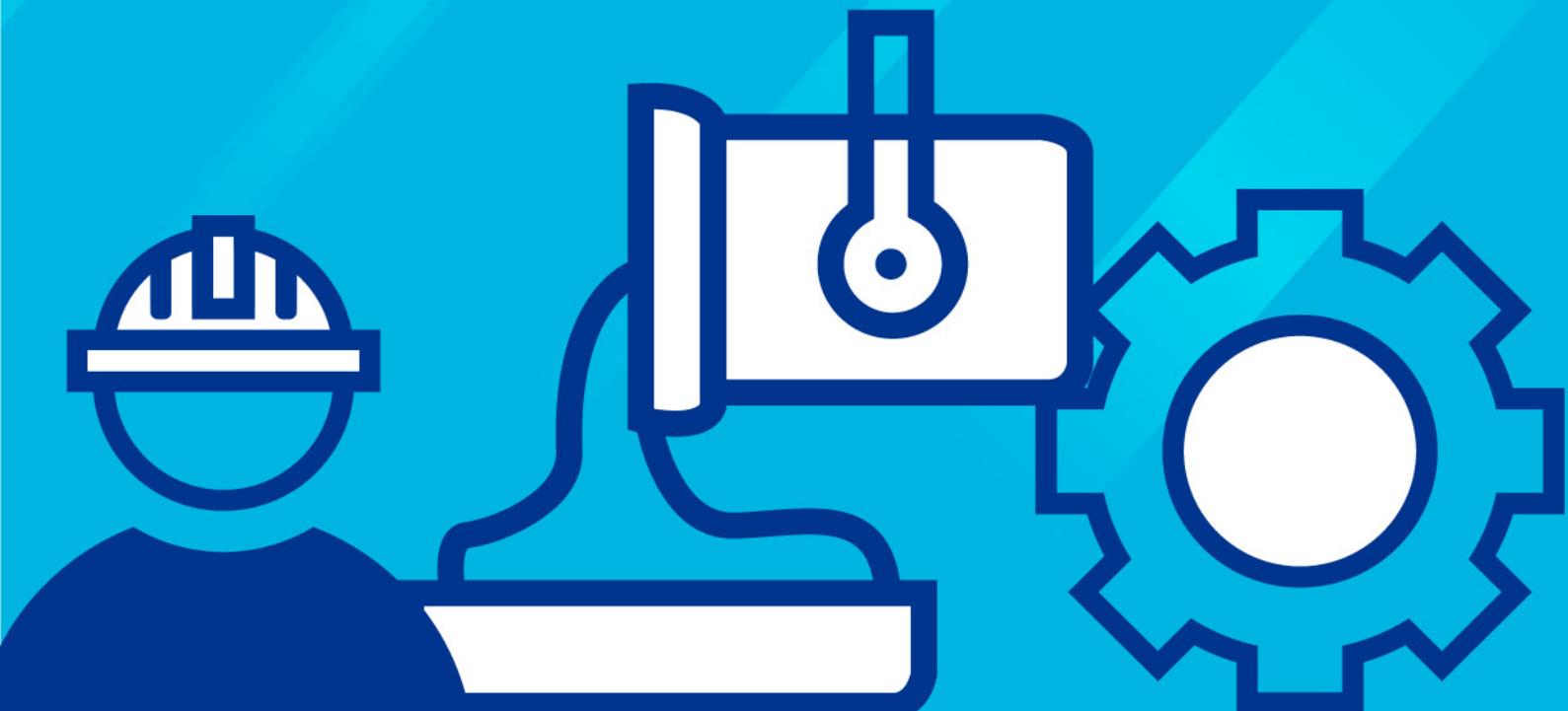




GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS DE FUNDICIÓN GRIS Y NODULAR EN LA INDUSTRIA

APORTES DE PRÁCTICAS TECNOLÓGICAS PARA LA EFICIENCIA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE PIEZAS FUNDIDAS.



Instituto
Nacional
de Tecnología
Industrial

INTI



Ministerio de
Desarrollo Productivo
Argentina

Colaboradores

Mgter. Cordero Mariano, Mgter. Gaspoz Melina, Ing. Grosso Hugo*,
Ing. Magliaro Leonardo*, Mgter. Ordano César, Ing. Rubino Guillermo,
Lic. Rizzotto Mauricio*, Ing. Zimmermann Alan, Ing. Martinez Kraemer Daniel,
Lic. Ciotti Nicolás, Tec. Vittori Sebastián.

Mención especial

Ing. Rizzo Norberto, Experto Internacional en Procesos de Fundición.

*Experto del sector empresarial

Borgiattino, Hernán Luis

Guía de buenas prácticas para la estandarización de procesos de fundición gris y nodular en la industria : aportes de prácticas tecnológicas para la eficiencia del proceso productivo de piezas fundidas / Hernán Luis Borgiattino. - 1a ed. - San Martín : Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-532-497-2

1. Fundición en Metales. 2. Industria Metalúrgica. 3. Metalurgia. I. Título.
CDD 669.028

PRÓLOGO



Llegar a la instancia de pensar en la formulación de una Guía de Buenas Prácticas conlleva, planificación, análisis, investigación, por lo tanto hablamos de tiempo, dedicación, responsabilidad y compromiso.

Cuando se comienza un proceso de desarrollo de una guía es porque se está dispuesto a abrir un abanico de posibilidades que incluye nuevas experiencias, aprovechar las herramientas teórico prácticas adquiridas durante la formación y aprendizaje en la industria del sector y fusionarlas con herramientas y conocimientos que van surgiendo a través del intercambio con colegas, empresarios, entidades intermediarias, organismos del estado, etc.

El intercambio que se generó durante la redacción de esta guía, permitió analizar el proceso productivo en relación a los recursos óptimos a utilizar tales como la maquinaria, instalaciones, materiales, capital de trabajo necesario, etc. minimizando los posibles errores que pudiesen perjudicar los resultados de la aplicación de esta guía, enfocados en la estandarización de los procesos productivos para la obtención de una pieza de fundición.

Como cierre, hago una mención especial a la enorme satisfacción personal que me ha generado la elaboración de esta guía.

Lic. Hernán Borgiattino

INTRODUCCIÓN



Según estimaciones realizadas por el INTI, el sector de Fundición en Argentina cuenta en el 2019 con aproximadamente 350 empresas fundidoras y representa en el orden de 10% del valor bruto de producción del sector metalúrgico.

El sector Fundición sostiene aproximadamente 7000 puestos de trabajo y produce alrededor de 300.000 toneladas de diversos productos de fundición: con grafito laminar (gris), nodular, acero y aluminio, entre otras. Esta producción se orienta a proveer mayormente a los sectores Automotriz y Maquinaria Agrícola de orden nacional.

En estudios recientes realizados sobre el sector mencionado¹, se pone de manifiesto que una de las principales debilidades de las empresas que lo integran es la falta de estandarización de sus procesos. Existe mucho conocimiento en los trabajadores y empresarios del rubro, que se ha ido construyendo con los años, y que les ha permitido permanecer produciendo y vendiendo en un espacio con importantes fallas de mercado y relevantes limitaciones en la formalización de las relaciones cliente-proveedor.

Este conocimiento que desarrollaron las empresas no suele estar formal y sistemáticamente establecido en documentos, procedimientos, instructivos, especificaciones técnicas que establezcan la forma de llevar adelante y controlar la producción, a fin de garantizar productos de calidad homogénea, al tiempo que aporten datos que permitan mejorar continuamente los procesos sobre una base técnica sólida.

Dicho de otra forma, el conocimiento construido por la experiencia fue y es central para la permanencia en el mercado, pero resulta insuficiente para desarrollarse y mejorar con miras a la inserción en mercados más exigentes, sean los actuales que están en permanente evolución, u otros futuros a incursionar.

En general, las empresas de este sector presentan dificultades de competitividad respecto de pares de otros países debido a que, a excepción de casos particulares, no logran contar con costos de producción suficientemente bajos, que hoy se requieren en el marco de la competencia global. De igual modo, la insuficiente o inexacta determinación de los requisitos de calidad del producto pactada entre cliente y proveedor no condiciona favorablemente al fabricante para la inclusión de nuevas tecnologías de producción y control en el proceso.

Haciendo foco en los factores intra-empresariales o “micro” (con independencia del contexto macro que es también muy relevante para el sector), los bajos niveles de estan-

¹ Relevamientos realizados en 2017, 2018 y 2019 por el grupo de trabajo del Observatorio del Sector Fundición de INTI. Estudio Sectorial ADIMRA.

darización que afectan a la calidad final de sus productos y las reducidas escalas de producción, son dos de los elementos centrales que deberían abordarse para mejorar su desempeño respecto de sus principales competidores.

A partir de esta situación, y con el objetivo de abordar dicha problemática, desde el INTI surge la iniciativa de desarrollar la presente Guía con el objetivo de orientar en estas temáticas tanto a las empresas del sector, que fabrican en su mayor parte piezas de fundición gris o nodular, como así también a sus clientes.

Con la finalidad de situar al lector convenientemente, se ha diagramado la presente guía siguiendo los pasos del proceso productivo, incorporando conceptos fundamentales y herramientas de aplicación para cada una de las etapas del proceso de fundición. En su contenido, se desarrollan teórica y prácticamente los principales controles y pruebas a realizar sobre el proceso productivo para obtener productos homogéneos y de la calidad requerida. Se presentan tecnologías y técnicas generales de amplia aplicación al sector, pero que deberán ser adaptados a las posibilidades de cada empresa, con flexibilidad, pero sin laxitud respecto de los condicionantes o requisitos indicados.

Como elementos centrales incluye la descripción de tres ejes: 1) la fase de diseño y desarrollo del modelo, 2) la etapa de moldeo y, 3) el conocimiento y mejora de la calidad metalúrgica del líquido.

Además, resulta importante resaltar la relevancia de contar con los requisitos técnicos del producto a elaborar solicitados por el cliente, y por ello se hará referencia a los mismos, por ser la fuente de información indispensable para orientar la producción y obtener piezas /productos satisfactorios.

Además, en cada uno de los capítulos y se considere oportuno, se indicarán las normas de referencia que aplican para la temática descrita. Se referenciará principalmente la serie de la norma IRAM a modo ejemplificador, aunque existan otras series también aplicables a los mismos tópicos. En el caso de no contar con norma IRAM aplicable se mencionarán series extranjeras (ASTM, SAE, UNE, etc.).

Objetivo

El principal objetivo de este documento es brindar una herramienta de consulta que permita orientar a las empresas de fundición en el proceso de obtención de una pieza o producto, de acuerdo a estándares de calidad requeridos por sus clientes.

Asimismo, con su enfoque general intenta ser útil para la implementación de aspectos técnicos que permitan aumentar la eficiencia global de la producción de la empresa.

Los conocimientos que aquí se describen en el marco de prácticas tecnológicas a aplicar, no reemplazan los saberes ni la experiencia acumulada en el piso de planta. Intenta posicionarse como un complemento confiable, basado en conocimientos teóricos y prácticos aplicados que logran resultados, y que han sido validados en su implementación por quienes participaron en la elaboración del presente documento.

otros elementos que también son fundamentales para la competitividad y la eficiencia global de la empresa (comercialización, finanzas, RRHH, etc.), y que deben igualmente ser atendidos para lograr resultados significativos y sostenibles en el tiempo. Solo se abordarán elementos para la producción en sí, que son muy relevantes, pero no suficientes para trabajar hacia la mejora de la competitividad empresarial dentro del sector.

De igual modo, deseamos dejar en claro que la aplicación de las herramientas y conocimientos aquí descritos deben considerarse en el contexto de un sistema de gestión de la calidad que ordena el funcionamiento global de la organización. Dicho de otro modo, la producción como así también las otras áreas que componen una empresa deben trabajar sincronizadamente con miras a satisfacer los requisitos de clientes, razón por la cual el sistema de calidad engloba su funcionamiento y da sentido al trabajo cotidiano y articulado entre ellas, hacia la mejora permanente.

Alcance

Se desarrollan en este documento aspectos técnicos relacionados al proceso de diseño de piezas, sistema de alimentación y calidad metalúrgica del líquido, particularmente útil, aplicable y orientado a procesos de fundición gris y nodular. Si bien algunas de las prácticas son aplicables a fundición de aluminio, en esta guía no se abordará la especificidad de su aplicación a dicho material.

A continuación, se presenta algunas normas de referencias (a modo de ejemplo, no excluyentes de otras normas aplicables) que dan cuenta de las características a cumplir para los distintos tipos de aleaciones:

Normas aplicables para piezas de fundición gris, nodular y aluminio

- IRAM 629 - Gris Laminar
- IRAM 750 - Nodular
- SAE J 431 - Automotive Gray Iron Castings.
- SAE J 434 - Automotive Ductile (Nodular) Iron Castings.
- ASTM A 247 - Método de prueba estándar para evaluar la microestructura del grafito en fundiciones de hierro.

La presente guía se orienta a la gestión y control de los procesos tomando como referencia los requerimientos de los clientes y las normativas vigentes aplicables, a fin de permitir la trazabilidad de los productos.

Las prácticas incluidas no representan inversiones ajenas a las típicas de la producción en todo el país. Cuando las acciones a desarrollar requieren de equipos muy costosos, se pueden derivar a terceros para su realización. De igual forma, la implementación de los cambios que puedan surgir de la lectura de la presente guía debe contrapesarse con las inversiones y por otro lado, con los requisitos que el cliente establezca.

Vale mencionar que la inexistencia de estos requisitos en forma explícita, no deber representar una excusa para desconocer la necesidad de implementar las tecnologías, controles y prácticas que permiten una mejor fabricación, con menos defectos, menos scrap y una mayor rentabilidad y eficiencia.

A partir de esto, y de la generalidad con la que fue pensada y elaborada la presente guía, resulta de aplicación a todas las empresas sin importar su tamaño, capacidad productiva, ubicación territorial, antigüedad en el rubro, dimensiones de las piezas, sistemas de producción, tipo de clientes, etc. Queda en el conocimiento construido y la intensión de cada empresa su valoración para la mejora y la adaptación a su propia realidad.

ÍNDICE



1	DESARROLLO	8
	1.1 Aspectos generales de control de la producción y la trazabilidad en el proceso	9
	1.1.1 Elementos documentales para lograr la trazabilidad en el proceso	10
	1.1.2 Control de producción: Métodos de inspección	12
	1.2 Generación del modelo o matriz	13
	1.2.1 Diseño del modelo o matriz	15
	1.3 Cálculo del sistema de alimentación	20
	1.4 Simulación Computacional	22
	1.5 Moldeo	25
	1.5.1.1 Propiedades de las arenas de moldeo	26
	1.5.1.2 Granulometría de las arenas de moldeo	27
	1.5.1.3 Componentes de las arenas de moldeo verde	28
	1.5.1.4 Preparación de las arenas de moldeo	29
	1.6 Colado del metal líquido	32
	1.6.1 Ensayos a realizar para control de proceso	33
	1.6.1.1 Espiral de colabilidad	34
	1.6.1.2 Cuña de temple	36
	1.6.1.3 Carbono equivalente	37
	1.6.1.4 Análisis químico	39
	1.6.1.5 Análisis metalográfico	39
	1.7 Defectos comunes en la generación del producto	40
	1.8 Postproceso	45
	1.8.1 Desmolde	45
	1.8.2 Granallado y Rebabado	45
	1.8.3 Tratamientos térmicos	45
	1.8.4 Controles a realizar en el producto	46
	1.8.4.1 Ensayo de tracción	46
	1.8.4.2 Ensayo no destructivo	46
	1.8.4.2.1 Visual	47
	1.8.4.2.2 Dureza	47
	1.8.4.2.3 Dimensionalidad	47
	1.8.4.2.4 Radiografía	48
	1.8.4.2.5 Tomografía computarizada de alta resolución	48

1.8.4.2.6 Ultrasonido	48
1.8.4.2.7 Tintas ultrapenetrantes	49
1.9 Expendio de producto final	49

2

ANEXOS	50
2.1 Control de producción y proceso	50
2.1.1 Registro de colada	50
2.1.2 Registro de modelo/placa/matriz	50
2.2 Diseño de un modelo a partir del cad de producción	53
2.3 Cálculo del sistema de alimentación	59
2.4 Cálculo simplificado de defectos y causales	63

1 DESARROLLO

Para un ordenamiento conceptual, la presente Guía toma como referencia el esquema básico del Gráfico N°1, que permite identificar los ejes fundamentales al momento de fabricar un producto que cumpla con los requisitos del cliente.

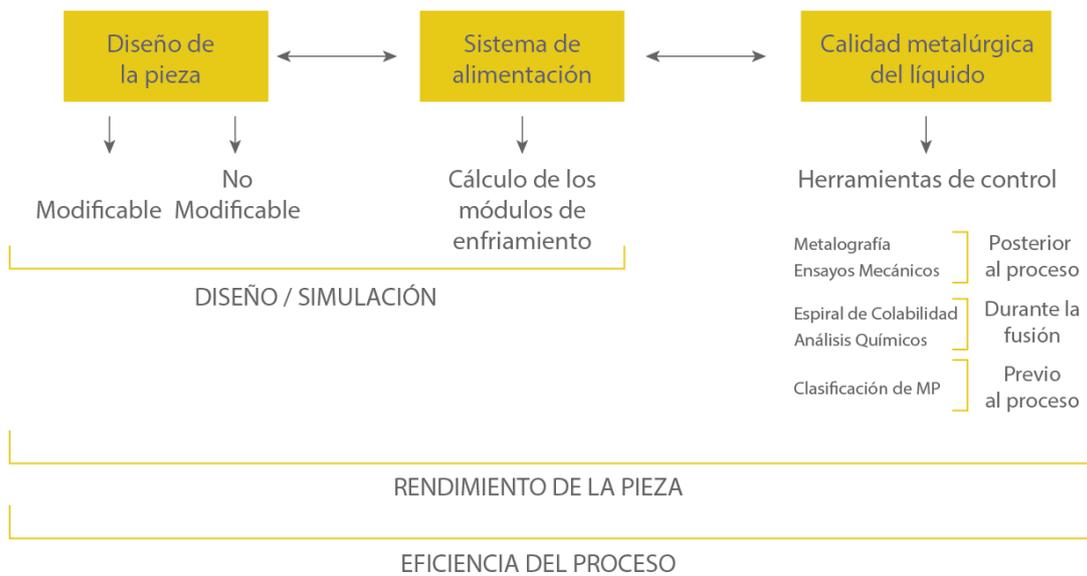


Gráfico N° 1: Esquema básico del proceso de fundición. Norberto Rizzo²

Se denominan ejes fundamentales al Diseño de la pieza, al Sistema de alimentación y a la Calidad metalúrgica del líquido, porque de estos depende que la pieza cumpla con las especificaciones técnicas solicitadas.

El diseño de la pieza, si bien en la mayoría de los casos no se puede modificar o resulta dificultoso, en muchos casos se puede compensar interviniendo en el diseño y cálculo del sistema de alimentación y en las características del metal líquido.

Cada pieza que se produce debe contar con un sistema de alimentación propio que además se ajuste al tipo de material requerido. Dicho de otra manera, para cada pieza se tiene un sistema de alimentación y un metal líquido que permite la obtención de la misma sin defectos.

En esta guía se detallarán las características principales del proceso productivo, como así también los controles que se deben realizar durante el mismo. Los ejes antes mencionados se despliegan en diferentes etapas del proceso, y son el foco de atención para el logro de los mejores resultados en la fundición.

² Fuente: "El Fundidor N° 125". Mayo/junio de 2008. Buenos Aires, Argentina. - www.fundidores.org.ar/sites/default/files/tecnico0005.pdf

1.1 Aspectos generales del control de la producción y la trazabilidad en el proceso

El proceso productivo para la obtención de una pieza de fundición consta de una serie de operaciones que suceden de una manera “dinámica, planeada y consecutiva”. Lo dinámico aparece por la variable temperatura y el correspondiente enfriamiento, que condiciona buena parte de la satisfacción de los requisitos a cumplir. Es una de las variables de mayor relevancia en todo el proceso productivo. Es planeado, porque requiere utillajes y herramientas adecuadas provistas y dispuestas con antelación, y no puede ser ejecutado con cambios sobre la marcha para corregir errores o desviar procesos fisicoquímicos mientras transcurren, ya que los resultados serán imprevisibles. Y consecutivo, porque se realizan por pasos que necesariamente están relacionados entre sí por tiempos y condicionantes técnicos específicos que se piensan y diseñan como un proceso, como un “todo”.

Este proceso requiere de contar con las especificaciones o requisitos por parte del cliente para orientar el desarrollo de la producción hacia la satisfacción de los mismos: Además, se necesitan recursos que deben estar previamente determinados y disponibles para las distintas etapas del proceso. Lo descrito hasta aquí puede verse reflejado en el siguiente gráfico.

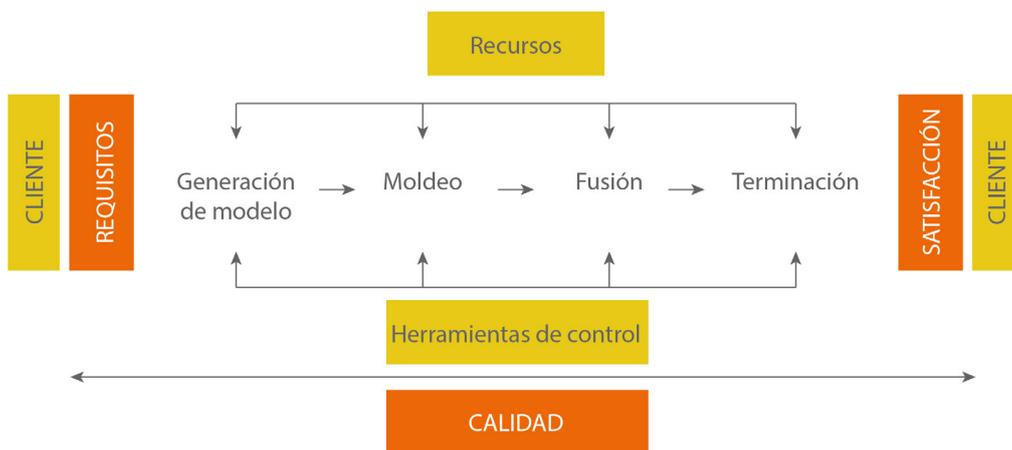


Gráfico N° 2: Diagrama de procesos de fundición. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse el control de la producción a través de la aplicación de herramientas específicas se debe desplegar sobre todo el proceso para garantizar el cumplimiento de los parámetros establecidos para cada una de las fases o etapas. De igual modo y con miras a satisfacer o garantizar el cumplimiento de los requisitos solicitados

del cliente durante todo el proceso se establecen instrumentos de gestión para contar con trazabilidad respecto del proceso y producto obtenido.

En esta guía no se hace especial hincapié en los instrumentos de los sistemas de gestión, sino en los elementos particulares de control y gestión de la producción en procesos de fundición. Por tal motivo, no se profundiza sobre los aspectos generales de un sistema de calidad a implementar, aunque tienen la misma relevancia que lo aquí incluido, al momento de contar con una metodología que garantice la calidad y el cumplimiento de los requisitos de los clientes.

En los párrafos siguientes indicamos los elementos relacionados con la trazabilidad indicada y con las herramientas de control de la producción aplicables.

1.1.1 Elementos documentales para lograr la trazabilidad en el proceso

La empresa debe garantizar que el producto cumpla con los requisitos especificados por el cliente realizando los controles adecuados a través de todo el proceso productivo. Entre otras medidas, es necesario entonces generar y tomar registros en cada una de las etapas del proceso, lo que permite construir la trazabilidad del mismo, y con ello obtener información necesaria para la toma de decisiones basada en datos relevados concretos.

Además, al relevar esta información de proceso, permite sistematizarlo (repetirlo de igual forma y documentarlo adecuadamente) y con ello, sentar las bases para la implementación de mejoras con datos reales y concretos, lo que aumenta la probabilidad de garantizar la calidad requerida por el cliente.

Por otro lado, ante una queja o devolución de un producto por parte de un cliente, la trazabilidad permite la reconstrucción del proceso productivo para, a través del análisis de los correspondientes registros, establecer los factores que pudieron originar el defecto que lo hizo insatisfactorio. Por esta razón la trazabilidad debe estar garantizada (y para ello planificada) a lo largo de todo el proceso productivo.

La información mínima que debería generarse y estar disponible para garantizar la trazabilidad en el proceso productivo consta de:

- **Registro de recepción de materias primas:** se debe registrar el tipo y cantidad de material recibido, proveedor, orden de compra que satisface el material recibido, fecha, controles a realizar, etc.

- **Registro de modelos:** permite llevar un registro de cada una de las placas/modelos con los que cuenta la empresa. Se detalla su código (identificación unívoca representativa), las características de moldeo, si tiene caja de noyos asociada y la posibilidad de anotar observaciones cuando fuera necesario realizarle mantenimiento o ajustes.
- **Parte de producción:** información sobre las piezas a producir y el detalle de los medios para ejecutarlos, incluyendo todos los elementos críticos necesarios. Ejemplo: en qué máquina o línea, a qué hora, con qué material, qué operario, con que controles de producto y de parámetros del proceso (incluyendo la identificación de los elementos de control utilizados), con que piezas, los lotes generados, y su vinculación con el resto de la información.
- **Registros de colada:** debe contar con los datos obtenidos al momento del llenado del molde o matriz y su post-proceso (datos de moldeo, de fusión, de noyos, granallado, etc.).
- **Registros de Anomalías e imprevistos:** se anotan los detalles de un incidente/falla (interrupción no planificada) que ocurrió durante el proceso, donde se documenta el origen del mismo y el plan de acción que se aplica para resolver el inconveniente y prevenir su reaparición.
- **Registro de No Conformidades:** se registran las no conformidades de un producto y cualquier otra anomalía dentro del proceso productivo. Las no conformidades son desvíos respecto de los requisitos establecidos que son chequeados en diferentes etapas del proceso sobre variables del mismo, de la materia prima en proceso o del producto terminado.

En el anexo 2.1 se presentan modelos ejemplificadores de formularios o documentos donde se pueda registrar la información indicada. Han sido presentados a modo de ilustrativo (puede haber más o menos instrumentos, o estos mismos modificados), y cada empresa los debe adaptar para su implementación.

Los documentos y registros anteriormente indicados son propios de la implementación de un sistema de gestión de calidad. Los mismos se ponen en funcionamiento para diversos fines vinculados a alcanzar la garantía de calidad, satisfacción del cliente y otros elementos, además de la trazabilidad de producto. Los sistemas de gestión pueden estar referenciados a normativas del tipo ISO 9001 por ejemplo, u otras de aplicación exclusiva para el sector o clientes específicos que lo demanden.

1.1.2 Control de la producción: Métodos de inspección

El proceso productivo para la obtención de una pieza de fundición consta de una serie de operaciones que suceden de una manera “dinámica, planeada y consecutiva”. Lo dinámico aparece por la variable temperatura y el correspondiente enfriamiento, que condiciona buena parte de la satisfacción de los requisitos a cumplir. Es una de las variables de mayor relevancia en todo el proceso productivo. Es planeado, porque requiere utillajes y herramientas adecuadas provistas y dispuestas con antelación, y no puede ser ejecutado con cambios sobre la marcha para corregir errores o desviar procesos fisicoquímicos mientras transcurren, ya que los resultados serán imprevisibles. Y consecutivo, porque se realizan por pasos que necesariamente están relacionados entre sí por tiempos y condicionantes técnicos específicos que se piensan y diseñan como un proceso, como un “todo”.

Este proceso requiere de contar con las especificaciones o requisitos por parte del cliente para orientar el desarrollo de la producción hacia la satisfacción de los mismos: Además, se necesitan recursos que deben estar previamente determinados y disponibles para las distintas etapas del proceso. Lo descrito hasta aquí puede verse reflejado en el siguiente gráfico.

Además de la gestión de la información indicada en el apartado anterior, resulta indispensable la realización de inspecciones y/o ensayos para caracterizar y definir el cumplimiento de parámetros establecidos como estándares durante el proceso de fundición, sobre el material en curso y el producto terminado.

Algunos de los métodos de inspección son los siguientes:

- 1) Inspección visual para detectar defectos evidentes como llenado incompleto, cortes fríos y grietas severas en la superficie;
- 2) Controles dimensionales: medición de las piezas con instrumentos calibrados para asegurar que se encuentran dentro de las tolerancias admitidas según requisitos;
- 3) Pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y otras, relacionadas con la calidad del metal fundido y diferentes insumos y utillajes necesarios para la producción;

4) Métodos no destructivos: radiografía, tomografía, pruebas de partículas magnéticas, uso de líquidos penetrantes fluorescentes y pruebas con ultrasonido, para detectar defectos superficiales o internos en la fundición;

5) Ensayos mecánicos para determinar propiedades, tales como la resistencia a la tensión y dureza.

En cada etapa del proceso, se aplican diferentes inspecciones y/o ensayos. En el desarrollo de la guía se indicarán cuales se implementan en cada fase y la utilidad que se busca con la información obtenida.

1.2 Generación del modelo o matriz

El correcto diseño del modelo o matriz resulta fundamental, debido a que los errores que se generen en esta fase no son factibles de corregir en las etapas posteriores del proceso de fabricación. Como las definiciones que se tomen son responsabilidad de la empresa, se considera que su diseño es uno de los ejes indispensables para trabajar y avanzar en una correcta planificación del proceso productivo. (ver gráfico N° 1 Pag N°8).

En la práctica, nos encontramos con muchos casos en los que la solicitud de fabricación de una pieza se realiza de manera informal y sin especificaciones suficientes que permitan conocer con exactitud los requisitos técnicos a satisfacer por el producto final. En dicho marco, resulta una práctica común contar con una pieza o producto considerado “referencia”, sin tener explicitación de tolerancias dimensionales, estructuras metalográficas condicionantes, composiciones químicas adecuadas, etc.

Si bien reconocer y contar con todos estos requisitos del producto final puede parecer un problema al principio, tener una etapa previa a la producción de descripción y clarificación de los mismos en acuerdo con el solicitante es necesario e imprescindible. De lo contrario, no se contará con los parámetros y estándares contra los cuales comparar los valores hallados en las pruebas y chequeos que se realizarán para definir la conformidad del producto, y con ello, la satisfacción técnica³ del cliente.

En el caso de recibir una pieza sin su plano, es importante generarlo con todas sus especificaciones técnicas, pautadas previamente con el cliente. La información mínima con la que debe contar el plano (que puede tener adjunta una planilla u hoja descriptiva) es la siguiente:

³ Hablamos de satisfacción técnica debido a que existen requisitos a cumplir de otra naturaleza como plazos de entrega, logística, etc. que también deben ser atendidos.

- Cotas y tolerancias correspondientes
- Código del producto
- Normas de referencia
- Material constitutivo
- Composición química y metalográfica esperada (zonas específicas a controlar)
- Dureza (zonas y escalas de medida)
- Sectores donde se realizará acabado superficial
- Especificar datos sobre procesos especiales de post proceso (distensionado, temple, bonificado, etc)

La información detallada se considera como la mínima, aunque puede haber información adicional de acuerdo a cuestiones técnicas a cumplir o comerciales relacionadas con cantidades, tiempos, modalidades de transporte, etc.

A continuación, profundizamos sobre algunos de los elementos indicados más arriba:

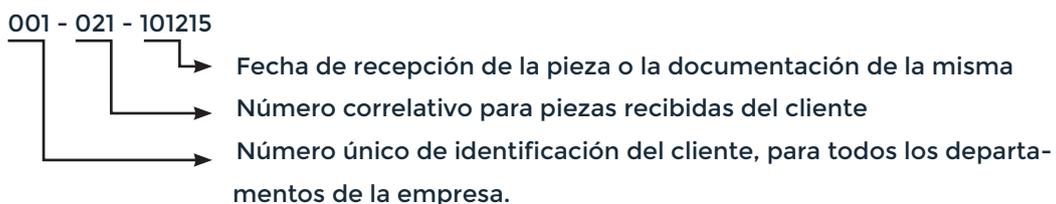
• Código o identificación del producto:

La identificación del producto se realiza mediante la asignación de un código que está compuesto por un conjunto de elementos que se combinan siguiendo ciertas reglas y que son semánticamente interpretables. Por ejemplo, dentro del código puede haber información respecto del cliente, el tipo de pieza, la versión cronológica de la misma, herramental asociado, etc. Para poder entonces codificar cada producto recibido, deben estar establecidas previamente las reglas para su conformación, teniendo en cuenta la información que desea incluirse.

Las características que debe cumplir una codificación son dos:

- Único para cada producto, y siguiendo ciertas reglas, similar para distintas versiones del mismo.
- Su conformación debe seguir siempre las reglas preestablecidas para que según dicha lógica se pueda identificar, rastrear, archivar, etc.

Un ejemplo de identificación de producto a través de un código puede ser el siguiente:



• Normas de referencia:

Las normas son documentos técnicos elaborados por organizaciones reconocidas, que surgen del debate entre grupos de expertos de las temáticas que tratan. Constituyen la mejor referencia general que puede tener la empresa para guiar su funcionamiento en los diferentes aspectos que hacen al proceso productivo, al producto en cuestión y particularmente también en los ensayos e inspecciones que se realizan.

Las normas se deben adquirir de los organismos que las generan, tales como IRAM, UNE, ASTM, entre otras, y si bien tienen un costo (normalmente muy accesible), la implementación de cambios y mejoras que derivan de su utilización, generan normalmente importantes retornos (organizacionales, tecnológicos, intangibles, etc.) que hacen que dicha inversión se torne prácticamente insignificante comparado con el beneficio. Desde el INTI recomendamos una amplia utilización de estas herramientas técnicas.

1.2.1 Diseño de modelo o matriz

Vinculado con los requisitos técnicos que se deben tener en cuenta, para el diseño del modelo o matriz de las piezas de fundición se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Ángulos de salida.
- Contracción del material.
- Sobrematerial.
- Partición del modelo.

1. Ángulos de salida.

Una vez realizado el proceso de moldeo, el modelo debe poder retirarse fácilmente durante el desmolde sin quedar sujetado y sin romper partes de la cavidad que ocupaba. Estas consideraciones se aplican también para la extracción de una pieza cuando se utilizan matrices. Para ello se debe establecer en el diseño del modelo o matriz los ángulos de salida convenientes que se detallan en el anexo 2.2 Paso N°2.

2. Contracción del material.

Para el correcto diseño de un molde o matriz para fundición, es muy importante comprender el fenómeno de la contracción que se genera desde que el metal se encuentra en estado líquido hasta que se obtiene la pieza final.

Se diferencian tres fases distintas en este proceso:

- **Contracción líquida:** el metal en estado líquido se contrae en volumen desde la temperatura que tiene en el horno hasta la que tiene cuando comienza la solidificación. Esta contracción afecta al diseño del molde o matriz, y su valor depende del tipo de aleación y del sobrecalentamiento. Para las fundiciones gráficas es del orden del 0,7 % al 1,8 % por cada 100 °C de temperatura.
- **Contracción de solidificación:** esta contracción es la más importante a la hora de conseguir una pieza fundida de calidad. Es la contracción que sufre la pieza mientras se solidifica, o sea la transición del metal líquido a sólido, que puede no ser homogénea en todo el volumen. Si su magnitud es relevante será difícil conseguir que la pieza no tenga porosidades ni cavidades. Esto es así porque el fenómeno de contracción de la fracción sólida y el de la fracción líquida ocurren al mismo tiempo, apareciendo zonas que solidifican antes que otras. Esto puede provocar la aparición de sectores aislados de líquido que se contraen dentro de material solidificado, generando condiciones para la aparición de rechupes o porosidades. En el caso del hierro nodular, el líquido nodular hipereutéctico, puede asumir un comportamiento que bajo determinadas condiciones puede solidificar desde contractivo a expansivo, aún con idéntica composición química.
- **Contracción sólida:** tras haber solidificado completamente (ya no hay fracción líquida), la pieza sigue contrayéndose ya que pasa de una temperatura elevada a la temperatura ambiente. Este enfriamiento no genera rechupes o porosidades, pero esta contracción se debe tener en cuenta a la hora de diseñar el modelo, ya que la pieza será de menor tamaño que el modelo debido a esta contracción.

En la siguiente secuencia de imágenes se analizan los pasos que llevan a un rechupe, descritos en los párrafos anteriores:

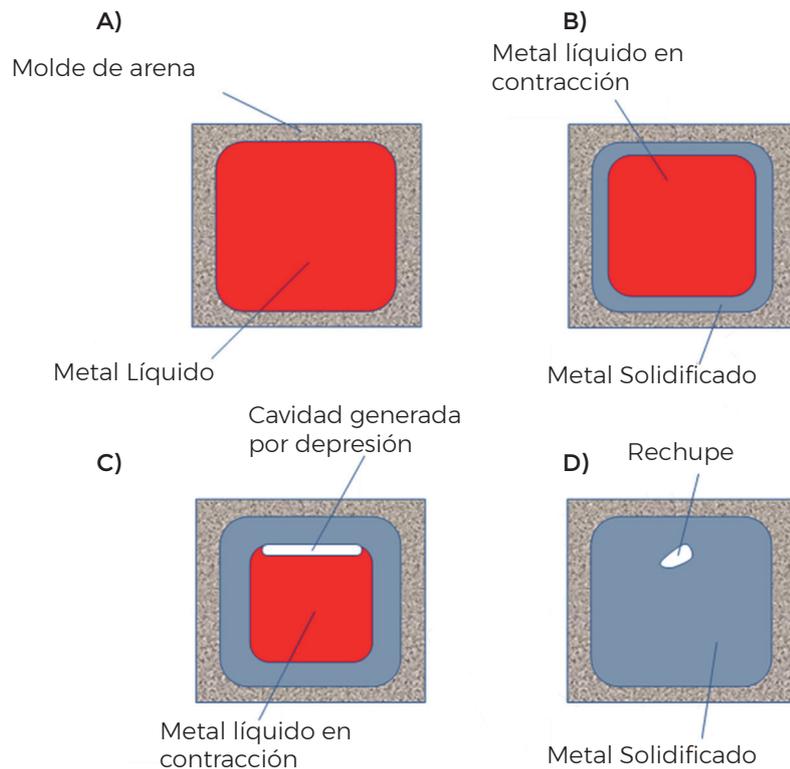


Figura N° 1: Pasos que lleva la formación de un rechupe

Supongamos una cierta cantidad de metal líquido atrapada dentro del molde (a).

La parte que primero se solidifica es generalmente el exterior de la pieza, por estar en contacto con el molde por ello se forma una cáscara solidificada, estando todavía el interior en estado líquido. (b)

A partir de una temperatura determinada el metal líquido (fracción líquida) se contrae a mayor velocidad que la parte ya solidificada de la pieza. Esto provoca la aparición de huecos como los indicados en la figura "c".

Una vez que todo el metal se ha solidificado, las zonas sin llenar se quedan huecas (d).

A esos huecos se les denomina rechupes y son los que deben tratar de evitarse en una pieza fundida (o al menos localizarlos en zonas que no afecten al correcto funcionamiento de la pieza).

Además de lo descrito también existe la posibilidad de la generación de un rechupe secundario, el cual se produce por una excesiva expansión del líquido en su solidificación eutéctica, que surge al no poder resistir el molde tal presión de solidificación (presión metalostática), generándose una zona con microporosidad.

Teniendo en cuenta este fenómeno, el modelo o matriz deben construirse de acuerdo con el grado de contracción del metal que se emplea en la colada. (Anexo 2.2, paso N° 3).

3. Sobrematerial.

El modelo o matriz debe adecuarse al mecanizado posterior y al uso que se le dé a la pieza. Si una pieza se emplea en bruto, es decir, tal como queda después de desbarbala y realizada su limpieza, el modelo no precisa una preparación especial.

Cuando la pieza requiere la mecanización de una o más superficies, el modelo o matriz debe contar con un espesor suplementario o de mecanización, que suele estar comprendido entre 3 y 8 mm. Este espesor, aunque en las piezas de precisión puede quedar reducido a unas pocas décimas, en las piezas grandes (especialmente de acero) puede alcanzar varios cm.

La Norma ISO 8062-4:2017 Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 4: General tolerances for castings using profile tolerancing in a general datum system, constituye una guía técnica de referencia con especificaciones respecto al sobrematerial y tolerancias para piezas de fundición.

Un sobrematerial excesivo representa un costo en que no debería incurrirse. Este costo está comprendido por una mayor cantidad de material utilizado (mayor volumen de chatarra, aditivos y calentamiento), mayores trabajos de mecanizado (tiempos, insumos, mano de obra, etc.) y una gestión de viruta más importante. La mayoría de estos costos suelen quedar ocultos, y no se tienen en cuenta generando pérdidas importantes. (ver Anexo 2.2, paso N° 4).

4. Partición del modelo.

En aquellas piezas que se obtienen mediante moldeo, se debe definir una sección donde dividir las dos partes del modelo, para poder extraer la pieza una vez solidificada.

Cada parte queda denominada entonces como semimolde.

Esa sección determina una "línea de partición" y tiene una importancia fundamental en la definición del modelo o matriz a implementar, ya que en base a esto se establecen los desmoldes necesarios para poder extraer la pieza del molde.

En los siguientes ejemplos, se pueden observar tres casos de aplicación de diferentes líneas de partición para una misma pieza. Los ángulos de desmolde se han exagerado para poder apreciar mejor la influencia de las líneas de partición en éstos.

En la pieza ahuecada como la de la figura N°2, a los semimoldes se los denomina cavidad (semimolde ahuecado) y núcleo (semimolde que penetra en el hueco de la pieza y genera ese hueco).



Figura N°2

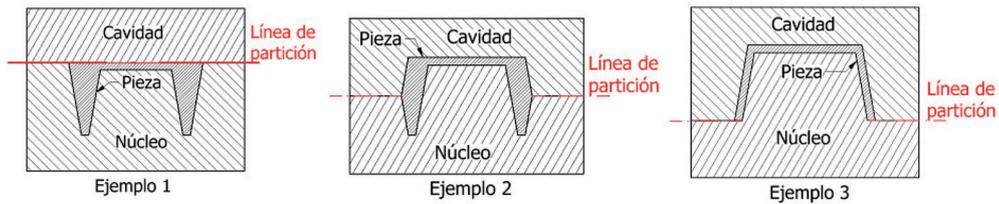


Figura N°3

En los ejemplos presentados en la figura N°3 , el número 3 es el más adecuado para la ubicación de la línea de partición. Esto es así porque permite mantener las paredes con un espesor uniforme en la pieza minimizando el retrabajo de mecanizado posterior, y además el molde resulta más sencillo de fabricar.

A la hora de determinar cuál es la superficie de partición adecuada debemos también tener en cuenta que la expulsión de la pieza sea posible. En ciertos casos las piezas tienen contrasalidas (indicadas con las flechas color rojo de la figura N°4, que son salientes-entrantes laterales en la pieza.

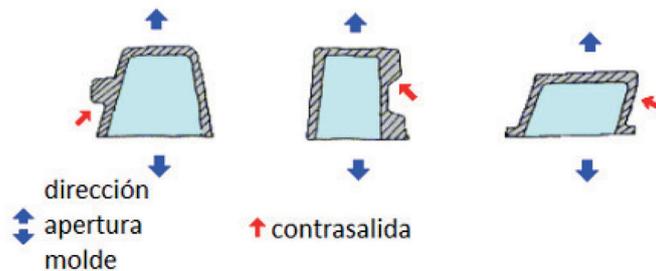


Figura N°4

Estas contrasalidas implican una dificultad en la extracción de la pieza, que se puede solucionar mediante una corredera con desplazamiento lateral o, a veces, cambiando la sección de la línea de partición (cambio de orientación), como se puede ver en la figura N°5.

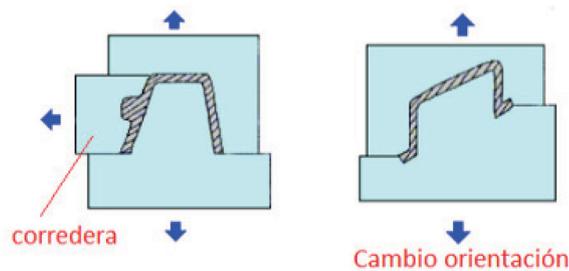


Figura N°5

También es importante tener en cuenta que, si hay una pared de encuentro entre los semimoldes, ésta no debe ser totalmente vertical, ya que ello conllevaría el peligro de choque en caso de desalineación. Para evitar esto, se le debe dar una cierta inclinación a esas paredes como se muestra la figura N°6.

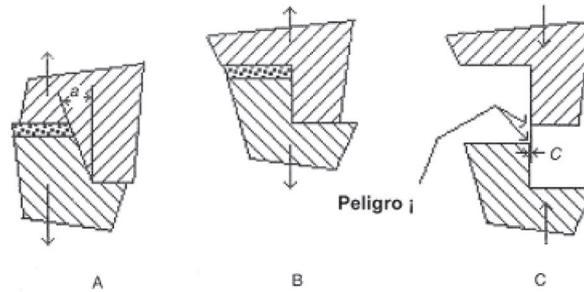


Figura N°6

1.3 Cálculo del sistema de alimentación

Un aspecto muy importante en el proceso de fundición es el modo en que se solidifica el metal que se funde dentro del molde o matriz. El mismo puede solidificar de forma homogénea en todo el volumen de la pieza o de forma heterogénea (descrito en el punto 1.2.1.2). Esto dependerá del tamaño y forma de la pieza, como así también del tipo de aleación que se trate. Para evitar los inconvenientes que genera la solidificación heterogénea se debe diseñar un sistema de alimentación adecuado.

Para ello se debe tener en cuenta que el metal líquido debe fluir de forma homogénea alcanzando todas las cavidades del molde o matriz sin generar salpicaduras ni turbulencias (que favorecen la generación de poros y otros inconvenientes), como así tampoco causar daños como erosiones en las paredes.

Durante la solidificación aparece una contracción volumétrica del material metálico, que puede generar rechupes, poros y micro segregaciones en los puntos calientes, como se desarrolló en el apartado anterior. Aunque la utilización de mazarotas o montantes conlleva costos adicionales por su implementación, su aplicación contrarresta la generación de estos defectos.

El sistema de alimentación debe diseñarse de modo que se cuente con suficiente metal líquido en el molde asegurando su aporte a las zonas calientes en todo momento. Esto quiere decir que las mazarotas o montantes deben solidificar después de la pieza. Dicho de otra forma, son la última parte en solidificar de todo el conjunto fundido.

Existen varios tipos de mazarotas según su disposición en el modelo. Así pues, se tienen mazarotas superiores que se ubican sobre la pieza, y mazarotas laterales dispuestas en el contorno. En la siguiente figura se pueden observar los dos tipos más comunes de mazarotas:

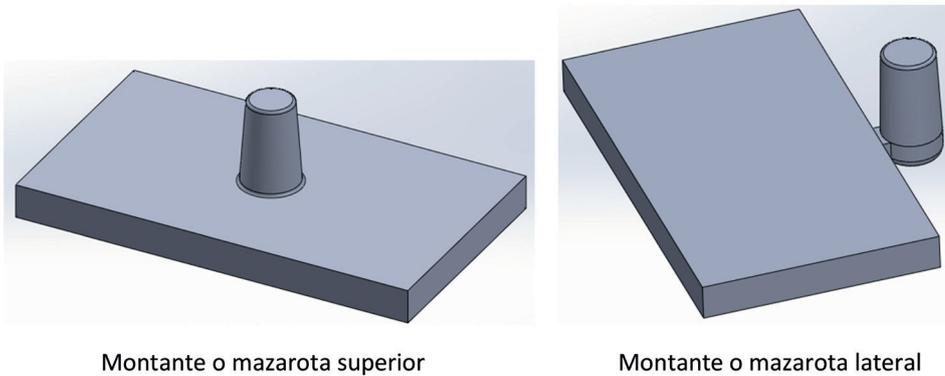


Figura N°7

Además, se pueden clasificar como mazarotas abiertas a aquella que tienen su parte superior libre en contacto con la atmósfera, y cerradas a aquellas que se encuentran tapadas por el molde en todas sus superficies.

Por lo general, las mazarotas deben situarse en los puntos calientes, en zonas de difícil alimentación o en las partes de la pieza de mayor módulo de enfriamiento. Este último concepto habla de la relación entre el volumen de la pieza y su superficie, y será retomado en el anexo correspondiente (anexo 5.3) para efectuar los cálculos que demanda la implementación de mazarotas.

En piezas de geometría simples (que implique un módulo de enfriamiento similar en toda la pieza) normalmente se puede utilizar solo una mazarota o montante para obtener el resultado óptimo. Sin embargo, para piezas de geometrías complejas o conjunto de piezas (más de una pieza por placa de moldeo) en el anexo correspondiente 2.3 resulta imprescindible la utilización de un mayor número de mazarotas o montantes.

La distancia de alimentación entre la pieza y la mazarota o montante será el factor que determine el número de mazarotas necesarias para resolver los problemas de contracción del metal fundido.

Esta distancia puede variar según la forma en la distribución de las piezas en la placa: en el caso de una distribución radial, la zona de ataque de la alimentación de la mazarota o montante es circular; y para el caso de una distribución lineal, la zona de ataque de la alimentación está expresada por la dirección longitudinal a ambos lados de la mazarota o montante.

Otro factor importante al momento de diseñar y calcular el sistema de alimentación es el volumen de material fundido requerido para obtener la pieza. A su vez, la relación entre el volumen de material destinado a la pieza y el necesario para el llenado de los canales de alimentación y mazarotas, es un elemento importante para el rendimiento del sistema completo de la placa o matriz. Esta relación entre el peso de la pieza y el peso total del sistema (alimentación más pieza/s), se recomienda que no sea inferior al 75%. Dicho de otra manera, el sistema de alimentación no debe superar el 25% del total de material empleado para el llenado de todo el molde o matriz.

Generalmente, se sobredimensiona el sistema de alimentación para asegurarse que la pieza no tenga defectos, pero no se tiene en cuenta que se está incidiendo directamente en el costo de fabricación de la misma (energía, materia prima utilizada, horas hombre directas, etc.).

Una buena distribución y cálculo del sistema de alimentación permite buenas condiciones para obtener piezas sin defectos y a un costo ajustado al diseño y las tecnologías disponibles. En el Anexo 2.3 se describen los pasos a seguir al momento de realizar el cálculo del sistema de alimentación de una pieza.

1.4 Simulación Computacional

En la actualidad existen dos tendencias en la evolución de la tecnología de fundición. Por un lado, se avanza en la mecanización y automatización del proceso, implementando mejoras en los equipos y aumentando la productividad. Por otro lado, se ha incrementado la eficiencia de la fundición, produciendo piezas de alta calidad en las que se ajustan las tolerancias dimensionales minimizando los postprocesos.

Debido a la continua especialización del sector y a las exigencias de la industria, la tecnología de fundición debe producir de forma más eficiente piezas de mayor complejidad (espesores más estrechos, formas más cerradas, tolerancias reducidas, mínimos retrabajos posteriores, etc.). Los altos costos que conlleva la fabricación de piezas complejas no permiten la realización de pruebas en moldes o matrices hasta desarrollar el diseño óptimo del conjunto. Por este motivo, se suelen realizar estudios previos en software de simulación de fluidos, que reproducen el llenado de molde o matriz y permiten obtener una aproximación de las características de la pieza final solidificada.

En este sentido, las simulaciones con software especializado permiten visualizar las condiciones en las que se encontrará el metal fundido en todo el proceso hasta la solidificación inclusive. Esto posibilita verificar los diseños realizados teóricamente, y no realizar pruebas en piso de planta que conllevan costos y tiempos adicionales muy importantes.

De este modo, se logra reducir la inversión de tiempo y dinero en el proceso de diseño, lo que permite realizar pruebas sucesivas y alcanzar, por ejemplo, el mejor rendimiento posible para cada pieza (relación entre peso del sistema completo y el peso de la pieza).

Para poder llevar adelante la simulación el fundidor debe contar con un 3d de la pieza, el cual debe ser proporcionado por el cliente, junto a su blue print 2D para conocer la forma en como el diseñador corta la pieza o sea la información en papel digitalizada y papel para arrancar la construcción del modelo, la cual debe respetar todas y cada una de las cotas que el diseñador fijo en cada vista y corte del Blue print, las cuales son responsabilidad del fundidor.

El software de simulación permite observar y analizar información referida a:

- **Llenado del molde bajo diferentes condiciones de contorno.** Se podrán suponer las velocidades del flujo que se alcanzan en los distintos sistemas, mejores zonas de llenado, verificación del diseño de sistemas de alimentación y tiempo de llenado.
- **Solidificación y enfriamiento del metal en el molde.** Se podrán analizar las zonas calientes de la pieza y los posibles rechupes que puedan aparecer en ella, verificación del sistema de compensación, posible porosidad y tiempo de solidificación.

En esencia todo software de simulación está compuesto por tres bloques:

1. Pre-procesado:

Se encarga del diseño del modelo, tanto en su geometría como en las características de las condiciones de contorno (superficie en contacto con el metal líquido). Se indican las características del diseño de los subconjuntos que forman el sistema de fundición, del material de trabajo, de la simulación en relación a la dimensión del mallado de cada elemento y del llenado.

2. Cálculo:

Bajo las condiciones de trabajo del horno y las características de contorno ya establecidas, se producen los cálculos de elementos finitos en el mallado del conjunto.

3. Post-procesado:

muestra los resultados numéricos generados en el cálculo. Una vez finalizada la simulación, se pueden analizar los resultados obtenidos respecto de la pieza solidificada, evaluando los siguientes parámetros:

- **Temperatura:** permite mostrar la temperatura de la pieza y la mazarota como así también la del conjunto entero, incluyendo el molde.
- **Tiempo de solidificación, tiempo de líquido y tiempo de fracción crítica sólida:** permiten generar una imagen del estado del sistema para un “step” considerado (un momento determinado del proceso de solidificación).
- **Gradiente de temperatura y velocidad de enfriamiento:** son parámetros importantes para el estudio de posibles defectos, creación de estructuras metalográficas indeseadas, etc.

Además, mediante este tipo de software es posible reconocer la necesidad de inclusión de mazarotas en el diseño del conjunto, para evitar posibles defectos en la pieza según su geometría. El software propone el nivel de sensibilidad del proceso indicando el número de mazarotas requeridas según se tenga una pieza compacta o de geometría mixta. Los parámetros que se utilizarán para el cálculo son los siguientes: módulo, altura, diámetro y relación altura-diámetro.

A modo de ejemplo, observamos en el figura N°8 que, al utilizar una mazarota cilíndrica la distribución de temperaturas es bastante homogénea en el sistema (conjunto pieza-mazarota), así como la solidificación. En este sentido, se puede deducir que aparecerán rechupes en la mazarota y no en la pieza.

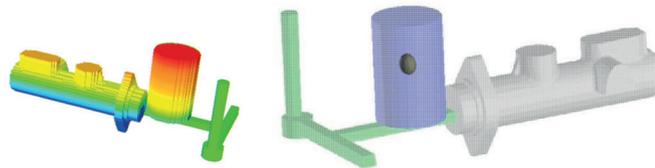


Figura N°8 Simulación de llenado. Fuente: Informe final simulación realizada a empresa del sector - fecha:2016

Se puede concluir que la simulación puede predecir defectos en piezas fundidas y es una herramienta que presenta las siguientes ventajas:

- Disminución del tiempo de puesta a punto de proceso de fundición. Muchas veces este tiempo es crítico para el desarrollo de un prototipo.
- Como se obtiene de forma más simple un mejor diseño de sistema, se lograrán mejores rendimientos en la colada, y con ello, menores costos de materiales, mano de obra, energía, etc.
- Ya que se obtiene un diseño de conjunto “óptimo” y probado, se aumenta la confiabilidad del proceso, bajando sensiblemente la posibilidad de obtener piezas con fallas (Scrap).

La simulación por software representa ahorros y mejoras considerables para empresas que utilizan esta herramienta. En la actualidad, se ha tornado una tecnología muy adoptada, ya que es sinónimo de mejores piezas fundidas, en menos tiempo y con un mayor aprovechamiento de metal.

1.5 Moldeo

La cavidad en donde se deposita el metal líquido recibe el nombre de molde o matriz. Si sólo permite realizar un vaciado y posteriormente se destruye, se denomina molde desechable. Mientras tanto, una matriz permite más de una operación de vaciado. Si su duración es menor a 1000 coladas se considera como semipermanente, mientras que si su duración es mayor a esa cantidad de operaciones se la denomina permanente.

Al producir los moldes desechables, estos deben poseer una serie de características para la obtención de un producto sin defectos y que cumpla con los requisitos del cliente. Algunas de ellas son las siguientes:

- Ser plásticos, de tal manera que puedan absorber la modificación volumétrica propia de la pieza en proceso de llenado y solidificación.
- Tener cohesión y resistencia, para reproducir y conservar la forma obtenida al extraer el modelo.
- Resistir la acción de altas temperaturas, es decir, capacidad refractaria.
- Tener permeabilidad, para permitir la evacuación del aire contenido en el molde y de los gases que se producen en la colada.
- Desintegrarse fácilmente para permitir la extracción y limpieza de la pieza.

Los moldes se pueden producir de varios materiales que incluyen arena, yeso y cerámica. Para los casos de fundición gris, nodular y otras, como así también para muchas aplicaciones de aluminio, se utilizan ampliamente las arenas, que se encuentran en el mercado de diferentes tipos y con distintas preparaciones (componentes, humedad, etc.) al momento del moldeo.

Para el caso de grandes cantidades de piezas se utiliza un molde permanente o coquilla, que se construyen con acero o fundición recubiertos de material refractario, lo cual permite soportar las altas temperaturas del proceso.

Los moldes permanentes (matrices) deben poseer las siguientes características:

- Ser lo suficientemente fuertes para sostener el peso del metal.
- Resistir la acción de la erosión del metal que fluye durante la colada.

- Generar una cantidad mínima de gas cuando se llena con el metal fundido. Los gases contaminan el metal y pueden alterar el molde. Para la expulsión de gases tiene que disponer de canales o ventanas de salida especialmente diseñadas para cada caso.

1.5.1.1 Propiedades de las arenas de moldeo

Las características físicas y químicas de las arenas de moldeo inciden directamente sobre el comportamiento que el molde desarrolla en el proceso de moldeo, colado, solidificación y desmolde de la pieza. En la tabla siguiente se muestran algunas de estas características de arenas de moldeo comunes:

Propiedad	Arena de sílice	Arena de cromita	Arena de circonio	Arena de olivino
Dureza según Mohs	7	5.5	7.5	6.5 a 7
Densidad en g/cm ³	2.65	~4.5	~4.5	~3.3
Densidad aparente a granel en g/cm ³	1.3 a 1.5	2.4 a 2.8	2.7 a 2.9	1.6 a 2.0
Temperatura de fusión en °C	1760 a 1780	1800 a 1900	2200 a 2400	1750 a 1850
Dilatación lineal hasta 600 °C en %	1.25	0.4	0.2	0.6

Tabla N°1: Propiedades de las tierras de moldeo en función de su empleo. Fuente: Caracterización de las tierras de moldeo - Julio César Ordinola Castillo.

La arena de moldeo con la que se fabrican los moldes debe cumplir con las siguientes características:

- Alta resistencia a la compresión y a la flexión.
- Grado de finura de la arena, la cual irá de acuerdo con el acabado superficial que se necesite obtener en las piezas fundidas.
- Permeabilidad de la arena adecuada según el metal que se fundirá para facilitar la salida de los gases.

La composición de la arena de moldeo es diversa y depende del tipo de aleación, masa, espesor de la pared y configuración de la pieza. A modo orientativo, se presenta la tabla siguiente que relaciona materiales y piezas, con condiciones a cumplir por la arena de moldeo:

Tipo de aleación	Humedad %	Permeabilidad	Resistencia a la compresión (N/cm ²)	Carbón total en arena	Índice de finura
Aluminio	6,5 a 8,5	7 a 13	4,56 a 5,27	12 a 18	225 a 160
Latón - Bronce	6 a 8	13 a 20	4,92 a 5,62	12 a 14	150 a 140
Cobre - Niquel	6 a 7,5	37 a 50	4,56 a 5,62	12 a 14	130 a 120
F.Gris baja calidad	5,5 a 7	10 a 15	4,21 a 5,27	10 a 12	200 a 180
F. Gris (compleja)	3,5 a 5	30 a 50	4,35 a 5,27	12 a 14	120 a 87
Piezas medianas de F.Gris (arena verde)	3,5 a 5	30 a 50	5,27 a 5,62	11 a 14	86 a 70
Piezas medianas de F. Gris (arena sintética)	3,5 a 5	30 a 50	5,27 a 5,97	4 a 10	75 a 55
Piezas pesadas en F. Gris (en verde y en seco)	4 a 6	30 a 50	3,15 a 5,27	8 a 13	61 a 50
Piezas Livianas en F.Maleable	4 a 6	80 a 120	4,56 a 5,27	8 a 13	120 a 92
Piezas pesadas de F. Maleable	5 a 7	40 a 60	4,56 a 5,27	8 a 13	85 a 70
Piezas livianas de hacer (arena verde)	2 a 4	120 a 125	4,56 a 5,27	4 a 10	56 a 45

Tabla N°2: Características y propiedades de las tierras de moldeo en función de su empleo. Fuente: Caracterización de las tierras de moldeo - Julio César Ordinola Castillo.

1.5.1.2 Granulometría de las arenas de moldeo

La selección de una correcta granulometría es de gran importancia, debido a que esta incide directamente sobre la calidad superficial de la pieza obtenida del proceso de fundición.

En la siguiente tabla se presenta el índice de finura⁴ para la clasificación de tipos de arena:

ARENA	AFS	En micrómetros
Muy Fina	110 - 140	140 - 110
Fina	70 - 110	230 - 140
Media	55 - 70	300 - 230
Gruesa	45 - 55	370 - 300
Muy Gruesa	25 - 45	700 - 370

Tabla N°3: Índice de finura de las arenas de moldeo. Fuente <https://pedeca.es/revistaonline/fundipress/45/files/assets/basic-html/page43.html>.

A continuación, se presenta la relación entre el índice de finura y los materiales ideales para fundir de acuerdo a este parámetro:

METALES	ÍNDICE DE FINURA (según AFS)
Acero	40 a 65
Fundiciones ferrosas	70 a 110
Aleaciones de cobre	100 a 120
Aleaciones ligeras	100 a 140

Tabla N°4: Índice de finura según el metal a fundir. Fuente Caracterización de las tierras de moldeo - Julio César Ordinola Castillo.

El análisis de las características de las tierras de moldeo se realiza mediante el tamizado de la arena, por dos razones importantes: para retirar impurezas de tamaño considerable (impurezas y otros objetos) y para separar la acumulación de tierra que podría alterar los ensayos.

Para medir el tamaño de grano de la arena se recomienda utilizar como referencia la norma ASTM E-11 o equivalente, teniendo en cuenta los aspectos de muestreo y representatividad de los resultados respecto del total de la misma. De esta manera nos aseguraremos la homogeneidad del grano de la arena a utilizar y así evitar problemas debido a diferencias de permeabilidad en el molde.

1.5.1.3 Componentes de las arenas de moldeo verde

A continuación, se detallan los distintos componentes y lo que le aportan a la arena verde de moldeo:

- Arena reciclada: arena recuperada luego del proceso de colado.
- Arena nueva: Arena sílice SiO₂.

⁴ Índice de Finura: es el tamaño medio de grano de arena. Su denominación en inglés son AFS,

- Carbón mineral molido: su función principal es generar un acabado o textura superficial en la pieza. Además, reduce la ocurrencia de penetración de metal y proporciona permeabilidad.
- Bentonita: funciona como aglutinante de la mezcla y proporciona resistencia, moldabilidad y plasticidad.
- Agua: componente fundamental para la activación de la bentonita, que permite cohesionar todos los elementos de la mezcla. Debe ser cuidadosamente controlada ya que un exceso puede generar una mezcla demasiado plástica y húmeda afectando la resistencia del molde, la terminación superficial de la pieza y la generación de defectos. Si se obtienen niveles bajos de humedad la mezcla carecerá de resistencia, plasticidad y cohesión de los componentes.

1.5.1.4 Preparación de las arenas de moldeo

Existen dos tipos de arena verde para la generación de los moldes:

- Arena de contacto (en verde o en seco).
- Arena de relleno.

La primera se aplica, como su nombre lo indica, en contacto con el modelo y es la que sufrirá la acción directa del metal líquido. Esto requiere una comprobación cuidadosa y una preparación minuciosa para garantizar la refractariedad, permeabilidad y una cohesión más elevada.

La segunda sirve para completar el molde y no requiere tanto cuidado como la arena de contacto. Esto no quiere decir que no se deba controlar la humedad de la misma ya que es un factor importante y puede traer consecuencias en el producto.

La preparación de la arena de contacto se realiza de modos diversos según el equipamiento que se disponga, los objetivos a alcanzar en el proceso y las costumbres de quien la prepara.

Cabe aclarar que para los casos en donde el moldeo se realice mediante equipamiento automático o semiautomático la arena a utilizar es solamente la de contacto. La arena de relleno se suele usar en procesos manuales.

Generalmente para la preparación de una mezcla se utiliza arena nueva y arena usada en anteriores coladas, agregando bentonita y carbón mineral molido.

A continuación, se detallan las proporciones para la preparación de las arenas de contacto según si cuenta o no con arena reciclada:

PREPARACIÓN DE ARENA DE MOLDEO SIN ARENA RECICLADA	
Componente	Cantidad kg
Arena Nueva	100
Bentonita	10
CMM*	3
% de agua**	3,5 a 5%
Resistencia a a compresión en verde (kg/cm ³): 0,35 a 0,45 Permeabilidad: 30 a 50% Compactabilidad: 3 a 5% Carbón total en arena: 4 a 10%	
* Carbón Mineral Molido ** % de agua respecto al peso total del pastón	

PREPARACIÓN DE ARENA DE MOLDEO SIN ARENA RECICLADA	
Componente	Cantidad kg
Arena Nueva	20
Arena Reciclada	80
Bentonita	10
CMM*	3
% de agua**	3,5 a 5%
Resistencia a a compresión en verde (kg/cm ³): 0,35 a 0,45 Permeabilidad: 30 a 50% Compactabilidad: 3 a 5% Carbón total en arena: 4 a 10%	
* Carbón Mineral Molido ** % de agua respecto al peso total del pastón	

Tabla N°3: Preparación arena de moldeo. Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la cantidad de agua que se debe agregar al momento de la preparación, ésta dependerá de la humedad que debemos tener en la mezcla para el moldeo (entre el 3.5 y 5% del peso de la mezcla). En función de la humedad determinada por el ensayo correspondiente, se incorporará pequeñas cantidades de agua garantizando su homogeneidad en toda la mezcla antes de realizar un nuevo muestreo para volver a ensayar y constatar su aptitud.

La determinación del porcentaje de humedad puede hacerse por distinto métodos. Puede realizarse por pesadas sucesivas hasta lograr peso constante, secando una muestra (previamente pesada) en una estufa con circulación de aire (105 a 110°C) durante 10 ´.

La humedad se determina por la siguiente fórmula:

$$h\% = ((Ph - Ps) / Ph) \times 100\%$$

Ph: peso húmedo

Ps: peso seco

Otro método es a través de un ensayo físico-mecánico donde se coloca una probeta de 50 mm de diámetro y 50 mm de altura dentro de un atacador como se observa en la Figura N° 9.

El dispositivo consta de una varilla A, soportada por dos guías g y g'. Una cabeza atacadora D está unida a la parte baja de la varilla A y ajustada dentro del tubo H, de manera que puede deslizarse por dentro de él.

Un martillo de fundición gris o acero F de 6,35 kg, se desliza a lo largo de la varilla entre los toques S y S'. La distancia entre estos toques es suficiente para permitir un recorrido de 5,08 cm al martillo F.

Arriba de la guía superior se cuenta con una escala B con tres líneas marcadas sobre la misma. Si el extremo superior de la varilla atacadora se encuentra ubicado entre las líneas superior e inferior de esta escala, después del tercer golpe realizado sobre la muestra, esto indica que la muestra está dentro de los límites permisibles de humedad (indicados más arriba entre el 3.5% y 5%).

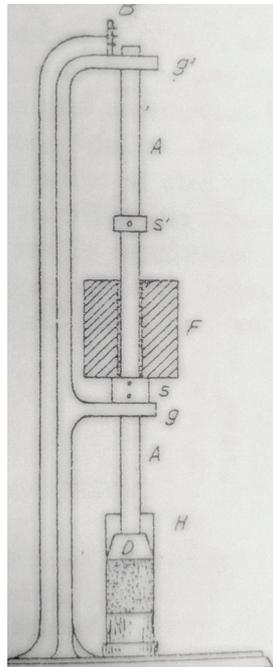


Figura N° 9: Equipo para ensayo mecánico de arenas de moldeo.

1.6 Colado del metal líquido

Como primera medida para la preparación del metal líquido a utilizar, se toma la información detallada sobre los requisitos técnicos de la pieza a fabricar acordados con el cliente.

El proceso de fusión de un metal depende de su composición química, temperatura de fusión y tensión superficial en estado líquido. Estos factores determinan su fluidez, siendo esta fundamental para garantizar un correcto llenado del molde o matriz.

La introducción del metal fundido en el molde y su flujo a través del sistema de alimentación es un paso crítico en el proceso. Para que esto tenga éxito, el metal debe fluir por todas las regiones del molde antes de solidificarse.

Los factores que afectan la operación de colado son la temperatura, la velocidad de llenado y la turbulencia generada dentro del molde.

La temperatura de colado es la que presenta el metal fundido en el momento de su introducción al molde o matriz. Lo importante aquí es la diferencia entre esta temperatura y la correspondiente al inicio de la solidificación. A esta diferencia de temperaturas se le llama sobrecalentamiento, que es la diferencia entre la temperatura de fusión del metal (propiedad física del mismo) y la temperatura del metal líquido en la cuchara antes del llenado del molde.

Por ahorro energético, este sobrecalentamiento debe ser el mínimo posible, sin afectar la fluidez necesaria del metal para un correcto llenado del molde. Para determinar la temperatura de sobrecalentamiento es muy importante tener en cuenta el tiempo que transcurre entre el llenado de la cuchara de colado y la finalización del proceso de colada en los moldes o matrices.

Una vez retirado el metal de la fuente calor (horno), su temperatura decrece a razón de 17°C por minuto aproximadamente. Este gradiente térmico temporal puede variar según la temperatura del metal líquido y otras condiciones del proceso. Este valor de 17°C por minuto se considera si se tiene una temperatura de metal líquido aproximada de 1350 °C.

Esta pérdida de temperatura en el metal líquido de la cuchara durante el proceso de llenado de los distintos moldes o matrices, también afecta su fluidez. Ello a su vez genera distintas aptitudes del líquido para completar correctamente el volumen de los moldes o matrices, según si se encuentra al inicio o al final del proceso.

En función de lo expresado en el párrafo anterior, es indispensable encontrar la mejor relación entre la cantidad del metal requerido por cuchara (teniendo en cuenta la cantidad, complejidad y tamaño de los moldes como además el tipo de metal o aleación) y

la temperatura de sobrecalentamiento ideal. Se debe lograr que el llenado de todos los moldes se lleve a cabo a temperaturas admisibles para mantener la fluidez adecuada durante el proceso de vaciado de la cuchara.

La velocidad de llenado de los moldes o matrices está en función del caudal de metal fundido que se vierte dentro del molde o matriz. Si esta velocidad es muy lenta, el metal puede enfriarse antes de llenar la cavidad. Por el contrario, si la velocidad es excesiva, se provocan turbulencias y se favorece la erosión de la arena del molde y el metal puede atrapar gases y escoria. Esta velocidad tiene relación directa con el sistema de alimentación y particularmente con su diseño, ya que si el mismo no garantiza las condiciones de forma y tamaño adecuadas podrán aparecer defectos aun cuando tengamos la temperatura de colado necesaria para el llenado del molde.

La turbulencia del flujo se produce generalmente al entrar en contacto el metal líquido con las paredes del molde. Su presencia dependerá de la velocidad de llenado y de la viscosidad del metal líquido, como así también de la geometría del sistema de alimentación.

El flujo turbulento debe evitarse para minimizar la formación de óxidos metálicos (también llamadas gotas o inclusiones metálicas) que pueden quedar atrapados durante la solidificación, degradando de esta forma la calidad de la fundición. También provoca una erosión excesiva del molde por efecto del impacto del flujo de metal fundido.

A modo de conclusión de lo desarrollado en este apartado, se observa que existen variables a considerar en el llenado del molde que pueden ajustarse durante el proceso, y otras que se determinan con antelación (sistema de alimentación, diseño de la cuchara de llenado, etc.). Igualmente, las variables administrables durante el proceso deben tener rangos admisibles definidos previamente para disminuir defectos durante el proceso de colado y solidificación.

1.6.1 Ensayos a realizar para control de proceso

Como se describió en el apartado anterior, el proceso de fusión de un metal depende de su composición química, temperatura de fusión y tensión superficial en estado líquido. Estos factores determinan su fluidez siendo esta fundamental para garantizar un correcto llenado del molde o matriz y obtener una pieza con las especificaciones requerida.

Para garantizar lo descrito, a continuación se desarrollan los ensayos a realizar tanto sobre el metal líquido o aleación, como en la pieza obtenida. Los ensayos necesarios sobre la arena de moldeo ya fueron descritos en el apartado correspondiente a arenas.

1.6.1.1 Espiral de colabilidad

En la práctica, un mismo líquido al cual le atribuimos buena calidad metalúrgica calificada por el método clásico (cuña de temple, Ceq, análisis químico, metalografía, etc.), puede generar resultados diferentes cuando se cambia de pieza o de sistema de colada.

Para solucionar esta problemática se recurre a la introducción del ensayo de la fluidez o espiral, cuyo resultado expresado numéricamente refleja el comportamiento básico del líquido en forma totalmente independiente de cualquier tipo de combinación.

Este tipo de ensayo nos permite observar la capacidad que tiene el metal líquido o aleación de fluir para lograr el correcto llenado de un molde o matriz. De este ensayo se obtiene un parámetro genérico, fácil y rápido de aplicar, que refleja el comportamiento real y absoluto asumido por el líquido que se está colando en ese momento. Dicho parámetro se representa en la cantidad de pulgadas de largo de la espiral de Taylor.

El ensayo se trata del colado de un molde con la forma que se describe en la figura siguiente, y el parámetro a medir es la longitud de la espiral solidificada, medido en pulgadas:

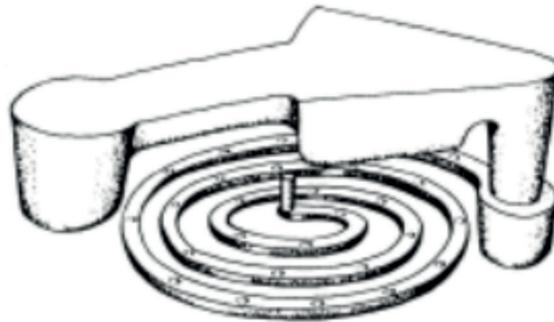


Figura N°10 . Fuente: Presentación: Como solidifican las aleaciones hierro carbono en la práctica - Ing. Norberto Rizzo. Año: 2016

Este ensayo (colado de la espiral) se realiza al inicio y final del vaciado de la primera cuchara que se extrae del horno, siempre y cuando se mantengan las condiciones del metal dentro del mismo durante su descarga en el proceso. En el caso de que se modifiquen estas condiciones por (ej., características de la aleación) se deberá realizar el ensayo nuevamente.

Si se cuenta con un horno a inducción o de características similares, el ensayo se deberá realizar al inicio del vaciado de cada una de las cargas del horno que se realicen durante la jornada. Si por el contrario se cuenta con un horno de cubilote el ensayo se deberá realizar al inicio del colado y en distintos momentos posteriores, eligiendo los mismos según el criterio del operador teniendo en cuenta la uniformidad en toda la carga del horno de las características del metal.

La longitud se mide contabilizando las marcas separadas una de otra, la misma es de 2" que están incluidas en el modelo quedando marcadas en el espiral.

Esto nos permite conocer cómo se comportará el metal dentro del molde o matriz. A mayor longitud de espiral (por ejemplo, superior a 80"), mayor será la factibilidad de un correcto llenado del molde o matriz, independientemente de los espesores de la pieza y sistema de alimentación de este. A medida que la longitud se reduce, disminuye también la fluidez del metal, lo que influirá en la capacidad de llenar el molde o matriz.

En general, y de forma aproximada, se puede indicar que por debajo de valores de 60" solo podrá aspirarse a obtener piezas de geometrías simples, sin espesores delgados, de bajo requisito, etc. Esta disminución en el largo tiene relación con un conjunto interrelacionado de variables, dentro de los cuales se encuentra, la viscosidad, tensión superficial, densidad, actividad del carbono, entre otras de igual relevancia.

Si al momento de realizar el vaciado de la cuchara tenemos valores de espiral como se detalla en el párrafo anterior, se deberán realizar los ajustes para utilizar dicho metal. Las variables a modificar pueden ser por ejemplo la T° del metal, la composición química (por ejemplo, a través de la inoculación), etc, dependiendo del horno con el que se cuente.

De tener un horno a inducción, o de similares características, se puede modificar la carga completa del horno ya que puede devolverse el contenido de la cuchara al mismo. En el caso de contar con un cubilote se deberá trabajar en el contenido de la cuchara y de la carga del mismo en forma separada, en ambos casos para mejorar las características de fluidez durante la colada.

A modo de referencia se presentan a continuación un gráfico con algunas longitudes de espiral ejemplificadoras que pueden encontrarse en ensayos realizados en distintas coladas.

Con recuadro en color verde se ven medidas de longitud de espiral que pueden considerarse adecuadas para piezas complejas (tamaños, espesores, diseños en general que pongan a prueba la fluidez del metal líquido). En el caso de las resaltadas en color azul y rojo se deberán llevar adelante las acciones indicadas en párrafos anteriores para adecuar el metal líquido en el caso que la complejidad de la pieza lo demande.

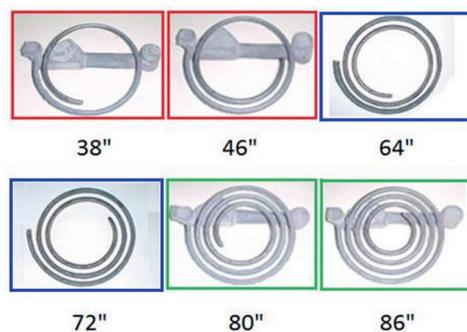


Figura N°11 . Fuente: Presentación: Como solidifican las aleaciones hierro carbono en la práctica - Ing. Norberto Rizzo. Año: 2016

Con el objetivo de sistematizar los aprendizajes en el proceso que derivan de los ajustes que se realicen, conviene mantener un registro de los valores hallados de longitud de espiral asociados a las condiciones del proceso y la pieza. Aquí es importante vincular el largo de la espiral con el sistema de alimentación, los módulos de enfriamiento de la pieza, la composición química del metal, la temperatura de sobrecalentamiento, etc.

El relevamiento y análisis de la información indicada en el párrafo anterior, provee mejores condiciones de inicio para la planificación de nuevas coladas, ya que predefine el valor de muchas variables que se han adoptado con éxito en procesos anteriores.

1.6.1.2 Cuña de temple

La mayoría de las empresas de fundición realizan pequeñas producciones de piezas, con espesores distintos y diferentes clases de aleaciones. Para estos casos se utiliza el control de nucleación mediante el uso de la cuña de temple para efectuar la corrección de aleación en la cuchara o el horno, según el caso.

El ensayo de la cuña de temple es de las herramientas de control más utilizadas en el análisis del metal líquido, para definir el grado de nucleación y estimar la clase de aleación obtenida.

La cuña de temple no determina un valor exacto y depende sobre todo de la experiencia del operador para realizar los ajustes necesarios en el metal líquido antes de realizar el proceso de colado. Normalmente conviene combinarlo con la realización de análisis químico del material. Con ello, se puede constatar la veracidad de lo concluido con el estudio de la cuña, y da robustez a la decisión de ajuste de aleación que se implemente.

La elección de la cuña de temple depende de las piezas que se quieran producir. La Tabla N° 6 muestra los tamaños y el diseño de la cuña conforme la norma brasileña ABNT NBR6846/2015:

CUÑA N°	B (mm)	H (mm)	A (mm)	LOGITUD (mm)	MÁXIMO W (mm)
W1	5	25	11.5	100	2.5
W2	10	32	18	100	5
W3	19	37	28	100	9.5
W3 1/2	25	44	32	130	12.5
W4	32	51	34.5	150	16

Tabla N°6 . : La prueba de la cuña como control de la nucleación en la fabricación de piezas de hierro fundido gris - Eduardo de Sousa Moreira. Fuente: www.eduardomoreira.eng.br

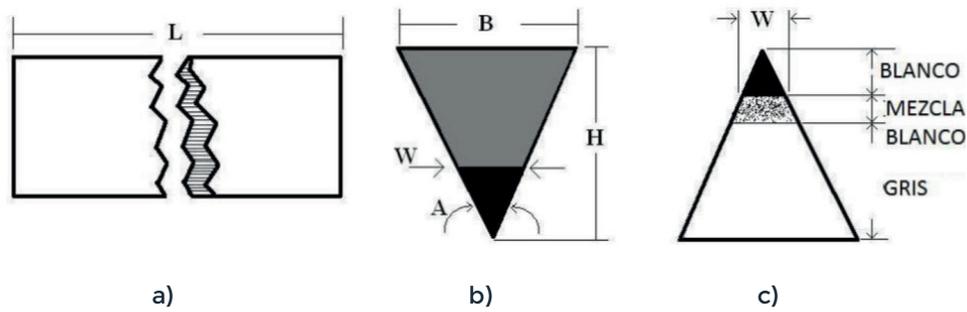


Figura N°12: La prueba de la cuña como control de la nucleación en la fabricación de piezas de hierro fundido gris - Eduardo de Sousa Moreira. Fuente: www.eduardomoreira.eng.br

En la práctica, se deben elegir las medidas de la cuña de temple que sea capaz de expresar la nucleación del material en las piezas a fundir. Para ello, se debe atender la relación entre el ancho de enfriamiento de la cuña (W) con el espesor “promedio” de la pieza. En otras palabras, si las piezas que se quiere fundir tuvieran un espesor de hasta 5 mm (Tabla N° 6 – columna B), entonces se debe seleccionar una cuña donde W sea de 5 mm como máximo (Tabla N° 6 – columna Máximo W).

Entonces ejemplificando la selección del modelo de cuña a utilizar, con una cuña $W2$ tendremos resultados del temple de cuña para espesores de piezas de hasta 10mm.

Se recomienda la realización del colado de cuñas al menos una vez por cada cuchara u horno, que mantenga la calidad metalúrgica del líquido. Esto es, en el caso de cubilote, una vez por cada cuchara antes de colar en los moldes. En el caso de hornos del tipo inducción o similar, se debe realizar antes de iniciar el vaciado del horno, pudiendo con esta información corregir toda la carga caliente antes de empezar el proceso de colado. Luego del colado debe realizarse un enfriamiento brusco, normalmente sumergiendo en agua.

La forma correcta de lectura es como se indica en la imagen c) de la tabla anterior, donde se detallan las distintas fases de la cuña. Aquí se observa que W se obtiene midiendo el ancho y no la altura de la zona blanca de la cuña. (la zona blanca corresponde a una estructura de cementita)

En función de la amplia difusión de este ensayo en la industria y la valoración cualitativa que se realiza, no profundizaremos aquí en aspectos relacionados a los posibles ajustes a realizar en el metal líquido antes de realizar el basamento del mismo. Por esta razón sugerimos contactarnos para indagar y conocer más detalles en la implementación del ensayo.

1.6.1.3 Carbono equivalente

El carbono equivalente (C_{eq}) es una representación cuantitativa del efecto del Silicio (Si) y el Fósforo (P) en la aleación. Permite encuadrar una fundición sobre el diagrama binario hierro-carbono de manera que sea posible conocer las temperaturas de inicio y fin de solidificación.

Este valor se obtiene a través del uso del equipo para medición de C_{eq} , donde se requiere del llenado con metal líquido de una probeta especial para este equipo. El equipo mide la velocidad de enfriamiento hasta la solidificación, lo que permite establecer y mostrar valores de C_{eq} .

Con un C_{eq} igual al eutéctico ($C_{eq} = 4,3 \%$) la colabilidad es máxima y la tendencia a la contracción es mínima. Con el aumento de C_{eq} la tendencia al temple y la resistencia mecánica disminuyen y se debe tener en cuenta que el concepto no tiene validez para contenidos elevados de Silicio.

De este modo, las propiedades de las aleaciones se pueden expresar en función del carbono equivalente siendo la ecuación representativa dada por la siguiente fórmula:

$$C_{eq} = \frac{C_{real} + Si + P}{3}$$

Donde,

C_{eq} : valor de carbono equivalente

C_{real} : valor de carbono deseado en la aleación

Si: valor de Silicio deseado en la aleación.

P: valor de Fósforo deseado en la aleación.

El uso del ensayo de C_{eq} se realiza generalmente en procesos donde se incluya un horno de cubilote (donde no podemos realizar un análisis químico previo al llenado de los moldes). Normalmente las determinaciones se realizan antes de iniciar el colado de los moldes y complementándose con el uso del ensayo de la cuña (indicado en el apartado anterior) permitirá tener una aproximación del tipo de aleación con la que se cuenta. Por tal motivo y dependiendo de la experiencia del operador y los tipos de piezas a obtener, se pueden realizar los ajustes necesarios tanto en la cuchara de colado como en las cargas introducidas en el horno.

Para un mismo porcentaje de C_{eq} es posible tener diferentes propiedades mecánicas en las piezas. Las mismas (dureza, tracción, etc) están relacionadas con la estructura metalográfica que adopta el metal líquido luego de la solidificación. Cabe mencionar que, a espesores mayores, las velocidades de enfriamiento disminuyen influyendo directamente en la estructura que se obtiene.

Lo contrario ocurre en piezas de espesores pequeños donde la velocidad de enfriamiento es mayor y también genera cambios en la estructura modificando sus propiedades mecánicas. En los casos indicados se pueden generar defectos en las piezas, los cuales se detallan en un apartado posterior.

Dependiendo del equipo con el que se cuente, se obtiene solo el valor del C_{eq} , o además los valores de C y Si. Esto es relevante ya que contar con estos valores permite estimar el tipo de aleación (hipo eutectoides con valores de C_{eq} menores a 4.3% e hiper eutectoides con valores de C_{eq} mayores a 4.3%). A su vez, estos datos posibilitan ajustar, a partir de los % de C y Si, los contenidos de la aleación que se está trabajando y así cumplir con los requisitos del cliente sobre el producto terminado.

1.6.1.4 Análisis químico

Para la determinación de la composición química pueden emplearse equipamientos que utilizan diferentes métodos tales como emisión atómica, absorción atómica, vía húmeda y rayos-X, entre otros. En algunos casos se requiere de una superficie del material para incidir con un haz o rayo, para luego analizar su reflexión o el resultado de su paso a través del mismo. Para otros métodos se requiera la generación de virutas del material para su procesamiento de acuerdo con el método que aplique. Como norma de referencia para extracción y preparación de muestras se indica la IRAM IAS U 500 - 170.

A través de este ensayo se puede comparar la composición química de la aleación en el horno y la deseada a partir del cálculo de carga realizado previamente al llenado del mismo, en función de la chatarra disponible y las ferroaleaciones requeridas.

En el caso de contar con un horno a inducción o de características similares, la determinación de componentes químicos es representativa de la composición de toda la carga.

En el caso de contar con un cubilote, como no se puede garantizar la homogeneidad de componentes en todo el volumen de la carga transformado en metal líquido, se deben extraer probetas en distintos momentos del vaciado. A su vez la corrección que se pueden realizar con los resultados obtenidos en el ensayo, solo permite corregir la aleación en coladas posteriores.

Como complemento del análisis químico se utilizan para el control del metal fundido las cuñas de temple, la determinación del carbono equivalente y la generación de la espiral de colabilidad.

1.6.1.5 Análisis metalográfico

La metalografía es la rama de la metalurgia que estudia la estructura de un metal o aleación y la relación con su composición química y propiedades mecánicas y físicas. Este estudio es llevado a cabo con la aplicación de diversas y variadas técnicas.

Los análisis metalográficos permiten establecer el tipo de aleación con la que se cuenta determinando el tipo de grano, el tamaño, forma y distribución de las distintas fases, como así también el grafito contenido en la muestra⁵. Del mismo modo también se pueden determinar las inclusiones metálicas y no metálicas, que, de acuerdo a su presencia, pueden tener efecto sobre las propiedades mecánicas del material como así también en su composición química.

Los análisis por vía metalográfica cuentan con normativa de referencia y a continuación se detallan algunas de ellas:

- IRAM IAS U 500 128 – Fundiciones de hierro. Método de clasificación del grafito.
- IRAM IAS U 500 121 – Fundición esferoidal austenítica.
- IRAM IAS U 500 120 – Productos de acero y fundición. Método de examen micrográfico.

Como la estructura metalográfica es determinante para el comportamiento de la pieza en servicio, las estructuras que deba satisfacer el producto deben ser parte de las especificaciones del cliente. Debido a ello, conviene que la sección, orientación y total de muestras para la realización de este ensayo esté acordada previamente con el mismo. Esto es porque debido a las características del proceso y tipo de pieza, se pueden encontrar estructuras diferentes en distintas partes de la misma.

1.7 Defectos comunes en la generación del producto

Existen numerosas contingencias que causan dificultades en una operación de fundición y originan defectos en la calidad del producto. Cuando se cuenta con especificaciones de cliente, es importante contar con los medios para verificar la existencia o no de estos defectos, sea por capacidades propias o mediante la contratación de terceros para tal fin.

Se detallan a continuación los defectos más comunes que ocurren en el proceso de fundición y se indican los procedimientos de inspección para detectarlos.

⁵ Si bien es un ensayo que determina características estructurales de la pieza, no permite realizar correcciones al proceso de forma inmediata, por lo que los resultados observados son utilizados para realizar correcciones en futuras coladas.

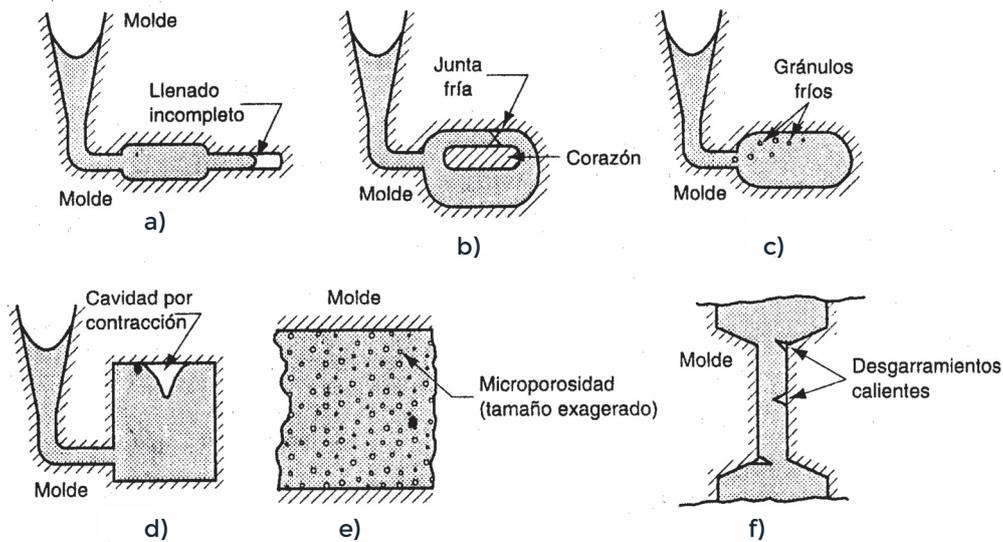


Figura N°13: Algunos defectos comunes en las fundiciones. Fuente: Ing. Mecánica – Tecnología Mecánica II - Facultad de Ciencias y Tecnología.

• **Llenado incompleto:** Aparece en una pieza que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causas típicas incluyen:

- 1) fluidez insuficiente del metal fundido,
- 2) baja temperatura del metal líquido,
- 3) baja velocidad de llenado del molde,
- 4) diseño del sistema de alimentación deficiente

Este defecto se puede observar a simple vista a través del ensayo visual.

• **Unión fría:** Cuando dos caras de metal líquido que fluye dentro del molde se encuentran para unirse, puede darse el caso de que no se cuente con la temperatura ideal para consolidar una solidificación correcta. Esto puede provocar falta de fusión entre ellas debido a solidificación o enfriamiento prematuro. Sus causas pueden ser:

- 1) fluidez insuficiente del metal fundido,
- 2) baja temperatura del metal líquido,
- 3) baja velocidad de llenado del molde,
- 4) diseño del sistema de alimentación deficiente,
- 5) espesores de piezas delgados

Este defecto se puede observar a simple vista a través del ensayo visual.

- **Metal granoso o gránulos fríos:** Las salpicaduras durante el vaciado de cuchara hacen que se formen gotas de metal que quedan atrapadas en la fundición. Un buen diseño del sistema de alimentación y de los procedimientos de vaciado de cuchara pueden evitar las salpicaduras y prevenir este defecto. Generalmente estas gotas quedan vinculadas a la superficie y se detectan a simple vista con el ensayo visual. Cuando exista un requisito de cliente vinculado a continuidad de volumen de material (inexistencia de discontinuidades de gas internas) se deberá evaluar la necesidad de implementar ensayos adicionales para detectarlas (tomografía, rayos x, ultrasonido, etc)

- **Cavidad por contracción:** Se trata de una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la pieza, y es denominado generalmente “rechupe”. Este defecto se puede resolver frecuentemente con un diseño apropiado del sistema de alimentación y se detecta a simple vista con el ensayo visual.

- **Microporosidad:** Se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través del volumen de la pieza. La misma se genera debido a la retención de gases dentro de la misma en el momento de la solidificación. Ocurre generalmente cuando se utilizan hoyos y estos liberan gases residuales al no ser tratados convenientemente antes de ser utilizados. Esto se verifica a través de ensayos no destructivos.

- **Desgarramiento caliente:** Este defecto se observa cuando una pieza cuenta con cambios de secciones generando una alta concentración de esfuerzos, causado por la ausencia del metal para contraerse naturalmente. En modelos utilizados en moldes de arena desechables o consumibles, esto se previene generando pequeños radios de curvaturas para evitar los vértices en dichas zonas.

Esto se verifica a través del ensayo visual.

Algunos defectos se relacionan con el uso de moldes de arena y, por lo tanto, ocurren solamente en el proceso con moldeo en arena verde. Se muestran a continuación algunos de los principales defectos que ocurren exclusivamente en la fundición en arena:

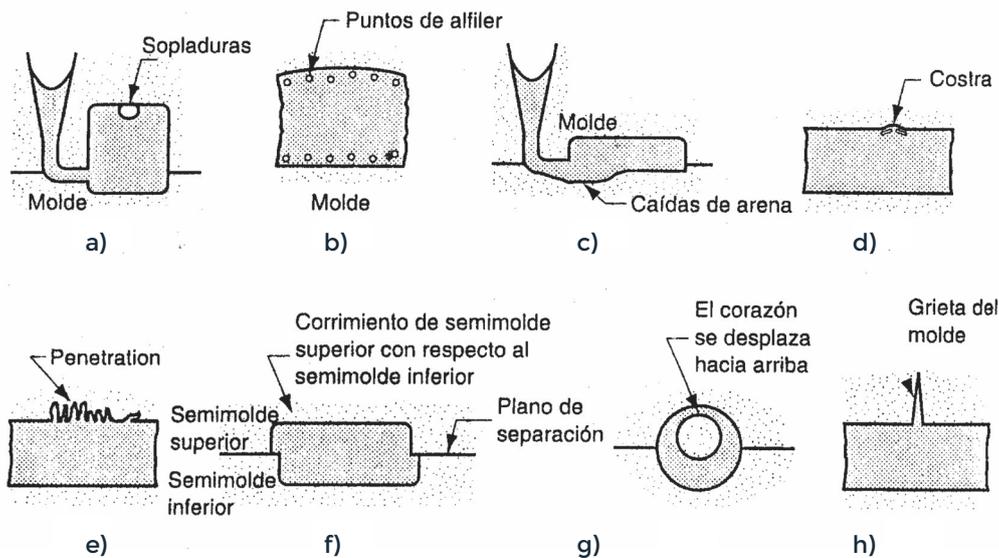


Figura N°14: Defectos comunes de fundiciones en arena. Fuente: Ing. Mecánica - Tecnología Mecánica II - Facultad de Ciencias y Tecnología

a) Sopladuras: Este defecto es una cavidad en forma de círculo causada por un escape de gases del molde durante el llenado. Ocurre en la superficie de la parte superior de la pieza o cerca ella. La baja permeabilidad y el alto contenido de humedad en la arena del molde son las causas principales. Esto se verifica a través del ensayo visual.

b) Puntos de alfiler: Es un defecto similar al de las sopladuras que involucra la formación de numerosas cavidades pequeñas de gas en la zona subsuperficial de la pieza. Estos se generan por escapes de gases generados por un noyo, o un alto porcentaje de humedad en la tierra de moldeo. Esto se verifica a través ensayos no destructivos (ultrasonido, tomografía, rayos X y otros ensayos para detectar discontinuidades subsuperficiales).

c) Caídas de arena: Este defecto provoca una irregularidad en la superficie de la pieza, que resulta de la erosión del molde de arena durante su llenado. Se presenta generalmente en forma de duplas de defectos:

- En la zona del bajo del molde como erosión de la arena en forma de arena sinterizada (mezcla de la arena del molde con metal solidificado).
- Como inclusiones de arena dentro de la pieza final o en su superficie. Esto se verifica a través de ensayos no destructivos (ultrasonido, tomografía, rayos X y visual).

d) Costras: Son áreas rugosas en la superficie de la pieza debido a la incrustación de arena o gases en el metal. Son causadas por desprendimientos de la superficie del molde que se descascaran durante la solidificación y quedan adheridas a la superficie de la pieza.

Otro causal de este defecto es cuando un noyo no está bien curado y desprende gases a la hora del llenado del molde. Debido a ello se observa en la superficie de la pieza un desprendimiento de capas de metal solidificado, que se lo denomina generalmente con el nombre de piel de cebolla. Se ve reflejado en la zona del sobre del molde. Esto se verifica a través del ensayo visual.

e) Penetración: Cuando el llenado del molde se realiza a alta velocidad, el metal líquido puede penetrar en el molde o en el noyo de arena. Después de la solidificación, la superficie de la fundición presenta una mezcla de granos de arena y metal. Una mejor compactación del molde de arena ayuda a evitar esta condición. Esto se verifica a través del ensayo visual.

f) Corrimiento del molde: Se manifiesta como un escalón en el plano de separación de la pieza, causado por el desplazamiento lateral del sobre con respecto al bajo. Esto ocurre generalmente cuando se utiliza un jaket o contrapeso sobre el molde de arena previo a su llenado. Esto se verifica a través del ensayo visual.

g) Corrimiento del noyo: El corrimiento del noyo puede ser generado por flotación del mismo en el metal líquido debido a que sus dimensiones son menores al de las portadas del modelo. Esto se verifica a través del ensayo visual.

h) Molde agrietado: Si la compactación del molde es insuficiente (uno de los causales de esto es la humedad de la tierra), se puede desarrollar grietas en el mismo a través de las cuales el metal líquido puede entrar para formar una rebaba en la pieza final. Esto se verifica a través del ensayo visual.

Como conclusión de este apartado, se destaca la importancia de seguir minuciosamente los pasos previstos a lo largo del proceso previo al llenado de los moldes (definición de requisitos del cliente, diseño del modelo y sistema de alimentación, controles en la arena de moldeo y en el moldeo, controles en el metal líquido, etc.). El cumplimiento de estos pasos minimiza las posibilidades de apariciones de estos defectos.

Si bien la inexistencia de estos defectos puede no aparecer como requisito del producto por parte del cliente, resulta obvio que su aparición puede generar una percepción de falta de calidad en la pieza o en el proceso. Por tal motivo, más allá que sea o no un requisito del cliente, debe evitarse la aparición de los defectos antes mencionados en las piezas entregadas.

Vinculado a la etapa de definición de requisitos del cliente, se considera de gran importancia incluir dentro de la negociación un apartado que clarifique los tipos de controles a realizar y la frecuencia de los mismos al producto terminado. De esta manera se acuerdan las condiciones para la satisfacción del cliente, respecto al cumplimiento de los requisitos técnicos impuestos.

1.8 Postproceso

En esta etapa se detallarán los procesos y controles que se le realiza al producto luego de su solidificación y enfriamiento dentro del molde.

1.8.1. Desmolde

El desmolde de las piezas fundidas se produce con la separación de las arenas de moldeo de la pieza fundida dentro del molde de arena. Este proceso se desarrolla de diferentes maneras dependiendo del sistema de moldeo y llenado de moldes con el que cuente la empresa.

De esta manera se separan:

- Las arenas que conformaban los moldes y que se destinarán a recuperación.
- Las piezas de fundición desmoldadas quedan preparadas para el proceso de granallado.
- El sistema de alimentación que se separa de la pieza se destina al sector de chatarra para su reutilización.

1.8.2. Granallado y Rebabado

Una vez separadas del sistema de alimentación y extraída manualmente toda la arena de sus paredes y cavidades, las piezas se suelen introducir en una granalladora. Gracias a la proyección de granalla de acero a gran velocidad se eliminan los últimos restos de arena que aún quedan adheridos y las rebabas existentes en la pieza. En algunos casos donde las rebabas no hayan sido eliminadas en su totalidad luego del granallado, puede ser necesario la aplicación de herramientas abrasivas para su remoción total.

Luego de este proceso, la pieza queda ya preparada para realizar el control visual para detectar posibles defectos y oportunamente pasar a otro proceso si así lo requiere.

1.8.3. Tratamientos térmicos

En función de las condiciones que tenga que cumplir la pieza en servicio, el cliente puede requerir características particulares que demanden la realización de tratamientos térmicos especiales. Algunas de las características que se pueden lograr son una mayor tenacidad, dureza, resistencia, etc. Incluso en muchos casos lo que se persigue con aplicación de estos tratamientos es lograr una mejor maquinabilidad de la pieza en procesos posteriores.

1.8.4. Controles a realizar en el producto

Estos ensayos se pueden ejecutar debido a diversas necesidades. Puede ser un requisito explícito del cliente debiendo estar claro el método y el muestro de piezas a realizar sobre los lotes en cuestión. También pueden aplicarse para el caso que, no siendo requisitos del cliente, convenga su realización para conocer las características y posibles defectos en las piezas, lo que permitirá evitar su despacho a cliente y trabajar en mejoras del proceso a futuro.

1.8.4.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en aplicar una carga en la dirección del eje longitudinal de una probeta de formas y dimensiones establecidas según norma, provocando un alargamiento de la misma, hasta llegar a la rotura o la suspensión del ensayo.

Este ensayo es el que mejor verifica el comportamiento de las fundiciones cuando son sometidas a cargas estáticas, ya que no sólo permite deducir algunas de sus propiedades mecánicas más importantes (ductilidad, tenacidad, etc.), sino también obtener el límite de elasticidad, la carga máxima y la tensión admisible o de trabajo.

La probeta normalizada se mecaniza de acuerdo con las siguientes normas:

- IRAM IAS U500 102 - Norma de ensayos de tracción.
- ASTM E8 - Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos.

Para la realización de este ensayo deberá estar acordada previamente con el cliente la zona a estudiar de la pieza, orientación para extraer y mecanizar la probeta, y las características de muestreo sobre todo el lote en cuestión.

1.8.4.2. Ensayos no destructivos

Son ensayos que permiten conocer el estado de una pieza sin modificar la estructura y las propiedades de la misma, utilizados para detectar fallas en el interior de la pieza o en su superficie. Normalmente las piezas que son sometidas a estos ensayos pueden continuar su proceso y ser entregadas al cliente.

Para la aplicación de estas técnicas se suelen usar principios de detección y medición a través de la aplicación de ondas (ultrasónicas, rayos gama y otros), sensores mecánicos y digitales, y distintos elementos de interface con la superficie (identadores, fluidos especiales, etc.).

1.8.4.2.1. Visual

A través de este ensayo se separan las piezas que cuenten con defectos en su superficie y sean identificables a simple vista. Cabe destacar que en este tipo de ensayos queda sujeto al criterio de la persona que lo está realizando y para limitar esta subjetividad se debe capacitar al mismo y brindarle las herramientas necesarias.

En tal sentido es importante que todos los operarios que tengan contacto con las piezas obtenidas tengan la capacidad de detección necesaria para identificar defectos, y así colaborar con el tratamiento de las piezas defectuosas de los lotes obtenidos, evitando que las mismas le sean entregadas al cliente.

Además, es conveniente contar con un banco de imágenes “modelo” de los criterios con los que la empresa determina la existencia o no de tal o cual defecto. Esto también es importante para la formación de las personas, como así también para los acuerdos con los clientes relacionados a defectos de superficies.

1.8.4.2.2. Dureza

Por medio de este ensayo se determinará la dureza con la que cuenta la pieza. El valor arrojado en este ensayo permitirá tener un conocimiento de las propiedades mecánicas y el tipo de estructura con el que cuenta la pieza.

La determinación de la escala de medida y la zona donde se realice la medición deben estar previamente acordadas con el cliente en función de los requisitos de este para las piezas, intentando resolver la medición con los medios que la empresa disponga.

La norma IRAM aplicable a medición de dureza en fundiciones es la IRAM IAS NM ISO 6506.

1.8.4.2.3. Dimensional

Por medio de este ensayo se comparará la pieza obtenida contra plano suministrado por el cliente. Los instrumentos de medición utilizados deberán estar previamente calibrados para asegurar una correcta medición.

El proceso de fundición puede arrojar piezas que en su superficie presenten irregularidades, fallas de forma y posición como así también otras geometrías no deseadas que conspiran contra la aplicación de los procedimientos de medidas. Por tal motivo se debe extremar el cuidado al momento de la utilización de los instrumentos de medida para que no se invaliden las mediciones que se ejecuten.

1.8.4.2.4. Radiografía

A través de este ensayo se busca detectar defectos internos en las piezas, a partir de la exposición de la misma a radiación penetrante X o Gamma. Los defectos son detectados por diferencias en la absorción de radiación del material, generando zonas oscuras/claras en la placa radiográfica. Defectos internos o externos, como cambios de espesores, fallas, corrosión, inclusiones y fisuras, quedan grabados en la placa radiográfica.

La norma IRAM aplicable para la realización de este ensayo es la IRAM NM ISO 5579:2016.

1.8.4.2.5. Tomografía computarizada de alta resolución

Mediante esta técnica es posible obtener un volumen digital de la muestra. Esto se logra exponiendo la pieza a la penetración de rayos gamma en la misma. En dicho volumen digital, se ilustran las diferentes densidades (poros, nódulos, inclusiones, etc) que componen al objeto en estudio y se presentan en un plano 3D de la pieza, lo que nos permite realizar diversos análisis tales como:

- Análisis de porosidades e inclusiones
- Comparación del plano original digital vs volumen obtenido por tomografía
- Inspección del solido renderizado
- Mediciones de espesores de pared
- Mediciones en general (ángulos, planos, distancias, etc.)
- Generar planos digitales

Las normas que aplican para la realización de este ensayo son:

- ASTM E1441-11 – Standar Guide for Computed Tomography (CT) Imaging
- ASTM E1814 -96 – Standar practice for Computed Tomography (CT) Examination of castings.

1.8.4.2.6. Ultrasonido

Este ensayo se suele detectar discontinuadas o defectos internos o superficiales de la pieza que presenten interfases de dos materiales distintos.

El ensayo de ultrasonido aprovecha la característica de las interfases (o discontinuidades) entre distintos materiales de reflejar, al menos una parte, de la intensidad de onda que recibe. Debido a esta característica, al incidir con una onda ultrasónica sobre defectos que

presenten cambios abruptos en su densidad (interfase) respecto de la que presente la pieza, podremos detectar reflejos de onda y caracterizarlos como asociados a determinados tipos de fallas.

Las normas que aplican para la realización de este ensayo son:

- IRAM-NM 330:2011 – Ensayos no destructivos. Ensayo por ultrasonidos. Principios generales. (NM 330:2011)
- IRAM-NM-ISO 16809:2016 – Ensayos no destructivos. Ultrasonidos. Medición de espesor (ISO 16809:2012, IDT).

1.8.4.2.7. Tintas penetrantes

Este ensayo se lleva adelante a través de la penetración de un líquido en discontinuidades superficiales que se encuentran en la pieza, por lo que solo permite detectar defectos que solamente se encuentren en la superficie.

Después de un determinado tiempo de penetración de la tinta, se remueve el exceso de la misma y se aplica un revelador. El revelador se combina con el líquido que ha penetrado en la discontinuidad originando una indicación en la superficie de la a.

Las normas que aplican para la realización de este ensayo son:

- IRAM-NM 327 – Ensayos no destructivos. Líquidos penetrantes. Terminología
- IRAM-NM 334 – Ensayos no destructivos. Líquidos penetrantes. Detección de discontinuidades.

1.9 Expendio de producto final

A los fines de garantizar que el producto se fabricó bajo los requisitos especificados por el cliente, se deben identificar las piezas obtenidas con un código el cual permita, a través del mismo, contar con los datos y / o registros de cada una de las etapas del proceso, lo que permite obtener la trazabilidad del mismo. Estos datos se deben reflejar en un informe técnico, el cual será entregado al cliente, donde se detallen las características principales del producto (código, tipo de material, composición química, dureza, etc).

Ante una queja o devolución de un producto por parte de un cliente, la trazabilidad permite la reconstrucción del proceso productivo para, a través del análisis de los correspondientes registros, establecer los factores que pudieron originar el defecto que lo hizo insatisfactorio.

2. Anexos

2.1 Control de producción y proceso

2.1.1 Registro de colada

Colada N°	PARTE DE COLADA												
Fecha													
Kg x carga	200												
Material												DEFECTOS	
Código de placa	Descripción de placa	Cant. de placas	Kg de piezas	Kg Sistema de alimentación	Cant. de cajas	Kg total x placa	Total de piezas	Piezas Buenas	Scrap	Rechupes	Desplazamiento	Falla de llenado	Cajas Rotas
						0	0		0				
						0	0		0				
						0	0		0				
						0	0		0				
					0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total de cargas		0,0											
Scrap		0											

*Modificar solo los campos en blanco

2.1.2 Registro de modelos / placa / matriz

CLIENTE	Costo de metal por placa	\$0,00	Costo fundición por kg	\$4,88
CÓDIGO DE PLACA	Costo de scrap	\$0,00	Cajas por hora	un.
MATERIAL	Costo tierra de moldeo por placa	\$0,00	Costo MO por hora	
Cantidad de modelos un.	Costo MO	\$0,00	Cant. de moldeadores	
Kg por pieza kg.	Costo total por placa	\$0,00.	Costo MO	\$0,00.
Kg en pieza por placa 0 kg.	Costo fabricación por pieza (sin scrap)	\$0,00	Costo MO por placa	\$0,00
Kg sistema de alimentación kg.	Ganancia deseada	%.	Costo de tierra de mold. x kg	\$5,07
Kg por placa 0 kg.	Precio venta sugerido	\$0,00	Cant. de tierra de moldeo kg. (8 kg por pieza)	
Costo material por placa \$0,00	Precio venta real \$0,00 (precio del mercado)		Precio de tierra de moldeo	\$0,00
Rendimiento 0	Precio venta real menos el scrap	\$0,00		
% de scrap	Ganancia real (descontando scrap)	%		
Scrap en kg 0 kg.	Scrap en kg	0 kg.		

*Modificar solo los campos grises

2.1.3 Registro de fusión

CALCULO DE CARGA DE HORNO INDUCCIÓN - NODULAR											Colada N°	
											Fecha	
											Material	
Materiales	Kg x carga	%	% C	Kg C anexado	% Si	Kg Si anexado	% Min.	Kg Mn anexado	% S	Kg S anexado	Precio x Kg	Costo x Kg
Chatarra de Fundición	240	48%	3,50	8,40	2,40	5,76	0,20	0,48	0,10	0,2400	\$6,00	\$1440,00
Chatarra 1020	245	90,74%	0,20	0,49	0,30	0,74	0,20	0,49	0,05	0,1225	\$11,00	\$2.695,00
Recarburante supergraf	11	4,07%	90,00	9,90	-	-	-	-	0,56	0,0616	\$100,00	\$1.100,00
Fe-Si	4	1,48%	0,00	-	75	3,00	-	-	-	-	\$1,30	\$5,20
Fe-Si granulado (cuchara)	4	-	0,00	0,00	75	3,00	-	-	-	-	\$10,00	\$40,00
Nodulizante	10	2,00	0,00	-	-	-	75	-	-	-	\$1,50	\$15,00
Carga Metálica/ Carga Total	485	500		18,79		12,50		0,97		0,4241	Costo por carga	
Perdidas Reducciones			18,79		10%	11,25	15%	0,14		-	\$5.295,20	
Composición química de la carga			3,76%		2,30%		0,03%		0,086%		Costo por kg	
Composición química óptima			3,2 - 3,5%		2,20 - 2,35%		0,1 - 0,2%		0,06 - 0,08%		\$10,59	
Análisis Químico			3,5		2,4		0,2		0,1			

Ceq 4,53%

Cant.de cargas 25 Costo de fusión \$132.380,00

Kg Fundidos	12500
Kg Colada	4500 36%
Kg piezas scrap	400 3%
Kg piezas OK	7600 61%

*Modificar solo los campos blancos

CALCULO DE CARGA DE HORNO INDUCCIÓN - GRIS											Colada N°	
											Fecha	
											Material	
Materiales	Kg x carga	%	% C	Kg C anexado	% Si	Kg Si anexado	% Min.	Kg Mn anexado	% S	Kg S anexado	Precio x Kg	Costo x Kg
Chatarra de Fundición	470,5	52,28%	3,50	16,47	2,40	11,29	0,50	2,35	0,10	0,4705	\$6,00	\$2.823,00
Chatarra 1020	400	93,13%	0,20	0,80	0,30	1,20	0,50	0,80	0,05	0,2000	\$11,00	\$4.400,00
Recarburante supergraf	16	3,73%	90,00	14,40	-	-	-	-	0,56	0,0896	\$1,00	\$16,00
Fe-Si	12	2,79%	0,00	-	75	9,00	-	-	-	-	\$1,30	\$15,60
Fe-Mn	1,5	0,35%	0,00	-	-	-	75	1,13	-	-	\$1,50	\$2,25
Carga Metálica/ Carga Total	870,5	900		31,67		21,49		0,97		0,7601	Costo por carga	
Perdidas Reducciones			31,67		10%	19,34	15%	2,74		-	\$7.256,85	
Composición química de la carga			3,52%		2,19%		0,31%		0,086%		Costo por kg	
Composición química óptima			3,2 - 3,5%		2,20 - 2,35%		0,5 - 0,6%		0,06 - 0,08%		\$8,06	
Análisis Químico			3,5		2,4		0,5		0,1			

Ceq 4,35%

Cant.de cargas 4 Costo de fusión \$29.027,40

Kg Fundidos	3600
Kg Colada	720 20%
Kg piezas scrap	300 8%
Kg piezas OK	2580 72%

*Modificar solo los campos blancos

CALCULO DE CARGA DE CUBILOTE - NODULAR												Colada N°		
												Fecha		
												Material		
Materiales	Kg x carga	%	% C	Kg C anexado	% Si	Kg Si anexado	% Min.	Kg Mn anexado	% S	Kg S anexado	Precio x Kg	Costo x Kg		
Chatarra de Fundición	51	42,50%	3,50	1,79	2,40	1,22	0,20	0,10	0,10	0,0035	\$2,00	\$102,00	Ceq	4,30%
Chatarra 1020	25	49,21%	0,20	0,05	0,25	0,06	0,45	0,11	0,05	0,00010	\$3,00	\$75,00		
Coladas	18,2	15,17%	3,50	0,64	2,25	0,41	0,20	0,04	0,07	0,00245	\$5,51	\$100,28		
Coque	25	36,23%	10,00	2,50	-	-	-	-	0,56	0,06	\$10,00	\$250,00		
Fe - Si piedra	0,8	1,16%	0,00	0,00	75	0,60	0,00	0,00	-	-	\$10,00	\$8,00		
Fe - Mn piedra	0	0	0,00	0,00	-	-	75	0,00	-	-	\$10,00	\$0,00		
Piedra Caliza	10,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	\$10,00	\$100,00		
Fe - Si granulado (cuchara)	1	-	0,00	0,00	75	0,75	-	-	-	-	\$10,00	\$10,00		
Nodulizante	2,4	2,00	0,00	0,00	-	-	0,25	-	-	-	\$10,00	\$24,00		
Carga Metálica/ Carga Total	94,2	120	4,22	3,05	0,25	0,0621					Costo por carga		Cant.de cargas	Costo de fusión
Perdidas Reducciones			18,79	10%	11,25	15%	0,14	-			\$669,28		60	\$40.156,92
Composición química de la carga			3,52%	2,28%	0,01%	0,052%					Costo por kg			
Composición química deseada			3,2 - 3,5%	2,20 - 2,35%	0,1 - 0,2%	0,06 - 0,08%					\$5,58			
Análisis Químico			3,5	2,25	0,2	0,07								
Análisis Químico Chatarra de Fundición			3,5	2,4	0,2	0,1								

Kg Fundidos	7200
Kg Colada	2400 33%
Kg piezas scrap	250 3%
Kg piezas OK	4550 63%

*Modificar solo los campos blancos

CALCULO DE CARGA DE CUBILOTE - NODULAR												Colada N°		
												Fecha		
												Material		
Materiales	Kg x carga	%	% C	Kg C anexado	% Si	Kg Si anexado	% Min.	Kg Mn anexado	% S	Kg S anexado	Precio x Kg	Costo x Kg		
Chatarra de Fundición	51	42,50%	3,50	1,79	2,40	1,22	0,20	0,10	0,10	0,0035	\$2,00	\$102,00	Ceq	4,30%
Chatarra 1020	25	49,21%	0,20	0,05	0,25	0,06	0,45	0,11	0,05	0,00010	\$3,00	\$75,00		
Coladas	18,2	15,17%	3,50	0,64	2,25	0,41	0,20	0,04	0,07	0,00245	\$5,51	\$100,28		
Coque	25	36,23%	10,00	2,50	-	-	-	-	0,56	0,06	\$10,00	\$250,00		
Fe - Si piedra	0,8	1,16%	0,00	0,00	75	0,60	0,00	0,00	-	-	\$10,00	\$8,00		
Fe - Mn piedra	0	0	0,00	0,00	-	-	75	0,00	-	-	\$10,00	\$0,00		
Piedra Caliza	10,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	\$10,00	\$100,00		
Fe - Si granulado (cuchara)	1	-	0,00	0,00	75	0,75	-	-	-	-	\$10,00	\$10,00		
Nodulizante	2,4	2,00	0,00	0,00	-	-	0,25	-	-	-	\$10,00	\$24,00		
Carga Metálica/ Carga Total	94,2	120	4,22	3,05	0,25	0,0621					Costo por carga		Cant.de cargas	Costo de fusión
Perdidas Reducciones			18,79	10%	11,25	15%	0,14	-			\$669,28		60	\$40.156,92
Composición química de la carga			3,52%	2,28%	0,01%	0,052%					Costo por kg			
Composición química deseada			3,2 - 3,5%	2,20 - 2,35%	0,1 - 0,2%	0,06 - 0,08%					\$5,58			
Análisis Químico			3,5	2,25	0,2	0,07								
Análisis Químico Chatarra de Fundición			3,5	2,4	0,2	0,1								

Kg Fundidos	3600
Kg Colada	720 20%
Kg piezas scrap	300 8%
Kg piezas OK	2580 72%

*Modificar solo los campos blancos

CALCULO DE CARGA DE CUBILOTE - GRIS											Colada N°		
											Fecha		
											Material		
Materiales	Kg x carga	%	% C	Kg C anexado	% Si	Kg Si anexado	% Min.	Kg Mn anexado	% S	Kg S anexado	Precio x Kg	Costo x Kg	
Chatarra de Fundición	71	35,50%	3,50	2,49	2,40	1,70	0,50	0,36	0,10	0,0035	\$2,00	\$142,00	
Chatarra 1020	20	46,19%	0,20	0,25	0,25	0,05	0,45	0,9	0,05	0,00010	\$3,00	\$60,00	
Coladas	85,7	42,85%	3,50	2,25	2,25	1,93	0,55	0,47	0,07	0,00245	\$5,15	\$441,36	
Coque	20	15,50%	10,00	-	-	-	-	-	0,56	0,06	\$10,00	\$200,00	
Fe - Si piedra	1,8	1,40%	0,00	75	75	1,35	0,00	0,00	-	-	\$10,00	\$18,00	
Fe - Mn piedra	1,5	1,16%	0,00	-	-	-	75	1,13	-	-	\$10,00	\$15,00	
Piedra Caliza	10,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	\$10,00	\$100,00	
Fe - Si granulado (cuchara)	0,3	-	0,00	75	75	0,23	-	-	-	-	\$10,00	\$3,00	
Fe - Mn granulado (cuchara)	0	2,00	0,00	-	-	-	75	0,00	-	-	\$10,00	\$0,00	
Carga Metálica/ Carga Total	176,7	200	6,92	5,26	0,25	0,0621					Costo por carga	Cant.de cargas	Costo de fusión
Perdidas Reducciones			18,79	10%	11,25	15%	0,14	-			\$979,36	60	\$58.761,30
Composición química de la carga			3,46%	2,38%	0,31%	0,032%					Costo por kg		
Composición química deseada			3,2 - 3,5%	2,20 - 2,35%	0,5 - 0,6%	0,06 - 0,08%					\$4,90		
Análisis Químico			3,5	2,25	0,55	0,07							
Análisis Químico Chatarra de Fundición			3,5	2,4	0,5	0,1							
Kg Fundidos	12000												
Kg Sist. Alimentación	2400	20%											
Kg piezas scrap	250	2%											
Kg piezas OK	9350	78%											

*Modificar solo los campos blancos

2.2 Diseño de un modelo a partir del cad de producción

Guía Práctica para el diseño de modelos

Pasos a seguir a la hora de diseñar el modelo de una pieza para su fabricación.

Paso N°1: Calculo de espesores (e) de las paredes para MATERIALES FERROSOS y NO FERROSOS

$$N = \frac{2l + b + h}{3}$$

Dónde:

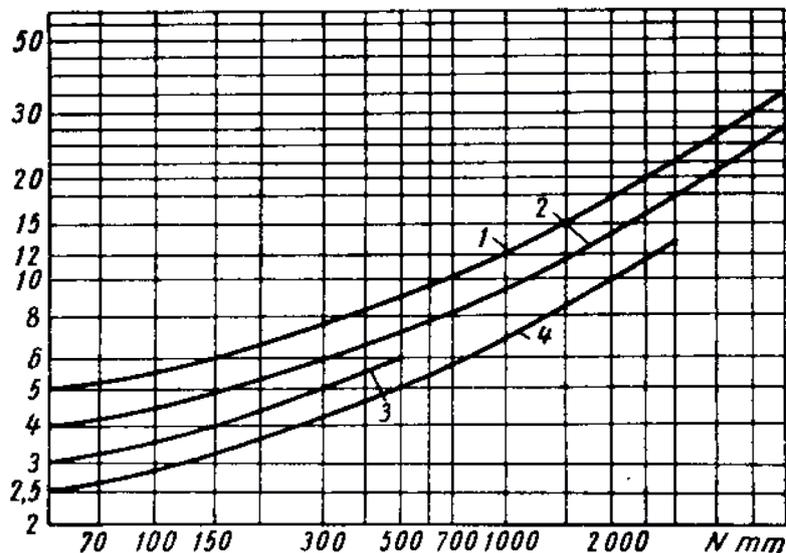
N: valor para ingresar a la tabla

l: longitud más grande de la pieza

b: longitud menor de la pieza

h: altura de la pieza

Una vez obtenido el valor N, procedemos a ingresar a la tabla adjunta con dicho valor en el eje “x”, y utilizando la curva que corresponda el punto donde corta dicha curva en el eje “y” nos dará el valor de e que necesitamos.



Paso N°2: Cálculo del ángulo de salida que facilitará el proceso de moldeo.

Se adjunta tabla ilustrativa con la cual podemos obtener dicho valor entrando a la misma con el valor de **Altura sobre el plano de separación h en mm.**

ÁNGULO DE DESMOLDEO			
Altura sobre el plano de separación h, en mm	Ángulo de inclinación de la pared α	Inclinación (tg α)	h tg α , en mm
Hasta 20	3°	0,052	Hasta 1
20 - 50	1°30'	0,026	0,5 a 1,25
50 - 100	1°	0,0175	0,9 a 1,8
100 - 200	45'	0,013	1,3 a 2,6
200 - 800	30'	0,01	2 a 8
800 - 2000	20'	0,006	5 a 12
Más de 2000	15'	0,004	Más de 8

Paso N°3: Cálculo de % de contracción a proporcionar a la pieza

Se adjunta en la siguiente página la tabla ilustrativa mediante la cual podemos obtener el valor buscado dependiendo del material de la pieza en cuestión.

AUMENTOS POR CONTRACCIÓN	
METAL	AUMENTO %
Fundición Gris	1
Fundición Cementada	0 a 2,5
Acero Fundido	2
Aleaciones de Al y Mg	1,25
Latón	1,5
Bronce, azúcar	1,5
Latón especial	2
Estaño	0,5
Zinc	1,5
Plomo	1

Paso N°4: Cálculo de sobre material

Se adjuntan tres tablas, dependiendo de la clase de proceso de fundición (1, 2 o 3), utilizamos la gráfica correspondiente. Ingresamos con el valor de la cota más grande (en el eje x), con el valor de la cota del lado que queremos que tenga el sobre material buscamos la curva correspondiente. El punto de cruce nos dará el valor necesario en el eje y.

Las siguientes tablas indican:

Tabla A: Sobre material para tratamiento mecánico (mecanizado) de proceso de fundición -clase 1.

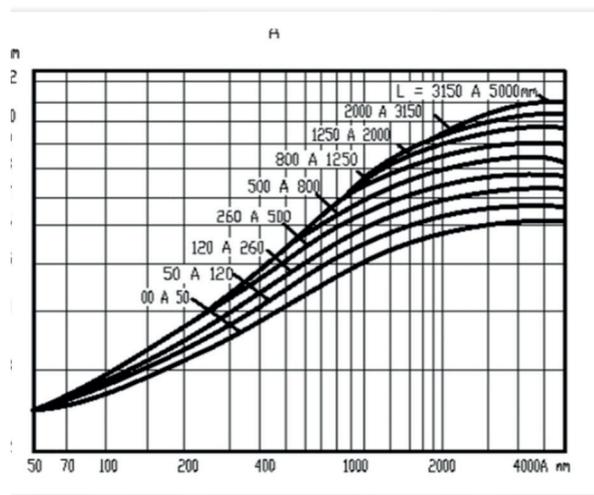


Tabla B: Sobre material para tratamiento mecánico (mecanizado) de proceso de fundición- clase 2.

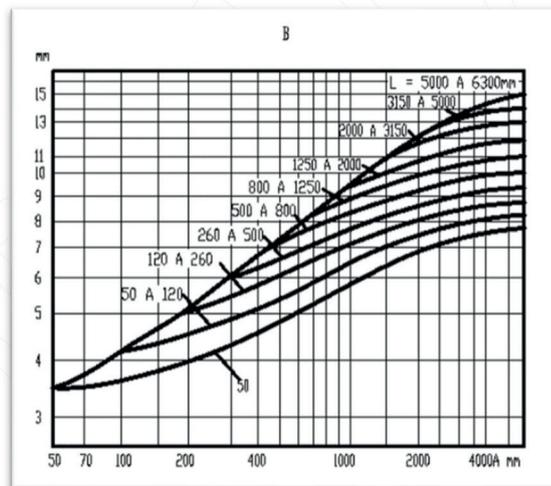
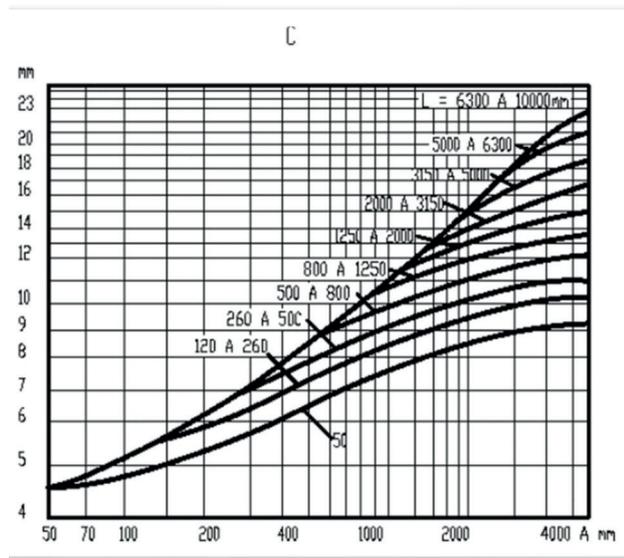
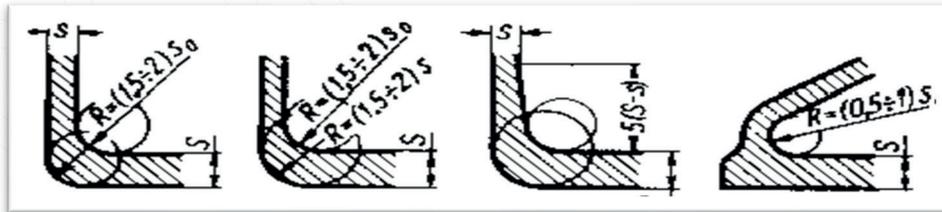
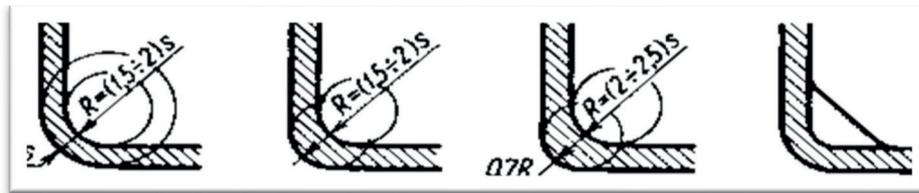


Tabla C: Sobre material para tratamiento mecánico (mecanizado) de proceso de fundición - clase 3.



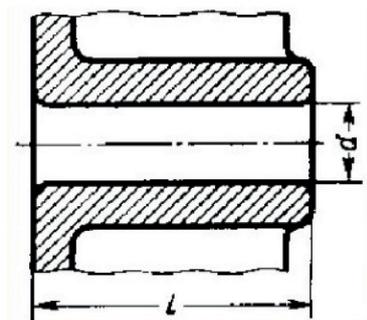
Paso N°5: Cálculo de radios interiores y exteriores

Se adjuntan en la siguiente página, imágenes ilustrativas para tener como referencia a la hora de la selección de los radios a utilizar en el momento del diseño.



Paso N°6: Diámetro mínimo de agujeros que pueden ser conservados en la pieza a diseñar para facilitar su moldeo.

Se adjunta imagen ilustrativa y formula para obtener el diámetro para la dimensión el agujero.



$$d = d_0 + 0.1 l$$

Donde:

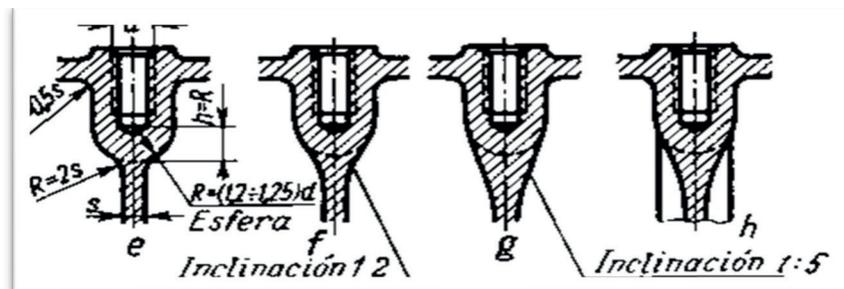
$d_0 = 5\text{mm}$ para aleaciones a base de aluminio y bronce

$d_0 = 7\text{mm}$ para fundición gris y nodular

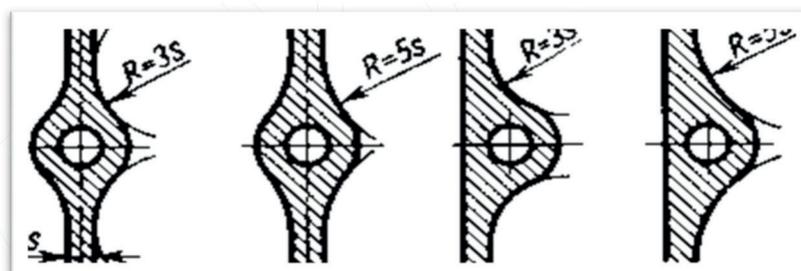
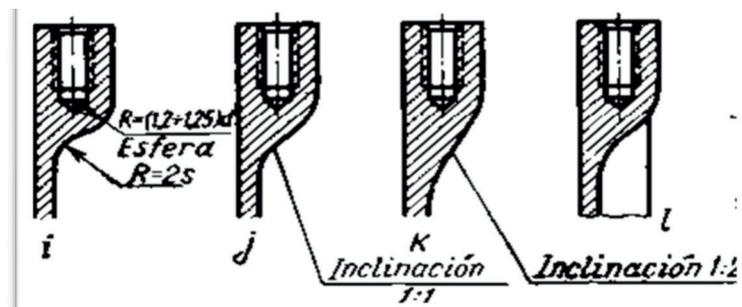
$d_0 = 10\text{mm}$ para acero fundido

Paso N°6: Criterio de relación en cambio de sección.

En un cambio de sección en una misma pieza, debemos tener en cuenta de que no sea tan brusco, ya que se pueden generar fisuras en las uniones, por lo tanto, el cambio debe ser menos brusco (forma correcta c y d, cambio menos brusco).

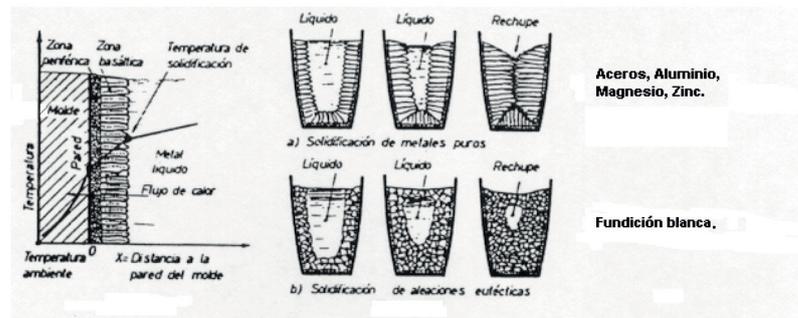


Criterio de en cambio de sección con perforado.

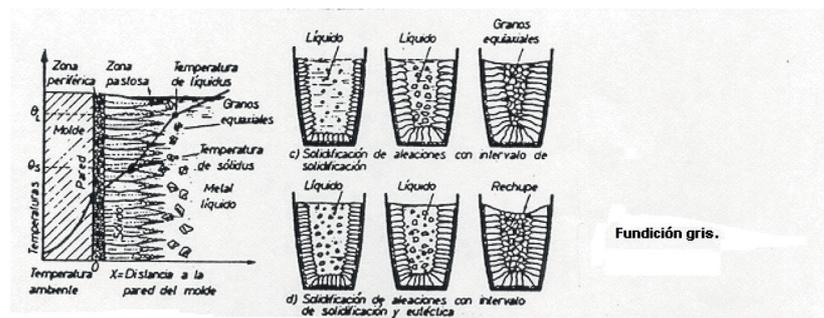


2.3 Cálculo del sistema de alimentación

Solidificación continua



Solidificación discontinua



La necesidad de contar con mazarotas surge cuando:

- Se tiene contracciones importantes en el líquido.
- Solidificación en forma continua.
- La pieza es gruesa (> 15 mm).
- Queremos que la pieza tenga resistencia y estanquidad.
- Requiera mecanizado.

Método de cálculo:

Criterios para el cálculo de la mazarota/montante

Determinar diámetro D de mazarota/montante

Criterio del volumen

Se determina el D_1 correspondiente al volumen mínimo que debe tener oara mazarota para cubrir la contracción de la pieza.

$$V_{maz\ min} = V_{pieza} \times c \times k$$

c= coeficiente de contracción volumétrica del metal (tabla 1)

k= coeficiente de seguridad

k= 3 si la distancia entre la marzzarota y la pieza es muy largo tomar k=2

Criterio de módulo

Módulo de enfriamiento representa la velocidad de enfriamiento de la pieza, suponiendo un vak uniforme del coeficiente de transmisión de calor en toda la superficie

$$\text{Módulo}_{enfriamiento} = \frac{V_{pieza}}{S_{pieza}}$$

Nota: en el caso de que la pieza tenga noyo

$S_{pieza} = S_{pieza}$ en contacto con la arena x 0,5 x

S_{pieza} en contacto con el noyo

TABLA 1			
METAL O ALEACIÓN	C	METAL O ALEACIÓN	C
Fundición Gris	3-5%	Cobre	4-5%
Fundición Blanca	6-7%	Aluminio	5-7%
Fundición nodular	4-5%	Aleaciones ligeras	5-8%
Aceros no aleados	5-7%	Aleaciones de Mg	4-5%
Aceros muy aleados	8-10%	Níquel	5-6%
Bronces de Sn	5-7%	Cuproníquel	5-5,5%
Bronces de Al	4-5,5%	Cinc	4-4,5%
Latones	6-7%	-	-

Paso 1: Cálculo del volumen de la pieza afectada V_{pieza}

Paso 2: Cálculo del volumen mínimo de la mazarota para cubrir la contracción de la pieza $V_{maz\ min}$.

$$V_{maz\ min} = V_{pieza} \times c \times k$$

Se debe cumplir que $V_{maz\ teórico} > V_{maz\ min}$

Se calcula de diámetro D para este volumen

Paso 3: Cálculo del Módulo de la pieza considerando si la misma tiene noyos M_{pieza}

$$\text{Módulo}_{pieza} = \frac{V_{pieza}}{S_{pieza}}$$

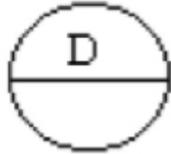
Donde:

V_{pieza} = Volumen de la pieza

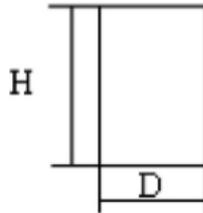
$S_{pieza} = S_{pieza}$ en contacto con la arena x 0,5 x S_{pieza} en contacto con el noyo

Paso 4: Se calcula el Módulo de enfriamiento de la mazarota.

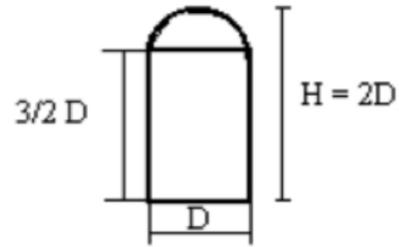
Escoger tipo de mazarota:



Mazarota esférica.



Mazarota cilíndrica
con $H=2D$.



Mazarota mixta

$V_{\text{maz teórico}}$

$$V_{\text{maz teo}} = \frac{\pi D^3}{6}$$

$$V_{\text{maz teo cilíndrica}} = \frac{1}{2} \pi D^3$$

$$V_{\text{maz teo mixta}} = \frac{11}{24} \pi D^3$$

$S_{\text{maz teórico}}$

$$S_{\text{maz teo}} = \pi D^2$$

$$S_{\text{maz teo cilíndrica}} = \frac{1}{5} \pi D^2$$

$$S_{\text{maz teo mixta}} = \frac{9}{4} \pi D^2$$

Se calcula el módulo de la mazarota a partir del de la pieza

$$M_{\text{maz teórico}} = 1,2 \times M_{\text{pieza}}$$

Seleccionar tipo de mazarota y calcular: esférica, cilíndrica

Una vez definido el tipo de mazarota y según el criterio del volumen:

$$V_{\text{maz min}} = V_{\text{maz teórico}}$$

de esto se obtiene el D_1 de la mazarota.

Paso 5: Según el criterio del módulo de enfriamiento

$$M_{\text{maz teórico}} = \frac{V_{\text{maz teórico}}}{S_{\text{maz teórico}}}$$

de esto se obtiene el D_2 de la mazarota

El valor de D se tomará del valor entre D_1 Y D_2 y las dimensiones de mazarota serán:

$$D = D_1 \text{ o } D_2$$

$$H = 2D$$

Comprobar que:

$H < a$ la altura de caja

$H > a$ la parte más alta de la pieza

Paso 6: Para calcular el número de piezas que puede alimentar esta mazarota hacemos:

$V_{\text{maz real}}$: la fórmula que se aplica es dependiendo del tipo de mazarota que se elija utilizando el valor de D obtenido.

$V_{\text{maz mínimo}}$: valor obtenido en Paso 2

El número de piezas a alimentar es

$$N = \frac{V_{\text{maz teórico}}}{V_{\text{maz mínimo}}}$$

Paso 7: Volumen del canal de distribución

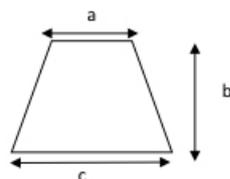
$$V_{\text{canal distrib.}} = 10\% \times (\text{n}^\circ \text{ piezas} \times V_{\text{pieza}})$$

Dimensiones del canal de distribución

$$V_{\text{canal distrib.}} = A_c \times L$$

donde:

L= longitud del canal (según diseño)
 A_c = Area del trapecio



$$a = \sqrt{\frac{Ac}{1,2}}$$

$$b = a$$

$$c = \left(\frac{2Ac}{b}\right) - a$$

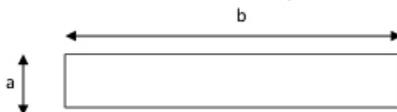
Dimensiones del ataque del canal

$$V_{\text{Ataque}} = \frac{Ac}{4} \times L$$

donde

L= 10mm

A_c = Area del trapecio



$$a = \sqrt{\frac{Ac}{1,2}}$$

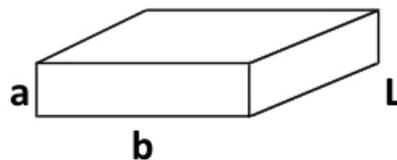
$$b = a$$

Dimensiones del ataque de la mazarota

$$L = \frac{1}{5} \times D$$

$$a = 0,7 \times D$$

$$b = 0,9 \times D$$



ALEACIÓN	DISTANCIA DE ALIMENTACIÓN (L en CM)
Acero 0.25%C	4.0
Acero 0.60%C	4.5
Aluminio 99.99%	10.0
Aluminio (Cu 4.5%)	6.0
Aluminio (Si 6%)	5.0
Aluminio (Si 7.0%)	6.0
Aluminio (Si 12.0%)	10.0
Hierro Gris	10.0
Hierro Nodular C.E = 3.6	6.0
Hierro Nodular C.E = 4.2	6.5
Hierro Nodular C.E = 4.3	7.0
Hierro Nodular C.E = 4.4	9.0

2.4 Gráfico simplificado de defectos y sus causales

Recepción MP	Sistema de Alimentación	Molde o Matriz			Fusión
		Tierra de Moldeo	Moldeo	Matriz	
Control de Mat. Prima	Diseño de Sistema de Alimentación	Humedad Proporciones de componentes	Control de ajuste de caja de moldeo Dureza del molde Control Visual del Molde Noyos Ajuste de placa de Moldeo	Control de Mantenimiento Preparación (pintura)	Carga de horno de fusión Calidad Metalúrgica del Líquido (Cuña, Ceq, Espec., Micro., EC) Control visual en el colado
					Observación y aplicación
Devoluciones por defectos (en el caso de que no hayan sido detectados en planta)					
Rendimiento de placa					
Alto porcentaje de Retrabajo					
% Scrap interno alto					

RENDIMIENTO DE LA PIEZA	EFICIENCIA DEL PROCESO
<p>DISEÑO / SIMULACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> Diseño de la pieza Modificable No Modificable <p>Sistema de alimentación</p> <ul style="list-style-type: none"> Cálculo de los módulos de enfriamiento <p>Calidad metalúrgica del líquido</p> <ul style="list-style-type: none"> Herramientas de control Metalografía Ensayos Mecánicos Espectro de Coabilidad Análisis Químicos Calificación de MP <p>Posterior al proceso</p> <ul style="list-style-type: none"> Durante la fusión Previo al proceso 	<p>Rechupe</p> <p>Microporosidad</p> <p>Dimensional</p> <p>Terminación Superficial</p> <p>Dureza</p> <p>Llenado incompleto/ Junta Fria</p> <p>Metal granoso o gránulos fríos</p> <p>Cavidad por contaminación</p> <p>Sopladuras</p> <p>Puntos de alfiler</p> <p>Caída de arena</p> <p>Costra</p> <p>Corrimiento del molde</p> <p>Corrimiento del corazón</p> <p>Molde agrietado</p>



GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS DE FUNDICIÓN GRIS Y NODULAR EN LA INDUSTRIA

APORTES DE PRÁCTICAS TECNOLÓGICAS PARA LA EFICIENCIA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE PIEZAS FUNDIDAS.

-  INTIArg
-  @INTIArgentina
-  INTI
-  @intiargentina
-  canalinti