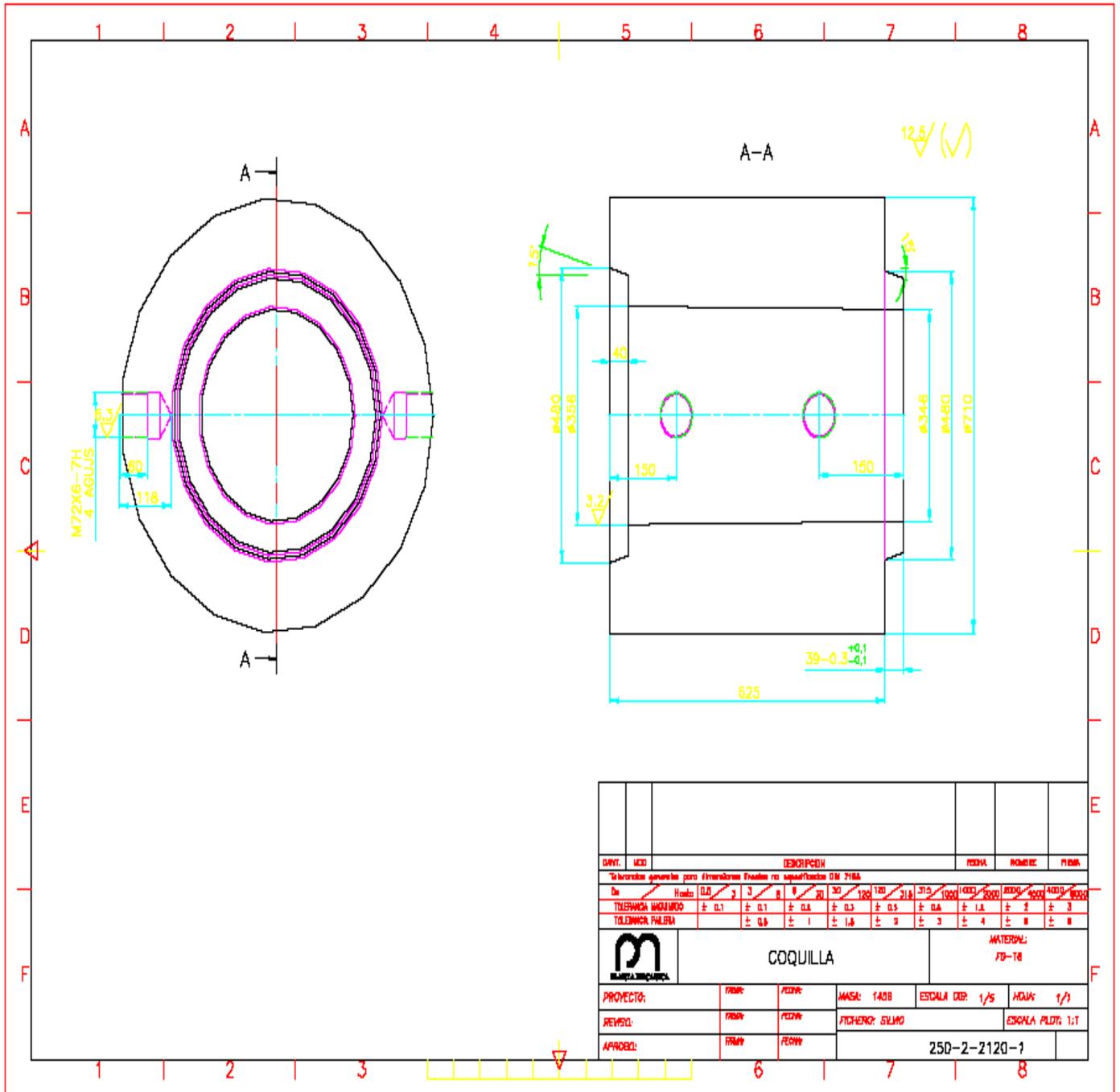
CILINDROS DE TRABAJO PARA TRENES DE LAMINACIÓN EN CALIENTE (BANDA Y CHAAPA)
 CILINDROS PARA PRODUCTOS LARGOS
 MATERIALES NUEVOS DESARROLLADOS RECIENTEMENTE

Anexo III Caja del molde (Cilindro de Laminación)

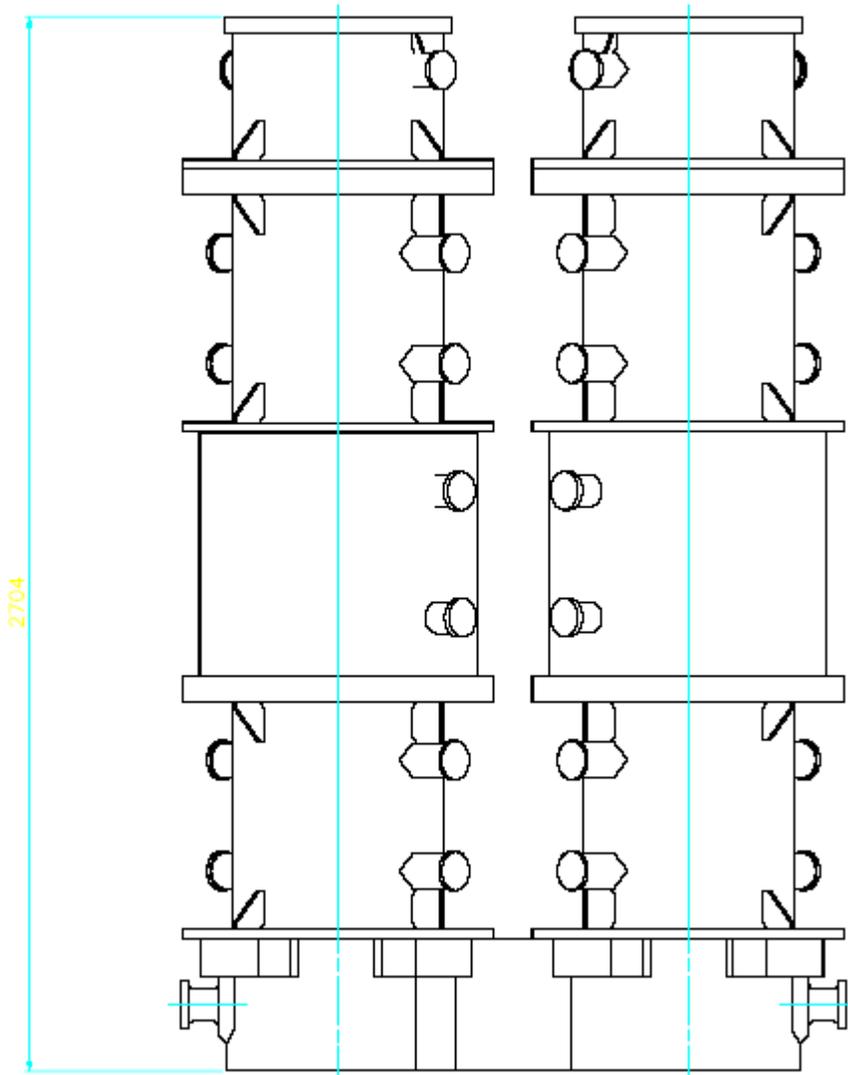


FOR.	POS.	COD/NORMA	ESPECIFICACION TECNICA	ELABORÓ: SAUCO	FIRMA:	FECHA:	M.n.u.	M.n.t.	M.b.u.	M.b.t.	OBSERVACION
A4		250-2-2120-E	CAJA	0				0.000			
				0				0.000			
				0				0.000			
A4	1	250-2-2120-1	TUBO	1 TUBO 540X10			73.940	73.940			
A4	2	250-2-2120-2	BRIDA	1 AISI 1020			103.300	103.300			
A4	3	250-2-2120-3	BRIDA	1 AISI 1020			176.200	176.200			
A4	4	250-2-2120-4	MURÓN	4 TUBO 89x16 AISI1020			2.340	9.360			
A4	5	250-2-2120-5	DISCO	4 A36			0.600	2.400			
A4	6	250-2-2120-6	CARTABON-2	4 AISI1020			0.500	2.000			
A4	7	250-2-2120-7	CARTABON-1	4 AISI1020			0.800	3.200			
							357.680	370.400	0.000	0.000	

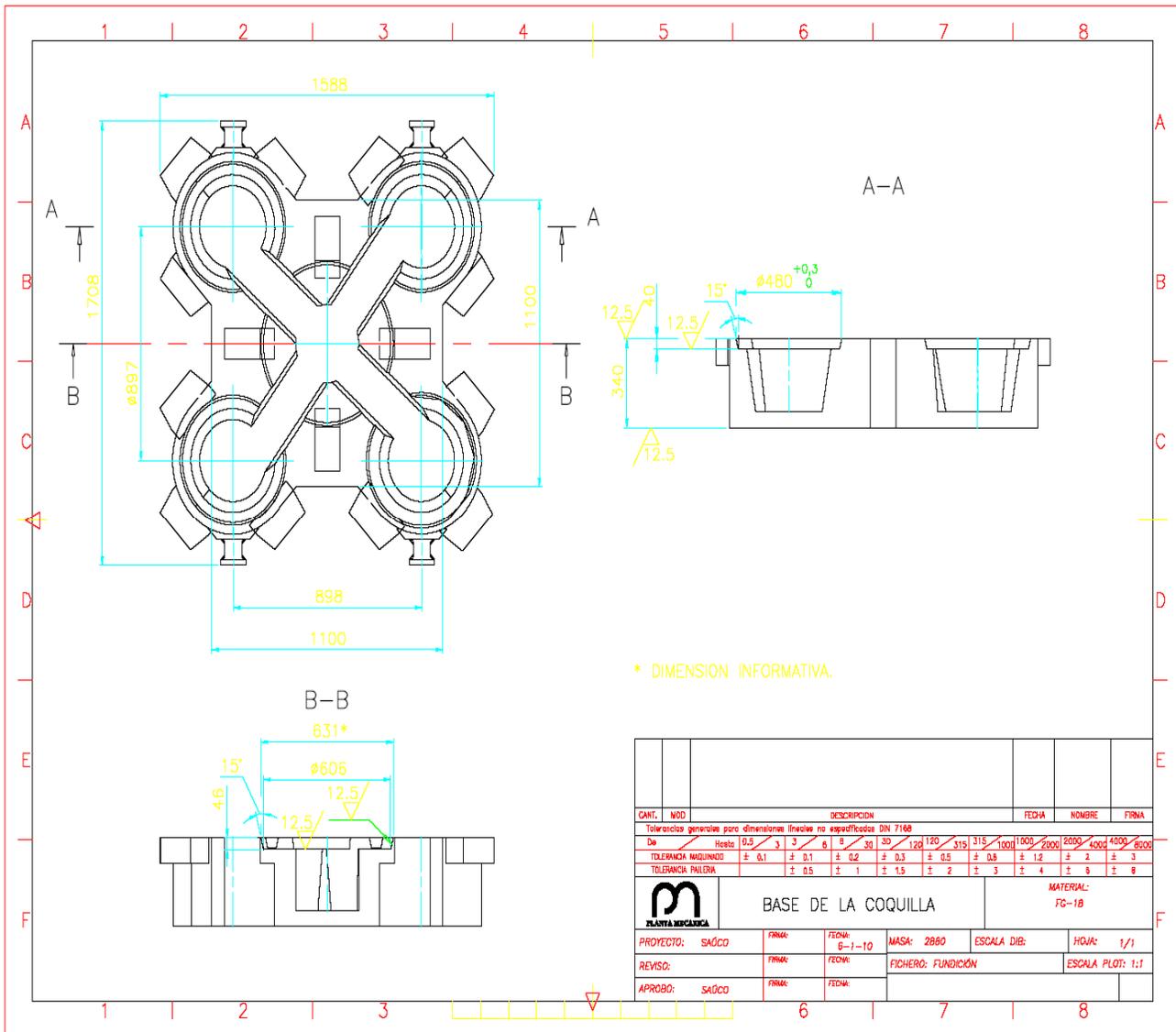
Anexo IV Dimensiones de la coquilla



Anexo V Montaje de cajas y la base

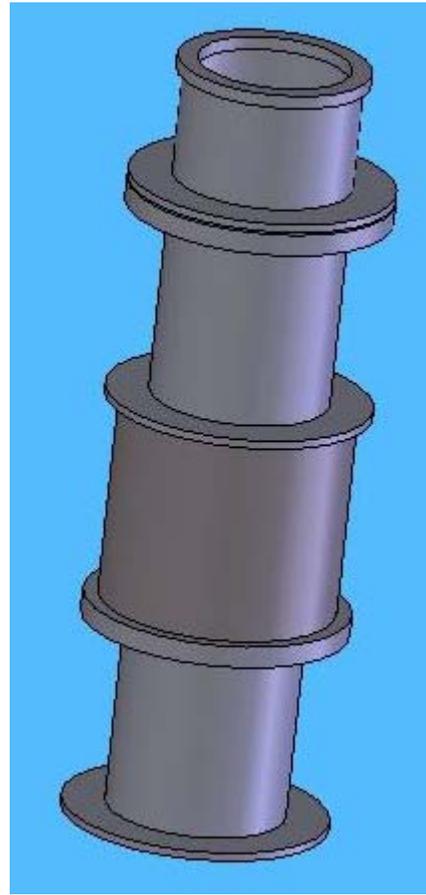
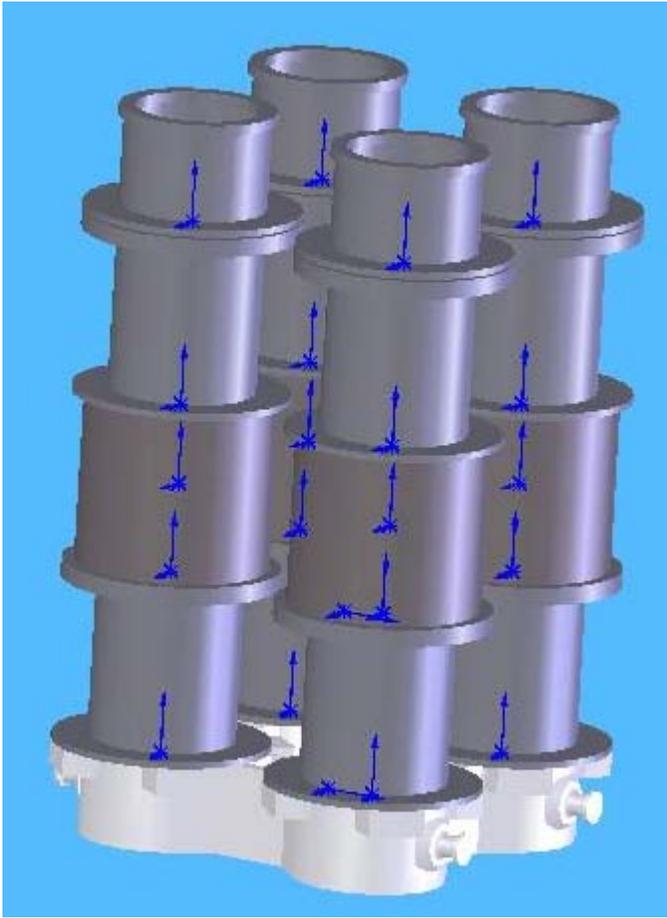


Anexo VI Base del montaje



CANT.	WDD	DESCRIPCION	FECHA	NOMBRE	FINA							
Tolerancias generales para dimensiones lineales no espaldkadas DIN 7168												
Da	Hacha	0,5	3	6	30	120	150	315	1000	2000	4000	8000
TOLERANCIA MAQUINADO		± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 5	± 8
TOLERANCIA PALERA		± 0,5	± 1	± 1,5	± 2	± 3	± 4	± 6	± 10	± 15	± 25	± 40
M		BASE DE LA COQUILLA				MATERIAL: FG-18						
PROYECTO:	SAÚCO	FINAC:	FECHA: 6-1-10	MASA:	2880	ESCALA DIB:	HOJA:	1/1				
REVISO:		FINAC:	FECHA:	FICHERO:	FUNDICIÓN	ESCALA PLOT:	1:1					
APROBO:	SAÚCO	FINAC:	FECHA:									

Anexo VII Vista en 3-D del montaje de las cajas en la base y de un solo montaje



Anexo VIII Resultados de una fundición



a) Cilindros obtenidos



b) Mazarota



c) Zona de trabajo del cilindro. Notar la baja calidad de la superficie aun cuando es en coquilla.



d) Acción de las mazarotas

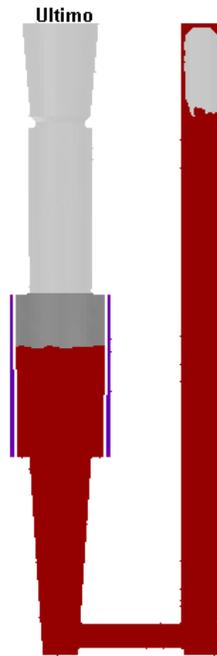
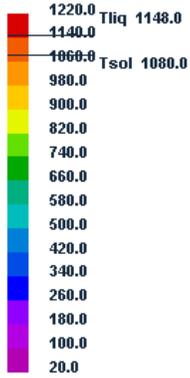


e) Los rechupes en la mazarota

Anexo IX Distribución de temperaturas en el momento del vertido y la solidificación.

Llenado a los 50 segundos

Temperature [C]

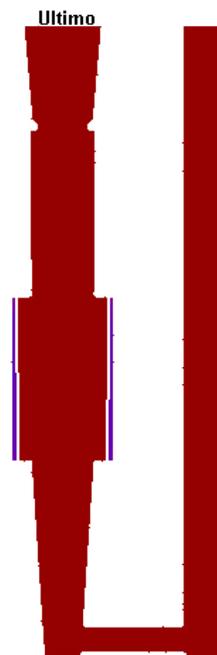
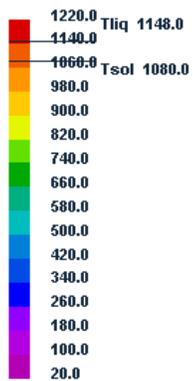


Step / Time Step : 3080 / 6.250e-003
Total Time : 50.0779 sec

ProCAST

Llenado a los 95 segundos

Temperature [C]

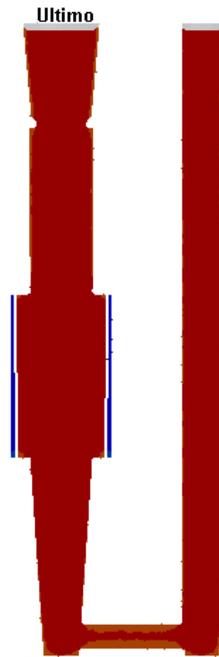


Step / Time Step : 5310 / 8.000e-001
Total Time : 95.2901 sec

ProCAST

Llenado a los 1000 segundos

Temperature [C]

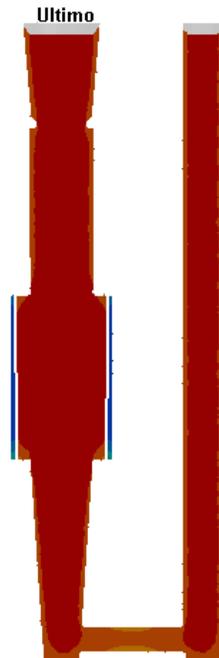
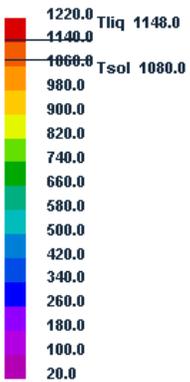


Step / Time Step : 6220 / 1.000e+000
Total Time : 1005.0901 sec

ProCAST

Llenado a los 2000 segundos

Temperature [C]



Step / Time Step : 7220 / 1.000e+000
Total Time : 2005.0901 sec

ProCAST

Llenado a los 5000 segundos

Temperature [C]

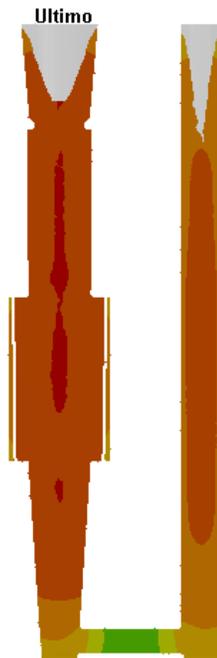
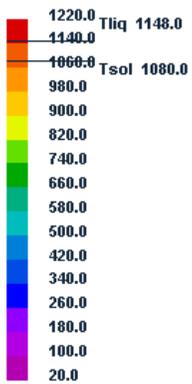


Step / Time Step : 10220 / 1.000e+000
Total Time : 5005.0898 sec

ProCAST

Llenado a los 10000 segundos

Temperature [C]

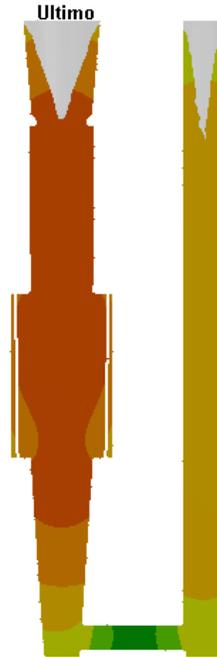
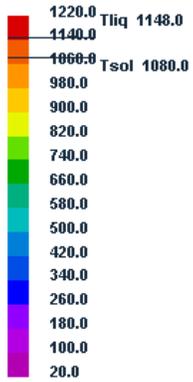


Step / Time Step : 15220 / 1.000e+000
Total Time : 10005.0898 sec

ProCAST

Llenado a los 15000 segundos

Temperature [C]

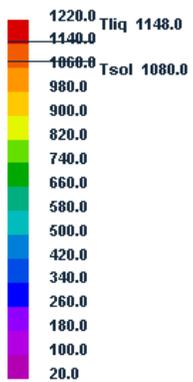


Step / Time Step : 20220 / 1.000e+000
Total Time : 15005.0898 sec

ProCAST

Llenado a los 30000 segundos

Temperature [C]

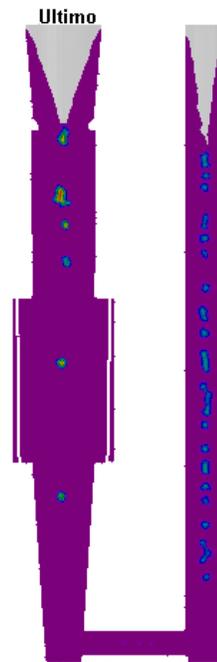
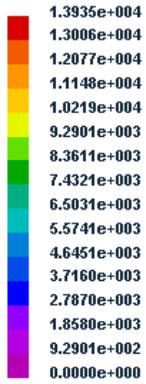


Step / Time Step : 50000 / 1.000e+000
Total Time : 30785.0898 sec

ProCAST

Puntos calientes a los 45000 segundos del vertido

Hot Spots [sec]

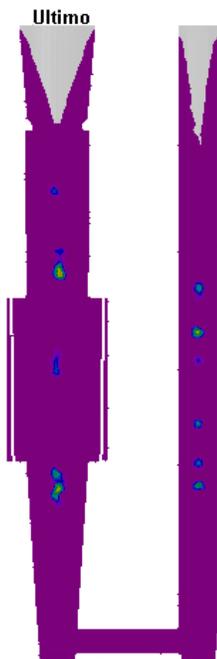
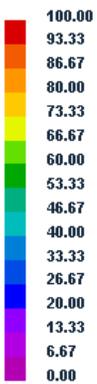


Step / Time Step : 50000 / 1.000e+000
 Total Time : 44785.0898 sec

ProCAST

Porosidad al final del llenado

Shrinkage Porosity [%]



Step / Time Step : 50000 / 1.000e+000
 Total Time : 44785.0898 sec

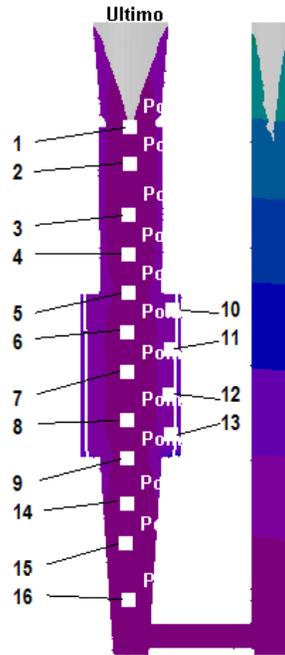
ProCAST

Puntos de control del proceso final

Total Displacement [cm]

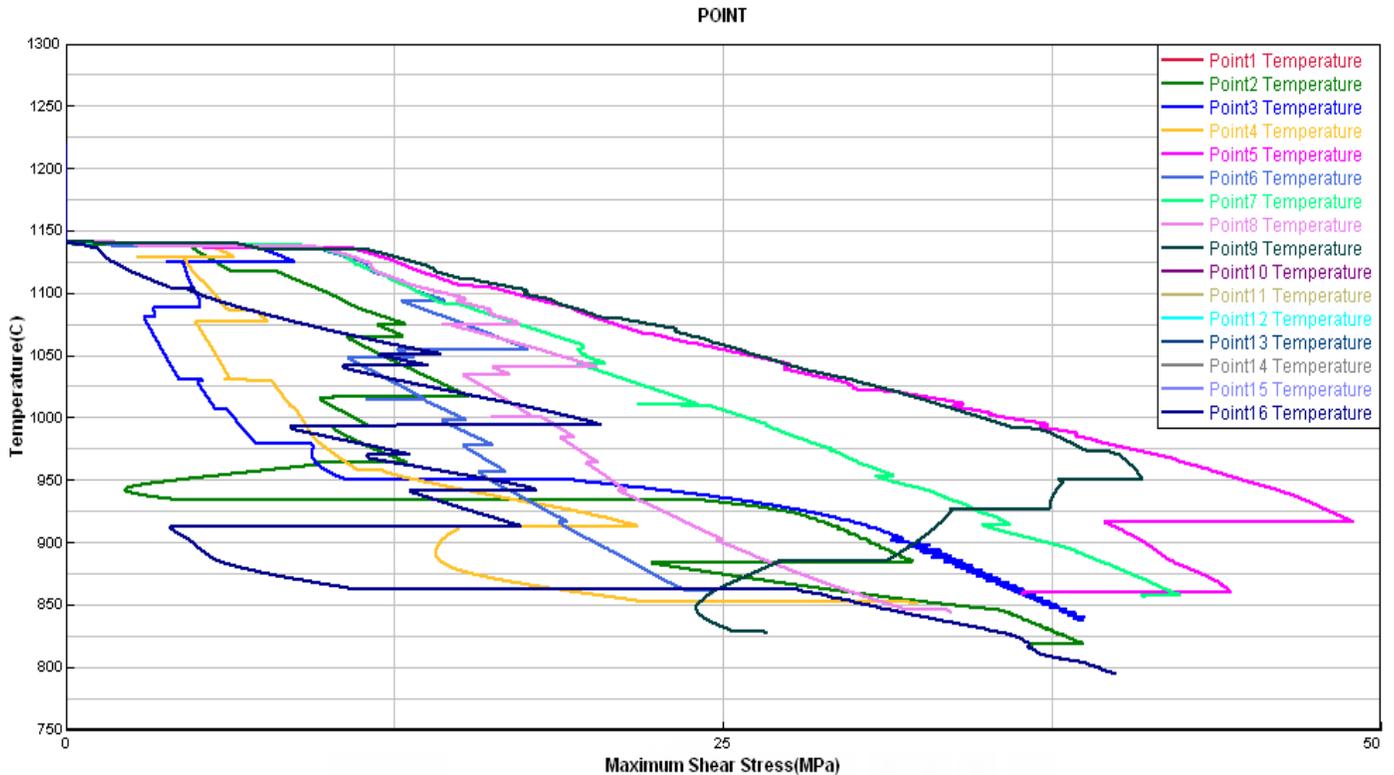


Step / Time Step : 50000 / 1.000e+000
Total Time : 44785.0898 sec

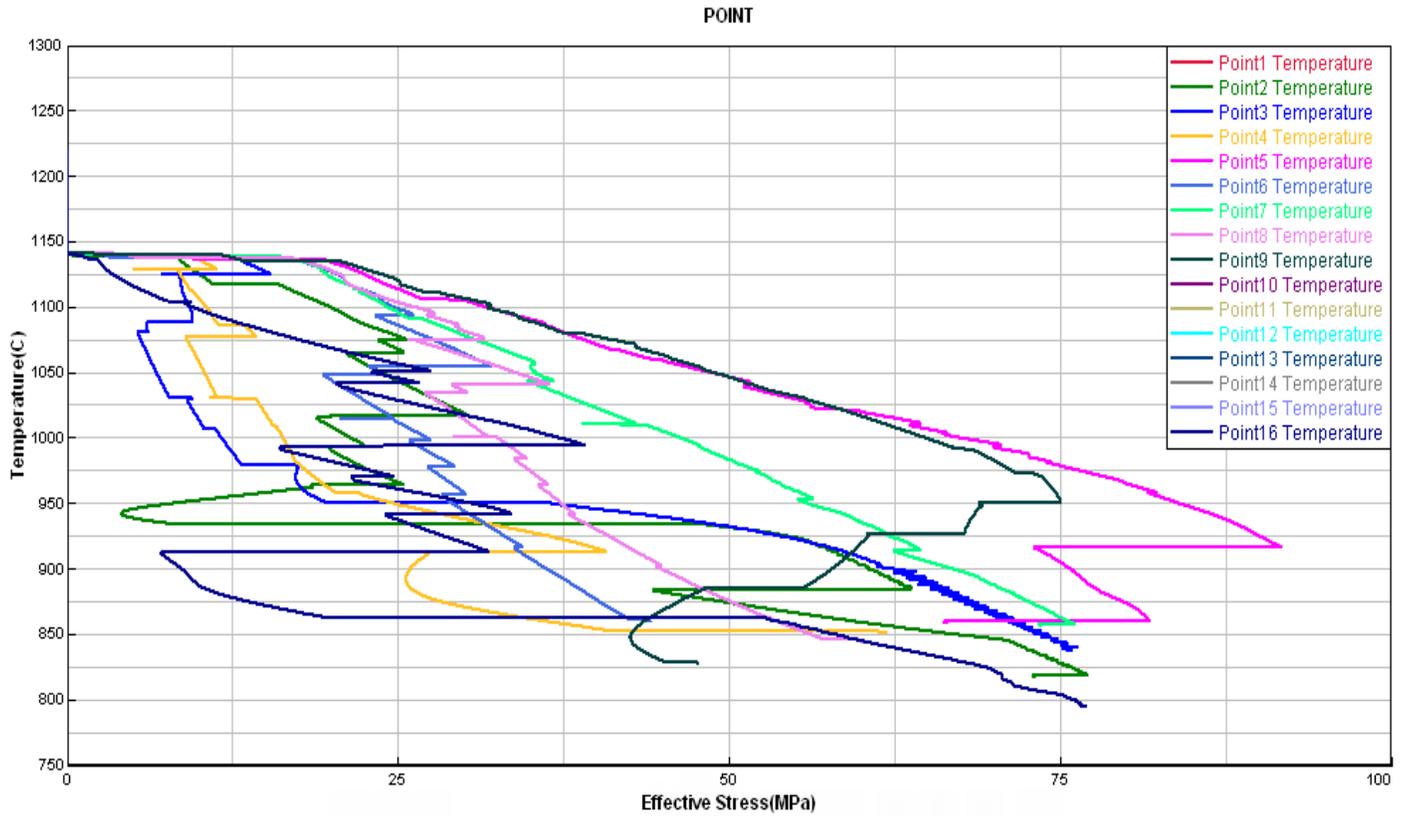


ProCAST

Máxima Tensión Cortante por punto



Tensión Efectiva por punto



Tensión Normal Promedio por punto

