



**Universidad
de Holguín**

FACULTAD DE INGENIERÍA
DPTO. MECÁNICA APLICADA

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA FABRICACIÓN DE CRISOL DE ACERO TERMO RESISTENTE PARA LA FUSIÓN DE METALES NO FERROSOS

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN
AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Autor: Juan Antonio Pérez Pérez

HOLGUÍN 2022





**Universidad
de Holguín**

FACULTAD DE INGENIERÍA
DPTO. MECÁNICA APLICADA

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA FABRICACIÓN DE CRISOL DE ACERO TERMO RESISTENTE PARA LA FUSIÓN DE METALES NO FERROSOS

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN
AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Autor: Juan Antonio Pérez Pérez

Tutor: Dr. C. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo

MSc. Luminita Dumitrescu

Consultante. Ing. Alexis Ronda Oro – Experto de HOLMECA

HOLGUÍN 2022



PENSAMIENTO

Sin capacidad científica no habría tampoco capacidad de asimilar tecnologías foráneas. No hay desarrollo económico posible sin inserción de la ciencia en la economía, no en nichos de excelencia, sino en toda la economía. Como país pequeño que somos, nuestra eficiencia económica depende de nuestra capacidad de insertarnos en la economía mundial, y eso solamente es posible con las palancas de la ciencia y la técnica, que es parte integrante de la defensa de la soberanía nacional.

Fidel Castro Ruz. Centro de Inmunología Molecular el 5 de diciembre de 1994.

RESUMEN

La investigación soluciona el problema ¿Cómo disminuir el costo de la producción de crisoles de aceros termo resistentes de manera competitiva?, para lo cual se desarrolló el objetivo general aplicar simulación numérica para disminuir el costo de la producción de crisoles de aceros termo resistentes de manera competitiva y cumplieron como tareas de investigación las siguientes: Evaluar los procedimientos existentes y los métodos de producción y uso de los crisoles para fusión de metales y aleaciones no ferrosas, evaluar los procedimientos existentes y los métodos de simulación numérica. Esta revisión permite establecer el marco teórico de la investigación y la fundamentación de la hipótesis, elaborar la metodología de producción de crisoles de acero termo resistentes, realizar la simulación numérica producción de crisoles de acero termo resistentes, aportando como contribuciones a la industria: Se disminuye el costo de producción con la aplicación de la simulación numérica a la tecnología para la producción de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.

Palabras Clave: Crisol, simulación numérica

ABSTRACT

The investigation solves the problem: How to reduce the cost of the production of crucibles of heat resistant steels in a competitive way?, for which the general objective was developed to apply numerical simulation to reduce the cost of the production of crucibles of heat resistant steels in a way competitive and fulfilled the following research tasks: Evaluate existing procedures and methods of production and use of crucibles for melting metals and non-ferrous alloys, evaluate existing procedures and numerical simulation methods. This review allows to establish the theoretical framework of the investigation and the foundation of the hypothesis, to elaborate the production methodology of heat resistant steel crucibles, to carry out the numerical simulation of the production of heat resistant steel crucibles, contributing as contributions to the industry: It decreases the cost of production with the application of numerical simulation to the technology for the production of crucibles of heat-resistant steels for the fusion of metals and non-ferrous metal alloys.

Keywords: Crucible, Numerical simulation

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTE Y ESTADO ACTUAL DE LA PRODUCCIÓN Y USO DE LOS CRISOLES.....	6
1.6. Antecedentes y estado actual de los aceros termo resistentes o refractarios	25
2.1 Introducción	34
2.2 Metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de crisol de acero termo resistente.....	35
2.2.1. Cálculo del peso de la pieza	36
2.3. Desarrollo de la metodología de fundición.....	37
2.4. Análisis numérico	48
2.5. Discusión de resultados y valoración socio económica.....	50
Valoración medioambiental	51
Contribución a la Defensa.....	51
CONCLUSIONES	52
Anexos	61

INTRODUCCIÓN

En Cuba a pesar de haberse logrado cierto desarrollo en la industria mecánica y metalúrgica, el estado actual del sistema económico del país no facilita la introducción de los logros de la ciencia y la técnica, entre otras razones, por la insuficiente disponibilidad de recursos financieros. La Universidad tiene la responsabilidad de realizar investigaciones y desarrollar nuevas tecnologías capaces de perfeccionar y dar respuesta a las necesidades siempre crecientes de la industria sideromecánica de nuestro país, para que puedan ser utilizadas eficientemente en la producción de materiales no ferrosos. La compra de crisoles de grafito para la producción de piezas fundidas de bronce y aluminio se dificulta por la obtención de recursos financieros y tecnológicos, por lo que nos dimos a la tarea de resolver esta situación mediante la elaboración de una tecnología alternativa para la obtención de los mismos.

Los primeros hornos especiales surgieron hace miles de años, los cuales no eran más que pequeños crisoles para la fundición de menas ricas de metales con bajo punto de fusión, como el cobre, el estaño y el plomo (Chang, 1991). También entre los materiales que el hombre trabajó desde la antigüedad se encuentra el bronce y el aluminio.

En la actualidad los crisoles de grafito tienen una gran aceptación. En estos hornos se funde el metal, sin el contacto directo con los gases de combustión y por esta razón se llaman algunas veces hornos calentados indirectamente.

La Empresa mecánica de Holguín de nombre comercial Holmeca es una de las entidades que tiene dentro de sus planes de desarrollo la implementación de la producción de aleaciones no ferrosas, la misma está ubicada en la carretera de San Germán Km 3 ½, Holguín, fue fundada en julio de 1980 y redimensionada en el año 2003 y consta de dos talleres fundamentales para su producción.

El taller de fundiciones no ferrosas en su entorno tecnológico cuenta con: horno de crisol para la fusión de bronce, horno Wilkinson para la fusión de cuproaleaciones, horno tambor para la fusión de aleaciones de aluminio y se moldea con pisonés neumáticos y mezclas en verde. La empresa tiene un taller auxiliar de herramental para la construcción de los modelos, accesorios, dispositivos y mantenimiento necesario para la ejecución de la producción.

El moldeo en las empresas es casi todo en verde y es escaso el empleo de métodos avanzados de obtener el molde. Esto dificulta y encarece la construcción de

dispositivos para la obtención de metales no ferrosos por vías conocidas en el mundo, pero por sus exigencias constructivas se hace imprescindible la aplicación de inversiones y la necesidad de automatizar los cálculos de estos parámetros en busca de la agilidad, competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad.

Por la importancia para el desarrollo de la industria cubana de la producción de artículos de metales no ferrosos, los altos costos y dificultades en la importación de los crisoles, se ha decidido la producción nacional de crisoles de aceros termo resistentes, estas tecnologías se ven encarecidas por la realización de los procesos de pruebas experimentales y series “Cero”.

Teniendo en cuenta las particularidades industriales antes citadas, se identifica como **problema científico** ¿Cómo disminuir el costo de la producción de crisoles de aceros termo resistentes de manera competitiva?

Esta investigación tiene por **objeto de estudio** la producción y uso de crisoles. El **campo de acción** de la investigación abarca la aplicación de análisis numérico.

La investigación plantea como **hipótesis** que: si se aplica el análisis numérico, se podrá disminuir el costo de la producción de crisoles de aceros termo resistentes de manera competitiva, facilitando de esta forma su implementación industrial.

Así, la investigación tiene como **objetivo general** aplicar el análisis numérico para disminuir el costo de la producción de crisoles de aceros termo resistentes de manera competitiva.

Se definieron como **tareas de investigación** las siguientes:

1. Evaluar los procedimientos existentes y los métodos de producción y uso de los crisoles para fusión de metales y aleaciones no ferrosas.
2. Evaluar los procedimientos existentes y los métodos de simulación numérica. Esta revisión permite establecer el marco teórico de la investigación y la fundamentación de la hipótesis.
3. Elaborar la metodología de producción de crisoles de acero termo resistentes.
4. Realizar el análisis numérico producción de crisoles de acero termo resistentes

La investigación identifica como **contribuciones a la industria**:

1. Establecer una tecnología para la producción de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.
2. Se disminuye el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.

Los **beneficios esperados** de la investigación se expresan en la reducción de los gastos y el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.

Métodos de investigación utilizados

A continuación, se exponen los principales métodos utilizados en la investigación, estos son:

- **Método histórico-lógico:** este se aplicó para establecer el estado del arte con respecto al la reducción de los gastos y el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.
- **Método de inducción-deducción:** se aplicó en la evaluación de los diferentes criterios que intervienen en la reducción de los gastos y el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.
- **Método de análisis y síntesis:** se utilizó para identificar los factores principales y sus características que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplicó en la identificación de las etapas que intervienen en la reducción de los gastos y el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.
- **Método de modelación:** se aplicó al modelar el proceso para la reducción de los gastos y el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.
- **Método computacional:** se utilizó durante la concepción y desarrollo de la

aplicación informática para asistir el cálculo y diseño de los parámetros que intervienen la reducción de los gastos y el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos. (SolidWorks).

- **Método experimental:** permitió crear las condiciones o adecuar las existentes en el estudio de las propiedades y relaciones del objeto, y para modificar las condiciones bajo las cuales tiene lugar el fenómeno de forma planificada. Además, para verificar la hipótesis formulada.
- **Método sistémico estructural:** se aplicó en la reducción de los gastos y el costo de producción con la aplicación del análisis numérico a la tecnología de fabricación de crisoles de aceros termo resistentes para la fusión de metales y aleaciones de metales no ferrosos.
- **Estructura de la tesis**

El contenido de esta tesis se ha organizado en una introducción, dos capítulos, conclusiones generales, recomendaciones, un apartado de referencias bibliográficas y un apartado de anexos.

En la «**Introducción**» se expone la motivación de la investigación, el objeto de estudio, el problema científico de la investigación, el objetivo, la hipótesis, la importancia y actualidad, del tema el campo de acción, la novedad científica y los métodos de investigación utilizados.

En el **Capítulo 1**, «Antecedente y estado actual de la producción y uso de los crisoles», se expone la revisión bibliográfica realizada, donde se analizan los aspectos esenciales relacionados. En el presente capítulo se exponen los antecedentes fundamentales relacionados con los hornos de crisol a escala nacional e internacional con el objetivo de describir los trabajos previos de la investigación. Se analizan los parámetros de los métodos de fabricación de crisoles más frecuentes, los aceros termo resistentes y refractarios con el objetivo de identificar las principales variables que intervienen en el desarrollo de la tecnología para la fabricación de crisoles, así como el análisis numérico.

En el **Capítulo 2**, «Metodología para la aplicación del análisis numérico a la fabricación de crisoles de acero termo resistente», se desarrolla la metodología para el diseño del experimento, se exponen los procedimientos y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación y los aspectos fundamentales de la metodología de cálculo de los parámetros para la aplicación del análisis numérico a la fabricación de crisoles de acero termo resistente. Se describe de manera exhaustiva los diferentes elementos y variables que componen esta metodología.

En las «**Conclusiones generales**» se establecen las conclusiones de la investigación en correspondencia con el objetivo planteado. En las «Recomendaciones» se establecen aquellos aspectos que permitirán cumplimentar y ampliar la investigación desarrollada. En los «Anexos» se muestran datos complementarios esenciales para facilitar la comprensión de la investigación desarrollada.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTE Y ESTADO ACTUAL DE LA PRODUCCIÓN Y USO DE LOS CRISOLES.

En el presente capítulo se exponen los antecedentes fundamentales relacionados con los hornos de crisol a escala nacional e internacional con el objetivo de describir los trabajos previos de la investigación. Se analizan los parámetros de los métodos de fabricación de crisoles más frecuentes, los aceros termo resistentes y refractarios con el objetivo de identificar las principales variables que intervienen en el desarrollo de la tecnología para la fabricación de crisoles, así como el análisis numérico.

Se concluye con un análisis de los principales sistemas de fusión existentes en el proceso de fundición.

1.1. Hornos llamas de crisol.

En la fusión de metales no ferrosos se usa una gran variedad de fusores, que se diferencian tanto por su estructura constructiva (rotatorios, de tambor, basculantes, etc.), como por la fuente de energías necesarias para la fusión (combustibles sólidos, líquidos, gaseosos y eléctricos).

Existe una amplia gama de fusores que usan como fuente de energía combustibles sólidos, líquidos o gaseosos entre los cuales se encuentran.

Los hornos de crisol son sencillos (utilizan como combustibles, carbón vegetal, coque, y funcionales (basculantes, con estructuras de acero, usan combustible líquido y sólido, con recuperadores de calor por lo que tienen una amplia aplicación como fusores de metales no ferrosos.

El calor en estos fusores se trasmite al metal a través de las paredes de crisoles de grafito, carburos de silicio o de hierros, lo que exime al metal del contacto con la llama o los productos de la combustión.

1.1. Características de los hornos de crisol

1. El calor se obtiene por combustión transmitiendo los gases calientes a la carga metálica, por los laterales del crisol, jugando un gran papel todas las formas de transmisión de calor, principalmente la convección y radiación hacia las paredes del acamara del horno.
2. La temperatura en el interior de los crisoles es menos a la de los gases de combustión siendo de 1200°C – 1400°C.
3. Los crisoles se caracterizan por una pérdida de calor significativa con la salida de los gases de combustión.
4. Los hornos estacionarios de tiro natural realizan el pulverizado del combustible con aire a presión o ventiladores con un flujo no mayor de 1 500 mm en la columna de agua.
5. Prácticamente no es posible regular la atmósfera del horno. El consumo del combustible sólido es muy grande y constituye del 50 al 60 % del peso de la carga.
6. La conducción del calor de los crisoles no metálicos es pequeña.
7. Se pierde mucho calor en el calentamiento del revestimiento refractario.
8. Disminuye la radiación con la salida de los gases de combustión.

Debido a todo esto el coeficiente de trabajo útil de los hornos de crisol estacionarios de tiro natural, principalmente el de coque con tiro natural, es muy bajo y constituye de un 3 – 6 %, con una conducción de colada eficiente puede aumentar al 7 % y más.

El balance calórico de los hornos de crisol estacionarios de tiro natural, según los datos del Prof. L. M. Marienbaj (Ex URSS), se caracteriza por los siguientes datos:

Calor útil – 7,7 %, pérdida a través de las paredes – 36,5 %, pérdida a través de la tubería 55,8 %.

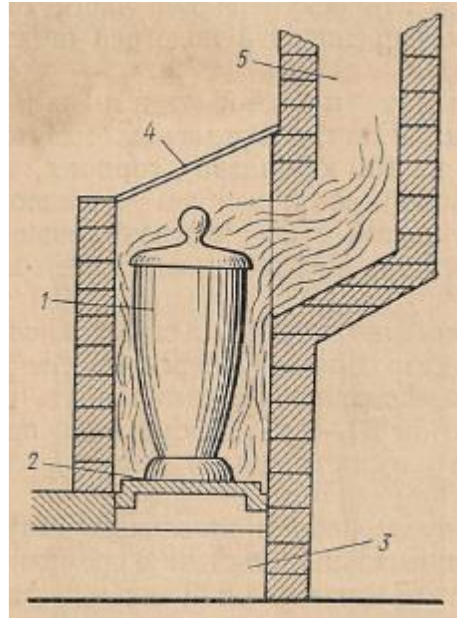


Fig.1.1. Horno de crisol estacionario. Fuente Prof. L. M. Marienbaj

Los datos enumerados a continuación son relacionados a los hornos de crisol modernos que utilizan combustible líquido y gaseoso.

El calor útil en estos hornos lo constituye de un 5 al 35 % de todo el calor y aumenta el coeficiente de trabajo útil del horno y depende de la temperatura del horno desde el comienzo de la fusión (caliente o fría).

La pérdida máxima de calor con la salida de los gases de combustión es alrededor del 50%, la temperatura de estos gases, en la salida es aproximadamente de 1000°C.

El trabajo útil del horno se puede aumentar significativamente recuperando una parte de las pérdidas de calor, utilizándolas en el precalentamiento de la carga y los gases.

Característica de los Hornos de crisol de combustibles sólidos:

Analizaremos los hornos calentados con Mazut, con un índice de consumo de 15 kg. por 100 kg. de aleación.

Horno frío: En estas condiciones la productividad disminuye un 30% y la colada se prolonga en un 50%.

Horno caliente: Con el calentamiento del horno y la carga la productividad del horno aumenta y se disminuye la conducción de la colada de un 20 a un 30%, además la productividad del horno durante la fusión de aleaciones de metales ligeros es 50 % mayor que para las aleaciones pesadas (Cu).

En la Tabla 1.1 se enumeran los índices medio de trabajo de los hornos de Mazut.

Tabla 1.1 Índices de trabajo de los hornos de combustible sólidos (Mazut).

Aleación	Condición del horno	Temperatura (°C)	Periodo de Colada (min.)	Consumo de combustible (kcal/kg.)	Coefficiente de trabajo útil
Ligeros	Fría	700 - 750	60 - 75	2000 - 2500	11 - 14
	Caliente		30 - 45	1300 - 1600	17 - 21
Latones	Fría	1000	90 -105	1300 - 1800	8 - 11
	Caliente		45 - 60	1000 - 1300	11 - 14
Bronces	Fría	1200 - 1250	90 - 120	1700 - 2300	7 - 10
	Caliente		60 - 75	1300 - 1600	10 - 13

1.1.2. Características de hornos de crisol de combustible gaseoso

El calentamiento de los hornos de crisol con gases tiene grandes ventajas y aumenta su aplicación.

El calentamiento con gases en comparación con los combustibles líquidos se diferencia en la regulación más sencilla de la colada, con ausencia de humos y un aumento del coeficiente de trabajo útil en un 50 %.

El proceso de ignición termina bajo el nivel del crisol y los productos combustión son neutrales. Con una regulación adecuada de los hornos gaseosos se evitan los residuos en la llama. Los gases resultantes son mucho menos agresivos en relación con el metal líquido que la llama de Mazut.

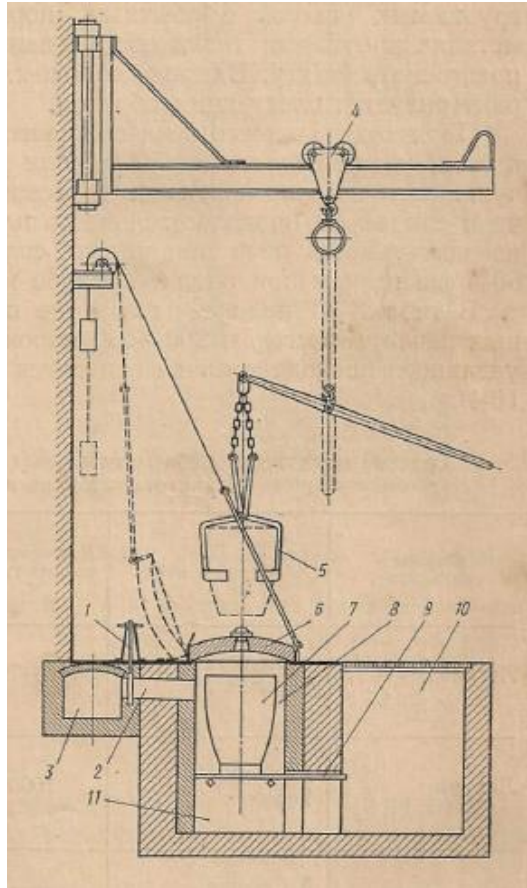


Fig. 1.2 Extracción de crisol Fuente Prof. L. M. Marienbaj

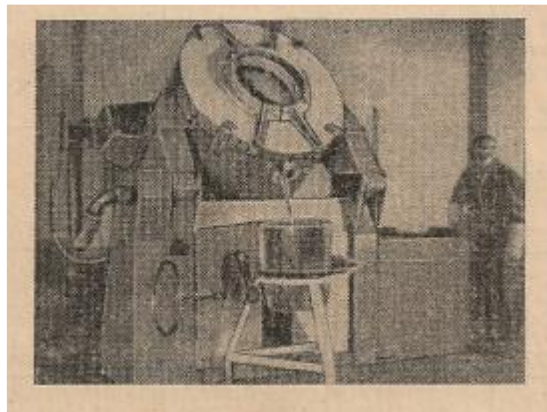


Fig. 1.3 Horno de Crisol Basculante Fuente Prof. L. M. Marienbaj

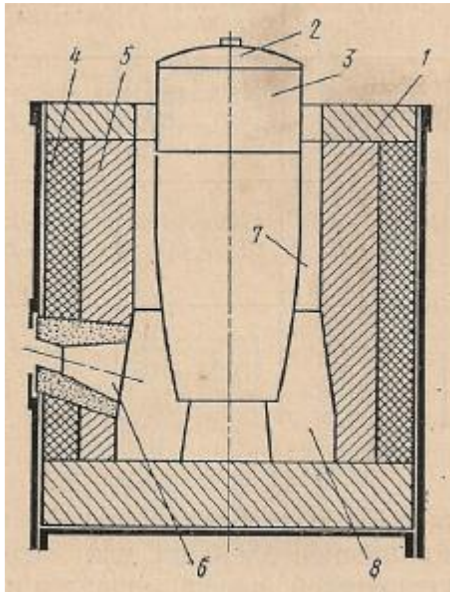


Fig. 1.4 Horno gaseoso abierto

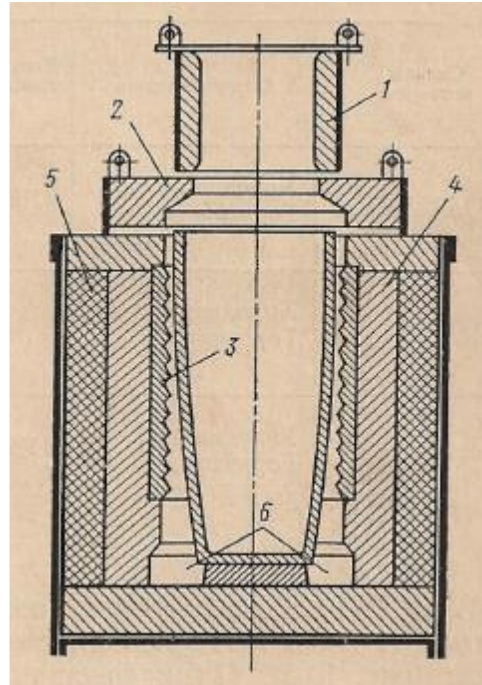


Fig. 1.5 Horno gaseoso cerrado

Fuente Prof. L. M. Marienbaj

La utilización de gases permite un calentamiento intensivo del revestimiento por convección y un calentamiento adicional del crisol como resultado de la radiación del revestimiento. Ver Fig. 1.5

Los dispositivos del horno contruidos para combustible líquido, para trabajar con gas no puede limitarse a un cambio de quemador (este error frecuentemente aparece en la literatura, catálogos y en la práctica). La utilización de gases, con una llama significativamente corta y una combustión más completa, permite disminuir las dimensiones de la cámara de combustión, como resultado disminuye el espesor entre el revestimiento y las paredes del crisol.

De esta manera se aumenta el flujo gaseoso y aumenta el coeficiente de transmisión de calor (α) La sumatoria del coeficiente de transmisión de calor (α) de la llama a la carga metálica aumenta.

$$\alpha = \alpha_{\text{cov}} + \alpha_{\text{cov-llama}} + \alpha_{\text{cov-revestimiento}}$$

Donde:

α_{cov} -- Coeficiente de transmisión de calor por convección de la llama al crisol.

$\alpha_{cov-llama}$ -- Coeficiente de transmisión de calor por radiación de la llama al crisol.

$\alpha_{cov-revestimiento}$ -- Coeficiente de transmisión de calor por radiación del revestimiento al crisol.

Tabla 1.2 Índices de trabajo de los hornos con combustible gaseoso./34/

No	Tipo de aleación	Condición del horno	Temperatura (°C)	Periodo de Colada (min.)	Consumo de Combustible (kcal. /kg.)	Coeficiente de trabajo útil
1	Ligeras	Fría Caliente	700 - 750	60 - 75 30 - 45	1400 - 1600 900 - 1000	20 - 17 28 - 31
2	Latones	Fría Caliente	1000	90 - 105 45 - 60	1200 - 1400 700 - 800	10 - 12 18 - 20
3	Bronces	Fría Caliente	1200 - 1250	90 - 120 60 - 75	1400 - 1600 1000 - 1100	10 - 12 15 - 16

En la Tabla 1.2 se enumeran los índices medios de trabajo de los hornos de crisol de combustible gaseoso. La superioridad de estos datos en relación con la tabla anterior es evidente.

1.2. Aumento de la productividad de los hornos llama de crisol. /37/

El aumento de la productividad de los hornos llama de crisol depende de un grupo de factores, en relación con sus condiciones de trabajo, Además de los factores ya mencionados (selección del combustible, tipo de transmisión de calor a la carga metálica, forma y dimensiones de la cámara de trabajo del horno), tienen gran significado los siguientes:

1. La cantidad de calor transmitido en una unidad de volumen de la cámara de combustión en relación con el consumo específico de combustible (kcal /100 kg)

2. La influencia del soplo (m^3/h) en la prolongación de la colada (en los hornos de combustible líquido).
3. Aprovechamiento de los gases calientes en el precalentamiento de la carga y el soplo.

Prolongación de la colada: Disminuye el aumento proporcional horario del consumo de combustible. Para la disminución del periodo de colada, es evidente la conducción más rápida posible. Con una conducción lenta el consumo de combustible no disminuye. La prolongación de la colada crea las condiciones para el aumento de la pérdida por fusión e inclusiones gaseosas.

En los hornos de combustible líquido la disminución del periodo de colada se realiza aumentando el soplo. Con una conducción rápida de la colada el consumo de energía no aumenta.

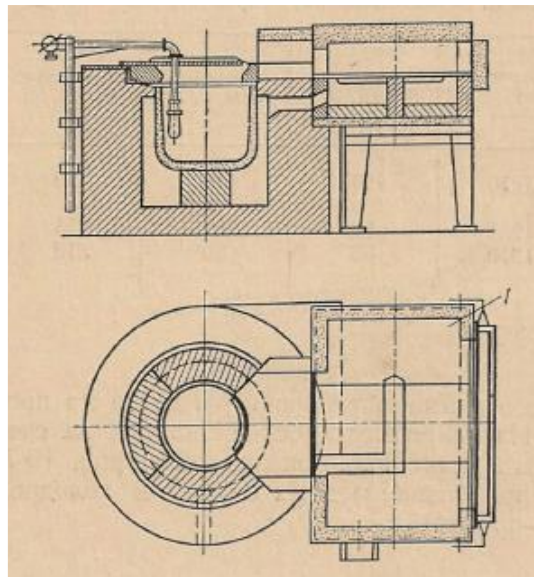


Fig. 1.6 Horno de combustible líquido Fuente Prof. L. M. Marienbaj

Influencia del precalentamiento de la carga: En principio en cualquier equipamiento utilizado para el precalentamiento de la carga se utiliza el calor recuperado de los gases de combustión., aumentándole coeficiente de trabajo útil de calentamiento del horno.

Es necesario sin embargo tener en cuenta que el precalentamiento de la carga debe realizarse en condiciones adecuadas, porque puede aumentar la pérdida por fusión e inclusiones gaseosas en el metal. Principalmente existe un gran peligro cuando se usa combustible líquido con llama larga. Para el precalentamiento se puede utilizar productos de combustión completa, los cuales se inflaman antes de su contacto con la carga.

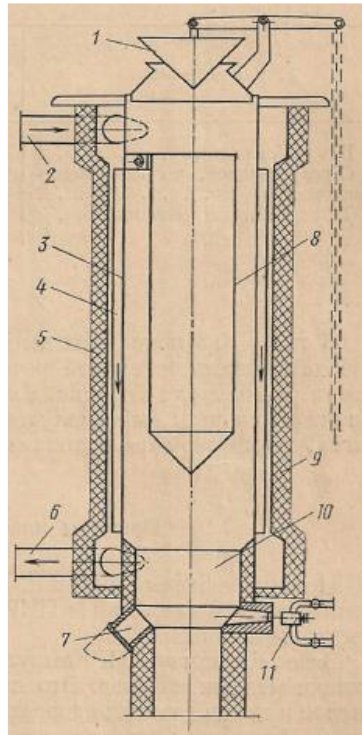


Fig. 1.7 Recuperador de calor Fuente Prof. L. M. Marienbaj

La correcta realización del precalentamiento de la carga permite disminuir el periodo de fusión y como resultado la disminución del consumo de combustible en un 40 %.

Influencia del precalentamiento del soplo:

Para el aumento de la productividad del horno y aumento de la temperatura de la aleación en los crisoles fusores por lo general se realiza el calentamiento del soplo en los recuperadores.

Los cálculos e investigaciones demuestran, que el precalentamiento del soplo hasta 400°C por recuperación de los gases de combustión da una economía del combustible de un 30%. En los hornos gaseosos este efecto es superior, que en los hornos de combustible líquido.

1.3. Recuperación de calor.

En la Fig. 1.3 se muestra un esquema de un horno de crisol dotado de una cámara para el precalentamiento de la carga con los gases de la combustión. Para el precalentamiento del aire y los gases, la construcción de los recuperadores que se muestra en la figura (1.7) es la más funcional.

Tabla 1.3 Influencia del soplo en los índices de trabajo de un horno de crisol /45/

No	Condición de la colada	Temperatura final del metal (°C)	Duración de la colada (min)	Consumo de Combustible (kg)	Temperatura del soplo (°C)
1	Sin recuperación	1 210	100	42	20
2	Recuperación, sin precalentamiento de la carga	1 265	80	36,5	255
3	Recuperación y precalentamiento de la carga	1 210	65	30	510

En la Tabla 1.3 se enumeran los datos sobre la temperatura del soplo en la productividad del horno de crisol. El calentamiento del aire se realiza por medio del calor transmitido por los gases de combustión a la instalación.

Fig. (1.7). Estos datos fueron obtenidos en la fusión de aleaciones de cobre en un horno de crisol frío.

1.4. Ejemplos de hornos llama de crisol.

Para la fusión y mantenimiento de las aleaciones de metales no ferrosos existe una amplia variedad de hornos, los cuales se describen a continuación:

La Fábrica "Elterma" de Polonia construye varios tipos de hornos de crisol para la fusión de aleaciones de cobre. Hornos basculantes con crisoles de grafito y dos quemadores (o un solo quemador con combustible líquido). El flujo de productos de combustión es orientado tangencialmente a la superficie inferior del crisol, los

gases se evacuan por la parte superior de la cámara de combustión por un orificio en la bóveda. Los hornos son dotados de paneles para la ubicación de los instrumentos de fundición. La temperatura de trabajo de estos hornos es de 1200°C, la capacidad del crisol es de 110 y 260kg.

Para la obtención en los hornos de crisol de aleaciones con buena calidad es necesaria la protección de la aleación de la interacción de los gases de la combustión y la reacción con los materiales del crisol. Un ejemplo de este equipamiento es el horno basculante “Coleman”, que utiliza gas licuado mostrada en la Fig. (1,6) El crisol para este horno tiene una construcción particular. El baño metálico está aislado completamente de los productos de combustión. La fusión es rápida. La construcción del horno permite ubicar funcionalmente los canales de evacuación de los gases y conducción de la atmósfera protectora. La capacidad de estos hornos es de 250 – 300kg. de aleaciones de aluminio.

En la Fig. (1.8). Se muestra un horno basculante para la fusión de metales no ferrosos. Estos hornos se construyen de tres dimensiones para combustible líquido y gaseoso para la fusión de aleaciones de aluminio y cobre.

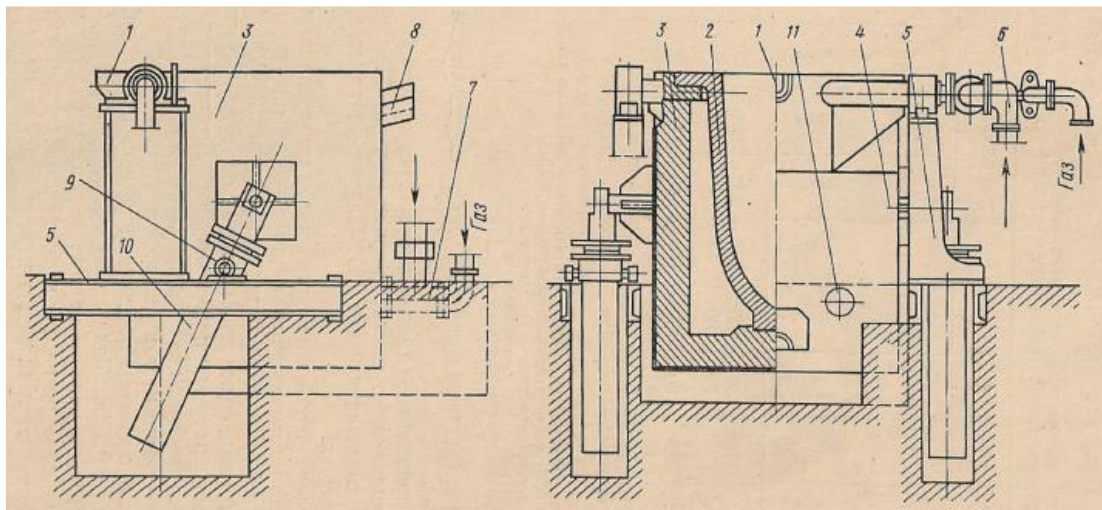


Fig. 1.8 Horno de crisol basculante Fuente Prof. L. M. Marienbaj

Tabla 1.4 Datos de capacidad, productividad y consumo de combustible. /8/

No	Índices	Horno BT 380, Cáp. 170 kg.				Horno BT 380, Cáp. 170 kg.				BT 380, Cáp. 170
		Aluminio	Latón	Bronce	Cobre	Aluminio	Latón	Bronce	Cobre	
1	Carga (kg)	170	500	500	500	225	680	680	680	585
2	Primera colada (min.)	35	70	80	95	45	105	120	135	70
3	Colada siguiente	30	60	70	85	40	80	90	105	60
4	Consumo de combustible (L ^{**})	21	41	48	58	27	55	61	71	48

* Para aluminio

** Consumo de combustible líquido determinado para una viscosidad 4,50 a 50°C. Para combustible gaseoso (4500 kcal /m³) y un consumo de 7%.

En la Tabla (1.4) se enumeran los datos de capacidad, productividad y consumo de combustible para estos hornos.

La carga sólida se precalienta y se carga al horno desde la plataforma. El horno es funcional para la fusión de retornos de grandes dimensiones. La pérdida por fusión de las aleaciones de Al constituyen menos del 1%. La fusión es rápida. El coeficiente de trabajo útil del horno es alto.

La Fig. (1.9) muestra un horno de crisol automatizado de combustible líquido o gaseoso para la fusión y mantenimiento de aleaciones de metales ligeros.

Se comercializan de tres tipos de estos hornos (de 100, 137 y 175 kg de capacidad), para la fusión y mantenimiento de las aleaciones de aluminio. El horno tiene controles automáticos de temperatura y el régimen de calentamiento. (Quemadores automáticos). El horno se caracteriza por un bajo consumo de combustible, un alto coeficiente de trabajo útil calórico, presta un servicio muy funcional y seguro.

La Fig. (1.10 a y b), muestran la vista general y corte del horno para la fusión y mantenimiento de aleaciones de magnesio. Estos hornos se utilizan par fusiones rápidas y seguras para fundidos de magnesio en moldes de arenas, en coquillas y por presión. La particularidad de la construcción del horno facilita la refinación de la aleación. El presenta un sistema de doble sistema de seguridad: sobre el crisol (atmósfera protectora SO_2) y sobre la tapa de toda la instalación y también ventilación y extracción de los productos de combustión, SO_2 y los vapores de los fundentes. El horno permite con facilidad la preparación del caldo metálico, tiene controles automatizados de combustión y regulación de la temperatura. La capacidad del horno se elige según las necesidades.

Para la fusión de estaño, plomo y sus aleaciones se utilizan crisoles de campana de construcción adecuada a la forma de la cámara, el calentamiento, servicio y extracción. En la (Fig. 1.11) se muestra la vista general y un corte de un horno estacionario con campana de hierro de forma particular, equipado con instrumentos de control automático y mando del régimen de temperatura y el proceso de combustión.

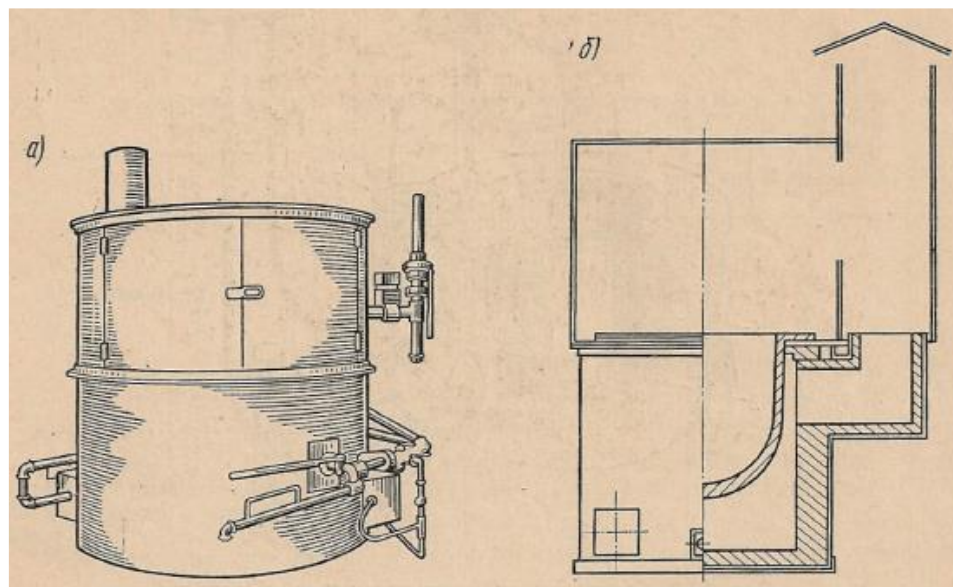


Fig. 1.9 Horno de crisol estacionario. Fuente Prof. L. M. Marienbaj

La capacidad de las campanas es de 25kg hasta 10t. La (Fig. 1.12) muestra la vista general de un horno para la fusión de estaño, plomo y sus aleaciones, el horno es de basculación manual, hidráulica o neumática. Las campanas de hierro (crisoles) pueden tener forma de semiesfera o parabólicas, con una capacidad de 0,06 hasta 0,4 m³. El horno está equipado con quemadores especiales de túnel colocados tangencialmente a las paredes de la cámara del horno.

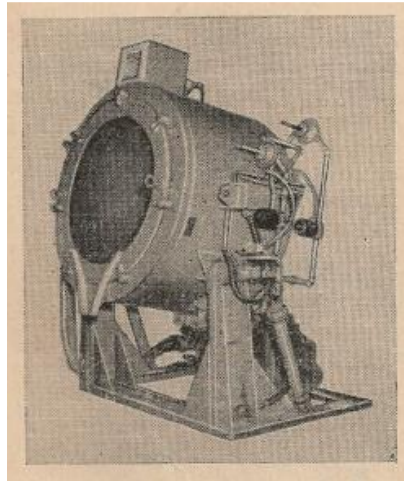


Fig. 1 .10 Horno de basculación Fuente Prof. L. M. Marienbaj

La Fig. (1.13 a y b) representa un horno rotatorio para la fusión de virutas, polvos metálicos, escorias, residuos y retornos de las coladas de latones, bronces, cobre, zinc, estaño, aleaciones antifricción, etc. Se comercializan cuatro tipos de estos hornos:

Para la fusión del Zn (capacidad 100kg.), para la fusión de retornos de aleaciones antifricción (capacidad 100kg.), para la fusión de virutas y residuos de latones (capacidad 330kg.).

El principio operacional y las formas particulares satisfacen un rendimiento metálico máximo y pérdidas metálicas mínimas por fusión y derrame.

La posición de trabajo del cuerpo del horno y el crisol es con una inclinación de 50 ° de la vertical y con rotación continua. La rotación y la forma del crisol suministran una mezcla constante del caldo metálico con la carga sólida de la aleación. La tapa del horno y el quemador se mantienen estáticos.

El calentamiento del crisol y el revestimiento del horno son uniformes. Se humaniza el trabajo al no necesitarse del mezclado manual, brinda un servicio seguro y funcional. El coeficiente de trabajo útil del horno es grande. La distribución del caldo metálico se realiza con una cazuela ubicada en un móvil. Fig. (1.14).

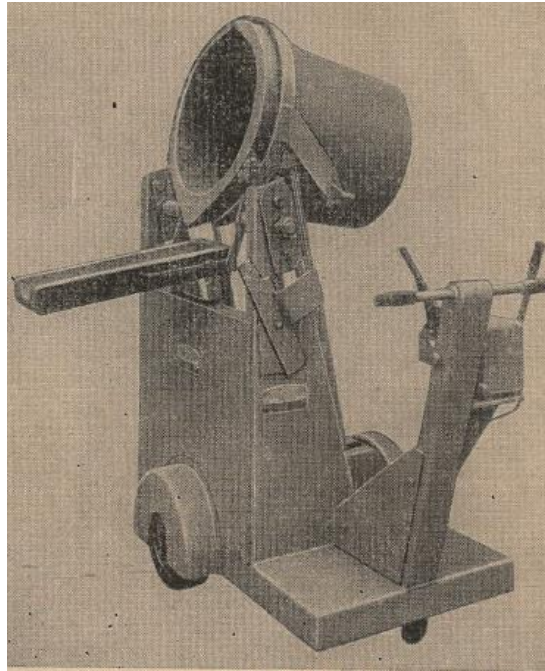


Fig. 1.11 Cazuela de vertido Fuente Prof. L. M. Marienbaj

1.5. Características de los Crisoles

La palabra *crisol* designa a ciertos cuencos refractarios que son vasos de laboratorio usados para fundir materias a altas temperaturas, y a las cavidades que reciben el metal fundido en los hornos de fundición de metales. Fue tomada del catalán antiguo *cresol*, forma hoy un tanto desusada excepto como tecnicismo y que actualmente es *gresol*, y cuyo significado básico, entre otros, es el de un tipo de cuenco o recipiente de barro o refractario con muchas acepciones específicas, pero que siempre incluyen la funcionalidad de contener alguna materia ardiente (Helena, 2017).

El crisol es uno de los artefactos más antiguos producidos por el hombre y fue “inventado” poco antes de la Edad de Bronce (9000 a.C.) cuando el hombre empezó a trabajar los metales para confección de utensilios domésticos, herramientas y armas (Corona Cadinhos, 2017). Los primeros crisoles eran construidos de arcilla y fibras

vegetales hasta que fue insertado en su composición el carbono que proporciona al crisol mayor resistencia térmica. Un gran avance tecnológico del crisol sucedió cuando se inició el uso de carburo de silicio en su composición, lo que le proporciona una mayor resistencia mecánica (Corona Cadinhos, 2017)

El procedimiento al crisol es el más antiguo de todos los métodos existentes en la fabricación de *acero* en forma líquida, derretida, es decir, del llamado *acero fundido*; según los datos existentes, este procedimiento surgió en Asia, en la época de la Edad Media temprana; el *acero al crisol* se destaca por unas propiedades mecánicas exclusivamente buenas, en cuanto a la forja y a la laminación, tanto longitudinal como transversal (Navas, 2015). Otro de los usos más primitivos del crisol fue la elaboración y obtención del platino para hacer metales acrisolados; más recientemente, los metales tales como el níquel y el circonio se han empleado en el crisol (Wikipedia, 2017).

En un principio los crisoles eran producidos manualmente. Actualmente los crisoles son producidos en prensas giratorias de gran presión y utilizan tecnología de punta en su elaboración (Corona Cadinhos, 2017). También dependiendo del tamaño y el material utilizado, pueden hacerse mediante el colado, el moldeo por inyección o la deposición química en fase de vapor (Goodfellow, 2017). Otro método sencillo de fabricación es el mecanizado. El diseño de los crisoles ha cambiado y evolucionado como las técnicas de la metalurgia han desarrollado. El hecho de que el diseño y uso de crisoles ha cambiado a través del tiempo los hace históricamente interesante y muy útil para los arqueólogos. Los primeros crisoles eran de forma irregular, a menudo inconsistente en el grosor, y por lo general no muy refractario. Los crisoles modernos se fabrican en un conjunto casi ilimitado de especificaciones, y se someten a temperaturas y presiones nunca antes soñado (Prucommercialre, 2017)

La característica que hace a un crisol útil es la capacidad de soportar temperaturas más altas que cualquier material que se coloca dentro, esto permite que el material dentro del crisol se pueda fundir y manipular conservando el recipiente (Prucommercialre, 2017). La importancia también está asociada a los procesos de

manufactura en la elaboración y obtención de diversas piezas coladas. Tienen una elevada utilización en la industria química y metalúrgica en numerosas operaciones como la fusión de aleaciones. La naturaleza de los crisoles depende del material o aleación a fundir y de la temperatura que se desea alcanzar. El volumen está en correspondencia con la cantidad de material que se necesita recoger en una sola colada (Sabelotodo, 2017). Están disponibles en tamaños, espesor y formas geométricas muy variadas, establecidas por quienes los diseñan o construyen; mayormente son cilíndricos y cónicos.

1. Algunas características generales de los crisoles son:

2. Elevadas temperaturas de funcionamiento.
3. Física y químicamente estables a altas temperaturas.
4. Resistentes al fuego, permiten ser calentados a fuego directo.
5. Buena conductividad térmica.
6. Muy buenas propiedades de choque térmico.
7. Flexibles y resistentes a la expansión térmica.
8. Alta resistencia mecánica.
9. Durabilidad y usabilidad.
10. Acristalamiento.
11. Muy buena resistencia química, a la oxidación, corrosión.
12. Superficies uniformes que previenen la erosión por fundido.
13. Elaborados con materiales de alta pureza. Material inerte.
14. Materiales de alta calidad para aplicaciones de alta tecnología.

1.5.1. Fabricación de Crisoles de fundición de metales.

Una superficie inerte, o superficie no reactiva, no sólo es útil, sino esencial para un crisol. Si la superficie es reactiva, el contenido dentro del crisol se puede comenzar a

mezclar con el material del propio crisol a las altas temperaturas (Prucommercialre, 2017). El punto de fusión de los materiales a utilizar debe ser mayor que el punto de fusión de los metales a fundir, deben ser refractarios y buenos conductores del calor (López, 2013). Los crisoles se clasifican de manera muy amplia, son construidos de disímiles materiales (refractarios o no), según el objeto al que se destinen: crisoles de fundición, de plata, de platino, de Hess, de cemento, de chamotte, de Passau o de Ips, ingleses, de plombagina, brascados, de magnesia, de cristal de roca fundido, de Rose, de Gooch, de Neubauer (Marketizer, 2009). Según los requerimientos pueden ser hechos de grafito, carburo de silicio, acero, hierro, arcilla, níquel, circonio, plomo, titanio, alúmina, barro refractario, porcelana, vidrio, sílice, oro, teflón, cobre, nimonio, zafiro, espinela, mullita, ferrotungsteno, molibdeno y otros materiales.

La composición química (característica más significativa) varía según la que trabaje cada fabricante y depende de la aplicación que tendrá ya que cada composición reacciona de manera diferente a la temperatura, la presión y al material que será tratado (Prucommercialre, 2017)

Crisol de grafito.

Unos de los materiales más idóneos para la construcción de crisoles es el grafito, puesto que resultan ser muy duraderos y se obtiene una alta eficacia en el funcionamiento de ellos. Son resistentes a temperaturas por encima de los 1600 °C. Se fabrican por moldeo y cocción a temperatura elevada de una pasta compuesta de grafito, arcilla y alquitrán principalmente (el crisol dura más cuanto más grafito contiene). También se fabrican crisoles tallados directamente en bloques de grafito artificial (Marketizer, 2009). El grafito, por ser un material con excelentes propiedades antiadherentes, los acabados de los crisoles son lisos facilitando así la reducción de mermas por incrustaciones de material fundido (Brunssen, 2017). Estos crisoles son frágiles y difíciles de manipular, pero tienen una larga vida útil si se utilizan apropiadamente (Sabelotodo, 2017)

No contaminan el material fundido con metales "extraños" como puede suceder con otros crisoles como los de acero (Sabelotodo, 2017). Para evitar el peligro de una

carburación se emplean crisoles de grafito provistos de un revestimiento interior adecuado (Marketizer, 2009). Los crisoles de grafito son utilizados para la fundición del cobre, la plata y el oro (que requieren una temperatura de al menos 1100°C) y en coladas de otros materiales preciosos, son excelentes para oficios de joyería. También en la industria del acero, el latón y el bronce. Resultan apropiados para la fundición de aluminio, bronce, plomo, hierro y en el manejo del platino. Son útiles para medir la concentración de oxígeno, hidrógeno o nitrógeno en metales como acero y silicona. Muy adecuados para ser usados en la obtención de ferroaleaciones complejas (Rodríguez, *et al.*, 1995; González, 2013; Perdomo *et al.*, 2015 y otros investigadores)

Existen crisoles que cumplen su función en los procesos de sinterización de metales y aleaciones de metales semipreciosos caracterizados por estar constituidos íntegramente de material grafito (Viñas *et al.*, 2015). Los crisoles de grafito son universales, se caracterizan por tener múltiples aplicaciones, alta refractariedad, toleran las temperaturas de fundición de metales resistentes y otros materiales, son ideales para fundiciones ferrosas y no ferrosas, especialmente adecuados para tratamiento de aleaciones, tienen muy baja reactividad, buenos para tratamientos con fundentes en fusiones intensivas, son utilizados en hornos de inducción o eléctricos, mantienen una larga vida de servicio.

El crisol de grafito se utiliza principalmente para fundir metales no ferrosos como cobre, latón, oro, plata, zinc, plomo y sus aleaciones. Los crisoles de grafito son especialmente diseñados para cada aplicación en específico, y se obtiene una alta eficacia en su funcionamiento, el grafito por ser un material con excelentes propiedades antiadherentes, los acabados de los crisoles son lisos facilitando así la reducción de mermas por incrustaciones de material fundido. Con estas propiedades de crisoles hechos con grafito de alta densidad, granos ultra finos y acabados de excelente calidad los crisoles de grafito, su uso es muy utilizado en la industria de la fundición por colada continua de oro, plata y materiales preciosos. Se pueden surtir fileras con cavidades redondas, cuadradas, rectangulares y en medidas especificadas por el cliente



Fig.1. 12 Crisol de grafito

1.6. Antecedentes y estado actual de los aceros termo resistentes o refractarios

Los aceros y superaleaciones resistentes a elevadas temperaturas, son aquellos materiales empleados en aplicaciones donde la temperatura de servicio excede los 650°C hasta alcanzar 1315°C aproximadamente. Las consideraciones tomadas para la selección de dichos materiales incluyen la resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas, resistencia al agrietamiento y/o fatiga térmica, resistencia a creep, etc.

Los aleantes que se utilizan para mejorar la resistencia a la termofluencia y a la oxidación a alta temperatura son fundamentalmente: Cr, Mo, Ni, W, Nb, V, Ti, Al y Si. El Cr, Al y Si forman óxidos refractarios densos y adherentes que resultan efectivos para bloquear la difusión de oxígeno y frenar el desarrollo del proceso de oxidación del material al formar Cr_2O_3 , Al_2O_3 o SiO_2 . El resto de los aleantes producen endurecimiento por solución sólida y por dispersión de finos carburos o precipitación de fases intermetálicas.

Los aceros más utilizados de estos tipos están cubiertos por las especificaciones de: ASME (American Society of Mechanical Engineers), ASTM (American Society of Testing Materials), API (American Petroleum Institute), ANSI (American National

Standard Institute) y AISI (American Iron and Steel Institute). Son muy usados en todo tipo de industria, por ejemplo en el proceso de piroconsolidación que se lleva a cabo en la Planta de Pellas de SIDOR se usan en su parrilla móvil, barrotes fabricados con una aleación de acero inoxidable con base Fe-Cr-Ni de acuerdo a la norma ASTM A297 grado HH.

Entre los aceros termoresistentes tenemos aceros al carbono, aceros al C-Mo y al C-Cr-Mo, Aceros inoxidables trabajados y fundidos y superaleaciones.

Los aceros al carbono son adecuados cuando la corrosión o la oxidación no son severas, se utilizan en condensadores, intercambiadores de calor o calderas, cuando las aplicaciones son de bajas sollicitaciones mecánicas se pueden utilizar los Aceros al carbono hasta 425°C y para temperaturas cercanas a 540°C pueden resistir por cortos períodos de tiempo.

Los aceros al C-Mo (Mo < 0.5%) y C-Cr-Mo (Mo entre 0.5 y 1% y Cr de 0.5 a 9%) tienen en general bajo contenido de carbono (0.15% máximo) y se emplean en tubos de caldera y en tuberías en plantas químicas y petroquímicas. Tienen estructura ferrítico-perlítica producto de los tratamientos térmicos de normalizado o de temple bainítico y revenido. En base a las relaciones de costo-comportamiento mecánico, los aceros al C se utilizan frecuentemente hasta 440°C. Entre 440 y 540°C se utilizan los aceros al C-Mo mientras que entre 540 y 650°C se usan los aceros C-Cr-Mo. Los aceros C-Mo se utilizan para el mismo tipo de equipamiento que los aceros al carbono, pero éstos pueden soportar mayores valores de tensiones debido a que el agregado de molibdeno aumenta la tensión máxima y reduce la velocidad de termofluencia para una tensión y temperatura dada.

Los aceros inoxidables para aplicaciones de altas temperaturas, pueden utilizarse en la condición de trabajado o fundido. Los grados trabajados se clasifican en Ferríticos, Martensíticos, Ausenticos y Endurecibles por precipitación (PH, precipitation hardening), mientras que los grados fundidos son Aleaciones Fe-Cr, Aleaciones Fe-Cr-Ni y Aleaciones Fe-Ni-Cr.

Los aceros inoxidables ferríticos son aceros de la serie AISI 400 con estructura ferrítica a todas las temperaturas, poseen contenidos de cromo en el rango de 10.5 a 30% y

algunos grados también contienen Mo, Si, Al, Ti y Nb que le confieren características particulares. No pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos y, en general, poseen baja resistencia mecánica y tenacidad. Tienen aplicaciones similares a los aceros al C-Cr-Mo, pero poseen como ventaja principal una alta resistencia a la oxidación, resistencia a la corrosión bajo tensión en cloruros y a la oxidación a bajos costos. Sus aplicaciones incluyen rotores de turbinas, tubos intercambiadores de calor. Los aceros inoxidable martensíticos son aceros que endurecen por transformación martensítica al aire desde la temperatura de austenización, el contenido de Cr está generalmente en el rango de 10.5 a 18% y el contenido de carbono puede ser de hasta 1.2%. Algunos grados poseen elementos como Nb, Si, W y V para modificar la respuesta al revenido. También se adiciona Ni para mejorar la resistencia a la corrosión en algunos medios y la tenacidad. Sus aplicaciones incluyen turbinas de gas y vapor, válvulas de vapor y ejes de bombas, etc., que requieren de resistencia mecánica y al calor hasta los 540°C.

Los aceros inoxidable austeníticos comprenden el grupo que contienen entre 18 a 25% Cr y Ni hasta el 20%, algunos grados contienen Mn hasta 18%. Estos aceros no son endurecibles por tratamiento térmico, pero pueden serlo por trabajado en frío, aunque a elevadas temperaturas se pierde el efecto debido a la recristalización de la estructura. Se los utiliza en partes de hornos, tuberías de intercambiadores de calor, tuberías de vapor, turbinas de gas, etc. Los grados H de los aceros inoxidable austeníticos se especifican para condiciones donde se requieren resistencia a la termofluencia y a la ruptura por termofluencia óptimas.

Los aceros inoxidable endurecibles por precipitación (PH) son grados que pueden ser endurecibles mediante un tratamiento de envejecido. Se clasifican en austeníticos, semiausteníticos o martensíticos de acuerdo a la microestructura obtenida luego del recocido de solubilizado. Sus aplicaciones incluyen las situaciones de mayor requerimiento mecánico a alta temperatura por corto período de tiempo junto con resistencia a la corrosión y a la oxidación hasta 425°C (industria aeroespacial, turbinas de gas, etc.)

Los aceros inoxidables fundidos están relacionados composicionalmente con los trabajados siendo la mayor diferencia el contenido de carbono. En los aceros inoxidables resistentes a altas temperaturas fundidos, el contenido de carbono varía entre 0.3 a 0.6% mientras que en los trabajados típicamente entre 0.01 a 0.25%. Estos aceros se designan por la Sociedad Americana de Fundidores de Aceros. La letra H indica que el acero será utilizado principalmente para servicios a altas temperaturas. La segunda letra denota el tipo nominal Cr-Ni de la aleación y los números que siguen a las dos primeras letras indican el porcentaje máximo de carbono, en la Figura 1 se muestra como es la clasificación de aleaciones fundidos resistentes al calor según la relación de los contenidos de cromo y níquel. Otra manera de clasificarlos es por el orden en que los aleantes están en mayor proporción: Aceros Fe-Cr (grados HA, HC y HD), Fe-Cr-Ni (grados HE, HF, HH, HI, HK y HL) y Fe-Ni-Cr. (grados HN, HP, HT y HU).

Las superaleaciones se desarrollaron a partir de los aceros inoxidables austeníticos pero con contenidos de Ni mayores. Son aleaciones base Ni (tipo INCONEL serie 600 y 700), base Fe-Ni (tipo INCOLOY serie 800) y base Co (tipo STELLITE) que se usan generalmente a temperaturas mayores a 540°C ya que poseen una excelente resistencia mecánica a elevadas temperaturas. Estas aleaciones se emplean, al igual que los aceros inoxidables endurecibles por precipitación, cuando los requerimientos de resistencia a la termofluencia y a la oxidación/corrosión son los más exigentes: industria aeroespacial, turbinas de gas, reactores nucleares.

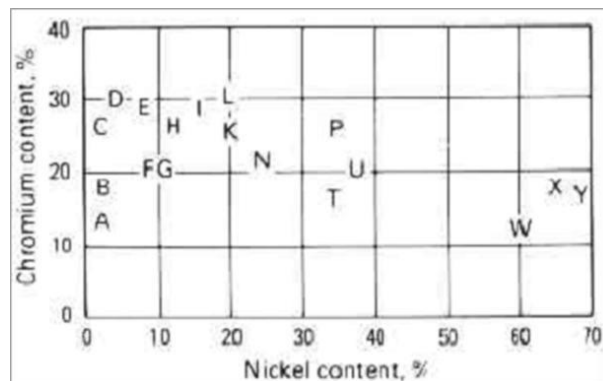


Fig1.13 - Clasificación de aleaciones fundidas resistentes al calor según la relación de los contenidos de cromo y níquel [1]

1.7. Simulación numérica

La simulación numérica ha alcanzado un alto nivel en el diseño y simulación de los procesos de fundición. Especialmente se centra en la solidificación y enfriamiento del metal de fundición y su comportamiento en las especificaciones de la pieza, el SolidCast® 8.0 se presenta como una herramienta combinado con el FlowCast® del mismo fabricante conforman un dúo de software que permiten simular tanto el llenado como la solidificación. SolidCast® utiliza el método diferencial de elementos finitos para realizar los cálculos de transferencia de calor.

Se trata de un software para técnicos que requiere unos previos conocimientos en el campo, pues no se trata de un software especialmente intuitivo, aunque bastante potente bajo un interfaz de usuario básico estéticamente.

Un punto muy importante a la hora del diseño del modelo a través de SolidCast® es su excelente herramienta de cálculo de mazarota.

Este software es capaz de analizar las zonas calientes que presenta la pieza y aconsejar un número de mazarotas, sus características geométricas y sus posiciones relativas. El proceso de simulación computacional a través de esta herramienta requiere las siguientes etapas básicas.

1. Crear un modelo de la pieza 3D.

- a) Se necesita ser capaces de crear un modelo de la pieza, de los sistemas de llenado y del sistema de compensación. Existen varios métodos para efectuarlo: Importar la geometría desde un sistema CAD como archivo .stl.
- b) Importar la geometría de la pieza desde CAD y crear los sistemas de llenado y compensación en SolidCast®.
- c) Crear la geometría en SolidCast®. Contiene una herramienta básica de creación de geometrías sencillas.

Mediante prioridades de las geometrías se pueden superponer figuras para obtener figuras más complejas. Además, mediante este método se pueden generar la superposición de geometrías que trabajen como machos. Un ejemplo es el que se muestra en la figura 1.7.

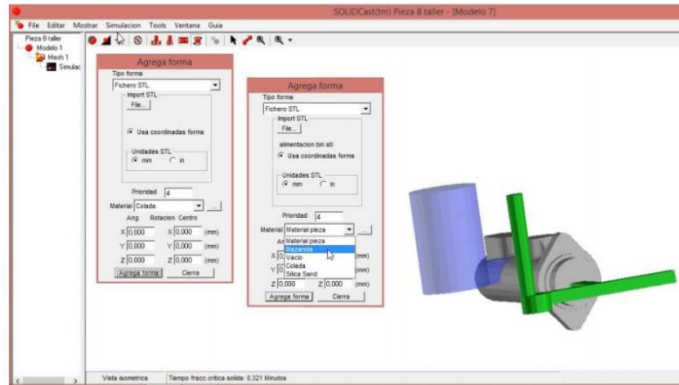


Fig. 1.14. Modelo de la pieza 3D

2. Selección de materiales y condiciones iniciales.

Se ha de seleccionar el material de trabajo, en este sentido el programa cuenta con una biblioteca de más de doscientas composiciones de materiales, además de la posibilidad de creación de nuevas composiciones basado en una serie de propiedades de los mismos: conductividad térmica, densidad, temperatura de solidus. Además, ha de seleccionarse los materiales a emplear en el molde, el cual incluye arena de moldeo, arena de machos, enfriadores, aislantes y exotérmicos, cáscara, molde metálico.

3. Mallado del modelo.

Para la generación del mallado, SolidCast utiliza el método de diferencias finitas de forma automática, lo cual significa que el mallado se realiza de forma rectangular. En este módulo es necesario especificar las características del molde: geometría, material, espesor y molde abierto o cerrado. Introducidos estos datos, solo queda especificar la cantidad de nodos del mallado o las dimensiones de cada nodo en milímetros. Para estudios ágiles en tiempos de procesados se suelen utilizar nodos de más de 5 mm, para estudios algo más rigurosos se suele utilizar 3 mm para cada nodo, todo esto dependiente del procesador de la computadora de trabajo.

Una vez generada la malla, se genera a su vez las características físicas del molde y modelo y es posible cuantificar volúmenes y pesos del conjunto.

4. Cálculo de la simulación.

En este punto, en SolidCast se puede elegir entre generar la simulación mediante un algoritmo más ligero en el que no se genera simulación del llenado, o un algoritmo con

un nivel medio o alto de detalle en el que se llama al programa de procesado FlowCast para la generación de la simulación del llenado y al programa de procesado Lastit para simulación de la solidificación y el enfriamiento del modelo.

Dependiendo del nivel de detalle que se quiera generar, evidenciado en la dimensión unitaria de cada malla, este necesitará más recursos de cálculo.

Además existe la opción de especificar el final de la simulación: estando la pieza totalmente sólida, cuando pieza y mazarota están totalmente sólidas, cuando se alcanza un tiempo o una temperatura previamente especificado, o bien con parada manual.

En la conclusión de la simulación se muestra una ventana resumen de todos los resultados de ella.

Análisis de resultados

Una vez finalizada la simulación, se pueden analizar los resultados mediante ploteos de superficies isométricas superficiales o mediante cortes transversales en la pieza. Véase figura 1.12.

- 1) Temperatura. Permite mostrar tanto temperatura de la pieza y la mazarota como del conjunto entero incluyendo el molde.
- 2) Tiempo de solidificación, tiempo de liquidus y tiempo de fracción crítica sólida. Permiten generar una imagen del estado del sistema para un “step” considerado.
- 3) Gradiente de temperatura y velocidad de enfriamiento.

En este apartado también es posible ejecutar el módulo de cálculo de mazarota.

En este módulo se puede generar la mazarota que mejor se acople a solventar los posibles defectos de la pieza según la geometría de la misma. Se indica el nivel de sensibilidad del proceso que está referido al número de mazarotas según se tenga una pieza compacta o de geometría mixta, y se debe indicar que dos factores se han de dejar fijos para el cálculo: módulo, altura, diámetro y relación altura - diámetro.

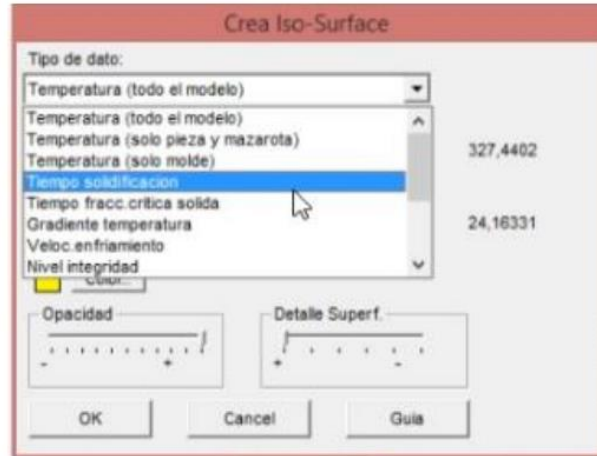


Figura 1.15 SolidCast, resultados de la simulación.

Resultados de la simulación.

Se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones según los casos definidos en la tabla 3.7 y los programas de simulación empleados.

5.3.1 Resultados del diseño 1

1A Sin mazarota.

Temperatura de colada: = 320 °C

Temperatura del molde: = 20 °C

Click2Cast

Condiciones de la simulación:

Vi: 0,7m/s

Espesor de la malla: 3 mm

Diámetro del caudal de entrada: 5 mm

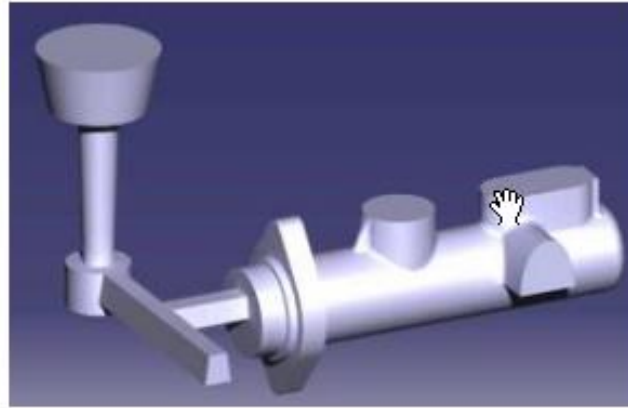


Fig. 1. 16 Resultados de la simulación. Modelo 3D.

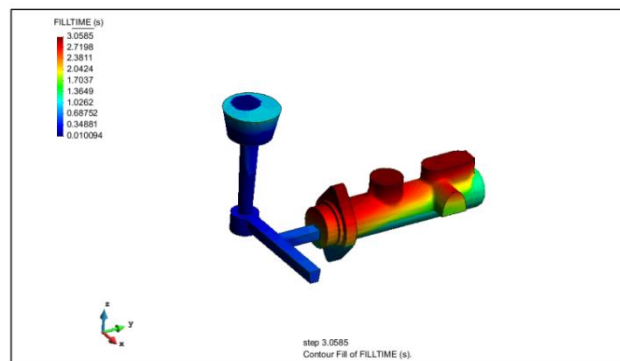


Fig 1.17 Resultado de la simulación 1A: FILL TIME Click2Cast Tiempo de llenado = 3,0585 s

Conclusiones parciales

En la consulta con experto y la revisión bibliográfica efectuada no se encontraron resultados sobre el análisis numérico, para la fabricación de crisoles de aceros termo resistentes con el objetivo de eliminar los procesos de prueba experimental y serie “Cero” de manera sostenible y competitiva.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE APLICACION DEL ANÁLISIS NUMERICO. LOS PARÁMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE FUNDIDOS DE CRISOLES DE ACERO TERMORESISTENTE.

2.1 Introducción

En el presente capítulo se expone los aspectos fundamentales de la metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de fundidos por el método “moldeo multiplano” para Holmecca. Se describe de manera exhaustiva los diferentes elementos y variables que componen esta metodología.

Para una mejor comprensión de la metodología I, al finalizar se expone un caso desarrollado en la Holmecca según las recomendaciones de autores nacionales que han investigado en la temática.

La producción de fundidos

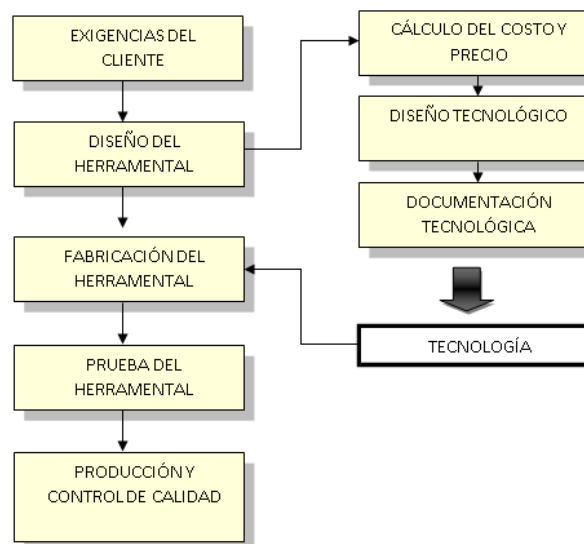


Fig. 2.1. Proceso tecnológico en la Holmecca para la obtención de fundidos.

Tecnología para la obtención de fundidos por el método de moldeo multiplano

La tecnología para la obtención de fundidos por el método de moldeo multiplano en la Holmecca, se puede expresar a través de la Figura 10. A partir de las exigencias del cliente, la empresa define el diseño del herramental necesario para dar respuesta a esta solicitud. El diseño herramental comprende el cálculo del costo y precio de las

piezas, el diseño tecnológico y la documentación tecnológica necesaria. En este proceso, la obtención de la tecnología constituye un aspecto relevante a definir.

2.2 Metodología de cálculo de los parámetros para la obtención de crisol de acero termo resistente.

En el proceso de fundición de metales ferrosos y no ferrosos intervienen una gran cantidad de materias primas, materiales y variables que dependen de la pericia del operario metalúrgico por eso es imprescindible el cumplimiento de la disciplina tecnológica cumpliendo con:

- 1) Determinar la posición del modelo del crisol en el molde durante el llenado.
- 2) Determinar el plano divisor del molde y del modelo del crisol.
- 3) Hacer el diseño de la pieza fundida
- 4) Determinar la posición del macho natural
- 5) Realizar los cálculos y esbozar en el dibujo, los elementos del sistema de alimentación, mazarota, etc.
- 6) Realizar los cálculos de la carga según la aleación determinada.
- 7) Determinar las recetas de mezclas de moldeo y para machos
- 8) Realizar el moldeo. vertido, desmoldeo y limpieza de las piezas.
- 9) Realizar el control de la calidad.

Para determinar la posición del modelo del crisol en el molde se tienen como aspectos a considerar los siguientes:

- 1) La mayor parte del modelo del crisol debe quedar en la parte inferior ya que facilita el montaje (la parte inferior del molde es la que nunca se mueve).
- 2) La posición del modelo del crisol debe corresponder con los principios de la solidificación dirigida, de manera que se eviten los defectos por contracción.
- 3) En el modelo del crisol de acero debe asegurarse la alimentación adecuada a las partes más masivas mediante las mazarotas.
- 4) La posición del modelo del crisol debe asegurar la salida de los gases, para evitar defectos.
- 5) El macho natural debe ocupar la posición más estable.

2.2.1. Cálculo del peso de la pieza

El peso del crisol fundido, es un dato de una suma importancia en la proyección de una tecnología este valor es necesario para el posterior cálculo del sistema de alimentación, mazarotas, contrapesos, el balance del metal, el rendimiento, etc.

Para calcular el peso del crisol se comienza por dividir el plano de la pieza fundida en figuras geométricas a las cuales se les calcula el volumen.

Una vez calculado el volumen de las figuras geométricas en que fue dividida la pieza se suman obteniéndose el volumen total de la pieza.

A partir de este volumen el cálculo del peso de la pieza se realiza mediante la multiplicación del volumen por el peso específico.

$$G = vp \quad (13)$$

A continuación, se relaciona el peso específico de algunas aleaciones usadas en fundición (tabla 6).

Tabla 2.1: Peso específico de algunas aleaciones [Navas,.1996].

Material	g/cm ³	Material	g/cm ³	Material	g/cm ³
Aluminio fundido	2,56	Bronce (sin estaño)	7.5 - 9.6	Fundición gris	6.9-7.4
Aleaciones de aluminio	2.5 - 2.96	Bronce (con estaño)	8.7 - 8.9	Fundición gris modificada	7.2
Plomo fundido	11.3	Latón	8.3 - 8.6	Fundición con grafito esferoidal	7.1-7.6
Estaño fundido	7.29	Aleaciones de zinc (con AL)	6.2 - 6.7	Fundición maleable	7.2-7.5
Magnesio fundido	1.79	Acero al carbono	7.14-7.85	fundición de alta aleación	5.5-7.5
Aleaciones de magnesio	1.75-1.86	Acero estructural	7.78-7.87	fundición blanca	7.4-7.7

Observaciones:

- El peso específico de la fundición aumenta con la disminución del contenido de grafito, con la disminución del contenido de silicio y aluminio y con la disminución de la porosidad. Con el aumento de la temperatura, el peso

específico de la fundición disminuye acorde con el coeficiente de dilatación térmica.

- Carbono, manganeso, cromo y aluminio disminuyen el peso específico del acero; níquel, cobre, wolframio lo incrementa.

La metodología de cálculo de los parámetros para la obtención del crisol constituye un aspecto importante para la Holmecca, debido a que permite el cálculo y análisis. Esta metodología facilita la determinación de un conjunto de variables que inciden directamente en el proceso productivo y define la calidad del producto final.

A continuación, se describe de manera exhaustiva los diferentes elementos y variables que componen esta metodología, aplicada en el proceso tecnológico de obtención de fundidos por el método “moldeo multiplano” en Holmecca.

2.3. Desarrollo de la metodología de fundición.

Esta metodología de obtención del fundido del crisol termoresistente se desarrolla en la Empresa Mecánica “Gustavo Machín Hoed de Beche” a partir de una solicitud real por parte de Holmecca, para la construcción de crisoles, según el caso CR-001 de la (Fig. 18).

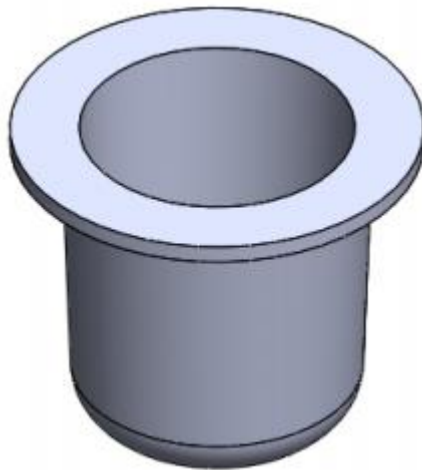


Fig. 2.2. Crisol de acero termo resistente. Fuente propia

Del diseño adecuado del sistema de alimentación depende la calidad de la pieza en gran medida, para lo cual se necesita conocer el peso de la pieza en bruto que será alimentada y se realiza determinación del volumen del fundido del molde multiplano. (Fig. 19)

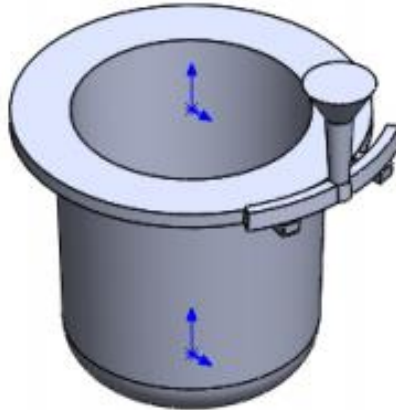


Fig. 2.3 Fundido del crisol en bruto

El peso del fundido del crisol en bruto se calcula determinando el volumen de la pieza multiplicándolo por la densidad de la aleación. Es indispensable un cálculo adecuado del sistema de alimentación. Una vez calculada la masa, debe tenerse en cuenta la velocidad de llenado del metal en el molde V (mm/s). La práctica ha demostrado que el valor de la velocidad de llenado del metal se debe acercar a una magnitud que se representa en la Tabla 4, en caso contrario pueden ocurrir defectos como dardas y variaciones en las dimensiones geométricas y soldaduras. Por lo tanto, se debe adecuar la V_v al valor de la Tabla 4, la velocidad de vertido se determina de acuerdo a la expresión (14).

$$V_v = F_s \times A_s \tag{14}$$

Tabla 2.2: Valor de la velocidad de llenado del metal en el molde.

Espesor de las paredes	5	5 - 10	10 - 40	40 - 60	60
Menor valor de velocidad (V) de llenado permitido (mm/s)	30	20	10	7	4

El tiempo de vertido (T_v) se considera uno de los problemas más complejos, para su cálculo, se utiliza la relación existente entre la velocidad de vertido y la masa de la pieza y el sistema de alimentación según la expresión (15).

$$T_v = \frac{V_v}{M_{psa}} \quad (15)$$

Al analizar el plano constructivo del fundido del crisol, se deben tener en cuenta varios factores, el más importante expresa que se debe tratar de colocar el modelo del crisol en una sola caja de moldeo; así como el plano divisor elegido facilite la extracción del modelo, la salida de los gases, comodidad del apisonado, acabado primario, etc.

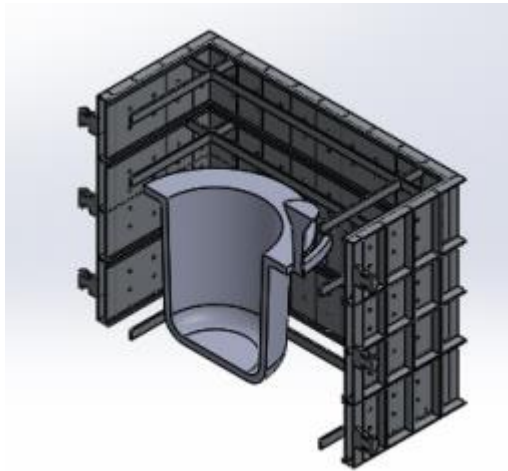


Fig.2.4. Posición del fundido del crisol en el molde

Permite la extracción del modelo y comodidad en el apisonado, pocas partes sueltas, una sola división y un solo macho. Pero tiene inconvenientes de gran peso como son el no permitir la salida de los gases con facilidad, dificulta la alimentación del nudo térmico inferior (la zona encerrada en círculos), lo que provocara rechupes. La pieza se encuentra en las dos cajas. La dirección de la inclinación se hará en sentido que facilite la extracción, en dependencia de la dirección en que se va extraer el modelo.

2.3.2. Caracterización del crisol

El crisol es utilizado como cámara fusora de metales y aleaciones no ferrosas.

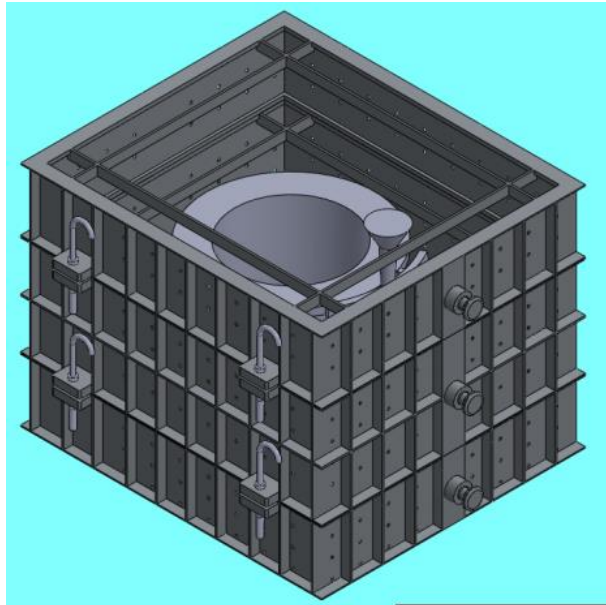


Fig. 2.5. Ubicación del fundido del crisol en el molde.

2.3.3. Elección del plano divisorio:

Esta es una etapa importante del proceso, para la selección del plano divisorio se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- La facilidad de extracción de la plantilla.
- La facilidad de extracción de pieza una vez terminada.
- La posibilidad de que el macho quede en la caja inferior.
- Asegurar la comodidad del apisonado, pintado y secado del molde.
- Que el fundido en bruto quede en una sola caja.

(Fig. 22) Elección de los planos divisorios del Moldeo multiplano.

2.3.4. Determinación de la masa de la pieza.

Para la determinación de la masa se usó el paquete de Diseño Asistido por Computadora (CAD): SolidWorks 2006; en el que se diseñó la pieza, según las medidas obtenidas, se aplicó el material seleccionado y se determinó la masa igual a 15 kg.

Se usa el método de moldeo con macho natural, que tiene que darle forma acabada a la superficie de la pieza con la precisión determinada, debe de poseer flexibilidad y resistencia mecánica, tiene que garantizar la evacuación libre de los gases que se forman durante el llenado y la extracción fácil de la mezcla de machos durante el moldeo.

2.3.5. Cálculo y diseño del sistema de alimentación.

Es la etapa clave de la tecnología de fundición, primeramente, se debe elegir el método de suministro de la masa fundida al molde y así determinar las dimensiones de los componentes del sistema de alimentación, alimentador y tragadero. Para que el sistema de alimentación funcione efectivamente debe garantizarse el llenado total del molde sin turbulencia, que el flujo de metal no destruya el molde y un factor importante desde el punto de vista económico la pérdida de metal sean las mínimas. En este caso que la pieza es de hierro gris, el sistema de alimentación generalmente más utilizado es sin presión, este garantiza un vertido más tranquilo en el molde y evita la turbulencia.

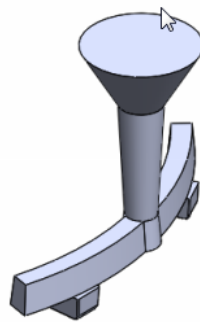


Fig. 2.6. Sistema de alimentación. Fuente propia

Mediante las siguientes expresiones se puede determinar las sumas de las áreas mínimas de los alimentadores:

$$\sum F_{min} = \frac{KG}{\mu T_v 0.31 \sqrt{Hm}} \text{ cm}^2 \quad (16)$$

Si $\rho \sqrt{2g}$ es constante = 3099

Donde:

G : Masa del metal fundido.

T_v : Tiempo de vertido.

K : Coeficiente que incluye la pérdida del metal en mazarota. ($K=1.21$)

μ : Coeficiente que abarca la resistencia del sistema de alimentación al paso del metal.

ρ : Densidad del metal. (Fundición gris: 7 g/cm^3)

H_m : Presión metalostática media.

$$H_m = H_o - \frac{p^2}{2C}$$

$$H_m = 260 \text{ mm} - \frac{80 \text{ mm}^2}{2 \times 80 \text{ mm}}$$

$$H_m = 220 \text{ mm} = 22 \text{ mm} \quad (17)$$

Como sólo se tiene un alimentador la expresión se calcula:

$$\sum F_{min} = \frac{KG}{\mu T_v 0.31 \sqrt{H_m}} \text{ cm}^2 \quad T_v = S \sqrt{GK} \text{ (s)} \quad (18)$$

Donde:

S : Es el coeficiente en función del espesor medio de la pared de la pieza.

El tiempo de vertido es:

$$T_v = 1.3 \times \sqrt{15 \times 1.21}$$

$$T_v = 7 \text{ s}$$

Velocidad de llenado:

$$V = \frac{C}{T_v}$$

$$V = \frac{80}{7}$$

$$V = 11.43 \text{ mm/s} \quad (19)$$

Sustituyendo los datos en la ecuación

$$\sum F_{min} = \frac{1.21 \times 15 \text{ Kg}}{0.35 \times 11.43 \text{ s} \times 0.31 \sqrt{21.6}}$$

$$F_{min} = 9.36 \text{ cm}^2$$

Con el área del alimentador se entra a la tabla 14, del texto (Métodos y cálculos en fundición), y en esta se buscan las dimensiones reales del alimentador.

$$F_a = 9.36 \text{ cm}^2$$

Utilizando la relación $Fa: Fes: Ftr = 1:1.05:1.1$; que es una de las recomendadas para estas aleaciones.

$$Ftr = a \times (Fa) \times R$$

$$Ftr = 1 \times (Fa) \times 1.05$$

$$Ftr = 1 \times (9.36) \times 1.05$$

$$Ftr = 17.8 \text{ cm}^2 \quad (20)$$

Donde:

a : Cantidad de piezas en el molde.

R : Relación escogida según el caso.

Diámetro del tragadero:

$$Dtr = 2 \sqrt{\frac{Ftr}{\pi}}$$

$$Dtr = 2 \sqrt{\frac{17,8}{\pi}}$$

$$Dtr = 4.66 \text{ cm} = 46.6 \text{ mm} \quad (21)$$



Fig. 2.7. Sistema de alimentación del fundido del crisol termo resistente.

Taza de vertido:

Hasta este punto, las variables e indicadores, se toman de acuerdo a la experiencia y a las condiciones concretas de la producción. Si el tiempo de vertido no fuese adecuado, habría que seleccionar otras condiciones para las variables antes descritas, esto implica realizar de nuevo el proceso de cálculo. La obtención de la variante

adecuada a la planta se logra a través de un proceso iterativo de ensayo y prueba de error.

El modelo se define a partir de la selección de las variables geométricas y tecnológicas recomendadas por Goyos [Goyos, 1996].

2.3.6. Parámetros para la fusión de acero termo resistente para crisol.

Esta investigación se realizó en el horno de inducción de alta frecuencia de 100 kg de capacidad modelo Inductotherm Corp. Power-Trak 100-30, la Empresa Mecánica del Níquel, Moa, por ser este tipo de horno el más indicado al propiciar una fusión más adecuada del acero termoresistente.

Para realizar los cálculos de las cargas es necesario conocer las altas y las bajas que se producen en cada uno de los agregados metalúrgicos que se utilizan en la fundición de hierro. En la Tabla A3.9 se plantean las varianzas de pérdida por fusión (V-) de los elementos en el horno de inducción de alta frecuencia Inductotherm de la EMN.

Tabla 2.4 Varianza de pérdida por fusión (V-) de los elementos en el horno de inducción de Inductotherm Corp. Power-Trak 100-30 de la EMN.

Elementos	(V-)
C	6
Si	3
Mn	15
S	8

Para el cálculo de la cantidad de elementos en la chatarra de acero, de las Tablas A3.3 y A3.4 se toman los datos necesarios para los cálculos necesarios. La masa de carbono en la chatarra de acero se calcula a través de la ecuación de Rasulov (20) y se obtiene (41).

$$M_{EC} = \frac{M_{MC} \cdot \%C_{RC} \cdot \left[\frac{100 - V_-}{100} \right]}{100} = \frac{20 \cdot 0,3 \cdot \left[\frac{100 - 6}{100} \right]}{100} = 0,0564kg \quad (41)$$

Con (42) se calcula la masa de Si en la chatarra de acero.

$$M_{ES} = \frac{M_{MC} \cdot \%Si_{RC} \cdot \left[\frac{100 - V_-}{100} \right]}{100} = \frac{20 \cdot 0,4 \cdot \left[\frac{100 - 3}{100} \right]}{100} = 0,0776kg \quad (42)$$

De la misma forma con (43) se calcula la masa de Mn en la chatarra de acero.

$$M_{EMn} = \frac{M_{MC} \cdot \%Mn_{RC} \cdot \left[\frac{100 - V_-}{100} \right]}{100} = \frac{20 \cdot 0,47 \cdot \left[\frac{100 - 15}{100} \right]}{100} = 0,0799kg \quad (43)$$

Se continúa con los cálculos de la masa de los elementos componentes principales en la chatarra de retorno. La masa de carbono en la chatarra de retorno se obtiene con (44).

$$M_{EC} = \frac{M_{MC} \cdot \%C_{RC} \cdot \left[\frac{100 + V_-}{100} \right]}{100} = \frac{20 \cdot 3,57 \cdot \left[\frac{100 - 6}{100} \right]}{100} = 0,671kg \quad (44)$$

Con (45) se obtiene la masa de Si en la chatarra de retorno.

$$M_{ESi} = \frac{M_{MC} \cdot \%Si_{RC} \cdot \left[\frac{100 - V_-}{100} \right]}{100} = \frac{20 \cdot 2,1 \cdot \left[\frac{100 - 3}{100} \right]}{100} = 0,41kg \quad (45)$$

De la misma forma con (46) se calcula la masa de Mn en la chatarra de retorno.

$$M_{EMn} = \frac{M_{MC} \cdot \%Mn_{RC} \cdot \left[\frac{100 - V_-}{100} \right]}{100} = \frac{20 \cdot 0,6 \cdot \left[\frac{100 - 15}{100} \right]}{100} = 0,102kg \quad (46)$$

La masa de los elementos componentes principales en la chatarra de hierro también se calcula. La masa de carbono en la chatarra de hierro se obtiene con (47).

$$M_{EC} = \frac{M_{MC} \cdot \%C_{RC} \cdot \left[\frac{100 + V_-}{100} \right]}{100} = \frac{60 \cdot 3,3 \cdot \left[\frac{100 - 6}{100} \right]}{100} = 0,186kg \quad (47)$$

Con (48) se determina la masa de Si en la chatarra.

$$M_{ES} = \frac{M_{MC} \cdot \%Si_{RC} \cdot \left[\frac{100 - V_-}{100} \right]}{100} = \frac{60 \cdot 2,1 \cdot \left[\frac{100 - 3}{100} \right]}{100} = 1,222kg \quad (48)$$

De la misma forma con (49) se calcula la masa de Mn en la chatarra.

$$M_{EMn} = \frac{M_{MC} \cdot \%Mn_{RC} \cdot \left[\frac{100 - V_-}{100} \right]}{100} = \frac{60 \cdot 0,6 \cdot \left[\frac{100 - 15}{100} \right]}{100} = 0,31kg \quad (49)$$

El fósforo no varía durante la fusión y no se tiene en cuenta para la chatarra de acero. La masa de fósforo no varía durante la fusión y en la chatarra de retorno se calcula con la expresión (50).

$$M_p = \frac{M_{PC} \cdot \%P_{RC}}{100\%} = \frac{20 \cdot 0,2}{100} = 0,04kg \quad (50)$$

El cálculo de la masa de fósforo en la chatarra se determina según la expresión (51).

$$M_p = \frac{M_{PC} \cdot \%P_{RC}}{100\%} = \frac{60 \cdot 0,1}{100} = 0,06kg \quad (51)$$

La masa de azufre en la chatarra de retorno se obtiene con (52).

$$M_{SC} = \frac{M_{MC} \cdot \%S_{RC} \cdot \left[\frac{100 + V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{20 \cdot 0,03\% \cdot \left[\frac{100 - 8}{100} \right]}{100} = 0,00552kg \quad (52)$$

Con (53) se determina la masa de azufre en la chatarra.

$$M_{SC} = \frac{M_{MC} \cdot \%S_{RC} \cdot \left[\frac{100 + V_{\pm}}{100} \right]}{100} = \frac{60 \cdot 0,1\% \cdot \left[\frac{100 - 8}{100} \right]}{100} = 0,0552kg \quad (53)$$

El cálculo de la masa de las adiciones se obtiene según la ecuación de Chernov (33) y se obtiene (54).

Luego del derretido y conocer la composición del caldo metálico se procede al afino e inoculación.

$$M_{Cq} = \frac{M_{MqC}(E_{3C} - E_{\%RC}) \cdot 100}{(100 - V_{-F}) \cdot L_{Si}} = \frac{100 \cdot (3,57 - 0,913) \cdot 100}{(100 - 6) \cdot 85} = 3,325 \text{kg} \quad (54)$$

Con (55) se calcula la masa de azufre

$$M_{\%S} = \frac{M_C \cdot 0,8}{100} = \frac{3,325 \cdot 0,8}{100} = 0,027 \text{kg} \quad (55)$$

Con (56) se calcula la masa de fósforo

$$M_{\%P} = \frac{M_C \cdot 0,21}{100} = \frac{3,325 \cdot 0,21}{100} = 0,0067 \text{kg} \quad (56)$$

Con (57) se calcula la cantidad de FeSi que se necesita adicionar.

$$M_{FeSi} = \frac{M_{Mv}(E_{\%SiM} - E_{\%RC}) \cdot 100}{(100 - V_{-F}) \cdot L_{Si}} = \frac{100 \cdot (2,55 - 1,71) \cdot 100}{(100 - 3) \cdot 75} = 1,154 \text{kg} \quad (57)$$

Dónde: M_{Mv} – Masa del caldo metálico en la cazuela de vertido 1200kg.

Cálculo de la cantidad de Mn necesario según (58)

$$M_{FeMn} = \frac{M_{Mv}(E_{\%MnM} - E_{\%RC}) \cdot 100}{(100 - V_{-F}) \cdot L_{Mn}} = \frac{100 \cdot (0,52 - 0,492) \cdot 100}{(100 - 15) \cdot 75} = 0,2 \text{kg} \quad (58)$$

En la Tabla A3.10 se incorporan los resultados del cálculo de las masas de los materiales de la carga metálica.

Tabla 2.5 Materiales componentes de la carga en horno de alta frecuencia de 100 kg de capacidad modelo Inductotherm Corp. Power-Trak 100-30 de la EMNi.

Materiales de carga	Masa (kg)	C		Si		Mn		Ni		Cr	
		%	kg.	%	kg.	%	kg.	%	kg.	%	kg.
Chatarra de acero	20	0,3	0,056	0,4	0,078	0,47	0,0799	-	-	-	-
Chatarra de retorno	20	3,54	0,671	2,1	0,41	0,6	0,102	0,2	0,04	0,03	0,00552
Chatarra de hierro	60	3,3	0,186	2,1	1,222	0,6	0,31	0,1	0,06	0,1	0,0552
Masa total del derretido	100	0,9	0,9	1,7	1,71	0,5	0,492	0,3	0,10	0,12	0,06072
Cantidad de adiciones que se necesita en los procesos de afino e inoculación											
Coque	3,33	-	2,67	-	-	-	-	-	0,0067	-	0,027
FeSi 75%	1,15	-	-	-	0,85	-	-	-	-	-	-
FeMn 80%	0,044	-	-	-	-	-	0,028	-	-	-	-
FeNi	-	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-
FeCr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	-
Carga total	104,524		3,57		2,55		0,52		0,107		0,08772

Tratamiento con 1,85 % de CaO												
Composición de afino	100	0,27	-	0,55	-	0,52	-	21	-	16	-	

Como fundente, se utiliza generalmente de 1,5 % a 2,2 % por kg de metal cargado, dependiendo del grado de oxidación de los materiales de la carga metálica. Como fundente se utiliza 1,85 % en piedra caliza de 56 % a 85 % de CaO y un tamaño aproximado a los 25 mm³, luego de limpiar del espejo del metal los 4,524 kg de escoria y se obtienen los 100 kg de la aleación base tecnológicamente necesaria.

Una vez seguida la tecnología para la elaboración del acero termo resistente por electro fusión en el horno de alta frecuencia de 100 kg de capacidad modelo Inductotherm Corp. Power-Trak 100-30 (EMNi), se continúa cumpliendo con todos los pasos tecnológicos de moldeo, vertido, solidificación, desmoldeo y acabado

2.4. Análisis numérico

El análisis numérico muestra la efectividad del crisol termo resistente, sin necesidad de realizar la prueba experimental, ni la serie “cero”, pruebas que aumentan el costo de las producciones. Como se observa en la figura el comportamiento térmico del crisol es adecuado, se mantiene la configuración del crisol garantizando la fusión del aluminio y sus aleaciones desde la temperatura de vertido de 727 °C hasta 800 °C.

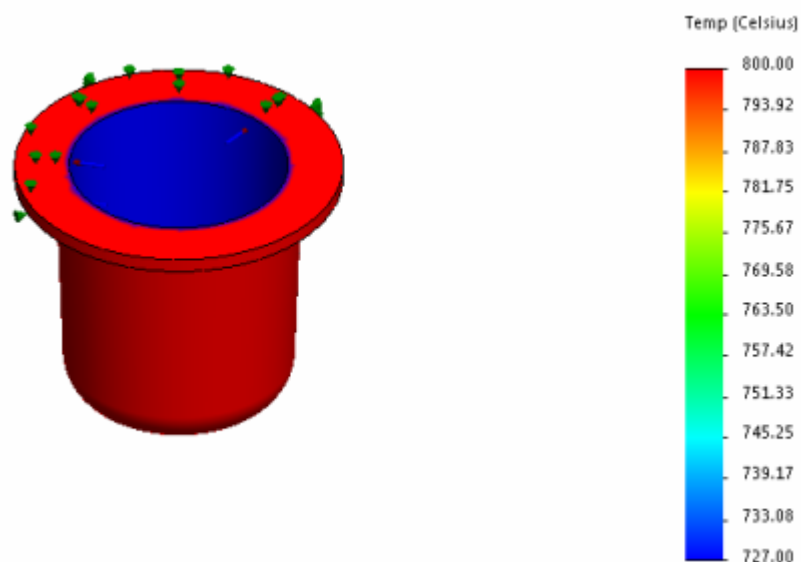


Fig. 2.8. Análisis numérico térmico externo del crisol durante la fusión de Al.

Como muestra la figura durante la fusión del aluminio y sus aleaciones, el crisol soporta el choque térmico y mantiene la configuración permitiendo una fusión segura la (Fig. 2.

8). muestra como la temperatura exterior del crisol de 800 °C propicia la temperatura tecnológica de vertido en el interior del crisol de 727 °C.

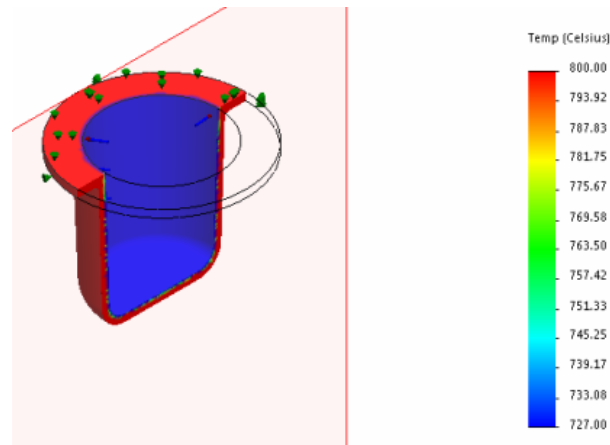


Fig. 2.9 Análisis numérico térmico interno del crisol durante la fusión de Al.

En las figuras 2.8 y 2.9 se observa como en el intervalo de la temperatura de calentamiento exterior del crisol a 800 °C la temperatura tecnológica de vertido de las aleaciones de aluminio de 727 °C – 730 °C la orientación del calentamiento del crisol es correcta y se garantizan las condiciones térmicas adecuadas necesarias a la fusión del Al y sus aleaciones.

Análisis numérico del crisol durante la fusión de cuproaleaciones.

Las aleaciones tanto los bronce (aleaciones CuSn), como los latones (aleaciones CuZn) tienen intervalos de vertido de 1245 a 1250 es decir un intervalo muy estrecho y conocido como intervalo de vertido peligroso, porque cualquier alteración de la temperatura de vertido tecnológica provoca defectos tanto internos como externos en los fundidos.

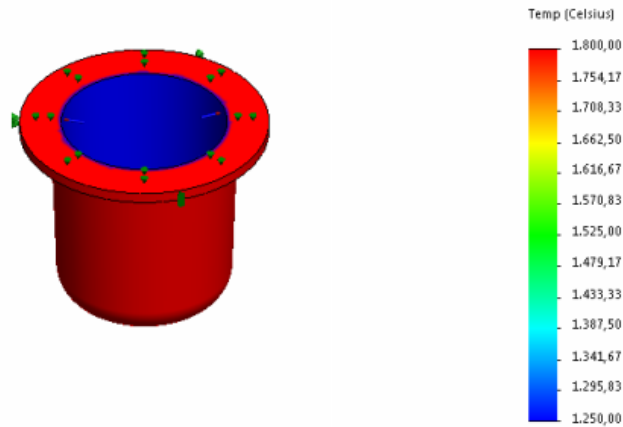


Fig. 2. 10 Análisis numérico térmico externo del crisol fundiendo aleaciones de Cu. En la figura se observa el análisis numérico externo del crisol el cual recibe un calentamiento externo de 1800 °C, garantizándose la temperatura tecnológica de vertido de las aleaciones de cobre igual a 1250 °C sin sufrir deformaciones en la configuración del crisol, con una conducción de la colada segura.

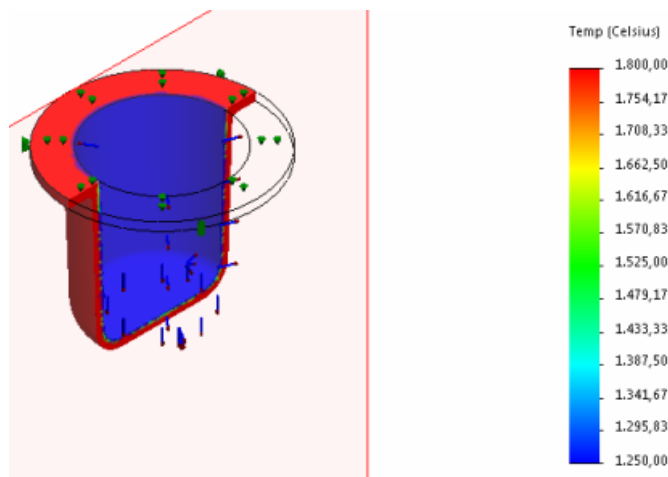


Fig. 2.11. Análisis numérico térmico interno del crisol fundiendo aleaciones de Cu. La figura muestra como al recibir una temperatura externa de 1 800 °C el mantiene su configuración y se garantiza la temperatura de vertido de 727 °C dentro del crisol sin que sufra deformaciones.

2.5. Discusión de resultados y valoración socio económica

Por primera vez se establece en el País una tecnología con basamento científico capaz de producir crisoles de aceros termo resistentes bajo las condiciones específicas de la

economía y la industria cubana, sustituyendo a los crisoles de grafito con un alto costo de importación superior a los 1 500 dólares.

Valoración medioambiental

La aplicación de los resultados de esta investigación permite la disminución en la generación de desechos sólidos y las emisiones gaseosas a la atmosfera.

Contribución a la Defensa.

Esta metodología se utiliza en la producción de fundidos para la reparación de la técnica militar en la Fabrica “60 Aniversario de la Revolución de Octubre”

CONCLUSIONES

1. Los resultados de esta investigación permitieron producir en el país crisoles de material termo resistente de manera competitiva y sostenible.
2. Por el impacto económico y social del desarrollo de esta metodología, permite el establecimiento de una línea de producción a escala industrial de crisoles en el País.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos, se arriba a las siguientes recomendaciones:

- Generalizar esta metodología en el resto de las Fundiciones del País, con el objetivo de acometer a escala industrial, la producción de crisoles de aceros termo resistentes de forma competitiva, sostenible y sustentable.
- Profundizar en el estudio del efecto normalizador que condiciona la fundición bajo este método de moldeo.

BIBLIOGRAFÍA

- [Abramov, 2019] Abramov. A. "Manual del joven fundidor". Editorial Alta Escuela. Moscú.2019. 203 p.
- [Alexandor, 2020] Alexandor, N. H. Control del estado del metal Líquido para la obtención de hierro con grafito esferoidal. *Liteinoe Proistbostba*. N. 3. 2020.
- [Bakkerus, 2021] Bakkerus and Van der Holst. The T-Nock Process for Making Ductil iron. *Modern Casting Tech*. N. 711, july 2021.
- [Batista, et al 2019] Batista Cabrera. A; Navas Medina, E. "Cálculo de Mazarotas para Piezas de Acero". *Construcción de maquinarias*.2019.
- [Batista, 2019] Batista Cabrera, A.; *et al*. "Propiedades de Fundición de los Metales y Aleaciones". Monografía, Universidad de Holguín. 2019
- [Batista^a, 2019] Batista Cabrera, A. "Tecnología de desulfuración en Cazuela con el fin de obtener Hierro con grafito Esferoidal". *Ingeniería Mecánica*. N. 3. 2019.
- [Batista^b, 2019] Batista Cabrera. A. "Utilización del Magnesio como Desulfurante y su influencia en las propiedades del HGE obtenida por el método "In-mold". *Mundo Mecánico*. N. 2. 2019.
- [Batista^c, 2019] Batista Cabrera. A. "Influencia del Azufre en el rendimiento de las piezas de hierro nodular obtenida por el método "Ind- Mold"". *Mundo Mecánico* N. 6. 2019.
- [Batista^a, 2019] Batista Cabrera. A; Ordóñez, U. "Selección de un nodulizante y forma y posición de una cámara de reacción para su aplicación para la obtención de hierro con grafito esferoidal por el método "In-mold"". *Ingeniería Mecánica*. N. 3. 2019.
- [Batista^b, 2019] Batista Cabrera, A; Ordóñez, U. "Determinación de la granulometría del NODULANT II y el parámetro de la cámara más adecuados para la obtención del hierro con grafito esferoidal por el método "In-mold"". *Ingeniería Mecánica*. N. 3. 2019.

- [Batista^c, 2019] Batista Cabrera, A. "Análisis y procedimientos para la obtención de hierro con grafito esferoidal por el método "In Mold" bajo las condiciones específicas de la Industria en Cuba". *Tesis Doctoral*, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín. 2019.
- [Boletín, 2021] Boletín Técnico MI SR - 1MI SR-2. 2021.
- [Calcosoft, 2020] Calcosoft. Base de Datos en Línea, 2004, 2 de marzo del 2020, <http://www.calcosoft.com>
- [Castledine, 2019] Castledine, T. J. "Experiences in the Application of the INMOLD Process to the vertically Jointed DISAMATIC Moulding System". DISA Convention. 2019.
- [Cenkebich, 2019] Cenkebich, I. "Optimización de la obtención de piezas de Hierro Nodular por el método ind-mould". *Liteinoe*. Proistbostba. N. 12. 2019. pp. 13-14. (en ruso).
- [Chaikin, 2021] Chaikin A. A. Refinado del HGE modificado en el molde por medio De filtros Cerámicos. *Liteinoe Proistbosta*. N. 4 Año 2021.
- [Davis, 2020] Davis, K. G. Dissolution of MgFeSi Alloy During Indmold Treatment. *British Foundryman*. N. 457. 2020.
- [DELCAM, 2020] DELCAM. Base de Datos en Línea, 2004, 4 de marzo del 2020, <http://www.delcam.com>
- [Dijon, 2019] Dijon, R. H. The disolution factors for the Ind-Mould Process. *British Foundryman*. N. 8. 2019.
- [Dunks, 2021] Dunks, C.M. "Mold Nodulizing and Continuos Stream Treatment Techniques as Operated in Europe". *Foundry Trade Journal*. 2021. N. 234.
- [Francois, 2020] Francois, M. Base de Datos en Línea, 2004, 17 de mayo del 2020, El magnesio como desulfurante, <http://www.cta.org.co/institucional.com>

- [Girchovib, 2018] Girchovib, N. G. Método de investigación para determinar la formación del hierro con grafito esferoidal y su valoración. Edit. Masgish. 2018. 45p.
- [Gorshkob, 2019] Gorshkob, A. A. Acerca de la formación del grafito esferoidal en las Burbujas Microscópicas durante la cristalización. Edit. Bishaia Scuola. 2019.123 p.
- [Genderevich, 2019] Genderevich N. A. “Elección del modificador para la obtención de piezas de hierro de alta resistencia modificado en el molde”. *Liteinoe Proistbostba*. N. 2. 2019. pág16-17.
- [Gibbs, 2020] Gibbs. Base de Datos en Línea, 2004, 4 de marzo del 2020, <http://www.gibbs.com>
- [Goyos, 1991] Goyos Pérez, L.; Martínez Reina, Elio. “Tecnología de fundición II”. Editorial ISPJAE. Ciudad de la Habana.1991. 243 p.
- [Gynsey, 2021] Gynsey. J. Co CQ (Controlled Quality Inoculation). Un proceso de alta Productividad. www.carpenterfortuna.com.mx/n-hierro.htm.Consult.2021
- [Hughes, 2020] Hughes. S. Foundry Trade Journal. 2020. N. 487.
- [Hity, 2020] Hity D. Electr.Furnace Proc. AIME 2020.V.27 pág 52-56.
- [Iron, 2021] Iron Casting whith Spheroidal or Nodular Graphite Specification 3rd reun. <http://www.clickafoundry.com/specification>. 1. Consultado.2021
- [LINCE, 2022] LINCE FUNDICION. Base de Datos en Línea, 2022, 14 de marzo del 2022, <http://www.lince-fundición.com>
- [Luffe, 2021] Luffe, A. “Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde”. *Liteinoe Proistbostba*. N. 12. 2021. (en ruso).
- [Karsay, 2020] Karsay, S. Producción de Hierro Nodular, 2da Edición. Edit. Titanic Inc. Comp. 2020.

- [Kobalevich, 2022] Kobalevich, E. B. Nueva tecnología de obtención de hierro Nodular. Liteinoe Proistbostba. N. 3. 2022. p. 10. (en ruso).
- [Mannion, 2020] Mannion, G. “Experiencias with the production of meehanite Nodular iron casting whith the inmold process. Foundry Trade Journal. Vol 137. pp. 139-147. Aug. 2020.
- [Material, 2022] Material Didáctico sin valor comercial. FES-CAUTIPLAN. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MEXICO. 2022
- [Machikin,2021] Machikin. B. I Aumento de la calidad de las aleaciones ferrosas Edit.Kiev.2021
- [Malishev, 2019] Malishev. A. Influencia del Silicio sobre las propiedades del HGE. Liteinoe Proistbostba No 9 Año 2019
- [May, 2019] Mayk. C. N. Sistema de Alimentación para modificación en el molde. Liteinoe Proistbostba No 11 Año 2019
- [Ginzburg, 2020] Ginzburg, I. y Steiner, H., 2020, “Lattice Boltzmann Model for Free-Surface Flow and Its Application to Filling Process in Casting”, *Journal of Computational Physics*, vol. 185, pp. 61 -99.
- [Metallography, 2021] Metallography. Base de Datos en Línea, 2021, 12 de Octubre del 2021, <http://www.metallography//technoters/iron.com>
- [Navas, 1996] Navas. E. Batista. A. Métodos de Cálculo en Fundición .Folleto Editado por la Uho. Año 1996.
- [ProCAST, 2019] ProCAST. Base de Datos en Línea, 2019, 12 de Febrero del 2019, <http://www.procast.com>
- [ProEngineer, 2019] ProEngineer. Base de Datos en Línea, 2019, 2 de Marzo del 2019, <http://www.proengineer.com>
- [Sánchez F. R., 2020] Perfil Fundición de Acero-Hierro de Holguín. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica METANICA. CD-ISSN 1607-6261

- [Sánchez F. R., 2020] El Rendimiento Tecnológico General como Regulador del costo de las piezas fundidas de hierro nodular. Resumen III Conferencia Internacional. Ingeniería. 2020
- [Sánchez F. R., 2020] El Rendimiento Tecnológico General como Regulador del costo de las piezas fundidas de metales ferrosos y no ferrosos. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261
- [Sánchez F. R., 2019] Horno Multipropósito. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261
- [Sánchez F. R., 2020] Sistema de trabajo 20 X 10. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. CD-ISSN 1607-6261
- [Sánchez F. R., 2020] Entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos. Jornada Científica. Facing – CEDEMA. 2020
- [Sánchez F. R., 2022] Tecnología para la manufactura competitiva de fundidos de aleaciones de Cobre. IV Conferencia Científica CD – ROOM-ISSN – 978-959-16-1010-2. 2022
- [Sánchez F. R., 2022] Caculo Competitivo del Costo y Precio de los fundidos de bronce y Latones. IV Conferencia Científica CD – ROOM-ISSN – 978-959-16-1010-2. 2022
- [Sánchez F. R., 2022] Ahorro de portadores energéticos en la obtención de fundidos no ferrosos bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana. Memorias del 6to. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente CD – ROOM-ISBN: 978- 959- 257- 231- 7
- [SolidWork, 2016] SolidWork. Base de Datos en Línea, 2016, 12 de febrero del 2016, <http://www.solidwork.com>
- [SYSWELD, 2020] SYSWELD. Base de Datos en Línea, 2015, 4 de abril del 2020, <http://www.sysweld.com>

- [Tartera, 2019] Tartera. J. Joining and Fabrication of Nodular Iron Casting by welding. Base de Datos en Línea, 2015, 24 de noviembre del 2019, <http://www.implog.com/foundry/books.htm>
- [Unigraphics, 2020] Unigraphics. Base de Datos en Línea, 2015, 2 de marzo del 2020, <http://www.unigraphics.com>
- [Fulgosi M, et al 2022] Fulgosi M., Lakehal D., Banerjee S. y De Angelis V., 2022, "Direct Numerical Simulation of Turbulence in a Sheared Air-Water with Deformable Interface", Journal of Fluid Mechanics, vol. 482, pp. 319-345.
- [Hansen, ,et al 2019] Hansen, P.N., Flender, E. y Hartman, G.C., 2019, "MAGMASOFT- The MAGMA System of Mold Filling and Solidification Modelling", in Numerical Simulation of casting solidification in automative applications (C. Kim and C.-W. Kim, eds.), pp. 221, The Minerals, Metals and Materials Society.
- [Hernánd,,et al 2022] Hernández-Ortega. J.J., 2022, "Estudio Numérico y Experimental de los Procesos de Fundición a Presión. Mecanismos de Formación de Porosidad durante el Llenado del Molde". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [Cleary, P,,et al 2020] Cleary, P., Ha, J., Alguine, V. y Nguyen, T., 2020, "Flow Modelling in Casting Processes", Applied Mathematical Modelling, vol. 26, no. 2, pp. 171 -190.
- Jiménez, L 2011 Jiménez, L 2011. Incremento de la vida Útil de los barrotos del Horno de Piroconsolidación de la planta de pellas. 1ra Fase, IIMM-10-022P, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales, SIDOR, Diciembre, 2011
- Campos, M. et al Campos, M. Blanco, L, Sicre-Artalejo, J. y Torralba, J, Aceros de 2014 baja aleación y alto rendimiento, Rev. Metal. Madrid, 44 (1),

Enero-Febrero, 5-12, 2008, ISSN: 0034-8570- Acero para un futuro sostenible, ArcelorMittal, España 2014

Molina, J., Remache, Molina, J., Remache, A. y Santiago, C., , Análisis de la Microestructura del Acero V320 Sometido a Tracción y Torsión luego de un Tratamiento Térmico de Temple Subcero, Revista Infociencia Vol. 10 / 2016, p. 55-62, <https://www.researchgate.net/publication/323945761>

Anexos

Crisoles y vasos para fundición hechos de grafito

