

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Fundada en 1968 Decreto Ley N° 17358



ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA

FACULTA DE INGENIERIA QUIMICA y METALURGICA

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGINIERO METALURGICO

TITULO:

“PROCESO DE DESOXIDACION DE ACERO EN HORNO DE INDUCCION

AUTORES:

➤ **CARDENAS RIVERA EMILIO RICAR**

ASESOR:

Dr. SANCHEZ GUZMAN ALBERTO IRHAAM

C.I.P. 19681 N° DNQ N° 187

HUACHO – PERU

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación es dedicado a Nuestros Padres por el gran esfuerzo que hicieron para brindarme esta carrera profesional y espero retribuir todo lo que hasta ahora han hecho por nosotros.

AGRADECIMIENTO

A todo el personal profesional técnico, administrativo y trabajadores en general que durante la investigación me brindaron las facilidades y la confianza necesaria para hacer posible mi tesis para así poder recibirnos como ingenieros metalúrgicos.

ÍNDICE

1	PLANTEAMIENTO	11
	1.1 DEFINICIÓN DE LA NECESIDAD Y ESPECIFICACIONES	12
	1.2 OBJETIVOS Y AMPLITUD DEL ESTUDIO	14
2	ANTECEDENTES Y ANÁLISIS	15
	2.1 ACERO	16
	2.1.1 Aceros al carbono	16
	2.1.2 Acero aleado	18
	2.1.3 Aceros inoxidables	19
	2.2 MATERIAS PRIMAS	22
	2.2.1 Chatarra	23
	2.2.2 Prerreducidos	26
	2.2.3 Ferroaleaciones	27
	2.2.4 Aluminio	31
	2.2.5 Manganeso	33
	2.2.6 Silicio	34
	2.2.7 Circonio	34
	2.2.8 Titanio	35
	2.2.9 Cromo	36
	2.2.10 Níquel	38
	2.2.11 Molibdeno	39

2.2.12	Volframio	40
2.2.13	Cobalto	41
2.2.14	Vanadio	42
2.2.15	Magnesio	43
2.3	PROCESO PRODUCTIVO	43
2.3.1	Fusión	44
2.3.2	Colada	63
2.3.3	Moldeo	69
2.3.4	Desmoldeo	89
2.3.5	Acabados	92
2.4	ENSAYOS Y CONTROLES	99
2.5	PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LA PRESENCIA DE GASES EN EL ACERO	105
2.5.1	Hidrógeno	107
2.5.2	Nitrógeno	110
2.5.3	Inclusiones	113
2.5.4	Defectos	117
2.6	METALURGIA SECUNDARIA	122
2.6.1	Procesos atmosféricos sin aportación térmica	124
2.6.2	Procesos atmosféricos con aportación térmica adicional	127
2.7	EJEMPLOS PRÁCTICOS DE ELABORACIÓN DE ACERO	128
2.7.1	Ejemplo de elaboración de acero formando doble	

	Escoria en horno de arco eléctrico	128
2.7.2	Ejemplo de elaboración de acero inoxidable de bajo carbono	140
2.7.3	Ejemplo de elaboración de acero hadfield (12–14 % C)	143
2.7.4	Ejemplo de elaboración de acero aleado	146
3	EMPRESA ACEROS DEL PERU SAC.	149
3.1	INTRODUCCIÓN	149
3.2	LOCALIZACIÓN Y CONTACTO	150
3.3	PRODUCTOS Y SERVICIOS	151
3.4	MEDIOS DE PRODUCCIÓN Y GESTIÓN DE LA CALIDAD	153
3.5	ESPECIFICACIONES DEL PROCESO PRODUCTIVO	153
3.6	PROTOCOLO DE OPERACIÓN EN ACEROS DEL PERU SAC	155
4	PROPUESTAS DE MEJORA	159
4.1	COMPLEMENTAR EL PROTOCOLO DE OPERACIÓN	159
4.2	METALURGIA SECUNDARIA	162
4.3	UTILIZACIÓN DE ENCAPSULADOS	163
5	CONCLUSIONES	164
6	BIBLIOGRAFÍA	166

INTRODUCCIÓN

El estudio de los procesos de manufactura proporciona una base para los conocimientos avanzados de manufactura integrada por computadora. Es de suma importancia que los ingenieros estén preparados para conocer las diferentes formas en que los materiales pueden procesarse así como las propiedades de cada uno de los mismos.

Los ingenieros deben comprender las ventajas y limitaciones que ofrece el maquinado convencional contra el maquinado automatizado, con el objetivo que los ingenieros sean competitivos y productivos en la industria.

Uno de los procesos de manufactura más empleados en la industria es la fundición. Esta se encarga de llevar los metales hasta el punto de fusión, para que el metal adopte la forma deseada a través de un molde.

Dentro del proceso de formación de un ingeniero, el conocimiento de este proceso permitirá tomar decisiones técnicas a la hora de diseñar productos o dirigir operaciones que involucren los procesos de fundición.

Quien escoge ser ingeniero metalurgista, deber de estar enterado de lo sacrificado que es estar inmersos en esta carrera, en este caso especial la metalurgia post-extractiva o de transformación.

La metalurgia post-extractiva se divide en: plantas de siderurgia, fundición, tratamientos térmicos, recubrimientos, laminación, trefilado, forja y otros. La industria que funde en hornos y vierte el metal en moldes después de haber empleado un modelo, para lo cual ha utilizado el arte y la ciencia con el fin de obtener piezas, es conocida simplemente como **fundición**.

RESUMEN

El calentamiento por inducción se aplicó industrialmente a la fusión de metales, cuyo principio de funcionamiento se basa en hacer circular una corriente alterna a través de una bobina, induciendo corrientes parásitas o de Foucault en el interior de la sustancia conductora, estas corrientes disipan calor por efecto Joule a la carga metálica. Los diferentes sistemas que conforman al horno de inducción son: - El inductor: Induce las corrientes parásitas o de Foucault en el material conductor. - El revestimiento refractario: Protege a la bobina de inducción de las altas temperaturas provenientes del material a fundir. - Sistema de alimentación: Provee al sistema la potencia eléctrica necesaria para la fusión de la carga. - Sistema de refrigeración: Enfía al inductor que se calienta por efecto Joule, provocado por la corriente de alimentación. - Circuito resonante serie: Es el encargado de la regulación del factor de potencia. - Sistema de control: Regula la potencia del equipo variando la frecuencia de alimentación.

El patrón de carga metálica de los hornos arco eléctrico se evaluó con fines de optimizar la producción de acero líquido con chatarra y con briquetas, esta investigación consistió en la posible reducción de costo mediante una evaluación técnica, así como también se tomó en cuenta el bienestar o afección que ocasiona el consumo de la chatarra y la briqueta en estos hornos. Este estudio se originó a causa de que la chatarra utilizada dentro de la producción ha tenido un aumento en sus costos y se quiere evaluar económicamente cual sería el comportamiento de los costos y de la producción con otro sustituto como lo es la briqueta, elaborando en detalle el consumo de cada una de las variables del proceso de coladas como lo son: (cal, energía eléctrica, electrodo, refractario y la puesta al mil) así como su respectivo costo; para una determinada carga metálica compuesta por (HRD, BRIQUETAS y CHATARRA), lo cual logra establecer el patrón de carga metálica más conveniente y menos costoso para la empresa.

PALABRAS CLAVES: HRD, CHATARRA, BRIQUETA, CARGA METÁLICA.

SUMMARY

Induction heating was applied industrially to the fusion of metals, whose principle of operation is based on circulating an alternating current through a coil, inducing eddy or eddy currents inside the conductive substance, these currents dissipate heat through Joule effect to the metallic load. The different systems that make up the induction furnace are: - The inductor: Induces eddy or eddy currents in the conductive material. - The refractory lining: Protects the induction coil from the high temperatures coming from the material to be melted. - Power system: Provides the system with the electric power necessary for the fusion of the load. - Cooling system: Cools the inductor that is heated by the Joule effect, caused by the supply current. - Series resonant circuit: It is responsible for the regulation of the power factor. - Control system: Regulates the power of the equipment by varying the frequency of feeding.

The metallic charge pattern of the electric arc furnaces was evaluated in order to optimize the production of liquid steel with scrap and with briquettes, this investigation consisted in the possible reduction of cost through a technical evaluation, as well as the welfare was taken into account or condition that causes the consumption of scrap and briquette in these ovens. This study originated because the scrap used within the production has had an increase in its costs and it is wanted to evaluate economically what would be the behavior of the costs and of the production with another substitute as it is the briquette, elaborating in detail the consumption of each one of the variables of the casting process, such as: (lime, electric power, electrode, refractory and putting to a thousand) as well as their respective cost; for a specific metal load composed of (HRD, BRIQUETAS and CHATARRA), which manages to establish the most convenient and least expensive metallic load pattern for the company.

KEY WORDS: HRD, CHATARRA, BRIQUETA, METAL LOAD.

1 PLANTEAMIENTO

1.1 DEFINICIÓN DE LA NECESIDAD Y ESPECIFICACIONES

La empresa ACEROS DEL PERU es una fundición que produce piezas de acero moldeado, mediante el moldeo en arena aglomerada por procedimientos Químicos y utilizando hornos de fusión eléctricos de inducción.

ACEROS DEL PERU SAC. no tiene una cartera de productos establecida, sino que trabaja bajo pedido, dedicándose principalmente a los sectores de:

- Matricería; laterales, pisadores, carros, cuchillas...
- Control de fluidos: válvulas, bombas...
- Plantas siderurgias: Ampuestas, sectores...
- Construcción naval: Arbotantes, bocinas, trocolas...
- Minería y Obras públicas: Martillos, mandíbulas...
- Turbinas: Kaplan, Francis, Pelton, coronas, bandas...

Los aceros se fabrican en base a las diferentes normas internacionales (UNE; DIN, ASTM, BS, AFNOR, EN), realizando principalmente los siguientes tipos de acero:

- Al carbono.
- De baja aleación.
- Inoxidables martensíticos.
- Inoxidables austeníticos.
- Dúplex y súper dúplex.
- Refractarios.
- Aleaciones especiales.
- Altamente aleados.

El peso máximo por pieza realizado es de 9 t, siendo las cajas máximas de 5000 x 3500 mm.

El proceso productivo se divide en las siguientes etapas:

1. Diseño preparación de los moldes ajustándose a los requerimientos del cliente.
2. Fusión de chatarra de acero en horno de inducción de recubrimiento básico, con adición de elementos de aleación y ferroaleaciones para la desoxidación
3. Colada en cuchara de recubrimiento básico con vaciado por el fondo
Con buza de vástago, sin utilizar metalurgia secundaria.
4. Realización del moldeo con modelos de madera ó de poliestireno, denominándose los proceso respectivamente:
 - Proceso tradicional
 - Proceso a la espuma perdidaSe utiliza para el moldeo arenas de sílice y cromita, junto con resinas para la compactación de la arena, (modelo químico).
5. Desmoldeo y extracción de las piezas.
6. Acabados de desmazararotado, desbarbado y granallado. También se realizan los tratamientos térmicos de normalizado, temple, Recocido y revenido además de los mecanizados requeridos.

La problemática principal de esta industria radica en las etapas de fusión y colada, y en concreto en la desgasificación del acero, ya que solo realizan la etapa de desoxidación, no eliminándose así todos los gases presentes en el acero por lo que en el producto final la calidad es menor de la deseada por presencia de poros, sopladuras y otros defectos.

1.2 OBJETIVOS Y AMPLITUD DEL ESTUDIO

Se realizará un estudio bibliográfico sobre el proceso de producción de las fundiciones de acero moldeado por gravedad en hornos de inducción y hornos de arco eléctrico.

El objetivo principal de este proyecto es obtener una serie de líneas de mejora que permitan una desoxidación más efectiva y por lo tanto, mejorar la calidad del acero.

Los objetivos parciales serán:

1. Complementar el actual protocolo de desoxidación

- Para ello se comparará el actual protocolo con la bibliografía consultada, introduciendo los cambios y nuevas acciones que se debieran realizar para mejorar la desoxidación y desgasificación del acero.

2. Realizar propuestas de mejoras:

- Introducción de metalurgia secundaria: Se realizará un estudio de la metalurgia secundaria disponible con el objetivo de determinar qué proceso sería el más adecuado.
- Utilización de encapsulados. Se estudiará las ventajas de la utilización de estos elementos en la desoxidación.

2 ANTECEDENTES Y ANÁLISIS

2.1 ACERO

Se denomina acero a toda aleación hierro-carbono forjable cuyo contenido de carbono está generalmente comprendido entre 0.10% y 2.1% (Fernández y Lasheras, 1991).

El hierro es un metal, relativamente duro y tenaz con temperatura de fusión de 1535°C y punto de ebullición 2740°C. Mientras el carbono es un no metal, blando y frágil en la mayoría de sus formas alotrópicas (excepto en la forma de diamante en que su estructura cristalográfica lo hace el más duro de los materiales conocidos).

El acero conserva las características metálicas del hierro, pero con propiedades notablemente mejoradas gracias a la adición del carbono, y de otros elementos metálicos y no metálicos. De tal forma no se debe confundir el hierro con el acero, dado que el hierro es un metal en estado puro al que se le mejoran sus propiedades físico-químicas con la adición de carbono y demás elementos.

(<http://www.dissenymecanic.net>).

2.1.1 Aceros al carbono

El acero al carbono, constituye el principal acero que se produce, estimando que un 90% de la producción mundial corresponde a aceros al carbono y el 10% restante son aceros aleados. Estos aceros son también conocidos como aceros de construcción. La composición química de los aceros al carbono es compleja, además del hierro y el carbono que generalmente no supera el 1%, hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como silicio y manganeso. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

Clases de acero al carbono:

- Aceros al carbono de laminación para construcciones metálicas y para piezas de maquinaria en general.

- Aceros al carbono de baja aleación y alto límite elástico para grandes construcciones metálicas, puentes, torres, etc.
- Aceros al carbono de fácil mecanización en tornos automáticos.

En estos aceros son fundamentales ciertas propiedades de orden mecánico, como la resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga y alargamiento, Estas propiedades dependen principalmente del porcentaje de carbono que contienen y demás aleantes.

En general los aceros al carbono ordinarios contienen:

- C < 1%
- Mn < 0.9%
- Si < 0.5%
- P < 0.1%
- S < 0.1%

De acuerdo con las propiedades mecánicas, se establecen una serie de grupos de aceros ordenados por su resistencia a la tracción. Popularmente son conocidos como acero extrasuave, suave, semisuave, semiduro y duro. En la Tabla 1 se describen las características principales.

Tabla 1: Tipos de acero al carbono.

	Carbono (%)	Res. Mecánica (kg/mm ²)	Dureza (HB)	Aplicaciones
Acero extrasuave	0.15	38-48	110-135	Elementos de maquinaria de gran tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes.
Acero suave	0.25	48-55	135-160	Piezas de resistencia media de buena tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado.
Acero semisuave	0.35	55-62	150-170	Ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos.
Acero semiduro	0.45	62-70	280	Ejes y elementos de máquinas, piezas bastante resistentes, cilindros de motores de explosión, transmisiones.
Acero duro	0.55	70-75	200-220	Ejes, transmisiones, tensores y piezas regularmente cargadas y de espesores no muy elevados.

2.1.2 Acero aleado

Acero aleado es aquel aleado con una variedad de elementos químicos en cantidades en peso del 1.0% al 50% para mejorar sus propiedades mecánicas. Los aceros aleados se dividen en dos grupos:

- Aceros de baja aleación.
- Aceros de alta aleación.

La distinción entre los dos varía: Smith and Hashemi sitúan la barrera en el 4 % en peso de aleantes, mientras que Degarmo lo define en el 8.0 %. La expresión acero aleado designa más comúnmente los de baja aleación. Todo acero es en realidad una aleación, pero no todos los aceros son "aceros aleados". Los aceros más simples son hierro (Fe) (alrededor del 99%) aleado con carbono (C) (alrededor del 0.1 -1 %, dependiendo del tipo). Sin embargo, el término

"acero aleado" es el término estándar referido a aceros con otros elementos aleantes además del carbono, que típicamente son el manganeso (el más común), níquel, cromo, molibdeno, vanadio, silicio, y

boro. Aleantes menos comunes pueden ser el aluminio, cobalto, cobre, cerio, niobio, titanio, tungsteno, estaño, zinc, plomo, y zirconio.

Algunos de estos aceros aleados encuentran aplicaciones altamente exigentes, como en los álabes de turbina de un motor de reacción, en vehículos espaciales, y en reactores nucleares. Debido a las propiedades ferromagnéticas del hierro, algunos aceros aleados tienen aplicaciones en donde su respuesta al magnetismo es muy importante, como puede ser un motor eléctrico o un transformador.

Se emplean estos aceros para alcanzar una templabilidad mayor, lo cual mejora otras propiedades mecánicas. También se usan para aumentar la resistencia a la corrosión en ciertas condiciones ambientales.

Los aceros de baja aleación con contenidos medios o altos en carbono son difíciles de soldar. Bajar el contenido en carbono hasta un 0.10% o 0.30%, acompañada de una reducción en elementos aleantes, incrementa la soldabilidad y formabilidad del acero manteniendo su resistencia. Dicho metal se clasifica como un HSLA Steel, acero de baja aleación de alta resistencia (<http://es.wikipedia.org>).

2.1.3 Aceros inoxidables

Según la norma EN 10088 se define a los aceros inoxidables como aquellas aleaciones férreas que contienen cromo en una proporción mínima de 10.5%

La principal característica del acero inoxidable es la buena resistencia a la corrosión, esto se debe a la propiedad de pasivarse de las aleaciones que lo componen en ambiente oxidante, lo que protege al acero y evita que se produzca la oxidación del hierro.

Los aceros inoxidables son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos. El porcentaje de dichos elementos y su variación cambia la porción de las fases presentes, lo cual da lugar a aceros inoxidables austeníticos, ferríticos, martensíticos y dúplex. En la Figura 1 se puede apreciar el árbol “genealógico” de los aceros

inoxidables, los cuales se encuentran al final de dicha estructura como consecuencia de su alto grado de aleación.

Las principales diferencias entre las distintas familias de aceros inoxidables vienen dadas por la diferencia de la composición química y las fases presentes así como sus porcentajes.

Los aceros austeníticos al cromo-manganeso-níquel se caracterizan por un alto valor de límite elástico y tensión de rotura pero su ductilidad es baja si se compara con los aceros austeníticos al cromo-níquel. Los aceros inoxidables austeníticos son similares a los ferríticos en el sentido de que no se pueden endurecer con tratamientos térmicos. Y se caracterizan por un alto grado de ductilidad, formabilidad y tenacidad, siendo materiales que se pueden endurecer trabajándolos en frío. No obstante los aceros ferríticos no tienen una alta dureza y su límite elástico varía entre 275 y 350 MPa. Presenta bajos valores de tenacidad y su susceptibilidad a la sensibilización limita su fabricabilidad. Sus ventajas vienen dadas por su resistencia a la corrosión atmosférica y la oxidación.

Los aceros dúplex se caracterizan por un alto límite elástico, que varía entre 550 y 690 MPa. El aumento del nitrógeno en los aceros dúplex aumenta el porcentaje de la austenita hasta aproximadamente un 50% (<http://www.tdx.cat>).

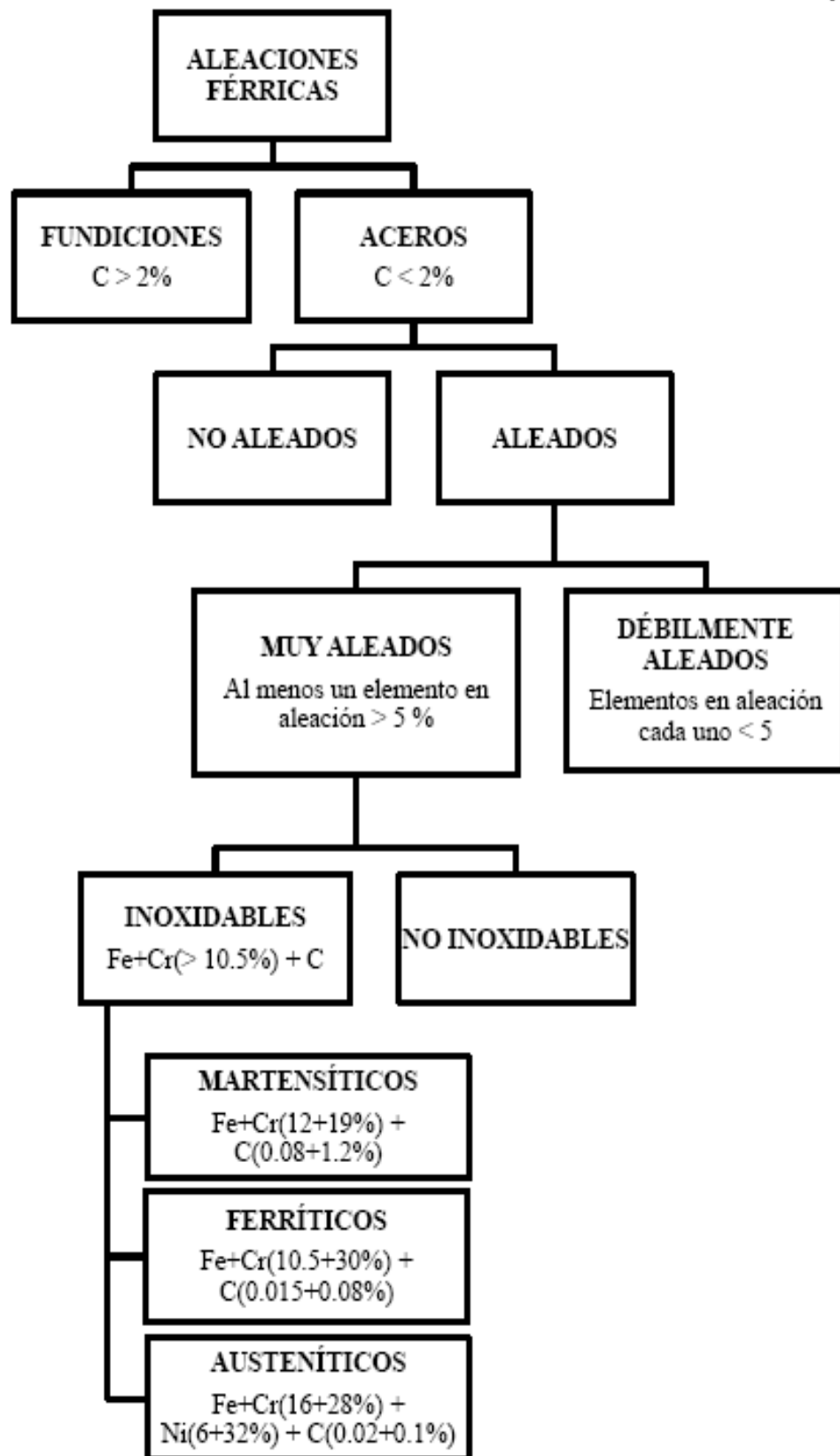


Figura 1: Árbol genealógico del acero (<http://www.tdx.cat>).

2.2 MATERIAS PRIMAS

En el siguiente apartado se procederá a describir las principales características de las materias primas empleadas en la fundición. La Figura 2 muestra los diferentes apartados a tratar. Se comenzará con la chatarra, los tipos que hay y los elementos nocivos que pueden contener. Después se hablarán de los prerreducidos y ferroaleaciones, terminando con una descripción detallada de los elementos más comunes de aleación en la fundición.

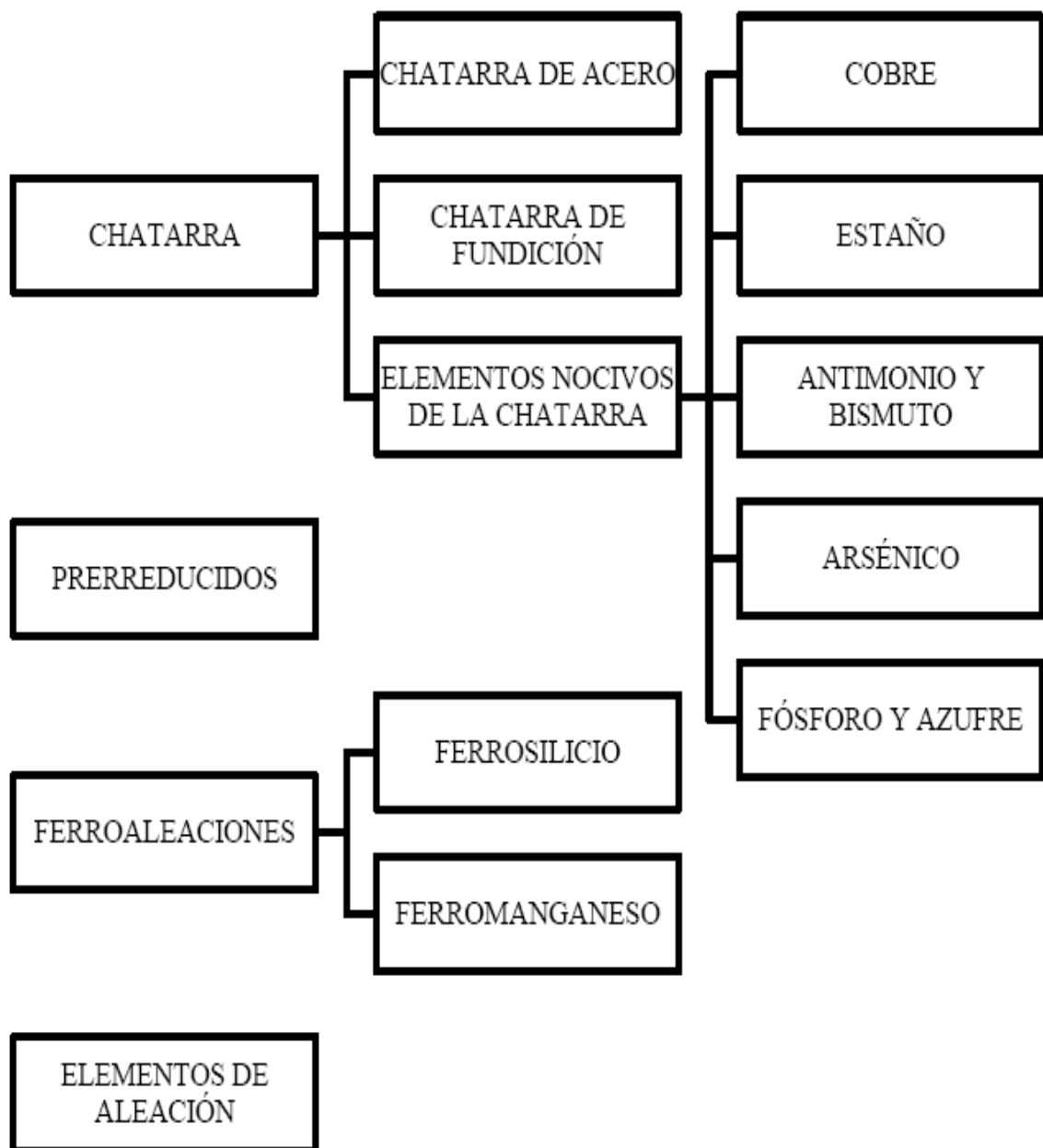


Figura 2: Diagrama de materias primas.

2.2.1 Chatarra

Al discutir las materias primas para acería es preciso tener en cuenta el comportamiento de los elementos que acompañan al hierro en los aceros. Unos favorables y otros indeseables para las propiedades de cada acero. Ha de tenerse en cuenta que, intrínsecamente hablando, ningún elemento es en sí favorable o indeseable, ya que hay elementos que son prohibidos en unos aceros y obligatorios en otros. En la marcha de acería se diferencian los elementos según:

- Se eliminan por oxidación (C – Si – Mn – P – Cr – V – Al – Ti).
- Se eliminan por reducción (O – S).
- No se pueden eliminar (Cu – Ni – Sn - As – Mo– Co) En este caso la única solución es no cargarlos (chatarras extra) o diluirlos (prerreducidos).

En términos metalúrgicos se entiende por chatarra cualquier material metálico de desecho procedente de los diversos procesos de fabricación de metales o aleaciones, así como también toda pieza metálica o resto de ella que por la causa que fuere ya no sea utilizable con el fin para el que fue creada. La denominación de chatarra no implica que en su posterior utilización haya de ser sometida a un nuevo proceso de fusión, sino que dicho aprovechamiento puede alcanzarse por cualquier proceso de acondicionamiento o utilizarse como está para una nueva finalidad.

Según su composición, la chatarra empleada en los hornos de acería se puede clasificar en dos grandes grupos, a saber, chatarra de acero y chatarra de fundición.

- **Chatarra de acero:** Como su nombre indica es la que está constituida exclusivamente por trozos de acero. Como el material del que procede puede ser un simple acero al carbono o ser aleado, para distinguirla se le denomina de acuerdo con su composición; por ejemplo, chatarra de acero al carbono, chatarra de acero al manganeso, cromo-níquel.

Por otra parte, en algunos casos se indica el origen de la chatarra y así se dice chatarra de carriles, de desguace (de barcos), de despuntes (de

laminación), etc. nombres todos que dan una indicación, no ya solamente del origen, sino en muchas ocasiones también de su composición.

Distinguimos entre la chatarra adquirida y la que procede de la propia factoría. La adquirida puede venir clasificada por tamaños o calidades. La producida en la propia factoría es, normalmente de composición conocida, especialmente la de bebederos, mazarotas, fondo de cuchara “lobos”, desperdicio.

- **Chatarra de fundición:** En la fabricación de acero en el horno eléctrico se rehúye el empleo de este tipo de chatarra, aunque a veces viene incluida en partidas adquiridas como chatarra de acero. En general, la chatarra de fundición tiene, además de sus característicos altos contenidos de carbono y silicio (que obliga a consumir más oxígeno que lo normal), un contenido bastante fuerte de impurezas nocivas para el acero, como azufre y fósforo; este último por la composición del arrabio del que procede y el azufre por haberlo adquirido en el curso de su refusión con coque en cubilote.

Estos elementos son costosos de eliminar y por eso la fundición no se emplea más que en casos de escasez o para elevar el contenido de carbono de un acero cuando la especificación lo requiera, pero siempre es más favorable para este fin el empleo de un arrabio de composición conocida.

Las cualidades deseables en la chatarra son:

- Lo más gruesa y masiva posible. En este sentido la mejor puede ser la procedente de astilleros, desguace de buques, maquinaria, calderería pesada y ferrocarriles.
- Son preferibles aceros al carbono o de muy baja aleación para acortar la duración oxidante de las coladas y evitar problemas en la laminación derivados de la presencia de elementos trampa. A

pesar de lo anterior algunas chatarras (inoxidable, Hadfield...) pueden ser útiles para fabricar los mismos aceros.

- Es favorable que estén limpias y libres de óxido, suciedad, pinturas, aceites, taladrinas, etc. En este sentido es preferible la chatarra desmenuzada a la compactada (Enríquez y Tremps, 2009a).

Elementos nocivos de la chatarra

La chatarra adquirida suele ser bastante heterogénea y en ella se encuentran a veces restos de metales no férricos que en general son nocivos para el acero.

- **Estaño:** Uno de los elementos más nocivos es el estaño. Comunica al acero fragilidad en caliente que puede llegar a impedir su laminación. También dificulta la soldabilidad de los aceros que lo contienen. Como esta impureza no se puede eliminar en el proceso de acería, es preciso que las materias primas no lo contengan, especialmente todo lo que tiene que ver con la hojalata (latas de conservas, bebidas...).
- **Cobre:** Esta impureza puede proceder de material eléctrico o de algún trozo de cobre o latón que se deslizó en la chatarra. Su efecto es nocivo por comunicar al acero fragilidad en caliente con la consiguiente dificultad para su laminación. Pero como la chatarra de sus aleaciones tiene mayor precio que la férrea, siempre suele presentarse en cantidades que no la hacen molesta más que si se suma al cobre que ya tiene el acero y que puede ser elevado especialmente si se trata de chatarra de acero al cobre "kuprus" o "cortén". La influencia del cobre es tanto más nociva cuando mayor sea el contenido de carbono del acero que se fabrique o cuanto más ductilidad se le exija.
- **Antimonio y bismuto:** Estas dos impurezas tienen un análogo efecto de acritud, tanto en caliente como en frío, aunque estén presentes en sólo

mínimas cantidades. Su presencia en la chatarra se debe a algún trozo de antifricción que puede quedar adherido a otro férreo (bloques de motor...). Suele ser más probable su presencia en la chatarra de fundición que en la de acero por provenir generalmente aquélla de maquinaria y ser más fácil por lo tanto la presencia del metal antifricción que en la chatarra de acero.

- **Arsénico:** Es raro encontrar esta impureza en la chatarra aunque pueden provenir de una chatarra de fundición blanca a la que previamente se le haya agregado este elemento para endurecerla. Hasta un contenido de 0,1 % de arsénico no se notan los efectos perjudiciales más que en alguna dificultad para soldar el acero. Por encima de este límite empiezan a presentarse dificultades en la laminación, lo mismo que sucede con el azufre.
- **Fósforo y azufre:** Estas impurezas siempre están presentes en la chatarra, y es fácil su eliminación en los hornos básicos. En los ácidos no son eliminables, por lo que deben aparecer en proporciones mínimas (Enríquez y Tremps, 2009a).

2.2.2 Prerreducidos

Los prerreducidos (pellets, briquetas, hierro esponja) son los productos obtenidos por reducción directa en estado sólido, mediante carbón o hidrocarburos, de minerales muy puros y lo más exentos posible de ganga. Ha de tenerse en cuenta que la ganga produce en la colada una escoria poco reactiva, viscosa y difícil de manipular.

Aportan la ventaja de que son hierro prácticamente puro exento de cualquier elemento contaminante o de aleación. Por ello su presencia en la carga es favorable como diluyente de elementos (Ni, Sn, Cu...) perjudiciales e imposibles de eliminar en las marchas de colada en acería (Enríquez y Tremps, 2009a).

2.2.3 Ferroaleaciones

Las ferroaleaciones, como su nombre indica, consisten en la aleación del hierro con uno o varios elementos. Se designan anteponiendo el prefijo “ferro” al nombre del elemento aleado y a continuación el número representativo del tanto por ciento de contenido de elemento aleado o, si son varios, los números de los tantos por ciento en el mismo orden que se han enunciado los elementos. Las ferroaleaciones más utilizadas se ven la Tabla 2.

Tabla 2: Composición de ferroaleaciones.

Nombre	Composición %			
	C	Si	Mn	P
Ferromanganeso Normal	7.0	0.5	80	0.25
Ferromanganeso 15% C	1.5	0.75	80	0.20
Ferromanganeso 1% C	1.0	0.75	80	0.20
Ferromanganeso 0.5% C	0.5	0.75	80	0.20
Ferromanganeso 0.1% C	0.1	0.75	80	0.20
Silicomanganeso Normal 1.25% C	1.25	20	70	0.05
Silicomanganeso Bajo 0.1% C	0.1	20	70	0.05
Spiegeisen	6.5	2	20	0.05
Silico-Spiegel	3.0	5	25	0.05
Ferrosilicio 50	0.5	50	0.1	0.05
Ferrosilicio 75	0.5	75	0.1	0.05
Ferrosilicio 90	0.5	90	0.1	0.05

Las ferroaleaciones tienen una doble misión, pues pueden actuar como desoxidantes en la fase reductora de la colada de acero o como vehículos de incorporación de los elementos respectivos (aleantes) en los aceros aleados. El constituir aleaciones con el hierro en lugar de usar los elementos puros se debe a la mayor facilidad y economía de obtención de las ferroaleaciones que los metales puros. Por otro lado al ser su temperatura de fusión bastante más baja son más fácilmente digeribles por el caldo.

El primer aspecto, el desoxidante, corresponde al ferrosilicio, ferromanganeso y ferrotitanio. El ferrosilicio es un enérgico desoxidante y su empleo es casi imprescindible en la fabricación del acero. El ferrotitanio es también un desoxidante y al mismo tiempo un desgasificante.

El ferromanganeso, aunque más débilmente que los anteriores es también desoxidante y además tiene la propiedad de sustituir al hierro en el sulfuro de hierro.

Este azufre, por ser soluble en el hierro, le comunica gran fragilidad en caliente. Sin embargo, el sulfuro de manganeso es insoluble y se globuliza y pasa a la escoria o queda en los espacios intercristalinos permitiendo así el trabajo en caliente (laminación y forja) de los aceros. Cuanto más azufre tenga un acero más manganeso ha de haber presente para que el acero sea forjable o laminable. De todas formas, en mayor o menor cantidad, siempre ha de estar presente.

El segundo aspecto de la misión de las ferroaleaciones es el de obtener aceros aleados con el aleante que se introduce. En este caso se puede decir que entran todas las ferroaleaciones, incluso las tres mencionadas anteriormente. Los metales que se emplean puros, esto es, sin alear con el hierro, son el aluminio, níquel, cobre y en algunas ocasiones silicio y manganeso.

Ferrosilicio

Las aleaciones de hierro y silicio pueden presentar diferentes grados y además contener otro u otros elementos de aleación. Así se tiene:

- Ferrosilicio del 10 al 12%.
- Ferrosilicio del 45 al 55%.
- Ferrosilicio del 75 al 80%.
- Silicio metálico del 98% o más.

Ferroaleaciones de silicio compuestas:

- **Ferro-silicio-calcio:** También se conoce esta aleación con los nombres de silico-calcio, siliciuro de calcio o “Sica”. Esta ferroaleación se emplea en acería como desoxidante, especialmente en la fabricación de aceros inoxidable, y como desulfurante. Además tiene la propiedad de fijar el nitrógeno disuelto en el acero y también eliminar el hidrógeno. Tiene la ventaja de producir una escoria muy fluida de silicato de calcio en contra del ferrosilicio y aluminio que producen residuos sólidos.

En estas aleaciones hay dos compuestos bien definidos, el CaSi_2 que contiene 41.67 % de calcio y tiene un punto de fusión de 1020°C y el CaSi con 58.81% de calcio y punto de fusión 1220°C . Con cerca del 40% de calcio se tiene el eutéctico $\text{CaSi}_2\text{-Si}$, que funde a 980°C ; al aumentar la proporción de silicio el punto de fusión va creciendo. Los productos industriales tienen una solución sólida de CaSi_2 en el silicio y hasta un 15% de hierro.

- **Ferro-silicio-aluminio:** Llamado también silico aluminio se emplea en la fabricación de acero como desoxidante y por tener la propiedad de eliminar o modificar las inclusiones sólidas del acero. Esta adición se hace después del período de oxidación con la escoria ya retirada y se produce una reacción muy viva entre los óxidos del baño y el silicio y el aluminio con la formación de una escoria compuesta de polisilicatos de hierro y aluminio que tiene una gran fluidez y que es capaz de fijar y arrastrar consigo los óxidos que permanecerían como inclusiones en el baño.

También durante la colada y siempre que se tenga el baño desnudo y expuesto a la oxidación del aire se añade polvo de silicio-aluminio pero sin los inconvenientes de éste. También puede hacerse la adición en la cuchara. El tipo normal de ferro-silicio-aluminio es el de:

- 45 a 50% de silicio.
- 20 a 25% de aluminio.
- 25 a 30% de hierro.

➤ **Ferro-silicio-cromo:** Se obtiene por reducción en el horno eléctrico por el carbón de una mezcla de sílice y de cromita. Tiene la particularidad, como el ferrosilicio, de contener tanto menos carbono cuanto más silicio lleva. Su aplicación en acería es como desoxidante en aceros inoxidables para evitar pérdidas de cromo en la fusión inicial de la chatarra en horno de arco.

➤ **Ferro-silicio-manganeso:** Esta aleación se obtiene por reducción de un mineral de manganeso silicioso o bien por reducción de sílice, mineral de manganeso y la adición de hierro según el título que se quiera obtener. La carga del horno se hace añadiendo cal o, mejor aún, espato flúor en pequeña cantidad. Las aleaciones son muy bajas en carbono, por lo que son muy indicadas cuando se quiere evitar carburación del baño.

Las composiciones que se presentan normalmente son de 16 a 32 % de silicio y 30 a 75 % de manganeso. A este último suele llamársele silicomanganeso.

Los contenidos de carbono son de 1.2 % para 20 % de silicio y 0.4 % para 30 % de silicio.

➤ **Ferro-silicio-manganeso-aluminio:** Esta aleación se emplea como desoxidante y reúne las propiedades de las aleaciones señaladas anteriormente. Su obtención se hace por refusión de las ferroaleaciones sencillas que aporten los elementos que la constituyen.

➤ **Ferro-silicio-zirconio:** Se emplea como desoxidante.

Ferromanganeso

Se emplea como desulfurante y como vehículo de aleación de manganeso.

La obtención del ferromanganeso se lleva a cabo en hornos con revestimiento básico o de carbono. Como el punto de ebullición del manganeso es de 1900°C, las características de la corriente eléctrica deben ser de una tensión y densidad de corriente bajas para que no se volatilice el manganeso formado.

El ferromanganeso afinado puede obtenerse a partir de un ferromanganeso ordinario carburado que se refunde, en horno de arco indirecto Rennerfeld o Stassano, con más mineral de manganeso. Éste se reduce a expensas del carbono del ferromanganeso ordinario. También directamente en un horno de este mismo tipo a partir de mineral.

El manganeso metal se obtiene por aluminotermia o por electrolisis.

Hay que emplear una escoria muy básica formada por cal, la cual siempre contiene manganeso y sirve para eliminar silicio y azufre. A veces es conveniente repasar la escoria por el horno, especialmente cuando contiene mucho manganeso.

Se obtienen varios tipos de ferromanganesos:

- Hierro especular (Spiegeleisen) con 10 a 12% o 18 a 20% de Mn.
- Ferromanganeso de 50 a 55% de Mn.
- Ferromanganeso de 75 a 80% de Mn.
- Manganeso metal.
- Dentro de cada clase hay que distinguir entre ferromanganeso ordinario o “duro” alto en carbono y ferromanganeso “afinado” bajo en carbono (Enríquez y Tremps, 2009a).

2.2.4 Aluminio

En la Tabla 3 se encuentran las principales características del aluminio.

Tabla 3: Propiedades del aluminio

Símbolo	Al
Numero atómico	13
Peso atómico	27
Densidad a 20°C	2.7g/cm ³
Punto de fusión	660°C
Punto de ebullición	2400°C
Estructura cristalina	Cúbica de caras centradas

El aluminio produce un endurecimiento de la ferrita, incrementa la templabilidad, no forma carburos sino que es un elemento grafitizante.

Es un gran desoxidante, con gran afinidad para el nitrógeno, con el que forma nitruros de aluminio, ayuda a evitar sopladuras y segregaciones al separar los gases del baño.

Posee un gran poder en el control de tamaño de grano, los aceros tratados con aluminio tienen buena resistencia al envejecimiento y buena resistencia al impacto, mejora la mecanizabilidad, decreciendo la resistencia a la fluencia.

Cuando el aluminio está presente entre 0.015 y 0.025%, las inclusiones en el acero son del tipo II que son las más perniciosas, pero si aumentamos el aluminio hasta el 0.10%, las inclusiones serán del tipo III, bastante menos peligrosas.

En los aceros nitrurados se emplea el aluminio 0.4 y 1.5%, también es empleado en los aceros para imanes al níquel y en los aceros para imanes permanentes con níquel y cobre. Junto con el wolframio y cobalto se obtienen aceros como Alnico, Alcomax.

En las aleaciones de base níquel junto con el titanio se añade aluminio para aceros resistentes a alta temperatura (Nimonic). En los aceros inoxidable 18-8 puede producir un endurecimiento por precipitación con adiciones de hasta el 1% de aluminio.

En las aleaciones hierro carbono para resistencias eléctricas, con adición de aluminio de hasta el 5% aumenta la resistencia a altas temperaturas, así como la resistividad.

Se emplean los aceros con aluminio y alto contenido de cromo para resistores, alguno de ellos con cobalto.

Es necesario añadir granalla de aluminio sobre la cuchara antes de llenarla en 0.1-0.2% sobre el peso del caldo, con lo que aseguraremos una desoxidación completa.

2.2.5 Manganeso

En la Tabla 4 se encuentran las principales características del manganeso.

Tabla 4: Propiedades del manganeso.

Símbolo	Mn
Numero atómico	25
Peso atómico	54.9
Densidad a 20°C	7.4g/cm ³
Punto de fusión	1244°C
Punto de ebullición	2095°C
Estructura cristalina	Cúbica

El manganeso es totalmente soluble en el hierro Gamma y en el hierro Alfa es del 3%. Endurece la ferrita, incrementa la templabilidad.

Se usa como desoxidante aunque su poder es menor que la del silicio y aluminio.

Cuando hay poco manganeso en el acero, el azufre forma SFe que tiene un punto de fusión bajo y que por lo tanto produce grietas en caliente y en especial a la hora de forja en caliente.

Cuando hay suficiente manganeso, se forma SMn de mayor punto de fusión desapareciendo este inconveniente.

Se emplea en aceros Hadfield de 12-14% de Mn, consiguiendo que la ausenita sea estable a temperatura ambiente, además de tener gran resistencia a la abrasión y gran ductilidad.

Elevan la resistencia a la tracción I en especial aquellos con 0.25% de carbono y 1% de manganeso, con buena tenacidad.

Los nitruros de manganeso son muy duros, utilizándose en aceros de nitruración.

Se emplea en aceros para cigüeñales, bielas, alambres, herramientas de troquelado en frío.

2.2.6 Silicio

En la Tabla 5 se encuentran las principales características del silicio.

Tabla 5: Propiedades del silicio.

Símbolo	Si
Numero atómico	14
Peso atómico	28
Densidad a 20°C	2.4g/cm ³
Punto de fusión	1411°C
Punto de ebullición	2600°C
Estructura cristalina	Cúbica

Es un gran desoxidante, endurece la ferrita y aumenta ligeramente la templabilidad, es un gran grafitizante. Con contenidos del 2.5% decrece la conformabilidad y aumenta la resistencia a la tracción y el límite elástico. Está presente en todos los aceros, pero no en cantidad mayor de 0.35% en la mayoría de los aceros por lo anteriormente dicho.

Se utiliza en los aceros para muelles. Aumenta la fragilidad de revenido cuando se adiciona a los aceros al cromo, cromo níquel y cromo-volframio, aumenta la resistencia al calor y a la oxidación.

Se emplea en los aceros para chapa magnética con 4-5% de Si para transformadores.

2.2.7 Circonio

En la Tabla 6 se encuentran las principales características del circonio.

Tabla 6: Propiedades del circonio.

Símbolo	Zr
Numero atómico	40
Peso atómico	91.2
Densidad a 20°C	6.4g/cm ³
Punto de fusión	1860°C
Punto de ebullición	4750°C
Estructura cristalina	Hexagonal compacta

El circonio tiene efectos análogos al titanio y aluminio, afina el grano, mejora la resiliencia y mecanizabilidad, la fluencia a altas temperaturas. Con aceros altamente aleados aumentan la dureza, limite elástico, disminuyendo el alargamiento...

Sus ferroaleaciones son grandes desoxidantes. Reduce el envejecimiento; forma inclusiones del tipo II, las mas perniciosas entre contenidos de circonio 0.03-0.3%. Fija el azufre, mejorando la mecanización, la laminación.

Otras propiedades que cabe mencionar son:

- Disminución de la fragilidad en caliente.
- Inhibición del crecimiento del grano (acero calmado).
- Mejora la fragilidad al choque a temperatura muy baja (-50°C -75°C).
- En las fundiciones el circonio favorece la formación de grafito laminar o eutectoide durante la solidificación; aumenta también el efecto del magnesio para formar grafito nodular y estabiliza este efecto.

2.2.8 Titanio

En la Tabla 7 se encuentran las principales características del titanio.

Tabla 7: Propiedades del titanio.

Símbolo	Ti
Numero atómico	22
Peso atómico	47.9
Densidad a 20°C	4.51 g/cm ³
Punto de fusión	1600°C
Punto de ebullición	3260°C
Estructura cristalina	Hexagonal compacta

Es un potente formador de carburos y nitruros. Actúa como gran desoxidante y desnitrurador. Se debe emplear con sumo cuidado y en cantidades pequeñas, controla el tamaño de grano austenítico, aumenta la dureza del revenido, disminuyendo la profundidad de temple.

En los aceros inoxidable evita la corrosión intercrystalina con cantidades mínimas referidas al carbono (cinco veces el porcentaje de carbono). Tiende a afinar el grano aumentando la resistencia a la fluencia.

2.2.9 Cromo

En la Tabla 8 se encuentran las principales características del cromo.

Tabla 8: Propiedades del cromo.

Símbolo	Cr
Numero atómico	24
Peso atómico	52
Densidad a 20°C	7.1 gr/cm ³
Punto de fusión	1850°C
Punto de ebullición	2680°C
Estructura cristalina	Cubica de cuerpo centrado

El cromo mejora la resistencia de los aceros frente a la corrosión, aumenta la templabilidad, siendo un gran formador de carburos y actuando en aceros de alto carbono mejorando la resistencia a la abrasión.

Es un elemento ferritizante. Forma varios carburos en especial cuando el carbono es alto. Los carburos formados son:

- $C(FeCr)_3$ que cristaliza en el sistema rómbico.
- $C_3(FeCr)_7$ en el sistema trigonal.
- $C(FeCr)_4$ en el sistema cúbico.
- $C_2(FeCr)_3$.

Con cromo entre el 5-6% junto con un poco molibdeno y niobio, aumenta la resistencia a la corrosión y a la fluencia a altas temperaturas. Cuando este mismo acero tiene poco carbono se emplea en las refinerías de petróleo.

Los aceros níquel–cromo–molibdeno, se emplean en piezas cementadas.

Incrementa, la resistencia en los aceros no aleados, con 1% de carbono y un 1.5% de cromo, se emplea en cojinetes con gran resistencia al desgaste. Se emplea en los aceros indeformables, aceros extrarapidos con volframio o molibdeno.

Los aceros inoxidable, todos tienen cromo en su composición, con o sin níquel y con carbono en cantidad desde 0.03%.

Con 0.1% de carbono y con más de 18% de cromo son totalmente ferríticos sin posibilidad de temple, con gran resistencia frente a ácidos, si aumentamos hasta el 27% el cromo, conseguiremos un acero que aguanta bien hasta 1000°C.

Cuando añadimos al acero níquel se mejora la resistencia a la corrosión.

Según se va añadiendo níquel se va aumentando el porcentaje de austenita.

Los óxidos de níquel y cromo crean una capa que impide la corrosión (pasivación).

La corrosión intercrystalina es debido a in empobrecimiento de los granos en cromo, aumentando esta corrosión cuando el carbono en porcentajes del orden de 0.03% va aumentando.

Los aceros refractarios son los que tienen del orden del 25% de cromo y alrededor de 20% de níquel como mínimo, que disminuyen las velocidades de oxidación.

2.2.10 Níquel

En la Tabla 9 se encuentran las principales características del níquel.

Tabla 9: Propiedades del níquel.

Símbolo	Ni
Numero atómico	28
Peso atómico	58.7
Densidad a 20°C	8.9 g/cm ³
Punto de fusión	1455°C
Punto de ebullición	2910°C
Estructura cristalina	Cúbica de caras centradas

El níquel es totalmente miscible con el hierro Gamma y un 10% con hierro Alfa.

Con más del 30% de níquel los aceros son totalmente austeníticos incluso a temperatura ambiente. No forma carburos.

Con adiciones de hasta el 5% se incrementa la resistencia y dureza de los aceros al carbono, con una buena tenacidad y al impacto, empleándose para piezas grandes que deban ser forjadas. Teniendo una estructura martensítica con contenidos de níquel de 15 al 20%.

Los aceros con níquel junto con cromo y molibdeno, incrementan la templabilidad, con bajos contenidos de ambos elementos.

Cuando se aumenta el carbono en estos aceros, aumenta la resistencia al desgaste y al choque (martillos desmenuzadores de chatarra).

Los aceros más conocidos al níquel son los inoxidables, también se emplea en aceros para imanes permanentes, turbinas de gas (Nimonic), en aceros de nula dilatación (Invar) en relojería...

2.2.11 Molibdeno

En la Tabla 10 se encuentran las principales características del molibdeno.

Tabla 10: Propiedades del titanio.

Símbolo	Mo
Numero atómico	42
Peso atómico	95.95
Densidad a 20°C	10.2gr/cm ³
Punto de fusión	2625°C
Punto de ebullición	5550°C
Estructura cristalina	Cúbica de caras centradas

El molibdeno es soluble en el hierro Alfa hasta el 37%. Endurece la ferrita y aumenta la solubilidad de la austenita. Gran formador de carburos, mejora la resistencia al revenido.

Los aceros de alta resistencia aleados con molibdeno, aumentan la tenacidad, resistencia a la tracción y dureza. Mejora la elasticidad y resiliencia, retardan la transformación austenítica, la velocidad de enfriamiento.

La adición de molibdeno a los aceros al cromo, al manganeso, y al níquel cromo, mejora la fragilidad revenido, facilitando el enfriamiento lento del mismo, que son empleados en la fabricación de ejes cigüeñales.

En aceros martensíticos con carbonos medios altos, aleados con molibdeno se aumenta la dureza. Cuando se añade molibdeno a aceros de baja y alta aleación, mejoran la resistencia a la tracción y la fluencia a altas temperaturas. Esto es debido al aumento de la resistencia en caliente a la tracción de la ferrita y la elevación de la temperatura de recristalización después del endurecimiento por deformación.

Se emplea en recalentadores de calderas y tubos para temperaturas mayores de 450°C, mejorando la resistencia a los gases, a la oxidación, al ataque del vapor de agua, con alta resistencia a la fluencia y sin fragilidad de revenido. También se emplea en turbina de gas.

En aceros para herramientas el molibdeno aumenta su profundidad del temple. En los aceros rápidos puede sustituir al volframio, el acero extra rápido al molibdeno se descarbura superficialmente.

En los aceros inoxidables 18-8 con molibdeno desaparece la corrosión intercrystalina, en especial con titanio o niobio.

En aceros nitrurados produce nitruros de gran dureza. Se emplea en el Permalloy con níquel y hierro.

2.2.12 Volframio

En la Tabla 11 se encuentran las principales características del volframio.

Tabla 11: Propiedades del volframio.

Símbolo	W
Numero atómico	74
Peso atómico	183.9
Densidad a 20°C	19.3g/cm ³
Punto de fusión	3380°C
Punto de ebullición	5400°C
Estructura cristalina	Cubica de cuerpo centrado

El volframio aumenta la templabilidad de la austenita y la dureza en la ferrita. Es un gran formador de carburos, que son extremadamente duros y resistentes al desgaste y al calor.

Los carburos presentan la composición Fe₄W₂C y Fe₄W₃C y en ciertas condiciones se descomponen en el carburo sencillo CW. Los carburos que no se disuelven hacen que el grano sea fino, para disolverlos hace falta tratamientos prolongados a altas temperaturas.

Favorece la ferritización, se requiere temperatura alta para las transformaciones eutéctoides. Cuando el temple es a baja temperatura se obtiene un grano muy fino, disminuyendo la penetración del temple.

Su principal empleo es en aceros para herramientas y en especial en los aceros rápidos para corte, altas velocidades y grandes avances, teniendo además de gran resistencia, gran tenacidad.

Recociéndolos para distensionarlos se aumenta la tenacidad sin disminuir la dureza, el rendimiento al corte, aunque disminuye algo la tenacidad.

Parte del wolframio puede sustituirse por el molibdeno, pero disminuye la propiedad de corte. Con adiciones de hasta el 15% de cobalto, los aceros rápidos con wolframio mejoran las propiedades de corte, aumentando la templabilidad. Cuando el wolframio es demasiado bajo disminuye la velocidad de corte y avances en los aceros de herramientas.

Los aceros con wolframio tienen más remanencia magnética, que los aceros no aleados. Desempeña un papel importante en la fabricación de metal duro sinterizado para recubrimiento de las puntas de herramientas de tornos, fresas...

2.2.13 Cobalto

En la Tabla 12 se encuentran las principales características del cobalto.

Tabla 12: Propiedades del cobalto.

Símbolo	Co
Numero atómico	27
Peso atómico	58.9
Densidad a 20°C	8.7g/cm ³
Punto de fusión	1860°C
Punto de ebullición	2900°C
Estructura cristalina	Hexagonal compacta

Presenta dos estructuras cristalinas, hexagonal compacta a menos de 450°C y cúbica centrada en las caras a más de 450°C. Tiene solubilidad limitada en el hierro Gamma y 75% en el Alfa. Disminuye el punto de temple aumentando el punto de fusión de los aceros aleados con molibdeno. Reduce la profundidad de temple, aumenta la dureza a alta temperatura, aumenta la resistencia a la corrosión, abrasión resistencia a la tracción y

límite elástico, aunque disminuye la tenacidad, impide la descarburación en caliente.

Se utiliza en aceros de hasta el 40% de molibdeno.

En aceros de herramientas al volframio, en aceros para imanes, elevando la magnetización y mejorando la remanencia.

La aleación Stellite que además tiene molibdeno, volframio, cromo níquel, tienen su empleo en motores de aviación, cirugía...

2.2.14 Vanadio

En la Tabla 13 se encuentran las principales características del vanadio.

Tabla 13: Propiedades del vanadio.

Símbolo	V
Numero atómico	23
Peso atómico	50.95
Densidad a 20°C	6.15g/cm ³
Punto de fusión	1860°C
Punto de ebullición	3550°C
Estructura cristalina	Hexagonal compacta

Su disolución total en hierro Alfa, aumentando la dureza de la ferrita y la templabilidad de la austenita.

Gran formador de carburos, afina el grano, forma nitruros, forma nitruros estables, aumentando la resistencia a la tracción, sin disminuir la tenacidad.

Se emplea en aceros para muelles, con el cromo, para cojinetes en aceros moldeados, para machos de roscar, martillos, taladros, hojas de afeitar, punzones, hileras, estampación en frío, aceros indeformables, aceros rápidos junto con volframio y cromo.

2.2.15 Magnesio

En la Tabla 14 se encuentran las principales características del magnesio.

Tabla 14: Propiedades del magnesio.

Símbolo	Mg
Numero atómico	12
Peso atómico	24.3
Densidad a 20°C	1.75 gr/cm ³
Punto de fusión	650°C
Punto de ebullición	1105°C
Estructura cristalina	Hexagonal compacta

Se obtiene una buena desoxidación y desulfuración en las aleaciones níquel-cromo.

Se ha llegado a reducir el azufre hasta 0.007% inyectando magnesio con cal en el horno. Las aleaciones de magnesio sirven para afinar el grano de aceros austenítico inoxidables y mejorar la conformabilidad en caliente (Yarza y Ibarra, 2008).

2.3 PROCESO PRODUCTIVO

El proceso productivo de una fundición de acero moldeado por gravedad sigue el diagrama de la Figura 3. Una vez se recibe el pedido, se estudia para determinar qué tipo de modelo es el más apropiado para realizar el molde. Tomada la decisión, se procede a realizar el molde con el modelo y una serie de elementos de moldeo como machos, enfriaderos, salidas de gases... Finalizada esta etapa, se procede a la fusión, donde se fundirán las materias primas necesarias para obtener el acero en el horno eléctrico. Al final de la fusión y durante la siguiente etapa, la colada, se desoxidará el acero, el cual una vez colado se dejará enfriar. Tras extraer la pieza (desmoldearla), esta se somete a una serie de acabados. En primer lugar se realiza un desmazarotado, desbarbado y granallado, para así después someterla a una serie de tratamientos térmicos, los cuales se elegirán en función de las propiedades que ha de tener el acero. Llegado este punto, la

pieza se mecaniza y tras comprobar sus propiedades mediante ensayos y controles, se envía al cliente.

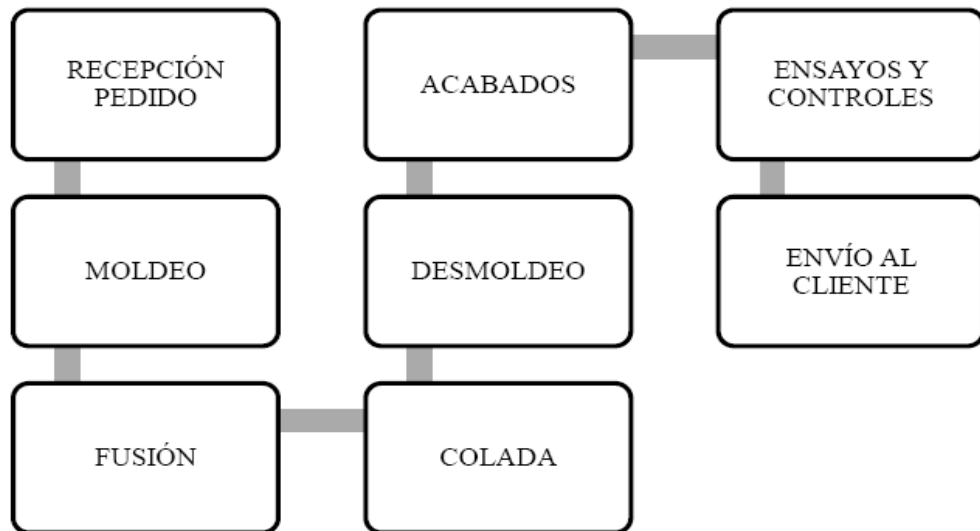


Figura 3: Diagrama del proceso productivo.

2.3.1 Fusión

La fusión de la materia prima se realiza en el horno, el cual puede de inducción o de arco eléctrico. Las diferentes etapas de la fusión se observan el diagrama de la Figura 4. La fusión comienza con la preparación de la carga, esto incluye una serie de operaciones en donde se calculará cuanta materia prima vamos a necesitar en función del acero a realizar. Tras el calculo de la carga y comprobar el estado del refractario, se procederá a fundir la carga entrando así, en lo que se denomina marcha de operación, la cual consiste en ir fundiendo y añadiendo las materias primas, controlando la temperatura y la escoria que protege al caldo. Al final de la fusión será cuando se realizará la desoxidación del caldo.

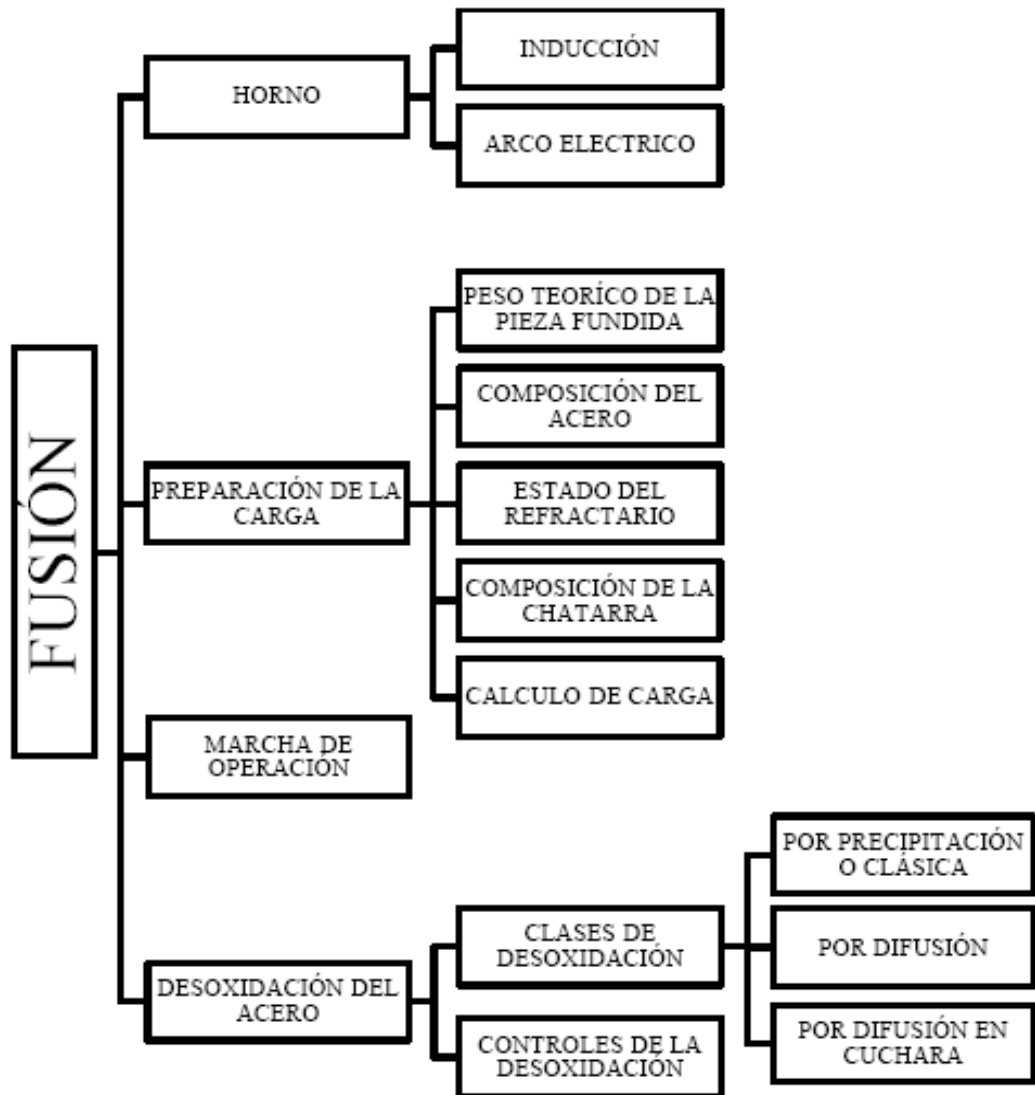


Figura 4: Diagrama de la etapa fusión.

Horno de inducción

Desde el punto de vista eléctrico el horno de inducción puede considerarse como un transformador:

- El primario es una bobina construida con tubos de cobre (Figura 5), por los que circula agua refrigerante. El secundario lo constituye el metal a fundir que, como es una masa única, funciona para efectos eléctricos como una bobina que estuviera en cortocircuito.
- La corriente alterna que circula por la bobina primaria genera campos electromagnéticos que a su vez inducen corrientes de Foucault en el

secundario, es decir, en el metal a fundir. Por efecto Joule estas corrientes calientan el metal, lo funden y sobre calientan.

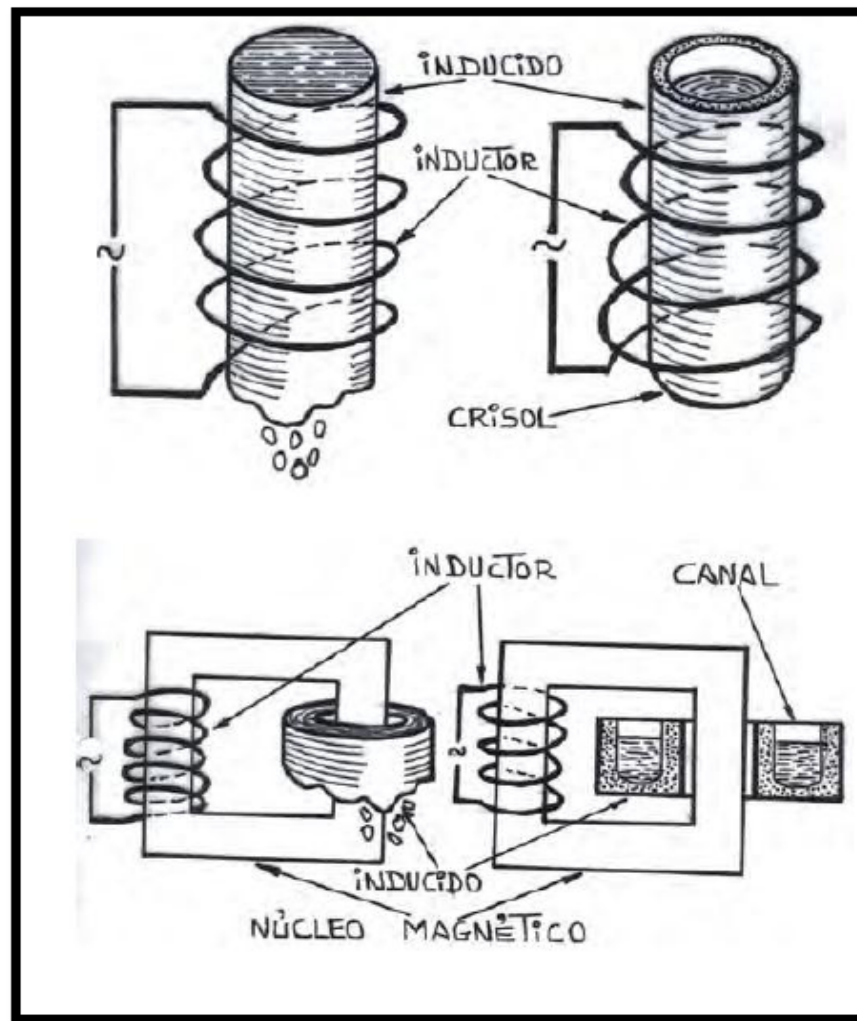


Figura 5: Horno de inducción de crisol sin núcleo y horno de inducción de canal con núcleo (Enríquez y Tremps, 2009a).

El horno de inducción (Figura 6) está constituido por los siguientes elementos principales:

- Transformador con variador de tensiones.
- Convertidor de frecuencia, siendo el más común el de estado sólido (tiristores), por su simplicidad y facilidad de mantenimiento.
- Batería de condensadores (capacitancia variable) para mejorar el consumo.

Cuadro de control y mando.

- Bombas, intercambiadores, desionizadores de agua y refrigeración. Especialmente necesarios en los convertidores de estado sólido que precisan refrigeración con agua desionizada en circuito cerrado.
- Ventiladores para refrigeración por aire.
- Sensores y alarmas de seguridad.
- Crisol (o cuba en los de canal) con tapa y mecanismo de basculación.

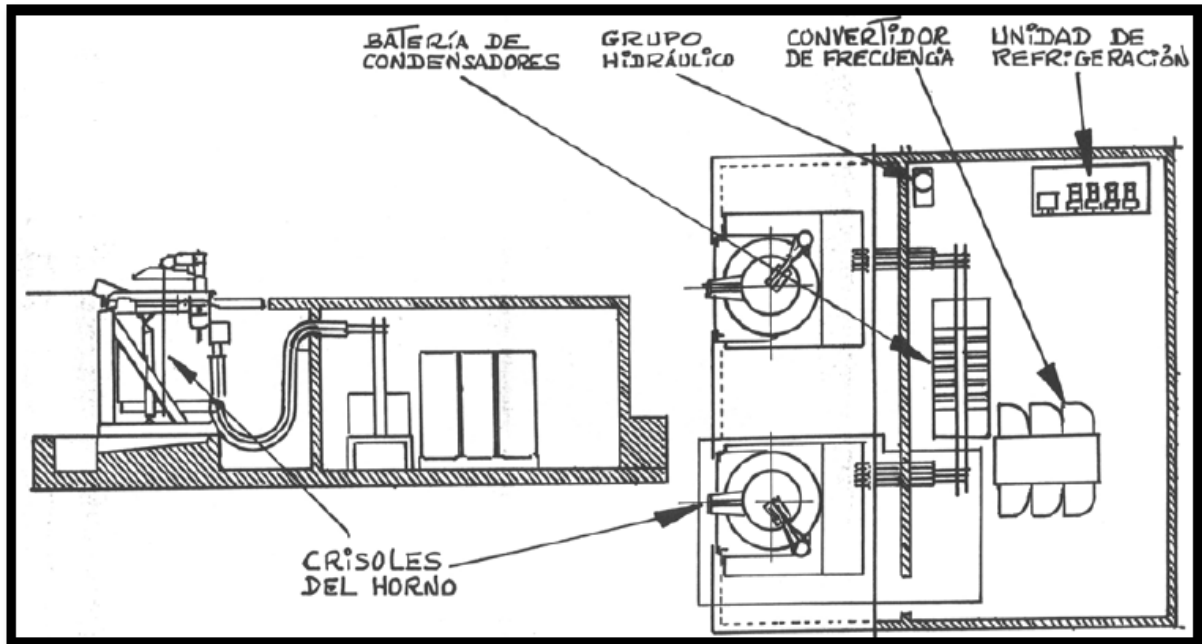


Figura 6: Horno de inducción de crisol (Enríquez y Tremps, 2009a).

Existen clases de horno eléctrico, según el diseño, el revestimiento, o si son de canal o crisol.

Clasificación según el diseño

- Hornos de crisol sin núcleo: Toda la carga se encuentra dentro de la bobina inductora, transmitiéndose la acción inductiva de la bobina directamente a la carga. El horno está compuesto por un crisol de material refractario que va envuelto exteriormente por espiras conductoras formadas por tubos de cobre, por los que además recorre el agua refrigerante.

- Hornos de canal con núcleo: Solo una parte de la carga metálica, el llamado canal, esta sometido a la acción inductiva y en consecuencia solo esa parte recibe calentamiento. La acción inductiva de la bobina se transmite al metal contenido en el canal a través de un núcleo de acero eléctrico. Las fuerzas electro (Enríquez y Tremps, 2009a).

Comparación entre horno de inducción de crisol y horno de canal:

El revestimiento del horno de crisol es más delgado, lo que le resta fiabilidad frente a perforaciones y limita su capacidad.

La potencia específica instalada (KVA/kg) es mucho mayor en los hornos de crisol. Esto permite alcanzar mayor temperatura y, por lo tanto, fundir metales y aleaciones de mayor punto de fusión (aceros ordinarios o especiales). La mayor potencia permite una velocidad de fusión más rápida, y mejor productividad.

Los hornos de crisol suelen trabajar a mayor frecuencia (los de canal lo hacen con frecuencia de la red). Esto hace que puedan arrancar con cargas frías y de menor conductividad y calidad.

Los hornos de crisol se emplean como hornos discontinuos de fusión primaria, casi siempre para aleaciones de alto punto de fusión (aceros). El horno de canal se usa como equipo de mantenimiento de caldo en procesos dúplex (IRSID, máquinas de colada continua) y para fusión primaria de aleaciones de bajo punto de fusión (Enríquez y Tremps, 2009a).

Clasificación según revestimiento

Los hornos de inducción pueden tener revestimiento ácido (cuarcita o arena silíceas), neutro (alúmina) o básico (magnesia o dolomía). El revestimiento ácido se emplea para aceros corrientes al carbono o cuando se dispone de chatarras de muy buena calidad. Para aceros muy aleados (Hadfield o inoxidable, por ejemplo) el revestimiento ácido no sirve pues aparte de su menor resistencia pirosférica se producirían reacciones metal-escoria-revestimiento que atacarían el refractario y rebajarían la calidad y aleación del acero. Por ello, para estos aceros de alta aleación se emplean

refractarios básicos, especialmente magnesia. También es válida la alúmina, que es bastante versátil. El crisol se construye en el mismo horno por atacado del refractario entre la bobina inductora de cobre y un molde cilíndrico de chapa que tiene la forma y dimensiones que ha de tener el crisol. La arena refractaria no tiene consistencia en frío, por lo que se deja el molde de chapa en la primera colada.

Este molde funde pero el calor del caldo sinteriza y vitrifica el refractario que adquiere consistencia para las siguientes coladas. Cuando la capa adyacente al caldo se consume vitrifica la siguiente, que adquiere consistencia, y así sucesivamente.

Cuando se enfría el refractario quedan grietas en él que pueden ser muy alarmantes. Sin embargo, en la siguiente colada, al calentarse y dilatarse el refractario, las grietas se cierran y el revestimiento queda impermeable al acero líquido (Enríquez y Tremps, 2009a).

Horno de arco eléctrico

El horno de arco pertenece, desde el punto de vista del diseño y operación, al grupo de los procesos de afino sobre solera. Podría considerarse como un horno Siemens-Martin de planta circular y en el que el calentamiento se realiza por arco eléctrico entre los tres electrodos, horno de corriente alterna trifásica, o entre el electrodo único y el baño, horno de corriente continua (Enríquez y Tremps, 2009a).

El horno de arco eléctrico consiste en un recipiente refractario alargado, refrigerado por agua para grandes tamaños, cubierta con una bóveda refractaria, a través de la cual uno o más electrodos de grafito están alojados dentro del horno. Por lo tanto, el horno se compone principalmente:

- El armazón: consiste en las paredes refractarias y en la cimentación.
- El hogar: consiste en el lecho refractario que bordea la cimentación.
- La bóveda: cubre el horno, puede ser de aspecto esférico o cónico, pudiendo estar refrigerada por agua ya que tiene que soportar grandes choques térmicos al entrar los electrodos por ella.
- Los electrodos, los cuales son de grafito y serán 3 ó 1 dependiendo del tipo de funcionamiento del horno.
- El transformador, parte fundamental de la instalación ya que debe alimentar adecuadamente al horno, adaptándose a las variaciones que puedan producirse. Estos tienen varias tomas de corriente a diferentes tensiones para que se pueda trabajar con una determinada potencia según cada momento de operación.

El arco eléctrico se forma entre la carga y el electrodo, así que la carga se calienta tanto por la corriente que pasa a través de la carga como por la energía radiante generada por el arco. Los electrodos suben y bajan automáticamente mediante un sistema de montacargas eléctrico ó cilindros hidráulicos. El sistema de vaciado en los hornos de arco eléctrico modernos suele ser colada por el fondo (Figura 7), permitiendo así realizar metalurgia secundaria en la cuchara, ya que el acero cae a la cuchara libre de escorias (Enríquez y Tremps, 2009a).

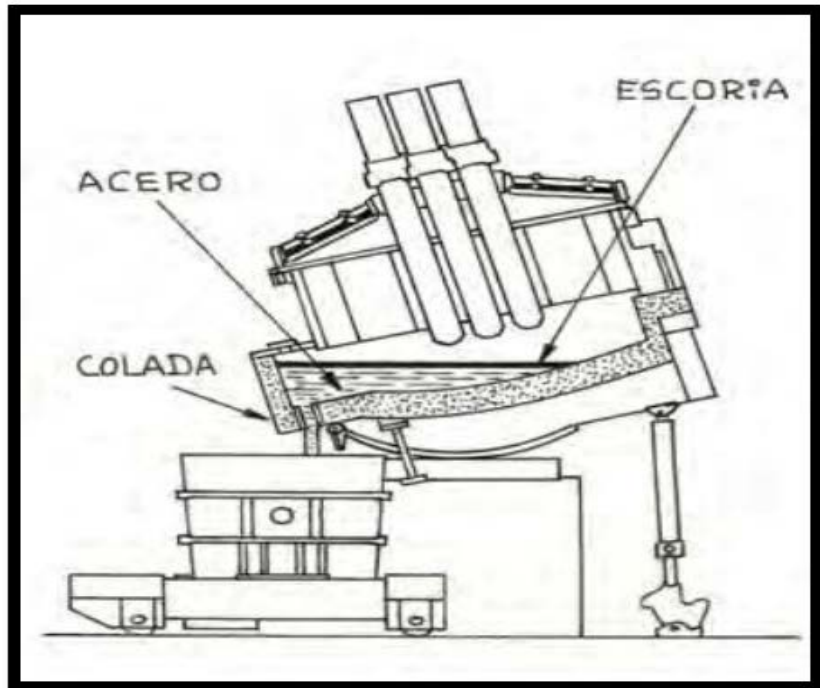


Figura 7: Colada excéntrica por el fondo (Enríquez y Tremps, 2009a).

Comparación entre horno de inducción de crisol y horno de arco

Las características de ambas unidades de fusión son muy diferentes, lo que marca sus aplicaciones. Algunas diferencias son:

El revestimiento de los hornos de inducción de crisol empleados para acero es más delgado (si fuera grueso no pasaría la inducción electromagnética) y por lo tanto tiene menor fiabilidad y seguridad contra perforaciones que el horno de arco. Esto hace que los hornos de inducción de crisol sean de capacidad mucho menor que los de arco y poco adaptables a grandes producciones para laminación o para piezas moldeadas de gran tamaño.

- Al no haber electrodos no recarbura el acero, lo que hace al horno de crisol especialmente favorable para fabricación de aceros de extra bajo carbono, como es el caso de los inoxidables o de fleje eléctrico.
- La agitación electrodinámica homogeneiza el acero, tanto en composición como en temperatura. Esta agitación es tanto más intensa cuanto menor es la frecuencia de la corriente que le alimenta. En hornos de baja frecuencia llega a formarse un menisco con la convexidad hacia arriba. Esta homogeneidad a su vez aporta fiabilidad de análisis. La agitación (que

no se da espontáneamente en el horno de arco) facilita la digestión de las ferroaleaciones. Esto favorece el ahorro de las mismas y es muy útil en la fabricación de aceros aleados.

- El calentamiento se produce en la masa y no hay arco entre electrodos. Por tanto la escoria está fría y no interviene en las reacciones. No hay reacciones químicas y por lo tanto hay garantía de que la composición que se carga es la que se va a tener en la cuchara. Esta escoria fría presenta una desventaja, y es que cuando se utilizan pellets prerreducidos como material de carga su digestión por el baño es muy difícil pues no pueden traspasar la costra de escoria. El problema se solventa en la actualidad calentando la escoria y superficie del baño con un torcho de plasma.

Los hornos de inducción de crisol están perfectamente adaptados a la colada en vacío o bajo atmósfera protectora, cosa no posible en los de arco. Esto facilita la fabricación de piezas y lingotes de aceros de calidad extra para aplicaciones especiales (Enríquez y Tremps, 2009a).

Preparación de la carga

A la hora de preparar la carga se tiene en cuenta una serie de factores:

- Peso teórico de la pieza fundida: Este peso se calculará a la recepción del modelo de poliestireno para poder cuantificar la carga del horno. En caso de que la pieza se fabrique mediante modelos de madera, el cálculo del peso de la pieza se realizará mediante el cálculo aproximado del volumen.
- Composición del acero: Se determinará antes de calcular la composición del horno. Existen numerosas clases de aceros, lo cual supone que cada uno tendrá una composición química particular.
- Estado del refractario: Antes de cualquier uso del horno se debe revisar el estado del revestimiento del horno para localizar posibles fisuras o ataques. Un refractario suele durar en torno a 75–85 coladas.

- Composición de la chatarra: Identificar la composición química media de la chatarra que se va a emplear.
- Cálculo de carga: Se realizan los cálculos necesarios para obtener el peso de chatarra que se debe introducir en el horno así como la cantidad de ferroaleaciones.

Para realizar la carga del horno se utilizan los puentes grúa y el electroimán. La chatarra depositada en contenedores está formada por un conjunto de piezas, partes metálicas, etc., de acero, inservibles y sin ninguna utilidad. Proceden del desguace de barcos, puentes, automóviles, electrodomésticos, máquinas, etc., así como los residuos, despuntes, recortes, virutas, etc., de la industria metalmecánica y rechazos y despuntes de la misma fabricación del acero (Álvarez, 2011).

Descripción de la operación

Después de introducirse la chatarra en el horno, como se muestra en la Figura 8, se esperará a que una vez comenzado el proceso de fusión la chatarra vaya reduciendo su tamaño en el interior del horno y después se van añadiendo las ferroaleaciones necesarias hasta completar la composición deseada.



Figura 8: Carga de chatarra en un horno de inducción.

Las reacciones metalúrgicas producidas durante la fusión son muy reducidas y se limitan a la escorificación de los óxidos metálicos de la carga y del deterioro del material refractario del horno al ponerse en contacto con la sílice aportada por la carga y por la añadida por el desescorificante (compuesto de sílice).

Cuando se forma la escoria en la superficie del horno se añade un desescoriente o fundente (carbonato cálcico) que tiene como función hacer la escoria más espesa para que al desescoriar, sea fácil su extracción. Además ayuda a formar una capa protectora del baño. Una vez todos los compuestos sean caldo, aproximadamente a los 120 minutos después de empezar se corta la corriente y se toma del caldo una muestra para analizarla con el espectrómetro (capítulo 2.3.5) el cuál nos da la composición química del acero. Además también se retira la escoria que se habrá formado, la cual flota sobre la superficie del baño en forma de capa espesa relativamente fría, puesto que solo se calientan indirectamente y protege al metal del acción de la atmósfera del horno.

Esta escoria está formada principalmente por silicatos de hierro y de manganeso saturados de sílice.

Finalmente se comprueban los resultados del espectrómetro y se realizará la adición de ferroaleaciones para ajustar la composición y desoxidar, proceso el cual se describe mas adelante.

Tras la desoxidación se restablece la corriente.

A los pocos minutos de restablecer la corriente se mira la temperatura con el pirómetro, se comprueba que la temperatura es la correcta (1620°C aproximadamente) y si lo es se da por terminado la operación, se corta la corriente y se cuela el acero.

Oxígeno en el acero

El oxígeno al ponerse en contacto con el acero fundido, se combina con el acero formando óxido ferroso FeO , que se disuelve en cantidades importantes en el baño metálico. La oxidación del acero en estado líquido se produce principalmente en los hornos de fusión. Aunque también puede oxidarse en la colada a la cuchara y en la colada al molde. La cantidad de oxígeno que pueden disolver los aceros, aumenta con la temperatura y disminuye con el contenido de carbono.

El hierro en estado líquido a 1539°C y presión atmosférica, puede contener hasta 0.1600% de oxígeno. El porcentaje de contenido de oxígeno se transforma en partes por millón multiplicando el valor por 10000.

Al solidificarse el hierro, la solubilidad baja bruscamente desde 0.1600% a 0.0030% y no puede por tanto mantener en disolución todo el oxígeno que disolvía en estado líquido a la misma temperatura. A la temperatura ambiente

la solubilidad del oxígeno es prácticamente nula. La solubilidad del oxígeno en el hierro y en el acero varía:

- Con la temperatura del baño.
- Con el contenido en carbono.
- Con la presión del ambiente que la rodea.

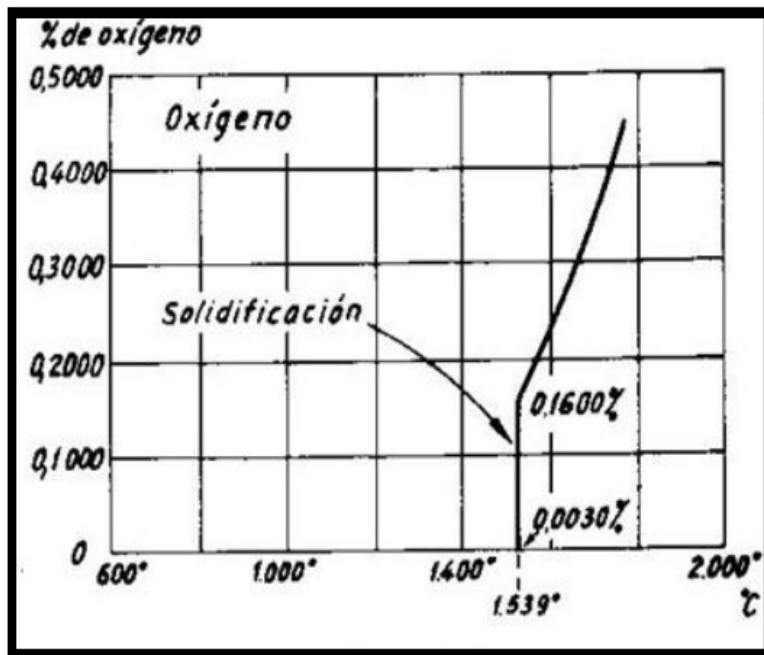


Figura 9: Influencia de la temperatura en la solubilidad del oxígeno en el hierro puro (Apraiz, 1969).

El oxígeno que en el enfriamiento se separa de la aleación en estado líquido, reacciona con el carbono del acero. La reacción que se produce en la solidificación:



Dando lugar el desprendimiento del óxido de carbono a porosidades, siendo por ello necesario desoxidar para obtener un acero de calidad (Apraiz, 1969).

Cabe recalcar la importancia que tiene la temperatura en el contenido de oxígeno en el acero líquido en el horno de fusión (Figura 9). Por ejemplo, para un contenido determinado de carbono, al pasar la temperatura desde 1600°C a 1650°C aumenta muy sensiblemente el contenido de oxígeno en equilibrio con el acero.

Se observa y se comprende, por lo tanto, que en los hornos, al final del proceso oxidante, los aceros a muy elevada temperatura se encuentran sobreoxidados y contienen mucho más oxígeno que el que corresponde al equilibrio (Enríquez y Tremps, 2007).

Desoxidación

La desoxidación es una operación tecnológica con la cual el oxígeno disuelto en el metal se transforma en un compuesto insoluble en el metal o se elimina de este último. El acero desoxidado tras la solidificación no desprende apenas gases, por ello se denomina acero calmado

La desoxidación se realiza para evitar que el acero después de colado desprenda gases en el momento de la solidificación, evitando la reacción (ec. 1). Cuando no desoxidamos un acero, las burbujas del monóxido de carbono formadas se desprenderán en cristalización, el metal se agitará enérgicamente y la superficie del metal será tumultuosa. Tal acero se llama efervescente. Existe una desoxidación intermedia que da acero semicalmado (Voskoboinikov, Kudrin y Yákushev, 1982).

A continuación se describen los siguientes procedimientos de desoxidación:

- a) Desoxidación por precipitación ó clásica.
- b) Desoxidación por difusión.
- c) Desoxidación tratando el metal por la escoria en la cuchara.

a) Desoxidación por precipitación ó clásica

Desoxidación por precipitación ó clásica consiste en transformar el oxígeno disuelto en el acero en óxido insoluble agregando al metal un elemento llamado desoxidante.

El desoxidante debe de ser mas afín con el oxígeno que el hierro, como resultado de la reacción se forma un óxido, poco soluble en el metal cuya densidad es menor que la del acero. El precipitado obtenido emerge pasando a la escoria.

En la práctica se ha visto que en la fabricación de aceros de 0.40 a 0.90% de carbono, el acero esta calmado, cuando el contenido en oxígeno es inferior a 0.0030% y, en los aceros de 0.14 a 0.40% de carbono, cuando es inferior a 0.0050%. Finalmente los aceros de 0.08% de carbono están calmados cuando es inferior a 0.0080% (Enríquez y Tremps, 2007).

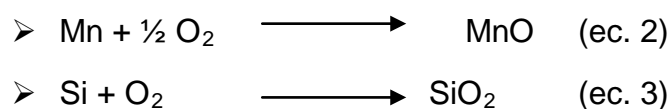
Los elementos utilizados han de tener una gran afinidad con el oxígeno, en la siguiente lista están ordenados de forma decreciente:

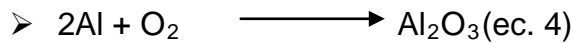
- Aluminio – titanio – vanadio – silicio – manganeso – cromo –fosforo – molibdeno – hierro – níquel – cobalto – arsénico – cobre.

Los elementos más comunes usados son el manganeso, ferrosilicio y aluminio, aunque lo más recomendable es añadirlo en forma de una aleación de Ca Mn Si. La adición se realizará en las siguientes cantidades (Apraiz, 1969):

- Mn = 0.60%
- Si = 0.25%
- Al = 0.025%

Dando lugar a las siguientes reacciones:





Se obtienen pequeñas partículas de óxidos MnO, SiO₂, Al₂O₃ y de silicatos complejos de esos metales (inclusiones no metálicas).

Todas estas reacciones van acompañadas con el desprendimiento de calor. El equilibrio de la reacción de desoxidación por precipitación se desplaza a la izquierda al aumentar la temperatura y a la derecha al disminuirla. Esto quiere decir que a medida que desciende la temperatura del acero las reacciones de desoxidación continúan desarrollándose y se forman cada vez nuevas y nuevas cantidades de óxidos que desde luego, no tienen tiempo para subir a la superficie e irse del metal.

Por eso con este método de desoxidación no se puede obtener un acero completamente exento de inclusiones no metálicas, siendo un inconveniente fundamental de este procedimiento de desoxidación. Sin embargo este método tiene la más amplia aplicación ya que es el más barato y simple.

La disminución de la cantidad de las inclusiones no metálicas quedadas en el acero, se alcanza haciendo variar la combinación de los desoxidantes y la sucesión de su introducción.

Es aconsejable desoxidar con una aleación de Fe-Al-Ti, o granalla de aluminio en cuchara.

Con el fin de obtener en el metal complejos de fusión fácil y bien emergentes se emplean muy frecuentemente los así llamados oxidantes complejos que no son más que aleaciones de varios desoxidantes: Silicomanganeso (Si+Mn), silicocalcio (Si+Ca) aleación AMS (Al+Mn+Si) aleación KMK (Si+Mn+Ca) y otros.

Al utilizar los desoxidantes complejos, los productos de la reacción entran en interacción recíproca. Además, al usar desoxidantes complejos se forman inclusiones más gruesas y más fáciles de emerger.

Por regla general los desoxidantes se agregan al metal al final de la fusión. Cabe mencionar que también se produce normalmente una cierta desoxidación por acción del carbono, con la ventaja de que da un producto gaseoso, CO, evitando las inclusiones no metálicas, aunque su acción para valores bajos de carbono es poco energética como se observa en la Figura 10. En vacío o a bajas presiones la acción del carbono es muy energética, siendo preferible esta porque no deja residuos sólidos (Voskoboinikov, Kudrin y Yákushev, 1982)

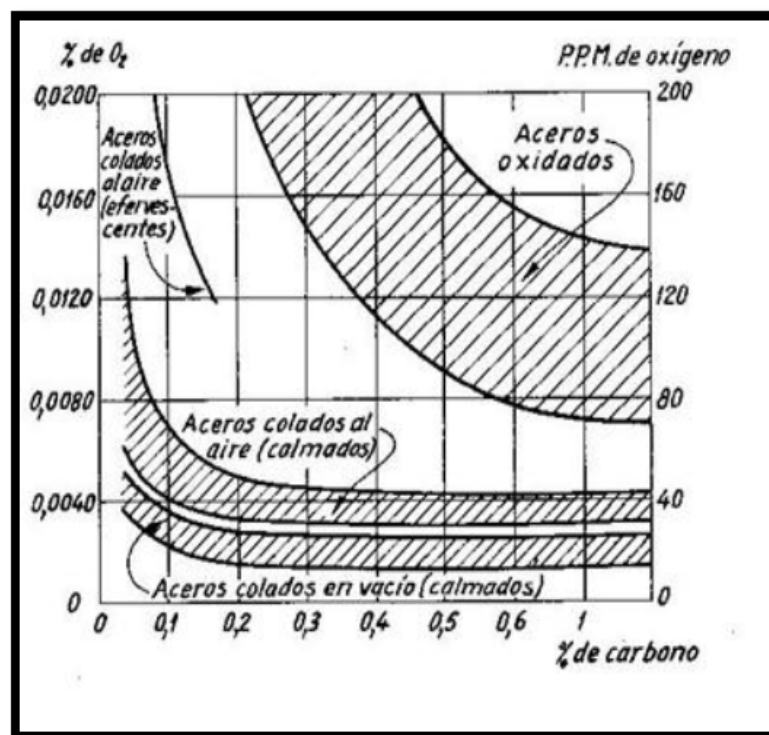


Figura 10: Influencia del contenido en carbono y del proceso de fabricación en el contenido de oxígeno de los aceros (Apraiz, 1969).

b) Desoxidación por difusión

Cuando el metal no está en ebullición, entre la escoria y la actividad del oxígeno en el baño existe una relación, ley de distribución de las impurezas disueltas en dos líquidos inmiscibles.

Por lo que si se disminuye la actividad de los óxidos de hierro en la escoria disminuirá el grado de oxidación del metal. Al efectuar la desoxidación por difusión suelen suministrarse a la escoria reductores fuertes: carbono, (coque, carbón vegetal, electrodos) el silicio (ferrosilicio) y aluminio.

Los óxidos de hierro presentes en la escoria interacciona con los reductores (desoxidantes), con ello la concentración y actividad de los óxidos de hierro presentes en la escoria disminuye y esto, a su vez, origina la disminución de la concentración y actividad de oxígeno, presente en el metal.

La velocidad del proceso de transferencia del oxígeno a partir del metal a la escoria se determina por difusión en el metal, de ahí el nombre.

En la desoxidación por difusión los productos de desoxidación no quedan en el metal, quedando un acero con menos inclusiones no metálicas, ventaja sobre la desoxidación por precipitación. Los inconvenientes principales: la velocidad de difusión en un metal calmado es pequeña, teniendo menor rendimiento. Además, al estar en una atmósfera oxidante la mayoría de los desoxidantes añadidos reaccionan con la atmosfera y no con los óxidos de hierro. Siendo por ello una opción trabajar en atmosfera protectora (Voskoboinikov, Kudrin y Yákushev, 1982).

c) Desoxidación por difusión en cuchara

Es una variedad de la desoxidación por difusión que se efectúa en la cuchara en vez de en el horno, y se distingue por la gran velocidad del proceso. Si durante la salida del horno a la cuchara se mezcla con una escoria que no contiene óxidos de hierro, entonces ocurre la difusión del oxígeno en forma de óxidos que pasa del metal a la escoria. El proceso ocurre con velocidad, ya que el chorro de metal al caer desde una altura considerable sobre la superficie de la escoria forma una emulsión de

escoria y metal. La escoria se prepara por separado, está compuesta principalmente por $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, y se denomina escoria sintética.

Para que se realice la desoxidación realmente, lo fundamental es que el contenido de óxidos de hierro en la escoria sea mínimo. Además es necesario asegurar la actividad máxima de CaO . Asegurando esto se crean las condiciones para eliminar el oxígeno y además el azufre.

La escoria sintética debe de tener una temperatura de fusión baja, y debe de humectarse mal con el metal, para que se separe completamente de este último.

La desoxidación por difusión en cuchara disminuye el tiempo de fusión del acero, aumentan la calidad y la estabilidad de las propiedades del metal (Voskoboinikov, Kudrin y Yákushev, 1982).

Controles de la desoxidación

Existen diversos tipos de controles para saber si la desoxidación ha sido llevada a cabo satisfactoriamente, habiéndolos desde los más sencillos hasta los más complejos y que requieren grandes inversiones, a continuación se explica algunos de ellos:

- **Color y olor de la escoria:** Cuando se “barrea” para acelerar las reacciones de inter-fase la barra se introduce después en agua para enfriarla. La escoria adherida se desprende y cae con el frío del agua y se puede observar su color.

Al principio, mientras la escoria está todavía oxidada, tiene color negro o marrón oscuro. Después, al avanzar la desoxidación, el color se aclara, pasando por color marrón claro y beige para terminar siendo blanca y con olor a carburo.

- **Composición de la escoria:** Un control más tecnificado sería empastillar la escoria y hacer análisis químico (espectrometría, fluorescencia de rayos).

- Temperatura del metal: Empíricamente se controlaba la temperatura del metal vertiendo en el suelo el contenido del cazo toma-muestras y viendo la distancia recorrida por la lengua de caldo antes de solidificar. También colando un lingotillo en molde de arena y controlando mediante una varilla el tiempo que tarda en solidificar y agarrar la varilla. Control instrumental de la temperatura se hace con pirómetros. Inicialmente fueron ópticos de radiación por desaparición de imagen; después fueron de infrarrojo. Actualmente se controla la temperatura mediante lanza pirométrica con cartucho consumible y recambiable.
- Composición del acero: Empíricamente se conocía que el acero estaba desoxidado cuando el lingotillo no sólo no se hinchaba al solidificar sino que se producía un rechupe acentuado; este rechupe indica ausencia de gas CO formado por el oxígeno del calco contenido en el molde al enfriarse. Y si no hay producción de CO es que no hay oxidación.
- El análisis térmico o la determinación instrumental del oxígeno mediante los respectivos sensores son medidas más fiables del grado de desoxidación.
- Hoy día se analiza por espectrometría de emisión (“chispeo”) una muestra de metal tomada mediante cazo y molde o con un captador especial consumible adaptado a lanza de inmersión o sublanza (Enríquez y Tremps, 2009).

2.3.2 Colada

La colada es el trasvase del metal líquido del horno a la cuchara (Figura 13) y posteriormente a la caja de moldeo para fundir la pieza. En este proceso los elementos principales son los que se indican en el diagrama de la Figura 11, donde se tiene la cuchara y el sistema de colada, el cuál está compuesto por elementos indicados.

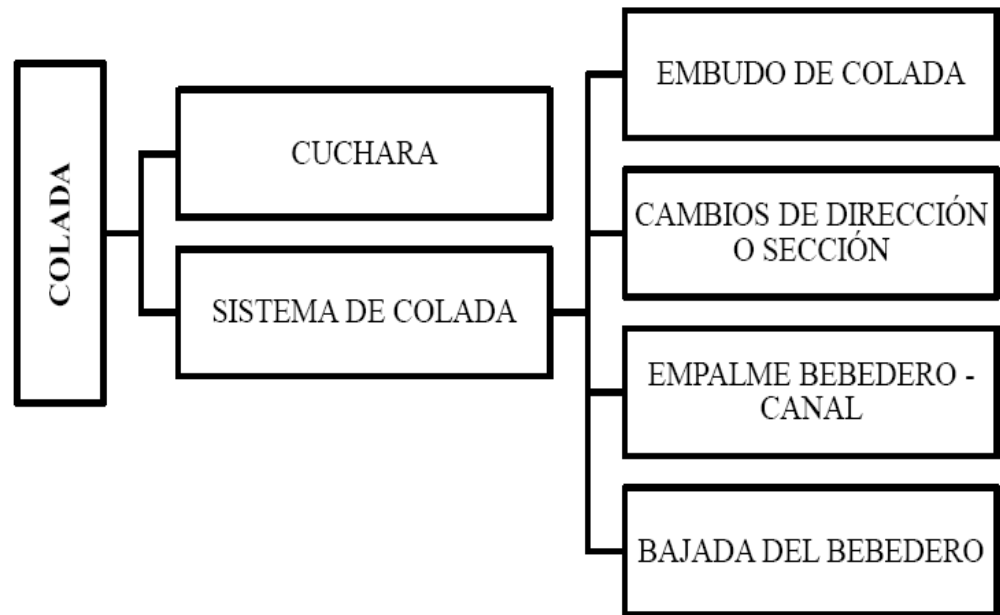


Figura 11: Diagrama de la etapa de colada.

La colada del horno de inducción al molde es bastante sencilla, y esto es así porque el horno de inducción tiene un sistema neumático de basculación y además su parte superior está abierta, factores estos que hacen sencilla la colada respecto del horno de arco eléctrico, el cuál para colar tienen la necesidad de desplazar alguna de sus partes.

Luego la colada se realiza en el horno de inducción basculando ó volcando el horno y colocando una cuchara delante de este, mediante un puente grúa, para que el metal líquido pase del horno a la cuchara, tras esto la cuchara es desplazada mediante el puente grúa hasta el molde, una vez al lado del molde es colocada y se procede la basculación del metal líquido al sistema de colada ó bebedero, terminando así la colada. En la Figura 12 se muestra un esquema de la colada del acero y en la Figura 13 el trasvase del horno a la cuchara.

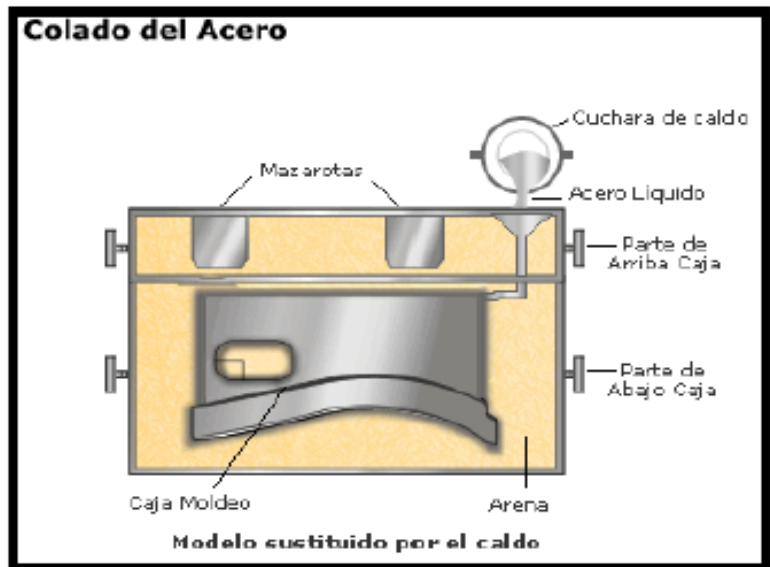


Figura 12: Esquema de la colada del acero.

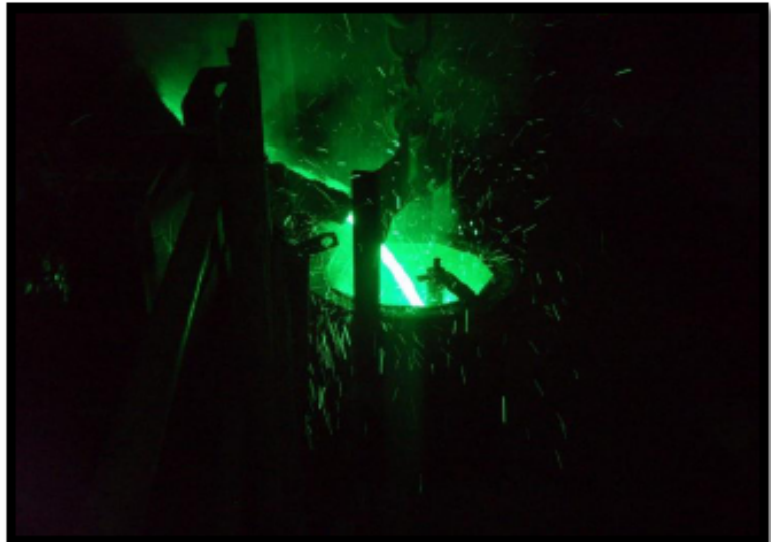


Figura 13: Traslado del horno a la cuchara.

Cuchara

Las cucharas son recipientes de chapa revestidos de un revestimiento refractario (Figura 14), esta puede tener un orificio en el fondo denominado buza, que es manejable a voluntad por medio de un juego de palancas, ó no tener orificio. Suelen tener un saliente en la parte superior en forma de pico, para cuando se vierte por la parte superior.



Figura 14: Cuchara de fundición.

Las cucharas están prefabricadas y vienen revestidas por materiales refractarios que logran mantener la temperatura del caldo en la cuchara el mayor tiempo posible. El tamaño de la cuchara debe ser proporcional al peso que se quiera colar ya que no es conveniente realizar varios vertidos al molde porque podríamos sufrir el defecto conocido como unión fría o separación definida entre el primer vertido y el segundo por diferencia de enfriamientos (Martínez, 2011).

Antes de la colada todas las cucharas deben calentarse lo más posible, preferiblemente a más de 1000°C , para evitar el enfriamiento del acero líquido por el baño de acero, daría lugar a la aparición de poros de hidrógeno en los lingotes o piezas coladas.

En la actualidad, el calentamiento de las cucharas se hace casi exclusivamente por mecheros de gas. Estos quemadores pueden trabajar con comburente aire u oxígeno puro (oxigás). La disposición de cucharas y mecheros puede ser:

- Cuchara vertical en posición invertida.

- Cuchara vertical en posición directa.
- Cuchara tumbada horizontal.

En el primer caso el quemador está situado en el suelo apuntando hacia arriba, con la cuchara colocada en posición invertida sobre él. La cuchara vertical directa está en su posición normal y el mechero forma parte de una tapa (bóveda) que cierra la cuchara aumentando el aislamiento térmico. En el caso de la cuchara tumbada, la tapa con el mechero está en un plano perpendicular al suelo y se desplaza horizontalmente (Enríquez y Tremps, 2009b).

Una vez tenga el metal líquido en la cuchara, es desplazada unos pocos metros con el puente grúa hasta el molde, donde se centra respecto al bebedero y se vierte el líquido al bebedero.

Tras la colada puede quedar una cantidad de metal líquido, que se vierte, se endurece y se le introduce en un contenedor que contiene sobrantes del mismo tipo de acero que se reutiliza como chatarra.

Después de colar en cada molde, se debe rellenar la parte superior de las mazarotas con polvos exotérmicos, para mejorar así la función de las mazarotas.

En la Figura 15 se está alimentando a un molde.



Figura 15: Traspase de la cuchara al molde de arena.

Sistema de colada

Un sistema de colada o de entrada del caldo a la pieza tiene como misión básica el llenado de la cavidad del molde. Pero adicionalmente debe evitar turbulencias del flujo líquido, erosión del molde y aspiración de gases; ha de establecer gradientes favorables de temperatura, favorecer la entrada del metal y controlar la velocidad de entrada del mismo a la cavidad del molde.

Hay que indicar que los sistemas de colada y alimentación constituyen una de las causas de rechazo más frecuentes de las piezas.

Los elementos que integran el sistema de colada:

➤ **Embudo de colada**

Sirve para facilitar el llenado y garantizar constancia de flujo, minimizar turbulencias y remolinos, separar y reflotar la escoria y la suciedad. Pueden hacerse en el mismo molde ó en pieza aparte, de arena de moldeo, de machos ó la combinación de ambas, todas mediante la ayuda de un casquillo de hierro para dar la forma. Se le da forma de copa ó tronco de cono inverso.

➤ **Cambios de dirección ó sección**

Es necesario que estos quiebros sean curvados y sin perfiles rectos, a fin de evitar los ya citados fenómenos de turbulencia y aspiración de granos de arena que conducen a la obtención de piezas defectuosas.

➤ **Empalme bebedero – canal**

Este punto también da lugar a turbulencias y arrastres de arenas, pero este problema se minimiza recurriendo a la utilización de medias cañas, choque ó pocillo.

El pocillo es una prolongación de la caña de pequeña longitud, este elemento tiene como función llenarse de metal líquido una vez que se vierte la colada, una vez lleno su función es la de servir de amortiguador de la caída del líquido, evitando así el arrastre de arena por colisión directa con el líquido.

➤ **Bajada del bebedero**

Normalmente es cilíndrica, sobretodo en el moldeo manual, en donde se realiza con un tubo o redondo de madera (Martínez, 2011).

2.3.3 Moldeo

El moldeo es el conjunto de operaciones que permiten obtener un molde. En el diagrama de la Figura 16 se muestran los diferentes elementos que hay en el moldeo.

El moldeo empieza con la elaboración o encargo del modelo. Obtenido el modelo, se procederá a realizar el molde con arena y lo que denominamos, modelo químico, es decir resinas, catalizadores, utilizando

los diferentes elementos de moldeo como machos, mazarotas, manguitos...

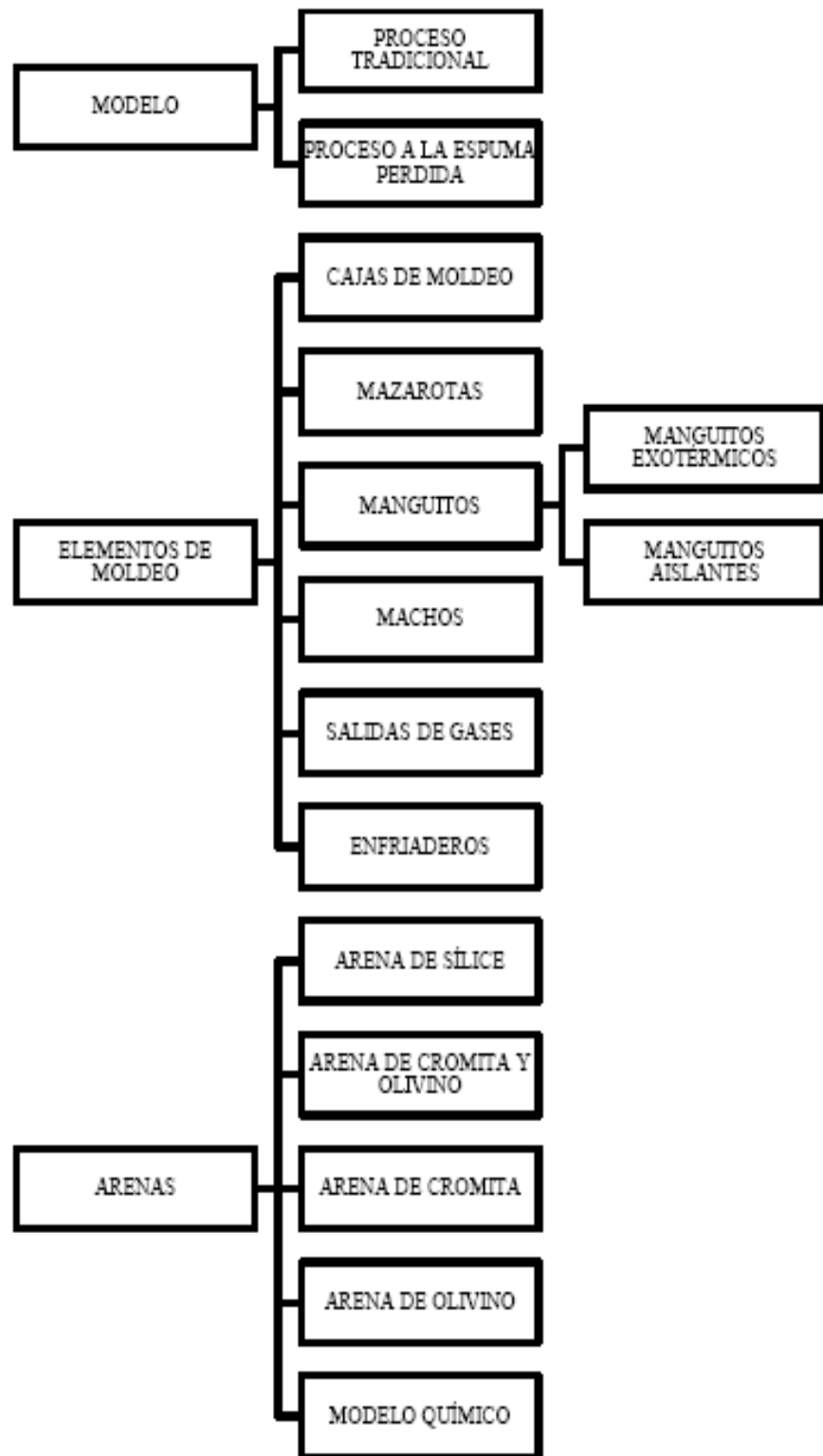


Figura 16: Diagrama de la etapa moldeo.

Modelos

El diseño de los modelos es realizado por los departamentos de ingeniería de las empresas. Éstos diseñan las piezas necesarias para cualquier proceso de fabricación de componentes o maquinaria. En estos departamentos se utilizan diversos software, entre los que más utilizan para el diseño de las piezas están: AUTOCAD, CATIA, TEBIS, AUTOFORM, SOLID EDGE (González, 2010).

La importancia del modelo en el proceso productivo es tal que cualquier defecto o imprecisión en el mismo quedará reflejado más tarde en el resultado final.

Los modelos buscan ser una copia exacta de la pieza que se desea obtener.

Características de los modelos:

- Los materiales de construcción del modelo, comprenden desde madera o plásticos hasta metales como el aluminio o el hierro fundido.
- En algunos casos los modelos están formados por dos semi-modelos correspondientes a sendas partes del molde que es necesario fabricar.
- Si la pieza que se quiere fabricar es hueca, será necesario disponer machos que eviten que el metal fundido rellene dichas concavidades.

Se ha dicho que el modelo es una copia exacta de la pieza que se desea obtener, esto se ha de matizar ya que tendrán modificaciones derivadas de la naturaleza del proceso en sí:

- El denominado ángulo de salida, son los ángulos mínimos que ha de respetar la superficie del modelo con la dirección de desmoldeo para que el molde no sea dañado en su extracción.

- La contracción que experimenta la pieza al ser extraída del molde, nos obliga a que este sea un poco más grande.
- El molde constará de los canales y mazarotas necesarios para poder producir el llenado.
- Las portadas para la posible colocación del macho.

Clases de Procesos

Tras la recepción del pedido se realiza un análisis y estudio de la pieza a elaborar, para determinar el tipo de proceso a realizar, el cuál puede ser:

- Proceso tradicional.
- Proceso a la espuma perdida.

I. Proceso tradicional

El proceso se caracteriza por la utilización de modelos de madera. Comienza con la recepción de los modelos, el cuál es elaborado por empresas especializadas en el sector, como por ejemplo en Cantabria se puede mencionar Nocu, empresa situada en el Polígono Industrial de Morero, en Guarnizo.

Los moldes se hacen habitualmente en dos partes a fin de que los modelos puedan retirarse antes de la colada. Los propios modelos se hacen frecuentemente en dos partes para facilitar el trabajo. Si las piezas coladas son huecas se requiere la presencia de machos que den la forma a las oquedades interiores. Estos machos también son moldeados en arena.

Una vez hecho el molde y los machos, éstos se recubren con una pintura refractaria especial, con el objeto de que el metal fundido no sinterice la propia arena del molde.

A continuación se procede a fundir el acero, verterlo en el molde y esperar a que enfríe. Una vez la pieza esté lo suficientemente fría se desmoldea y se procede a su acabado final.

II. Proceso a la espuma perdida

El proceso se caracteriza por la utilización de modelos de poliestireno expandido mostrándose las etapas del proceso en la Figura 17.

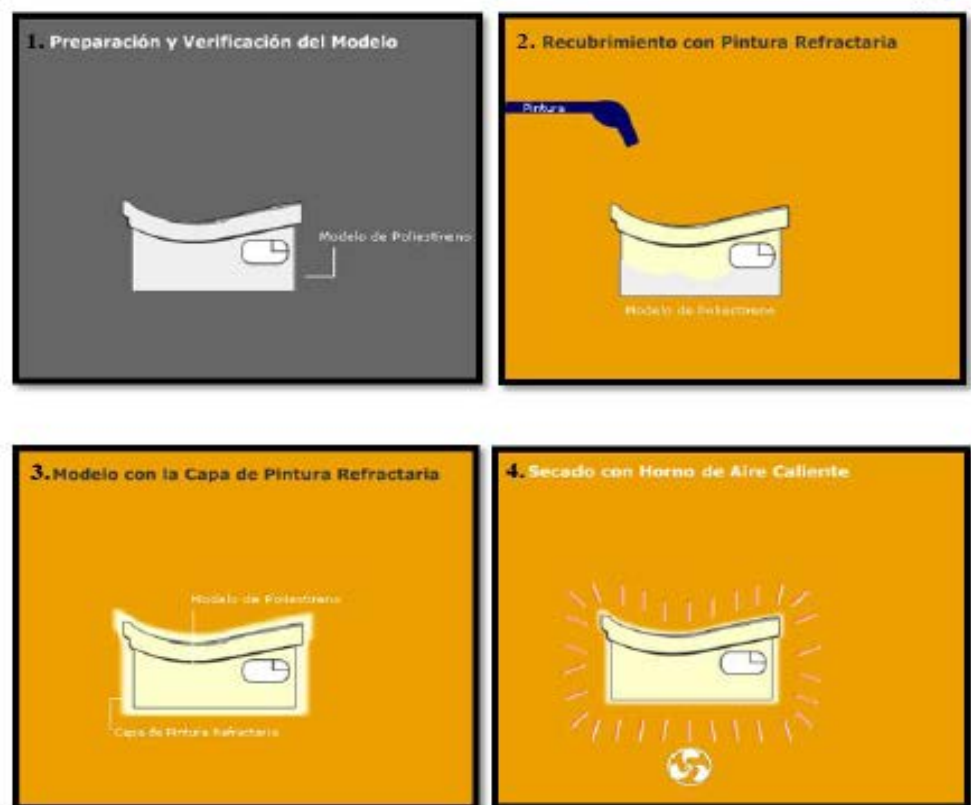


Figura 17: Esquema del proceso a la espuma perdida.



Figura 18: Modelo de poliestireno expandido.

Comienza con la recepción de los moldes que son una copia fiel de la pieza que se desea obtener. Se someten a un control minucioso antes de realizar cualquier operación. La Figura 18 es un ejemplo de modelo de poliestireno expandido.

Una vez revisado el molde y antes de introducirlo en la arena, se recubre por una papilla refractaria compuesta por materiales silicios principalmente y un líquido de transporte que suele ser el agua.

A continuación se procede al moldeo con arena compactándola de forma vibratoria.

Cuando la arena ha alcanzado la altura adecuada se puede proceder a la colada del metal la cual se puede hacer siguiendo las mismas técnicas empleadas en el moldeo convencional. Al ir añadiendo el metal de colada, la elevada temperatura de este, provocará la destrucción del modelo dando lugar a gases que fluirán a través del recubrimiento. Finalmente se procede a su desmoldeo y acabado.

Comparación entre procesos

Ventajas del proceso tradicional:

- Se puede utilizar el modelo tantas veces como se desee, siendo óptimo para grandes series de piezas.
- El molde tiene un diseño más robusto, ya que el peso de la arena puede hacer que el poliestireno se deforme, quedando reflejado en la pieza, mientras que utilizando el modelo de madera esto no ocurre.
- Generalmente, se pueden fabricar piezas de mayor tonelaje.
- El modelo es difícil de alterar durante su transporte o manipulación, mientras que en el caso de los modelos de espuma, tienen poca robustez y puede darse el caso de partes dañadas que se reflejarán en la pieza final.

Ventajas del proceso a la espuma perdida:

- Evita el problema de almacenaje de los modelos, ya que los modelos utilizados son destruidos en el proceso de fusión.
- La utilización de modelos de poliestireno expandido permite una precisión muy alta en las piezas fundidas y reduce de manera considerable los trabajos de mecanizado.
- No se necesita la utilización de machos ni el empleo de personal especializado en su fabricación.
- Los modelos pueden prepararse uniendo partes más sencillas con adhesivos adecuados.
- Fácil automatización, lo que supone una disminución de costes en operaciones y defectos de modelos, moldes y piezas.
- Mejores condiciones de acabado superficial que con el moldeo de arena superficial, y ausencia de rebabas y líneas de partición en la pieza final.
- Libertad de diseño, siendo esta prácticamente ilimitada.
- Se eliminan las juntas y por tanto la posibilidad de desplazamientos (Martínez, 2011).

Moldeo

El moldeo sirve para dar forma superficial a una pieza de metal fundido y consiste en la creación de una cavidad que reproduzca la figura de la pieza a conseguir, en un medio lo suficientemente resistente, cavidad que va a llenarse con el metal o aleación líquida y en la que va a permanecer durante su solidificación y enfriamiento en sólido hasta que sea apta para su extracción.

La creación de la cavidad debe atender a una serie de exigencias que convierten probablemente este proceso en el más dificultoso del proceso de diseño. El molde debe permitir el llenado correcto y

homogéneo por la aleación pero debe evitar que se fugue, pero dejando pasar los gases que se generen. Además debe permanecer inalterable durante la solidificación y a la vez ser el depósito remanente que compense las contracciones, expansiones, etc. Hasta que la pieza haya alcanzado un estado que permita su extracción, que debe ser sencilla.

Los moldes deben ser, por tanto, rígidos, compactos, densos, que reproduzcan con fidelidad el modelo y que resistan los efectos térmicos del metal fundido y la erosión del flujo de metal líquido, conservando la forma hasta la completa solidificación de la pieza sin crear tensiones en ella, garantizando molde tras molde la máxima precisión dimensional, aspecto superficial adecuado y ausencia de defectos (Martínez, 2011).

A continuación se muestra en la Figura 19 la parte de debajo de un molde, y en la Figura 20 un molde completo.

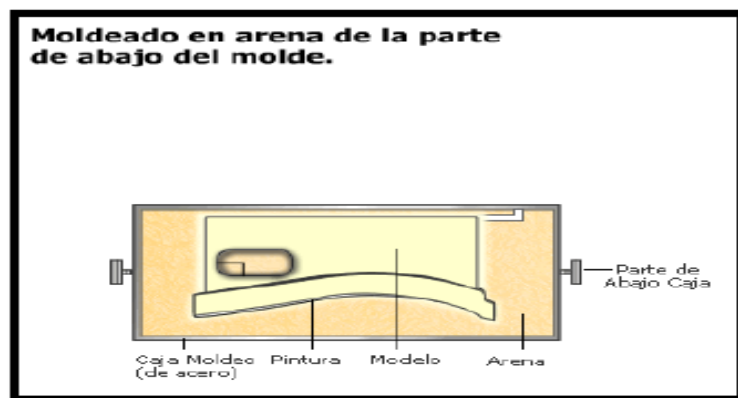


Figura 19: Esquema de la parte de debajo de un molde.

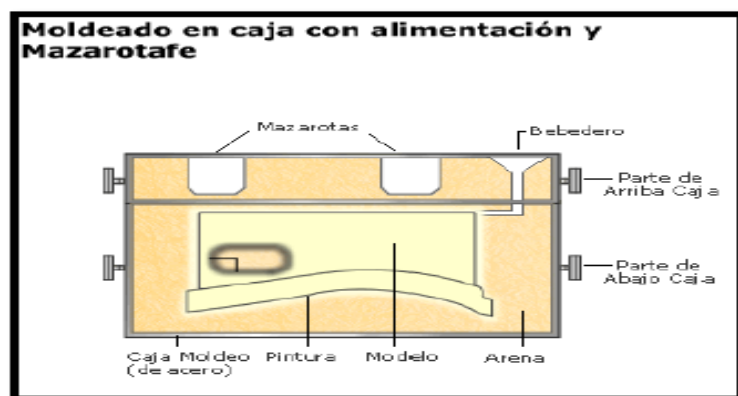


Figura 20: Esquema de un molde completo.

Elementos de moldeo

A continuación se describen los elementos necesarios para realizar el moldeo:

Cajas de moldeo

Recipientes en los cuales se contiene la mezcla de arena, catalizador y resina; dicho de otra forma, son los recipientes por tanto que sostienen el molde. La forma final que cubre el molde se compone de dos o más cajas, dependiendo de la altura necesaria para cubrir el molde.

En cada molde nunca pueden faltar la caja superior ni la inferior, mientras que las intermedias pueden variar en número e incluso no ser necesaria su utilización.

Las cajas están formadas por un bastidor de paredes verticales, provisto de esquinas para sostener el molde de formas diversas como pueden ser cuadradas, rectangulares y otras.

El tamaño de las cajas es muy diverso, debido a que las cajas deben contener ya justarse al tamaño y forma de los modelos o piezas a obtener. Por ello las fundiciones que realizan series pequeñas de piezas y de tamaño muy variable, deben de disponer de un gran número de cajas con diversos tamaños, tanto de perímetro como de altura.

Las cajas de moldeo en su pared vertical interior tienen ondulaciones, que tienen como función fijar y aguantar el molde. Estas ondulaciones consiguen con esto asegurar el manejo y transporte de las cajas cuando estas contienen el molde.

Además para su transporte y manejo las cajas llevan bien soldadas o bien formando parte de ellas asas o puños en los que se enganchan normalmente cadenas.

Las cajas pequeñas si se hacen ligeras se fabrican en aluminio, pero generalmente tanto las cajas pequeñas como las medianas se fabrican en hierro fundido. Mientras que las grandes en acero fundido.

Las caras de las cajas confrontadas, es decir que una va estar apoyada sobre la otra, están cepilladas y rectificadas por maquinas herramientas. Para que enlacen perfectamente las cajas, a veces llevan dos o más escuadras en forma de cuña u horquilla (Martínez, 2011).

Mazarotaje

La mazarota es el depósito de metal que suministra caldo a la pieza de una forma continua hasta el final de la solidificación. La posición de las mazarotas debe ser estudiada con cuidado al igual que su tamaño. Las mazarotas suministran el caldo a la pieza según esta se va contrayendo para compensar los rechupes que se producirían sin la presencia de estas. La Figura 22 muestra la posición mazarota en el molde.

A la hora producir las piezas de acero se deberá introducir el caldo en las cajas de moldeo. Este proceso se conoce como alimentación, alimentar una pieza quiere decir suministrarle caldo. Para que una pieza se funda de una forma satisfactoria es necesaria una buena alimentación.

Los metales sufren cambios en su volumen a lo largo de este proceso, estas variaciones suelen ser contracciones siendo lo más común que se produzcan a lo largo del proceso, aunque en algunos metales solo ocurrirán en parte de él.

La contracción tendrá lugar cuando el metal se encuentra en estado líquido y cuando se está realizando el cambio de estado de líquido a sólido.

La forma en la que se solidifica el metal es según capas paralelas a la superficie del modelo, a excepción de la parte superior que, exceptuando sus bordes, permanece en fase líquida hasta el final de la solidificación. A la vez que el caldo se enfría también se contrae esto hace en el nivel superior vaya descendiendo formando una cavidad con una forma más o menos cónica característica. Esta cavidad se conoce como rechupe.

Como el rechupe se debe a la contracción este será mayor cuando mayor sea la contracción líquida y en el cambio de estado. La cantidad de contracción dependerá del volumen de metal que forme la pieza y de las características que tenga este.

Además de los factores ya especificados también afectará el exceso de temperatura del líquido que llena la pieza en el momento en que termina su llenado hasta la temperatura a la que da comienzo su solidificación.

Una forma de evitar el rechupe es ir añadiendo la cantidad de caldo adecuado a medida que se va produciendo la contracción volumétrica, siempre y cuando esta contracción este teniendo lugar en estado líquido, es decir hasta que la pieza solidifica por completo.

Para realizar esta alimentación y evitar el rechupe se hace uso de las mazarotas.

La mazarota no deja de ser una parte más de la pieza que se está moldeando por lo que en ella se creará también rechupe, si bien este rechupe nunca debe penetrar en la pieza y normalmente para conseguir esto hacen falta más de una mazarota (Álvarez, 2011).

Manguitos

➤ **Manguitos exotérmicos:** Son casquillos hechos de termita (polvos de aluminio y de óxidos de hierro, entre otros) y un aglomerante, que se recubren de polvos exotérmicos de cobertura (están fabricados de termita) después de llena la mazarota, ó lo que es lo mismo después de colar. Con los polvos exotérmicos se contrarresta las perdidas de calor por radiación, con lo que se disminuye más todavía el volumen de la mazarota. También es más acusada la reducción de costos si se disminuye el diámetro del cuello de la mazarota por medio de diseño apropiado del manguito o por implantación de un estrangulamiento cerámico, ya que disminuyen el volumen y además simplifican el corte de las mazarotas de la pieza. La Figura 21 muestra la sección de un manguito.

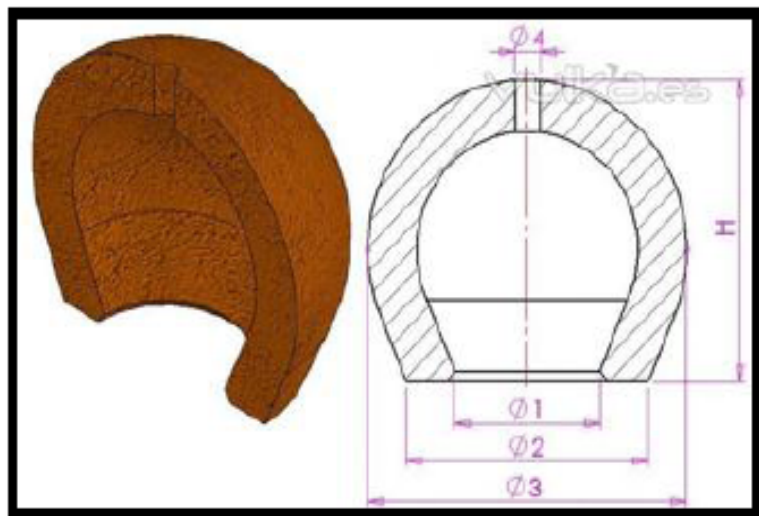


Figura 21: Sección manguito exotérmico (<http://galeria.vulka.es>).

- Manguitos aislantes: Al igual que los anteriores estos casquillos confinan térmicamente las mazarotas, alargan su vida útil en estado líquido, posibilitando su reducción de tamaño. También se le añaden tras colar polvos exotérmicos y se les puede implantar un estrangulamiento en la parte inferior.

Se diferencian de los anteriores en que están fabricados de diferente material y tienen distinta confinación térmica (<http://www.insumosmetalurgicos.com>).

En Figura 22 situación de la mazarota y el manguito en el molde:

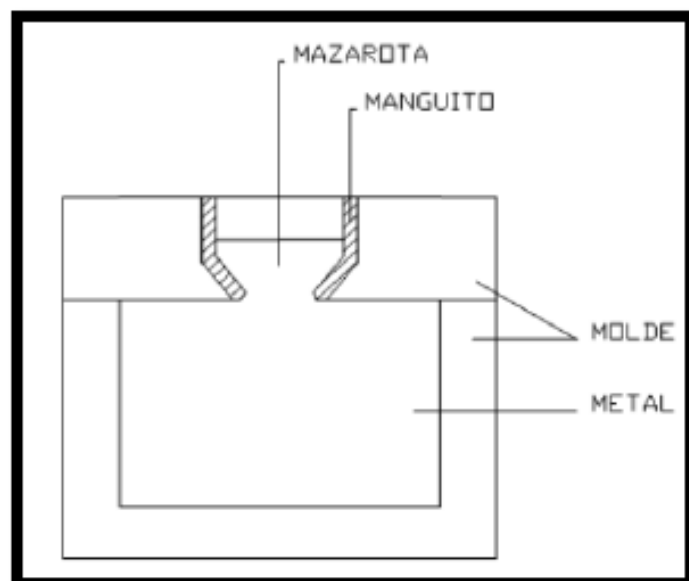


Figura 22: Esquema de una caja de moldeo (Álvarez, 2011).

Machos

Los machos tienen como función conseguir realizar las zonas huecas de las piezas.

Estos se colocan en portadas adecuadas, que son las piezas destinadas a apoyarse en el molde, es decir las piezas que sostienen a los machos en la posición adecuada. La fabricación de los machos es una de las operaciones más delicadas al moldear, debido a su gran importancia para obtener piezas sin defectos. Las principales propiedades a tener en cuenta a la hora de fabricar los machos son las siguientes:

- Que sean simples y de fácil preparación.
- Buena resistencia mecánica, para aguantar el empuje y la presión del metal líquido.
- Que no produzcan rebabas.
- De material refractario, por tener que aguantar la temperatura del metal líquido sin vitrificarse, fundirse y evitando las penetraciones del metal.
- Con portadas, para ayudar a la salida de gases y para que soporten las cargas o esfuerzos sobre los machos.
- Deben ser muy permeables, para facilitar la salida de gases y evitar la formación de sopladuras. Algo elástico, para no obstaculizar la contracción del metal.
- Fácil extracción, que su extracción sea fácil y completa, bien por sacudidas o bien por martillo neumático.

Salidas de gases

Las salidas de gases se hacen para evitar las sopladuras, las cuales son pequeñas cavidades producidas por los gases desprendidos durante el enfriamiento de las piezas, que no pueden llegar a la superficie. Normalmente las sopladuras son gases de monóxido de carbono y dióxido de carbono, procedentes de la reducción por el carbón de óxidos de hierro y manganeso, también puede ser gases de

hidrógeno de la reducción del vapor de agua atmosférico, que se ha introducido en el horno.

Las sopladuras tienen forma de burbuja alargada, normalmente con sus ejes perpendiculares a las paredes de las piezas. Para proporcionar salida a los gases se realizan sobre la superficie superior del molde y alrededor de las mazarotas pinchazos o agujeros de pequeño diámetro.

Enfriaderos

Los enfriaderos son artificios que aceleran el enfriamiento en una zona de la pieza determinada. La aplicación de enfriaderos es muy antigua en la fundición y de buenos resultados. Los enfriaderos pueden ser externos o internos.

Los externos se desprenden de la pieza en el desmoldeo, mientras que los internos quedan englobados o formando parte de la masa de la pieza, ya que se funden en ella mientras solidifica. Los enfriaderos exteriores suelen ser un taco de cobre, acero o grafito, mientras que los enfriaderos interiores son de formas simples como clavos de herrar, espirales u otras formas similares.

El efecto de los enfriaderos internos se basa en la creación de superficies interiores que aumentan la superficie efectiva de la zona masiva y disminuyen su módulo de enfriamiento. De esta forma, la zona masiva se enfría antes, igualándose su velocidad y tiempo de enfriamiento al del resto de la pieza. Este hecho se refuerza por el hecho de ser metálicos.

Su uso ha de hacerse guardando las debidas precauciones, ya que si estos elementos están oxidados o tienen grasas y materia orgánica pueden originar poros en la zona masiva, que perderá por ello gran parte de su resistencia mecánica a flexión. Cuando se utilizan enfriaderos, deben tomarse precauciones para evitar sopladuras cuando el enfriador es metálico, porque sobre él se condensa la humedad del molde.

Para evitar esto problemas de condensación se pueden usar “enfriaderos refractarios”, que además tienen otras ventajas y es que son moldeables. Tienen como inconveniente su conductividad térmica que es menor que la de los enfriaderos metálicos, pero es dos o tres veces mayor que las mezclas normales de arena de moldeo. Estos enfriaderos refractarios pueden ser fabricados por los fundidores o de productos comerciales.

Los fundidores los suelen fabricar añadiendo virutas de hierro a la mezcla de arena, normalmente en la fabricación de machos, actuando estas virutas como enfriaderos internos (Álvarez, 2011).

Arenas

Los moldes perdidos de fundición destinados a recibir colada deben poseer las siguientes características:

- Ser plásticos.
- Tener cohesión y resistencia, al objeto de poder reproducir y conservar la reproducción correcta del modelo.
- Resistir la acción de las altas temperaturas, es decir ser refractarias.

- Permitir la evacuación rápida de aire contenido en el molde y de los gases que se producen en el vertido de la colada por la acción del calor sobre el molde, en unas palabras debe tener permeabilidad.
- Disgregación fácil para permitir la extracción y el acabado de las piezas, deben ser disgregables.

Para conseguir estas características usaremos las arenas de fundición, las cuales están constituidas por granos de cuarzo (SiO_2 dióxido de silicio, compuesto muy refractario) y arcillas (Silicatos hidratados de aluminio). Diferenciamos entre las siguientes arenas:

- **Arena de sílice:** Es el tipo de arena más utilizado, a causa de que cumple perfectamente las exigencias exigidas para el moldeo en la fundición, pero sobretodo se utiliza porque es la que mejor relación tiene calidad-precio.
- **Arena de Cromita y Olivino:** Además de la arena de sílice se utilizan otras arenas para su uso en la fundición como son las arenas de cromita y las arenas de olivino, que tienen varias ventajas respecto a las arenas de sílice como son:
 - ✓ Buenas propiedades de enfriamiento.
 - ✓ Buena resistencia a la penetración del metal.
 - ✓ Aguantan más tiempo el calor radiante del metal y tienen un alto punto de fusión.

Pero tiene como desventaja que es mucho más caro que la arena de sílice.

Se emplean en para zonas de los moldes que no interesa que se produzcan penetraciones o defectos superficiales por culpa de las altas temperaturas del metal al colar. Por sus propiedades también se usan para fabricar machos.

- **Arena de cromita:** es un producto de alta refractariedad con una gran resistencia a la penetración del metal. Se emplea para controlar los defectos superficiales originados por las altas temperaturas del metal colado ó frentes a las entradas y zonas de pieza masivas (puntos calientes). Su empleo es particularmente adecuado en las zonas de moldes y machos expuestos al calor radiante del metal fundido durante tiempos considerables. Son compatibles con todos los sistemas de moldeo y sus requerimientos de aglomerantes son realmente bajos.

- **Arena de olivino:** que se emplea en fundición, es una roca eruptiva volcánica básica. Químicamente se define como una solución sólida compuesta por 94% de fosterita (silicato de magnesio Mg_3SiO), un 6% de fayalita (silicato de hierro SiO_4Fe_2) y un 0.5% cada uno de cromita y talco.
Una característica relevante del olivino es que no contiene cuarzo, por cuya razón no provoca silicosis. El olivino es especialmente adecuado para el moldeo de piezas que requieren baja expansión, buenas propiedades de enfriamiento y buena resistencia a la penetración del metal líquido.

En la Tabla 15 se presenta la dilatación térmica lineal de arena de sílice y cromita

Tabla 15: Comparación de la dilatación térmica de arenas (<http://www.ilarduya.com>).

Tipo de Arena	Dilatación térmica lineal [$10^{-6}K^{-1}$]		
	20300°C	20600°C	20800°C
Sílice	14.0	23.0	17.0
Cromita	7.1	7.5	7.5

Por último hay que comentar que las cajas entre sí tienen el mismo perímetro, pero en cada una de ellas puede variar la altura (Álvarez, 2011).

Modelo químico

Se denomina modelo químico al moldeo de fundición que utiliza resinas para la compactación de la arena. Además, se utilizan diversas herramientas para ayudar a la compactación y moldeo, como martillos pisadores neumáticos, paletas y rotalines.

La cantidad de aglutinantes (resinas y catalizador) que se ha de utilizar debe ser la menor cantidad posible, ya que la mayoría de ellos son productos que al quemar producen gases y otros problemas los cuales son nocivos para la pieza.

➤ **Resina Fenólica – Alcalina:** es una resina especialmente fabricada para trabajar con arenas recuperadas en porcentajes que pueden llegar hasta el 80–90%.

Las características de esta resina son su bajo coste, no tiene olor, tiene buen desmodelado y es insensible al tipo de arena que se utilice.

➤ **Catalizador:** tiene como función hacer que la resina se polimerice creando un molde rígido y duro que permite en el molde la caída de la colada y la solidificación del metal.

El catalizador usado para la resina Fenólica – Alcalina, se trata de un éster orgánico de glicerina mezclado con propilencarbonato, en una proporción de 65–75% de éster orgánico y 25–35% de propilencarbonato. Aunque esta proporción puede variar si se quiere variar la vida de banco. Se puede tener almacenado un mes en su envase.

El moldeo químico destaca por una serie de características que lo diferencian de otros tipos de moldeo de arenas, como son el moldeo en verde o el moldeo por presión. Estas características son:

- Poca reactividad con las impurezas presentes en las arenas.
- Emanaciones gaseosas no peligrosas para el ambiente de trabajo (en la reparación, en la colada y en el desmolde).
- Facilidad de preparación y de utilización.
- Larga duración de vida de la arena preparada.
- Facilidad y duración en el almacenamiento de machos.
- Suficiente permeabilidad para la evacuación de gases.
- Buenas características mecánicas en frío.
- No existe reacción del molde o macho con el metal colado.
- Facilidad de desmodelado y limpieza de utillaje.
- Facilidad de recuperación de arenas.

Antes de cerrar la caja, hay que pintar los interiores con pintura refractaria como se muestra en la Figura 23, para que el molde sea capaz de resistir altas temperaturas, evitando que la arena sinterice, pasando a ser cristal e incrustándose en la pieza.



Figura 23: Pintado del molde una vez retirado el modelo.

Además de pintar, hay que preparar el bebedero y la alimentación, que no es más que un sistema de tubos por donde va a bajar el caldo para llenar el molde. Una vez hecho todo esto, y cerrada la caja, se puede proceder a verter el caldo al molde (Álvarez, 2011).

2.3.4 Desmoldeo

A continuación se describen las 3 etapas en las que se compone el desmoldeo:

Enfriamiento

Antes de realizar el desmoldeo de cualquier caja se deberá prestar mucha atención a la calidad del acero con que ha sido fundida. Para ello las cajas deberán de ir identificadas en todo momento con un código y el tipo de calidad para ser distinguidas.

En general, el desmoldeo se realizará al día siguiente de haber realizado el fundido del acero. Sólo cuando el diseño de la pieza aconseje un desmoldeo en caliente para evitar agrietamientos éste se realizará.

El desmoldeo se realizará verificando que no se desmoldean piezas en las cuales la temperatura de la pieza es superior a la establecida en la tabla para cada calidad. Para reducir el impacto térmico de las piezas al desmoldearlas se descubrirán las piezas, primero ligeramente hasta que parte del calor acumulado se vaya disipando.

Durante el tiempo de contacto de la pieza con la parrilla se tendrá cuidado que la pieza no sufra deformaciones por el golpeo. Esta deformación es más acusada cuando las piezas están muy calientes.

Las piezas y las cajas de moldeo se transportaran hasta el lugar de almacenamiento y se evitara que las piezas estén expuestas a la lluvia.

El tiempo de enfriamiento es muy importante para evitar posibles defectos (deformaciones, grietas, etc.). Para ello dependiendo de la calidad y del peso de las piezas se determinan unos tiempos mínimos de enfriamiento antes del desmoldeo.

Desmoldeo

Una vez se consideré que la pieza ya puede ser manipulada, debido a que las piezas ya hayan terminado su proceso de solidificación, es entonces cuando se procede al desmoldeo de estas piezas.

El desmoldeo consiste en extraer ó sacar las piezas del molde y separar la pieza ó las piezas del molde desecho como se muestra en la Figura 24 y Figura 25.

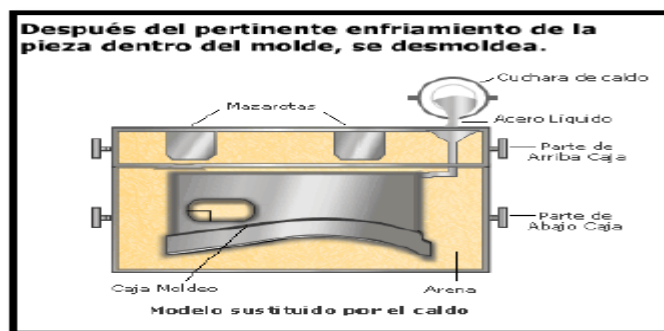


Figura 24: Desmoldeo I.



Figura 25: Desmoldeo II.

Se coloca el molde con el puente grúa sobre un contenedor, una vez en el contenedor se le dan unos golpes al molde de arena, produciéndose su agrietamiento y rotura, pudiéndose retirar entonces las cajas de moldeo. Después de esto se termina de romper el molde y se extraen las piezas que forman un conjunto mediante el puente grúa, quedando en el contenedor los pedazos ó terrones de arena del molde. Tras esto el conjunto de las piezas es desplazado al taller (Figura 26) de acabados y los restos del molde que están en el contenedor se trasladan a la recuperadora de arenas.

Este mismo sistema en talleres mecanizados se realiza con sacudidores, que son un emparrillado horizontal de vibración neumática, sobre los que se deposita el molde, y al conectarse la arena va cayendo debajo de la parrilla donde es recogida y llevada al sistema de recuperación.



Figura 26: Pieza desmoldeada.

Recuperación de la Arena

La arena recuperada del desmoldeo es más heterogénea y está agrupada en terrones compactos, sobre todo los que estuvieron más cerca ó en contacto con el metal. Esta masa es necesario reducirla al estado

granular, para lo cual se introduce la arena en una maquina recuperadora de arenas, la cual tiene varias secciones.

La desterronadora, está compuesta por dos cilindros paralelos, pero que no se llegan a poner en contacto, su superficie normalmente es rugosa aunque también puede ser lisa, por último podemos decir de ellos que están comprimidos elásticamente entre sí, de modo que puedan separarse en caso de que pasen cuerpos metálicos. Tras estos la arena reducida a tamaño de grano pasa a una cinta transportadora, y como la arena recuperada tiene rebabas, escamas y trozos de metal, por eso la cinta pasa por un separador magnético que atrae esas partículas. Después de esto la cinta transporta lleva la arena hasta una criba, donde se separan los elementos no ferrosos como son terrones quemados y costras.

Por último la maquina pasa la arena por ventilador con el cual se hace una clasificación de la arena al separar los granos gruesos, de los granos de arena finos que ya no nos sirve, estos últimos son desplazados por tubería a un contenedor, mientras que los gruesos por medio de una turbina pasan a una tolva situada a una cierta altura, para después por caída alimentar al mezclador de arenas.

La arena recuperada se suele mezclar con la arena nueva antes de entrar al mezclador, con el fin de mezclar los diversos ingredientes y especialmente para garantizar la distribución uniforme del aglutinante en toda la masa, de modo que todos los granos queden recubiertos por igual.

2.3.5 Acabados

Tras el desmoldeo la pieza ha de someterse a una serie de acabados para:

- Eliminar restos del desmoldeo y la fusión.
- Dar textura superficial.

- Mejorar sus propiedades.
- Preparar la pieza conforme a las especificaciones del cliente.

Esto se realiza mediante las operaciones y tratamientos que muestra la Figura 27, como granallado realizar los tratamientos térmicos pertinentes. El mecanizado será el último paso antes de entregar al cliente, tras haber realizado los ensayos de calidad requeridos.

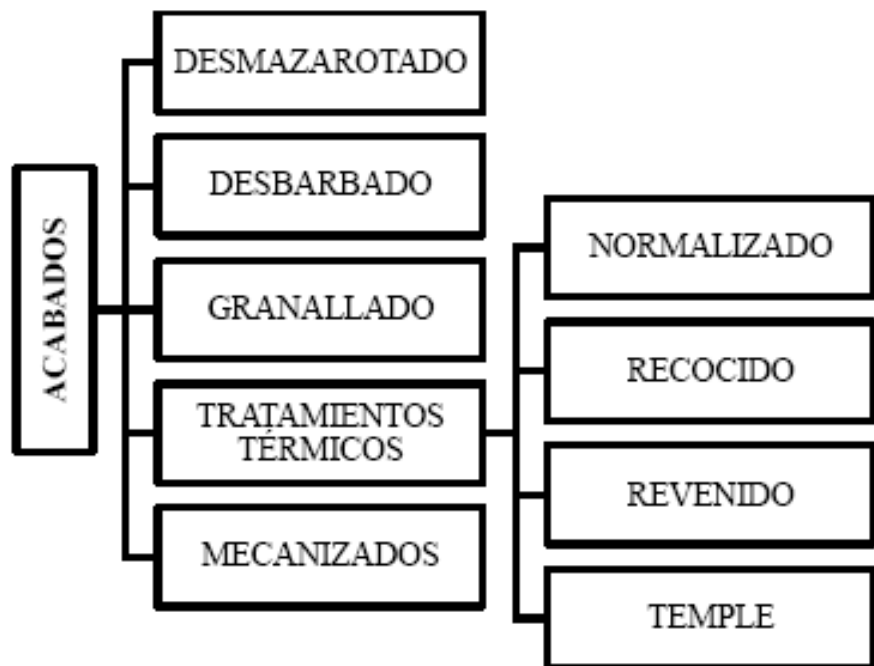


Figura 27: Diagrama de la etapa acabados.

Desmazarotado

Después del desmoldeo se separan de las piezas, el bebedero y las mazarotas. Las piezas de acero requieren para su corte una de las siguientes herramientas: sierra, amoladora con disco abrasivo u oxicorte.

Normalmente el corte del bebedero y las mazarotas se efectúa mediante amoladora de disco ayudándose de mazos de grandes dimensiones para arrancar dichos elementos. El oxicorte se emplea cuando es necesario realizar cortes a las piezas con un espesor elevado.

Las mazarotas y bebederos son reutilizados siempre que sean debidamente identificados a la hora de separarlas de las piezas ya que la calidad del acero con que han sido fundidas limita la utilización de estos bebederos y mazarotas para la fusión en otras calidades distintas.

Desbarbado

Posteriormente al desmoldeo, se puede observar que la pieza está llena de costras de arena, de alguna rebaba e incluso alguna penetración del metal en el molde, por lo cual es necesario mandar la pieza al taller de rebarba para hacerle una limpieza superficial ó rebarbado, que consiste en dejar libre a la pieza de estos materiales, (Figura 28).

Se hará un repaso de la superficie de las piezas, para eliminar estos defectos, mediante una amoladora de disco abrasivo adecuado para la eliminación de la rebarba. Tras esto se hace el granallado.



Figura 28: Desbarbado de una pieza.

Granallado

La granalla son bolas de hierro ó acero que se emplean como abrasivo en la fundición, para limpiar de arena las piezas coladas, es decir la arena que haya quedado adherida a las piezas después de desmoldar.

La granalladora tiene como función impulsar y lanzar mediante un potente chorro de aire a presión la granalla sobre la superficie ó zona de las piezas a limpiar.

La granalladora automática de ganchos es una maquina muy apropiada para el granallado de piezas metálica, en ella las piezas se depositan en un gancho giratorio y pasan a una cabina cerrada.

Dentro de la propia capacidad máxima de la maquina, admite también piezas de muy pequeño tamaño y dificultosas, así como piezas que por su naturaleza requieran gran cuidado de manipulación.

Además dispone de una cabina para chorreo manual, que consiste en una manguera de la que sale la granalla, y que debe ser orientada manualmente. Se utiliza con las piezas de mayor tamaño (Martínez, 2011).

Tratamientos térmicos

Por lo general, las piezas se someten a cuatro tipos de tratamientos térmicos para mejorar las propiedades del acero, estos se realizan en un horno como el de la Figura 29. Los tratamientos son el normalizado, recocido, revenido y temple, y se resumen a continuación.



Figura 29: Horno de tratamiento térmico.

Normalizado

El normalizado se lleva a cabo al calentar a unos 35° por encima de la Temperatura crítica superior, se mantiene un tiempo , y luego se enfría en aire estático hasta la Temperatura ambiente , con esto se consigue un acero más duro y resistente que el que se obtiene con un enfriamiento más lento, en un horno después de un recocido .

Este tratamiento se utiliza tanto para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, y sirve para afinar la estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la solidificación, forja etc. La velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que el recocido, es un tratamiento típico de los aceros al carbono de 0.15 a 0.40 % de carbono, y las temperaturas normales del normalizado varía según el porcentaje en carbono, que va desde 840°C a 935°C , según la composición sea desde 0.50 a 0.10 % de carbono.

Recocido

Es el primer tratamiento térmico que vamos a realizar a las piezas es un recocido de ablandamiento para bajar la dureza tras la solidificación, para después realizar el mecanizado con mayor facilidad.

El recocido es un tratamiento térmico cuyo fundamento es un calentamiento a una temperatura adecuada y con una duración determinada, a lo cual le sigue un enfriamiento lento de las piezas.

La finalidad del recocido es eliminar estados anormales tanto constitucionales como estructurales en los metales y de las aleaciones, que en general endurecen los materiales y provocan en sus estructuras tensiones.

Con el recocido al destruirlas lo que se consigue es ablandar los metales y aleaciones haciendo que estos se puedan trabajar mejor. Lo que pretendemos al realizar el recocido a nuestras piezas es obtener las características solicitadas para realizar el mecanizado.

Revenido

Consiste en calentar el acero, después de haber sido templado, a una temperatura inferior a la subcrítico, para enfriarlo generalmente al aire. El objeto del revenido es mejorar la tenacidad (o resiliencia) de los aceros templados, a costa de disminuir su dureza, su resistencia mecánica y su límite elástico. También se eliminan las tensiones internas del material, producidas en el temple.

La temperatura mínima para este revenido es de 180°C y el tiempo de mantenimiento a la temperatura de revenido es normalmente como mínimo 2 horas.

Temple

El temple es un proceso de calentamiento y enfriamiento. En este tratamiento térmico se realiza el enfriamiento con una velocidad mínima determinada, generalmente muy rápida, que se denomina velocidad crítica. El fin que se pretende es conseguir transformar toda la masa del acero con el calentamiento en austenita, después gracias a un enfriamiento suficientemente rápido, se transforma la austenita en martensita.

Hay que indicar que con el temple en la práctica no se consigue transformar la totalidad de la austenita en martensita, normalmente porque es imposible conseguir una velocidad de enfriamiento suficientemente rápida en la totalidad de la masa de las piezas.

La finalidad del temple es principalmente aumentar la dureza, la resistencia mecánica y el límite elástico, a costa de bajar la resiliencia y el alargamiento de las piezas.

El enfriamiento se acelera con la colocación de ventiladores de gran potencia, que generan una corriente de aire forzado (Apraiz, 2002).

Mecanizados

El mecanizado es un conjunto de operaciones o acabados realizados con herramienta, que tienen como finalidad darle a la pieza a mecanizar las dimensiones exactas, con las cuales fue diseñada.

También se puede decir que el mecanizado o maquinado es un proceso de elaboración manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo (Figura 30), de tal manera que el remanente sea la forma deseada. Esta acción trae consigo la deformación en cortante del material de trabajo, lo que produce viruta, la cual al ser removida queda expuesta la nueva superficie.

El mecanizado no es solamente un proceso, sino una familia de procesos. La característica común es el uso de la herramienta de corte que forma una viruta, la cual se mueve o quita de la zona de trabajo. Para realizar la

operación, se requiere de un movimiento relativo, que se logra en la mayoría de los casos por medio de un movimiento primario, llamado velocidad y un movimiento secundario, denominado avance. Hay muchas operaciones de mecanizado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta geometría y textura superficial (Martínez, 2011).



Figura 30: Mecanizado.

2.4 ENSAYOS Y CONTROLES

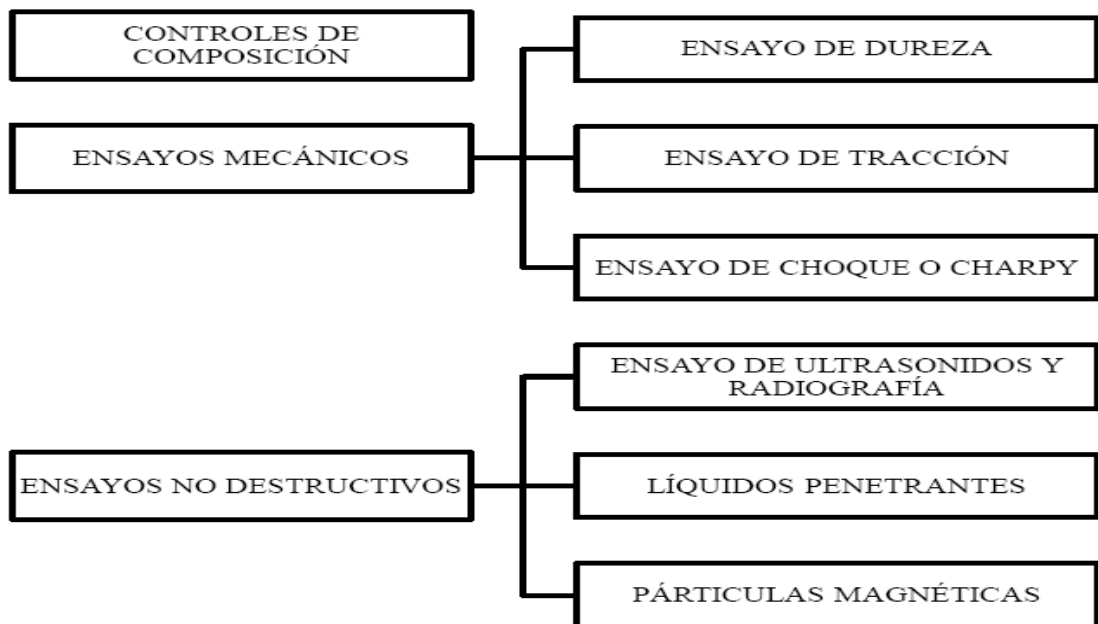


Figura 31: Diagrama de los ensayos y controles de las piezas.

Control de composición

Tiene por objeto determinar la composición química de las aleaciones y las impurezas que las acompañan. El procedimiento más exacto para determinar la composición química de cualquier sustancia es el análisis químico, tanto cuantitativo como cualitativo. Para realizar los análisis químicos se utiliza un espectrómetro de chispa o arco como el de la Figura 33.

Primero se coge una muestra (Figura 32) de acero del horno por medio de un crisol, se corta con una amoladora una de las superficies de la probeta y se pule. A continuación se introduce en el espectrómetro de chispa o arco.



Figura 32: Toma de muestra de caldo y probeta analizada.

Los espectrómetros de chispa o arco se utilizan para elementos metálicos en muestras sólidas. Un arco eléctrico o chispa pasa por la muestra, calentándola a alta temperatura para excitar los átomos. Los átomos excitados emiten luz en varias longitudes de onda que son detectados mediante métodos espectroscópicos comunes.

Las fuentes de chispa están controladas bajo una atmosfera de argón.



Figura 33: Espectrómetro de chispa o arco.

Dependiendo de la calidad de acero a analizar se elegirá en la base de datos del ordenador el programa patrón adecuado. Estos programas patrón tienen unas curvas de composición determinadas, las cuales se comparan con los resultados obtenidos.

Normalmente estos equipos necesitan ser calibrados de manera periódica para no perder fiabilidad. Las calibraciones se realizan mediante diferentes patrones certificados cuya composición está garantizada por los organismos competentes. A parte de estas calibraciones periódicas se debe prestar mucha atención al mantenimiento del espectrómetro ya que cualquier avería o fallo en el equipo suele repercutir enormemente en el proceso productivo ya que el análisis de las composiciones es un aspecto fundamental en la producción de los diferentes aceros, no pudiéndose asegurar de ninguna otra forma que la composición de la colada se ajusta de manera inequívoca a la concentración deseada

Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos son todos aquellos que tratan de cuantificar el límite elástico, la carga de rotura, la resiliencia y la dureza. A continuación se describen los más comunes:

➤ Ensayos de dureza

La dureza de un metal es la resistencia que opone a la penetración de otro cuerpo más duro que él. Corrientemente se utilizan varios tipos de ensayos (Brinell, Vickers, Rockwell y Shore). El principio de todos ellos es el mismo, difiriendo únicamente en la forma del penetrador.

El Método de Brinell para medir las durezas consiste en comprimir una bola de acero muy duro, con un diámetro de 10 mm, sobre el material a ensayar, por medio de una carga y durante un tiempo determinado. Tras esto se mide el diámetro de la huella, y se encuentra la dureza del material por la relación entre la carga citada y el área de la huella. A mayor huella menor dureza del material.

El diámetro de la huella se mide con una lupa provista de un retículo graduado, una vez que se sabe el diámetro de la huella se miran unas tablas en las que sabiendo el diámetro, se determina directamente la dureza. La normativa española respecto al ensayo de dureza Brinell es UNE-EN ISO 6506-4:2007

➤ Ensayos de tracción

Es el ensayo más utilizado para conocer la resistencia mecánica del material, consiste en someter a una probeta a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta su rotura, con una máquina normalizada a tal efecto.

Los parámetros que habitualmente se miden en este ensayo son:

Resistencia a la tracción.

✓ Límite elástico.

✓ Alargamiento.

✓ Estricción.

➤ **Ensayo de choque o Charpy**

Este ensayo tiene por finalidad determinar la tenacidad de un metal, es decir, su resistencia al choque.

En este acero es importante este ensayo debido a que la mayoría de herramientas que se realizan con él, están sometidas a percusiones o choques.

Como es el caso de la pieza a realizar, ya que su finalidad es la de formar parte de una matriz de embutir.

Los valores que se obtienen en el ensayo de choque son una referencia extraordinaria para juzgar en muchos casos el posible comportamiento de los metales. Valoran aproximadamente la tenacidad, capacidad de resistencia al choque, a través de la medición de la resiliencia.

Se puede decir que resiliencias bajas (se da el nombre de resiliencia a la energía consumida para romper la probeta) indican propensión del material a ser más frágil bajo cargas dinámicas.

La normativa española respecto al ensayo Charpy es UNE-EN ISO 148-3:2010 (<http://www.aenor.es>).

Ensayos no destructivos

➤ **Ensayo de Ultrasonidos y de Radiografía**

La Radiografía industrial es un método de ensayo no destructivo de gran utilidad para el control de calidad en trabajos de soldadura, forja y fundición, ya que pone de relieve defectos que pueden comprometer la utilidad de los productos acabados o bien, limitar su vida en servicio.

El método de Radiografía se fundamenta en la acción penetrante de la radiación ionizante (rayos X, rayos gamma, neutrones), los cuales al atravesar un cuerpo y ser detectados en transmisión sobre una película fotográfica visualizan en ella las características internas de dicho cuerpo: cavidades, defectos, etc.

En el ensayo de ultrasonidos, se introducen ondas ultrasónicas en los materiales, para establecer la presencia en estos de discontinuidades, defectos y fallas, a partir de las reflexiones que en los mismos experimentan dichas ondas.

➤ **Líquidos penetrantes**

La prueba por líquidos penetrantes es una técnica empleada para la detección de defectos superficiales tales como roturas, pliegues, inclusiones, porosidad... Que se presentan en cualquier tipo de superficie, particularmente muy utilizado para piezas no magnéticas, en los que por lo tanto no se puede utilizar el método magnético. Los principales materiales que pueden ser examinados por este método son: aluminio y sus aleaciones, latón, bronce, titanio, magnesio, etc.

Las fallas o fisuras buscadas pueden deberse a fatiga del material, concentraciones del mismo, defectos de cordones de soldadura, etc. Y en cada caso se deberá determinar la localización y extensión de las mismas.

➤ **Partículas magnéticas.**

Se trata de una técnica de detección de defectos superficiales. El principio de este método consiste en que cuando se induce un campo magnético en un material ferromagnético, se forman distorsiones en este campo si el material presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, por lo que éstas se deforman o se producen polos. Estas distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas que son aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie a examinar y por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de forma directa o empleando luz ultravioleta (Martínez, 2011).

2.5 PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LA PRESENCIA DE GASES EN EL ACERO

El oxígeno, el hidrógeno y el nitrógeno, son gases que están frecuentemente en contacto con los aceros fundidos en diversas etapas de los procesos de fabricación y, en ocasiones, son causa de importantes problemas de calidad.

La solubilidad de estos gases aumenta con la temperatura como se indica en la Figura 34. Esta solubilidad es mucho mayor en los aceros fundidos que en los aceros en estado sólido. Los aceros pueden llegar a contener grandes cantidades de gases cuando el baño metálico alcanza las máximas temperaturas en los procesos de fabricación.

Al enfriarse el acero fundido en el horno, y en especial durante la colada, se van desprendiendo los gases, sobretodo en el momento de la solidificación, en que disminuye mucho y muy bruscamente su solubilidad.

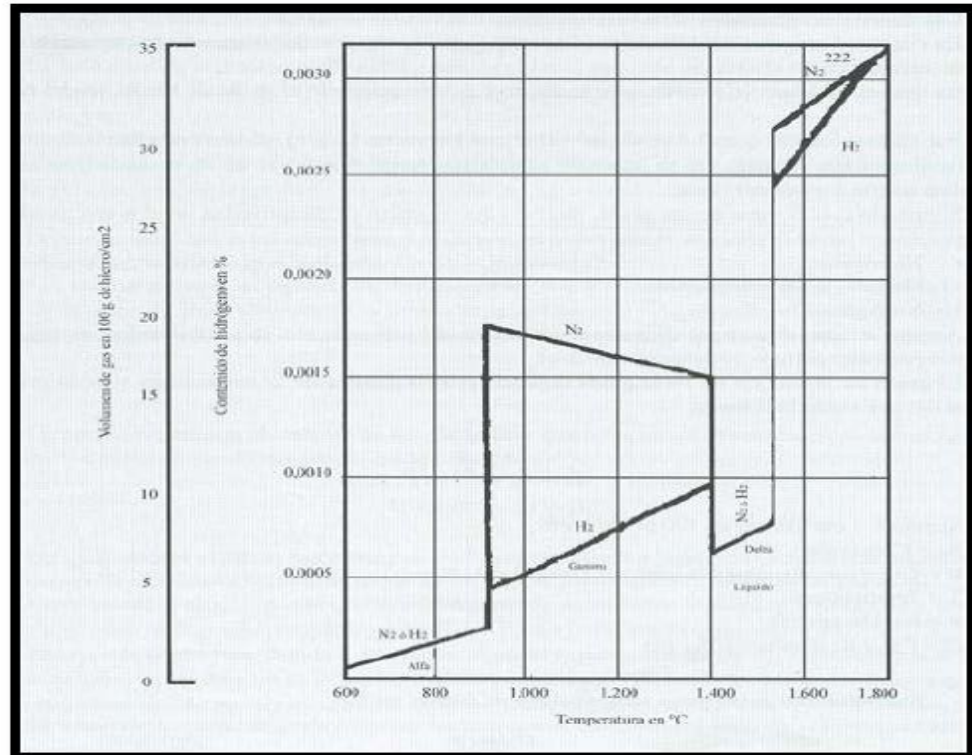


Figura 34: Solubilidad del nitrógeno e hidrógeno en el hierro. Presión parcial 1 Atm. Según Slevert y Chipman (Yarza y Ibarra, 2008).

Los principales problemas que derivan de los gases en el acero moldeado en orden de peligrosidad decreciente son:

- El hidrógeno da lugar a la formación de las llamadas manchas brillantes, también denominadas copos o hair lines, que reducen la tenacidad y ductilidad de los aceros.
- El oxígeno origina porosidades en los aceros mal desoxidados y facilita la formación de inclusiones no metálicas como ya se ha mencionado anteriormente.
- El nitrógeno reduce la ductilidad y comunica fragilidad a los aceros (Apraiz, 1969).

Para disminuir la acción perjudicial de los gases, se recomienda colar los aceros a la temperatura más baja posible compatible con otras limitaciones, evitando siempre que quede algo de acero solidificado en la cuchara.

De los tres gases, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, que se disuelven en el acero a elevada temperatura, a temperatura ambiente solo el hidrógeno aparece libre en el acero sólido.

En los aceros a la temperatura ambiente, el oxígeno siempre aparece combinado formando óxidos o silicatos. Por lo tanto se encuentra formando inclusiones no metálicas, excepto en el caso de los aceros efervescentes, en que puede aparecer en pequeñas cantidades en forma de CO en los poros o cavidades que hay en el material.

El nitrógeno se suele encontrar de forma combinada formando nitruros (Enríquez y Tremps, 2007).

2.5.1 Hidrógeno

En las piezas de gran diámetro y de responsabilidad, la presencia de hidrógeno en el acero sólido, aún en pequeñas cantidades, ocasiona defectos, denominados flakes, hair lines, cracks, manchas brillantes o grietas internas. El hidrógeno en la solución sólida aparece en forma de ión H^+ . Los defectos se aprecian en las piezas rotas, pueden ser grietas finas, fracturas fibrosas, manifestándose la superficie defectuosa en forma de machas brillantes.

La influencia perniciosa del hidrógeno se deja sentir en las propiedades mecánicas del acero, ya que los átomos apresados en la red cristalina, producen tensiones que elevan la resistencia a la tracción y disminuyen el alargamiento y la resiliencia.

- En los aceros en estado sólido, el hidrógeno suele presentarse en cantidades variables, aproximadamente en peso el 0.0002 a 0.0015%.
- El contenido en hidrógeno en centímetros cúbicos, por cada 100g de acero, se transforma en ppm multiplicando ese valor por 1.25.
- Los aceros en estado líquido suelen contener hasta 0.003% de hidrógeno.
- En general decimos que si el contenido es mayor a $6\text{cm}^3/100\text{g}$, puede haber problemas y aparecer copos en el acero.

El hierro puro fundido a 1539C° puede disolver 0.0025% de hidrógeno, esta solubilidad aumenta con la temperatura, al solidificarse desciende bruscamente hasta 0.0008%, siendo a temperatura ambiente de 0.00012% (1.2 ppm). Por este hecho, al solidificarse y no poder disolver el hidrógeno, este queda en forma gaseosa en bolsadas o poros. Si se trata de piezas de poco espesor, menor 50mm, el hidrógeno sale al exterior al cabo de cierto tiempo por difusión.

Las grietas debidas al hidrógeno se forman en el proceso de enfriamiento a unos 200°C, temperatura inferior a 290°C, que es la que corresponde al paso del hidrógeno atómico (que se difunde bien el acero) a hidrógeno molecular (no que se difunde) y que, al no poder salir, queda en el interior de las piezas.

Durante el recorrido por el interior del molde el acero está rodeado de una atmosfera rica en vapor de agua, razón por la cual hay que contar siempre con un aumento de hidrógeno durante la colada. En aceros moldeados habrá que extremar la precaución para que el caldo llegue al final de la fusión con el mínimo hidrógeno posible, sobre todo con aceros aleados con níquel o manganeso, porque ambos elementos aumentan la solubilidad del hidrógeno en el acero.

La difusión del hidrógeno atómico se realiza mejor cuanto mayor sea la temperatura, pero conviene hacerlo a temperatura más baja para disminuir la capacidad de disolución del hidrógeno en el metal.

Los elementos favorecedores de la solubilidad del hidrógeno son:

- Titanio, circonio, vanadio.
- Los que actúan en sentido contrario: carbono, silicio, aluminio.

Se tendrá en cuenta las siguientes prácticas para no incorporar hidrógeno al acero:

- La chatarra oxidada en exceso debe rechazarse puesto que junto con el óxido de hierro, tendrá hidrógeno.
- Procurar secar bien los fundentes y ferroaleaciones que se añaden al horno.

Para su secado se calentarán fuertemente antes de añadirlas al horno. Hay que tener particular cuidado con el ferrosilicio, la cal y el carbón en polvo.

- Se tendrá en cuenta los tapones de la cuchara, los cuales deberán estar perfectamente secos, calentándose para ello al rojo vivo.
- Se secarán los machos con aire caliente una vez cerrados.
- Para piezas de gran tamaño se utiliza chamota como material de moldeo. La chamota tiene la ventaja de que después de calentada por encima de 500°C pierde completamente la humedad, incluso el agua de cristalización.
- La pintura de los moldes ha de estar sumamente seca. Hoy día existen pinturas de este tipo en forma de suspensión de arena de circonio en un líquido inflamable que se quema sin dejar residuos después de aplicarla.
- Cuando se cuele el acero en moldes de arena, habrá que secar las superficies de estos con aire caliente o rayos infrarrojos. Los moldes de arena de gran tamaño suelen secarse en hornos con recirculación de aire a 200°C, antes de cerrarlos. No es aconsejable secar los moldes a la llama directa de quemadores de gas o petróleo, porque la humedad se condensa de nueva en las superficies frías de los enfriadores metálicos o en ángulos muertos del molde, donde no llega bien el calor de la llama.

A continuación se describen los métodos para desgasificar el acero:

- El método para reducir el hidrógeno más común es mediante el tratamiento térmico de recocido. El hidrógeno a 600°C puede reducirse en el acero hasta 1.5cm³ por cada 100g de acero. A continuación puede ser enfriado hasta temperatura ambiente sin peligro de grietas. Este tratamiento es complicado porque reduce en parte las propiedades mecánicas del material, aumento de la fragilidad. El tiempo necesario para la difusión del hidrógeno a través de la masa

metálica es proporcional al cuadrado del diámetro de las barras, por ello puede llegar a ser un tratamiento largo, utilizándose hoy en día métodos de desgasificado.

- Para desgasificar el acero en la cuchara se recomienda C.W. Briggs un tratamiento con politetrafluoretileno. Este producto, estable hasta 315°C, se descompone de forma homogénea al introducirlo en el baño dentro de un recipiente cerámico. En este procedimiento tienen una gran importancia la profundidad de inmersión y el reparto del barboteo. También se ha conseguido disminuir el contenido de hidrógeno en el acero altamente aleado, por inmersión de aleaciones de magnesio o de otros productos fácilmente evaporables.
- La mejor medida para mantener bajo contenido de hidrógeno en un horno de arco eléctrico, es producir durante el periodo de oxidación un hervido fuerte y homogéneo del baño mediante un barrido de oxígeno, para arrastrarlo dentro de las burbujas de CO. Para ello es necesario mantener el carbono 0.3-0.4% más alto que el contenido final.
- Para evitar la contaminación del caldo a partir de la atmosfera del molde en piezas de acero moldeado con elevado contenido en cromo, se secan los moldes perfectamente y se llenan con argón. La colada se efectúa bajo este gas, evitando la colada en atmosfera protectora el exceso de nitrógeno en los aceros al cromo (Roesh y Zimmermann, 1969) (Yarza y Ibarra, 2008) (Apraiz, 1969).

2.5.2 Nitrógeno

Al igual que el hidrógeno se encuentra disuelto en estado atómico, teniendo una curva de solubilidad análoga a partir de los 1400°C.

La curva de solubilidad del nitrógeno es una función dependiente de su presión parcial y de la temperatura. La solubilidad disminuye con la presión, pudiendo ser eliminado por un tratamiento al vacío, o por las burbujas de CO durante el soplado.

Si se encuentran elementos en el acero con tendencias a formar nitruros, disminuye la cantidad de gas arrastrado. Los diferentes elementos con que se alea el acero tienen diferentes formas de afectar a la solubilidad del nitrógeno. Los siguientes elementos formadores de nitruros aumentan su solubilidad:

- Vanadio
- Cromo
- Manganeso
- Molibdeno
- Aluminio

Los que disminuyen esta acción:

- Cobre
- Níquel
- Cobalto

La influencia de los anteriores elementos sobre la solubilidad del nitrógeno en el hierro líquido está representada en la Figura 35.

El nitrógeno crea problemas en los aceros por comunicarles fragilidad, reducir su ductilidad y disminuir la plasticidad. Esto ocurre casi exclusivamente cuando se encuentra en cantidades importantes. En los aceros fabricados en hornos eléctricos o Siemens, el nitrógeno no tiene por qué crear dificultades encontrándose entre un 0.0050 – 0.0100% en los diversos tipos de aceros.

La conocida rotura concoidal aparece cuando el nitrógeno y el aluminio están presentes en el acero por encima de una proporción. El nitrógeno

también produce otros fenómenos de envejecimiento y la llamada acritud azul, que fragilizan el acero.

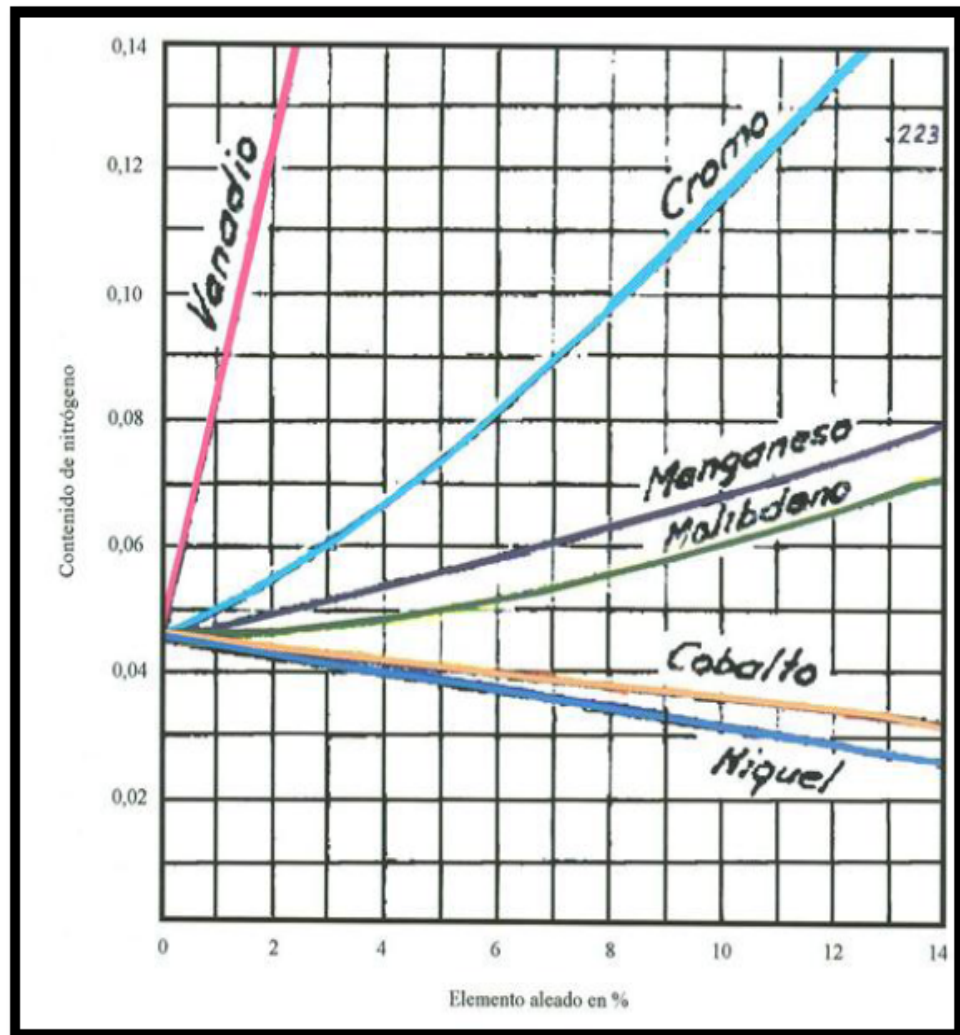


Figura 35: Influencia de los elementos aleados sobre la solubilidad del nitrógeno en el hierro líquido para una presión parcial 1 Atm. Según L.S. Darken y R.W. Gurry y para el molibdeno y el cobalto según H. Schenk, M.G. Frohberg y H. Graf (Yarza y Ibarra, 2008).

En los aceros austeníticos al cromo-níquel y al cromo-manganeso favorece el nitrógeno la formación de austenita. Para alear estos aceros con nitrógeno se emplea ferrocromo rico en nitrógeno. Por precipitación de nitruros de cromo y manganeso durante el tratamiento de revenido aumenta el límite elástico y mejoran las características mecánicas a altas temperaturas. El contenido de nitrógeno en el acero de una fundición debe

controlarse periódicamente ya que su proporción puede acumularse en el material de reciclado alcanzar valores inadmisibles si se emplean ferroaleaciones de baja calidad. Las particularidades metalúrgicas de los hornos de fusión tienen gran influencia sobre el nivel de nitrógeno.

Se recomienda fundir los aceros al cromo bajo una escoria pobre en carburo cálcico, ya que este reacciona con el aire formando cianamida cálcica e introduciendo así nitrógeno en el baño.

Durante el sangrado y durante la colada aumenta el contenido de nitrógeno, suele ser, del contenido del horno. Depende del tipo de acero, es decir de la aleación, y de la cantidad de aire y escoria arrastrados durante la colada del horno a la cuchara, y de esta al molde (Roesh y Zimmermann, 1969) (Yarza y Ibarra, 2008).

2.5.3 Inclusiones

Las inclusiones no son sino pequeñas partículas de óxidos principalmente de hierro y manganeso que pueden quedar en suspensión en el acero después de la desoxidación.

Los 3 orígenes principales de las inclusiones:

- Inclusiones debidas a la desoxidación del metal.
- Inclusiones debidas a la oxidación del metal durante la colada.
- Inclusiones debidas a los refractarios del molde.

Por el tamaño de inclusiones se dividen en:

- Microinclusiones (solo se ven en microscopio).
- Macroinclusiones (se ven a simple vista).

Para eliminar del baño las inclusiones estas deben tener el máximo tamaño posible, haciendo que choquen entre si por medio de la agitación del baño (efecto de coalescencia) y manteniendo dentro de lo posible una

viscosidad baja. A su vez debemos conseguir que las inclusiones suban a la superficie lo más rápido posible y que queden atrapadas en la escoria.

Una de las prácticas que favorecen la coalescencia es añadir al baño cuando este contiene suficiente manganeso, el silicio necesario para desoxidar los óxidos de manganeso y hierro.

El problema no tiene una solución tan sencilla, pues una temperatura muy alta no favorece la coalescencia y además se oxida el silicio con lo que queda mermada su efectividad, aunque se mejora la velocidad de ascensión de inclusiones.

El caldo aunque esté bien desoxidado tiende a oxidarse, dependiendo del tiempo que este dentro del horno y de la duración de la colada.

Sabemos por el contrario que la reacción de reducción de los óxidos de hierro y manganeso por medio del aluminio es casi cuantitativa y que desde luego superior a la del silicio.

De ahí que se prefiera para cantidades pequeñas de FeO el aluminio antes que el silicio como desoxidante, sobre todo en coladas largas cuando el horno se vacía en varias veces, añadiendo a cada cuchara granalla de aluminio antes de verter el caldo en ellas.

El titanio tiene un efecto similar al aluminio aunque es un poco más caro y tiene el inconveniente de fijar el nitrógeno, formando nitruros de aluminio, que reduce la elasticidad y aumenta la fragilidad de los aceros.

Por lo tanto cuando se efectúa la colada, bajando algo la temperatura hasta la adecuada, es muy conveniente la adición de aluminio, pues reaccionará con eficacia, reduciendo los óxidos.

Dado que el fundidor o acerista, está obligado a trabajar con temperaturas del baño lo suficientemente altas para realizar las coladas, en especial cuando existen piezas de sección delgada o de difícil llenado, aunque no lo desee, ayuda a la formación de óxidos de hierro y manganeso.

Por lo que añadir granalla de aluminio en la cuchara antes de llenarla, es una práctica muy recomendable, contando con que el baño haya sido bien desoxidado.

Para evitar la menor cantidad de inclusiones, se deben fijar las condiciones siguientes en el del horno de arco eléctrico:

- Al final del afino u oxidación reducir al mínimo el contenido de FeO, manteniendo el carbono en la banda baja de la norma y aprovechar esta temperatura para fusión de la cal y de los desoxidantes, y así bajar la temperatura.
- Retirar la escoria completamente sin dejar rastros sobre ella, después de 10 minutos de dejar desinsuflar oxígeno.
- Antes de formar la segunda escoria, añadir el carbono que necesitemos, y a continuación, formar la segunda escoria con caliza y/o espato de flúor (mejor que con cal, pues esta es altamente higroscópica) y los desoxidantes correspondientes.
- Agitar la segunda escoria reductora para una reacción efectiva escoria-metal.
- Con la escoria reductora formada, añadir el manganeso antes que el silicio.

Aunque actuemos con eficacia y siguiendo todas las normas para conseguir un buen acero, es imposible obtenerlo exento de inclusiones.

Por otro lado es imposible asegurar que dos coladas sean iguales, aunque el laboratorio nos lo diga por que las microinclusiones serán distintas.

Entre los elementos que mas generan inclusiones están:

- Nitrógeno, azufre y oxígeno. El carbono y el fósforo forman carburos y fosfuros que algunos no consideran inclusiones.
- El nitrógeno produce nitruros, entre ellos el más típico es el nitruro de titanio, en aquellos que hayan sido tratados con ese elemento. Tiene un color amarillo y se presenta en finas partículas cristalizadas.
- El azufre, forma los sulfuros correspondientes, principalmente con el hierro y con el manganeso. Aún en aceros de muy bajo contenido de azufre se han encontrado sulfuros.
- El mayor formador de inclusiones es el oxígeno, produciendo óxidos que reaccionan entre sí. Las inclusiones debidas al silicio, están en forma de silicatos de hierro y manganeso, así como silicato de aluminio cuando se emplea en la desoxidación del acero, y raramente como silicio puro.

Se ha comprobado que los aceros que no han sido desoxidados con aluminio los silicatos están en mayor cantidad. Cuando añadimos aluminio en cantidad suficiente los silicatos se destruyen, quedando inclusiones más finas de alúmina, cuya repercusión es menos dañina.

Se cree que el aluminio influye sobre las inclusiones de sulfuros de forma similar (Yarza y Ibarra, 2008).

2.5.4 Defectos

Defectos y causas en piezas de acero moldeado

a) Sopladuras, poros, cavidades, ampollas: Proviene en general de la formación de gases debido a humedades que reaccionan con el caldo o al propio caldo que al colar lleva ya disueltos esos gases. Cuando esto es así, después de la colada, se observa como la mazarota o el tragante del bebedero sube quedando su parte superior en forma de champiñón. Causas:

- Caldo con gases en disolución por un mal desoxidado en horno o una mala práctica en el afino.
- Caldo con gas por humedad del refractario de la cuchara.
- Velocidad de colada inadecuada, creando un régimen turbulento que atrapa parte del aire.
- Humedad en el molde.
- Humedad en los machos.

b) Rechupes, cavidades y depresiones: Proviene principalmente de la falta de material de aporte durante la solidificación. Causas:

- Mal diseño del bebedero, modelo, ataques que impiden el paso adecuado del caldo.
- Mazarotas insuficientes para alimentar la pieza.
- Colada del acero demasiado fría.
- Grietas y rajaduras.
- Mismas causas que con los rechupes.
- Desmoldeo demasiado rápido.
- Exceso de rigidez de machos o molde.
- Composición inadecuada para la geométrica de la pieza.
- Tratamiento térmico inadecuado.
- Corte y soldadura en frío.

- c) Piezas deformadas: Ocurre cuando la pieza es de geometría delicada y de dimensiones no proporcionales, por ejemplo discos de gran diámetro y poco espesor. Causas:
- Mal diseño, falta de nervios o poca dimensión de los mismos.
 - Molde o macho poco flexible.
 - Acción de los gases en moldes de poca permeabilidad.
 - Tensiones durante un enfriamiento inadecuado.
 - Mala posición durante el tratamiento.
 - Desmoldeo demasiado rápido.
- d) Falta de llenado: Es un defecto muy visible que inutiliza por completo la pieza. Causas:
- Colada incompleta o caldo frío.
 - Falta de fluidez suficiente para llenar el molde en especial las partes de poco espesor.
 - Mal diseño de molde, con pasos o ataques a pieza demasiados estrechos.
 - Falta de vientos, con poca permeabilidad de las arenas, creando una contrapresión.
- e) Arenas y escorias: Es de los defectos más comunes, ya que el propio molde y machos están constituidos por arena y suelen aparecer casi siempre en la superficie o cerca de la misma, en la parte superior del molde. Raramente aparecen en la parte baja de la pieza. Causas:
- Mal diseño del molde que origina remolinos que da lugar a arrastre de arenas.
 - Colada demasiado brusca que puede deteriorar el molde en especial allí donde hay cantos o vivos o secciones poco redondeadas o secciones muy débiles de arena.
 - Molde o macho de poca resistencia.
 - Suciedad en el molde.

- Suciedad en el caldo.

f) Deltas: Aparecen casi siempre en la parte superior de la pieza debido a un desprendimiento de arena. En la pieza se observa una sobrecapa de metal sobre su superficie. Se produce siempre durante la colada.

Causas:

- Humedad en el molde o machos.
- Poca permeabilidad o falta de salida de gases.
- Temperatura excesiva de colada.
- Falta de pintura refractaria.

g) Otros defectos:

- Piezas desplazadas o variada por el movimiento o mal cierre de la caja, mala colocación de los machos. Este tipo de defecto no tiene reparación por lo que se considera como pieza rechazada.
- Superficie rugosa debido a un tamaño de arena gruesa.
- Penetraciones de caldo en la arena por una temperatura excesiva o por defecto de la arena.
- Partes vítreas por falta de refractariedad de la arena o por defecto de arena sin pintura protectora o una temperatura alta de colada para el tipo de arena empleada.
- Costuras, cicatrices, hinchazones y ondulaciones.

Los defectos son abundantes generándose la mayoría durante la fundición, moldeo y desmoldeo (Yarza y Ibarra, 2008).

Porosidad

Las secciones con espesores comprendidos entre 15 y 30 mm son las que presentan este defecto con mayor frecuencia. El contenido de óxido del acero situado directamente sobre la superficie del molde es mayor que el

del material en su interior, por cuya razón se producen las porosidades junto a la superficie de la pieza.

También puede explicarse la localización de las zonas porosas, teniendo en cuenta que el acero que entra primero en el molde tiene un contenido de oxígeno mayor que el que le sigue inmediatamente; donde vaya a parar este primer acero se producirá con más intensidad los poros. Según la forma y la colocación de las entradas se distribuirá el acero con más o menos gas a punto un punto u otro de la pieza, de aquí la influencia de sistema de colada en la posición de las zonas porosas.

Como se desprende de lo expuesto, es conveniente que el acero que fluye en primer lugar en el molde vaya a parar a las mazarotas, donde no importa que se presenten poros. Si la oxidación es muy fuerte, se pueden presentar no solo porosidades, sino también sopladuras. Para el sistema de colada de piezas de gran tamaño, en moldes de arena, suelen emplearse tubos de material cerámico, evitando así gran número de inclusiones, oxidación y toma de hidrógeno.

El régimen laminar o turbulento con que discurre el acero líquido por la superficie del molde y la geometría de la pieza juega un papel muy importante en la cantidad y localización de las porosidades. El sistema de colada tiene, por tanto una gran influencia sobre la aparición y localización de este defecto. Más tarde, al final de la solidificación, empieza a segregarse el hidrógeno en estas burbujas al disminuir su solubilidad con la temperatura. Si el hidrógeno contenido en el acero ya es elevado antes de empezar la colada y aumenta aún más durante el llenado del molde, puede llegar a alcanzar una concentración tal, que durante la solidificación se desprenda en las burbujas de gas, aumentando su volumen. Las burbujas se alargan entonces paralelamente a los cristales, es decir, perpendicularmente a la superficie del molde.

La presión del gas en las burbujas puede aumentar de tal manera, que estas buscan la salida entre los cristales ya formados hacia el interior y exterior del metal en la solidificación.

Las burbujas debidas al hidrógeno tendrán una superficie metálica, mientras que las debidas al oxígeno estarán recubiertas de óxido.

Se tiene también el caso en que el caldo este mal desoxidado desde el principio, teniendo un alto contenido de oxígeno. Durante la solidificación se produce un desprendimiento de gas en toda la masa, que da lugar a grandes burbujas (sopladuras). Al disminuir la solubilidad del hidrógeno durante la solidificación se segrega este también, aumentando el volumen de las sopladuras. También el nitrógeno si se encuentra en cantidad elevada puede contribuir a la formación de poros.

También puede producir porosidad la humedad condensada en las superficies frías de los enfriadores metálicos. El gas desprendido bruscamente, al alcanzar el acero líquido la superficie de la coquilla, penetra dentro de él y al quedar aprisionado por la rápida solidificación da lugar a porosidad. Una buena práctica es pintar los enfriadores con una pintura que lleve aluminio e impida la oxidación.

Los soportes de los machos estañados pueden producir también porosidad, si están fabricados con acero sin calmar. Muchas veces se han observado reacciones entre soportes con elevado contenido de hidrógeno u óxido y el acero líquido, que han producido porosidad.

A parte de estos tipos de porosidad, debidos a los gases formados en reacciones químicas, se conocen otros producidos por gases ocluidos de forma mecánica en el seno del acero líquido. Este caso se presenta, por ejemplo, cuando las salidas de gas de los machos son insuficientes, o cuando se desprende alguna parte del molde y al quedar rodeada por el

acero, los gases contenidos en los poros el material del moldeo, que no pueden escapar, son aprisionados por el líquido.

Por último se ha de mencionar también un tipo de poros abiertos hacia el exterior, que se producen cuando en la superficie de un molde, cuya permeabilidad es insuficiente, se encuentra alguna partícula que al descomponerse por el calor desprenda gran cantidad de gases. En ocasiones se observan en las piezas moldeadas en chamota, burbujas formadas entre la superficie del molde y el acero en estado pastoso, que ascienden serpenteando. Este caso produce por ejemplo en moldes de chamota recubiertos con una pintura demasiado grasa y por tanto poco permeable.

Para suprimir la porosidad en piezas de acero moldeado, cuyas causas con frecuencia se superponen, es imprescindible efectuar un cuidadoso estudio, teniendo en cuenta los distintos aspectos, metalúrgico, material de moldeo y técnica de colada, que pueden contribuir a producir los poros (Roesh y Zimmermann, 1969).

2.6 METALURGIA SECUNDARIA

Los procesos de metalurgia secundaria, tienen como objetivo principal el desgasificado del baño de acero. En esta operación van incluidas las siguientes:

1. Eliminación de hidrógeno.
2. Eliminación de nitrógeno.
3. Eliminación de oxígeno.
4. Eliminación de inclusiones.
5. Descarburación por desgasificado.

Los procesos pueden ser de 4 clases:

- Procesos en vacío sin aportación térmica.
- Procesos en vacío con aportación térmica.
- Procesos atmosféricos sin aportación térmica.
- Procesos atmosféricos con aportación térmica.

Los procesos al vacío consiguen resultados notables, incluso espectaculares en la consecución de los objetivos descritos anteriormente. Los procedimientos realizados a presión atmosférica no consiguen resultados tan brillantes. Sin embargo la relación resultados/inversión obtenida a presión atmosférica es compensatoria en una acería que fabrica aceros muy especiales solo en ocasiones contadas que no compensan una fuerte inversión en equipos y operaciones, Tanto uno como otros pueden realizarse sin aportación térmica adicional o con caldeo posterior.

Las ventajas de utilizar metalurgia secundaria en los siguientes campos son:

1. Productividad:

- Optimización de las operaciones en la acería.
- Mayor aprovechamiento de los equipos productivos.
- Flexibilidad óptima.

2. Costos:

- Posibilidad de utilizar ferroaleaciones más baratas y mayor recuperación de estas.
- La eficiencia de estos procesos reduce las necesidades de control de calidad.
- En el desgasificado hay una eliminación muy importante del contenido de hidrógeno, del orden del 50 al 70%. Con esto se suprimen los largos recocidos que hay que dar a las piezas moldeadas de gran espesor.

3. Calidad química:

- Posibilidad de encajar con precisión la composición química del acero fabricado.
- Posibilidad de alcanzar contenidos muy bajos de carbono.
- Desgasificación completa de gases como el hidrógeno y el nitrógeno.
- Disminución parcial, por evaporación de elementos perniciosos como As, Sb, Bi, Cu, Sn, Pb... alguno de los cuales, aún en proporciones muy

pequeñas, disminuyen las características mecánicas del acero que las contiene.

4. Calidad estructural:

- La extracción completa del oxígeno del baño por purga con gases inertes impide la formación de óxidos (inclusiones no metálicas).
- El proceso por purga de gases inertes posibilita la flotación de las inclusiones que se hubiera podido formar, enviándolas a la escoria donde son atrapadas.
- Si a pesar de todo no se pudiera evitar o flotar las inclusiones, existe la posibilidad de modificar la composición y morfología de las mismas para hacerlas menos perjudiciales.
- Mejores propiedades transversales (o de tenacidad) del material, especialmente ductilidad y resistencia a la fatiga, que tienen una gran dependencia de la disminución de cantidad y tamaño de las inclusiones no metálicas (óxidos, silicatos...).
- Disminución de la susceptibilidad de los aceros martensíticos a entalladuras producidas por cambios bruscos de temperatura.

2.6.1 Procesos atmosféricos sin aportación térmica

Los efectos de creación de interfaces, aceleración de reacciones, desgasificación, desoxidación, eliminación de inclusiones... Se consiguen mediante inyección de argón y otros gases más o menos inertes, que puede ir acompañada de adición forzada de escorificantes y ferroaleaciones. Algunos de estos procedimientos que implican inyección de gases inertes, especialmente argón, han sido desarrollados por los fabricantes o comercializadores de estos mismos gases.

A continuación se exponen las características más comunes en los procesos atmosféricos sin aportación térmica.

- Se realizan a presión atmosférica.

- Todas las operaciones se realizan en la misma cuchara.
- Comportan inyección y barboteo de argón.

Los procesos más habituales sin aportación térmica y a presión atmosférica son:

- a) Purga de Argón, AP, Argon purge.
- b) Método Convencional.
- c) Capped argon bubbling, CAB.
- d) Composition adjustment by sealed argon bubbling, CAS.
- e) Inyección con lanza Thussen-Niederrhein, TN.

Se ha de tener en todo momento claro que la realización de alguno de los siguientes procesos conlleva unas desventajas en los siguientes ámbitos:

- Mayor desgaste de refractarios.
- Temperaturas elevadas frenan la defosforación.
- En hornos de arco hay más consumo eléctrico y de electrodos.
- Una mayor duración de la colada.

A continuación se describen los procesos mencionados:

a) Purga de Argón, AP, Argon purge

Es el sistema más sencillo y barato con que se cuenta. Consiste en barbotar argón a través del baño en la cuchara. Este gas se insufla mediante una lanza protegida con refractario o tapón poroso. Se pueden añadir reductores para desoxidación, manteniendo sobre el baño una escoria sintética desulfuradora. La reacción entre los desoxidantes, una vez disueltos en el acero, y el oxígeno es muy rápida y se alcanza pronto el equilibrio. Los productos de la desoxidación son

flotados después hacia la superficie donde son atrapadas por la escoria.

Para garantizar homogeneización de los desoxidantes en el acero y forzar la eliminación de las inclusiones es fundamental que el barboteo con argón, sea por lanza o por tapón poroso. Es aconsejable mantener un caudal de soplado relativamente alto durante la colada del horno de arco a la cuchara y un caudal bajo después de la colada para que floten las inclusiones formadas. A partir de ahí si el caudal es excesivo las inclusiones podrían volver a sumergirse en el baño.

b) Método convencional

Proceso bastante sencillo, consiste en insuflar gas inerte por el fondo de la cuchara mediante lanza protegida o tapón poroso. Esta inyección de gas tiene un papel doble.

Por un lado de la superficie del baño donde aflora el chorro de gas inerte que hace resbalar la escoria hacia otras zonas de la superficie del baño. Esta zona libre de escoria se llama calva. Sobre ella caen ferroaleaciones y escorificantes los cuales tienen una buena digestión por el acero líquido. Por otro lado, las burbujas arrastran a la superficie los gases e inclusiones que nadan en el acero.

c) Capped argon bubbling, CAB

Este método de barboteo de argón bajo cámara cerrada es muy parecido al método convencional. La tapa tiene dos ventanas como mínimo. Una de ellas es una mirilla donde se observa el proceso o se introducen cañas pirométricas, lanzas de tomas de muestras... Sobre la otra se disponen las tolvas de aditivos con sus correspondientes dosificadores automatizados.

d) Composition adjustment by sealed argon bubbling, CAS

Difiere del CAB (Capped argon bubbling) en ser ligeramente más sofisticado, especialmente en la adopción de atmósferas protectoras. La tapa de cuchara tiene una campana cuya parte inferior se sumerge en el baño dando así lugar a una cavidad estanca. En esta cavidad desemboca el chorro emergente de gas insuflado por el tapón poroso. La cámara se conecta la entrada de gas de protección que evita la oxidación de las adiciones reductoras y aleantes, las cuales caen desde la tolva sobre la calva, facilitando así su digestión por el acero líquido.

e) Inyección con lanza Thussen-Niederrhein, TN

La adición de productos desoxidantes y desulfurantes al acero se hace con gran eficacia, insuflando estos productos en polvo, a través de una lanza, por medio de gas inerte. Los productos más frecuentes empleados para desulfurar y para el control de la morfología de las inclusiones son el silicio-calcio (sica) y diversas escorias sintéticas.

La agitación del acero por el paso de gas produce excelente homogeneidad de composición y temperatura del baño y una mejora de la limpieza, como en otros métodos de barboteo.

2.6.2 Procesos atmosféricos con aportación térmica adicional

La inyección de gases o de materiales sólidos provoca un enfriamiento del baño de acero que en algunos casos puede imposibilitar las operaciones posteriores, especialmente en la máquina de colada continua. Esto da lugar a la aparición de los procesos con aportación térmica adicional que, los cuales se realizan mediante el caldeo eléctrico o caldeo por oxígeno.

- El caldeo eléctrico engloba un grupo de procesos donde el calentamiento se hace posicionando la cuchara bajo una bóveda de horno de arco de diámetro igual que el de la cuchara. Aunque el

fundamento de los procesos es el mismo, el diseño particular varía de unos a otros.

- El caldeo por oxígeno engloba un grupo de procesos que se aprovecha la reacción Vacher-Hamilton de combustión de carbono por el oxígeno inyectado sobre el baño.

Los procesos atmosféricos con aportaciones térmicas más notables son:

Caldeo eléctrico

- a) Horno cuchara, Ladle Furnace, LF.
- b) Gas Refining Arc Furnace, GRAF.

Caldeo por oxígeno

- a) Argon Oxygen Decarburisation, AOD, (División Linde, Union Carbide).
- b) Cresot-Loire-Uddeholm, CLU.
- c) Composition adjustment by sealed argon bubbling – Oxigenbubbling, CAS-OB. (Enríquez y Tremps, 2007).

2.7 EJEMPLOS PRÁCTICOS DE ELABORACIÓN DE ACERO

2.7.1 Ejemplo de elaboración de acero formando doble escoria en horno de arco eléctrico

Es el proceso más clásico y empleado para fabricar aceros de alta calidad o alta aleación. De una forma muy esquemática podemos decir que el proceso de doble escoria consiste en:

- Fundir chatarra, luego crear una escoria oxidante sobre el baño metálico, que servirá para oxidar el carbono, silicio y fósforo

manganeso hasta que esos elementos queden reducidos a límites muy bajos.

- Por la acción de esa primera escoria oxidante se consigue eliminar una gran parte del fósforo que contienen las cargas y, luego, por la acción de la segunda escoria reductora se puede eliminar gran parte del azufre.
- En esa última fase, y antes de colar el acero, necesitamos eliminar el oxígeno que contiene el baño fundido. Eso se consigue por la acción de la escoria reductora y añadiendo desoxidantes como ferromanganeso, ferrosilicio, aluminio y carburo de calcio.

Primera fase de afinado:

- $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$ (ec. 5)
- $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$ (ec. 6)
- $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ (ec. 7)

La eliminación del fósforo se consigue, también por oxidación, en la primera fase del proceso con escoria básica y oxidantes. El anhídrido fosfórico formado se combina con la cal y da fosfato tricálcico y tetracálcico, que sale del horno al desescoriar.

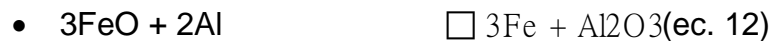
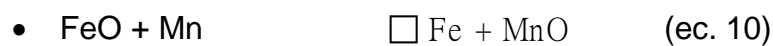
El azufre se elimina en cambio en la segunda fase del proceso con escoria básica reductora. Se combina con la cal y se forma sulfuro de calcio que pasa a la escoria.

Se producen las siguientes reacciones:

- $\text{FeS} + \text{CaO} + \text{C} \rightarrow \text{CaS} + \text{Fe} + \text{CO}$ (ec. 8)

El oxígeno residual disuelto en el baño se elimina al final del proceso. Una parte es absorbida por la escoria reductora y, otra parte, por la adición de desoxidantes como el silicio, manganeso, carbono, aluminio y carburo de calcio.

La desoxidación se realiza de acuerdo con las siguientes reacciones:



Como resumen destacaremos que este proceso se caracteriza por trabajarse con dos escorias diferentes.

1. Escoria básica y oxidante, que al final de la fase tiene esta composición:

- CaO = 40%
- SiO₂ = 15%
- FeO = 15%

Trabajando con esa escoria, se oxidan y disminuyen los porcentajes de silicio, carbono y manganeso del baño de acero y se elimina parte del fósforo que contiene las cargas.

2. Escoria desoxidada básica de la siguiente composición aproximada.

- CaO = 60%
- SiO₂ = 20%

- $\text{FeO} = 0.15\%$
- $\text{CaC}_2 = 1.5\%$

Trabajando con ella, se elimina el azufre y se desoxida el acero.

Principales fases de la operación

1ª carga del horno

La operación se inicia al introducirse la chatarra al horno y algo de cal y caliza. En general, cuando interesa fabricar aceros de calidad se recomienda que la composición media del acero, en el momento de fundir, tenga un contenido en carbono ligeramente superior ligeramente superior en 0.25-0.50% al porcentaje de carbono que se desea que tenga el baño final de la fase oxidante (generalmente el 10%), pues es muy recomendable que durante esta fase se produzca un vigoroso hervido del baño que favorezca la eliminación de gases e impurezas. Cuando se efectúa ese barboteo, que es debido al desprendimiento de óxido de carbono al oxidarse el carbono se dice que el baño trabaja.

Si el contenido de carbono de la chatarra no es suficiente se suele añadir a la carga o el baño cuando está terminado de fundir, coque o lingote de hierro...

Se ha comprobado experimentalmente que si no tenemos el carbono suficiente y no se produce hervido, obtenemos aceros de baja calidad.

2ª Conexión de la corriente eléctrica

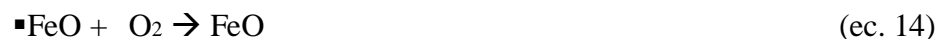
3ª Fusión de la carga

En cuando se observa que hay acero fundido debajo de los electrodos formando un pequeño charco, debe de añadirse una pequeña cantidad de cal o caliza para cubrir superficialmente el baño metálico.

4ª Periodo oxidante o de afino

Tras formase el primer charco de metal fundido el baño empieza a oxidarse por el oxígeno del aire y del óxido de hierro que contiene la chatarra. Luego, cuando todo el metal se encuentra en estado liquido, o un poco antes, se suele introducir hierro que acentúa la oxidación de la escoria, y por lo tanto la del metal. Además para acelerar esta fase oxidante se introduce oxígeno por medio de un tubo de.

El baño comienza a trabajar o hervir debido a la oxidación del carbono que da un desprendimiento gaseoso de CO. Al mismo tiempo se va formando una pequeña cantidad de escoria negra y cal, con un poco de sílice y óxido de hierro. Esta escoria sirve como vehículo del óxido de hierro, para la oxidación del acero durante esta fase de la operación. La oxidación de los diferentes elementos:



Aceleramos la oxidación del baño añadiendo mineral de hierro o inyectando oxígeno. Asimismo, se hacen adiciones de cal y caliza para facilitar la formación de escoria.

El óxido de carbono escapa en forma de gas, y los demás óxidos P, Si, Mn... son sólidos, mezclados entre la escoria y el baño. Estos últimos al tener menor densidad que el acero fundido, tienden a subir a la

superficie y combinarse con la cal de la escoria formando compuestos más o menos estables.

En esta fase se elimina el fosfato tricalcico y tetracalcico:



Al cabo de 30-70 minutos termina esta fase, y se saca del horno la escoria, y con ella gran parte del fosforo, silicio, manganeso y otros elementos fácilmente oxidables. De esta forma al final de esta fase obtenemos un baño muy oxidado y de bajo contenido en carbono, manganeso silicio y fosforo. Destacamos de esta fase:

- El hervido que facilita el desprendimiento y la eliminación de gases
- La eliminación del fosforo en la escoria

La oxidación del fosforo al ser muy exotérmica se realiza a baja temperatura, y en gran parte antes de que comience la oxidación del carbono.

Si existiesen fuertes cantidades de fosforo, se podrían usar dos escorias oxidantes en esta fase, una para eliminar el fosforo, con abundante óxido de hierro y cal, a baja temperatura y otro como la descrita anteriormente.

5ª Desescoriado

Al final del primer periodo de afino, la escoria oxidante es retirada con barras refrigeradas, quedando desnudo el baño con bajos porcentajes de C, Mn, Si y P. En la siguiente etapa incorporaremos una segunda escoria reductora.

6ª Período desoxidante

Esta etapa de trabajo es bastante empírica, y en las acerías se emplean métodos sistemas y técnicas bastante variables de unos casos a otros.

En todos los casos se cubre el baño con una escoria desoxidante preparada fundamentalmente con tres partes de cal y una de espato de flúor, a la que se añade como elemento desoxidante generalmente una parte de coque o grafito. A veces se añade un poco de carburo de calcio o silicocalcio y también, en algunos casos ferrosilicio en polvo.

En esta etapa conseguimos reducir una parte del contenido inicial de oxígeno por simple contacto del baño metálico con la escoria fuertemente reductora que cubre el metal, que cuando se deja enfriar al aire tiene un color blanco característico. Esa escoria, también desulfura el baño metálico.

Carburación del baño

Antes de hacer adiciones de los elementos que forman la segunda escoria, se acostumbra añadir al baño desnudo coque o trozos de electrodos de grafito reducidos a tamaño de granos de arroz que realizan dos funciones. Realizan una parcial desoxidación del baño que facilita la acción desoxidante de la escoria. Al tener el acero mas carbono baja automáticamente el oxígeno del baño.

A veces en vez de introducir coque se introducen los electrodos un momento en el baño desnudo. Estos dos métodos solo se realizan cuando queremos realizar acero con altos contenido en carbono.

Cuando se fabrican aceros bajos en carbono, saltamos esta operación y se añade la segunda escoria formada por cal, espato, y una limitada cantidad de coque.

Desoxidación parcial por adición de desoxidantes

Otro de los métodos que se sigue en ocasiones, aunque hay fabricantes que no lo recomiendan es el de desoxidación parcial previa, con adición de ferromanganeso, ferrosilicio o aluminio al baño desnudo antes de hacer ninguna otra adición. En este caso, el baño absorbe un porcentaje variable de manganeso o silicio, que realizan una parcial acción desoxidante.

La adición de fuertes cantidades de desoxidantes como ferrosilicio y ferromanganeso al baño desnudo oxidado, aunque es un método de trabajo muy cómodo, no es lo más recomendable. Si las adiciones de ferrosilicio se hacen después de que el baño este suficientemente desoxidado (por contacto con la escoria reductora) es posible obtener acero de mejor calidad (más limpio) desoxidado en el mayor grado posible con la escoria, ya que esta quita una gran parte de las impurezas (óxidos) en forma análoga a un papel secante, sin introducir otras impurezas o materias metálicas en el baño, lo cual e suma gran ventaja.

Las cantidades de ferrosilicio y ferromanganeso que se suelen añadir para realizar esa primera desoxidación inicial, suelen ser las necesarias para que el acero quede con un 30% a 60% del silicio y manganeso que se señala en las especificaciones, haciéndose las restantes adiciones de estas ferroaleaciones cuando el proceso esta mas avanzado y el contenido de oxígeno en el baño es muy pequeño.

Formación de la segunda escoria

La segunda escoria se forma siempre, con adiciones de cal, espato de flúor y un poco de coque u otros elementos desoxidantes. El peso total de la escoria reductora que se añade al baño es de 2 – 3.5% del peso del acero, dependiendo del tamaño del horno y de la superficie del baño. La mitad del peso de la escoria se suele añadir al principio y el

resto luego, en intervalos sucesivos. El peso de la escoria oxidante es aproximadamente el 10% del peso del acero.

Atenciones para mantener la escoria bien desoxidada

La escoria reductora o segunda escoria suele tardar de 15 a 40 min en formarse, en cubrir bien el baño y en tener la viscosidad adecuada en todas las partes del horno.

Cuando una escoria comienza a reaccionar con los óxidos de acero, el baño tiende a oxidar la escoria y esta a desoxidar el baño. A partir de este momento, la principal preocupación del encargado del horno debe de ser mantener la escoria desoxidada, para así favorecer la desoxidación y la desulfuración del baño de acero. Si se logra mantener la escoria desoxidada, se tiene garantía de que se está desoxidando el baño de acero.

El contenido en óxido de hierro de la primera escoria oxidante hemos dicho que oscilaba entre el 12% y el 25% de FeO, y el de la segunda escoria, un poco después de haberse formado, suele variar del 6 al 12 %, bajando luego rápidamente. A los 10 min, el contenido de óxido de hierro es solo del 2%, y luego sigue disminuyendo oscilando a las 30 min entre los 0.5 y 1%. El porcentaje de carburo de calcio que conviene que contenga la escoria debe de ser superior a 2% y suele oscilar entre 0.5 y 2.5%. El carburo no puede existir en la escoria en presencia del óxido de hierro.

Por lo tanto, la existencia de carburo en la escoria es garantía de que esta se encuentra desoxidada. La presencia de carburo en la escoria se detecta al introducir una barra rodeada de escoria en el agua y observar el fuerte olor a acetileno que desprende.

Ya que el carburo de calcio que contiene la escoria solo desoxida la capa de acero superficial, que está justo en contacto con la escoria, es

difícil conseguir una intensa y rápida acción desoxidante en todas las partes de un baño cuando el acero esta sin movimiento. Para evitar ese inconveniente, se recomienda remover de vez en cuando la escoria y el acero con una barra de hierro para que así, al acentuarse el contacto de la escoria con el acero, se acelera la acción desoxidante. El carburo reacciona con FeO y MnO del baño llegando a completar la desoxidación si está el tiempo suficiente. Sin embargo, la desoxidación que realiza la escoria es lenta necesitando de cantidades adicionales de ferroaleaciones.

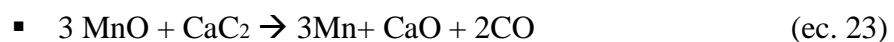
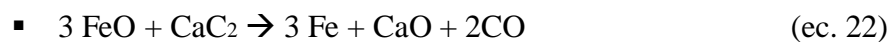
Desoxidación

Normalmente, el principal agente desoxidante en la segunda escoria es el carburo de calcio que se forma al reacciona la cal con el carbón en la siguiente forma:



A veces, el carburo de calcio se añade directamente para formar escoria.

El carburo desoxida la escoria al reaccionar con los óxidos de hierro y manganeso, que se transforman en hierro y manganeso metal, desprendiéndose óxido de carbono y formándose cal según las siguientes reacciones.



Pasando el hierro y el manganeso al baño del acero.

Desulfuración

La desulfuración se efectúa con una escoria básica y reductora por la acción de la cal, y del carburo de calcio, según las siguientes reacciones:

- $\text{FeS} + \text{CaO} + \text{Ca} \rightarrow \text{CaS} + \text{Fe} + \text{CO}$ (ec. 24)
- $3\text{FeS} + 2\text{CaO} + \text{CaC}_2 \rightarrow 3\text{CaS} + 2\text{CO} + 3\text{Fe}$ (ec. 25)
- $3\text{MnS} + 2\text{CaO} + \text{CaC}_2 \rightarrow 3\text{CaS} + 2\text{CO} + 3\text{Mn}$ (ec. 26)

El carburo de calcio de la escoria se gasta en estas reacciones, por lo que adicionamos carbón pulverizado para que al reaccionar con la cal se forme un nuevo carburo de calcio y continúe su acción desoxidante y desulfurante. La desoxidación por Si, Mn, o Al se realizan al final de esta fase, cuando se hacen adiciones del ferromanganeso y aluminio se produce:

- $\text{Si} + 2\text{FeO} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}$ (ec. 27)
- $\text{Mn} + \text{FeO} \rightarrow \text{MnO} + \text{Fe}$ (ec. 28)
- $2\text{Al} + 3\text{FeO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Fe}$ (ec. 29)

El control del grado de basicidad, de desoxidación y de viscosidad de la escoria se determina observando su color y aspecto. Para ello se meten barras al horno en las que se queda adherida la escoria. Al principio de la fase desoxidante el color de la escoria después de enfriarse es negro, lo que indica que todavía contiene óxidos y por lo tanto, la escoria esta oxidada. A medida que transcurre el tiempo varía de color, que va pasando de negro a pardo, luego pasa a un color gris y más a tarde a un color blanco. La escoria blanca pulverulenta indica que esta desoxidada.

Acción del carburo de calcio

El principal objetivo es formar lo más rápido posible una escoria reductora, que no contenga carburo de calcio, garantizando así la ausencia de óxidos en la escoria durante toda la fase reductora o desoxidante. Una escoria con carburo esta libre de óxidos.

Adición de elementos especiales y desoxidantes

Una vez comprobada la segunda escoria reductora, su aspecto al enfriarse y tenemos los análisis del laboratorio, se realizan las últimas operaciones antes de hacer la colada del acero a la cuchara. Primera se hacen adiciones de las distintas ferroaleaciones para encajar los diversos elementos de las especificaciones requeridas. Se comprueba la desoxidación final del baño, añadiendo si es necesario ferrosilicio algún otro como el aluminio, que al mismo tiempo controla el tamaño de grano.

Además observaremos que la temperatura es la adecuada, ya que si no, no obtendremos un acero de calidad.

Utilización de escoria blanca formada con una cantidad de ferrosilicio superior a lo normal.

Cuando se fabrica aceros bajos en carbono ($C < 0.10\%$) la segunda escoria no se prepara a base de carburo principalmente, sino que se emplea más cantidad de ferrosilicio que la normal y solo una pequeña cantidad de carburo de calcio. Esta escoria poco carburada se emplea para evitar que con la presencia de importantes cantidades de carburo aumente el contenido de carbono en el baño.

En este caso la desoxidación se realiza:



Mientras que la desulfuración:



Esta escoria, como se ha explicado antes, se utiliza para fabricar aceros bajos en carbono, como los aceros de cementación.

7ª Colada del acero

Una vez ya tenemos el acero listo para que la colada sea realizada, abriremos el agujero de colar y volcaremos el horno permitiendo que todo el baño del metal y de escoria sea trasvasado a la cuchara (Apraiz, 1969).

8ª Inspección del horno, acondicionamiento y reparación de la solera y de los refractarios si es necesario.

Empleo del oxígeno en los hornos eléctricos de arco:

- Inyección de oxígeno entre los trozos de chatarra en la primera parte del proceso antes de la fusión. Así se favorece la combustión de gases que se producen en la cámara del horno, se mejora el rendimiento térmico del proceso y se acelera la primera etapa de fusión de las cargas.
- Inyección de oxígeno en el baño fundido. Así, se acelera la oxidación de las impurezas, principalmente la eliminación del carbono y se reduce la duración del periodo oxidante (Apraiz, 1969).

2.7.2 Ejemplo de elaboración de acero inoxidable de bajo carbono

Los hornos de inducción son idóneos para este tipo de acero, siempre que la carga sea realizada a base de chatarra y componentes bajos en carbono. Ya que este elemento no puede ser eliminado fácilmente. Nosotros vamos a describir brevemente el proceso en el horno de arco.

Las condiciones previas son:

- Contenido en carga del cromo no mayor de 8-9%. Si el contenido es mayor, por un lado se oxidará el exceso del mismo, impidiendo la oxidación del carbono además de una pérdida de cromo innecesaria.
- El carbono de la carga no ha de ser mayor del 0.3%
- El horno debe estar limpio de contaminantes por lo que es bueno empezar la semana con esta colada después de haber reparado el horno.
- Los utensilios que se utilicen como rables, tubos, barras... son de ser de bajo contenido en carbono.

Vamos a describir paso a paso el proceso real de un acero inoxidable del tipo CF-3, con carbono inferior al 0.03%, en un horno de 4 toneladas, para una pieza de 2500kg incluyendo mazarotas, bebederos... La carga se compone de chatarra de acero CF-3, ferróníquel al 70% y bajo carbono, chatarra al carbono 0.5% de carbono, caliza y espato de flúor.

La carga se realiza en 2 partes:

Se carga y comienza la fusión con potencia media observando el descenso de los electrodos. A los 35 minutos vemos que se ha formado caldo, el amperaje se estabiliza en 3000-3500A y 210-220V.

A los 40 minutos se carga la segunda parte, incluyendo en esta etapa el níquel.

A los 75 minutos se termina la fusión de la segunda parte y se desescoria parcialmente, para eliminar el fosforo contenido en la escoria, añadiendo seguidamente la mitad del aluminio, siliciuro de calcio y ferrosilicio para formar la nueva escoria. Se comienza la inyección de oxígeno durante 12 minutos a razón de metro cubico por tonelada y minuto, es decir un total de 32 metros cúbicos, con un tubo de pulgadas y a una presión de 9 kg/cm².

La temperatura al inicio de la inyección de oxígeno es de 1580°C. Si fuera menor se calienta con electrodos hasta alcanzarla.

Se levantan los electrodos y se comienza la inyección de oxígeno. Según pasa el tiempo se nota un aumento de las llamas con un resplandor muy claro, esto indica que el carbono se está oxidando y la temperatura se va elevando.

Una vez terminada la inyección la composición es de 0.023% de carbono y 1860°C.

Este es el momento de actuar con rapidez. Se añaden al baño 70kg de chatarra CF-3, limpia para ir enfriando el baño, junto con la otra mitad de siliciuro de calcio y aluminio. Se sigue añadiendo al baño silicio-manganeso y ferrocromo afinado en varias partes, vigilando que se funde cada adición antes de añadir el siguiente, llegando al minuto 95 con una temperatura de 1640°C y las adiciones fundidas.

Se saca una muestra de rechupe y otra para análisis. Recibido el resultado de laboratorio añadimos lo necesario, esperamos que se funda y sacamos la escoria con un ligero volteo de del horno y con ayuda del rabie se termina de limpiar el horno, llegando a los 120min de proceso.

Se prepara la cuchara para la colada, teniendo una temperatura de 1610°C en el horno. Por la experiencia sabemos que perdida de temperatura habrá por absorción de calorías de la propia cuchara y por el tiempo transcurrido entre el vaciado del horno y la colada.

La cuchara es una buza de accionamiento manual. En l momento de la colada la temperatura medida es de 1580°C, que es lo que esperábamos, llenándose la pieza perfectamente, tiempo transcurrido 125 minutos.

La Tabla 16 contiene la composición de la carga:

Tabla 16: Composición de la carga en la elaboración de hacer inoxidable de bajo carbono.

Elemento	Cantidad
Chatarra de CF-3	900 kg
Ferroníquel al 35%	300 kg
Chatarra de acero al 0.5%	1050 kg
Caliza	100 kg
Espato de flúor	10 kg
Total metal	2250 kg
Total de fundentes	110 kg
Cromo en carga	170 kg (7.5%)
Carbono en carga	6.4 kg (0.3%)
Níquel en carga	175 kg (7.7%)

Las adiciones que se realizan se muestran en la Tabla 17.

bono.

Elemento	Cantidad
Níquel electrolítico	20 kg
Silicio de calcio	8 kg
Ferrosilicio especial	23 kg
Silico-manganeso especial	17 kg
Aluminio en granalla	8 kg
Total del metal	610 kg
Ferrocromo afinado con 0.02% C al 70%	470 kg

Siendo los resultados finales los mostrados en la Tabla 18.

2.7.3 Ejemplo de elaboración de acero hadfield (12–14 % C)

Este acero representa por si solo un tipo de acero, ya que siendo aleado, es diferente de cualquiera de ellos y el único cuyo aleante

principal es el manganeso y en tan alta proporción. Hay dos modalidades de este acero cuya única diferencia es el cromo, su elaboración sigue el siguiente procedimiento:

La primera condición es que la proporción manganeso carbono debe de ser 10:1, si la relación es algo mayor nos aseguraremos que todo el acero es austenítico en temperatura ambiente.

El revestimiento del horno debe de ser básico, y la arena del molde de olivino y nunca de arena silícica.

Comenzando con la carga de la cesta de chatarra, colocamos en el fondo la caliza y sobre ella la chatarra, dejando los pedazos más menudos en la parte superior para su pronta fusión.

Se puede componer la carga del horno con retornos de la propia fundición de acero al manganeso, pero esta práctica no es recomendable para un acero de calidad.

Siempre que se pueda reduciremos esta práctica y no pasaremos del 20% en la composición de la misma, descartándolo en las piezas de alta responsabilidad.

La composición de la carga se muestra en la Tabla 19:

Tabla 19: Composición de la carga en la elaboración de acero al manganeso Hadfield (12-14 %C).

Elemento	Cantidad
Sobranate de acero al carbono	1160 kg
Chatarra de acero al carbono	2160 kg
Caliza	100 kg
Total metal	3320 kg

La Tabla 20 muestra las adiciones en la elaboración:

Tabla 20: Adiciones en la elaboración del acero Hadfield (12-14% C).

Elemento	Cantidad
SiMn (65% Mn-19%Si)	120 kg
FeMn (75% Mn-75C)	550 kg
Total manganeso aportado	490 kg
Porcentaje de manganeso en peso	12.2%

Las adiciones se han escogido para que la relación C: Mn sea 1:11. Recordamos que la chatarra aporta al baño 0.5% de manganeso y 0.25% de carbono, por lo que los cálculos están destinados a obtener en la pieza un manganeso del 12-12.3%.

Se pone el horno en marcha a media potencia, cuando tengamos caldo, aumentamos la potencia sin sobrepasar 1520-1530°C. Una vez fundida la chatarra se añade más caliza y carburo de calcio y se inyecta oxígeno, hasta llegar a la temperatura señalada.

Se retira la escoria por basculación del horno con ayuda de los rabies, añadiendo a continuación las adiciones de SiMn y FeMn preparadas y mezcladas con calizas.

Debido a la cantidad de adiciones, estas deben hacerse en partes de unos 50kg aproximadamente cada 3 minutos para dar tiempo a su disolución, a la vez de controlar la temperatura del baño no descienda demasiado.

Se comprueba que las adiciones han sido disueltas y se saca una muestra de rechupe y otra para el análisis.

Si el resultado es correcto se cuela después de desescoriar y comprobar la temperatura (1480°C).

A pie de horno junto con la probeta de rechupe y análisis se ha sacado otra probeta que se enfría rápidamente en agua, y se dobla hasta 180°C (no debe romperse ni agrietarse) y se le aplica un imán, el cual no atraerá al acero, demostración de que es austenítico y de buena calidad (Yarza y Ibarra, 2008).

2.7.4 Ejemplo de elaboración de acero aleado

El proceso para la obtención de acero aleado en horno de arco es muy similar al de los aceros al carbono, así por ejemplo vamos a realizar un acero aleado del tipo: GS- 25CrMo4 cuya composición nominal esta en la Tabla 21.

Tabla 21: Composición nominal de acero 25CrMo4.

Elemento	Porcentaje en peso
Mn	0.5 - 0.8
C	0.22 - 0.25
Si	0.3 - 0.5
Cr	0.8 - 1.5
Mo	0.2 - 0.3
P	<0.03
Si	<0.03

Partiremos de chatarra de acero al carbono, el poco cromo que pueda tener esta se oxidará durante la fusión, en un porcentaje alto, sin embargo el molibdeno no sufrirá apenas variación.

El carbono debemos incrementarlo hasta el 0.50%, favoreciendo la formación de CO, al inyectar el oxígeno, con lo que el baño se verá agitado y la temperatura subirá ayudando en la fusión de la chatarra y favoreciendo la eliminación de las inclusiones.

Así pues añadimos el equivalente al 0.20% de carbono en la adición de grafito en la carga.

El molibdeno también se añade a la carga, pero siempre en el rango inferior de la norma, para determinar su ajuste tras el análisis de laboratorio.

Una vez fundida toda la carga, añadimos más caliza para completar la formación de la escoria. Si la escoria resulta muy viscosa se añade espato de flúor. A continuación se inyecta el oxígeno hasta temperaturas de 1630-1640°C. Se elimina la escoria del baño y añadimos según la Tabla 22:

Tabla 22: Adiciones en la elaboración de acero aleado.

Elemento	Cantidad
SiMn (65%Si – 19% Mn)	16 kg
FeSi (75% Si)	20 kg
FeMn (75%Mn-7%C)	10 kg
FeCr (62% de Cr)	54 kg

Estas adiciones se hacen lo más rápido que se pueda, mezcladas con caliza carburocálcico en varias partes hasta su total disolución en el baño, que se debe de verificar agitándolo con el rabie.

Se vuelve a añadir carburo cálcico y después de homogeneizar el baño, se saca la muestra de rechupe y de análisis, midiendo la temperatura.

Si es correcta, alrededor de 1600°C se rectifica la composición del baño si es necesario, se elimina la escoria y se dispone la colada.

En cuchara antes de la colada se añade granalla de aluminio. El resultado final del baño en porcentaje en peso está en la Tabla 23.

Tabla 23: Composición final del baño en peso.

Elemento	Porcentaje en peso
Ni	0.13
Cu	0.19
C	0.227
Si	0.32
Mn	0.68
Cr	1.05
Mo	0.24
P	0.021

Con procesos similares a los descritos podemos obtener cualquier tipo de acero que normalmente es fundido para obtener piezas de acero moldeado (Yarza y Ibarra, 2008).

5 CONCLUSIONES

La empresa ACEROS DEL PERÚ SAC. Es una fundición que produce piezas de acero moldeado, mediante el moldeo en arena aglomerada por procedimientos químicos y utilizando hornos de fusión eléctricos de inducción.

ACEROS DEL PERÚ SAC no tiene una cartera de productos establecida, sino que trabaja bajo pedido, dedicándose principalmente a los sectores de matricería, generación de energía, construcción naval y turbinas.

Los aceros se fabrican en base a las diferentes normas internacionales (UNE; DIN, ASTM, BS, AFNOR, EN), realizando diversos tipos de acero, como por ejemplo, aceros dúplex, súper dúplex, refractarios, altamente aleados...

El proceso productivo se divide en las siguientes etapas:

1. Diseño y preparación de los moldes ajustándose a los requerimientos del cliente.
2. Fusión de chatarra de acero en horno de inducción de recubrimiento básico, con adición de elementos de aleación y ferroaleaciones para la desoxidación.
3. Colada en cuchara de recubrimiento básico con vaciado por el fondo con buza de vástago.
4. Realización del moldeo con modelos de madera ó de poliestireno, denominándose los proceso respectivamente:
 - Proceso tradicional
 - Proceso a la espuma perdidaSe utiliza para el moldeo arenas de sílice y cromita, junto con resinas para la compactación de la arena, lo que se denomina modelo químico.
5. Desmoldeo y extracción de las piezas.
6. Acabados de desmazararotado, desbarbado y granallado. También se realizan los tratamientos térmicos de normalizado, temple, recocido y revenido además de los mecanizados requeridos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- ALDASORO, V.; IBARRA, M. 2008. Fundición de aceros moldeados. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
- ÁLVAREZ, E. 2011. Acero GX4CrNiMo16-5-1: Influencia de la composición química y del porcentaje de retorno en las propiedades mecánicas. A. Ayerbe de Aragón Aguilera (dir.). Proyecto fin de carrera, Universidad de Cantabria.
- APRAIZ, J. 1984. Fabricación de hierro, acero y fundiciones. Bilbao: Urmo, D. L.
- APRAIZ, J. 2002. Tratamientos térmicos de los aceros. 10ª ed. Madrid: CIE Inversiones Editoriales Dossat.
- ENRÍQUEZ, J. L.; TREMPES, E. 2009a [en línea]. Monografías sobre tecnologías sobre el acero. Parte I: Acería eléctrica. Universidad politécnica de Madrid. [Consulta: 7 de mayo de 2012]. Disponible en http://oa.upm.es/1929/1/Aceria_electrica_MONO_2009.pdf
- ENRÍQUEZ, J. L.; TREMPES, E. 2009b [en línea]. Monografías sobre tecnologías sobre el acero. Parte II: Colada del acero. Madrid: Universidad politécnica de Madrid. [Consulta: 5 de abril de 2012]. Disponible en http://oa.upm.es/1669/1/MONO_TREMPES_2009_01.pdf
- ENRÍQUEZ, J. L.; TREMPES, E. 2007 [en línea]. Monografías sobre tecnologías sobre el acero. Parte II: Metalurgia secundaria. Madrid: Universidad politécnica de Madrid. [Consulta: 21 de abril de 2012]. Disponible en http://oa.upm.es/1000/1/Berciano_Trempe_01.pdf
- FERNÁNDEZ, J.; LASHERAS, J.M. 1991. Ciencia de materiales. San Sebastián: Editorial Donostiarra, S.A.
- GONZÁLEZ, D. 2010. Influencia de la composición química en la resistencia del acero GX4CrNi13/4. A. Ayerbe de Aragón Aguilera (dir.). Proyecto fin de carrera, Universidad de Cantabria.
- MARTÍNEZ, I. 2011. Influencia de la composición química en las propiedades mecánicas del acero G20Mn5. A. Ayerbe de Aragón Aguilera (dir.). Proyecto fin de carrera, Universidad de Cantabria.
- ROESH, K.; ZIMMERMANN, K. 1969. Acero moldeado. Madrid: Editecna.

- VOSKOBONIKOV, V.G.; KUDRIN V.A; YÁKUSHEV, A.M. 1982. Metalurgia general. Moscú: Mir.