

PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL

—  
PIEZAS  
DE ACERO  
MOLDEADO  
DE CALIDAD

CUADERNO TECNOLÓGICO N° 18

Autor: **Ing. Jorge Madías**  
Metallon, San Nicolás, Argentina

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

Junio de 2015



**INTI**



**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)

—

PIEZAS  
DE ACERO  
MOLDEADO  
DE CALIDAD

CUADERNO TECNOLÓGICO N° 18

Autor: **Ing. Jorge Madías**  
Metallon, San Nicolás, Argentina

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

Junio de 2015



INTI



Unión Europea

## INDICE

PRESENTACIÓN .....	4
RESUMEN.....	6
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. PANORAMA MUNDIAL DEL ACERO MOLDEADO .....	9
3. PANORAMA NACIONAL DEL ACERO MOLDEADO.....	12
4. COMPETENCIA CON OTROS MATERIALES.....	15
5. EQUIPOS NECESARIOS.....	17
6. HORNOS DE FUSIÓN .....	20
7. ROL DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA .....	22
8. ASPECTOS ESPECÍFICOS A TENER EN CUENTA .....	24
9. CONCLUSIONES.....	31
10. BIBLIOGRAFÍA .....	32

## INDICE TABLAS Y DE ANEXOS

Tabla 1	Los cinco productores más importantes de acero moldeado en 2013. ....	9
Tabla 2	Comparación de algunas características de la fundición gris, la fundición nodular y el acero moldeado. ....	13
Tabla 3	Ejemplo de mix de producción para una fundición de piezas ferrosas destinadas a la minería. ....	15
Tabla 4	Áreas de la fundición que deberían incluirse en la nave principal y un ejemplo del equipamiento necesario para cada área. ....	16
Tabla 5	Ahorros por t de pieza buena producida, al pasar de hornos eléctricos de arco a hornos de inducción, para cada ítem componente del costo operativo, según una evaluación de la empresa John Deere, al analizar en el año 2000, el incremento de capacidad de fusión en una de sus fundiciones. ....	19
Tabla 6	Contracción de diversos tipos de acero, y comparación con la fundición gris y blanca. ....	23

## ABREVIATURAS UTILIZADAS

<b>ADI</b>	Austempered Ductile Iron.
<b>CIFRA</b>	Cámara de Industriales Fundidores de la República Argentina.
<b>PLC</b>	Controlador Lógico Programable.
<b>PyMEs</b>	Pequeñas y Medianas Empresas.

## 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.

## RESUMEN

En el texto se analizan diversos aspectos de la producción de acero moldeado, que es importante para la industria del petróleo y gas, la minería, la industria química y la producción de energía, entre otros sectores. Abarca los aceros al carbono, de baja aleación y también los de alto manganeso e inoxidables.

Se presenta un panorama mundial de la producción del acero moldeado y una visión de la situación nacional en la materia, incluyendo también en el análisis, y a título de comparación, otras fundiciones ferrosas como son la fundición gris y la nodular. Se analiza la competencia entre el acero moldeado y la fundición nodular, y las situaciones en que es conveniente diseñar piezas de acero.

Se presenta el equipamiento necesario para la instalación de una fundición de acero moldeado, con un ejemplo concreto. Se discute en detalle las ventajas y desventajas de instalar un horno de inducción o un horno eléctrico de arco. Asimismo es revisado, el rol de la simulación del colado, solidificación, enfriamiento y tratamiento térmico de las piezas de acero.

Finalmente, se mencionan diversos aspectos específicos de los procesos de moldeo, fusión, colada, desmoldeo y rebabado en que los aceros se diferencian de la fundición nodular y la gris.

El acero moldeado, aunque ha visto reducir su producción a costa de la fundición nodular en las últimas seis décadas, mantiene su primacía cuando se requiere tenacidad, ductilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al calor y resistencia a la abrasión combinadas con resistencia al impacto. Ocupa el cuarto puesto en la producción mundial y nacional, luego de la fundición gris, fundición nodular y el aluminio. La piezas de acero fundidas son demandadas por la industria del petróleo y gas, minería, cementeras y otras.

Para instalar una fundición que produzca piezas de acero moldeado se requiere disponer de equipos similares a las fundiciones que producen otros tipos de metales ferrosos, con algunas diferencias. Para el moldeo generalmente se utilizan arenas aglomeradas con resinas o aceites autofraguantes; el espectrómetro de emisión óptica es indispensable; el corte de montantes y coladas es más difícil. El horno de inducción y el horno eléctrico de arco son las herramientas de fusión preferidas, con predominio del horno de inducción cuando se producen piezas pequeñas y medianas, y del horno de arco para la producción de piezas grandes y muy grandes.

La simulación matemática de las operaciones es una herramienta clave para acortar los tiempos, desde el diseño hasta la producción de la primera pieza.

Las piezas de acero exigen moldes y noyos más resistentes a las altas temperaturas; así como también el diseño de montantes que compensen la elevada contracción del metal. Para finalizar, el rebabado es más complicado que con otros materiales, debido a la tenacidad del acero.

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción de piezas de acero moldeado es importante para la industria del petróleo y gas, la minería, la industria química y la producción de energía, entre otros sectores. Abarca los aceros al carbono, de baja aleación y también los aceros de alto manganeso e inoxidables.

En este texto se presenta un panorama mundial de la producción de acero moldeado y una visión de la situación nacional en la materia, incluyendo también en el análisis, y a título de comparación, otras fundiciones ferrosas como la fundición gris y la nodular. Se analiza la competencia entre el acero moldeado y la fundición nodular, y las situaciones en que es conveniente diseñar piezas de acero.

Se detalla el equipamiento necesario para la instalación de una fundición de acero moldeado, con un ejemplo concreto. Se discute en detalle las ventajas y desventajas de instalar un horno de inducción o un horno eléctrico de arco.

Se revisa el rol de la simulación del colado, solidificación, enfriamiento y tratamiento térmico de las piezas de acero.

Finalmente, se mencionan diversos aspectos específicos de los procesos de moldeo, fusión, colada, desmoldeo y rebabado en que los aceros se diferencian de la fundición nodular y la fundición gris, por lo que se adoptan soluciones diferentes.

## 2. PANORAMA MUNDIAL DEL ACERO MOLDEADO

El acero moldeado representa en el mundo el 11% de la producción de piezas fundidas, con 11,3 millones de t producidas en el año 2012. El material más producido es la fundición gris, seguida de la fundición nodular y de los metales no ferrosos, entre los que predomina el aluminio (figura 1).

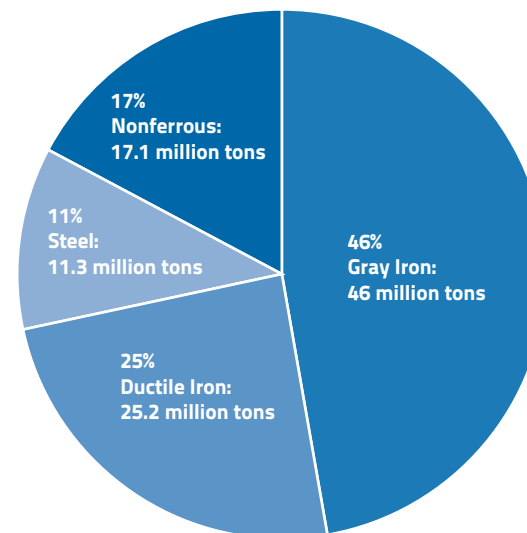


Fig. 1: Distribución de la producción de piezas fundidas por material (2012) [1]

La evolución de la última década siguió un camino de crecimiento hasta el año 2008, con una caída en 2009 y una posterior recuperación. Este proceso no resulta tan marcado para el acero moldeado (figura 2).

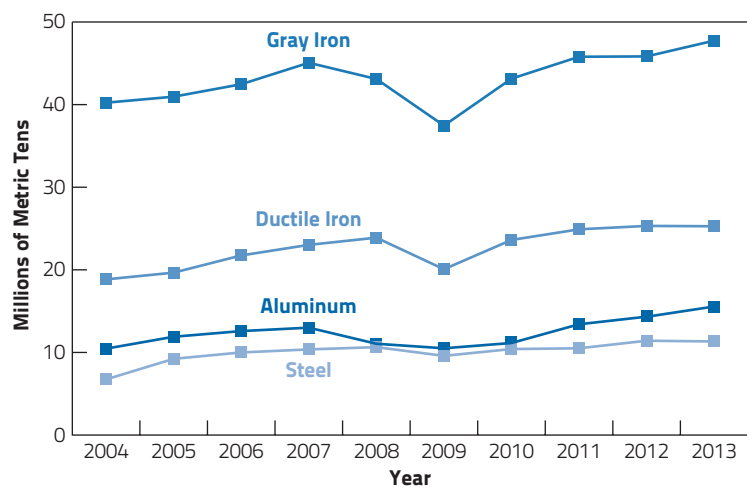


Fig. 2: Evolución de la producción mundial de piezas moldeadas en fundición gris, fundición nodular, aluminio y acero, desde el año 2004 hasta el año 2013 [1]

China detenta prácticamente la mitad de la producción mundial de piezas fundidas. Otros países emergentes que aparecen entre los diez primeros productores son: India, Rusia y Brasil (figura 3). En los países donde la industria automotriz tiene un peso significativo, la fundición nodular y el aluminio, sobrepasan a la fundición gris y el acero moldeado.

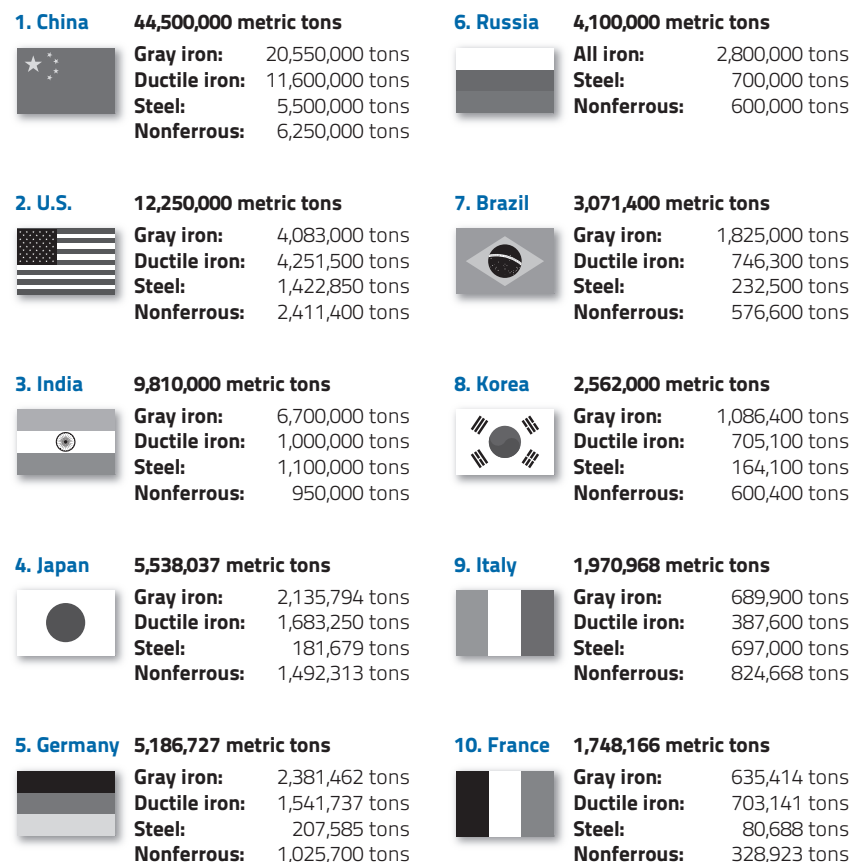


Fig. 3: Principales productores mundiales de piezas fundidas y su producción por cada tipo de material (2012) [1]

Los cinco productores principales de acero moldeado se enumeran en la tabla 1.

PAÍS	PRODUCCIÓN 2013 (T)
China	5.500.000
Estados Unidos	1.422.850
India	1.100.100
Rusia	700.000
Brasil	232.500

Tabla 1: Los cinco productores más importantes de acero moldeado en 2013. Elaboración propia en base a datos de [1]

### 3. PANORAMA NACIONAL DEL ACERO MOLDEADO

Cabe señalar que hay un importante déficit de información pública al respecto. La última estadística publicada por la Cámara de Industriales Fundidores de la República Argentina corresponde al año 2011.

Siguiendo estas cifras, el acero moldeado representa en la Argentina el 9% de la fundición ferrosa, con 12.500 t producidas en ese año (figura 4). Como en el mundo, el material más producido es la fundición gris, seguida de la fundición nodular. Un aspecto notorio es que mientras las cifras mundiales de producción muestran una recuperación al nivel previo a la crisis en 2011, eso en Argentina no ha sucedido.

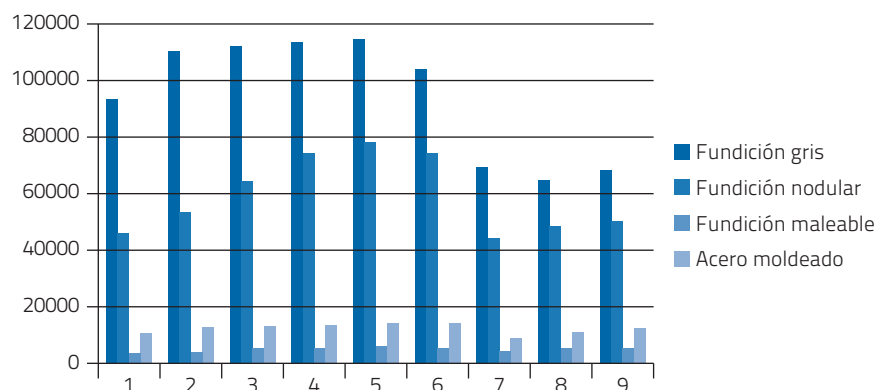


Fig. 4: Producción de fundiciones ferrosas en Argentina, 2003-2011. Elaborado sobre la base de publicaciones de CIFRA.

Diversos análisis económicos indican la posibilidad concreta de que el sector minero, en las provincias en que hay un ambiente favorable, se desarrolle en forma creciente, más allá de los bajos precios actuales. De manera similar, la importante disponibilidad de gas y petróleo en nuestro país, hacen prever un incremento de su explotación en el futuro. Ambos sectores son muy importantes en lo que respecta al consumo de piezas de acero moldeado.

Algunas características generales del sector de la fundición son las siguientes:

- Constituyen cerca de 500 empresas, en su mayoría PyMEs de propiedad familiar.
- Baja penetración de capital extranjero.
- Más de 7000 empleos directos.
- Importante número de personal de proveedoras de equipamiento, materia prima, insumos, herramientas, tratamiento de superficies, servicios, etc.
- Capacidad instalada para fabricación de 290.000 t/año.

El importante número de sectores que atiende la industria de la fundición, la convierte en un sector estratégico para el desarrollo nacional. Entre los sectores más destacados podemos mencionar:

- Automotriz
- Siderúrgico
- Maquinaria Agrícola y Vial
- Máquinas y Equipos
- Militar
- Naval
- Petrolero
- Minero
- Cementero
- Ferroviario
- Red de Aguas
- Construcción
- Químico
- Energético
- Artículos del Hogar

**Por la forma en que se comercializan sus productos**, las fundiciones (todas) pueden dividirse en tres tipos:

Fundiciones que entregan piezas en bruto a terceros: Aceros Cuyanos, Acerías 4C, Acería Sauce Viejo, ENERBOM

Fundiciones que producen piezas o conjuntos terminados, en las que la fundición es la actividad central: Fundición San Cayetano, Titania

Fundiciones que son cautivas de una empresa o grupo: METALAR

A su vez, **las empresas en las que se realizan operaciones de producción de piezas de acero moldeado pueden dividirse en dos tipos:**



Fundiciones especializadas, donde el acero es el material principal: Aceros Cuyanos; Fundición San Cayetano; ENERBOM; Acería Sauce Viejo; Acerías 4C; Fundición San Diego; Fundición Eléctrica Navarro; Small Castings; Aceros Brinell; Titania, Aceros Corona

Fundiciones diversificadas, donde el acero es un material más. MEGAFUND

### Proveedores de insumos, y de equipamiento:

Para el conjunto de las fundiciones, sea cual sea el material que produzcan, son importantes los proveedores de insumos. Hay distribuidores que procuran abarcar todos los productos necesarios, como MEDEMET (Villa Ballester), METALPROD (Buenos Aires), TPF (Las Parejas) o Cividino (Caseros), mientras otros se especializan en un producto, como las areneras y los extractores de bentonita.

Con respecto al equipamiento, y debido a la pequeña escala de la industria, hay pocos proveedores nacionales. Por ejemplo, Electrosericios en lo que hace a hornos de inducción, y Gerosa en instalaciones de procesamiento de arenas. Es muy común la adquisición de equipamiento usado, tanto en el país o en el exterior. Un proveedor típico es Brignone y Asociados. También se realiza la compra de equipamiento nuevo al exterior (hornos de inducción Megatherm e Inductotherm).

## 4. COMPETENCIA CON OTROS MATERIALES

El acero moldeado se ubicaba en el segundo lugar, luego de la fundición gris, en cuanto al peso anual producido, hasta el surgimiento y desarrollo de la fundición nodular en las décadas de 1950, 1960 y 1970. La fundición nodular presenta la ventaja de tener una temperatura de colada entre 250°C y 300°C menor, y un contenido de carbono más elevado. Ambos aspectos implican que sea más fácil alcanzar una alta calidad superficial, en comparación con las piezas de acero. Su costo de fusión también es inferior.

Si bien el acero presenta más ductilidad y tenacidad que la fundición nodular, para muchas piezas que se hacían tradicionalmente en acero, las propiedades mecánicas de la fundición nodular resultaron suficientes. Entre aquellas piezas que comenzaron a producirse en fundición nodular en la época mencionada caben destacar los cigüeñales y las horquillas de dirección para automotores.

El diseño de piezas de acero moldeado está indicado cuando se requiere alta ductilidad y/o tenacidad, soldabilidad, alta resistencia a la corrosión, resistencia a la abrasión combinada con resistencia al impacto y a las altas temperaturas. Puede en algunos casos sustituir a construcciones soldadas, que son construidas a partir de aceros laminados, y piezas forjadas.

En grandes componentes, la diferencia de costo se amortigua, y la facilidad para la reparación por soldadura del acero, es un factor relevante [2].

En la tabla 2 se comparan algunas características del acero moldeado, la fundición gris y la fundición nodular:

PROPIEDAD	FUNDICIÓN GRIS	FUNDICIÓN NODULAR	ACERO MOLDEADO
Resistencia a la tracción	Baja	Media	Alta
Límite de fluencia	No presenta	Medio	Alto
Alargamiento	No presenta	Medio	Alto
Resistencia al impacto	Muy baja	Media	Alta
Amortiguación de las vibraciones	Alta	Baja	Baja
Conductividad térmica	Alta	Media	Baja
Soldabilidad	Baja	Baja	Alta
Maquinabilidad	Alta	Alta	Media

Tabla 2: Comparación de algunas características de la fundición gris, fundición nodular y el acero moldeado.

Una relativamente nueva amenaza para el acero moldeado proviene de la fundición nodular austemperada, conocida como ADI por sus iniciales en inglés (*Austempered Ductile Iron*). Este material está siendo investigado y aplicado en forma creciente. En la figura 5 se presenta una comparación con los aceros, en términos de resistencia a la tracción y alargamiento:

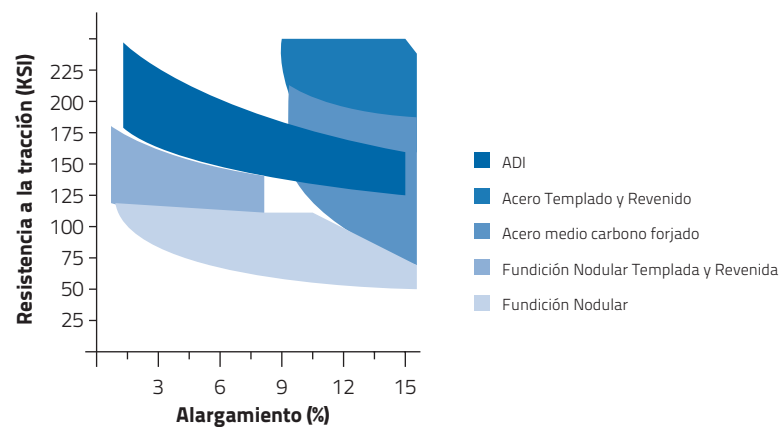


Fig. 5: Comparación de la fundición nodular y la fundición nodular austemperada (ADI) con acero de medio carbono forjado, y acero templado y revenido, en términos de resistencia a la tracción y alargamiento.

## 5. EQUIPOS NECESARIOS

Aunque se tiene una diversidad de iniciativas en el NOA y NEA para apoyar la integración del equipamiento requerido para instalar una fundición de acero moldeado depende de la cantidad, peso y características de las piezas a producir. A título de ejemplo, se presenta el caso de una fundición orientada a la producción de unas 250 t/mes de piezas para minería. Un mix de materiales para este sector puede ser el que se presenta en la tabla 3:

MATERIAL	PORCENTAJE EN PESO DE LA PRODUCCIÓN (%)
Aceros al carbono	10
Aceros de baja aleación	50
Aceros al manganeso	30
Aceros inoxidables	2
Fundición gris	5
Otros	3

Tabla 3: Ejemplo de mix de producción p/fundición de piezas ferrosas en minería

Los sectores a incluir en la fundición a contemplar en la nave principal, se presentan en la tabla 4; definiendo para cada sector, el equipamiento necesario:

SECTOR	EQUIPOS PRINCIPALES
Fundición	2 hornos de inducción de 1500 kg/h; 1 horno de inducción de 500 kg/h; 2 hornos de inducción de 23 kg/h para microfusión; Transformador y torre de enfriamiento; grúa bandera de 2 t; 12 cucharas; 2 calentadores de cucharas; pirómetros de inmersión fijos y portátiles; generador eléctrico para emergencias; puentes grúa de 5 y 10 t; pala frontal
Moldeo y preparación de arenas	Mezcladora continua con tres bombas; mesas de compactación; mesas de rodillos; manipuladores de moldes; equipos de pintura y secado
Desmoldeo y recuperación de arenas	Desmoldeadora (shake-out); silos de almacenamiento de arena nueva y usada; enfriador de arenas; secador de arenas; clasificador de arenas; vasos neumáticos de transporte
Noyería	Sopladora de noyos de caja fría; mezcladora
Limpieza y acabado	Esmeriles colgantes y estacionarios; granalladora de gancho, giratoria y de tambor; arenadora (para piezas grandes)
Tratamiento térmico	Horno de 2000 mm x 3000 mm x 2000 mm de 10 t; temperatura máxima 1200°C c/ PLC para programación y control de temperaturas y puerta tipo guillotina, carro tipo boggie, pileta de temple (agua y aceite); ventiladores para temple con aire y forzado; pirómetro óptico láser
Laboratorio	Espectrómetro de emisión óptica base Fe; microscopio, pulidora, cortadora y embutidora; durómetros varios; equipos para ensayo de arenas; mufla y balanza analítica

Tabla 4: Áreas de la fundición que deberían incluirse en la nave principal y ejemplo del equipamiento necesario para cada área

En construcciones auxiliares pueden alojarse el almacén de materias primas; el taller de modelos; la oficina de ingeniería y calidad; el depósito de modelos; el depósito de piezas terminadas; el vestuario y los baños; la zona de preparación de la carga; el depósito de chatarra; el depósito de arena nueva; el taller de mantenimiento y la sala de compresores.

La fundición descrita tiene un grado importante de aplicación de tecnología. Pueden definirse equipamiento de preparación de arenas, moldeo, desmoldeo, laboratorio, etc., más simples. Sin embargo, **hay requisitos que son ineludibles**, como por ejemplo la disponibilidad de un **espectrómetro de emisión óptica**, para la determinación de la composición química a lo largo del proceso en el horno. Esto es necesario para el ajuste de la composición mediante la adición de ferroaleaciones, o para la realización de tareas metalúrgicas como la decarburación, la desulfuración y la defosforación, si se dispone de un horno eléctrico de arco con revestimiento básico. **A diferencia de las fundiciones grises y nodulares, que se especifican generalmente por las propiedades mecánicas, los aceros se especifican en primer lugar por su composición química.**

## 6. HORNOS DE FUSIÓN

En las fundiciones donde el mix es dominado por piezas de acero moldeado, los dos hornos que compiten son el horno de inducción y el horno eléctrico de arco [3].

El horno de inducción tiene como aspectos positivos los siguientes:

- No requiere electrodos.
- Se puede producir un amplio abanico de materiales.
- Control fácil y rápido de la temperatura del metal líquido.
- Ajuste sencillo de la composición química.
- Velocidad de fusión variable con facilidad.
- Buena performance ambiental, sin necesidad de alta inversión en equipamiento.

Entre sus desventajas cabe mencionar:

- Limitaciones en los materiales que se pueden cargar.
- Restricciones en la realización de tareas metalúrgicas que requieren de la interacción de la escoria con el metal líquido o de la inyección de oxígeno (defosforación, desulfuración, decarburación).

Por su parte, el horno eléctrico de arco se destaca por:

- Capacidad de fundir todo tipo de materias primas, inclusive virutas.
- Capacidad de lograr temperaturas elevadas (si es necesario).
- Con revestimiento básico, posibilidad de eliminar elementos por la vía de reacciones metal –escoria (desulfuración, defosforación).
- Simpleza y confiabilidad del equipamiento.

En tanto que tiene como debilidades:

- Alto costo de los electrodos.
- Ruido.

A título ilustrativo, en la tabla 5 se presenta el resultado de un cálculo realizado por la empresa John Deere al analizar en el año 2000 el incremento de capacidad de fusión en una de sus fundiciones, definiendo los ahorros en cada ítem de costo, al pasar de hornos eléctricos de arco a hornos de inducción:

ÍTEM	AHORRO AL PASAR DE HORNO DE ARCO A HORNO DE INDUCCIÓN (USD/ t)
Energía de fusión	2,7
Demanda de energía	-3,3
Electrodos	33,4
Carga metálica	-20,2
Mano de obra (producción)	5,4
Refractarios	1,0
Mantenimiento (material y mano de obra)	18,0
Control de polución	4,8
Disposición de desechos	0,9
Total	42,8

Tabla 5: Ahorros por t de pieza buena producida, al pasar de hornos eléctricos de arco a hornos de inducción, para cada ítem componente del costo operativo, según evaluación de la empresa John Deere al analizar en el año 2000 el incremento de capacidad de fusión en una de sus fundiciones [4]

Estas diferencias se amortiguan a medida que los hornos tienen más capacidad. Esto explica porque se encuentran hornos eléctricos de arco como unidades de fusión en las grandes fundiciones de piezas de acero moldeado como ESCO, ELECMETAL, Goodwin Steel Castings, Eletro Aço Altona, etc.

## 7. ROL DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

La simulación numérica de las operaciones de colado, solidificación y enfriamiento de piezas fundidas, tiene una amplia aplicación en el diseño de sistemas de colada y de montantes, así como en la investigación aplicada a la solución de problemas de calidad diversos.

Existe una amplia oferta comercial de programas basados en elementos finitos y que incluyen el aspecto fluidodinámico de la colada y el llenado de la pieza, la transferencia de calor al molde y las propiedades obtenidas luego de un tratamiento térmico (figura 6). Para las universidades, algunos de los proveedores de estos programas ofrecen versiones de demostración, de utilidad importante para fines didácticos.

El alto costo de las licencias (y de los estudios puntuales realizados por algunos de los licenciarios), hace que la demanda de programas se centre en las fundiciones que procesan grandes series de piezas, típicamente para la industria automotriz (generalmente de fundición nodular, fundición gris y aluminio), y en las fundiciones que procesan piezas de grandes dimensiones, que es el caso de algunas de las piezas de acero moldeado.

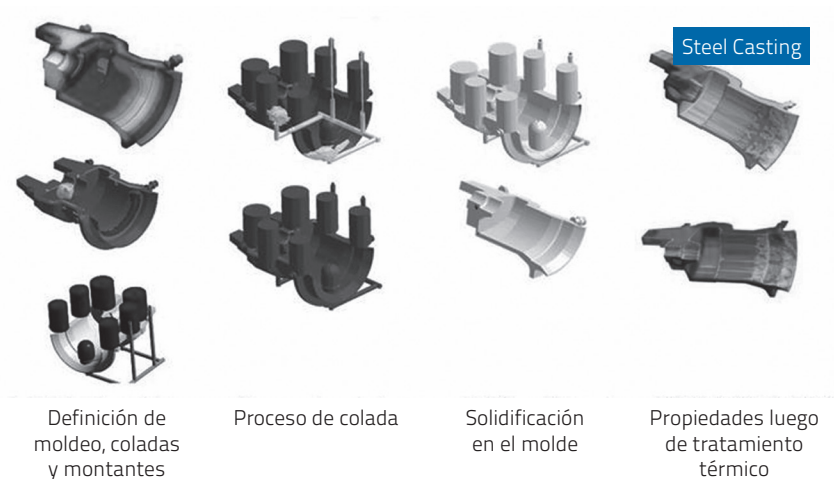


Fig. 6: Empleo de la simulación para el diseño del molde, el colado, la solidificación y el tratamiento térmico de piezas de acero moldeado

Además de la aplicación directa por parte de las plantas, estos programas de simulación se utilizan para la investigación aplicada, entre otras cosas en el estudio de defectos.

A título de ejemplo, más adelante, cuando nos referimos a un defecto típico de las piezas de acero moldeado, esto es, la penetración de acero líquido en la arena de moldeo, se presenta un estudio que hizo uso de la simulación computacional.

## 8. ASPECTOS ESPECÍFICOS A TENER EN CUENTA

En los párrafos siguientes se analizan algunos aspectos específicos de la fundición de acero moldeado, en los que hay diferencias, ya sea en los insumos, la tecnología y los equipos utilizados, con respecto a los empleados en la fundición nodular y la fundición gris, iniciando desde el diseño de la pieza hasta su inspección final, pasando por las demás etapas del proceso.

### Diseño

En esta etapa hay que tener en cuenta diversos factores que disminuyen el costo por pieza y facilitan la obtención de una pieza sana. Las recomendaciones típicas para las piezas de fundición gris o nodular son también válidas para las piezas de acero: espesores no demasiado diferentes, cantos redondeados, y evitar diseños que restrinjan la contracción del metal.

Como los hoyos y moldes son más sensibles a la penetración por parte del acero fundido, debido a que la temperatura de colada es del orden de 300 oC más alta, es necesario tener en cuenta desde el diseño de la pieza este problema. Por ejemplo, hoyos de pequeño diámetro, para facilitar el pasaje de tornillos, que están expuestos a la radiación de calor del acero líquido durante el llenado y luego quedan inmersos en una gran masa de acero líquido, son serios candidatos a producir la penetración del acero, complicando la limpieza del hoyo.

### Modelo

Aquí también son válidas las recomendaciones usuales para otros materiales, en relación con el sobrematerial para mecanizado, la colocación en el sobre de aquella parte más sensible a los defectos superficiales, las contrasalidas, la superficie de división o partición, la previsión de ayudas para el mecanizado, etc.

Como en el acero, no hay precipitación de grafito, como si sucede en el caso de la fundición gris y la nodular, hay que considerar una mayor contracción en el estado sólido, teniendo en cuenta también, algunos aspectos específicos indicados en la tabla siguiente:

MATERIAL	ASPECTOS ESPECÍFICOS	CONTRACCIÓN (MM/M)
Fundición gris	Piezas delgadas	10
	Piezas gruesas	7
	Piezas cilíndricas moldeadas verticalmente	Sobre la altura 5-6 Sobre el diámetro 7-8
Fundición blanca	Para maleable	18
Acero	De bajo carbono (0,10%)	22
	De medio carbono (0,30%)	18
	De alto carbono (0,70%)	15
	Con enfriamiento rápido	12
	Al manganeso	28

Tabla 6: Contracción de diversos tipos de acero, y comparación con la fundición gris y blanca [5]

Los materiales para los modelos son los usuales: madera, resina, aluminio, poliestireno expandido. Este último es una opción importante para el acero moldeado, ya que es común que haya una demanda unitaria de piezas grandes.

### Moldeo

Para el moldeo de piezas de acero hay cierta preferencia por las arenas aglomeradas con resinas o aceites autofraguantes, con respecto a la arena aglomerada con bentonita, debido a la necesidad de una mayor resistencia del molde. Las técnicas de moldeo en cáscara (shell moulding) y de moldeo a la cera perdida son usuales para piezas pequeñas (en el primer caso), y muy pequeñas (en el segundo caso), donde hay requisitos de alta calidad superficial, para evitar operaciones de mecanizado.

Las piezas de acero, debido a la alta temperatura de colada, son proclives a producir la penetración de la arena de moldeo por el acero líquido (sinterización). Este tema no está todavía completamente resuelto; siguen apareciendo casos y es motivo de investigaciones recientes en instituciones académicas.

Por ejemplo, investigadores de la Universidad de Missouri, Estados Unidos, realizaron un estudio en el que se colaron bloques en diferentes condiciones (nos referimos al tipo de arena, de aglutinante, de pintura y su forma de aplicación, clase de acero). Los bloques obtenidos, se cortaron transversalmente para la observación de la penetración, que se hacía a simple vista y luego en probetas metalográficas (figura 7). Se medía la superficie afectada por la penetración [6].

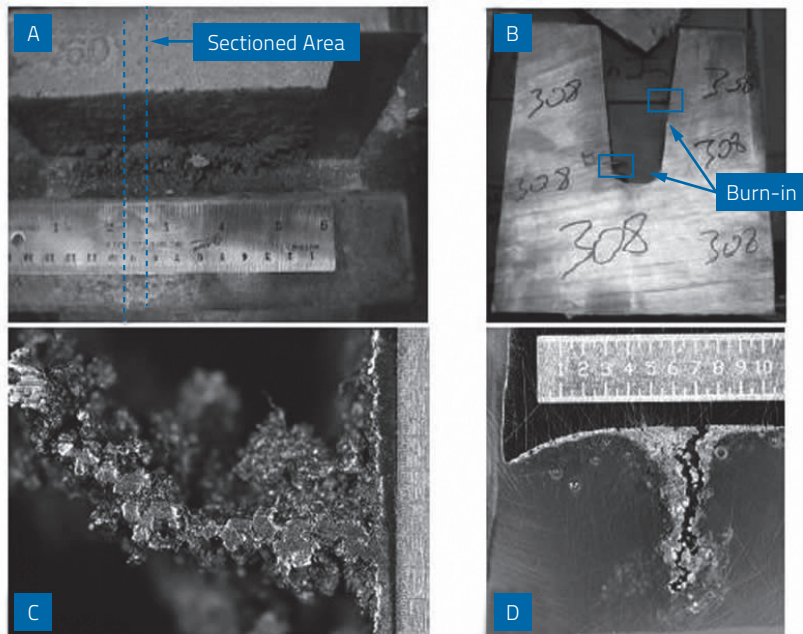


Fig. 7: Metodología para el estudio de la penetración del acero líquido en el molde: A) Bloques fundidos presentando penetración; B) corte transversal de los bloques; C) Aspecto de una muestra embutida en resina para su observación; D) muestra para observación en microscopio electrónico de barrido y análisis EDS [6]

**Se encontró que el factor determinante para la generación del defecto era la expansión de la arena de moldeo.** Se propuso un mecanismo para la formación del defecto, con la ruptura de la capa de pintura debido a la expansión de la arena, y la consiguiente penetración del metal líquido (figura 8). En este proceso, juega un rol importante la tensión interfacial entre el acero líquido y la arena, que puede ser disminuida por restos de azufre proveniente de la resina. En el mismo sentido influyen el contenido de azufre, así como el oxígeno disuelto en el acero.

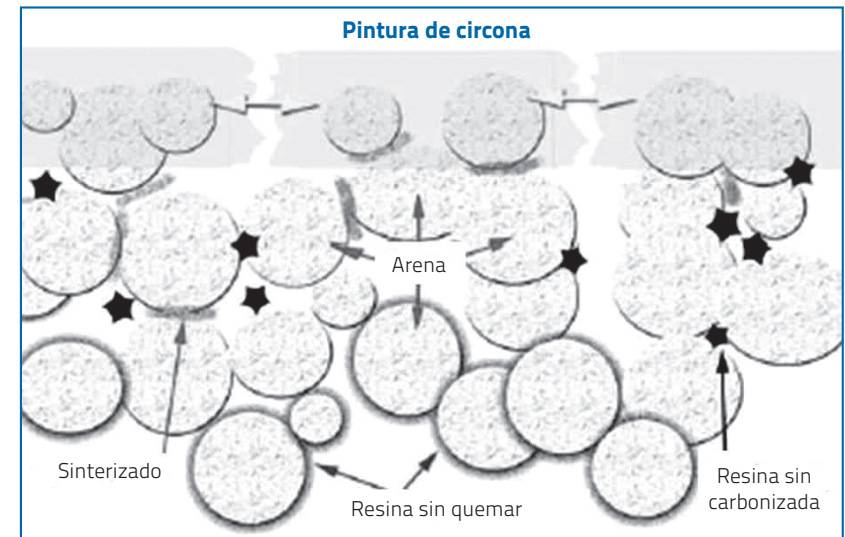


Fig. 8: Mecanismo para la penetración del acero líquido en el molde y la sinterización de la arena [6]

Se encontró que las arenas que pasaban por un reciclado mecánico exclusivamente generaban mayor superficie penetrada / sinterizada que las que habían pasado por un reciclado térmico (figura 9, arriba). Estas últimas, presentan luego del reciclado, una superficie más limpia (figura 9, abajo).

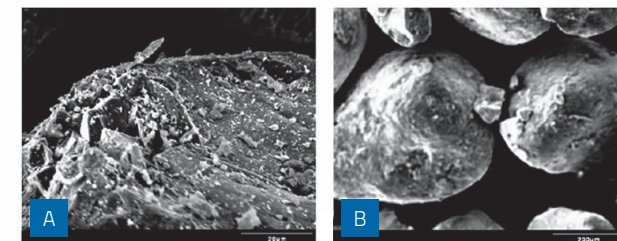
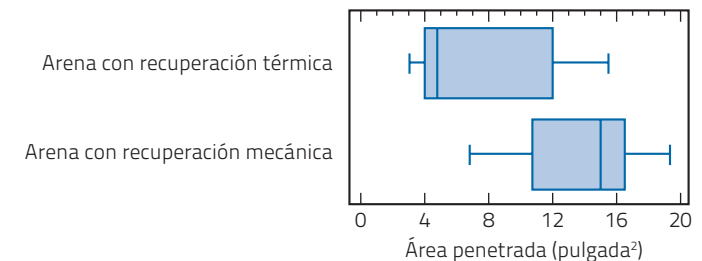
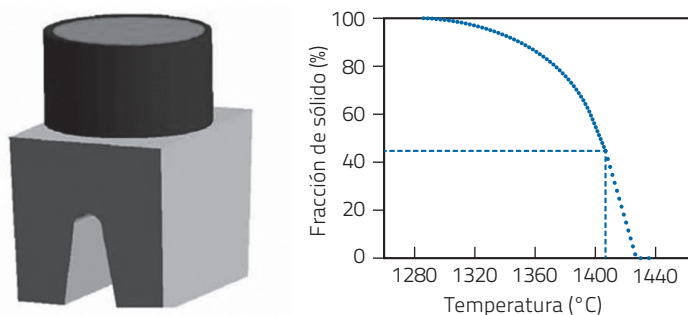


Fig. 9: Arriba: Área penetrada por el metal, en función del proceso de reciclado empleado para la arena. Abajo: Aspecto de la arena reciclada mecánicamente (izquierda) y térmicamente [6]

Posteriormente, investigadores de la Universidad de Iowa, Estados Unidos, han procurado simular la formación de este defecto mediante el empleo de un programa de simulación [7]. En la figura 10 se presentan el bloque simulado, con su montante y aislación térmica (arriba); la fracción de sólido en función de la temperatura (abajo, izquierda) y los datos de partida (abajo, derecha). En la figura 11 se presenta uno de los resultados obtenidos.



#### Información básica de los bloques en V

Acero: CF-8M  
 Arena de moldeo: con resina furánica  
 Temperatura de inicio de la simulación: 1500 °C  
 Temperatura de líquidos: 1425 °C  
 Temperatura de sólidos: 1291 °C  
 Temperatura crítica: 1405 °C (corresponde a 45% de sólido)  
 Coeficiente interfacial de transferencia de calor: 1000 W/m<sup>2</sup>K  
 Peso de metal colado: 69 kg

Fig. 10: Arriba: Bloque con montante y aislación térmica. Abajo, izquierda: la fracción de sólido en función de la temperatura para un acero inoxidable CF-8M. Abajo, derecha: Parámetros básicos para la simulación [7]

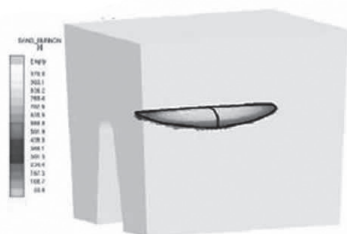
## Coladas y montantes

En el diseño del ingreso del acero al molde es importante tener en cuenta la alta temperatura del metal que ingresa, y la facilidad con que se produce la oxidación por contacto con el aire. Algunas recomendaciones clásicas para el diseño de la colada de piezas de acero son las siguientes [8]:

- La contracción del chorro de metal sucede en los empalmes del sistema de colada aún luego de un cálculo preciso, y pueden aparecer defectos, a menos que se haga algo para suprimirla.
- Bajadas cortas y cónicas, y escoriadores largos con un hueco en la base de la bajada, aseguran el llenado completo del sistema con turbulencia y aspiración mínimas.
- Los escoriadores con alargues, los ataques tangenciales y disponer el escoriador en el sobre, y los ataques en la bajera, son medidas efectivas para generar trampas para la suciedad.
- Un alto caudal y una baja velocidad del líquido, favorecen que la erosión sea mínima.
- Los ataques con forma de cuerno no son recomendables porque causan más atrape de aire.
- Muchos ataques generan menor erosión del molde que un ataque único.
- Un sistema levemente presurizado, con relación de área de 1:2:1.5 da buenos resultados para acero.

Con respecto a los montantes, ya se ha mencionado la contracción que presentan los distintos tipos de acero, más elevada que la de las fundiciones grises o nodulares, donde la precipitación del grafito ayuda a compensarla. La distancia entre montantes, a su vez, debe ser menor que en el caso de la fundición gris y nodular. Un método de cálculo muy utilizado cuando no se dispone de herramientas de simulación es el de los módulos de enfriamiento [9].

### Sinterización



### Penetración

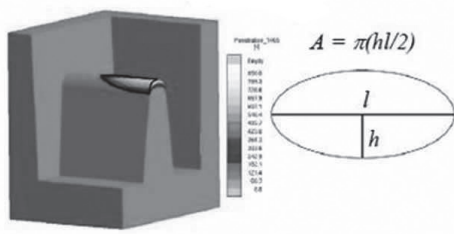


Fig. 11: Tiempos para la formación de defectos para el caso del bloque (datos básicos) [7]



## Colada

El acero es muy sensible a la reoxidación en contacto con el aire, con la consiguiente formación de escoria superficial (nata) y de macroinclusiones. Por esta razón se tiende a utilizar para el colado cucharas con sistema de barra tapón y buza sumergida, que permite el colado por la parte inferior, libre de escoria, y un menor contacto con el aire que en el colado tradicional por el labio de la cuchara [10]. Estas cucharas suelen equiparse con un tapón poroso para la inyección de argón, que facilita la flotación de las inclusiones hacia la superficie, tal como puede observarse en la figura siguiente:

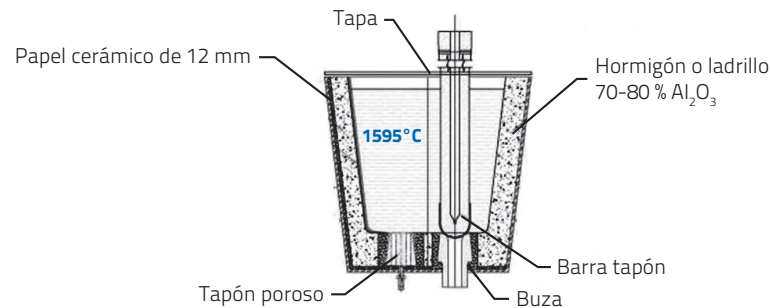


Fig. 12: Cuchara equipada con barra tapón, buza y tapón poroso, para el colado de 1500 kg a 4000 kg de acero en ENERBOM [10]

## 9. CONCLUSIONES

El acero moldeado, aunque ha visto reducir su producción a costa de la fundición nodular en las últimas seis décadas, mantiene su primacía cuando se requiere tenacidad, ductilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al calor y resistencia a la abrasión combinadas con resistencia al impacto. Ocupa el cuarto puesto en la producción mundial y nacional, luego de la fundición gris, fundición nodular y el aluminio. La piezas de acero fundidas son demandadas por la industria del petróleo y gas, minería, cementeras y otras.

Para instalar una fundición que produzca piezas de acero moldeado se requiere disponer de equipos similares a las fundiciones que producen otros tipos de metales ferrosos, con algunas diferencias. Para el moldeo generalmente se utilizan arenas aglomeradas con resinas o aceites autografuantes; el espectrómetro de emisión óptica es indispensable; el corte de montantes y coladas es más difícil. El horno de inducción y el horno eléctrico de arco son las herramientas de fusión preferidas, con predominio del horno de inducción cuando se producen piezas pequeñas y medianas, y del horno de arco para la producción de piezas grandes y muy grandes.

La simulación matemática de las operaciones es una herramienta clave para acortar los tiempos, desde el diseño hasta la producción de una pieza.

Las piezas de acero exigen moldes y nuyos más resistentes a las altas temperaturas; así como el diseño de montantes que compensen la elevada contracción del metal.

Para finalizar, el rebabado es más complicado debido a la tenacidad del material.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- «47th Census of Word Casting Production». Modern Casting, December 2013.
- Monroe, R.; «When to use ductile iron or steel castings?»
- Madias, J.; «Alternativas para la obtención de metal líquido: cubilote, horno de inducción y horno de arco». COLFUN, Buenos Aires, Argentina, octubre de 2010.
- Ulfers, H.M.; Christoffersen, R.; Weaver, R.; "John Deere Foundry Meltshop Revitalization Project". 2000 Electric Furnace Conference Proceedings, pp. 243-258.
- Deslandes, F.; Vandenberghe, L.; «Modelos y Moldes para Fundición», UTEHA, 1966, p. 65.
- Kruse, B.L.; Richards, V.L.; Jackson, P.D.; «An investigation of the causes that lead to burn-in/burn-on in heavy section steel casting». AFS 2006.
- Brooks, B.E.; Beckermann, Ch.; «Prediction of burn-on and mold penetration in steel casting using simulation». 60th SFSA Technical & Operating Conference, Paper No. 5-3, Chicago, USA, 2006.
- Chakrabartti, S.; "Gating of steel castings", Powerpoint presentation.
- Bierrenbach de Souza Santos, A.; Haydt Castello Branco, C.; «Alimentação de ferros fundidos cinzentos e nodulares». Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares, Capítulo 4, IPT, São Paulo, 1991, p. 83-112.
- Soria, J.C.; Enrique, J.; López, J.; «Modificaciones implementadas en la cuchara de acero de ENERBOM S.A. para lograr piezas de acero moldeadas de alta calidad». COLFUN, Tandil, Argentina, noviembre de 2007.



Unión Europea

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

—  
PIEZAS  
**DE ACERO  
MOLDEADO  
DE CALIDAD**



**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**

**Ministerio de  
Industria**