

PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL

—  
FUNDICIÓN  
**NODULAR  
DEL ALTO  
RENDIMIENTO**

CUADERNO TECNOLÓGICO N°9

Autor: **Ingeniero Norberto  
Rizzo Downes**

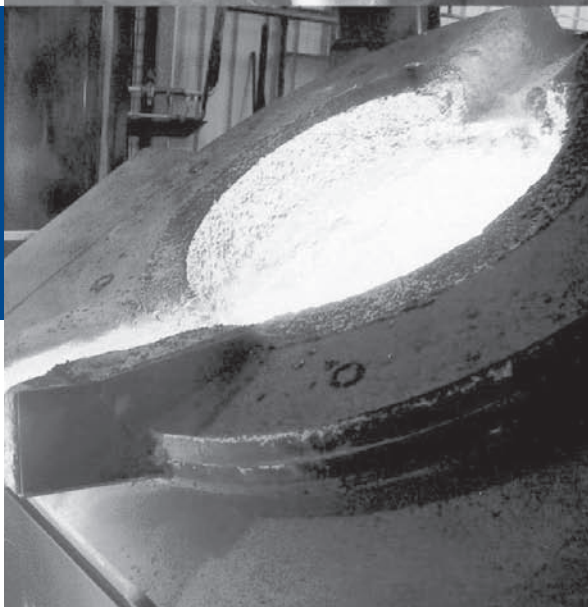
Asesor

Con la colaboración de:  
**Prof. Ing. Daniel Martínez Kraher**  
INTI-Mecánica, Buenos Aires, Argentina

Septiembre de 2014



Unión Europea



PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL



Unión Europea

Delegación de la Comisión Europea en Argentina  
Ayacucho 1537  
Ciudad de Buenos Aires  
Teléfono (54-11) 4805-3759  
Fax (54-11) 4801-1594



INTI



Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional  
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212  
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490  
Fax (54 11) 4752 5919

[www.ue-inti.gob.ar](http://www.ue-inti.gob.ar)

CONTACTO

Información y Visibilidad: Lic. Gabriela Sánchez  
[gabriela@inti.gob.ar](mailto:gabriela@inti.gob.ar)

FUNDICIÓN  
NODULAR  
DEL ALTO  
RENDIMIENTO

CUADERNO TECNOLÓGICO N°9

Autor: **Ingeniero Norberto Rizzo Downes**  
Asesor

Con la colaboración de:  
**Prof. Ing. Daniel Martínez Krahmer**  
INTI-Mecánica, Buenos Aires, Argentina

Septiembre de 2014



INTI



Unión Europea

## INDICE

<b>1. PRESENTACIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>2. RESÚMEN .....</b>	<b>6</b>
<b>3. NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA ELEVAR LA EFICIENCIA PRODUCTIVA EN PLANTAS DE FUNDICIÓN .....</b>	<b>8</b>
Introducción .....	8
<b>4. FUNDICIÓN DÚCTIL O HIERRO NODULAR .....</b>	<b>12</b>
La familia del hierro dúctil .....	13
Propiedades de los hierros dúctiles .....	16
Efecto de la forma de grafito .....	18
Efecto del conteo de nódulos .....	19
Ventajas del hierro Dúctil o Nodular .....	19
Aplicación del hierro Dúctil o Nodular .....	20
<b>5. EFICIENCIA EN LA PLANTA DE FUNDICIÓN .....</b>	<b>21</b>
La Eficiencia .....	21
El rendimiento del molde .....	22
El rendimiento metálico del líquido .....	22
<b>6. LA VERDADERA IMPORTANCIA DE LA RELACIÓN RENDIMIENTO - RECHAZO. ....</b>	<b>23</b>
El porcentaje de rechazo y la productividad .....	24
<b>7. DIEZ PASOS A TENER EN CUENTA PARA ALCANZAR EL ALTO RENDIMIENTO .....</b>	<b>26</b>
Paso 1) Utilizar filtros en todos los diseños .....	26
Paso 2) Utilizar materias primas estables .....	27
Paso 3) Usar canales trapezoidales para minimizar la turbulencia .....	27
Paso 4) Optimizar los tiempos de colada. Colado secuencial .....	31
Paso 5) Contar con módulos de los canales que minimicen las pérdidas de temperaturas .....	33
Paso 6) Utilizar mazarotas como compensadoras de contracción/expansión .....	33
Paso 7) Ubicar las mazarotas en óptima posición .....	33
Paso 8) Utilizar una mazarota para más de una pieza cuando sea posible .....	34
Paso 9) Utilizar una mazarota en la parte superior o de tope .....	34
Paso 10) Utilizar una mazarota caliente .....	34
<b>8. ALTO RENDIMIENTO EN LA PRÁCTICA .....</b>	<b>35</b>

<b>9. FACTORES CON CAPACIDAD DE MODIFICAR EL COMPORTAMIENTO DEL LÍQUIDO AL SOLIDIFICAR .....</b>	<b>37</b>
La calidad metalúrgica del líquido .....	37
La influencia del diseño de la pieza .....	38
El diseño del sistema de colada y alimentación .....	39
Relación entre estos factores .....	39
<b>10. CÓMO SOLIDIFICA EL HIERRO NODULAR DENTRO DE LA CAVIDAD DEL MOLDE .....</b>	<b>41</b>
El diseño de la pieza, y la calidad metalúrgica del líquido .....	43
El diseño de la pieza, la calidad metalúrgica del líquido y el sistema de colada y alimentación .....	44
<b>11. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE ALTO RENDIMIENTO .....</b>	<b>47</b>
Primer ejemplo .....	47
Segundo ejemplo .....	49
Tercer ejemplo .....	51
Cuarto ejemplo .....	52
El alto rendimiento y los niveles de piezas rechazadas .....	53
<b>12. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE ALTO RENDIMIENTO .....</b>	<b>54</b>
Rechufe primario .....	54
Rechufe secundario .....	55
Contracción .....	55
Hinchamiento .....	56
Sopladura por gas (blowhole) .....	57
Exudación eutéctica .....	58
<b>13. AUMENTO DE RENTABILIDAD GENERADA POR EL ALTO RENDIMIENTO .....</b>	<b>59</b>
Introducción .....	59
Caso 1 - Rendimiento clásico convencional .....	59
Caso 2 - Análisis sobre posibilidades de ahorro elevando el Rendimiento, para igual número de figuras por molde .....	61
Caso 3 - Análisis sobre posibilidades de ahorro en base a mayor cantidad de figuras por molde .....	63
<b>14. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>64</b>

## 1. PRESENTACIÓN

La Unión Europea y el INTI firmaron un convenio de financiación destinado a mejorar la competitividad de las miPyMEs del norte argentino acercando respuestas tecnológicas apropiadas al nuevo entorno productivo industrial. Los responsables de la ejecución del Proyecto "Mejora de las Economías Regionales y Desarrollo Local" son el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), en representación del gobierno nacional, y la Delegación de la Unión Europea en Argentina.

Durante más de medio siglo, el INTI ha construido capacidades profesionales e infraestructura tecnológica de relevancia que lo posicionan hoy como actor importante para aportar innovación tecnológica aplicada a los procesos productivos de toda la economía y para el desarrollo de soluciones industriales que incrementen la productividad y la competitividad de la industria nacional.

Con la ejecución de este proyecto se busca acercar la tecnología y las capacidades técnicas a las regiones de menor desarrollo relativo del país, poniendo a disposición de las miPyMEs y Pymes los medios para satisfacer las demandas de mejora de eficiencia y calidad de sus productos y/o servicios para dar un salto cualitativo en cada una de las provincias del NOA y NEA.

Por tanto, a través de un diagnóstico y evaluación de necesidades tecnológicas hecho en articulación con los gobiernos provinciales, se diseñó un plan de acción sectorial que se implementará hasta el 2015, en cinco sectores industriales determinados como prioritarios: industrialización de alimentos, curtiembre, textil, y metalmecánica junto a la gestión medioambiental como eje transversal a los sectores industriales anteriores.

El proyecto Mejora de las Economías Regionales y Desarrollo Local surge como parte de las acciones de vinculación internacional del INTI, en donde la cooperación técnica con organismos públicos y privados del mundo -presentes en el campo tecnológico- favorecen el intercambio de conocimientos como elemento fundamental para el desarrollo industrial local.

En esa dirección, uno de los componentes de este proyecto es la convocatoria de especialistas en diversas temáticas, para cumplir con misiones de trabajo en nuestro país. El objetivo de cada misión es brindar capacitaciones específicas a técnicos de las provincias norteñas, de acuerdo a la especialidad de cada experto, a grupos de trabajo de Centros Regionales de Investigación y Desarrollo así como a Unidades Operativas que conforman la red INTI, y brindar asistencia técnica a las miPyMEs que acompañen el desarrollo de las actividades del proyecto. Además, mantienen entrevistas con actores locales quienes constituyen un recurso esencial y estratégico para alcanzar los objetivos planteados.

La publicación que se dispone a conocer ha sido concebida como resultado de una misión técnica de uno de los expertos intervinientes en este proyecto. Cada experto al finalizar su trabajo en el país, elabora un informe técnico con recomendaciones para el fortalecimiento del sector para el cual fue convocado y que da lugar a la presente producción, editada con el propósito de divulgar los conocimientos a partir de las necesidades

detectadas y los resultados del intercambio efectivo hecho en territorio, conjugando los basamentos teóricos con la realidad local.

### **Dra. Graciela Muset**

DIRECTORA DEL PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL

El contenido de este documento es responsabilidad exclusiva del autor y en ningún caso se debe considerar que refleja la opinión de la Unión Europea.

## 2. RESÚMEN

En este cuaderno tecnológico tratamos de resumir todo lo concerniente a los aspectos relacionados con la "Eficiencia operativa de una planta de fundición de hierro nodular", por ser esta una de las aleaciones con mayor nivel de dificultad técnico, al momento de producirla libre de defectos de solidificación.

Para ello consideraremos los temas que a nuestro criterio, son los más influyentes para alcanzar esta eficiencia operativa. Algunos de ellos, fueron tomados de la rutina clásica, mientras otros son producto de diferentes estudios metalúrgicos de nuestra propia autoría, o de información que nos brinda la bibliografía moderna.

Presentaremos esquemas prácticos desarrollados en planta, que fueron aplicados al proceso, principalmente en las piezas de muy alto volumen de producción, donde se lograron niveles de rendimiento impensables años atrás.

También consideraremos aspectos que hemos desarrollado a través de muchos años de trabajo en plantas de hierro nodular automotriz, donde aplicamos con éxito el alto rendimiento, en piezas fabricadas en grandes series. Mostraremos además ejemplos de piezas producidas bajo este concepto en la práctica.

En el capítulo final, expondremos la gran influencia que ejercen sobre la rentabilidad de una planta de fundición, la forma de costear, el retorno, el rechazo, y por supuesto, el rendimiento.

Particularmente introduciremos un ejemplo costeadado en forma convencional, fijando un precio de venta en forma directa sobre el costo, en más un 33.3%, situación que en apariencia, debiera resultar un muy buen negocio, cuando en realidad demostraremos que la rentabilidad puede resultar negativa.

Seguidamente realizaremos dicho cálculo, valorizando tanto el porcentaje de retorno, como el de rechazo, y considerando diferentes niveles de rendimiento, resultantes de aumentar la cantidad de figuras por molde, para una misma pieza.

Algunas aclaraciones y/o definiciones:

- a) Rendimiento: se entiende por rendimiento de un proceso de fundición, a la relación existente entre el peso de una pieza fundida rebabada y lista para entregar, y el peso de todo el material suministrado para llenar el molde, más los derrames, salpicaduras y otras pérdidas de metal líquido que pueden ocurrir durante el proceso de colada. Bajo el mismo concepto se engloba también la idea de disponer de una mayor cantidad de piezas, en un mismo molde.
- b) Retorno: se denomina retorno a todo el material que vuelve al horno para ser refundido y que está conformado por todo aquello que no sea pieza buena dentro de las especificaciones técnicas, como también el sistema de colada y de alimentación, los derrames de metal, y las piezas rechazadas, ya sea por defectos o porque no cumplen con las normas que rigen su nivel de calidad.

- c) Rechazo: se llama así al conjunto de piezas que no pueden ser entregadas para la venta por poseer defectos, o porque no cumplen con las normas que rigen su nivel de calidad.
- d) %CE = porcentaje de carbono equivalente.
- e) Módulo geométrico: es la relación existente entre el volumen y la superficie de enfriamiento de una pieza, o de cualquiera de sus partes (cortes), consideradas en forma individual. Su valor afecta a la velocidad con que las mismas se enfrían. Se mide en cm.
- f) Módulo térmico: en este caso, depende del elemento que enfría al módulo geométrico. Por ejemplo, si lo dotamos de un manguito exotérmico, tendrá igual módulo geométrico, pero por la acción del manguito su módulo térmico resultará mucho mayor.

### 3. NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA ELEVAR LA EFICIENCIA PRODUCTIVA EN PLANTAS DE FUNDICIÓN

#### INTRODUCCIÓN

Las piezas de fundición en general y principalmente las ferrosas en particular, son aquellas que surgen de la combinación entre dos elementos muy abundantes en la naturaleza como son el *hierro* y el *carbón*. Según sea la proporción en porcentaje existente entre estos elementos, se van conformando una serie de aleaciones cuyos detalles de desarrollo vale la pena conocer. También es interesante mostrar la secuencia en que estas aleaciones fueron apareciendo en el mercado, ya que este simple detalle ha generado diferentes modalidades de trabajo heredadas de sus antecesoras, que con el tiempo los técnicos han transformado erróneamente en leyes metalúrgicas (aun cuando técnicamente esto no es del todo cierto).

Si bien las primeras aleaciones de hierro llegaron desde el espacio en forma de meteoritos que impactaron sobre la tierra, los cuales estaban conformados por aleaciones Fe-Co-Ni-C además de otros elementos, trozos de ellos se fueron utilizando como materia prima para la elaboración de diferentes elementos. Uno de estos fueron las espadas, que sustituyeron las clásicas de su época, basadas en aleaciones de cobre.

Esta situación se prolongó hasta que comenzó el desarrollo de las aleaciones de hierro elaboradas por el hombre mediante la aplicación del método de pudelado. Este sistema consistía en la reducción del mineral de hierro mediante la mezcla con carbón de madera, sistema que no alcanzaba el punto de fusión. En efecto, el proceso consistía en poner en contacto al mineral de hierro con carbón a lo que podemos considerar como "bajas temperaturas", ya que dentro de un horno muy elemental, el material solo alcanzaba el estado *pastoso* que, por efecto de la temperatura y del contacto directo entre el carbón y el óxido de hierro, lograba una precaria reducción de los óxidos. Esta forma de reducción generaba un nivel muy elevado de impurezas en su interior, que se extraían por repetidos forjados en forma manual en ciclos repetitivos de calentamiento y conformado, generándose así materiales de muy baja calidad.

Pero la verdadera metalurgia se logró cuando recién se pudo producir hierro líquido con la ayuda de unos primitivos hornos, que luego dieron origen a los altos hornos y a los cubilotes. En estos hornos se confeccionaban piezas de características metalúrgicas, con un rango de calidad muy variable.

Con la mejora de los equipos de fusión primaria como método de reducción del mineral de hierro y la obtención de metal líquido, renombrado como *pigiron* (que significa "hierro sucio"), el líquido así obtenido fue empleado posteriormente como base para la fabricación de los primeros aceros. Comparando los diferentes métodos de elaboración de acero, el más exitoso fue el Bessemer, que consistía en hacer pasar una corriente de aire a través

de agujeros practicados en el fondo de un recipiente cilíndrico, con una reducción cónica en su boca, y el cual poseía un recubrimiento refractario al que llamaron convertidor. A través de la oxidación, este dispositivo le quitaba al material el exceso de carbono, transformándolo en acero. Se inició así el desarrollo metalúrgico industrial en el siglo 19.

Con este tipo de acero se construyeron desde rieles y puentes ferroviarios, hasta el emblemático Titanic, en el que la extrema fragilidad del material con que fue construido, generó la rotura del casco en su primer viaje. Asimismo se empleó para la fabricación de la torre Eiffel, que aún se encuentra en pie, con todas sus piezas originales.

En lo referente a la obtención de piezas por colado, las primeras fueron logradas con una estructura que actualmente podríamos denominar fundición atruchada, es decir, un tipo de hierro colado que responde a los diferentes diagramas Fe-C (tanto al conformado por Fe-Cementita, como por Fe-Grafito). En resumen, una mezcla de fundición de hierro gris y blanca, de muy baja calidad.

Con el pasar del tiempo estos materiales fueron evolucionando a través de las diferentes generaciones mediante el conocimiento adquirido resultante del método de prueba y error, más que por un propósito técnico en desarrollar una mejora de la tecnología metalúrgica. Por aquellos años surgiría el primer diagrama de equilibrio Fe-C (ver figura siguiente).

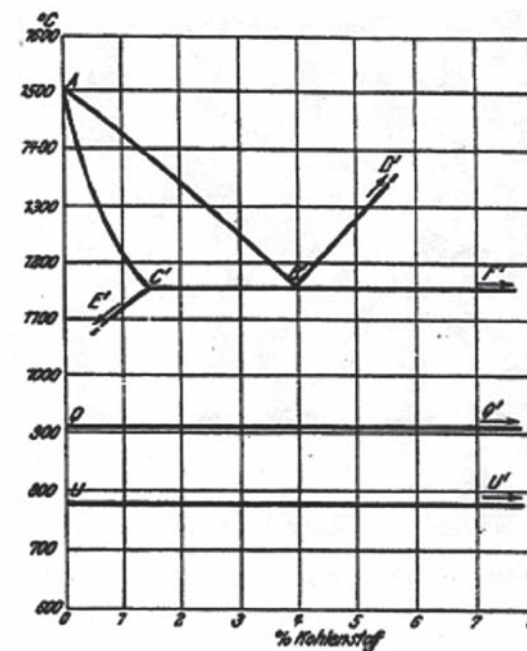


Fig. 3-1: Diagrama Hierro-Grafito según Heyn-Charpy (1911)

Seguidamente se inició un importante cambio, cuando se pudieron obtener fundiciones totalmente grises (Fe-Grafito) y totalmente blancas (Fe-Cementita). En estas últimas, donde el carbono se encuentra en forma combinada formando Cementita, constituyente extremadamente duro y frágil, si bien resultaban relativamente fáciles de obtener con los elementos con que se contaba en la época, su mecanizado era muy difícil, tanto que solo se las utilizaba en piezas resistentes al desgaste.

Avances posteriores permitieron que, si este tipo de piezas eran sometidas a un prolongado tratamiento térmico de recocido, se lograra ferrita por la eliminación de toda la Cementita presente por medio de la oxidación del carbono que la constituía, o bien grafito y ferrita, mediante el desdoblamiento de la Cementita. Es decir, contrariamente a lo que sucedía con la cementita, tanto la ferrita, como el grafito son fáciles de mecanizar y presentan una alta maleabilidad, propiedad que dio el nombre a este tipo de aleaciones: las fundiciones maleables.

Sobre los diferentes tipos de recocido podemos decir que en la práctica surgieron dos tratamientos que generaron otras tantas versiones distintas de este tipo de fundición, y que tomaron su nombre del lugar donde fueron originadas: 1) la europea de corazón blanco, y 2) la americana de corazón negro. Esta última aleación fue usada en la industria automotriz hasta finales de la década del 70 del siglo pasado.

Terminando los años 40, primero en Inglaterra y casi simultáneamente en los EE.UU, surgieron dos métodos registrados bajo diferentes patentes: las aleaciones que fueron denominadas como **hierro nodular** y **hierro dúctil**, ambas solo diferenciadas por la forma de obtención de los nódulos de grafito. Mientras el primero utilizaba el elemento "cerio" para lograr la estructura a la que se denominó "nodular", el segundo empleaba el elemento "magnesio" para formar los nódulos durante el proceso de solidificación. Estos agregados, le aportaban a la aleación una muy alta ductilidad sin la necesidad de un tratamiento de maleabilización, es decir que, esta propiedad se obtiene directamente de colada, lo cual permite mejorar la calidad y bajar los costos productivos.

Es así como todas estas diferentes aleaciones fueron apareciendo por la necesidad imperiosa de obtener mejores propiedades y menores costos de producción. Sin embargo, todo este proceso sucedió con cambios significativos en la forma que asumía el líquido al solidificar, pero sin modificar las formas de las piezas, las que se producían mediante el uso de los mismos herramientas de moldeo y sistemas de colada.

Es de nuestro interés comentar la secuencia con que fueron introducidas las diferentes aleaciones al comienzo de la industrialización en el siglo XIX, principios del XX, con el inicio de la industria automotriz, donde las piezas de cierta responsabilidad coladas en acero, material que por su elevado costo fue primero reemplazado por las fundiciones maleables, en alguna de sus dos variantes, y que por idénticas circunstancias recién en los años 60, fueron lentamente reemplazadas por las actuales fundiciones nodulares.

El paso de los años y la aparición de las nuevas aleaciones, generó que el cambio entre la aleación utilizada y la nueva, se llevara a cabo sobre piezas con idéntico diseño, manteniendo incluso el sistema de alimentación. Esto se debió al argumento comercial, que la nueva aleación sustituyente podía ser colada con los mismos herramientas productivos, que se utilizaban para la aleación que estaba siendo desplazada.

Todo comienza con el uso del acero, una aleación Fe-C que cuenta con el mayor índice de contracción durante su proceso de solidificación (alrededor del 7%), situación que en la práctica implica que se deben prever en los herramientas determinados elementos del sistema de colada necesarios para compensar tales variaciones de volumen durante la solidificación (llamados mazarotas, montantes o simplemente alimentadores), y que funcionan como mecanismos suplidores de líquido, para evitar la formación de defectos de solidificación.

Con el tiempo, el acero fue suplantado por la fundición maleable de menor temperatura de fusión, lo que permitía obtener piezas con espesores más delgados y de menor peso, hecho que se traduce en una mejora de costo. Sin embargo, en su inicio, el cambio se implementó utilizando los mismos herramientas de moldeo y sistemas de colada utilizados para el acero, situación que se traducía en valores de rendimiento extremadamente bajos, aun aplicando la nueva aleación.

Lo mismo ocurrió cincuenta años después cuando las fundiciones maleables fueron sustituidas por las nodulares, y al igual que en cambios anteriores, estas aleaciones también podían ser fundidas utilizando los mismos diseños de piezas y sistemas de colada y alimentación, que los empleados para las maleables. Si bien con el correr del tiempo, estos diseños fueron mejorando y siendo cada vez más livianos, su rendimiento no superaba el 40%.

Luego de varios años de producir con hierro nodular y mediante pequeñas mejoras en las técnicas de procesamiento, el rendimiento fue aumentando hasta alcanzar los niveles actuales que son del orden del 48% al 52% en la mayoría de las grandes plantas automotrices. Es de destacar que, a finales de la década de los años 70 surgieron propuestas para lograr en el nuevo hierro nodular un rendimiento mucho mayor, aplicando solamente un particular diseño al sistema de colada al cual se lo denominó "Sistema de Alto Rendimiento".

En los años 90 y ante una crisis de calidad en la principal planta de fundición de hierro nodular de un grupo empresario por el que fui contratado con el objeto de elevar la calidad de sus productos, se presentó la oportunidad de estudiar la forma de incursionar y elevar el rendimiento de la planta. Una de las limitantes en mi tarea era la reducida disponibilidad de líquido (metal fundido), ya que en esos momentos se utilizaba más del doble del requerido (contándose con un rendimiento en el orden del 50%). Esto desembocó en la búsqueda y la implementación de sistemas de colada y alimentación que elevaran tal rendimiento metálico, para hacer más eficiente la planta, y consecuentemente, mejorar su rentabilidad, siendo este punto en cuestión el que desarrollaremos en este trabajo.

#### 4. FUNDICIÓN DÚCTIL O HIERRO NODULAR

El hierro dúctil, también conocido como hierro nodular, fundición con grafito esférico o simplemente fundición nodular, fue desarrollado por primera vez, por H. Morrogh en la British Cast Iron Research Association de Inglaterra, en Julio de 1946, utilizando el elemento cerium como agente nodulizante, para la formación directa de los nódulos de grafito en el líquido. Sin embargo, y debido a sus altos costos y muy serios problemas de control, este proceso nunca fue utilizado como práctica industrial.

Durante la segunda guerra mundial, debido a la escasez del elemento cromo, la International Nickel Company, intentó sustituirlo por el magnesio como elemento estabilizador de los carburos en los Ni-Hard, pero debido a la gran violencia de su reacción al intentar incorporarlo al líquido, este proceso tampoco prosperó.

Con el objetivo de poder añadirlo, después de haber efectuado varios desarrollos, se pudo determinar que estas violentas reacciones desaparecerían por completo si el magnesio era introducido disuelto en níquel, permitiendo así ser incorporado al líquido sin el menor inconveniente, y generando un método seguro para la producción directa de nódulos de grafito. A esta nueva tecnología se la denominó como Ductile Iron, siendo introducida al mercado en Marzo del 1947 y atribuyéndole a K. Millies ser el co-inventor del hierro dúctil o nodular.

Este material pertenece a la familia de las fundiciones grafiticas que poseen mayor ductilidad, propiedad que le confiere excelente resistencia a los golpes, con muy buena aptitud para soportar la deformaciones.

Se trata de una aleación con la mayor capacidad de alargamiento obtenida directamente por fusión en su grado o calidad "nodular ferrítica". Se puede doblar, torcer y deformarse sin fracturarse, lo que la hace ideal para ser utilizada en la elaboración de partes de vehículos expuestas a impactos.

Su resistencia, tenacidad y ductilidad, se pueden asemejar a las de muchos grados o calidades de aceros fundidos, y hasta pueden incluso superarlas, conformando así un grupo de propiedades muy superiores a las de los hierros grises estándares.

La diferencia entre el hierro dúctil o nodular y el hierro gris radica fundamentalmente en la forma que se presenta el grafito en la estructura. Mientras el primero lo tiene conformando nódulos con un elevado nivel de esfericidad, en el gris se encuentra constituido por hojuelas o escamas, con un patrón de distribución que puede ir desde el azar (cuando se trata de buena calidad), hasta una orientación dendrítica o alineada (cuando se obtienen estructuras de propiedades mecánicas calificadas de baja calidad).

El hierro nodular también se diferencia básicamente del gris por el hecho de que su composición química debe contener un bajo porcentaje del elemento azufre, y debe recibir la incorporación de magnesio cuando se encuentra en estado líquido. El magnesio modifica sensiblemente la forma que asume el grafito al precipitarse durante su solidificación. A diferencia del hierro gris (donde forma escamas), en el hierro nodular el grafito forma esferoides, principal razón en la diferenciación de sus propiedades mecánicas.

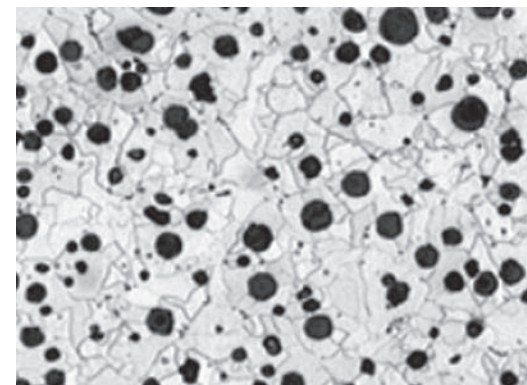


Fig. 4-1: Estructura micrográfica típica de un hierro nodular ferrítico

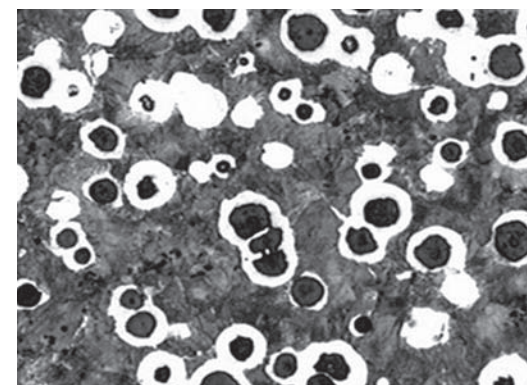


Fig. 4-2: Estructura micrográfica típica de un hierro nodular ferrítico-perlítico.

#### LA FAMILIA DEL HIERRO DÚCTIL

El hierro dúctil es un material que conforma una familia de hierros fundidos que exhiben una amplia gama de propiedades. En todas ellas el grafito se distribuye en forma de nódulos, y la diferencia entre una y otra, radica en el tipo de micro-estructura que presenta su matriz.

Estos nódulos por su forma casi esférica no favorecen la propagación de grietas como si ocurre en el hierro gris, dándole al nodular una gran ductilidad y capacidad de alargamiento. Según sea la matriz, será la dureza del hierro dúctil. Este hecho por sí solo, determina la gran importancia de la matriz, en el control de las propiedades mecánicas. Los tipos de matrices pueden ser:



- 1. Nodular ferrítica:** Está conformada por esferoides de grafito en una matriz de ferrita de muy alta ductilidad y resistencia al impacto y con una resistencia a la tracción equivalente a la del acero bajo en carbono. El hierro dúctil ferrítico se puede producir *as-cast*, o sea directamente de colada. Si no se lo logra así, es posible mejorarlo por tratamiento térmico de recocido para asegurar su máxima ductilidad y tenacidad a baja temperatura (ver Fig. 4-1).
- 2. Nodular ferrítica-perlítica:** Es el grado más común dentro de los hierros dúctiles y está conformado por esferoides de grafito en una matriz de ferrita + perlita en proporciones variables, que van desde bajos porcentajes de perlita hasta bajos porcentajes de ferrita. Presenta muy buenas características para el mecanizado y cubre una amplia gama de propiedades mecánicas que dependerán de la relación en que se encuentren ambos constituyentes (ver Fig. 4-2).
- 3. Nodular perlítica:** Está formada por esferoides de grafito en una matriz de estructura totalmente perlítica. Estas estructuras poseen alta resistencia mecánica, buena resistencia al desgaste, ductilidad y resistencia moderada al impacto, con una maquinabilidad superior a la de los aceros, y con propiedades físicas comparables.

Si bien las anteriores son los tipos de matrices más comunes que obtienen sus propiedades mecánicas directamente de la fusión, el hierro dúctil también puede ser **tratado térmicamente** para alcanzar los siguientes grados de mayor exigencia mecánica, y ser utilizables en una amplia variedad de aplicaciones adicionales:

- 4. Nodular martensítica:** El tamaño de la pieza define el nivel de elementos aleantes requeridos en su composición química, debido a la necesidad de promover la formación de una estructura de temple denominada martensítica en la pieza. La formación de dicha estructura se obtiene mediante el tratamiento térmico de temple y revenido, el cual consiste en un calentamiento previo, hasta lograr la formación de austenita. Sometida a un rápido enfriamiento, que dependerá del tamaño de la pieza, se formará martensita alfa, una estructura inestable, muy dura y frágil, que con un revenido posterior a una temperatura determinada, se transformará en martensita beta, donde la dureza obtenida dependerá de la temperatura de revenido. Esto permite el desarrollo de una muy alta resistencia mecánica y al desgaste, pero con niveles más bajos de ductilidad y tenacidad.
- 5. Nodular bainítica:** Al igual que la anterior, mediante la incorporación de diferentes elementos aleantes, se obtiene este material por tratamiento del tipo isotérmico, lográndose muy buenas propiedades de tenacidad y resistencia al desgaste. Sin embargo, este tipo de material está siendo reemplazado en la actualidad por las fundiciones ADI y CADI que describiremos más adelante.

- 6. Nodular Austenítica:** Se trata de un hierro dúctil aleado para producir una matriz totalmente austenítica, que ofrece una buena resistencia a la oxidación y a la corrosión, y buena resistencia y estabilidad dimensional a temperaturas elevadas.
- 7. ADI:** Es la denominación por sus siglas en inglés, las que in extenso significan *Austempered Ductile Iron*, es decir, fundición de hierro nodular austemperada. Este material, si bien tiene como base un hierro nodular de muy buena calidad, es el miembro más reciente incorporado a la familia de los hierros nodulares. Con sus cinco diferentes tipos (ver tabla siguiente), cubre un rango muy amplio de propiedades mecánicas y niveles de resistencia con porcentajes de alargamiento impensables años atrás.

Tabla 4-1: Las cinco clases de fundiciones nodulares ADI

Grado	Grado ASTM A897	Resistencia a la tracción (psi)	Límite elástico (psi)	Alargamiento (%)	Dureza Brinell
1	130-90-09	130.000	90.000	9	269 - 341
2	150-110-07	150.000	110.000	7	301 - 375
3	175-125-04	175.000	125.000	4	341 - 444
4	200-155-02	200.000	155.000	2	388 - 477
5	230-185-01	230.000	185.000	1	402 - 512

EL ADI se obtiene partiendo de un hierro nodular que se somete a un proceso de tratamiento denominado *Austempering*, el cual consiste en austenizarlo a una temperatura por encima de los 820 °C, para generar luego un enfriamiento interrumpido a una temperatura por encima de aquella temperatura de inicio de la formación de martensita, y finalmente hacerlo permanecer a esa temperatura constante, durante un tiempo prolongado.

Bajo esa circunstancia, la matriz formada por austenita meta-estable se desdobra en una nueva estructura denominada *ausferrita*, conformada por dos constituyentes: austenita saturada en carbono (que la hace estable en el tiempo) y ferrita.

Con estas aleaciones se logran propiedades mecánicas que pueden llegar a duplicar aquellas de las fundiciones perlíticas, y con un muy buen alargamiento, combinación que permite lograr un material con resistencia al desgaste y a la fatiga superiores.

- 8. CADI:** Es la denominación por sus siglas en inglés, las que in extenso significan *Carbide Austempered Ductile Iron*, es decir, fundición de hierro nodular austemperada similar al ADI pero con carburos en su estructura. Este material tiene como base a un hierro nodular de muy buena calidad. Su matriz es similar a la de las ADI, pero en su estructura se observa la presencia de carburos muy duros y resistentes al desgaste, junto a la ausferrita, que se obtiene a través del mismo tratamiento térmico que el descripto para las ADI.

## PROPIEDADES DE LOS HIERROS DÚCTILES

Las propiedades de tracción del hierro dúctil convencional, sobre todo el límite elástico, la resistencia a la tracción y el alargamiento, han sido tradicionalmente los valores más ampliamente citados y aplicados del comportamiento mecánico, para estos materiales. La mayor parte de las especificaciones mundiales para el hierro dúctil, describen las propiedades de sus diferentes grados, principalmente para estos tres parámetros.

Los valores de dureza, debido a la facilidad con que se la obtiene, por lo general se ofrecen como información mandatoria. Como dato adicional se refieren valores de resistencia al impacto para ciertos tipos ferríticos de alta ductilidad. Existen otras propiedades tales como el módulo de elasticidad y el límite proporcional del hierro dúctil, cuya consideración es vital a la hora del diseño.

- a. **Módulo de elasticidad:** El hierro dúctil exhibe una relación tensión-deformación elástica proporcional o similar a la de acero, pero limitada por la aparición gradual de la deformación plástica. El módulo de elasticidad para el hierro dúctil, varía desde 62 GPa hasta 170 GPa. El módulo dinámico elástico (DEM), que es el límite de alta frecuencia del módulo de elasticidad, medido por la prueba de frecuencia de resonancia, exhibe un rango de 162 GPa a 186 GPa.
- b. **Relación de Poisson:** Es la relación entre la deformación elástica lateral y la deformación elástica longitudinal, producida durante un ensayo de tracción. En el hierro dúctil hay poca variación. Un valor comúnmente aceptado es el de 0.275.
- c. **Límite proporcional:** El límite proporcional es la tensión máxima bajo la cual un material presenta un comportamiento elástico. En los hierros dúctiles, que poseen una transición gradual desde la zona elástica hasta la de comportamiento plástico, el límite proporcional se define como la tensión necesaria para producir una desviación del comportamiento elástico de 0.005%. Se mide por el método de compensación utilizado para medir la resistencia a la fluencia, aunque también puede estimarse a partir de ella. La relación entre el límite proporcional y el límite de elasticidad al 0.2% típicamente es de 0.71 para las fundiciones ferríticas, disminuyendo a 0.56 para las perlíticas y los grados martensíticos templados.
- d. **Límite elástico:** El límite de elasticidad, es aquella tensión a la que un material comienza a exhibir deformación plástica significativa. Para el hierro dúctil se utiliza el método de compensación, en el que la resistencia a la fluencia se mide a una desviación especificada a partir de la relación lineal entre la tensión y la deformación. Esta desviación, por lo general 0.2%, está incluida en la definición del límite elástico o límite de elasticidad en las especificaciones internacionales. Los límites elásticos del hierro dúctil suelen oscilar entre 275 MPa para los grados ferríticos, a más de 620 MPa para los grados martensíticos.
- e. **Resistencia a la tracción:** La resistencia a la tracción es la carga máxima en tensión, que un material puede soportar antes de la fractura. Para los hierros dúctiles convencionales oscilan entre 414 MPa para los grados ferríticos, y más de 1380 MPa para los martensíticos.

- f. **Elongación:** Se define como el aumento permanente de la longitud de una probeta de tracción, expresada como un porcentaje de una longitud especificada, y que se mide cuando la barra se prueba a la rotura. Los hierros dúctiles ferríticos pueden exhibir alargamientos de más del 25%. En tanto que, los hierros dúctiles austemperados exhiben la mejor combinación de resistencia y alargamiento.
- g. **Dureza:** La dureza del hierro dúctil generalmente se mide mejor usando el método Brinell, que consiste en determinar ópticamente el diámetro de la impronta que deja una bola de acero endurecido o de carburo de tungsteno de 10 mm de diámetro, sobre una superficie plana de la pieza. Este tipo de dureza, se incluye en muchas especificaciones relativas al hierro dúctil. Por su grado de representatividad, es utilizada como ensayo rápido en el control de la producción, ya que guarda relación directa con las propiedades mecánicas. Las pruebas de micro-dureza, por el contrario, son tomadas sobre la propia estructura, previa preparación en calidad metalográfica y usando penetradores de diamante, con el objeto de medir sobre constituyentes individuales de la matriz de hierro dúctil.
- h. **Resistencia al impacto.** Todos los hierros dúctiles tienen buena resistencia al impacto. Depende del grado de ferritización que posee su micro-estructura. El hierro dúctil, que es totalmente ferrítico, alcanza valores altos. Su punto de transición dúctil/frágil disminuirá al reducir el porcentaje de silicio.
- i. **Densidad:** El valor generalmente aceptado para la densidad del hierro dúctil a temperatura ambiente es de 7.1 g/cm<sup>3</sup>. La densidad se ve afectada principalmente por el porcentaje de carbón grafito presente en su estructura. Las densidades varían entre 6.8 g/cm<sup>3</sup> para las estructuras altamente ferríticas y 7.4 g/cm<sup>3</sup> para las perlíticas.
- j. **Expansión térmica:** El coeficiente de expansión térmica lineal del hierro dúctil depende principalmente de la microestructura, si bien está influenciado en menor medida por la temperatura y la estructura del grafito. En los hierros dúctiles no aleados, la composición tiene sólo una ligera influencia sobre la expansión térmica, pero los hierros dúctiles austeníticos pueden exhibir un comportamiento significativamente diferente.
- k. **Resistencia mecánica a temperatura:** La capacidad de un hierro dúctil a altas temperaturas es más o menos comparable con las del acero fundido. Solo a modo de ejemplo, a 430 °C, el hierro dúctil tiene una resistencia a la rotura por tensión en el rango de 210 a 240 MPa.
- l. **Conductividad térmica:** La conductividad térmica de los hierros grises y dúctiles está influenciada fuertemente por la morfología del grafito. La conductividad es más alta en el hierro gris debido a la naturaleza semi-continua de las escamas de grafito. Debido a esta influencia del grafito en escamas, la fracción de volumen de grafito juega un papel importante en el hierro gris, pero no en el dúctil. Además de la forma del grafito, la microestructura, la composición y la temperatura, también influyen en la conductividad térmica. Los hierros dúctiles ferríticos tienen una conductividad térmica más alta que los grados perlíticos y, los grados templados, alcanzan valores similares a la de los hierros ferríticos y perlíticos.

**m. Resistividad eléctrica:** El hierro dúctil con grafito esférico tienen una menor resistividad eléctrica, que el hierro gris con grafito en escamas. Los elementos principales que afectan la resistividad aumentándola, son el silicio y el níquel.

**n. Propiedades magnéticas:** Las propiedades magnéticas de los hierros dúctiles están determinadas principalmente por su microestructura.

La forma esférica de las partículas de grafito les da mayor inducción y mayor permeabilidad, en comparación con los hierros grises de matriz similar. Los hierros dúctiles ferríticos son magnéticamente más suaves que los grados perlíticos, y tienen una mayor permeabilidad y menor pérdida por histéresis. Para alcanzar una máxima permeabilidad y una mínima pérdida por histéresis, se utilizan los hierros nodulares ferríticos, pero de bajo contenido de fósforo.

**o. Calor específico:** Es la cantidad de energía requerida para aumentar en un grado la temperatura de una unidad de masa de un cuerpo. Por lo general, el calor específico aumenta con la temperatura, alcanzando su máximo cuando se produce una transformación de fase. Para el hierro dúctil no aleado, el calor específico varía con la temperatura.

**p. Resistencia al desgaste:** Los datos de servicio indican que la resistencia al desgaste del hierro dúctil es equivalente a algunas de las mejores calidades de fundición gris. Esto ha sido demostrado por el comportamiento en servicio de algunos componentes, como pueden ser: camisas de cilindros, cigüeñales, rodillos, troqueles y engranajes.

**q. Resistencia a la corrosión:** La resistencia a la corrosión del hierro dúctil es igual o superior a la de la fundición de acero, por lo que, con relación a esta propiedad, puede usarse uno u otro indistintamente. En algunas aplicaciones, el hierro dúctil demuestra una ventaja útil sobre el acero fundido en el caso de las salmueras alcalinas. El hierro dúctil también se utiliza ampliamente para la manipulación del ácido sulfúrico concentrado, de soluciones cáusticas, del condensado de vapor y de una amplia variedad de líquidos orgánicos.

## EFFECTO DE LA FORMA DE GRAFITO

Dentro de la familia del hierro dúctil, la nodularidad juega un papel importante en la determinación de las propiedades. La nodularidad y la morfología de las partículas no esféricas, ejercen una fuerte influencia sobre el rendimiento y la resistencia a la tracción del hierro dúctil. La nodularidad se reduce si la cantidad de magnesio residual (Mg) es muy baja (los nódulos se convierten en vermículos alargados), y si el nivel de azufre es elevado (los nódulos se convierten en escamas del tipo hojuela).

Pequeñas adiciones de plomo (Pb) reducen la nodularidad, y generan la presencia de grafito pseudo-laminar en forma intergranular, o también de pequeñas láminas, efecto que se traduce en una drástica reducción de las propiedades mecánicas de tracción.

El efecto de la cantidad de nódulos en los hierros dúctiles revela una característica

muy importante como lo es el comportamiento del líquido durante su solidificación. La presencia de pocos nódulos grandes significa que el líquido solidificó muy contractivamente mientras que, la de muchos nódulos pequeños denominados eutécticos (que no superan un diámetro de 45 micrones) determina que la solidificación se llevó a cabo con un aumento de volumen, es decir, que fue expansiva.

Este concepto es muy importante, por cuanto la obtención de líquidos que solidifican en forma expansiva, permiten mediante este mecanismo de expansión compensar el efecto de contracción que presentan las aleaciones de hierro al solidificar, fenómeno que nos permite poder elevar el rendimiento, dada la posibilidad de achicar significativamente las mazarotas y los canales de colada.

## EFFECTO DEL CONTEO DE NÓDULOS

El recuento de nódulos, expresado como el número de nódulos de grafito/mm<sup>2</sup>, también influye sobre las propiedades mecánicas del hierro dúctil, aunque no tan fuerte y directamente como la forma del grafito. Generalmente, un recuento elevado indica una buena calidad metalúrgica, pero hay un rango óptimo de recuento de nódulos para cada módulo de pieza, ya que una cantidad excesiva podría generar una expansión desmesurada, situación que llevaría a la pieza a hincharse. Sería entonces el caso de otro defecto de solidificación, ahora por expansión. El recuento de nódulos en exceso, puede provocar una disminución de las propiedades mecánicas de la aleación. El recuento de nódulos por se, no afecta fuertemente las propiedades de tracción, pero tiene ciertos efectos sobre la microestructura, que pueden influir de manera significativa sobre las propiedades como el alargamiento. En tal sentido, en el hierro fundido dúctil, el recuento de nódulos influye sobre el contenido de perlita. Su aumento, lo disminuye, generando una reducción de la resistencia a la tracción y un aumento de la elongación.

Como el incremento en el recuento de nódulos minimiza el posible contenido de carburo asociado con el fenómeno de temple (o chill) inverso o invertido, que consiste en la formación de carburos en zonas centrales de las piezas, las cuales son de más lento enfriamiento, cuando en realidad su formación siempre está asociada a velocidades de enfriamiento más elevadas, una mayor cantidad de nódulos, harán más estables las propiedades mecánicas en toda la pieza (nos referimos a la resistencia a la tracción, la ductilidad y su maquinabilidad).

## VENTAJAS DEL HIERRO DÚCTIL O NODULAR

Los beneficios del hierro dúctil son los siguientes:

Cuando se compara una pieza de acero fundido con una de hierro dúctil, su principal ventaja reside en su significativo menor costo de fabricación, debido básicamente a que el hierro dúctil tiene una temperatura de fusión más baja que la del acero. Esto permite un

mejor acabado de la superficie y espesores mucho más delgados, asociados a formas más complejas, que permiten incorporar mayores cambios de sección.

El hierro nodular muestra buena ductilidad con niveles de elongación que superan el 18% en los grados ferríticos, lo cual facilita el mecanizado.

Una importante característica es que las piezas de fundición en hierro dúctil pesan el 10% menos que las de acero fundido en razón de su menor densidad, propiedad que aunada a una mayor habilidad de alcanzar formas más delgadas y complejas por su colabilidad en relación al acero, las hace ideal para utilizar en partes automotrices, principalmente de suspensión.

## APLICACIÓN DEL HIERRO DÚCTIL O NODULAR

La industria del automóvil ha expresado su confianza en el hierro dúctil a través de la amplia utilización de este material en los componentes relacionados con la seguridad, tales como rótulas de dirección, pinzas de freno, y cajas diferenciales

Una de las aplicaciones más críticas del hierro dúctil se da en contenedores para el almacenamiento y transporte de los desechos nucleares. Este tipo de aplicación muestra la capacidad de la fundición dúctil para cumplir e incluso superar las pruebas de calificación más críticas para medir el rendimiento de los materiales.

Existe una gran gama de piezas fabricadas en hierro dúctil. El peso de las posibles piezas de fundición en este material puede ser de menos de 25 g a más de 200 t. El tamaño de la sección puede ir de tan solo 2 mm a más de 500 mm de espesor.

La distribución del grafito nodular en la matriz de hierro dúctil, a causa de su total discontinuidad, evita la formación de capilaridad que a menudo se encuentra en la fundición gris. Esa capilaridad puede generar fugas que se tornan críticas en las piezas contenedoras de fluidos bajo presiones elevadas. Esta situación, sumada al hecho de que se moldea fácilmente, hace que el hierro dúctil sea ideal para servicios de alta presión, como son los cuerpos de compresores de múltiples etapas para fluidos gaseosos.

## 5. EFICIENCIA EN LA PLANTA DE FUNDICIÓN

### LA EFICIENCIA

La *eficiencia operativa* de una planta de fundición es un parámetro muy importante a tener en cuenta principalmente en aquellas dedicadas a la industria automotriz, donde los grandes volúmenes a producir ejercen fuertes limitaciones sobre los márgenes de rentabilidad, situación por la cual se torna importante prestar atención a la relación entre lo producido y la capacidad de planta real instalada. Dicha capacidad depende de los equipos y del tipo de diseño utilizado en los herramientas productivos, ya que el rendimiento del diseño estará estrechamente relacionado con la rentabilidad de la operación.

Pero quizás este concepto que podríamos considerar obvio en cualquier actividad productiva, no lo sea en una planta de fundición, ya que aun utilizando el total de la capacidad disponible (en cuanto al tonelaje de metal líquido y la cantidad de moldes que la planta por diseño puede alcanzar), la rentabilidad puede no ser buena.

En el diseño de toda planta de fundición es necesario considerar aspectos importantes que ayuden a definir el tamaño y la capacidad de los equipos en sus diferentes áreas operativas. En efecto, en base a la cantidad y a la variedad de tamaños del universo de las piezas a producir, se podrá determinar el tipo y tamaño del equipo de moldeo, mientras que en base a la cantidad y a los pesos de las piezas, se podrán definir los requerimientos de metal líquido a disponer, con el fin decidir el tamaño y la potencia de los hornos que conformaran el área de fusión.

Pero al realizar este análisis considerando solo los parámetros tradicionales, podríamos llegar a sobredimensionar los equipos de producción, como consecuencia de lo cual aumentaría la magnitud de la inversión, insumiendo entonces un mayor nivel de amortización. Esto podría obligar a elevar los costos, restringiendo los niveles de rentabilidad de la compañía, en el caso que no se elevaran los precios para compensarlos.

Esta situación es la habitual, cuando se emplean los niveles de rendimiento tradicionales. Sin embargo, hoy en día, estos pueden ser superados significativamente utilizando las metodologías denominadas de alto rendimiento, que permiten producir las mismas piezas en hierro nodular, pero con herramientas diseñados con una mayor cantidad de piezas por molde, y utilizando a la vez una relación de menor cantidad de metal líquido por pieza.

El hecho de no tener en cuenta estas influyentes variables que afectan directamente la eficiencia productiva de la planta, es una limitación que posee la práctica convencional, al no considerar la importancia del *rendimiento*. Este se aplica tanto al moldeo (elevando la cantidad de cavidades dispuestas en el molde), como al colado (llenando el molde con la menor cantidad de metal posible, mediante un sistema de colada y alimentación, diseñado bajo el concepto del alto rendimiento).

## EL RENDIMIENTO DEL MOLDE

El rendimiento de moldeo se traduce en una mayor cantidad de cavidades colocadas en cada molde aprovechando todo el espacio disponible en la placa, lo cual genera la aplicación de un eficiente sistema de colada y alimentación de alto rendimiento, que se vale, entre otros detalles, de canales de distribución más delgados y mazarotas más pequeñas.

## EL RENDIMIENTO METÁLICO DEL LÍQUIDO

Del total del metal colado en el molde, solo una parte se transforma en piezas vendibles y facturables, relación que surge entre el metal que conforman las piezas y el total de metal colado. Esta variable indudablemente involucra al diseño del sistema de colada y alimentación, cuyo tamaño y peso dependerá del nivel con que se maneje la metalurgia aplicada al líquido utilizado en la producción de la pieza en cuestión. Esta situación requiere que el diseñador del herramental conozca con precisión el comportamiento que asumirá el líquido al solidificar. Dado que en la práctica esto generalmente no es así, el diseñador, ante la duda que tal sistema pueda generar un alto porcentaje de piezas con defectos de solidificación, suele dejar en el herramental de producción (modelo), un excesivo espacio libre entre figuras para poder ubicar (si fuera necesario), grandes mazarotas que permitan proveer más líquido a cada una de las cavidades, y compensar así las posibles variaciones volumétricas que se presentarán durante la solidificación.

## 6. LA VERDADERA IMPORTANCIA DE LA RELACIÓN RENDIMIENTO - RECHAZO

En la cotidianeidad de la operación productiva de una planta de fundición de hierro nodular, es habitual que el responsable de los resultados operativos, preste mucha atención a los niveles de rechazo que el proceso genera, y mucho más aún, cuando estos porcentajes superan los niveles considerados en la estructura de costo de cada pieza.

El nivel de rechazo depende de una multiplicidad de factores que van, desde el propio estado operativo de los equipos productivos, pasando por la calidad del control que se tiene sobre el proceso, la disciplina operativa, la estabilidad de las materias primas disponibles, hasta el más fundamental de todos, como es el diseño de cada pieza en particular, incluyendo su sistema de colada y alimentación.

Este conjunto de situaciones hace que cada fundición se mueva de acuerdo a un modelo de comportamiento que la caracteriza. De ahí el conocido dicho popular "cada planta es diferente", situación que si bien es absolutamente cierta, para nada debiera limitar a que se puedan tomar acciones para ser mejorada cada día.

Para ello, hay que aceptar el incursionar en nuevos procedimientos, y no refugiarse en un proceso ineficiente que, por ser bien conocido, puede condenarnos a repetir una y otra vez esta única forma de hacer las cosas, confundiendo el concepto de poseer mucha experiencia, con el de haber repetido una práctica pobre, durante muchos años.

Muchas veces se asocia el concepto de "bajo rechazo" con el éxito operativo ya que, al contar con un porcentaje de rechazos pequeño, nos aseguraríamos la posibilidad de vender una gran cantidad de piezas. Sin embargo, estas apreciaciones apresuradas, se efectúan sin haber analizado con precisión, cual es el verdadero costo asociado, para mantener un nivel de rechazo extremadamente bajo.

La fundición es, por encima de todo un negocio, que no puede ser calificado como bueno por el solo hecho de considerar su nivel de rechazo. Por el contrario, esta calificación debería basarse en un parámetro más trascendente, como puede ser el de relacionar que porcentaje de metal, de la totalidad que funde la planta se vende y cobra.

Este concepto debe necesariamente involucrar, no solo al porcentaje de rechazo (al cual se lo controla en todas las plantas en forma continua, y generalmente se lo fija en valores subjetivos muy bajos), sino también al rendimiento. En efecto, ambas variables se encuentran muy relacionadas con la rentabilidad de toda la operación, e incluso el rendimiento posee un efecto mayor sobre la verdadera rentabilidad de la planta, que el propio rechazo.

Más adelante veremos incluso que (apartado 13 ejemplo 1), el pretender reducir en forma exagerada el porcentaje de rechazo, en lugar de hacer la operación más rentable, podría producir un efecto contrario, ocasionando inclusive pérdidas encubiertas en algunas piezas.

## EL PORCENTAJE DE RECHAZO Y LA PRODUCTIVIDAD

En la Fig. 6-1 podemos observar el porcentaje de rechazo (variable normalmente considerada por los fundidores como la causante de la pérdida de rentabilidad de la operación), relacionado con el rendimiento (variable que -a nuestro criterio- es la causa más importante que afecta la rentabilidad, por su capacidad de modificar el nivel de productividad de la planta). También observamos como ambas afectan la productividad de la planta.

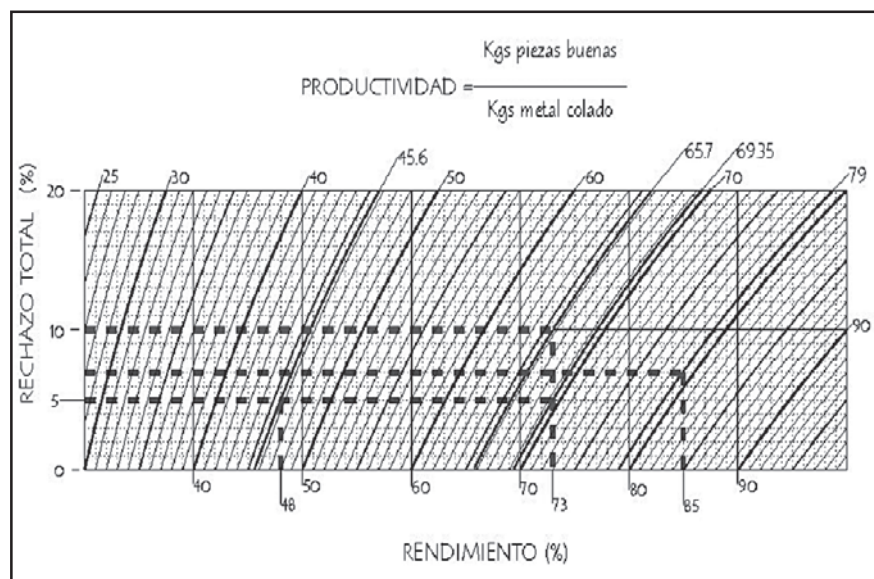


Fig.6-1: Gráfico de rechazo (%) vs rendimiento (%)

En las Figs. 6-2 y 6-3 se muestran el sobre y el bajero de un herramental diseñado y construido en Japón en la década del 90. El primero consistía en cuatro figuras y un sistema de colada y alimentación con un rendimiento metálico del 48% (Fig.6-1), el cual debía producirse con un nivel de rechazo máximo <5%, generando entonces un porcentaje de piezas vendibles del 45.6%.

A ese mismo herramental se le re-diseñó su sistema de colada, gracias a lo cual fue posible elevar el rendimiento metálico al 73%. Suponiendo inicialmente que el nivel de rechazo pudiera elevarse a un orden del 10%, la productividad se incrementaría a un 65.7%.

Una vez puesto el sistema rediseñado en producción, cuando fue ajustado a lo metalúrgicamente requerido por las piezas, su nivel de rechazo se mantuvo en el mismo nivel anterior, motivo por el cual, la productividad final resultó ser del 69.35%.

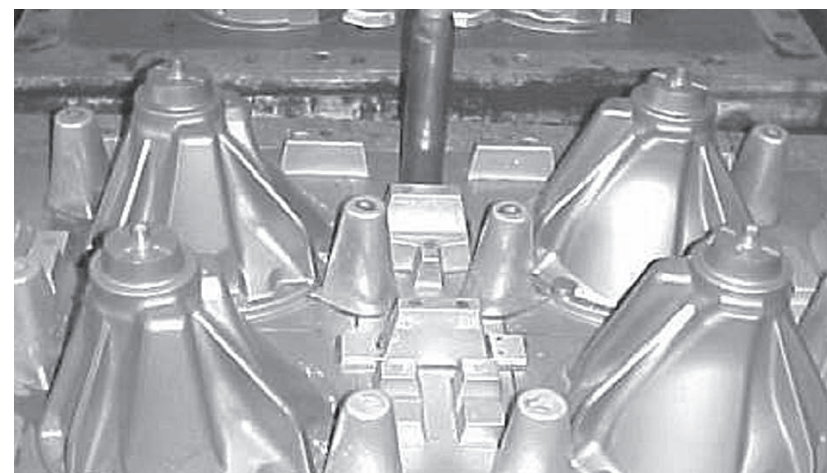


Fig. 6-2: Herramental sobre

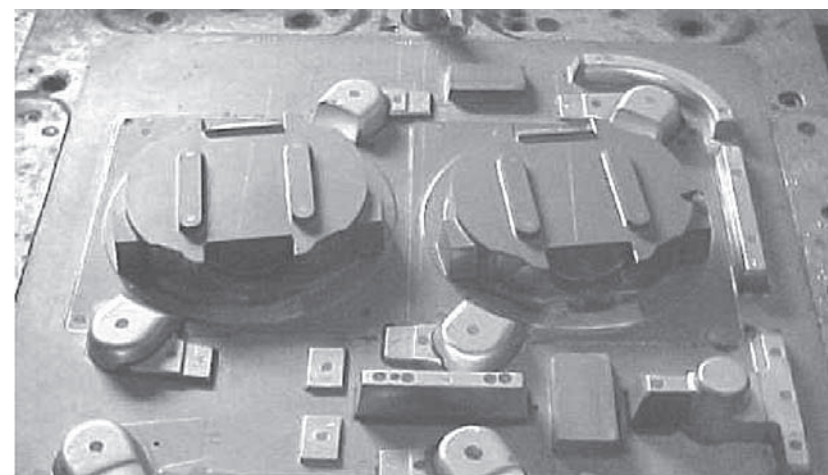


Fig. 6-3 Herramental Bajero

Al observar las grandes diferencias en productividad que arroja el diagrama para un mismo herramental, con un sistema de colada y alimentación convencional y otro modificado, vemos que, incluso duplicando el nivel de rechazo, situación que en la práctica nunca ocurrió, la productividad para la misma pieza se elevó de 45.6% a 69.35%, es decir un 52% más, con la misma capacidad instalada y sin realizar inversiones adicionales.

## 7. DIEZ PASOS A TENER EN CUENTA PARA ALCANZAR EL ALTO RENDIMIENTO

Para diseñar un sistema de colada y alimentación con alto rendimiento es necesario tener en cuenta diez pasos importantes, a saber:

### PASO 1) UTILIZAR FILTROS EN TODOS LOS DISEÑOS:

Todo sistema de colada y alimentación es el responsable de proveer líquido a la cavidad del molde. Dicho líquido deberá estar libre de escoria que pudiera dañar la pieza colada. Anteriormente, esta acción se lograba generando una baja velocidad en los canales de distribución del metal líquido dentro del molde, para que la escoria flotase por efecto de la diferencia de densidad. Esto implicaba el uso de canales gruesos, que ocupaban mucho lugar dentro del propio modelo.

Para elevar el rendimiento en los diseños de los herramientales, se reemplaza ese tipo de canales por otros más livianos y que permiten una mayor velocidad de colada, dejando la responsabilidad de separar la escoria contenida en el líquido al filtro cerámico que ocupa menos lugar que un canal grueso. Este filtro solo permite pasar el metal líquido y retiene cualquier partícula sólida contenida en él.

En la Fig. 7-1 se puede observar la ubicación del dispositivo en el herramental para ubicar un filtro cerámico en el molde, el cual está indicado mediante un círculo.



Fig. 7-1: Zona del molde destinada al filtro cerámico

### PASO 2) UTILIZAR MATERIAS PRIMAS ESTABLES:

Las materias primas son un factor muy importante en el logro de un diseño de alto rendimiento, ya que son las responsables de aportar estabilidad de comportamiento durante la *solidificación*, al líquido con que se está colando. Esta condición debe permanecer en el tiempo para que se logren las mismas variaciones volumétricas que se generan durante la solidificación, lo que en otras palabras se podría definir como "sostener una calidad metalúrgica en el tiempo". Otros autores lo expresan como "no innovar".

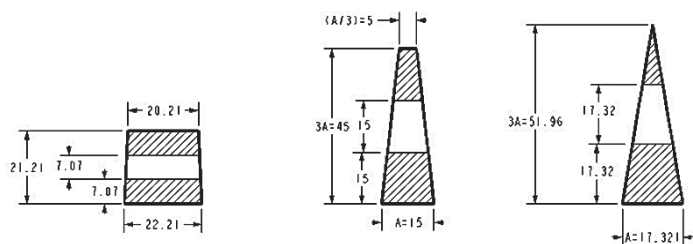
Es una creencia generalizada que esta estabilidad depende del nivel de pureza química de las materias primas, principalmente de los re-carburantes, cuando en realidad, la pureza y la estabilidad en el comportamiento que asume el líquido durante la solidificación, son dos aspectos totalmente independientes uno del otro. Por lo tanto, y primordialmente, es preferible contar con una materia prima muy estable antes que con una muy pura, ya que esta última pudiera ser aún inestable y modificar el *comportamiento del líquido durante la solidificación*.

### PASO 3) USAR CANALES TRAPEZOIDALES PARA MINIMIZAR LA TURBULENCIA:

Un factor muy importante a tener en cuenta en el diseño del alto rendimiento es la sección de los canales de distribución del líquido en el interior del molde. Estos canales deberán ser lo más livianos y con la menor superficie proyectada como base sobre la placa, con el objeto de utilizar el menor espacio posible en ella, permitiendo así más lugar libre para la colocación de una mayor cantidad de cavidades por molde.

Otra variable importante a considerar es la *turbulencia*, que generalmente es ignorada o subestimada por los fundidores de hierro nodular. Se debe tener en cuenta que, altos valores de turbulencia en el flujo de metal dentro del canal disuelven aire durante la colada, generando así defectos como ser una baja nodularidad, por la oxidación del magnesio (considerada una falta metalúrgica grave).

Para ello, es indispensable minimizar los niveles de turbulencia dentro del canal, lo cual dependerá del *diseño del propio canal*. Si hablamos de hierro nodular, esto adquiere *mucho importancia* en la calidad de la pieza obtenida.



	Clásico	Trapecio extendido	Triángulo
Área (mm <sup>2</sup> )	450	450	450
Perímetro (mm)	84.9	110.6	122.7
Módulo total (cm)	0.53	0.41	0.37
Módulo 1/3 punta	0.423	0.284	0.142
Módulo 1/3 base	0.425	0.443	0.477
Reynolds (Re)	29451	22613	20378
Peso (g/25.4mm)	81	81	81

Nota: esta tabla es para un peso del canal de distribución CONSTANTE.

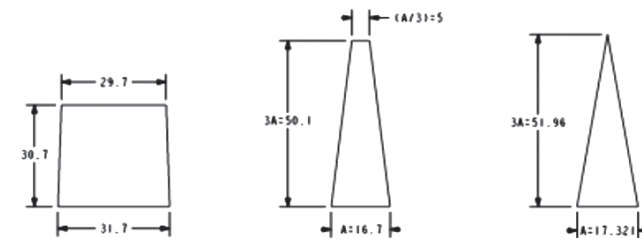
Fig. 7-2: Tres secciones diferentes de canales de distribución

En la Fig. 7-2 comparamos tres secciones distintas de canales de distribución de metal en el molde, para igual peso por unidad de longitud (25.4 mm), y donde el nivel de turbulencia medido en Reynolds es calculado para un caudal igual a 2.5 kg/seg.

De la tabla de la Fig.7-2 se desprende que el de diseño triangular es el que posee menor nivel de turbulencia (Re=20378.1) en comparación con los otros dos. Sin embargo, debemos tener en cuenta que este perfil es el menos recomendado por el bajo valor del módulo geométrico del tercio superior o de la punta, dado que produce un rápido enfriamiento del líquido durante la colada, resultando poco práctico, a pesar de ser aquel de menor nivel de turbulencia.

Es por esta razón, que el canal que realmente es utilizado es el trapezoidal extendido, el cual, si bien con un ligero incremento en el nivel de turbulencia, es el de menor sección proyectada en la base, con un módulo en el tercio superior que duplica el valor del triangular, hecho que lo hace de uso práctico.

En la Fig.7-3 se representan los mismos perfiles de canal pero con un dimensionamiento de los canales tendiente a lograr un mismo nivel de turbulencia en los tres (Re=20000), lo que permite observar cómo se comporta el peso por unidad de longitud (25.4 mm). Comparando el clásico y el trapezoidal extendido, resulta más liviano este último.



	Clásico	Trapecio extendido	Triángulo
Área (mm <sup>2</sup> )	942	544	450
Perímetro (mm)	123	123	123
Módulo (cm)	0.77	0.44	0.37
Reynolds (Re)	20353	20395	20378
Peso (g/25.4mm)	170	98	71

Nota: esta tabla es para un Re en el canal de distribución aproximadamente CONSTANTE

Fig. 7-3: Tres secciones diferentes de canales de distribución

### Comentarios sobre el Número de Reynolds Re o $N_R$ :

Este concepto es aplicable a todo sistema de canales de distribución donde el metal en la sección fluida llena completamente el canal. El metal fundido puede fluir ya sea de una manera quieta, aerodinámica, laminar o con varios grados de turbulencia. En el flujo laminar las partículas siguen un recorrido bien definido, sin turbulencia. En el flujo turbulento, el recorrido de las partículas líquidas se realizará cruzándose unas con otras en un modelo intrincado de líneas entrelazadas con remolinos (corrientes circulares). El grado de turbulencia puede variar ampliamente, desde uno muy ligero, hasta otro claramente violento, dependiendo de las condiciones del flujo.

La caracterización del flujo de líquidos, incluido el metal fundido, dentro de un canal es llevada a cabo mediante un número adimensional llamado Número de Reynolds (Re o  $N_R$ ). Este número se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$Re = Vd/\nu$$

Donde:

V = velocidad del líquido (cm/s)

d = diámetro del canal (cm)

$\nu$  = viscosidad cinemática del líquido (cm<sup>2</sup>/s)



En el caso de los canales con secciones transversales no circulares,  $d$  se toma como igual a 4 veces el radio hidráulico o sea:

$$d = \frac{4 \times \text{área transversal}}{\text{perímetro de la sección transversal}}$$

El trabajo en la práctica experimental ha mostrado que, para un  $Re$  de 2000 ó menor, el flujo invariablemente es suave o laminar. Cuando el  $Re$  es mayor que 2000 pero menor que 20000, el flujo es turbulento. Finalmente, si excede los 20000, la turbulencia es severa. Estas variaciones en el flujo son ilustradas en la Fig. 7-4.

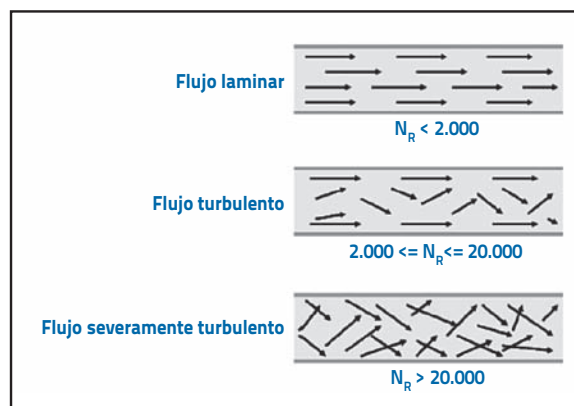


Fig. 7-4: Flujo laminar versus turbulento (esquemático)

Para la mayoría de las situaciones prácticas de las fundiciones de piezas metálicas, el  $Re$  es considerablemente más grande que 2000 y por consiguiente, se presenta el flujo turbulento, porque las velocidades son altas.

Afortunadamente para el fundidor, ha sido reconocido que ocurren dos niveles de turbulencia. Cuando  $Re < 20000$ , existe una capa límite de metal sin alteración, sobre la superficie de la corriente. La turbulencia queda entonces confinada a la parte central del flujo. Este tipo de flujo turbulento, es considerado relativamente inofensivo, porque la capa superficial no se corta, evitando el arrastre de aire o gas. También, la erosión de la arena de moldeo es reducida o eliminada. Por el contrario, cuando el  $Re$  supera los 20000, la capa superficial de la corriente se corta, teniendo lugar una severa turbulencia. Bajo estas condiciones de flujo, es probable que ocurra la formación de escoria (masa de óxidos), arrastre de aire, y gases de molde (se incrementa el riesgo de erosión, en los moldes de arena).

Puesto que el número  $Re$  es empleado para predecir el grado de turbulencia en una corriente fluida, se usa para diseñar sistemas de colada efectivos y eficientes. Los sistemas de colada son diseñados para minimizar la turbulencia, por lo cual siempre se desea un  $Re$  tan bajo como sea posible.

#### PASO 4) OPTIMIZAR LOS TIEMPOS DE COLADA. COLADO SECUENCIAL:

El líquido nodular debe ser colado rápidamente, no solo para evitar *uniones frías* en la pieza, como ocurriría con cualquier aleación, sino también para que dicho líquido de características hipereutécticas, no comience a formar nódulos primarios en el líquido durante la colada, ya que esto incentivaría un comportamiento, mucho más *contractivo*, y como consecuencia directa de ello, se transformaría en generador de rechupes primarios.

Cuando se trabaja con máquinas moldeadoras utilizando moldes de gran tamaño, surge la necesidad de colocar la mayor cantidad de cavidades por molde, si el objetivo es lograr un diseño de alto rendimiento.

El hecho de colar muchas cavidades rápidamente en cualquier molde, requiere contar con canales gruesos y muy pesados, para poder proveer rápidamente de mucho líquido. Sin embargo, esto se contradice con el logro de un alto rendimiento.

Para conjugar ambas opciones, como lo son el alto rendimiento y una rápida colada, recurrimos a la única forma de lograrlo: un alto rendimiento con muy bajos tiempos de colada puede darse eficientemente a través de un sistema de *colada secuencial*, principalmente disponiendo los moldes en forma vertical (tal como se observa en la secuencia de las Fig. 7-5, 7-6, 7-7).



Fig. 7-5: Colada secuencial vertical, nivel 1



Fig. 7-6: Idem nivel 2

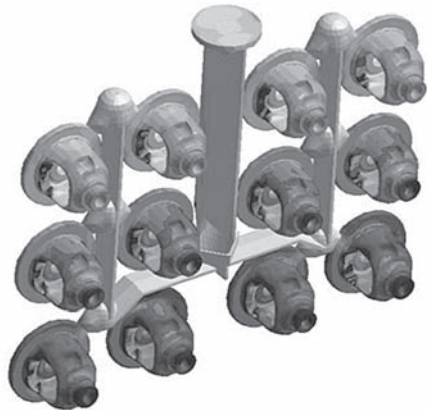


Fig. 7-7: Idem nivel 3

En las Fig. 7-5 se observa cómo es posible empleando un sistema de colada muy liviano y *secuencial* colar un nivel completo en solo 3.5 s. En la Fig. 7-6 un segundo nivel en 4.1 segundos, y en la Fig. 7-7 se puede colar el tercer nivel en 4.6 segundos.

De haberse aplicado un sistema convencional de colado simultáneo, este mismo sistema hubiese completado el llenado de todas las cavidades en 12.2 segundos, generando así, según el simulador, una diferencia de temperatura entre el primer y último líquido en entrar a una misma cavidad superior a los 100 °C, rango que, en materia de hierro

nodular, nunca debería superar los 50 °C. Al aplicar el sistema secuencial, la diferencia de temperatura en una misma pieza, según la misma simulación, resultaría de solo 15 °C aproximadamente.

Esta pequeña diferencia de temperatura, al poder llenar una misma cavidad con tiempos y turbulencia bajos, hace a este sistema de colado térmica y metalúrgicamente muy estable.

#### PASO 5) CONTAR CON MÓDULOS DE LOS CANALES QUE MINIMICEN LAS PÉRDIDAS DE TEMPERATURAS:

Durante el diseño de un sistema de alto rendimiento, la longitud de los canales debe ser lo más corta posible, y su módulo geométrico debe guardar un equilibrio entre el más bajo (para que no pese demasiado), y otro que, aunque bajo también, no lo sea tanto que enfríe demasiado al líquido durante la colada.

El factor dinámico que está presente durante el proceso de llenado del molde, determinado por la velocidad del flujo del líquido, le aporta al módulo geométrico (que empieza a enfriarse cuando el flujo de colada finaliza), ciertos valores que deben ser evaluados mediante simuladores, en caso de pretender encontrar el valor óptimo, y teniendo como variable a cumplimentar la correspondiente a la **turbulencia**.

#### PASO 6) UTILIZAR MAZAROTAS COMO COMPENSADORAS DE CONTRACCIÓN/ EXPANSIÓN:

Las mazarotas utilizadas como proveedoras de líquido deben ser orientadas a compensar las variaciones de presión que ocurren durante el proceso de solidificación.

Si lo que se busca es alcanzar alto rendimiento, es preferible el uso de manguitos exotérmicos de bajo volumen pero con elevado módulo térmico, los cuales ocupan menor espacio en la placa, a la vez que propician aumentar la posibilidad de incorporar un mayor número de cavidades.

#### PASO 7) UBICAR LAS MAZAROTAS EN ÓPTIMA POSICIÓN:

La ubicación de la mazarota surge del análisis de la distribución de módulos que presente cada pieza, considerando el concepto de *unidades de alimentación*, donde la solidificación del módulo significativo menor (uno de los primeros en solidificar), puede "aislar" a otras zonas de la pieza, que deberán ser asistidas por mazarotas, o en su defecto, autoalimentadas por la expansión del propio líquido.

## PASO 8) UTILIZAR UNA MAZAROTA PARA MÁS DE UNA PIEZA CUANDO SEA POSIBLE:

Mientras el diseño de la placa de moldeo lo permita, un aspecto que nos lleva a mejorar el rendimiento es el hecho de compartir una mazarota con dos o más piezas, de ser posible.

## PASO 9) UTILIZAR UNA MAZAROTA EN LA PARTE SUPERIOR O DE TOPE:

En sistemas de moldeo vertical esto es relativamente sencillo pero, en un sistema de moldeo horizontal, la situación se torna muy complicada. En caso de aplicar el concepto de las unidades de alimentación, es muy probable que sea necesario recurrir a los manguitos exotérmicos de tope, colocados en el modelo antes que las piezas sean moldeadas, para que queden insertados en la arena del propio molde.

## PASO 10) UTILIZAR UNA MAZAROTA CALIENTE:

Las mazarotas calientes, que reciben su nombre por ser llenadas con el líquido caliente tomado directamente del sistema de colada, en la práctica se comportan en forma más eficiente, ya que elevan el valor del módulo térmico, para un mismo módulo geométrico.

En caso de no ser posible ubicar tal mazarota como caliente, o sea que esta no pueda ser conectada directamente al sistema de alimentación, habrá que dotar a la pieza de un manguito exotérmico, que permita elevar el módulo térmico, para igual módulo geométrico.

## 8. ALTO RENDIMIENTO EN LA PRÁCTICA

En el final de la década de los años setenta y comienzos de los ochenta surgieron investigadores dedicados al hierro nodular que proponían métodos dirigidos a elevar el rendimiento metálico de los diseños mediante la aplicación de un particular método de cálculo de los sistemas de colada y alimentación.

En esta propuesta se ponía como condición para alcanzar un resultado exitoso que el líquido con que se debería colar tendría que ser de una alta calidad metalúrgica, situación que en la práctica no tuvo la aceptación esperada debido a lo inestable que se tornaba este método en cuanto a la reiterada presencia de defectos en las piezas.

En los años ochenta (en una pequeña planta de fundición), y luego en los años noventa (en una gran planta de fundición nodular automotriz), retomamos esta muy buena idea, con el objetivo de desarrollarla en forma experimental. Pretendíamos evaluar la verdadera posibilidad de implementarla en piezas con rentabilidad comprometida, mediante la optimización de la cantidad de líquido, para elevar así el rendimiento, y hacer más rentable la planta.

Al comenzar con las primeras corridas de prueba, nosotros y el resto de los metalurgistas que intentaron implementar este método obtuvimos piezas donde algunas resultaban con muy buenos resultados y otras con defectos de solidificación, los que surgían espontáneamente, sin que se hubiera realizado cambio alguno, tanto en el proceso como en las materias primas.

Con el fin de averiguar el posible origen de tal pérdida de estabilidad que la aplicación de este método generaba, se comenzó a realizar una serie de estudios con la ayuda de tesisistas de grado en ingeniería en metalurgia.

En el inicio del estudio se analizó bajo que circunstancias, el nuevo sistema de colada y alimentación propuestos, presentaba esas espontáneas etapas de inestabilidad que particularmente se mostraban sin cambios en las variables normalmente utilizadas como control al proceso en la rutina productiva. Nos estamos refiriendo a la composición química, al valor del % de CE, a la temperatura, al tiempo de colada y al nivel de inoculación, entre otras variables clásicas utilizadas como control.

Del análisis de las coladas estudiadas se pudo determinar que la aparición de los defectos espontáneos en las piezas no respondían a un particular comportamiento del *sistema de colada* (el cual permanecía por su propia conformación invariable), y que su formación se circunscribía a determinadas coladas (las que particularmente respondían perfectamente a los parámetros requeridos por el proceso en todas sus variables).

De lo mencionado anteriormente se desprende que, en un proceso llevado a cabo bajo condiciones de producción totalmente normales y en el que se utilice un *sistema de colada* de alto rendimiento, es posible lograr piezas sanas siempre y cuando el comportamiento dado por la forma que asuma el líquido a solidificar (conocido como *calidad metalúrgica*), se complemente con los requerimientos generados por el propio *diseño de la pieza* que se está colando. Se conforma así un grupo de factores con real capacidad de influencia, sobre los resultados finales obtenidos en las piezas.

Por lo tanto, para poder acceder a un sistema de alto rendimiento (donde su comportamiento sea tan estable que permita poder ser utilizado como método de producción), libre de los típicos defectos atribuidos a la solidificación (tales como rechupes primarios y secundarios, depresiones superficiales, zonas porosas, etc.), es necesario conocer en detalle e individualmente, cada uno de los siguientes factores, presentes en la cavidad del molde:

- La calidad metalúrgica del líquido
- La influencia del diseño de la pieza sobre el comportamiento del líquido durante la solidificación.
- La influencia del diseño del sistema de colada y alimentación sobre el comportamiento del líquido durante la solidificación.

## 9. FACTORES CON CAPACIDAD DE MODIFICAR EL COMPORTAMIENTO DEL LÍQUIDO AL SOLIDIFICAR

La solidificación del líquido nodular es un proceso mucho más complejo de lo que generalmente el fundidor considera, por el hecho de estar conformado por una serie de factores que se interrelacionan entre sí. Estos se afectan mutuamente y, si sus comportamientos se complementan, se logra el equilibrio necesario para producir piezas libres de defectos de solidificación. Por el contrario, si no se complementan, el equilibrio solo se restablecerá con la formación de algún efecto compensatorio.

Una pieza sin defectos necesariamente es el producto de un líquido que, al solidificar, ocupó un volumen igual a la cavidad del molde, y muy similar al requerido por el diseño de la propia pieza. En efecto, la falta de líquido (producto de la presencia de una mayor contracción a lo esperado), generará rechupes por falta de material para completar el volumen de la pieza, o bien propiciará la formación de una burbuja de gas (*blowhole*), debido a la existencia de una presión negativa, resultante de un espacio libre dentro de la cavidad del molde. Dicha depresión, creada por contracción del líquido durante la solidificación, es la que forma la burbuja.

En cambio, un líquido cuyo comportamiento al solidificar sea expansivo, generará dentro de la cavidad del molde una elevación de la presión. Al tratarse de un molde de arena, este se deformará bajo la fuerza que tal presión genera, aumentando el volumen de la cavidad. Como el agrandamiento ocurrirá durante el proceso de la solidificación eutéctica, donde el líquido comienza a ser pastoso, al sistema de colada y alimentación le será imposible proveer el líquido necesario, para compensar el aumento proveniente de esa expansión de solidificación.

En ambas situaciones, la solidificación ocurrió fuera del equilibrio requerido, para que la pieza solidifique libre de defectos.

### LA CALIDAD METALÚRGICA DEL LÍQUIDO

Si bien los precursores del método para lograr el alto rendimiento fijaban como condición para obtener buenos resultados la necesidad de **contar** con un líquido de alta calidad metalúrgica, la dificultad radica en el hecho de que no existe ningún método que permita poder medir esta variable. Por lo tanto, solo cabe estimarla, pero esta tarea para un fundidor, es muy difícil de implementar en la práctica como variable de control.

De acuerdo con nuestra experiencia, la calidad metalúrgica de un líquido nodular radica en el tipo de comportamiento que asume el líquido durante su solidificación. A diferencia del comportamiento presentado por los aceros o cualquiera de los metales comúnmente utilizados en la industria al solidificar, el nodular puede poseer un comportamiento desde *contractivo* (como la generalidad de las aleaciones), hasta *expansivo* (una particular forma de solidificar que solo presenta el hierro nodular y unos pocos metales y aleaciones durante su solidificación).

Mediante un método que desarrollamos con la finalidad de poder determinar cuál era el verdadero comportamiento que asume el líquido nodular que usábamos para colar (método que explicaremos en detalle en el apartado 10), pudimos determinar que el hierro nodular, al solidificar dentro de la cavidad del molde, puede asumir un comportamiento *variable*.

Esta característica es propia de cada líquido y, de acuerdo al tipo y magnitud de la variación volumétrica que presente, se lo calificará de acuerdo a un rango que va desde la *alta* calidad metalúrgica (cuando su comportamiento posea una tendencia a ser expansivo) hasta una *pobre* o *baja* calidad metalúrgica (cuando ese mismo comportamiento tienda a ser de contractivo a muy contractivo).

¿Cuál es la mirada de los fundidores?: esta dualidad de comportamientos muy disímiles entre sí, se pone en evidencia en la práctica a través del nivel de piezas con defectos alcanzado durante las diferentes coladas. Si ese nivel supera el porcentaje presupuestado, la calidad metalúrgica del líquido se considerará *baja* para esa pieza, mientras que para aquellas coladas que no lo superen, se la considerará alta (notar la diferencia de concepto, en relación a lo expresado en el párrafo anterior).

Esta comparación no es válida para coladas llevadas a cabo sobre piezas diferentes, ya que la práctica ha demostrado que un mismo líquido puede comportarse como de *alta* calidad metalúrgica en un tipo de diseño de piezas, así como de *baja* calidad en otros tipos de piezas, cuando en las piezas haya presencia de defectos atribuibles a la solidificación siendo que el líquido es el mismo.

Esto pone en evidencia que la calidad metalúrgica de un líquido nodular no puede ser calificada por el método basado en los resultados obtenidos sobre las piezas, ya que como hemos visto, esto podría dar un resultado muy diferente según sea el diseño de cada una de ellas.

Es por eso que, al momento de definir una calidad metalúrgica del líquido, debemos tener en cuenta cual puede ser el resultado que un líquido determinado pueda generar sobre un tipo de diseño de las piezas, como así también la influencia que sobre ese mismo comportamiento ejerza el sistema de colada y alimentación que lo asista.

## LA INFLUENCIA DEL DISEÑO DE LA PIEZA

Todo fundidor, en algún momento, se habrá encontrado en su rutina con la situación que determinadas piezas se tornan más propensas a formar defectos de solidificación que otras, aun al ser coladas con el mismo líquido. Esta situación ocurre incluso en piezas muy similares en diseño, con diferencias de forma que muchas veces pueden pasar desapercibidas.

Este escenario es producto de la incidencia que ejerce el diseño de cada pieza sobre el comportamiento que asume el líquido al solidificar, influenciado por el valor de los módulos y los volúmenes que conforman la pieza. Por lo tanto, el solo hecho de que los diseños de las piezas sean diferentes, generará en el líquido un comportamiento también distinto.

Por todo lo dicho, la calidad metalúrgica es solo uno de los elementos que intervienen en la conformación del verdadero comportamiento final que asumirá ese líquido. El sistema de colada y de alimentación también será parte crucial del comportamiento final que adquirirá el líquido al solidificar, situación que, en la práctica, se verá reflejada, en el nivel de la calidad metalúrgica alcanzada.

## EL DISEÑO DEL SISTEMA DE COLADA Y ALIMENTACIÓN

Modificar el sistema de alimentación y colada es una práctica extensamente aplicada en la rutina productiva, cuando se observa la presencia reiterada de un determinado tipo de defecto. Esto, si bien permite hacer mucho más estable el comportamiento del líquido, es una modificación del proceso, que no siempre elimina definitivamente su aparición. En efecto, con el tiempo, ese mismo sistema de colada y alimentación muy probablemente volverá a presentar este u otro defecto de solidificación similar, aun cuando se cuele la misma pieza con el mismo líquido.

Esta situación pone en evidencia que el sistema de colada y alimentación, al igual que el diseño de la pieza, tienen la capacidad de afectar el comportamiento final asumido por el líquido al solidificar. Sin embargo, en razón de sus características físicas, y al estar conformados por elementos rígidos, ambos serán de comportamiento repetitivo y constante en el tiempo.

Por lo tanto, el hecho de que una pieza de determinado diseño haya salido bien con un determinado sistema de colada y alimentación y luego, con el correr del tiempo, haya presentado problemas, no significa que estos dos elementos hayan sido el origen de la generación de algún defecto típico de solidificación.

En consecuencia, tal formación de un defecto tiene su origen en un cambio del comportamiento del líquido al solidificar. En otras palabras, **se produjo una variación en su calidad metalúrgica**, debido a la modificación de alguna variable asociada con el comportamiento del líquido, y que en consecuencia, alteró su calidad y el resultado final.

Debido a lo complejo que resulta poder colar hierro nodular para moldear piezas libres de defectos, necesariamente debemos considerar en forma conjunta los tres factores propuestos. Estos factores, al interactuar entre sí, generan un tipo de comportamiento particular para cada combinación. De los tres, solo el comportamiento asumido por el líquido, podrá funcionar como una variable.

## RELACION ENTRE ESTOS FACTORES

En la Fig. 9-1, en primer término, observamos el comportamiento con relación a las variaciones volumétricas que presentan las diferentes calidades metalúrgicas representadas por las líneas de tendencia baja (inferior), alta (superior) o promedio (central).

Otro aspecto importante es observar la magnitud en las variaciones volumétricas (representadas en el eje Y) que experimenta el líquido, en función del valor del módulo que lo enfría (representado en el eje X), y sus respectivas ecuaciones, que definen las distintas curvas según sea la calidad metalúrgica del líquido.

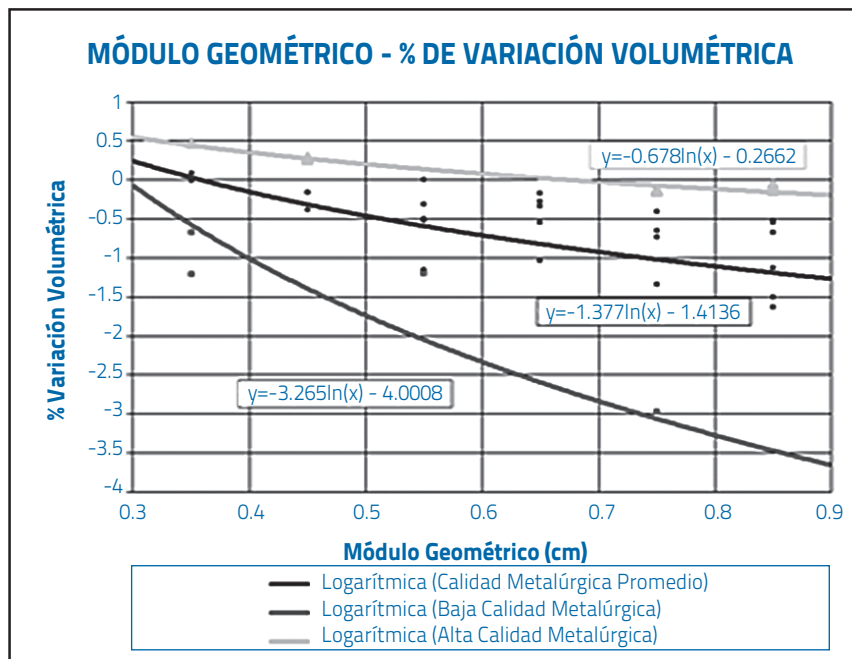


Fig. 9-1

## 10. CÓMO SOLIDIFICA EL HIERRO NODULAR DENTRO DE LA CAVIDAD DEL MOLDE

Resumiremos ahora en un ejemplo lo hasta aquí desarrollado. Así podremos apreciar, como influyen cada uno de los factores mencionados, como modificadores del comportamiento final asumido por el líquido, en una pieza de cierta complejidad de hierro nodular. Para ello trabajaremos con una pieza automotriz, a la que descompondremos en los diferentes módulos que la conforman, así como en los volúmenes asociados a cada módulo.

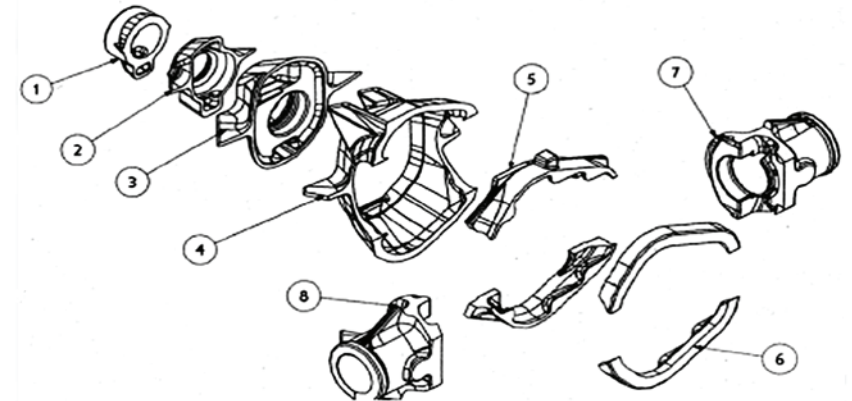


Fig. 10-1: Carcasa diferencial constituida por 8 secciones

En la Fig. 10-1 hemos tomado una carcasa diferencial estándar. La misma fue segmentada en ocho módulos. Cada uno corresponde a la relación entre el volumen y la superficie de enfriamiento de cada corte virtual, en que hemos fraccionado la pieza a estudiar y representado en 3D en la Fig. 10-1.

El seccionamiento ha sido efectuado de manera tal que, cada uno de los cortes representa una determinada parte de la pieza mediante un módulo y un volumen asociado (habrá un par de valores para cada corte).

Con los valores obtenidos, se elabora la tabla siguiente, donde se presentan los volúmenes, las superficies de enfriamiento, los módulos (relación volumen y superficie de enfriamiento), y la fracción volumétrica (volumen de cada corte referida al volumen total de la pieza).

Sección	Volumen	Superficie de enfriamiento	Módulo	Fracción volumétrica
1	164983	294070	0,56	0,04
2	209984	414180	0,51	0,05
3	599476	1084580	0,55	0,13
4	681967	1678970	0,41	0,15
5	464461	653260	0,71	0,10
6	345257	549660	0,63	0,08
7	1028319	1209930	0,85	0,23
8	1029157	1211510	0,85	0,23
Total	4523604	7096160	0,64	1,00

Fig. 10-2: Tabla de módulos y fracciones volumétricas de la carcasa en estudio

Con el valor de cada volumen y módulo, elaboramos una distribución de cuerpos, que representan cada uno de los diferentes cortes virtuales que realizamos sobre el diseño original de la pieza. Al agruparlos según su distribución original, podemos evaluar en forma rápida cuál de todos ellos será el primero en solidificar (0,41) y el último en hacerlo (0,85 + 0,85). Los individualizaremos de la siguiente manera: el módulo significativo menor corresponderá al menor valor de módulo, asociado al mayor volumen identificado (corte 4 en el ejemplo), y el módulo significativo mayor, corresponderá al mayor valor de módulo asociado, al mayor de los volúmenes (cortes 7 y 8). Por tratarse de una pieza simétrica, se halla conformada por dos módulos significativos mayores, separados y de igual valor.

En la Fig. 10-3 hemos representado toda la pieza por medio de sus volúmenes virtuales respectivos, ubicados en la misma secuencia que la correspondiente al diseño de la pieza original.

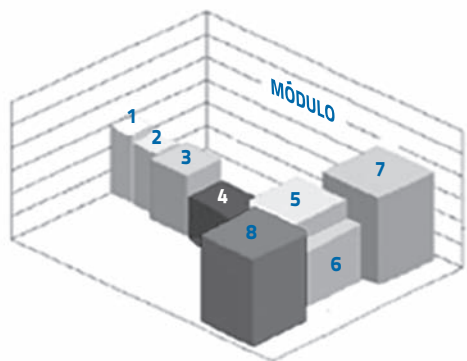


Fig. 10-3: Representación de la carcasa mediante sus volúmenes constitutivos

Con este mecanismo podemos decir que conocemos la pieza aunque no sepamos todavía como solidificará, ya que esto dependerá de la calidad metalúrgica del líquido y del sistema de colada que la asista.

## EL DISEÑO DE LA PIEZA, Y LA CALIDAD METALÚRGICA DEL LÍQUIDO

Ya hemos analizado el diseño de la pieza, a través del valor de sus propios módulos y volúmenes que la conforman. Ahora la relacionaremos con la calidad metalúrgica del líquido, y con cada uno de sus módulos.

Si retomamos las curvas de tendencia de las variaciones volumétricas del líquido al solidificar de la Fig. 9-1 (ver apartado 9), basada en módulos puros, pueden ser representadas a través de las ecuaciones correspondientes, a las diferentes calidades metalúrgicas mostradas en dicho gráfico (siendo FV= Fracción Volumétrica). De este modo tenemos que:

$$y = -0,678 \ln(x) - 0,2662 * FV \text{ Alta}$$

$$y = -1,377 \ln(x) - 1,4136 * FV \text{ Promedio}$$

$$y = -3,265 \ln(x) - 4,0008 * FV \text{ Baja}$$

Nota: recordemos que, x= módulo e y= variación volumétrica.

La aplicación de estas ecuaciones representativas de las diferentes calidades metalúrgicas del líquido disponibles, al estar afectadas por la Fracción Volumétrica de cada corte, nos va a permitir ponderar el comportamiento asumido por el líquido con el que se cuela la pieza.

En la Fig. 10-4 podemos observar las variaciones volumétricas que surgen de la aplicación de las ecuaciones para las diferentes calidades metalúrgicas, ponderadas por sus volúmenes. De allí se desprende que, aun utilizando el líquido de la mayor calidad metalúrgica, el comportamiento del líquido dentro de la cavidad del molde resultará contractivo, como se puede observar en la última fila de valores.

Variaciones volumétricas (%)			
Sección	Calidad Metalúrgica Baja	Calidad Metalúrgica Promedio	Calidad Metalúrgica Alta y módulo de canal 0,2
1	-0,080	-0,020	-0,013
2	-0,080	-0,020	-0,014
3	-0,270	-0,080	-0,047
4	-0,160	-0,030	-0,027
5	-0,300	-0,100	-0,051
6	-0,190	-0,060	-0,033
7	-0,790	-0,270	-0,136
8	-0,790	-0,270	-0,136
Variación Total de Volumen	<b>-2,660</b>	<b>-0,850</b>	<b>-0,457</b>

Fig. 10-4: Tabla de variación volumétrica para los 8 cortes y distintas calidades del líquido

En la cuarta columna de la tabla se observa que, aún una calidad metalúrgica alta, con un módulo de ataque de 0,2\*cm, que define un particular diseño del sistema de colada, todavía no alcanza para que ese líquido solidifique ligeramente expansivo, para obtener piezas sin defectos de solidificación.

## EL DISEÑO DE LA PIEZA, LA CALIDAD METALÚRGICA DEL LÍQUIDO Y EL SISTEMA DE COLADA Y ALIMENTACIÓN

Ya relacionamos la calidad metalúrgica del líquido con el diseño de la pieza, ahora incorporaremos el sistema de colada y alimentación como el otro factor con capacidad de modificar el comportamiento final que asumirá el líquido dentro de la cavidad del molde.

A los valores de la Fig.10-4 les hemos agregado la influencia que genera el sistema de colada y alimentación, sobre el comportamiento final asumido por el líquido, conformándose el esquema completo de los cálculos para todo el sistema y que ha sido volcado en la tabla de la Fig. 10-5.

Variaciones volumétricas (%)						
Sección	C.M. Baja	C.M. Prom	C.M. Alta 0,2	C.M. Alta 0,3	C.M. Alta 0,32	C.M. Alta 0,34
1	-0,080	-0,020	-0,013	0,005	0,008	0,012
2	-0,080	-0,020	-0,014	0,009	0,014	0,018
3	-0,270	-0,080	-0,047	0,018	0,031	0,044
4	-0,160	-0,030	-0,027	0,052	0,068	0,083
5	-0,300	-0,100	-0,051	-0,004	0,006	0,150
6	-0,190	-0,060	-0,033	0,004	0,011	0,018
7	-0,790	-0,270	-0,136	-0,035	-0,015	0,005
8	-0,790	-0,270	-0,136	-0,035	-0,015	0,005
Variación Total de Volumen	<b>-2,660</b>	<b>-0,850</b>	<b>-0,457</b>	<b>0,013</b>	<b>0,107</b>	<b>0,335</b>

Fig. 10-5: Tabla de variación volumétrica considerando el sistema de colada

En esta última tabla se han agregado las columnas 5, 6 y 7, donde solo resultan modificados los módulos de ataque del sistema de colada que se han ido incrementando desde el valor inicial de 0.2cm a 0.3cm, 0.32cm y 0.34cm.

Este simple cambio efectuado al módulo del ataque del sistema de colada de la pieza, al propiciar un aumento del tiempo de conexión entre el sistema de alimentación y la pieza, permitió modificar el comportamiento del líquido dentro de la cavidad del molde, haciéndolo más expansivo.

Con respecto a la influencia que el sistema de colada y alimentación ejerce sobre la forma de solidificar que asumirá la pieza, dependerá del tiempo que este sistema se mantenga conectado a la misma, el cual es función del módulo significativo menor (menor módulo de la pieza, con mayor volumen asociado) y estará entre los primeros en solidificar. Además, dado su mayor volumen entre sus pares, presurizará la cavidad del molde, durante su expansión eutéctica.

El modulo significativo menor de la pieza es aquel que tiene el comportamiento más expansivo, siempre y cuando el líquido se mantenga conectado al sistema de colada, durante la contracción Líquido/Líquido, y además sobre él se esté aplicando la presión metalostática. Dicho de otra forma, ocurrirá mientras el enfriamiento del líquido dentro de la cavidad, ocurra bajo una presión constante, la metalostática.

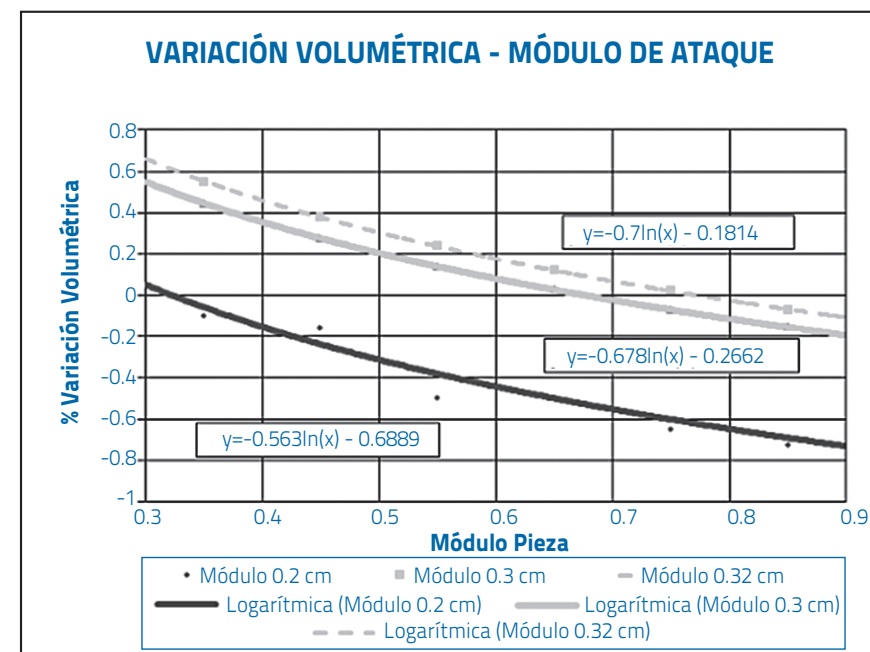


Fig. 10-6: Variación volumétrica para líquido de alta calidad según el ataque.

En la Fig.10-6, se puede observar el comportamiento del líquido de alta Calidad Metalúrgica con respecto al % de Variación Volumétrica, según sea el valor del módulo de ataque del canal de colada (0.2cm; 0.3cm; 0.32cm).

“Leyendo” el gráfico, mientras un módulo de 0.2cm en el canal de ataque, genera un comportamiento contractivo de -0.44 % en un módulo de la pieza de 0.60 cm, sobre ese mismo módulo, uno de 0.32cm para el canal de ataque genera un comportamiento expansivo de +0.20 %.



Para ello, el módulo del canal de ataque debe guardar una relación con el módulo significativo menor de la pieza, el cual estará entre los primeros en alcanzar la solidificación eutéctica, la cual deberá ocurrir sólo cuando el canal de ataque a la pieza este solidificado, para poder así retener la expansión típica de la solidificación eutéctica.

Para ello, el inicio de la solidificación eutéctica y la solidificación del canal de ataque deben guardar una relación como la mostrada en la Fig. 10-7. Allí se observan los módulos de ataque 0.30cm; 0.32cm y 0.34cm y su relación con el módulo significativo menor.

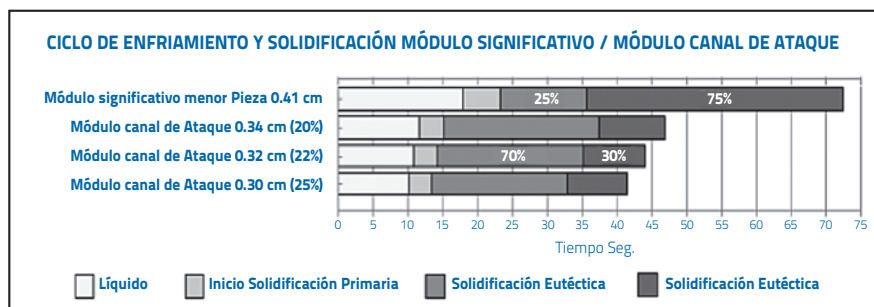


Fig. 10-7: Relación entre la solidificación eutéctica y la del canal de ataque

Nota a la Fig. 10-7: la primera solidificación eutéctica corresponde al 25% del tiempo de solidificación, mientras que la segunda, corresponde al 75% restante.

Como la solidificación de todo líquido Nodular ocurre en un periodo de tiempo, el canal de ataque a la pieza deberá estar un 75% solidificado cuando la expansión eutéctica comience a elevar la presión por expansión dentro de la cavidad del molde, situación que ocurrirá cuando la solidificación eutéctica del módulo significativo menor, se aproxime al 25%.

Este sencillo hecho hará más expansivo al líquido restante ubicado dentro de la cavidad del molde, debido a la expansión que el módulo significativo menor, genera sobre el resto de los módulos mayores que solidifican más lento. Por este motivo hemos elegido el módulo de 0.32cm, para un módulo significativo menor de la pieza de 0.41cm.

## 11. EJEMPLOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE ALTO RENDIMIENTO

En base a lo desarrollado en los apartados anteriores, sobre la posibilidad real de elevar el rendimiento en sus diferentes formas básicas, ya sea aumentando la cantidad de cavidades por molde (que en otras palabras significa más piezas por molde), y/o incrementando la relación entre la cantidad de metal transformado en pieza y el metal total colado en ese molde, mostraremos algunos ejemplos de piezas elaboradas con ambos métodos. Es decir, algunas han sido desarrolladas directamente aplicando el método de evolución del diseño, y otras aplicando el cálculo del sistema de colada y alimentación, que anteriormente hemos descrito.

### PRIMER EJEMPLO

En primer término, se trata de una carcasa de diferencial de vehículos automotores, que se venía elaborando con un herramental de tres figuras por molde, tal como es mostrado en la Fig. 11-1.

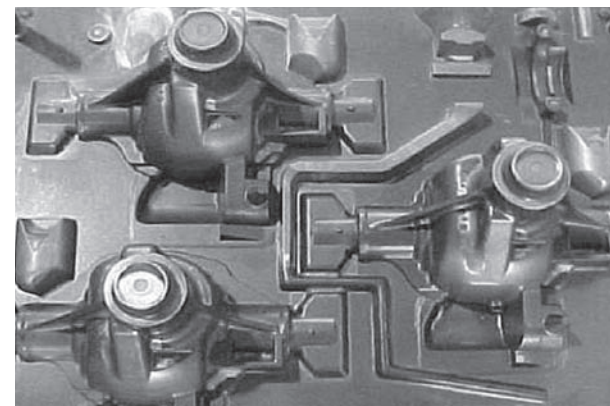


Fig. 11-1: Herramental con tres figuras de carcasa de diferencial

A esta pieza se le aplicaron todos los conceptos antes propuestos en este trabajo, con el único fin de elevar tanto la cantidad de cavidades por molde (para poder producir más piezas en un mismo molde), como también el rendimiento metálico (a través de una mayor cantidad del metal total colado por molde, que llega a transformarse en pieza).

En la Fig. 11-2 podemos apreciar el nuevo diseño del herramental de la misma pieza.

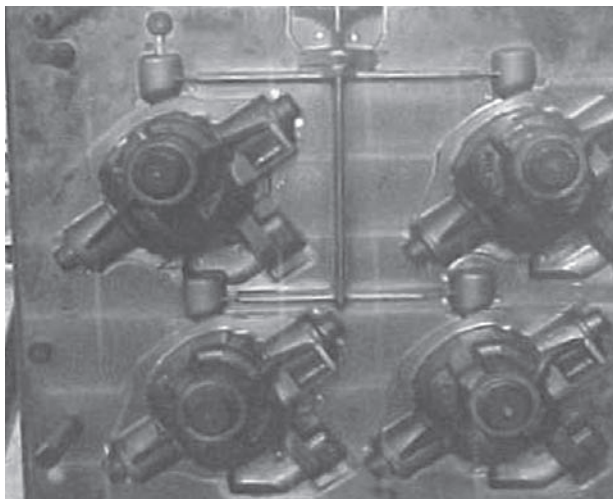


Fig. 11-2: Nuevo Herramental con cuatro figuras de carcasa de diferencial

Allí se puede observar la inclusión de una cuarta pieza en el mismo molde, así como la simplificación del sistema de alimentación, la reducción del tamaño de las mazarotas, y del espesor de los canales del sistema de colada y alimentación.

En la Fig. 11-3 se comparan ambos diseños, donde se evidencia el incremento tanto en el rendimiento de piezas por molde, como el rendimiento metálico.

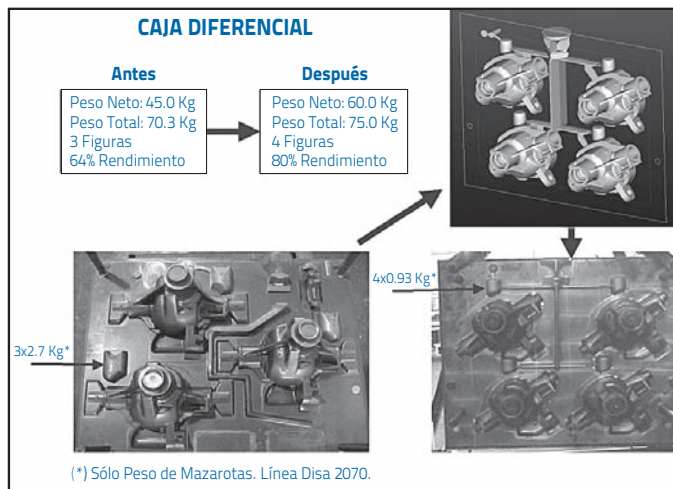


Fig. 11-3: Comparativo entre proceso original y de alto rendimiento

Se puede ver que el rendimiento en cantidad de piezas por molde pasa de 3 a 4 equivalentes, es decir un 33% más de piezas, para la misma cantidad de moldes, lo que implica un aumento de igual porcentaje en la capacidad instalada de moldeo.

Con respecto a la cantidad de metal, empleando solamente 4.7 kg más de metal, es posible obtener una pieza más por molde. Como su peso individual es de 15 kg, es posible vender un 33% más de piezas usando solo un 6.68% más de metal, elevándose así el rendimiento metálico total del 64% al 80% y consecuentemente, elevando la rentabilidad de manera significativa (ver Apartado 13)

## SEGUNDO EJEMPLO

Se trata de una copa diferencial, también conocida como porta-engranaje o engrane, que mostramos en la Fig. 11-4.

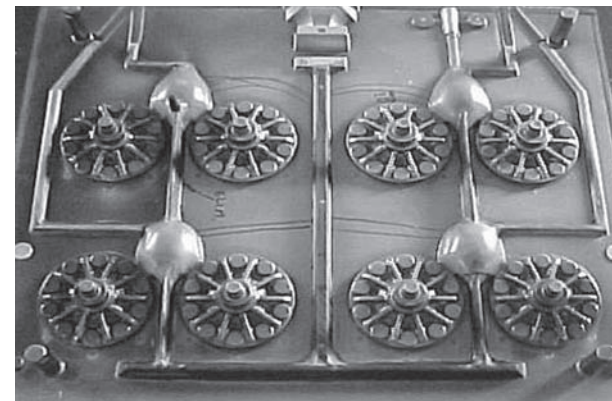


Fig. 11-4: Herramental con ocho figuras de copa diferencial

Aquí vemos un herramental con ocho cavidades por molde, cuyo rendimiento, tanto en cantidad de piezas por molde, como en cantidad de metal colado por pieza, se pretende elevar.

En la Fig. 11-5 es posible observar la nueva distribución, en la cual se incrementó la cantidad de piezas por molde, y se disminuyó la cantidad de metal empleado por pieza.

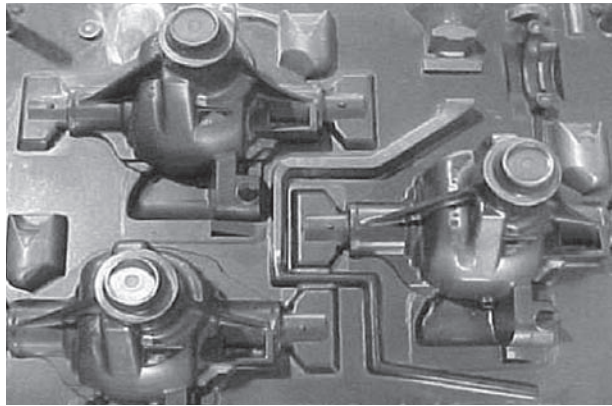


Fig. 11-5: Nuevo Herramental con doce figuras de copa diferencial

En la Fig. 11-6 mostramos una comparación entre ambos diseños, donde se puede apreciar, tanto el incremento en el rendimiento de piezas por molde, como la disminución en la cantidad de metal colado por pieza.

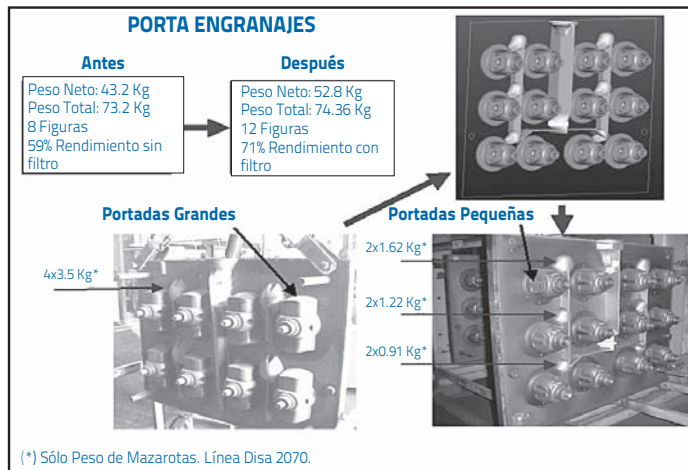


Fig. 11-6: Comparativo entre proceso original y de alto rendimiento

Del ejemplo anterior se puede apreciar el aumento en el rendimiento a través de una mayor cantidad de piezas por molde. En efecto, se pasó de 8 a 12 equivalentes, es decir un 50% más de piezas para la misma cantidad de moldes. Esto implica un aumento del 50% en la capacidad instalada en moldeo, sin necesidad de invertir en equipos.

Con respecto a la cantidad de metal requerido, con solo incrementar 1.16kg de metal por molde, fue posible obtener cuatro piezas más por molde, y vender un 50% más de piezas, elevándose el rendimiento metálico total desde el 59% al 71%.

### TERCER EJEMPLO

Se trata de una carcasa de diferencial modelo 80, para Pick Up, de 48 kg por pieza, para una cantidad de metal colado por molde de 100 kg, en la que se producía 1 pieza por molde tal como se muestra en la Fig. 11-7.

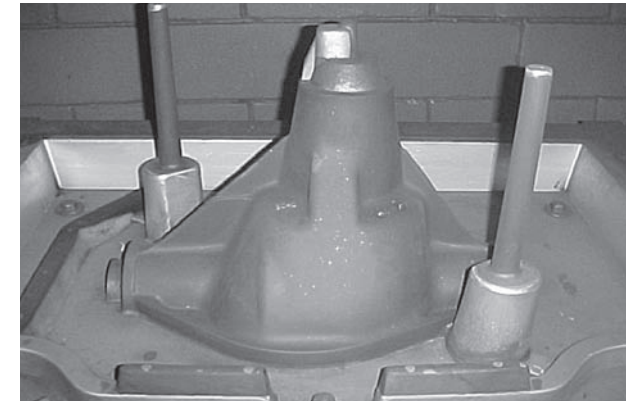


Fig. 11-7: Herramental con una figura de carcasa de diferencial mod.80

Se utilizaba un herramental diseñado en los EE.UU con tecnología obsoleta. Aplicando la metodología descrita, se decidió elevar tanto la cantidad de figuras por molde, como la cantidad de metal colado por pieza, lográndose desarrollar un nuevo herramental, tal como se muestra en la Fig. 11-8.

En el nuevo diseño se colocaron dos figuras por molde, y un sistema de colada y alimentación de alto rendimiento, que incrementó el rendimiento metálico del 50% al 74% y el de la cantidad de piezas por molde en un 100%.

En la Fig. 11-8 es posible apreciar como un diseño de herramental puede influir tan significativamente al aumentar en un 100 % la capacidad de moldeo de esta pieza.

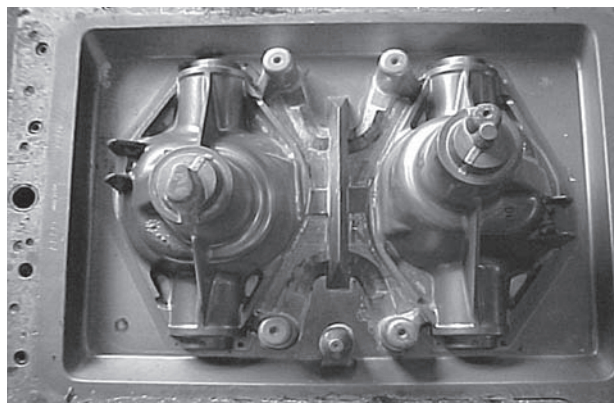


Fig. 11-8: Nuevo Herramental con 2 figuras de carcasa de diferencial mod.80

#### CUARTO EJEMPLO

En un momento de muy alta demanda, se le requirió a la planta donde realicé la mayoría de mis experiencias prácticas, la producción de una considerable cantidad de carcasas de diferencial, situación que demandaba una cantidad de moldes que superaba con creces la cantidad disponible. Esto nos embarcó en un desafío importante, que nos permitió volcar todos nuestros esfuerzos en su consecución.

El desafío implicaba poder colar una pieza que, por recomendaciones del fabricante de la máquina de moldeo ante su tamaño, solo permitía colocar una figura por molde. A pesar de esta recomendación fuertemente condicionante, se intentó diseñar un modelo con dos figuras, sin que se elevara descontroladamente el nivel de rechazo por defectos, tanto los de moldeo, como los de solidificación.

Con respecto a la posibilidad de poder tener bajo control los defectos de solidificación, de manera tal que no superaran el porcentaje permitido por los costos, sometimos el diseño de la pieza a lo antes propuesto. Esto nos permitió establecer cuál sería el comportamiento durante la solidificación, lo que determinó que podía ser producida mediante un sistema de colada y alimentación, sin que provocara un aumento del nivel de defectos por encima del rango presupuestado, quedando entonces sólo comprobar en la práctica, si podríamos producir con ese nivel de defectos fijados.

Ante tal incertidumbre, se dispuso asumir la situación y se diseñó el herramental de la Fig. 11-9, en la cual es posible apreciar que se trata de dos grandes figuras por molde y un sistema de colada y alimentación central de alto rendimiento.

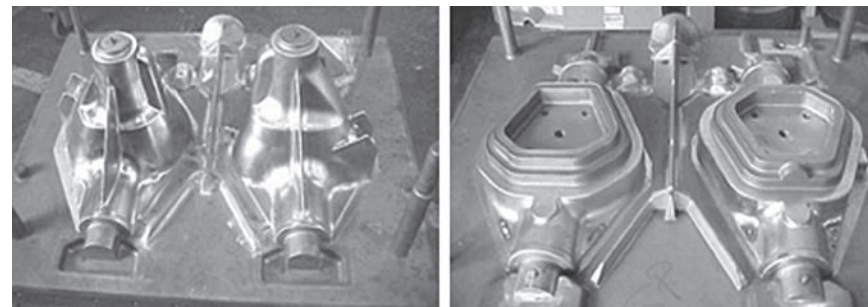


Fig. 11-9: Herramental diseñado bajo los conceptos del alto rendimiento

Una vez desarrollado el herramental bajo los esquemas mencionados, se lo sometió a las pruebas iniciales. Para nuestra sorpresa, la máquina de moldeo (Disa 2070 KB), se mostró amigable con el diseño de dos figuras. En cuanto al nivel de defectos por moldeo podemos decir que, si bien fue alto comparado con el convencional, no afectó los costos justamente por el elevado rendimiento alcanzado.

Como corolario, podemos decir que con este herramental se alcanzó un rendimiento del **85%**, con un **rechazo** interno del **7%**, donde más del **60%** tenía su origen en rotura de molde generado por fluctuaciones en la calidad de las arenas, con un **rechazo en cliente** por defectos de solidificación de **2630 ppm**.

De esta pieza se produjeron aproximadamente **300.000 unidades**, lo que generó un **ahorro** de alrededor de **160.000** moldes, situación que hizo posible que dicha pieza entrara en producción, esquema imposible con un diseño de una sola figura por molde. En términos productivos, esto equivaldría a unos **200** turnos de producción.

Así, este diseño permitió captar un negocio, aun sin contar con todos los moldes disponibles, lo que no hubiera sido posible de haber seguido las recomendaciones del propio fabricante del equipo de moldeo.

#### EL ALTO RENDIMIENTO Y LOS NIVELES DE PIEZAS RECHAZADAS

Es común que los fundidores, al momento de tener que decidir el tipo de sistema a aplicar en el desarrollo de los herramentales, probablemente recurran a uno del tipo tradicional, escudándose en que los sistemas de alto rendimiento normalmente se comportan mucho más inestablemente que los tradicionales. Esta situación realmente ocurría cuando se aplicaba un determinado tipo de sistema de colada y alimentación, sin poner atención en los efectos que sobre su funcionalidad origina la calidad metalúrgica del líquido y, por supuesto, el propio diseño de la pieza, tal como lo hemos demostrado.

## 12. DEFECTOS TÍPICOS DE SOLIDIFICACIÓN

La siguiente lista de defectos incluye los típicos que surgen con mayor frecuencia cuando se trabaja con diseños de alto rendimiento, debido a que todo el sistema se torna más sensible a cambios de comportamiento del líquido, en relación a las variaciones volumétricas, que el proceso de solidificación implica.

Dentro de esta lista básica, daremos alguna orientación sobre las fuentes que los originan, así como también cuál podría ser la forma de solucionarlos.

### RECHUPE PRIMARIO

Se lo denomina *primario* por formarse en la zona del último líquido en solidificar, el cual, debido a un cambio en el comportamiento del propio líquido colado, que solidifica más contractivo, y ante la imposibilidad que el sistema de alimentación provea el líquido faltante, se genera un volumen vacío, que normalmente aparece en zonas internas de la pieza.

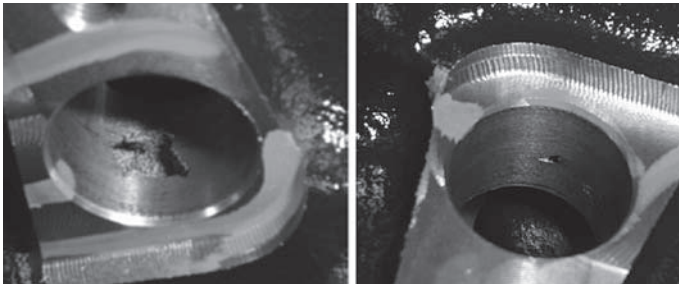


Fig. 12-1: Ejemplos típicos de rechupes primarios

En la Fig. 12-1 se observan los típicos rechupes de solidificación primarios en piezas automotrices, puestos en evidencia por mecanizado.

La aparición de este defecto en una pieza que normalmente se producía sin problemas, se debe a un cambio en el comportamiento del líquido durante la solidificación, en relación a las variaciones volumétricas.

Las piezas resultaron sub-alimentadas, cuya causa puede ser atribuida a una modificación en la inoculación, una variación en la calidad de las materias primas (re-carburantes, inoculantes), o incluso el haber colado el líquido a menor temperatura de la especificada.

En la figura anterior, el caso del defecto con la mayor cavidad se originó ya que no se respetó la relación de la carga al horno de fusión, donde el personal suplantó parte de la carga metálica basada en retorno por más acero modificándose la relación acero/retorno, alterando así el comportamiento metalúrgico asumido por el líquido en la solidificación, al tener que aumentar la cantidad de re-carburante, para mantener el porcentaje de carbono en el baño.

### RECHUPE SECUNDARIO

Su denominación de *secundario*, o también llamado falso rechupe, tiene su origen opuesto al anterior, ya que aparece, donde el líquido cambia a un comportamiento más expansivo durante la solidificación, el cual viene acompañado por elevadas presiones del líquido eutéctico en estas circunstancias, ocasionando una significativa elevación de la presión, generada por la propia expansión eutéctica, del último líquido en solidificar. Cuando por efecto de esta presión se agranda el molde, la presión dentro de la cavidad cae, y el último líquido no alcanza a compensar la contracción presente, en las pequeñas zonas calientes de la pieza.

En la Fig. 12-2 se observan otros clásicos defectos de solidificación en piezas automotrices, que en el caso de las fotografías, fueron puestos en evidencia por seccionamiento de la pieza para su control de sanidad.

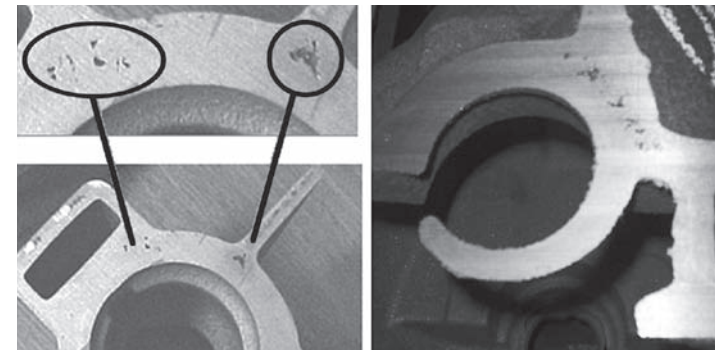


Fig. 12-2: Ejemplos típicos de rechupes secundarios

La aparición de este defecto, en piezas en la que normalmente no se generaba, se debe básicamente a un cambio que surge en el comportamiento del líquido durante la solidificación, asociado con variaciones volumétricas expansivas. Las piezas resultaron sobrealimentadas por un cambio en el sistema de colada, que fue reparado por daños en sus canales, causado por trozos de material metálico en las arenas de moldeo.

### CONTRACCIÓN

Como todos los defectos de solidificación (ver Fig. 12-3), responde a un cambio contractivo en el comportamiento del líquido, que tiene la particularidad de generar espesores muy finos de piel, donde tal contracción se refleja en alguna superficie de la pieza, mediante la conformación de una muy suave depresión.

La solución a este tipo de defecto consiste en modificar el comportamiento del líquido, haciéndolo algo más expansivo. Esto se logra aumentando la cantidad de nódulos por unidad de área, reduciendo el % de CE hipereutéctico a un valor más cercano al eutéctico, o utilizando re-carburantes de comportamiento más expansivo.

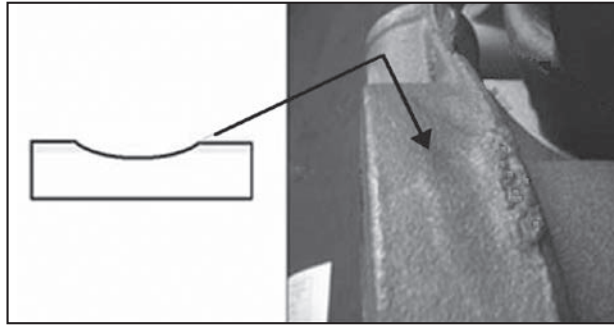


Fig. 12-3: Ejemplo típico de defecto superficial producido por contracción

## HINCHAMIENTO

Es un defecto de solidificación que responde a un cambio más expansivo en el comportamiento del líquido, y se produce cuando es colado en un molde de arena muy suave (poco compactada), que permite que la pieza crezca durante la solidificación, bajo la presión de expansión eutéctica.

En la Fig. 12-4 es posible observar la forma en que una pieza automotriz modifica sus cotas por hinchamiento, llevándolas incluso fuera de la tolerancia dimensional, con las consabidas dificultades que el exceso de sobre-material genera sobre las operaciones de mecanizado.

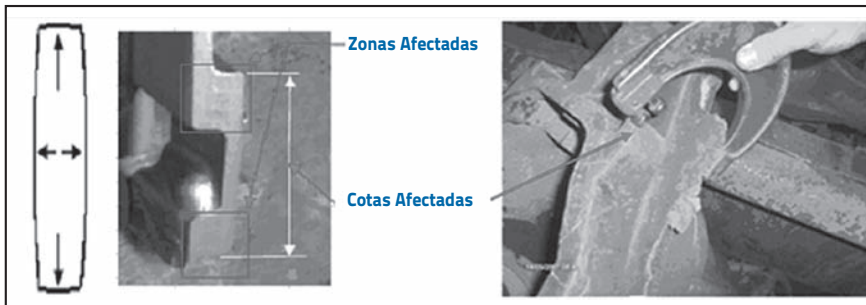


Fig. 12-4: Defecto típico por hinchamiento

El remedio contra la aparición de este tipo de defectos es hacer menos expansivo el líquido con que se cuela, ya sea, elevando el % CE, reduciendo la cantidad de nódulos por unidad de área, o disminuyendo la inoculación.

Otra solución para evitar tal deformación es elevar la densidad del molde; en otras palabras, hacerlo más resistente a la deformación (equivalente a un significativo aumento de dureza del molde, por mayor compactación).

## SOPLADURA POR GAS (BLOWHOLE)

En la práctica, este tipo de defecto ilustrado en la Fig. 12-5 suele ser atribuido a la presencia de gases disueltos en el líquido. Estos gases son generados básicamente por tres fuentes diferentes: por el noyo, por la elevada humedad de la arena, o por un muy elevado nivel de volátiles en las arenas de moldeo. En efecto, estas producen un burbujeo durante la colada, o cuando la cavidad, aún líquida, comienza a enfriarse.

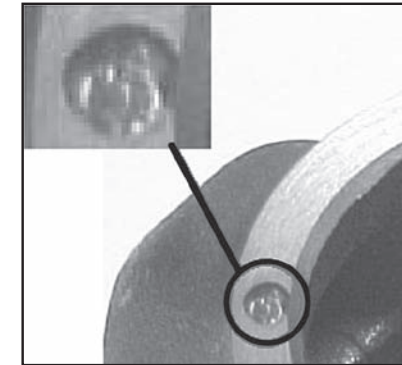


Fig. 12-5: Defecto típico por blowhole

Si bien los conceptos convencionales sobre el origen de tales defectos son válidos, el motivo real de formación de las burbujas de gas radica en otro factor, tanto o más importante que la propia fuente que lo origina, como es la presión existente sobre el líquido dentro de la cavidad del molde.

Resulta así, porque la formación de toda burbuja de gas requiere para prosperar, la presencia de una presión negativa dentro del hueco del molde. Por lo tanto, provocar una presión positiva durante la solidificación en su etapa eutéctica, limita fuertemente la formación de esta clase de defectos.

## EXUDACIÓN EUTÉCTICA

La exudación eutéctica es un defecto que genera confusiones al momento de definirlo. De hecho, se lo nombra indistintamente como escama, salpicadura, cáscara, o adherencia, cuando en realidad es un defecto formado por el efecto expansivo del último líquido que solidifica, en algún punto caliente de la pieza, encerrado por la propia piel ya solidificada.

Ante la gran presión que se desarrolla en esa zona, por la necesidad que tiene el líquido en solidificar, expulsando el carbono atómico en solución, este proceso estará inevitablemente acompañado por un aumento de volumen. Al no poder hacerlo, por no disponer de lugar, eleva la presión, hasta que se perfora la cáscara de metal solidificado, y se derrama parte del líquido eutéctico que se expande fuera de la pieza, bajando así la presión interna, y formando los nódulos eutécticos, que le permiten al líquido solidificar.

Una forma inequívoca de reconocer una exudación eutéctica es analizar químicamente la escama pegada a la pieza, y también el metal base en una zona cercana al defecto: una significativa diferencia en el valor de sus carbonos equivalentes, permitirá corroborar que se trata de ella.

En la Fig. 12-6 se puede apreciar este tipo de defecto, así como los análisis químicos realizados en la pieza y sobre la propia escama.

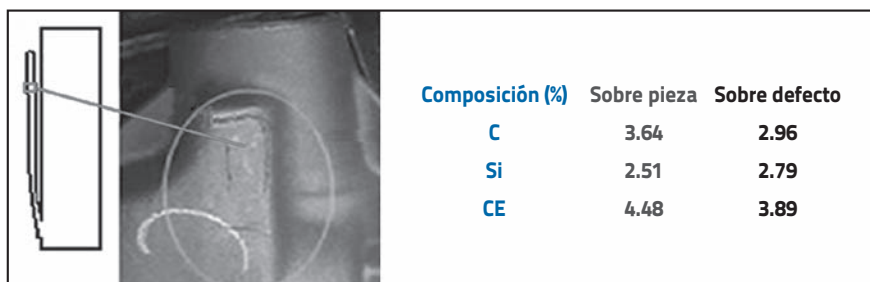


Fig. 12-6: Exudación eutéctica y su verificación por determinación de CE

## 13. AUMENTO DE RENTABILIDAD GENERADA POR EL ALTO RENDIMIENTO

Efectuaremos el análisis de rentabilidad en tres versiones. La **primera** correspondiente a un sistema clásico convencional. El mismo será tomado como referencia con un nivel de rendimiento típico. Una **segunda** versión con un nivel mayor de rendimiento, aunque logrado solo con la optimización del sistema de colada y alimentación, sin modificar la cantidad de cavidades por molde del primer caso. Finalmente, un **tercero**, en el cual se ha logrado una doble mejora, tanto del sistema de colada y alimentación, como por el incremento en la cantidad de figuras por molde.

La posibilidad de incorporar nuevas cavidades, surge por el empleo de todos los nuevos espacios despejados, que surgieron por la minimización del sistema de colada, y principalmente del tamaño de las propias mazarotas.

Al final, y a maneja de conclusión, presentaremos una relación entre la cantidad de metal utilizado en un sistema de colada clásico, y los otros dos diseños con alto rendimiento, evidenciando como la elevación de esta variable, influye sobre la rentabilidad.

### INTRODUCCIÓN

Partimos con la premisa, que el precio de venta de las piezas de fundición, está condicionado por los valores propios del mercado. Esta base, es la que debemos tomar como referencia, al momento de hacer nuestros costos, y fijar nuestras ganancias.

Para simular el cálculo, debemos establecer algunos parámetros que necesitamos tomar como referencia, los que en este estudio, si bien son supuestos, lo hacemos respetando con buena aproximación, la relación entre los diferentes conceptos como son: el costo del líquido, el del retorno y el del rechazo, así como su relación con el rango de precio de venta, fijado por el mercado.

También tendremos en cuenta la incidencia del nivel de rechazo generado por la pieza, para los diferentes rendimientos planteados, con el objeto de obtener el verdadero costo de cada pieza, producidas bajo las tres circunstancias descriptas anteriormente.

### CASO 1 - RENDIMIENTO CLÁSICO CONVENCIONAL

Partiendo de lo que podemos considerar un precio competitivo de venta, en función del rango fijado por el mercado al cual pretendemos incursionar. Sumado a nuestras propias pretensiones de rentabilidad, es que para este ejemplo, fijamos los siguientes valores supuestos:

(a) Precio de venta	12 \$/kg
Costo de producción	9 \$/kg
Costo retorno y rechazo	4 \$/kg
Rentabilidad	33.3 %

## Ejemplo de rentabilidad produciendo con parámetros convencionales

Con el objetivo de evaluar la rentabilidad que se obtendría tomando como condiciones de producción el esquema de una fundición normal o clásica, nos basamos en:

Capacidad del molde	6 piezas x molde
Peso de la pieza	1kg x pieza
Rendimiento	50%
Porcentaje de Rechazo	1%

### Análisis de los parámetros técnicos

Consideramos:

Metal en piezas = 1kg x 6 Pz.= 6kg
Metal en retorno al 50% = 1kg x 6 Pz.= 6kg
Metal en rechazo al 1% (1 x 6) Kg / 100 = 0.06kg
Cantidad de Metal Total por Molde= 12.06 kg

### Análisis económico en función de la cantidad de metal por molde

Para simplificar el análisis, asumiremos que vendemos todo el metal que colamos dentro del molde:

#### Valor de venta por Molde

Piezas 12 \$/kg x 6 kg = 72.00 \$
Retorno 4 \$/kg x 6 kg = 24.00 \$
Rechazo 4 \$/kg x 0.06 kg = 0.24 \$
Precio de Venta = 96.24 \$

#### Costo de producción

Cantidad de Metal Total por Molde x Costo de Producción:
12.06 kg/Molde x 9 \$/kg= 108.54 \$/Mol.

#### Resultado operativo

PV (Precio de Venta) - CP (Costo de producción)
96.24 \$ - 108.54 \$ = - 12.3 \$/ Mol.

De lo anterior surge que, aun marcando nuestra producción con un costo de 9 \$/kg y estimando un 33.3% de ganancia, al asumir un precio de mercado para la venta a 12 \$/kg, esta tecnología genera una pérdida de:

$$(-12.3\$ \times \text{Mol.} / 108.54\$) \times 100 = -11.3\% \times \text{Mol.}$$

En consecuencia, para poder acceder a este mercado con la *rentabilidad* pretendida, será necesario utilizar recursos de optimización en la cantidad de líquido a colar para igual cantidad de cavidades en el molde, efecto que se logra aplicando la tecnología del **Alto Rendimiento**.

## CASO 2 - ANÁLISIS SOBRE POSIBILIDADES DE AHORRO ELEVANDO EL RENDIMIENTO, PARA IGUAL NÚMERO DE FIGURAS POR MOLDE

Con el objetivo de evaluar la rentabilidad que se obtendría tomando como condiciones de producción el esquema de una fundición normal o clásica con la premisa que, para este caso debido a las características de la pieza y el tamaño del molde, *no* será posible agregar un mayor número de cavidades. Paralelamente en los cálculos, emplearemos un costo y precio de venta iguales al Caso 1, aunque con mayores porcentajes de rendimiento y rechazo:

Capacidad del molde	6 piezas x molde
Peso de la pieza	1kg x pieza
Rendimiento	75%
Porcentaje de Rechazo	5%

### Análisis de los parámetros técnicos

Metal en piezas 1kg x 6 Pz.= 6 kg/Mol.
Metal en retorno al 75% (1 x 6 x 0,33*)= 2 kg/Mol.
Metal en Rechazo (5 x 6) kg / 100 = 0.30 kg/Mol.
Cantidad de Metal Total = 8.30 kg/Mol.

\* Al elevar el rendimiento del 50% al 75% la cantidad total de metal por molde requerida para colar 6 piezas más su respectivo retorno es igual:

Total metal en molde	6kg/75/100 = 8 kg
Total metal Retorno	8kg- 6kg Pz.= 2 Kg.
Relación Metal/Retorno	2kg/6kg Pz. = 0,33*

### Análisis económico en función de la cantidad de metal por molde

Al igual que en el caso 1, para simplificar el análisis, asumimos que vendemos todo el metal que colamos dentro del molde.



## Valor de Venta

Piezas 12 \$/kg x 6 kg =	72.00 \$/Mol.
Retorno 4 \$/kg x 2 kg =	8.00 \$/Mol.
Rechazo 4 \$/kg x 0.30 kg =	1.20 \$/Mol.
PV= Precio de Venta =	81.20 \$/Mol.

## Costo de Producción

Si bien al procesar menos cantidad de kilogramos x Molde, tenemos un menor costo por kg, asumiremos los mismos valores establecidos para los costos fijos en el caso 1, para no distorsionar el análisis (en la realidad deberíamos al menos reducir el costo de materias primas en forma proporcional).

Costo de producción 8.30 kg/Mol. x 9 \$/kg = 74.7 \$/Mol.

## Resultado operativo

PV (Precio de Venta) - CP (Costo de producción)  
81.2 \$ - 74.7 \$ = Ganancia de **6.5 \$/Mol.**

Al seguir vendiendo a igual precio, como el costo de producción bajó de 108.54 \$ a 74.7 \$ se ha pasado de perder **-12.3 \$/Molde** o **-11.3%**, a ganar **6.5 \$/Molde** o un **8.70%**, que resulta para el negocio global, una diferencia contra el caso 1 en valores *absolutos* de: **-12.3 \$/Molde + 6.5 \$/Molde = 18.8 \$/Mol.**

Si relacionamos este valor con el nuevo costo de producción de 74.7 \$/Molde, obtenemos un incremento como referencia al Caso 1 en valores *absolutos* de:

**(18.8 \$/Mol. / 74.7 \$/Mol) x 100 = 25.16% x/ Mol.**

## CASO 3 - ANÁLISIS SOBRE POSIBILIDADES DE AHORRO EN BASE A MAYOR CANTIDAD DE FIGURAS POR MOLDE

Aplicando el concepto de minimizar el tamaño de los canales y las mazarotas, con el objetivo de ubicar una mayor cantidad de figuras por molde (ocho figuras), considerando el mismo precio de venta y costo de producción por kilogramo, e iguales porcentajes de rendimiento y rechazo del Caso 2, resulta que:

Capacidad del molde	8 Pz. x mol.
Peso de la pieza	1kg
Rendimiento	75%
Porcentaje de Rechazo	5%

## Análisis de los parámetros técnicos

Metal en piezas 1kg x 8 Pz. = 8 kg/Mol.  
Metal en retorno (1 x 8 x 0,33\*) Pz. = 2.64 kg/Mol.  
Metal en Rechazo (5 x 8) kg/100 = 0.40 kg/Mol.  
Cantidad de Metal Total por Molde = 11.04 kg/Mol.

## Análisis económico en función de la cantidad de metal y figuras por molde

Al igual que en el caso 1, asumimos que venderíamos todo el metal que colamos dentro del molde:

## Valor de venta

Piezas 12 \$/kg x 8 Pz. = 96.00 \$/Mol.  
Retorno 4 \$/kg x 2.64kg = 10.56 \$/Mol.  
Rechazo 4 \$/kg x 0.04kg = 1.60 \$/Mol.  
PV precio de venta = 108.16 \$/Mol.

## Costo de Producción

Si bien los gastos de procesamiento podemos considerar que no varían, y solos los materiales adicionales aumentarían proporcionalmente el costo, para evitar confusiones vamos a considerar el mismo impacto del costo de producción, es decir 9 \$/kg, y lo aplicaremos integro al metal total que precisamos (de esta manera, estaremos haciendo un cálculo conservador):

11.04 kg/Mol. x 9 \$/kg = 99.36 \$/Mol.

## Resultado operativo

PV (Precio de Venta) - CP (Costo de producción)  
108.16 \$ - 99.36 \$ = **8.80 \$/Mol.**

Si mantenemos el precio de venta de 12 \$/kg, mientras el costo de producción pasaría de 108.54\$ en el Caso 1 (referencial para este análisis), a 99.36\$, el porcentaje de rentabilidad, inicialmente en -11.3% por molde se transformaría en:

**(8.80\$/99.36\$) x 100 = 8.96 %**

Entonces, la mejora por cada molde en valores *absolutos* es de:

**-11.3% + 8,96 % = 20.26 %**

Para el negocio global tenemos una diferencia en valores *absolutos*:

**-12.3 \$/Mol + 8.80 \$/Mol = 21.1 \$/Mol.**

Si relacionamos este valor con el nuevo costo de producción de 99.36 \$/Molde obtendríamos una ganancia por cada molde vendido en valores *absolutos*:

**(21.1 \$/Mol. / 99.36 \$/Mol.) x 100 = 21.23 %**

## En resumen:

Hasta aquí, cuando pasamos del caso 1 al 2, sólo consideramos la variación del rendimiento del 50% al 75%, manteniendo la misma cantidad de figuras por molde (seis).

Adicionalmente, tendremos una cantidad de material sobrante de 3.76 kg/Mol. que resultan de:

$$12.06 \text{ kg/Mol. (Caso 1)} - 8.30 \text{ kg/Mol. (Caso 2)} = 3.76 \text{ kg/Mol. como metal disponible}$$

Con este metal disponible podemos fabricar más piezas, ya sean del mismo tipo u otras diferentes. Si asumimos poder fundirlas con un rendimiento del 75% y venderlas al mismo precio, resultará:

$$3.76 \text{ kg/Mol.} \times (75/100) = 2.82 \text{ kg/Mol.}$$

Considerando el mismo precio de venta que el de los casos anteriores tenemos:

$$\text{Pieza } 12 \text{ \$/kg} \times 2.82 \text{ kg/Mol.} = 33.6 \text{ \$/Mol.}$$

$$\text{Retorno} + \text{Rechazo } 4\text{\$/kg} \times 0.94\text{kg/Mol.} = 3.76 \text{ \$/Mol.}$$

$$\text{Precio de venta Molde adicional} = 37.36 \text{ \$/Mol.}$$

## Costo de producción

Tomando el mismo costo del caso 2, considerando que producimos con los mismos equipos, y que tanto la mano de obra, como los materiales, comparten el costo de producción en 50% - 50%, entonces, para producir las piezas extras, solo se requerirá un 50% del costo el correspondiente a las materias primas que conformen el líquido, el cual fue vendido como pieza, por el incremento del rendimiento.

$$\text{Costo de producción de Caso 2 es: } 8.30 \text{ kg/Mol.} \times 9 \text{ \$/kg} = 74.7 \text{ \$/Mol.}$$

$$74.7 \text{ \$/mol.} \times 50\% = 37.35 \text{ \$/mol.}$$

Siendo que, 37.35 \\$/mol. es el costo del metal total, que referido a los 8.30 kg/molde, podemos establecer que, el costo de los 3.76 kg/molde del metal disponible nos cuesta:

$$(37.35 \text{ \$/mol.} \times 3.76 \text{ kg/mol.}) / 8.30 \text{ kg/mol.} = 16.92 \text{ \$/mol.}$$

Es decir que, los 3.76 kg/molde de metal disponible, resultantes de las mejoras del rendimiento, nos cuesta 16.92 \\$/molde.

## Resultado operativo

$$\text{PV (Precio de Venta) - CP (Costo de producción)}$$

$$37.44 \text{ \$/Mol.} - 16.92 \text{ \$/Mol.} = \mathbf{20.52 \text{ \$/Mol.}}$$

Resulta así, que para el metal disponible, la rentabilidad porcentual es de:

$$(\mathbf{20.52\text{\$}} / 16.92 \text{ \$}) \times 100 = \mathbf{121.33\%}$$

El mismo análisis marginal podemos hacer para el Caso 3. Si tuviéramos la posibilidad de utilizar y vender todos los moldes disponibles de la capacidad instalada, al aumentar la cantidad de piezas por molde, que pasó de 6 a 8 cavidades, estas dos piezas adicionales equivaldrían a un 33% más por molde.

Con el ahorro del líquido y la mejor utilización del molde, al incorporar una mayor cantidad de piezas por molde (de 6 a 8 piezas), surge en forma directa un aumento en la capacidad instalada del orden del 33% más, sin realizar ningún tipo de inversión.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

### ARTÍCULOS:

- Anderson, J., Corlett G. A "Experiences with an Applied Riser Technique for the Production of Ductile Iron Castings", Ancast Industries. Ltd., Winnipeg, Canada, QIT Fer Et Titane Inc., AFS Transactions Vol 91 83-90.
- Aubrey L.S., Brockmeyer J.W. Wieser P.F., "Removal from Ductile Iron with Ceramic Foam Filters" Transation 85-21; 1985.
- Bates, C.E., Patterson B. "Volumetric Changes Occurring During the Freezing of Hypereutectic Ductile Iron", AFS Research, Research Institute, Birmingham, USA, AFS Transactions, Vol. 87 79-64 (1979).
- Benforte Francisco, "Comunicación personal no publicado Idea original del autor adaptada al alto rendimiento de hierro nodular incorporada con su permiso".
- Bhaskaran C., Wirth D. Ductile Iron Shrinkage Evaluation through Thermal Analysis. AFS Transaction Vol. 110; 2002.
- Bin, H., "Modeling the Feeding Behavior oh Gaphite Iron Casting. AFS Transactions 1993.
- Ductile Iron Handbook, Processing Comite AFS. Revised 1993, American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, EE.UU.
- Heine R. Model for Specific Volume and Expansion and Contraction Behavior of Solidifying and Cooling Ductile and Gray Iron. AFS Transation vol 96.
- Heine, R.W. "Major Aspects of Processing Cast Iron", University Wisconsin, Madison, Wisconsin. AFS Transactions, Vol.102, 1994.
- Kanno, T., Kang, I., Fukuda, Y., Mizuki, T., Kimura Chuzosho Co.,Ltd., Sunto-Gun, Shizuoka-Ken , Japan; Kiguchi, S, Kinki University, Osaka-Fu, "Effect of Pouring Temperature and Composition on Shrinkage Cavity in Spheroidal Graphite Cast Iron", Japan, AFS Transactions Vol 06-084; 2006.
- Kanno T., Kang L., Fukuda Y., Mizuki T. "Effect of Pouring Temperature and Composition in Spheroidal Graphite Cast Iron". AFS Transactions Vol. 114, 2006, Estados Unidos.
- Li H. Experimental Determinations of Cast Iron Density Using Immersion Technique. AFS Transation. Vol. 111. 2003.
- Loper C. Inoculation Cast Iron. Summary of Current Understanding. AFS Transactions Vol.107 1999.
- Loper. C.R. Jr. AFS Transactions "Sequential Filling off Mold Cavities". 1981 (81-07) AFS Gating and Riser of Cast Iron Vol. 1.
- Loper C., Heine R., "Graphite Formation During Solidification of Cast Iron". AFS Transactions Vol 69 1961, Estados Unidos, Página 583 (Mechanism of Graphite Formation.
- Manpeay F. Quantitative Description of Solidification Morphology of Lamellar and Spheroidal Graphite Cast Iron. AFS Transactions Vol.107 1999.

- Sillen R., "Finding the True Eutectic Point-And, Essential Task for Efficient Process Control of Ductile Iron". Ductile Iron Society, Keith Millis Symposium, Las Vegas Nevada 2008. Pg.100.
- Lloyd Thomas "Economic and Operational Considerations in the Use of Carbon Charging Materials in Ferrous Metal Casting" .BCIRA Broadsheet No.132, 1986.
- Peroza G., Figuera E., Rizzo N., Quintero O., "Diseño de Programa. Computacional para evaluar la Solidificación del Hierro Nodular", Congreso de Latino Metalurgia, Cusco, Perú, Noviembre 2005.
- Winter, B.; Ostron, T.; Hartman, D.; Trojan,P.; Pelke, R."Mold Dilatation and Volumetric Shrinkage of White, Grey, and Ductile Cast Iron", University of Michigan and Albor MI. AFS , Transactions 84-69 1984.
- Zhukof A. "Certain topics of the present state of the theory of graphitization of cast iron", Giessereiforschung 44, 1992, N° 3, Alemania.

## ARTÍCULOS PROPIOS

- Rizzo, N., Solidification of ductile iron inside the mold cavity. Some ideas to improve metal yield. 71 World Foundry Congress, 19-21 May 2014 Bilbao, Spain.
- Rizzo, N., "Defectos Espontáneos de Solidificación en Hierro Nodular Hipereutético. 5° Congreso Latinoamericano de Fundición, COLFUN,15 AL 17 de Noviembre 2012 Costa Salguero. Bs. As. Argentina.
- Rizzo, N., Spontaneously occurring defects related solidification in hipereutectic ductile iron. 70 TH World Foundry Congress. 25-27 April 2012.Monterrey. Nuevo Leon , México.
- Rizzo N. "Practical Aspects of Nodule Density and its Relationship to High Casting Yield in ductile", 2008 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, Las Vegas, Estados Unidos.
- Rizzo N. 3° Congreso Latinoamericano de Fundición COLFUN .07 22 y 23 de Noviembre de 2007 Tandil. Argentina.
- Rizzo N. "Aspectos Prácticos de la Nodularidad y su Relación con el Alto Rendimiento en Hierro Nodular". Colfun 2007, Trabajo N° 07, Tandil, Buenos Aires, Argentina.
- Rizzo N. Pignone G. Labrador L., Calidad Metalúrgica y Alto Rendimiento en Hierro Nodular. 2 Jornadas CIFRA/IAS sobre Fundición 30 y 31 de Agosto 2006 /San Nicolás, Argentina.
- Rizzo, N., "Productividades em Rendimento em Ferro Nodular"; VI Seminário de fundição, Sede da ABM, Sao Paulo, Brasil; 20-22 de novembro de 2006.
- Rizzo N., Duque R., Kanan S., "Algunas Ideas: Productividad y Rendimiento en Hierro Nodular", 1 Jornada CIFRA/IAS sobre fundición.8-10 Noviembre 2005. San Nicolas, Argentina.
- Rizzo N., Kanan S. "Mejora de la productividad en piezas de fundición nodular. Algunas ideas para mejorar el rendimiento de la producción de piezas de fundición",

Revista Fundidores, España, Febrero 2005.

- Rizzo N. Kanan S. Improving Productivity in Ductile Iron Casting. Some Ideas to Improve Casting Yield. AFS Transactions Vol.111, August 2003.
- Rizzo N. Duque R. Kanan S., Ten Step to Improving Casting Yield in Ductile Iron. Foundries. DIS .Keith D. Millis. World Symposium on Ductile Iron October 2003.

## LIBROS TÉCNICOS:

- Bodsworth C. and Bell H. B. "Physical Chemistry of Iron & Steel Manufacture, Second Edition Longman Group Limited, London 1972.
- Campbell, J., Casting Practice, The 10 Rules of Casting. - Ductile Iron Handbook. American Foundryman Society Inc. 1993.
- Campbell, J., Casting, The New Metallurgy of Cast Metal. Second Edition.
- "Ductile Iron Handbook", American Foundrymen's Society Inc. 1993.
- "Fundición con Grafito Esferoidal" Qit-Fer et Titane. Revisión 1992, SOREMÉTAL.
- Guy A. "Physical Metallurgy for Engineers", ADDISON-WESLEY PUBLISHING INC., Massachusetts, EE.UU.
- Iron Casting Handbook, Grey and Ductile Iron. Iron Foundry Society Inc, Cleveland 1971.
- Karsay S., Encyclopedia of Design Logic, The Practical Foundryman's Guide to Feeding and Running Grey- CG- and SG Iron Casting. Ferrous Casting Centre. 1984.
- Karsay S. Ductile iron III, Gating and Riser. Qit-Fer Titane.inc 1983.
- Karsay S. Ductile Iron: The State of the Art Qit-Fer Titane.inc.1980.
- Karsay S. Ductile iron Production Practices. AFS publication. 1975.
- Lerner Y. Modern Casting of Ductile Iron, AFS publication, 2006.
- Miller and Company, The Ductile Iron Process Compendium V 1976.
- Morten Ingan O. "Microstructure evolution in ductile cast iron containing rare earth metals. Doktor ingenioravhandling 1997 Metallurgisk institutt.
- Skaland T. "A Model for the Graphite Formation in Ductile Iron" Metallurgisk Institutt Trondheim 1992.
- Basic Principles of Gating and Riser, American Foundry Society/Cast Metals Institute, Des Plaines, IL (1973).



PROYECTO **MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL**

—  
EFICIENCIA  
OPERATIVA  
**DE UNA PLANTA  
DE FUNDICIÓN  
DE HIERRO  
NODULAR**



**INTI**



**Unión Europea**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional  
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212  
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490  
Fax (54 11) 4752 5919  
[www.ue-inti.gob.ar](http://www.ue-inti.gob.ar)



**Presidencia de la Nación**

**INDUSTRIA**