



**Universidad
de Holguín**

FACULTAD
DE INGENIERÍA
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Análisis numérico de moldes de fundición de metales ferrosos y no ferrosos con mezcla carburante

Autor: Maiquel Leyva Antunez

HOLGUÍN, 2022



Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Análisis numérico de moldes de fundición de metales ferrosos y no ferrosos con mezcla carburante

Autor: Maiquel Leyva Antunez

Tutores: Dr.C. Ing. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo
Dr.C. Ing. Roberto Pérez Rodríguez
Ing. Alexis Ronda Oro

HOLGUÍN, 2022

PENSAMIENTO

Sé firme en tus actitudes y perseverante en tu ideal.

Pero sé paciente, no pretendiendo que todo llegue de inmediato.

Haz tiempo para todo, y todo lo que es tuyo, vendrá a tus manos en el momento oportuno.

Mahatma Gandhi

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a la Universidad de Holguín por haberme aceptado, ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera, así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante día a día.

Agradezco también a mis tutores haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también por haber tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante el desarrollo de la tesis. De igual manera, agradecer al Ing. Alexis Ronda Oro que fue el que se ocupó de todo lo que necesitamos dentro del Taller de Fundición en La Empresa Mecánica “Héroes del 26 de Julio” (HOLMECA) para el desarrollo de esta investigación. Al M.Sc. Ing. Alberto Arias Ambruster, por brindarme gran parte de sus conocimientos en el uso del software ProCAST® para la realización de esta tesis, además de todos sus consejos como profesional.

Y para finalizar, también agradezco a todos los que fueron mis compañeros de clases en la Universidad, ya que gracias al compañerismo, la amistad y el apoyo moral, han aportado en un alto porcentaje a mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi padre Omar y a mi madre Iliana, que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mis hermanos Yoisel y Omar Luis que siempre han estado junto a mí, brindándome su apoyo.

A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

RESUMEN

Esta investigación soluciona el problema de la demostración de la efectividad del uso de las mezclas carburantes en los moldes de fundición de metales ferrosos y no ferrosos. Se planteó como objetivo general, utilizar el análisis numérico por elementos finitos del molde de fundición, para demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa. Se evaluaron los procedimientos existentes y los parámetros que intervienen en la elaboración de las mezclas de moldeo y los métodos de análisis numérico en los procesos de moldeo de metales. La investigación logra utilizar el análisis numérico del molde de fundición para demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera competitiva. Se logra sustituir la prueba experimental y la serie “Cero”, (procesos los cuales son muy costosos), por el análisis numérico logrando disminuir el costo de elaboración de los moldes. La investigación permite el aumento de la competitividad y sustentabilidad, así como la disminución de los costos de producción para la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos, para las condiciones específicas cubanas.

ABSTRACT

This research solves the problem of demonstrating the effectiveness of the use of fuel mixtures in ferrous and non-ferrous metal casting molds. The general objective was to use the numerical analysis by finite elements of the foundry mold, to demonstrate the effectiveness of the use of fuel mixtures in obtaining ferrous and non-ferrous metal melts in a precise manner. Existing procedures and parameters involved in the preparation of molding mixtures and numerical analysis methods in metal molding processes were evaluated. The research manages to use the numerical analysis of the foundry mold to demonstrate the effectiveness of the use of fuel mixtures in obtaining ferrous and non-ferrous metal melts in a competitive manner. It is possible to replace the experimental test and the "Zero" series, (processes which are very expensive), by the numerical analysis, reducing the cost of making the molds. The research allows the increase of competitiveness and sustainability, as well as the reduction of production costs to obtain ferrous and non-ferrous metal castings, for the specific Cuban conditions.

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LAS MEZCLAS DE MOLDEO..... | 14 |
| 1.1 Introducción..... | 14 |
| 1.2 Arenas de moldeo | 15 |
| 1.2.1 Clasificación de las mezclas de moldeo..... | 16 |
| 1.2.2 Propiedades de las mezclas de moldeo..... | 16 |
| 1.3 Arcillas de fundición | 18 |
| 1.3.1 Clasificación de las arcillas de fundición | 19 |
| 1.3.2 Relación agua-arcilla..... | 20 |
| 1.3.3 Ensayos de laboratorio | 21 |
| 1.3.4 Acción aglutinante de las arcillas de moldeo | 24 |
| 1.3.5 Aglutinantes | 25 |
| 1.4 Importancia de la utilización de los MEF en la ingeniería..... | 25 |
| 1.4.1 Uso de la herramienta de simulación numérica ProCAST® en los procesos de fundición..... | 27 |
| 1.5 Conclusiones..... | 31 |
| CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS EN LA ELABORACIÓN DE MOLDES CON MEZCLAS CARBURANTES | 32 |
| 2.1 Introducción..... | 32 |
| 2.2 Caracterización de la fundición con grafito nodular esférico | 32 |
| 2.3 Caracterización de las aleaciones de aluminio..... | 33 |
| 2.4 Caracterización de las aleaciones de cobres (bronces y latones)..... | 33 |
| 2.5 Análisis de las características de las mezclas de moldeo | 34 |
| 2.6 Simulación numérica para determinar la competitividad de las mezclas de moldeo carburante..... | 37 |
| 2.7 Simulación numérica de competitividad de las mezclas carburantes en los moldes de fundidos de aleaciones de aluminio | 39 |
| 2.8 Simulación numérica de competitividad de las mezclas carburantes en los moldes de fundidos de aleaciones de cobre..... | 41 |

| | | |
|----------------------------------|---|----|
| 2.9 | Simulación numérica de competitividad de las mezclas carburantes en los moldes de fundidos del hierro gris con grafito nodular esférico | 44 |
| 2.10 | Valoración socioeconómica..... | 46 |
| 2.11 | Valoración medioambiental y para la defensa..... | 49 |
| 2.12 | Conclusiones..... | 49 |
| CONCLUSIONES GENERALES..... | | 50 |
| RECOMENDACIONES | | 51 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 52 |
| ANEXOS | | 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Arena de Sílice (Maldonado, 2021). | 15 |
| Figura 1.2 Caolinita (Maldonado, 2020)..... | 19 |
| Figura 1.3 Arcilla Bentonita (Maldonado, 2020)..... | 19 |
| Figura 1.4 Dispositivo para el llenado del cilindro (Salcines, 2000)..... | 23 |
| Figura 1.5 Escala para la lectura directa de la compatibilidad (Salcines, 2000). | 23 |
| Figura 1.6 Etapas de la simulación Fuente: E.T.S.I. de Bilbao..... | 27 |
| Figura 1.7 Malla Chequeada en 3D (Arias, 2021). | 28 |
| Figura 1.8 Generación de la zona de separación durante el mallado y la creación de puntos coincidentes para la correcta simulación (ESI-Group, 2011) (Arias, 2021). .. | 29 |
| Figura 1.9 Esquema del fenómeno de la transferencia de calor que se origina entre el molde y la pieza (ESI-Group, 2011) (Arias, 2021). | 30 |
| Figura 1.10 Proceso de simulación en ProCAST® (Arias, 2021). | 31 |
| Figura 2.1 Bloque en Y según norma ASTM A537 -84 para extracción de muestra para ensayos mecánicos..... | 38 |
| Figura 2.2 Bloque en Y según norma ASTM A537 -84, exportado al ProCAST. Fuente de elaboración: Propia. | 38 |
| Figura 2.3 Análisis numérico del bloque en Y según norma ASTM A537-84. Fuente de elaboración: Propia..... | 39 |
| Figura 2.4 Análisis del avance del frente de enfriamiento solidificación del Al. Fuente de elaboración: Propia..... | 40 |
| Figura 2.5 Análisis del mantenimiento de la geometría y configuración del molde de Al. Fuente de elaboración: Propia. | 40 |
| Figura 2.6 Análisis del comportamiento térmico de la pieza de Al en el molde de mezclas carburantes. Fuente de elaboración: Propia..... | 41 |
| Figura 2.11 Análisis de los efectos superficiales de la orientación del avance del frente de enfriamiento, solidificación y contracción de los moldes de hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburante. Fuente de elaboración: Propia. | 45 |
| Figura 2.12 Análisis de los efectos interiores de la orientación del avance del frente de enfriamiento, solidificación y contracción de los moldes de hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburantes. Fuente de elaboración: Propia. | 46 |

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de la fundición es de importancia para el mundo por diferentes razones. Quizás la más importante de ellas es porque es un medio de apoyo para otros tipos de industrias, para las pequeñas empresas, y para la economía de manera global. Gran cantidad de empresas dependen de la fundición como la automotriz, la construcción, la industria aeroespacial, el sector petrolero, la minería, el transporte e incluso la sanidad. Esta trae consigo un gran número de ventajas debido a que es un proceso considerado más fácil que el proceso de maquinado y se pueden llegar a fabricar piezas que tengan distintos tamaños y diferentes niveles de complejidad.

Es considerada la madre de otras industrias y es una actividad de gran impacto en el PIB industrial. En este sentido, el acompañamiento del Estado a las industrias, la visión del negocio y las posibilidades de capacitación técnica son los primeros pasos que se deben dar para fortalecer un área que viene en auge en el resto del mundo y que necesita seguir creciendo. Es vital para el progreso de un país el desarrollo de la construcción de maquinarias, lo que se refiere a la producción de artículos metálicos que ocupa un lugar preponderante y por fundición se produce una cantidad significativa de estos artículos.

En Cuba existen varias industrias que realizan los procesos de fundición de metales y que se encuentran envueltas en una reconversión tecnológica, que propiciará elaborar piezas y componentes dirigidos a programas priorizados del país; además de elevar la calidad y eficiencia de sus producciones, muchas de las cuales sustituyen importaciones y posibilitarán ampliar su presencia en el mercado internacional.

Las mezclas de moldeo juegan un papel determinante en la calidad y costo de las piezas fundidas, producto que los materiales componentes como arenas y arcillas refractarias, etc., influyen en las propiedades del molde de las cuales depende la calidad de los fundidos en cuanto a la formación de poros, sopladuras, inclusiones no metálicas y en la estructura de la pieza. Por esto hay que prestar especial cuidado en la selección de los materiales y en la preparación de las mezclas de moldeo.

Según (Suárez, 2022) existen un gran número de tipos de mezclas de moldeo, y la principal diferencia está en su uso; para piezas pequeñas, medianas y grandes, por ejemplo. La mezcla denominada MR1, compuesta por bentonita y melaza como aglutinantes, acompañando a la arena sílice, es una mezcla que se puede denominar única. La utilización de la melaza ha quedado relegada en los últimos tiempos, dado fundamentalmente por su utilización en otras esferas de la vida, ejemplo como alimento animal y en el mejoramiento de suelos. Por eso al preparar mezclas ya sean de cara, de relleno o únicas se debe tener especial cuidado en que cumplan con las propiedades siguientes: refractariedad, permeabilidad, resistencia, plasticidad, moldeabilidad y colapsabilidad.

Actualmente la Empresa Mecánica “Héroes del 26 de Julio” (HOLMECA) es una de las entidades que tiene dentro de sus planes de desarrollo la implementación de materiales alternativos para la producción de moldes de metales ferrosos y no ferrosos, 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 producciones ferrosas cuenta con un horno de cuba alta discontinuo de 700 mm de diámetro interior. La capacidad calculada del mencionado taller es de 360 toneladas al año. Se producen piezas principalmente para la Industria Mecánica, el MINAZ, el MINTUR, el MINDUS, entre otras. El moldeo se realiza en cajas metálicas de dimensiones 1 000 x 800 x 300 mm y 630 x 500 x 250 mm y se utilizan mezclas en verde.

Posee un taller secundario para la elaboración y secado de los machos, estos son elaborados con mezclas de cromita, bentonita, fuel oíl y melaza con secados en estufas a temperaturas de 200 – 250 °C. Presenta un sistema de moldeo mecanizado con máquinas neumáticas movidas por un compresor que impulsa de forma estable aire comprimido a seis atmósferas.

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 pisones

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.

Se utiliza el método de moldeo en verde, compuesto de arena y arcillas refractarias y el aglutinante. Como arena refractaria se utiliza la arena sílice, la bentonita en calidad de arcilla refractaria y como aglutinante la miel final de la caña. Esta mezcla tiene como desventaja que la miel de caña es un producto higroscópico y esta humedad provoca poros y sopladuras en los fundidos de metales ferrosos. Esto se ha solucionado con el uso de mezclas carburantes usando como aglutinantes hidrocarburos tales como fuel oíl o aceites usados.

Estas particularidades de la industria generan un **problema**: ¿Cómo demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en los moldes de fundición de metales ferrosos y no ferrosos?

Esta investigación tiene por **objeto de estudio** los moldes de fundición.

El **campo de acción** de la investigación abarca la aplicación del análisis numérico del molde de fundición.

La investigación plantea como **hipótesis**: Si se utiliza el análisis numérico del molde de fundición, entonces se podrá demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

A partir de la hipótesis, se plantea como **objetivo general** del trabajo: Utilizar el análisis numérico del molde de fundición para demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

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

1. Evaluar los procedimientos existentes y los parámetros que intervienen en la elaboración de las mezclas de moldeo.
2. Evaluar los procedimientos existentes y los métodos de análisis numéricos en los procesos de moldeo de metales ferrosos y no ferrosos. Esta revisión permite establecer el marco teórico de la investigación y la fundamentación de la hipótesis.

3. Desarrollar el análisis numérico del molde de fundición para demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

La investigación identifica como **aporte práctico** el análisis numérico que permite demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

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 desarrollo del análisis numérico en la demostración de la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa. Permite establecer el marco teórico referencial, permitiendo identificar qué se ha investigado sobre el tema objeto de estudio, a fin de sustentar el objeto y el campo de la presente investigación.

Método de inducción-deducción: se aplicó en la evaluación de los diferentes criterios que intervienen en el desarrollo del análisis numérico, y en la demostración de la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

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 el desarrollo del análisis numérico del molde de fundición y en la demostración de la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

Método de modelación: se aplicó al modelar el análisis numérico en la demostración de la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

Método informático: se utilizó durante la concepción y desarrollo de la aplicación informática para asistir el desarrollo del análisis numérico en la demostración de la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales

ferrosos y no ferrosos de manera precisa.

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, el campo de acción, la novedad científica y los métodos de investigación utilizados.

En el Capítulo 1, «Antecedentes y estado actual de las mezclas de moldeo», se expone la revisión bibliográfica realizada, donde se analizan los aspectos esenciales relacionados con los antecedentes y las tendencias actuales en la elaboración de moldes de fundición, así como los distintos componentes de las mezclas de moldeo.

En el Capítulo 2, «Materiales y métodos en la elaboración de moldes con mezclas carburantes», se desarrolla la tecnología para la elaboración de moldes de fundición de metales ferrosos y no ferrosos con el uso de mezclas carburantes, se realiza el análisis numérico del molde de fundición y se demuestra la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa, se exponen los procedimientos y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación.

En las «Conclusiones generales» se establecen las conclusiones de la investigación en correspondencia con el objetivo planteado. Se establecen en las «Recomendaciones» aquellos aspectos que permitirán cumplimentar y ampliar la investigación desarrollada. Las fuentes consultadas y utilizadas durante la investigación se relacionan en las «Referencias Bibliográficas». Para facilitar la comprensión de la investigación desarrollada en los «Anexos» se muestran datos complementarios esenciales.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LAS MEZCLAS DE MOLDEO

1.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los antecedentes fundamentales relacionados con el método de moldeo, con el objetivo de describir los trabajos previos de la investigación. Se analizan los parámetros que influyen en los moldes de materiales ferrosos y no ferrosos, así como las características de la bentonita con el objetivo de identificar las principales variables que intervienen en el desarrollo de la tecnología para la obtención de estos moldes.

En cuanto a las investigaciones, (Pallo et al., 2018) realizaron un estudio donde se pretendía determinar las propiedades de las mezclas de moldeo usadas en varios talleres de fundición de la Empresa Mecánica de Holguín de nombre comercial “Holmecca” y de acuerdo a estos resultados, proponer una nueva composición de mezcla de moldeo que mejorara las propiedades de la mezcla original y a su vez, determinar la influencia de estas propiedades en las piezas fundidas.

Para determinar las propiedades de las arenas se realizaron ensayos de granulometría, tamaño y forma de grano, contenido de humedad y arcilla, permeabilidad, dureza, resistencia al corte y compresión. Además, se realizaron ensayos mecánicos de tracción y dureza superficial en las probetas fundidas con dos tipos de mezclas distintas para cada taller de fundición. Una vez concluidos los ensayos, se compararon los resultados obtenidos de estos en las mezclas de moldeo y mecánicos, entre mezclas originales y nuevas para determinar las diferencias producidas con los cambios realizados y la influencia de las propiedades de las mezclas de moldeo en las propiedades mecánicas de las piezas fundidas. De esto se obtuvo una evidente mejora en las propiedades de las mezclas de moldeo al reducir el contenido de humedad y de arcilla, sin embargo, no se notó mayor cambio en las propiedades mecánicas de las piezas fundidas.

Los trabajos anteriormente referenciados sirven de importantes referentes a la hora de llevar a cabo la selección de una mezcla de moldeo para la producción de piezas fundidas, ya sea en masa o únicas, y es muy importante debido a que el desconocimiento de los fundidores sobre las propiedades y características con las que

deben contar las mezclas es un problema grave, que trae como consecuencia dificultades para dosificar los insumos y aditivos de la mezcla de moldeo.

1.2 Arenas de moldeo

Generalmente, suele usarse arena sílice (Figura 1.1) debido a su bajo precio y a que es adecuada por sus características de alta temperatura y elevado punto de fusión. Lo aconsejable para lograr una buena fundición es que la arena esté limpia y que sea nueva. Se pueden diferenciar dos tipos de arenas diferentes como la aglutinada naturalmente (banco de arena) y la sintética (arena de lago).



Figura 1.1 Arena de Sílice (Maldonado, 2021).

Es necesario que la arena disponga de propiedades como cohesión, plasticidad en estado húmedo, resistencia a la tracción y flexión, refractariedad, permeabilidad, conductividad térmica, disgregable, que se deforme para permitir contracción y que sea económica. Es decir, se requiere que soporte altas temperaturas sin que se funda o se degrade. Otros aspectos para tener en cuenta son el tamaño del grano, la forma de dicho grano y la distribución de la mezcla.

Si disponemos de arena que posee granos finos y redondos, esta se puede apisonar de manera más compacta y se logra que el molde obtenga una superficie más lisa. Este tipo de arena de grano fino refuerza la resistencia del molde, además de reducir su permeabilidad. Sin embargo, una permeabilidad adecuada de los moldes y machos deja que los gases y vapores producidos durante la fundición escapen fácilmente.

Con el fin de evitar defectos como podría ser el desgarramiento y el agrietamiento en caliente, es necesario que el molde tenga una colapsabilidad que deje a la fundición contraerse cuando ésta se enfríe. Ha de destacarse que el costo es reducido y los desperdicios minimizados cuando se recupera la arena tras el proceso, por medio del refregado en seco, el lavado o incluso mediante calentamiento si se está trabajando con aglutinantes orgánicos. El proceso de compactación de la arena en el molde se puede realizar de manera manual o empleando máquinas de presión neumática (Barrio, 2022).

1.2.1 Clasificación de las mezclas de moldeo

Una mezcla de moldeo en su forma más simple es la unión de diferentes materiales, capaces de producir un material de construcción con el cual se pueda elaborar el molde (Pallo et al., 2018). Los componentes fundamentales de una mezcla son:

- Arena (material básico)
- Arcilla (que tiene como función la unión de los granos entre sí)
- Agua (agente activante de la aglutinación)
- Aditivos (propiedades especiales en condiciones especiales)

Su clasificación está dada de acuerdo a su utilización:

- De revestimiento: Esta mezcla es utilizada en el modelo. Su utilización se ejecuta en conjunto con la mezcla de relleno para completar el restante de la caja de moldeo. Su resistencia para aguantar la presión del metal líquido debe ser alta.
- De relleno: La mezcla de relleno debe poseer menor penetrabilidad al gas que la de revestimiento.

1.2.2 Propiedades de las mezclas de moldeo

Desde el punto de vista tecnológico, es necesario conocer cada uno de los elementos que componen la mezcla, sus características y propiedades fundamentales, así como su campo de aplicación.

En dependencia de estos conocimientos, el tecnólogo fundidor será capaz en un momento dado de elegir el material adecuado para lograr una producción con calidad. A continuación, se relacionan algunas de las propiedades más importantes de las mezclas de moldeo (Revelo, 2011).

Refractariedad: Es la propiedad de soportar altas temperaturas sin mostrar índices de fusión o descomposición sin que cambie sus propiedades. Está íntimamente relacionada con la composición química de manera que una arena que contenga un 99,8 % de SiO_2 o más, es considerada altamente estable y altamente refractaria.

Permeabilidad: Es la propiedad que permite a la mezcla de moldeo ser atravesada por los gases y posibilita la evacuación de estos del molde en el momento de la colada. En este caso, la porosidad de la arena es la que permite la permeabilidad, y el escape de los gases y vapores formados en el molde.

Resistencia: Este debe resistir a los esfuerzos mecánicos a que está sujeto, el molde debe mantener sus dimensiones y formas iniciales. Es decir, el molde debe tener resistencia a la tracción, a la compresión, al corte y dureza superficial. Este tipo de resistencia depende del tamaño, forma y uniformidad del grano de arena, además del aglomerante o aglutinante utilizado.

Plasticidad: Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño y alta capacidad de hinchamiento.

Moldeabilidad: En sí esta propiedad es la capacidad que tienen las mezclas para fluir alrededor de lo que se utilice como molde permitiendo la reproducción de detalles.

Colapsabilidad: Es la facilidad para que el molde pueda ser destruido, como por lo general estos moldes son de un solo uso, después de colar el metal se debe destruir el molde para sacar la pieza por lo que debe ser fácil destruirlo.

1.3 Arcillas de fundición

En los talleres de fundición se emplean con frecuencia las arcillas bentoníticas, las mismas son usadas principalmente como aglutinante; sin embargo, existen otros tipos de arcillas (refractarias) que también pueden ser utilizadas.

Las arcillas son rocas formadas por partículas muy finas (del orden de los micrones), cuyo componente fundamental es el silicato de aluminio hidratado, acompañado de algunas impurezas minerales como: calcita, feldespato, mica, óxido de hierro y cuarzo. Su coloración es muy variada y depende principalmente de la composición mineralógica.

Las arcillas en los talleres de fundición se emplean, fundamentalmente, para la elaboración de mezclas de moldeo aprovechando sus propiedades aglutinantes; este es el caso de las arcillas (bentonitas).

En Cuba, actualmente se explotan con fines de moldeo algunos yacimientos de arcillas, generalmente bentonitas cálcicas, las cuales son sometidas a un proceso de enriquecimiento con sodio con vistas a incrementar sus propiedades absorbentes. Sin embargo, las arcillas con propiedades refractarias no están completamente estudiadas, y su uso es aún insuficiente.

En la región de Moa se localizan importantes depósitos de minerales con excelentes propiedades, los cuales pueden ser empleados como material refractario, pigmentos y aislantes térmicos.

El desarrollo alcanzado en esta región en ramas tan importantes como la geología, la minería y la metalurgia, facilita los procesos de prospección, extracción, preparación, transportación y explotación de los variados recursos minerales con que cuenta el municipio y que, en su gran mayoría, no son aprovechados eficientemente (Pons et al., 2018).

1.3.1 Clasificación de las arcillas de fundición

Las arcillas se clasifican de la siguiente manera:

Caolinita: Es un silicato acuoso de aluminio cuya temperatura de fusión oscila entre los 1 748 - 1 750 °C. Estas arcillas se presentan en forma de escamas, cuyo poder aglutinante es moderado y su poder refractario es hasta 1 500 °C (Figura 1.2).



Figura 1.2 Caolinita (Maldonado, 2020).

Bentonita: Su composición química es inestable debido a que su red cristalina puede ensancharse en la dirección de uno de sus ejes, lo que permite que absorba mayor cantidad de agua mejorando sus propiedades como aglutinante. Su temperatura de fusión oscila entre 1 250 - 1 300 °C (Figura 1.3).



Figura 1.3 Arcilla Bentonita (Maldonado, 2020).

Su procedencia es de la descomposición de cenizas volcánicas. Existen dos tipos de bentonitas, las sódicas y las cálcicas. Su modo de empleo está entre el 2 al 5 % en masa respecto a la arena con un 3 a 4 % de agua (Pallo et al., 2018).

1.3.2 Relación agua-arcilla

Los resultados del trabajo de investigación en el campo de las mezclas de moldeo demuestran que la relación agua-arcilla es un parámetro definitorio en el mecanismo de la aglutinación y, con ello, en el comportamiento y propiedades de las mezclas de moldeo arena-arcilla. En este sentido, han constituido un importante aporte los trabajos de Wenninger que han puesto en primer plano la teoría, mencionada anteriormente, que explica el proceso de aglutinación mediante el alto grado de ordenamiento de las capas de agua.

La teoría del agua rígida de forma resumida, puede expresarse así: se sabe que el hecho de que la molécula de agua sea un dipolo, le permite su autoalineación ordenada a temperatura de congelación. Esto también es posible a temperatura ambiente, debido a que en su estado líquido el ordenamiento del dipolo se refuerza con la presencia de fuerzas electroquímicas similares a las que se originan en la interfase líquido-sólido.

Esto quiere decir que una película de agua sobre la superficie de un sólido (grano de arena), puede concebirse como una serie de capas de moléculas dipolares superpuestas. Es evidente que a medida que la distancia desde la superficie aumenta, la orientación, el grado de alineación y la rigidez de las capas disminuyen, ya que las fuerzas superficiales son menos efectivas. A cierta distancia, ya las capas poseen un grado de desorden molecular tal que se comportan como un líquido a temperatura ambiente.

La verificación de lo anterior fue el principal aporte de Wenninger y puso en evidencia que la capacidad aglutinante de cada laminilla de arcilla estaba relacionada con el cociente agua/arcilla de su estructura. Quedó evidenciado, además, que la absorción del agua se produce mediante su incorporación, por capas, dentro de la entidad agua-arcilla. Finalmente, se estableció que la primera capa se adhiere para una relación agua/arcilla de 0,15; la segunda a una relación 0,30; la tercera a 0,45, y la cuarta a 0,60.

En cambio, las primeras capas fuertemente adheridas a la superficie y con un elevado grado de ordenamiento, se comportan como un sistema rígido. Por esa razón, se le ha denominado agua rígida. Ahora bien, de los dos componentes sólidos de la mezcla convencional en verde, la arcilla posee un grado de dispersión mucho mayor que la arena, lo cual implica una mayor concentración de cargas en la superficie de la laminilla de arcilla.

Por lo tanto, en la unión húmeda entre láminas de arcilla y granos de arena, las primeras serán las que determinarán la cantidad y posición del agua rígida. Por ello, muchos investigadores consideran correcto emplear el término de entidades agua-arcilla al referirse al elemento aglutinante en las mezclas de moldeo tradicional en verde. Partiendo de los conceptos anteriores, Wenninger dedujo y demostró que las entidades agua-arcilla deberían comportarse como un conjunto integral en respuesta a las cargas externas.

Siguiendo el mismo razonamiento, debía esperarse que las variaciones en el contenido de humedad produjeran variaciones correspondientes en la resistencia mecánica de la mezcla en verde y en su densidad. Para ello, propuso la molienda continua de la mezcla a partir de valores altos de humedad. Lo anterior, como es de suponer, debía suceder cuando el contenido de humedad del sistema fuera tal que la aglutinación respondiera a la teoría del agua rígida, o sea, entidades agua-arcilla actuando como un sólido flexible, alrededor de los granos de arena (Salcines et al., 2000).

1.3.3 Ensayos de laboratorio

A partir de la teoría del agua rígida y de los trabajos desarrollados por Wenninger se alcanzó una concepción más clara sobre los mecanismos de aglutinación en verde de las mezclas de moldeo. Al mismo tiempo, se presta una particular atención a los ensayos de compactibilidad, resistencia a la compresión en verde y humedad, como índices más representativos de dicho proceso de aglutinación. Se demuestra la relación que existe entre estos ensayos y las consecuencias de los trabajos de Wenninger. Se hace particular énfasis en el ensayo de compactibilidad por considerarlo de aplicación limitada.

Sobre el ensayo de compactibilidad es conocido que el índice de compactibilidad está

directamente relacionado con el consumo de energía necesario para producir un molde o un macho. O sea, está relacionado con el comportamiento de la mezcla de moldeo en la operación de producir el llamado molde de arena. Esto equivale a decir que, en cierta medida, de esta propiedad depende la productividad de moldeadores y macheros.

Conceptualmente, la compactibilidad de una mezcla de moldeo es la propiedad que mide la deformación que ésta experimenta, en verde, cuando por efecto de cargas externas sufre una deformación de tipo plástico. El objetivo del ensayo de desmoldeabilidad es medir la magnitud, expresada en porcentaje, de dicha deformación.

El ensayo más universalmente aceptado de compactibilidad, consiste en llenar un tubo normalizado (4,75 pulgadas de altura y 2 pulgadas de diámetro interior, según la norma AFS), con mezcla de moldeo desmenuzada (cribada). Con ese fin, la mezcla que ha de llenar el tubo primero se hace pasar por un tamiz (0,075 pulgadas de luz) montado a una altura constante sobre el tubo.

A este fin, se recomienda construir un dispositivo compuesto de un embudo con un fondo de igual diámetro que el tubo de ensayo colocado debajo de él como se muestra en la Figura 1.4. La parte superior del embudo lo constituye un tamiz de 0,075 pulgadas de luz. Luego de llenado el tubo con la mezcla de moldeo suelta (tamizada) se debe enrasar el borde superior del mismo para eliminar el exceso de mezcla.

Posteriormente, se compacta la mezcla contenida en el tubo mediante tres golpes del apisonador de probetas. La distancia desde el borde superior del tubo hasta la superficie de la mezcla compactada, expresada en porcentaje de la altura del tubo, es la medida de la compactibilidad de dicha mezcla. Se puede colocar una regla graduada en la parte superior del apisonador, con la cual se determina la distancia a la superficie de la mezcla compactada y obtener directamente el porcentaje de compactibilidad (Figura 1.5).



Figura 1.4 Dispositivo para el llenado del cilindro (Salcines, 2000).

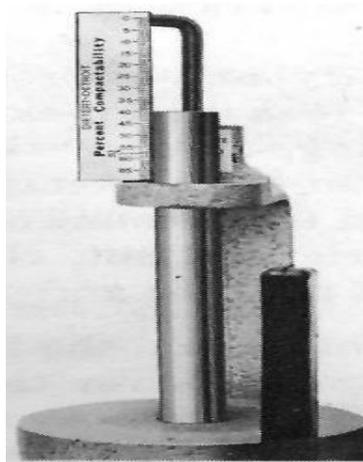


Figura 1.5 Escala para la lectura directa de la compatibilidad (Salcines, 2000).

Como hemos señalado antes, este ensayo posee un significado práctico importante. En primer lugar, como el ensayo es independiente de la gravedad específica de la arena (tipo de arena), resulta más representativo que el ensayo de densidad a granel para medir el requerimiento de humedad en una mezcla de moldeo. Por otra parte, su sensibilidad está dada por el hecho de que al variar el contenido de humedad de la mezcla, el espesor del recubrimiento de agua-arcilla variará consecuentemente y con ello, la respuesta a las cargas externas del sistema en su conjunto.

La correlación demostrada entre la resistencia a compresión en verde y la compactibilidad para definir el aglutinante que realmente trabaja en la mezcla de moldeo (arcilla efectiva), ha llevado a algunos investigadores a proponer un valor o

índice de aglutinación expresado por el producto de la resistencia a compresión en verde y la compactibilidad. Este índice se considera un parámetro útil para el control de las mezclas de moldeo en la planta procesadora.

Sobre la resistencia en verde y la humedad se ha visto que el ensayo de compactibilidad reproduce la forma en que un volumen fijo de mezcla de moldeo reacciona ante una entrada fija de energía, lo cual con bastante aproximación reproduce la acción que una máquina de moldear realiza sobre un volumen de mezcla colocado dentro de una caja de moldeo. A su vez, esta entrada de energía es lo que confiere a la mezcla de moldeo resistencia en verde, lo que está directamente relacionado con la relación agua/arcilla existente en la misma.

Esta relación es íntima en tanto sólo en presencia de agua es que la arcilla (o bentonita) desarrolla su capacidad plástica (aglutinante). Además de esto, en el sistema pieza fundida-molde la humedad de la mezcla se constituye en el principal agente regulador del enfriamiento y la extracción del calor. A partir de esto último, no es difícil comprender que para un área determinada de moldeo-colada el consumo de agua se relaciona directamente con la producción anual de piezas fundidas de dicha área (Salcines et al., 2000).

1.3.4 Acción aglutinante de las arcillas de moldeo

Se sabe que la capacidad aglutinante de una arcilla está dada, fundamentalmente, por la forma y el tamaño de las partículas que la componen, así como de la estructura de la propia arcilla, especialmente en lo relacionado con el tipo de enlace que se forma entre dos láminas adyacentes de la arcilla.

Por ejemplo, las bentonitas son un tipo de arcilla que está constituida mayormente de este aglutinante y es usado porque tiene una capacidad de absorción mucho más elevada de agua, hinchándose hasta 16 veces su volumen primitivo. Se caracterizan por su alto poder aglutinante debido al pequeño tamaño de sus partículas. Esto representa una alta capacidad de absorción de agua y su capacidad de aglutinación alcanza hasta 2-7 más que cualquier otra arcilla (Cabrera, 2020).

La caolinita está constituida por dos láminas y posee una capacidad aglutinante baja debido a que cada capa de hidróxido de aluminio está conectada a una capa de óxido

de silicio; en cambio, en el mineral montmorilonita constituido por tres láminas, una capa de hidróxido de aluminio está siempre entre dos capas de óxido de silicio, desplegando así una capacidad aglutinante alta. La mayoría de los minerales de arcilla tienen cationes intercambiables. La capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión del suelo dependen del tipo y cantidad de cationes (Carrasco, 2018).

1.3.5 Aglutinantes

Los aglutinantes son sustancias cuyo objetivo es proporcionar cohesión a la mezcla en proporciones determinadas de agua y arena. Los principales requerimientos que deben cumplir los aglutinantes son que su distribución debe ser uniforme en la superficie de la arena, la permeabilidad debe ser óptima, permitir la plasticidad de la arena para que se llene en todas las cavidades del molde, rápido secado del molde, no ser tóxica ni nociva para los operarios y de un costo bajo, y no debe minimizar el poder refractario de la mezcla de moldeo (Pallo et al., 2018).

La bentonita sódica o cálcica, proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla, facilitando el moldeo y proporcionando la suficiente resistencia en húmedo para mantener la reproducción y sus detalles tanto al retirar el objeto modelador y mientras se vierte el material fundido. La proporción de las bentonitas en la mezcla fluctúa según sea ésta sódica o cálcica.

El porcentaje de bentonita en la arena de moldeo, varía según el sistema de moldeo (manual o de alta productividad) y el tipo de pieza a fundir, normalmente está entre el 2 % y el 10 % de la cantidad de arena. La bentonita sódica se usa en fundiciones de mayor temperatura. La cálcica por ser más estable a altas temperaturas, se utiliza en fundición de: acero, hierro dúctil y maleable, en menor escala para metales no féreos facilitando la producción de moldes complejos (Chura, 2014).

1.4 Importancia de la utilización de los MEF en la ingeniería

El Método de los Elementos Finitos (MEF) consisten en un método de análisis en ingeniería que permite reproducir virtualmente a un componente o sistema mecánico en situación de trabajo real, ofreciendo las ventajas de la reducción de costes, tiempo, equipamiento y accesibilidad necesarios en un análisis real (Quillupangui-Caiza, 2020), (Arias & Ruíz, 2019), (Anabitarte-Gorostegui, 2020), (Flores, 2021).

El MEF se ha desarrollado en todos los campos de la ingeniería, esto se debe a que, un análisis con elementos finitos se aplica a todos los problemas de la industria. Por lo general, el manejo del MEF ha requerido un profundo conocimiento físico-matemático, no obstante, en la actualidad existen una variedad de programas de computadora, junto con las características del hardware, que han puesto al alcance de los usuarios potentes herramientas que se basan en los elementos finitos para procesos de simulación (Serpa-Andrade, 2018),(Tierra et al., 2020). Los programas disponibles para un análisis usando elementos finitos son fáciles de operar, pero requiere entender la interfaz y la metodología de trabajo, para de esta forma producir resultados de calidad.

En términos matemáticos, el MEF es una técnica numérica para la resolución de problemas descritos como un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. Utilizando los elementos finitos, se puede analizar cualquier forma, así como, idealizar la geometría y obtener resultados con la precisión deseada (Woge et al., 2020).

Una de las principales ventajas del método de elementos finitos, trabaja con las condiciones de frontera de un cuerpo con configuración irregular, estableciendo sobre la superficie del mismo pequeñas regiones (tantas como sea necesario) para lograr un perfil aproximado del cuerpo; considerando que la condición de frontera puede ser diferente entre una y otra región adyacente, con lo que se puede atacar una variedad de problemas reales (Torneo-Costa, 2020).

El procedimiento básicamente incluye la división del dominio en muchas pequeñas regiones, llamadas "elementos", convenientemente distribuidas, los cuales pueden ser de forma triangular, cuadrilátera, hexaédrico, tetraédrico (García et al., 2020), como los más comunes, y se usa una interpolación para describir el comportamiento de estos subdominios. Un número satisfactorio de puntos, llamados "nodos", se especifican en cada elemento y a cada uno de ellos le corresponde un valor de la variable o las variables de la ecuación diferencial, que se obtiene interpolando dentro de cada elemento.

El uso del principio variacional o del método de residuos ponderados permite transformar a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el dominio, en ecuaciones de elementos finitos, que gobiernan aisladamente a cada uno de los elementos y en general son ecuaciones algebraicas (Elisea-Espinoza, 2018). Las ecuaciones resultantes son convenientemente acopladas, formando un sistema global, el cual puede introducir las condiciones de frontera y las condiciones iniciales, sobre la base de los requerimientos del modelo requerido; finalmente los valores de la variable en los nodos, son determinados de la solución del sistema de ecuaciones algebraicas (Abasolo et al., 2017), (Arias, 2021).

1.4.1 Uso de la herramienta de simulación numérica ProCAST® en los procesos de fundición

ProCAST® es un programa de cómputo basado en el método por elementos finitos para simular cualquier proceso de fundición, entre los que destaca fundición por gravedad, baja presión, alta presión entre otros; además de facilitar la comprensión de los procesos de solidificación, lo cual ayuda a la correcta toma de decisiones en las etapas tempranas del proceso de fabricación, incluyendo diseño y llenado del molde. Este software es usado en la industria de la fundición con fines para estudiar el comportamiento de los procesos de fundición de piezas y determinar las variables que afectan la obtención de piezas fundidas (Arias, 2021).

Todo software por elementos finitos está dividido en tres etapas (Figura 1.6) que son:



Figura 1.6 Etapas de la simulación Fuente: E.T.S.I. de Bilbao.

Modelo CAD

Con las dimensiones de la probeta, el cálculo de los sistemas de alimentación y las dimensiones de la caja de moldeo, se procede a realizar un modelo CAD (en este caso en el sistema CAD SolidWorks® 2016). Luego se guarda el archivo en IGES, STEP, STL o cualquier extensión, para luego realizar la simulación en ProCAST® 2019.

Visual-Mesh 14.5

En esta aplicación, se importa la geometría para discretizar la pieza (crear la malla por elementos finitos). En este caso se asignan los siguientes valores a la probeta: un tamaño de elemento de malla de 7, a los sistemas de alimentación y tragadero de 8 y a la caja de moldeo de 6 (mallado en 2D). Luego se generan 51 660 elementos, después se chequea la malla generada (Figura 1.7).

Visual-Cast 14.5

Mediante esta opción del software, se le introduce toda la información necesaria para la simulación. Se introducen los valores de material: AlCu4MgTi; temperatura de vertido: 730 °C; temperatura de precalentamiento del molde: 200 °C; tipo de arena: arena de cromita.

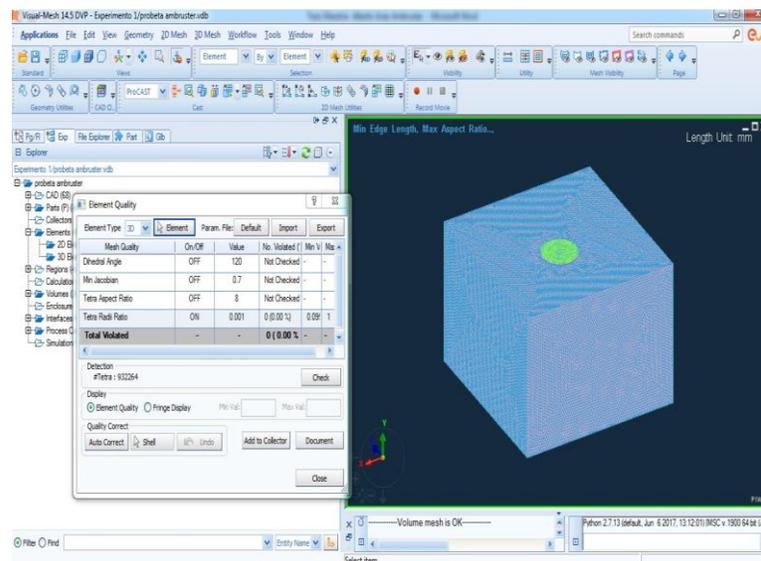


Figura 1.7 Malla Chequeada en 3D (Arias, 2021).

Propiedades de la zona de contacto

Durante el proceso de mallado se genera una zona entre los diferentes materiales que componen el modelo. En el caso de este trabajo son dos materiales y la zona que se crea separa a los mismos. Para el correcto funcionamiento de la simulación es necesario hacer dobles los puntos para que exista una temperatura diferente en cada lado (Figura 1.8).

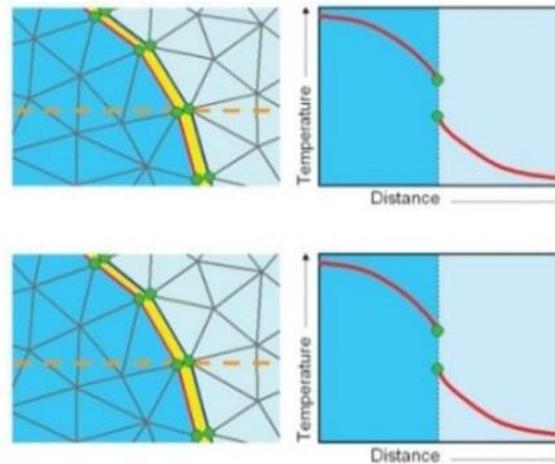


Figura 1.8 Generación de la zona de separación durante el mallado y la creación de puntos coincidentes para la correcta simulación (ESI-Group, 2011) (Arias, 2021).

Los valores de los coeficientes de transferencia de calor adecuados para cada par que se genera, se muestran en la Figura 1.9.

Asignación de condiciones de contorno

Se pueden aplicar tres tipos de condiciones de contorno:

1. Condiciones de contorno de superficie ("Asignar superficie"), que corresponden a todas las condiciones aplicadas al exterior del modelo o al exterior de un determinado dominio material. Este es el tipo de límite más utilizado.
2. Condiciones de volumen ("Asignar volumen"), que corresponde a las condiciones que se aplican en un volumen completo (por ejemplo, calor volumétrico o fuente de masa).

3. Condiciones de contorno asignadas a envolventes ("Asignar envolvente") en caso de problema de radiación.

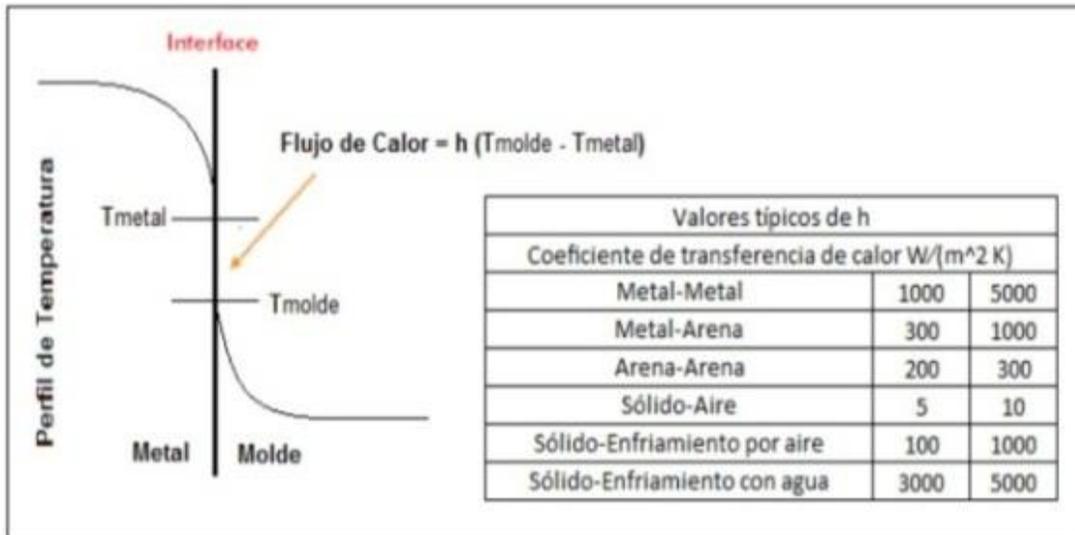


Figura 1.9 Esquema del fenómeno de la transferencia de calor que se origina entre el molde y la pieza (ESI-Group, 2011) (Arias, 2021).

Cálculo (StarSimulation)

Esta opción nos permite correr la simulación en este caso y a su vez, nos permite ver cómo se comporta el porcentaje de llenado, la fracción sólida el tiempo aproximado de la corrida. Así como, las curvas que nos van diciendo cómo se va comportando el porcentaje de solidificación, de llenado, entre otras (Figura 1.10).

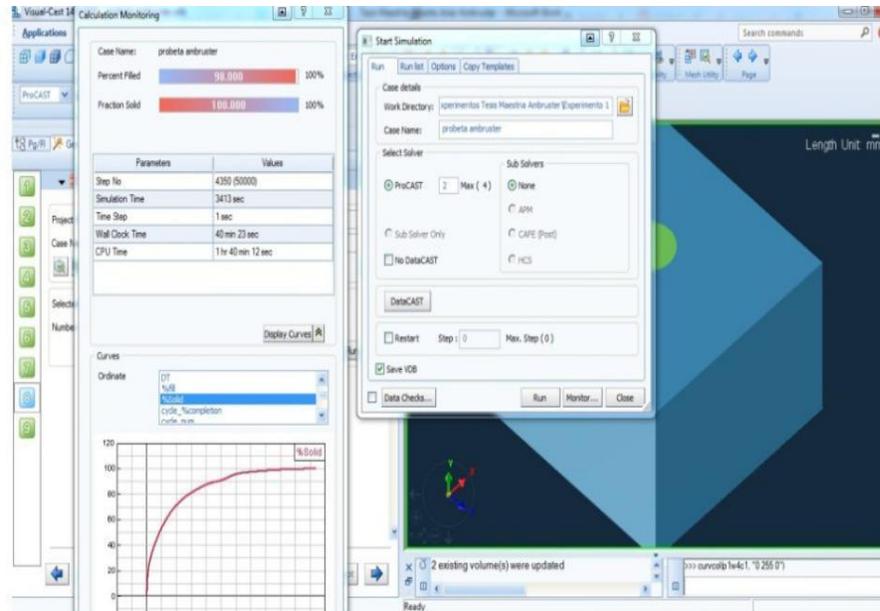


Figura 1.10 Proceso de simulación en ProCAST® (Arias, 2021).

1.5 Conclusiones

1. Al realizar la consulta con expertos y la búsqueda bibliográfica, no se encontró la utilización del análisis numérico del molde de fundición para demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera competitiva.
2. Las búsquedas realizadas demuestran que es viable el uso del análisis numérico en lugar de la prueba experimental y la serie “Cero” para determinar la competitividad del uso de las mezclas carburantes.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS EN LA ELABORACIÓN DE MOLDES CON MEZCLAS CARBURANTES

2.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla la tecnología para la elaboración de moldes de fundición de metales ferrosos y no ferrosos con el uso de mezclas carburantes, se realiza el análisis numérico del molde de fundición y se demuestra la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera precisa. Se exponen los procedimientos y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación.

2.2 Caracterización de la fundición con grafito nodular esférico

Las aleaciones de metales ferrosos y no ferrosos tienen un lugar preponderante en la producción de partes y piezas, mecanismo, maquinarias para la Industria Metalmeccánica, Siderúrgica, Naval, Automotriz, etc. Destacándose la fundición con grafito nodular esférico, las aleaciones de aluminios y las aleaciones de cobre.

La industria metalmeccánica manifiesta como tendencia mundial la sustitución de piezas de acero y fundición gris ordinaria, por fundición con grafito nodular, debido a que puede superar al acero en cuanto a sus propiedades de fundición, temperatura de fusión y vertido en el intervalo de 1 425 °C a 1 450 °C menor densidad y menor costo por tonelada (Al-Ghonamy, et al., 2012; Aristizábal, et al., 2013; Jacas, et al., 2005). Estas ventajas se aprecian de manera más visible en la industria automovilística, la industria naval, la construcción de maquinarias y la industria azucarera, entre otras. La aplicabilidad del hierro con grafito nodular ha sido posible gracias al desarrollo del tratamiento térmico de austemperizado, lo que ha permitido obtener fundiciones competitivas con los aceros, conocidas internacionalmente como ADIs, o sea, hierros dúctiles austemperados (Carnero, et al., 1999; Ordóñez-Hernández, et al., 2015).

El hierro gris de alta resistencia con grafito nodular esférico también es conocido como hierro con grafito esferoidal, hierro nodular, hierro dúctil y fundición gris con grafito esferoidal. En esta investigación se asume la denominación de fundición con grafito nodular esférico, según las normas UNE 36 111 y UNE 36 118.

2.3 Caracterización de las aleaciones de aluminio

Las piezas de aleaciones de aluminio pueden ser elaboradas en moldes húmedos, secos, de arena, de metal, de cáscara y otros (Kallbom, et al., 2005). Para las piezas de aleaciones de aluminio se emplean arenas de grano fino con adición de arenas arcillosas (B. M. Pillajo Corella y F. I. Romero Velasco, 2019).

Las mezclas para machos deben poseer una gran compresibilidad y los aglutinantes deben quemarse a temperaturas relativamente bajas (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2018). Las piezas grandes se elaboran en moldes secos de elevada resistencia. Para hacer moldes medianos y grandes se emplean mezclas de endurecimiento rápido con vidrio líquido con su posterior soplado con CO₂ o secado mediante el calentamiento.

Las aleaciones de aluminio se oxidan con facilidad durante la fusión a 727 °C, disuelven los gases y las impurezas nocivas (F. Botero, 2019). En la superficie de la masa fundida se forma una capa resistente de óxidos, la cual protege a la misma de la oxidación ulterior. La aleación puede contaminarse con óxido de aluminio, que no se disuelve en el aluminio fundido, éste puede ser eliminado sólo mediante el afino. Las aleaciones de aluminio disuelven intensivamente los gases, principalmente el hidrógeno y como resultado en las piezas se crean porosidades. Por esta razón, para la fusión de aleaciones de aluminio tiene gran importancia la elección correcta de los materiales de la carga y el grupo de fusión.

2.4 Caracterización de las aleaciones de cobres (bronces y latones)

Durante la fusión del cobre debe tenerse especial cuidado para evitar en lo posible la incorporación del hidrógeno y el oxígeno al cobre fundido (Sánchez-Figueroa, 2009). El hidrógeno se disuelve en el cobre en tanto que el oxígeno se combina formando óxido cuproso Cu₂O; después de la colada, el cobre al enfriarse deja al hidrógeno en libertad el cual reacciona con el óxido cuproso resultando piezas porosas como se muestra en la reacción (1):



Este peligro aumenta cuando se utiliza cobre catódico, el cual debido a su proceso de obtención contiene disuelto mucho H_2 . Para evitarlo se opera en una atmósfera oxidante; cubriendo la superficie del metal con una capa de carbón vegetal e introduciendo un desoxidante por un orificio que se practica en dicha tapa. Como desoxidante puede utilizarse el Cu fosfórico y diversos compuestos de calcio, litio y berilio (Sánchez-Figueroa, 2009). Puede utilizarse también el aluminio que es un desoxidante muy activo. Si bien este metal forma una capa de óxido en la superficie del crisol que debe eliminarse antes de proceder a la colada.

Pueden ser fundidas las piezas en arena o en coquilla satisfactoriamente. Para la fundición en arena deben prepararse moldes no muy prensados y con buena permeabilidad (Sánchez-Figueroa, 2009). Debe mantenerse la cuchara lo más cerca posible de los bebederos para reducir la oxidación del aluminio y disponer de grandes mazarotas que conserven el metal en estado líquido durante todo el tiempo de solidificación de la pieza, manteniéndolas cubiertas con una capa de carbón vegetal en polvo. Para la fundición en coquillas deben utilizarse coquillas de cobre, de cobre refrigeradas o no (en dependencia de las dimensiones de la pieza). Hay que evitar el uso de coquillas de hierro o acero, ya que producen piezas porosas.

La temperatura de vertido recomendada se encuentra en el intervalo de 1 150 °C a 1 200 °C según el espesor de las piezas fundidas.

2.5 Análisis de las características de las mezclas de moldeo

El método de producción de piezas fundidas en moldes de arena mantiene, sobre los demás, ventajas tan importantes como ser la forma más rápida y económica de obtener la cavidad del molde (en especial con el empleo de máquinas de moldear); obtener piezas de una calidad adecuada para la mayoría de los usos corrientes en construcción de maquinarias; ser el único método conocido hasta el momento para obtener piezas fundidas grandes. La producción de piezas fundidas en moldes de arena del total elaborado en un país desarrollado aún es superior al 80-85% y a veces más.

La mezcla de moldeo utilizada por la industria metalúrgica cubana se prepara tomando como base la miel final de la caña, las arcillas y arenas refractarias producidas por las Empresas Geomineras de Oriente, Centro y Occidente.

El redimensionamiento de la industria azucarera trajo como consecuencia el déficit de la miel final de la caña y el cierre de las fundiciones del MINAZ, SIME, etc. que tenían como mercado, la producción de piezas de repuesto para la industria azucarera, derivando paralelamente la disminución de los volúmenes de demanda de arenas y arcillas refractarias que implicaron la no factibilidad de producción de las mismas por parte de las Empresas Geomineras.

Produciéndose el paro de las fundiciones del país, con este trabajo se logró utilizar como sustituto de la miel final de la caña a el aceite quemado generado por los grupos electrógenos, que es un producto de desecho con un costo mínimo y un efecto muy positivo para el medio ambiente y la utilización de la arena y polvos de vidrio en calidad de arenas y polvos refractarios. Logrando una mezcla de moldeo más competitiva, sostenible y sustentable.

Una mezcla de moldeo, en su forma más simple, es la unión de materiales capaces de producir un material de construcción con el cual se pueda laborar el molde, o sea, la cavidad en la que se ha de verter la aleación para obtener la pieza fundida. Los ingredientes básicos de la mezcla son:

1. La arena refractaria de moldeo o material básico de la mezcla
2. La bentonita como arcilla refractaria
3. Como aglutinante la melaza encargada de unir fuertemente los granos de la arena entre sí
4. Agente activante de la aglutinación, que en la mayoría de las mezclas es el agua

Evidentemente que para realizar estas funciones los materiales de moldeo (Tabla 1) deben de poseer una serie de propiedades y características como resistencia mecánica, plasticidad, refractariedad, fluidez, permeabilidad a los gases etc. Muchas de estas propiedades dependen, en mayor o menor grado de los ingredientes básicos de la mezcla y todas influyen de una forma u otra sobre la calidad del producto final.

Por lo tanto, para el estudio de las mezclas de moldeo se parte del conocimiento de los materiales que forman dichas mezclas.

Tabla 1 Composición de la mezcla de moldeo en verde utilizada en la FAH.

| Designación | Componentes | Contenido, % | Aplicación |
|-------------------|------------------------|-----------------|--|
| Mezcla de Cara | Arena Sílice utilizada | 89.0 | Moldeo manual de piezas con paredes finas de hierro gris y aluminio para producciones artísticas |
| | Bentonita | 6.0 | |
| | Melaza | 4.2 | |
| | Agua | 0.8 | |

Las propiedades de las mezclas de moldeo en verde deben corresponderse con:

- Humedad: (4,5 a 5,5) %
- Permeabilidad: Mayor de 70 U
- Resistencia en verde: Mayor de 0,5 Kg/cm²

Partiendo de que el vidrio se obtiene por la fusión de la arena y que las mezclas de moldeo obtienen su mayor eficiencia y rendimiento, luego de ser utilizadas en varias coladas; es decir, cuando se han quemado al entrar en contacto con el metal caliente. Trituramos los residuos de vidrios con molinos de martillo, se obtiene una arena con una granulometría adecuada y con molinos de bolas se obtiene un polvo de vidrio que sustituye la bentonita.

Para la presente investigación se aplica la mezcla de cara debido a la alta calidad que debe tener esta mezcla para lograr alta calidad superficial, pero es aplicable a todo tipo de mezcla de moldeo de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos. En la Tabla 2 incorporamos los resultados obtenidos.

Tabla 2 Composición de la mezcla de alternativa.

| Designación | Componentes | Contenido, % | Aplicación |
|----------------|-----------------|-----------------|--|
| Mezcla de Cara | Arena de vidrio | 88.0 | Moldeo manual de piezas fundidas de metales ferrosos y no ferrosos |
| | Polvo de vidrio | 6.0 | |
| | Aceite usado | 6 | |
| | Agua | 0 | |

Se obtienen las propiedades acordes a las normas que rigen estos procesos:

- Humedad: (4,5 a 5,5) %
- Permeabilidad: Mayor de 70 U
- Resistencia en verde: Mayor de 0,5 Kg/cm²

Con esta tecnología se elimina la utilización de agua, porque el aceite quemado por ser más fluido que la melaza, realiza las funciones de la miel final y el agua.

Esta tecnología es más eficaz tecnológicamente, debido a que durante el vertido el aceite quemado se combustiona completamente permitiendo la salida de los gases, lo que disminuye la formación de poros y sopladuras en las piezas fundidas y aumenta el período de enfriamiento de los moldes lográndose. Una pieza más normalizada y al tener los mismos índices de dilatación y contracción que el polvo y la arena de vidrio, se disminuye el rechazo por concepto de moldes rotos.

2.6 Simulación numérica para determinar la competitividad de las mezclas de moldeo carburante

La competitividad de las mezclas carburante tradicionalmente se demuestra realizando pruebas experimentales y series “Cero”, que son procesos que aumentan los costos de producción de los fundidos. Esta investigación usa las técnicas y las herramientas de la simulación numérica en tres aleaciones metálicas que tienen diferentes temperaturas de fusión y vertido; además de comportarse de manera diferente en el molde y la generación de poros y sopladuras. Como lo son las aleaciones de aluminios, aleaciones de cobre y hierro con grafito nodular esférico.

Se decidió trabajar con probetas normalizadas y fundidas en tríos, a fin de trabajar con la aleatoriedad necesaria a la investigación. Se seleccionó el bloque en Y (Figura 2.1) según norma ASTM A537-84. Para la extracción de probetas a partir de los bloques fundidos se utilizó la norma internacional ASTM A536 – 84.

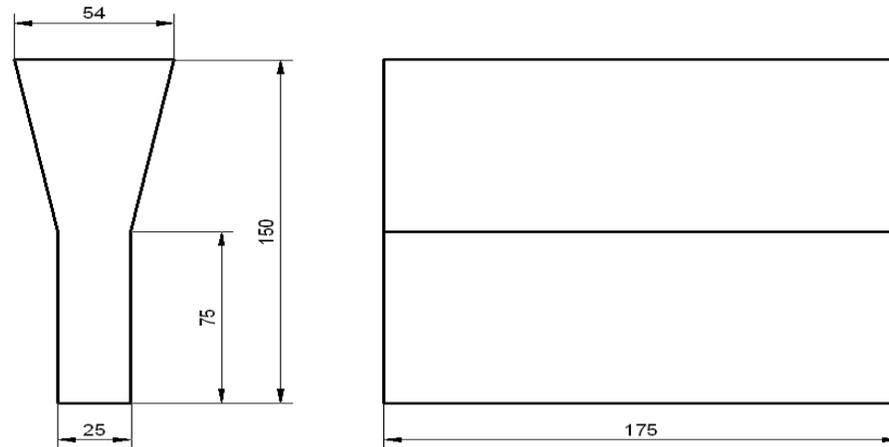


Figura 11 Bloque en Y según norma ASTM A537 -84 para extracción de muestra para ensayos mecánicos.

Con el uso del método de elementos finitos y el software Solidworks se diseña un trío de bloques en Y según norma ASTM A537 -84, que es exportado al ProCAST (como se muestra en la Figura 2.2).

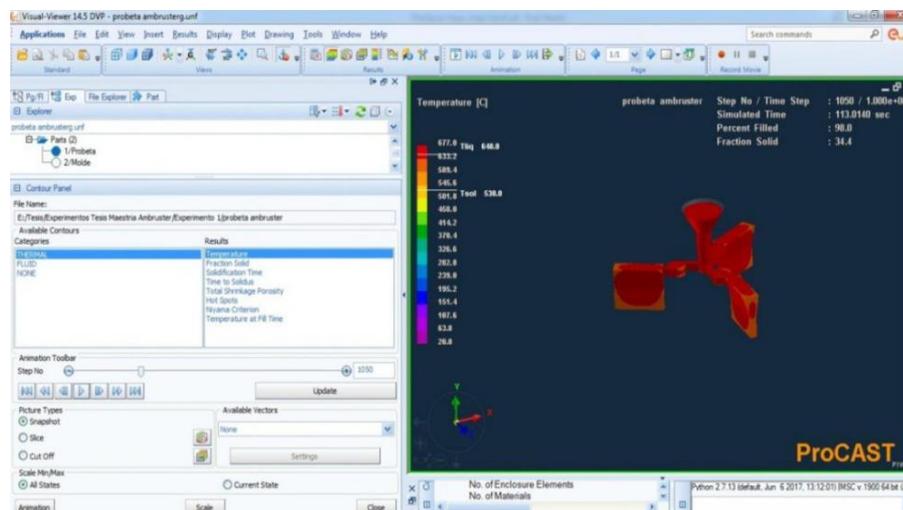


Figura 12 Bloque en Y según norma ASTM A537 -84, exportado al ProCAST. Fuente de elaboración: Propia.

2.7 Simulación numérica de competitividad de las mezclas carburantes en los moldes de fundidos de aleaciones de aluminio

Con la aplicación del análisis térmico a la temperatura de vertido de las aleaciones de aluminios de 727 °C, se observa que el molde resiste el impacto térmico del caldo metálico del aluminio, ocupando y manteniendo toda la configuración del molde (Figura 2.3).

En la Figura 2.4 se realiza un corte longitudinal donde se observa una resistencia térmica tecnológicamente adecuada de la mezclas carburantes antes el vertido y llenado del molde a la temperatura de 727 °C; así como el avance del frente de enfriamiento y solidificación del caldo metálico del aluminio, que está bien orientado, así como la contracción del fundido.

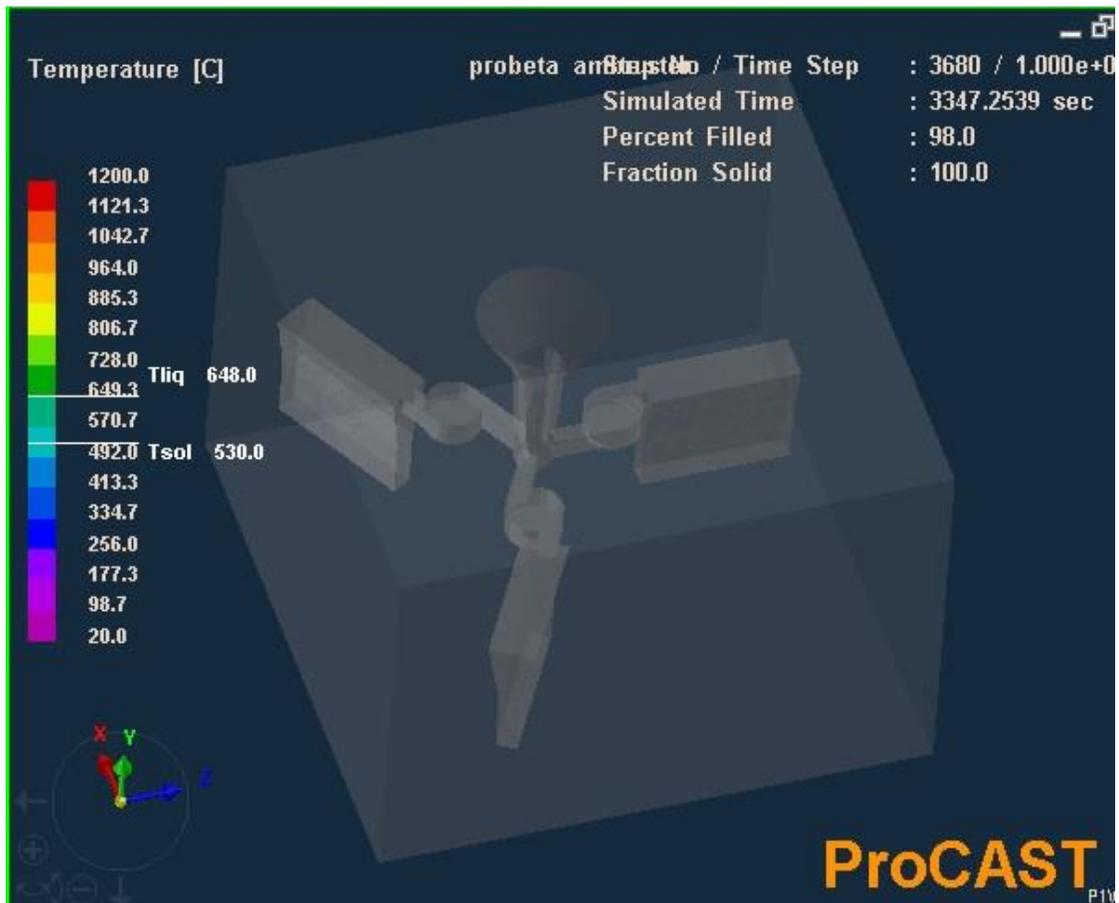


Figura 13 Análisis numérico del bloque en Y según norma ASTM A537-84. Fuente de elaboración: Propia.

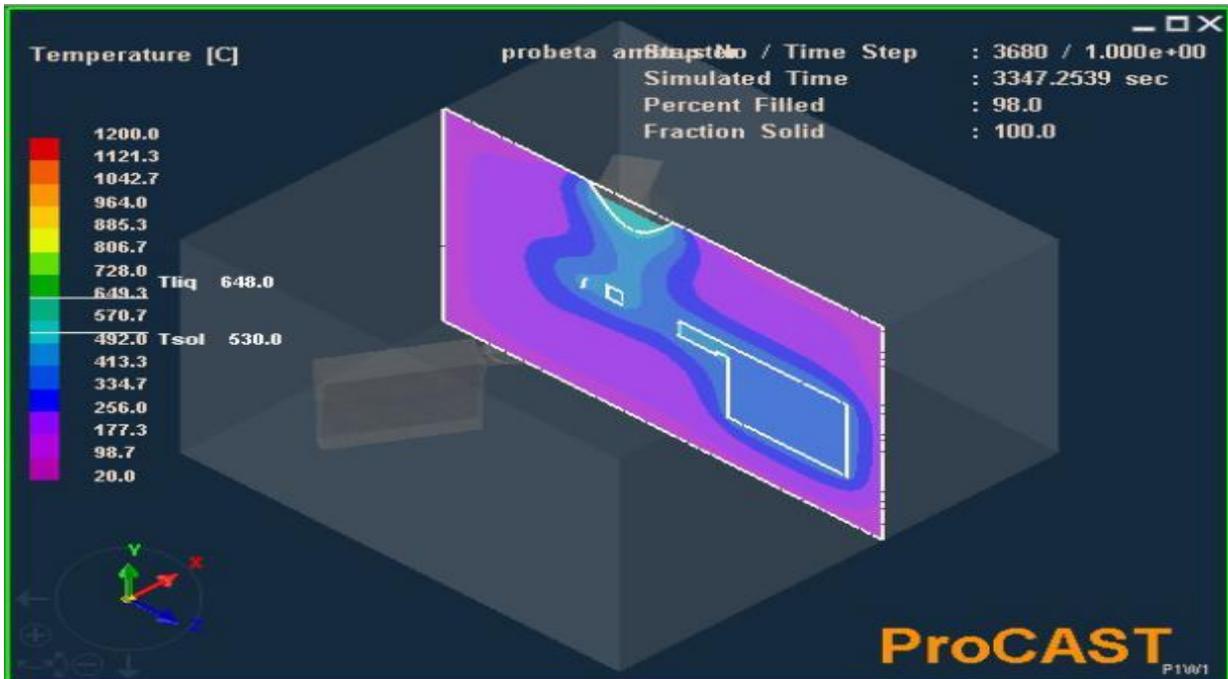


Figura 14 Análisis del avance del frente de enfriamiento solidificación del Al. Fuente de elaboración: Propia

En la Figura 2.5 se observa cómo el caldo metálico ocupa todo el molde manteniendo la geometría y configuración del molde de Al.

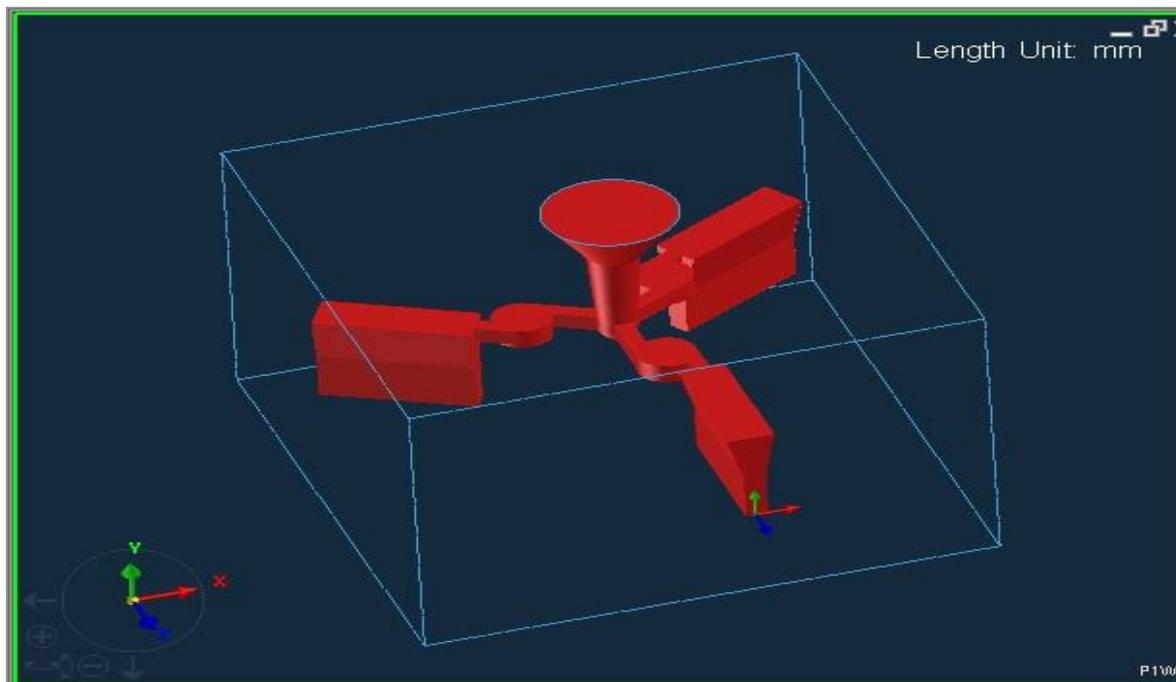


Figura 15 Análisis del mantenimiento de la geometría y configuración del molde de Al. Fuente de elaboración: Propia.

El código de colores que facilita el ProCAST, permite el análisis de la orientación de la solidificación del caldo metálico del aluminio en el molde de arenas carburantes, como se muestra en la Figura 2.6.

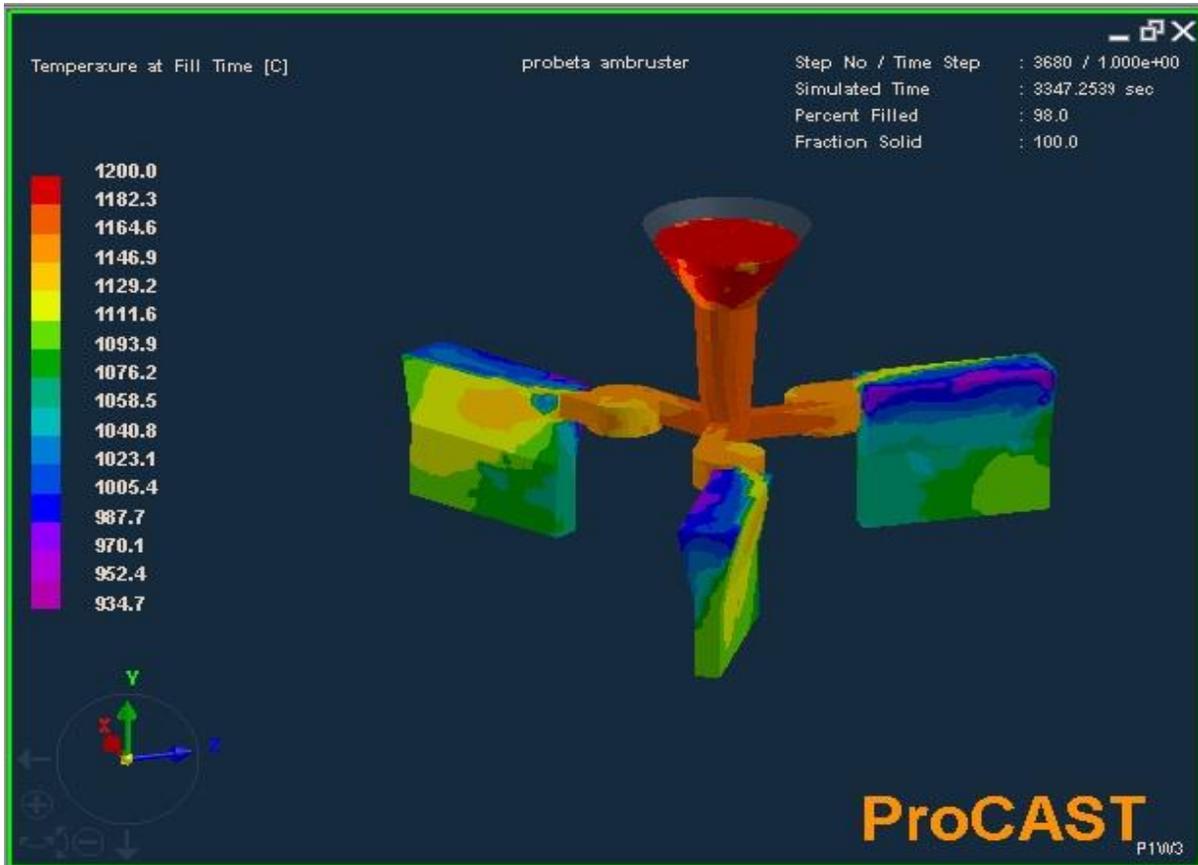


Figura 16 Análisis del comportamiento térmico de la pieza de Al en el molde de mezclas carburantes. Fuente de elaboración: Propia.

2.8 Simulación numérica de competitividad de las mezclas carburantes en los moldes de fundidos de aleaciones de cobre

El caldo metálico de las aleaciones de cobre, tanto los broncees como latones presentan una temperatura de vertido alrededor de los 1 250 °C. La simulación de estas condiciones térmicas (Figura 2.7) demuestran la resistencia de las mezclas carburantes antes este impacto térmico, por lo que son adecuadas para la elaboración de los moldes para fundidos de aleaciones de cobre.

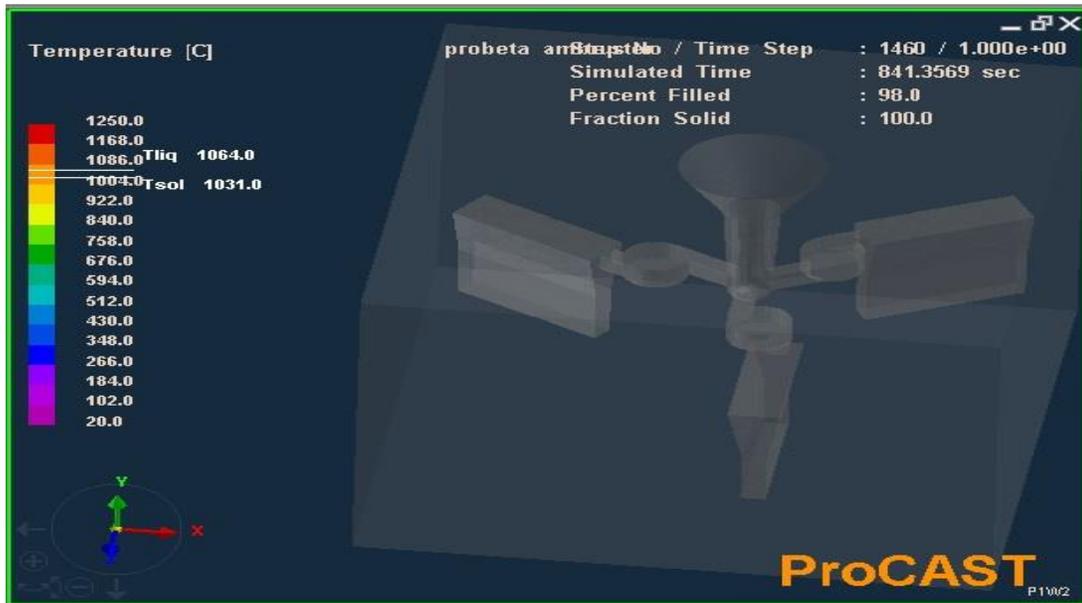


Figura 2.7 Análisis de la resistencia de los moldes de aleaciones de cobre elaborados con mezclas carburante. Fuente de elaboración: Propia.

La Figura 2.8 muestra el análisis de la estanqueidad de los moldes de aleaciones de cobre elaborados con mezclas carburante. Se demuestra que el molde es capaz de soportar la presión metalostática que ejerce el caldo metálico de las aleaciones de cobre, manteniendo la geometría y sin desarenado; por lo que se demuestra la competitividad de estas mezclas para la elaboración de artículos de bronce y latones.

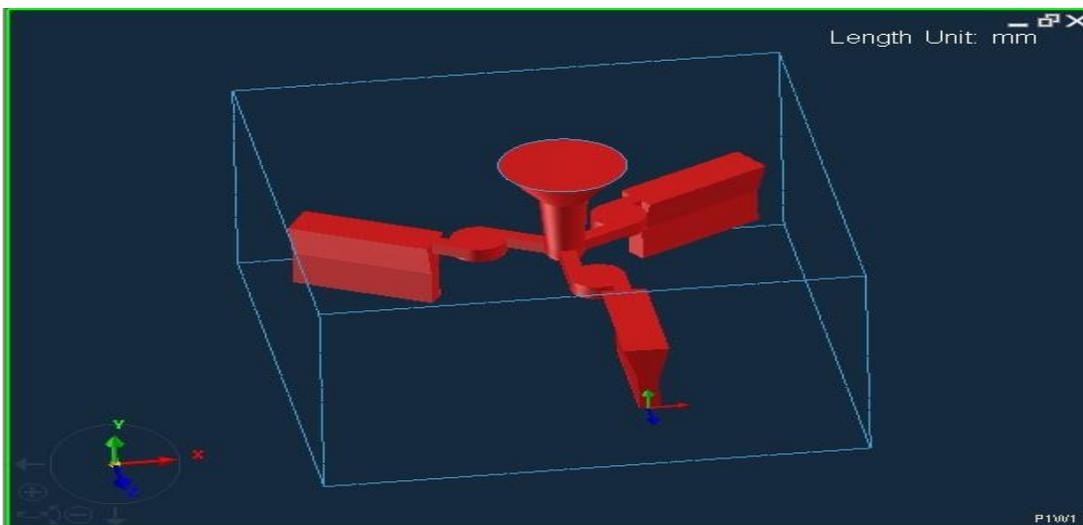


Figura 2.8 Análisis de la estanqueidad de los moldes de aleaciones de cobre elaborados con mezclas carburante. Fuente de elaboración: Propia.

El análisis de la orientación del frente de enfriamiento y solidificación de los moldes de aleaciones de cobre elaborados con mezclas carburantes se muestra en la Figura 2.9 y se observa cómo en el avance de 1 250 °C hasta los 750 °C, las mezclas soportan estos choques térmicos manteniendo la temperatura tecnológica de 450 °C, adecuada para soportar las presiones generadas en el momento de la evacuación. Además, se observa cómo el frente de enfriamiento y solidificación avanza desde el fundido hasta la parte superior de la copa de vertido, avance que permite la evacuación de los gases evitando defectos tales como poros y sopladuras; además de la orientación correcta de contracción evitándose rechupes.

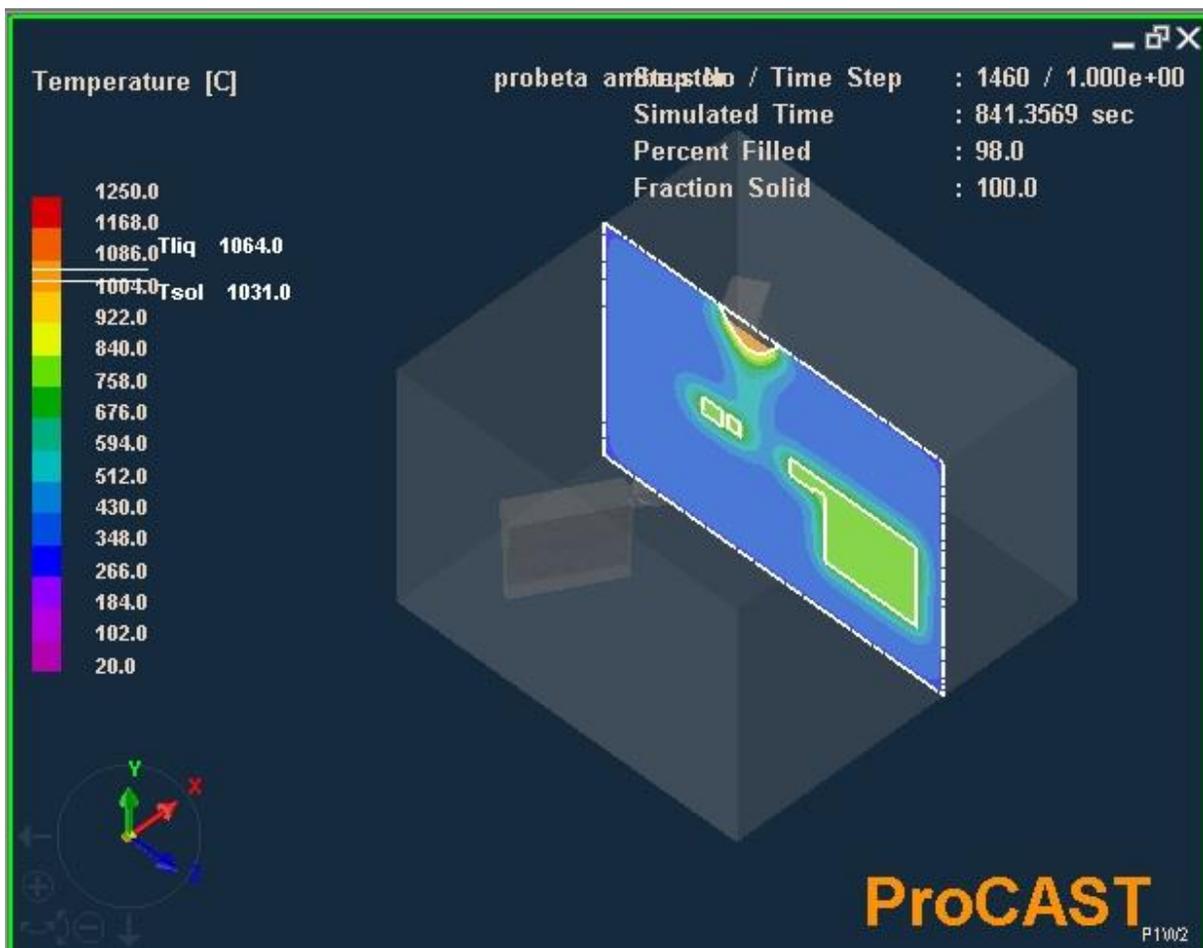


Figura 2.9 Análisis de la orientación del frente de enfriamiento y solidificación de los moldes de aleaciones de cobre elaborados con mezclas carburantes. Fuente de elaboración: Propia.

2.9 Simulación numérica de competitividad de las mezclas carburantes en los moldes de fundidos del hierro gris con grafito nodular esférico

En la Figura 2.10 se muestra el análisis del comportamiento de los moldes hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburante. Se observa cómo el caldo metálico del hierro gris con grafito nodular esférico actúa con una temperatura de vertido de 1 450 °C; y se aprecia la simulación de estas condiciones térmicas, demostrando la resistencia de las mezclas carburantes ante este impacto térmico. De este forma, se observa que son adecuadas para la elaboración de los moldes para fundidos de hierro gris con grafito nodular esférico.

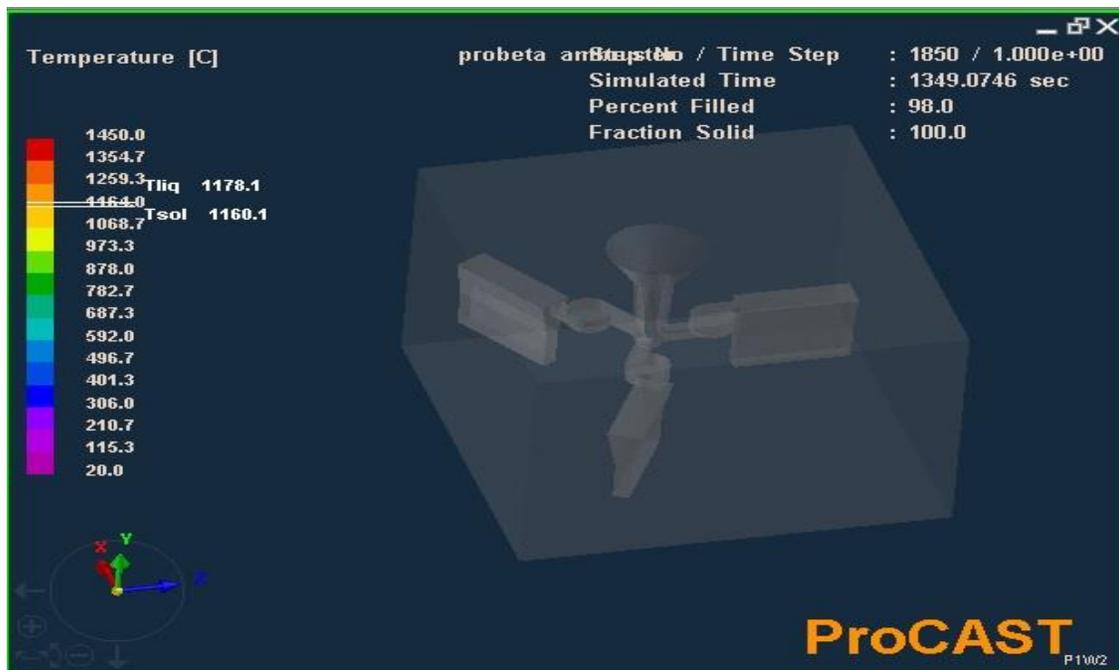


Figura 2.10 Análisis del comportamiento de los moldes de hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburante. Fuente de elaboración: Propia.

Por su parte, la Figura 2.11 muestra el análisis de los efectos superficiales de la orientación del avance del frente de enfriamiento, solidificación y contracción de los moldes de hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburante; desde los fundidos hacia la mazarota y la copa de vertido.

Se aprecia cómo en la temperatura de 1 160 °C, la formación de los poros, sopladuras y la contracción quedan alojados en estas partes del molde, cumpliendo con los propósitos tecnológicos.



Figura 17 Análisis de los efectos superficiales de la orientación del avance del frente de enfriamiento, solidificación y contracción de los moldes de hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburante. Fuente de elaboración: Propia.

El análisis de los efectos interiores de la orientación del avance del frente de enfriamiento, solidificación y contracción de los moldes hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburante se muestra en la Figura 2.12. Se demuestra la correcta formación del fundido y cómo cuando el fundido presenta una temperatura superior a los 700 °C, en la copa de vertido la contracción sucede sobre los 1 164 °C y las mezclas carburantes garantizan la temperatura alrededor de 500 °C; conservando la estanqueidad del molde y la configuración tecnológica adecuada del fundido.

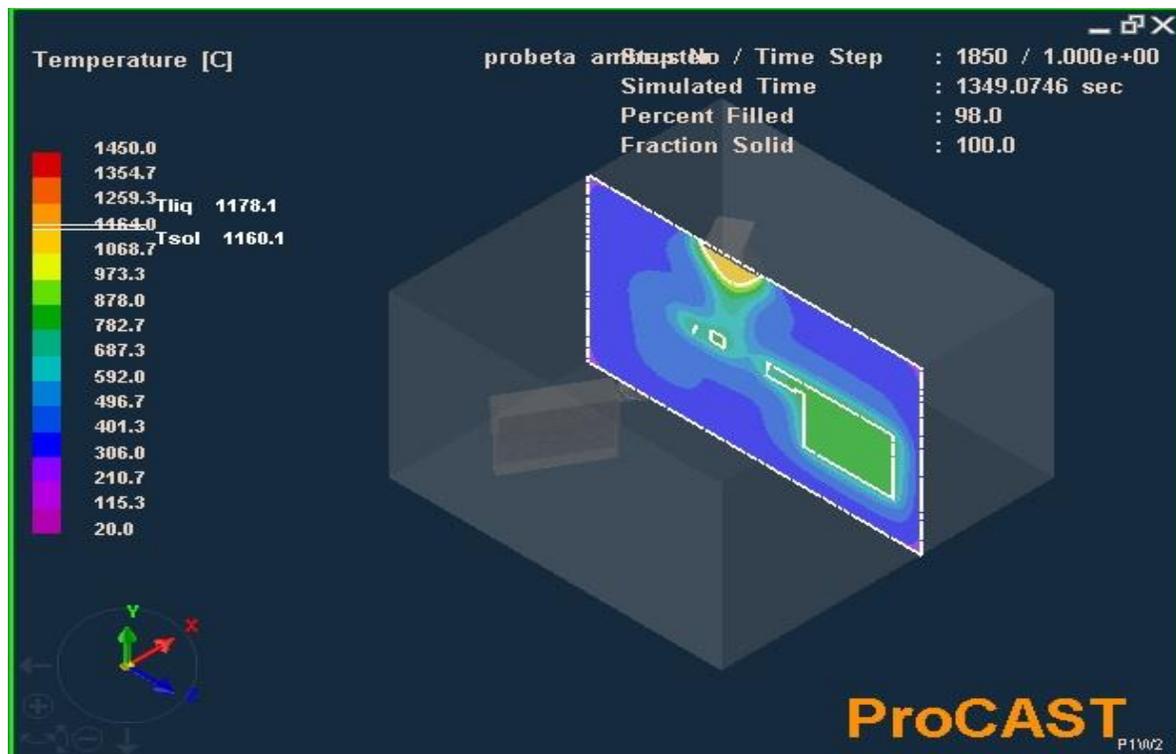


Figura 18 Análisis de los efectos interiores de la orientación del avance del frente de enfriamiento, solidificación y contracción de los moldes de hierro gris con grafito nodular esférico elaborados con mezclas carburantes. Fuente de elaboración: Propia.

Los resultados obtenidos con los análisis numéricos realizados a las temperaturas de 727 °C, 1 250 °C, 1 450 °C, correspondientes a los caldos metálicos de las aleaciones de aluminios, cobre y hierro gris con grafito nodular esférico respectivamente, han demostrado la competitividad de las mezclas carburantes.

2.10 Valoración socioeconómica

Por primera vez se establece en el País una tecnología con basamento científico adecuado a las condiciones de la industria cubana, capaz de permitir la elaboración de mezclas de moldeo con las propiedades tecnológicas acorde a las normas que rigen este proceso.

La valoración económica se hace teniendo en cuenta los costos de producción antes y después de aplicada la innovación.

$$Ee = [(Ga - Gp) \cdot e \cdot Q] \quad (2)$$

Donde:

Ee-Efecto económico anual

Ga-Costo de producción anterior: \$ 2 051,64

Gp- Gasto de producción posterior: \$ 1589,86

e-coeficiente normativa de efectividad = 0,15 (para la rama metalúrgica)

Q-Volumen de mezcla 140 ton

Sustituyendo:

$$Ee = [(\$ 2 051,64 - \$ 1589,86) \cdot 0,15 \cdot 140 \text{ ton}] \quad (3)$$

$$Ee = [(\$ 641,78) \cdot 0,15 \cdot 140 \text{ ton}]$$

$$Ee = \$ 64 470,20$$

Con la aplicación de esta tecnología se genera un ahorro \$ 64 470,20.

La utilización de la arena de vidrio ha permitido llegar a índices de eficiencia competitivos que han favorecido la producción a escala industrial en el proceso de fundición de metales ferrosos y no ferrosos, bajo las condiciones de la industria siderúrgica cubana actual, como son la disminución del costo de producción y el precio del fundido.

Esto permitirá desarrollar de forma real los planes de utilización de mezcla alternativa de fundición, como por ejemplo: la sustituyendo de las mezclas convencionales de la EFAH. En este caso, las piezas fundidas se obtienen más limpias, disminuyendo el tiempo de producción al necesitarse menos pasos tecnológicos y menos energía, lo que trae como consecuencia menores costos de producción.

Tomando como base comparativa el comportamiento del Rendimiento Tecnológico General (RTG) con la utilización de las mezclas carburantes y los resultados obtenidos en los laboratorios de ensayos de mezclas, nos permite hacer medibles la eficacia y la eficiencia por separado de los factores que determinan el costo de la producción, la productividad y competitividad del producto a través del proceso de fundición como

son el Rendimiento Metálico (Rm), Índice de Rechazo (Ir) y la Pérdida Metálica (Pm) los cuales se incorporan a la Tabla 3.

Tabla 3 Comparación de los factores que influyen en el RTG antes y después de la utilización de mezcla alternativa.

| No | Parámetros | Tipos de Arenas | | Eficiencia | |
|----|---------------------------------------|-----------------|-------------------|------------|-------|
| | | Cromita | Mezcla carburante | unidades | (%) |
| 1 | Rendimiento Metálico (%) | 85 | 85 | - | - |
| 2 | Índice de Rechazo (%) | 3 | 3 | - | - |
| 3 | Pérdida Metálica (%) | 5.8 | 5.8 | - | - |
| 4 | Rendimiento Tecnológico General I (%) | 77.67 | 77.67 | - | - |
| 5 | Productividad (Kg. /C.) | 850 | 850 | - | - |
| 6 | Costo (\$/Ton) | 1997.88 | 1589,86 | 408,02 | 20,43 |
| 7 | Precio (\$/Ton) | 2200.60 | 1732,59 | 468,01 | 21,30 |

El comportamiento del rendimiento metálico o la relación entre el metal neto y el metal bruto medido en por ciento es de 85 %, el índice de rechazo de las piezas modificadas se mantiene en 3 y la Pérdida Metálica hasta 5.8 %, obteniéndose un Rendimiento Tecnológico General de 77.67 %, que unido a una productividad de 850 Kg de metal, se disminuye el costo de producción hasta 1589,86 (\$/Ton) y comercializado al precio de 1732,59 (\$/Ton). Esta variación positiva del Rendimiento Tecnológico General genera ganancias económicas y disminuye los costos de producción de fundidos, lo que posibilita su producción a escala industrial por el proceso de fundición de una forma competitiva, sostenible y sustentable; ya que aumenta la factibilidad de producción en 20,30 % y aumenta la competitividad en 21,30 %.

2.11 Valoración medioambiental y para la defensa

Con la aplicación de este trabajo se establece una tecnología capaz de influir positivamente en el medioambiente, dándole utilización al aceite quemado generado por los grupos electrógenos, y las 17 000 toneladas de fragmentos de vidrios acumuladas en las bases de la UERMP. Se logra sustituir la miel final y emplear el polvo y arena obtenida de los desechos de vidrios en la elaboración de las mezclas de moldeo de metales ferrosos y no ferrosos. Se aumenta la factibilidad de producción en 20,30 % y se aumenta la competitividad en un 21,30 %.

El impacto medioambiental radica en dar utilización a residuos de difícil evacuación y biodegradación, lo que constituía un problema para el medioambiente en Cuba.

Esta tecnología permite ser utilizada en la fabricación de piezas de repuestos y en la modernización de la técnica militar.

2.12 Conclusiones

1. El enfoque expuesto permite el aumento de la competitividad y sustentabilidad, así como la disminución de los costos de producción para la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos, para las condiciones específicas cubanas.
2. La utilización de arena de vidrio facilita la producción a escala industrial de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos a través del proceso de fundición al disminuir los costos de producción asociados a un nivel competitivo.
3. La alternativa expuesta permite la utilización de fragmentos de vidrio como sustituto del Ferro Silicio en la fusión de hierro para las condiciones cubanas de una forma alternativa, sostenible y sustentable.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Esta investigación logra utilizar el análisis numérico del molde de fundición para demostrar la efectividad del uso de las mezclas carburantes en la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos de manera competitiva.
2. Se logra sustituir la prueba experimental y la serie “Cero”, (procesos los cuales son muy costosos), por el análisis numérico logrando disminuir el costo de elaboración de moldes.
3. El enfoque expuesto permite el aumento de la competitividad y sustentabilidad, así como la disminución de los costos de producción para la obtención de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos, para las condiciones específicas cubanas.
4. La utilización de arena de vidrio facilita la producción a escala industrial de fundidos de metales ferrosos y no ferrosos a través del proceso de fundición al disminuir los costos de producción asociados a un nivel competitivo.
5. La alternativa expuesta permite la utilización de fragmentos de vidrio como sustituto del Ferro Silicio en la fusión de hierro para las condiciones cubanas de una forma alternativa, sostenible y sustentable.
6. Tiene un impacto medioambiental positivo al darle uso a 17 000 Ton de vidrios acumuladas en las bases de la UERMP del país.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios e investigaciones más profundas acerca de la utilización de arenas alternativas para la manufactura de moldes en piezas fundidas de metales ferrosos y no ferrosos, que permitan la explotación de éstas y la integración directa a la producción.
2. Generalizar esta metodología en el resto de las fundiciones del país, con el objetivo de acometer a escala industrial la producción de fundidos con mezclas alternativas, como sustituto de las mezclas convencionales en la producción de productos fundidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abasolo Bilbao, M., Aguirrebeitia Celaya, J., CoriaMartínez, I., & Heras Miguel, I. (2017). Guía práctica de elementos finitos en estática. In S. Ediciones Paraninfo (Ed.).
- Al-Ghonamy, A. I., Ramadan, M., Fathy, N., Hafez K.M., El-Wakil, A.A. (2012). "Effect of graphite nodularity on mechanical properties of ductile iron for waterworks fittings and accessories. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 1-5.
- Altamirano Carrasco, O. V. (2018). *Análisis De La Resistencia A Compresión Del Adobe Estabilizado Con Cal En La Ciudad De Cajamarca*. (Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Civil). Retrieved from <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/2528>.
- Anabitarte-Gorostegui, A. (2020). Análisis de sensibilidad de elementos finitos sobre la modelización de paneles de aluminio AL2024 para estructuras aeronáuticas. https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/31624/TFG_Ainh_0a_Anabitarte_Gorostegui_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arias Ambruster, A. (2021). *Integración CAD-CAE En El Diseño De Piezas Metálicas Fundidas Por Gravedad En Moldes Cerámicos*. (Tesis presentada en opción al título académico de máster en mantenimiento y reacondicionamiento de máquinas).
- Arias Girón, C. C., & Ruíz Galeano, E. E. (2019). *Modelación por el Método de Elementos Finitos (MEF), mediante el Software ANSYS del elemento placa*. Retrieved from <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/22126/AriasGironChristianCamilo2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aristizábal, R. E., Pérez, P.A., Machado, H.D., Pérez, A.M., Katz, S. (2013). "Studies of a Quenched Cupola Part IV: Behavior of Coke," en AFS Proceedings, Schaumburg, IL USA, 2013, pp. 1-11. https://www.researchgate.net/publication/267343938_Studies_of_A_Quenched_Cupola_PART_IV_Coke_Behavior

- Barrio Martín, M. (2022). *Diseño, Fabricación Y Validación De Modelos Desechables Obtenidos Mediante Impresión 3d Para Su Uso En Procesos De Moldeo En Arena*. Retrieved from <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/53581>
- Botero, F. (2019). Maquinaria hornos de inducción: producción limpio y eficiente. *Metal actual*, p. 27.
- Cabrera Rudas, A. A., , Lindo Rojas, Danny Jesús. . (2020). *Analisis De Los Componentes De Arena De Moldeo Empleados Para Un Buen Resultado De Piezas Fundidas De Aluminio Realizados En La Empresa "Fundicion El Carmen" Sac Lima-Peru*. (Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero metalúrgista y de materiales). Retrieved from <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6440>
- Cardoso Acosta, R. J. (2019). *Evaluación de la arena sílice de Casilda, Trinidad, como material refractario monolítico para un horno de inducción*. (Tesis en opción al título de ingeniería en metalurgia y materiales). Retrieved from <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/3693>
- Cardoza Cazeneuve, Y. J. (2019). *Diagnóstico del proceso de moldeo en talleres productores de fundiciones grises en el norte del Perú*. (Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico - Eléctrico).
- Carnero, A. A., Bunin, K.P., Glebova, E.D. , Pritomanova, M.I. (1999). Tratamiento termocíclico del hierro fundido y el acero (en ruso). *Vol. 167 Kiev: Техника, 1999*.
- Carrión Vargas, M. V. (2020). *Estudio de la influencia del tipo de arena en el llenado de un molde en arena verde, para la fundición de un disco de freno, a través de la simulación CFD*. (Maestría en Diseño Industrial y Procesos). Retrieved from <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4007>
- Carrizosa Isaza, P. (2007). *Modelación y análisis de un molde para fundición de aluminio por coquilla*. (Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico). Retrieved from https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4483/Pablo_Carrizosalsaza_2007.pdf

- Chura Uruchi, V. (2014). Conformado De Una Pieza De Aluminio: Moldeo En Arena Verde, Fundición Y Colada. *Revista tecnológica*, Vol. 10 N° 16. http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rtft/v10n16/v10n16_a03.pdf
- Elisea-Espinoza, J. J. (2018). *Solución de Ecuaciones integrales para fluidos coulómicos mediante el método de elemento finito*. (Tesis de maestría.). Retrieved from <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/5791>
- Escobar Ruiz, M. A. (2021). *Modelación y simulación del proceso de fundición para el zinc y aluminio*. (Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magíster en Electromecánica). Retrieved from <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8196>
- ESI-Group. (2011). ProCAST 2011.0 User Manual. 1-934.
- Flores, A. R. (2021). *Diseño de una plantilla ergonómica que regule la presión plantar en jóvenes practicantes de baloncesto femenino: análisis biomecánico y de elemento finito*. *Maestro en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Industrial y de Manufactura*. Retrieved from https://207.249.117.50/jspui/bitstream/1019/167/1/Tesis%20%20Alejandro%20Flores_ver%20final.pdf
- Garavito, E. C. d. I. J. (2018). *Tratamientos Térmicos*. *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá*.
- García-Cuevas González, L. M., Gil Megías, A., Navarro García, R., & Quintero Igeño, P. M. (2020). *Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado*. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/146219>
- Gutiérrez González, J., Pluma Torres, María de Jesús, Hernández, Enrique . (2014). *Análisis de la manufactura esbelta en la industria de la fundición.*, from <https://foundrygate.com/upload/artigos/Analisis%20de%20la%20Manufactura%20Esbelta%20en%20la%20Industria%20de%20la%20Fundicion.pdf>
- Jacas, M., Rodríguez, M., Ordoñez, U. (2005). "Modelación por Elementos Finitos como Método para la sustitución de piezas de acero por Hierro Nodular,". *Ingeniería Mecánica*, Vol. 8, No. 3, pp. 1-8, www.redalyc.org/articulo.oa?id=225118188005.

- Kallbom, R., Hamberg, K. , Wessan, M., Bjarkegren, L. (2005). "On the solidification sequence of ductile iron castings containing chunky graphite,". *Materials Science and Engineering*,, Vol. 413-414, pp. 346–351.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305010014>
- Maldonado, Y. (2020a). Bentonita: Tipos, propiedades, características y usos., from <https://geologiaweb.com/minerales/bentonita/>
- Maldonado, Y. (2020b). Caolinita: Propiedades, características y usos.
<https://geologiaweb.com/minerales/caolinita/>
- Maldonado, Y. (2021). Arena de sílice: Propiedades, características y usos., from <https://geologiaweb.com/materiales/arena-de-silice/>
- Muñoz Bello, N. G. (2019). *Implementación de un protocolo de fabricación para la obtención de fundición gris con base en la norma ASTM A48 clase 30 de piezas de alcantarillado*. (Trabajo de profundización presentada(o) como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería – Ingeniería Mecánica). Retrieved from <http://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76217>
- Ordóñez-Hernández, U., Parada-de-la-Puente, S., Figueroa-Hernández, C., Mondelo-García, F.J., Barba-Pingarrón, A., del-Castillo-Serpa, A. . (2015). "Caracterización de la capa de boruros formada durante la austenización de un hierro nodular austemperizado,". *Ingeniería Mecánica*, Vol. 18, No. 1, pp. 71-79.
<http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/510/880>.
- Pallo Morocho, L. E., Valdivieso Godoy, Elizabeth Adriana. (2018). *Estudio De Las Propiedades De Las Arenas Y Su Influencia En Las Piezas Fundidas En Ciertos Talleres De Fundicion De La Ciudad De Quito*. (Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero mecánico). Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19942>
- Pillajo Corella, B. M., Romero Velasco, F. I. (2019). Diseño y Construcción de un horno calentador por resistencias eléctricas. *Escuela Politécnica Nacional, Quito*.
- Pons Herrera, J. A., Leyva Rodríguez, Carlos Alberto. (2018). Empleo De Las Arcillas Ferro-Caolinitlca-Gibbsiticas De La Region De Moa En Los Talleres De

<http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1685>

Quillupangui-Caiza, I. M. (2020). Modelamiento discreto no lineal de la respuesta estructural de elementos de hormigón armado reforzados con acero de alta resistencia utilizando tecnología de elemento finito y elasto-plasticidad. *Quito, 2020*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/21291/1/CD%2010807.pdf>

Revelo Guerrero, F. R. (2011). *Selección de la mezcla de moldeo óptima para fundición de aluminio con el uso de modelos gasificables*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4405>

Reyes Moreira, K., Márquez Delgado, José Eduardo, Pérez Michel, Erodís. (2017). Modelación relacional para el diseño del sistema de alimentación en la fundición en moldes de arena de hierro gris. *8VA CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN*. https://www.researchgate.net/profile/Erodís-Pérez-Michel-2/publication/335586647_Modelacion_relacional_para_el_diseno_del_sistema_de_alimentacion_en_la_fundicion_en_moldes_de_arena_de_hierro_gris_Relational_modeling_for_feed_system_DESIGN_in_the_sand_casting_molds_for_gray_iron/links/5d6e795892851c1b3b273bc9/Modelacion-relacional-para-el-diseno-del-sistema-de-alimentacion-en-la-fundicion-en-moldes-de-arena-de-hierro-gris-Relational-modeling-for-feed-system-DESIGN-in-the-sand-casting-molds-for-gray-iron.pdf

Rodríguez Molina, J. C. (2021). *Coefficientes De Transferencia De Calor Mediante Rociado Térmico Hvoí En Moldes Permanentes Para La Industria Del Aluminio*. (Tesis en opción al grado de: Maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales.). Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/22734/1/1080315656.pdf>

Salcines Merino, C. M., Valdés Cruz, Alain. (2000). Importancia de los ensayos de compactibilidad, resistencia en verde y humedad en mezclas de moldeo. *Revista Minería y Geología, Vol . XVI I, No. 3-4*. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/164>

- Sánchez-Figueroa, R. P. (2007). "El Rendimiento Tecnológico General como regulador del costo en las producciones de fundidos de hierro con grafito esferoidal por el método "In Mold". en *III Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, Holguín, Cuba,*.
- Sánchez-Figueroa, R. P. (2009). "Tecnología para la manufactura competitiva de fundidos de aleaciones de Cobre,". en *IV Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, Holguín, Cuba,*.
- Sánchez-Figueroa, R. P. (2010). "Ahorro de portadores energéticos en la obtención de fundidos no ferrosos bajo las condiciones específicas de la industria metalúrgica cubana,". en *6to. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Holguín, Cuba.*
- Sánchez-Figueroa, R. P., Pérez-Rodríguez, R. (2008). "Entorno tecnológico alternativo para la producción competitiva, sostenible y sustentable de fundidos de cuproaleaciones densos,". en *V Jornada Científica de la Facultad de Ingeniería - Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA) Universidad de Holguín.*
- Sánchez Figueroa, R. P., Pupo Salazar, Lisandra, Arias Ambruster, Alberto, Pérez Rodríguez, Roberto. (2021). Simulación numérica como herramienta para predecir defectos en probetas experimentales de aleaciones de hierro gris. *10ma Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín.*
<https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/807>
- Serpa-Andrade, G. d. R. (2018). *Optimización estructural del asistente robótico SPELTRA por simulación numérica basada en elementos finitos.* Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15132>
- Suárez Lisca, L. H., Coello Machado, Norge I., Cruz Pérez, Juan Carlos. (2022). Determinación De Las Principales Características De Una Mezcla De Moldeo Tipo Única Con Elementos Refractarios.
from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612022000300001
- Tierra, P., Aquino, M., Pozo, E., & Jaramillo, J. (2020). Simulación matemática de pruebas de impacto entre diferentes materiales, por medio de software para

análisis no lineales. *Dominio de las Ciencias*, 6(3), 1171-1193.

<https://es.statista.com/estadisticas/634786/produccion-del-sector-de-la-fundicion-por-paises/#statisticContainer>

Tornero-Costa, R. (2020). *Desarrollo de modelos biomecánicos del hígado mediante Método de Elementos Finitos*. Retrieved from

https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/156477/49170382_TFG_15990561_884473758923403983557474.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Woge, O. G., Morán, C. O. G., & Chau, A. L. (2020). Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab. *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*, 1(1), 27-47

ANEXOS

Anexo 1 Horno de cuba alta discontinuo de 700 mm de diámetro de trabajo de la Empresa Mecánica de Holguín



Anexo 2 Mezcla de moldeo utilizada en el taller de fundición no ferrosa en la Empresa Mecánica de Holguín



Anexo 3 Caja de moldeo superior e inferior lista para el fundido de metales.

