

CARACTERIZACIÓN DE PROCESO DE FUNDICIÓN DEL LABORATORIO UPB
SECCIONAL MONTERÍA.

JOSÉ ANDRÉS MEJÍA MERCADO
JAVIER ANDRÉS ARRIETA GELIS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2024

CARACTERIZACIÓN DE PROCESO DE FUNDICIÓN DEL LABORATORIO UPB
SECCIONAL MONTERÍA.

JOSÉ ANDRÉS MEJÍA MERCADO
JAVIER ANDRÉS ARRIETA GELIS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

KATERIN OSORIO BARRERA
INGENIERA MECÁNICA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2024

CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 OBJETIVOS:	12
1.1.1 Objetivo general.	12
1.1.2 Objetivos específicos.	12
2 MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE:	13
2.1 Marco Teórico	13
2.1.1 Aluminio	13
2.1.2 Proceso Fundición	15
2.1.3 Velocidad de vaciado	15
2.1.4 Grado de sobrecalentamiento o temperatura de vertimiento	16
2.1.5 Llama adiabática	16
2.1.6 Crisol	16
2.1.7 Molde	16
2.1.8 Horno para fundición	17
2.1.9 Combustión	19

2.1.10	Generalidades de la combustión	19
2.1.11	Propano	21
2.2	Estado del Arte	21
3	METODOLOGÍA	31
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	Resultados diagnóstico inicial.	36
4.2	Resultados validación de pruebas experimentales.	47
4.3	Resultados desarrollo del modelo predictivo.	66
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
6	BIBLIOGRAFÍA	76
7	ANEXOS	79
7.1	Encuesta – Profesor 1 (Docente de facultad de ingeniería mecánica)	79
7.2	Encuesta – Mecánico (Encargado del taller de la facultad de ingeniería mecánica)	82
7.3	Encuesta – Profesor 2 (Docente de facultad de ingeniería industrial)	84

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	14
Tabla 2	33
Tabla 3	34
Tabla 4	39
Tabla 5	43
Tabla 6	51
Tabla 7	52
Tabla 8	53
Tabla 9	53
Tabla 10	54
Tabla 11	54
Tabla 12	55
Tabla 13	56
Tabla 14	56
Tabla 15	57
Tabla 16	61
Tabla 17	63
Tabla 18	64
Tabla 19	65
Tabla 20	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.....	17
Figura 2.....	18
Figura 3.....	18
Figura 4.....	38
Figura 5.....	42
Figura 6.....	44
Figura 7.....	45
Figura 8.....	48
Figura 9.....	51
Figura 10.....	58
Figura 11.....	69
Figura 12.....	71
Figura 13.....	72

RESUMEN

En este trabajo de investigación se realizó una caracterización del proceso de fundición que se lleva a cabo en una hornilla de material SCH 40 ASTM A-53, donde se funde aluminio convencional con fines educativos e investigativos en la universidad UPB seccional Montería. El motivo de esta investigación está asociado al tiempo de ejecución de cada experimento, por lo cual, se desarrolla una metodología de tipo descriptivo - experimental para obtener un modelo predictivo que estime el tiempo empleado. Teniendo en cuenta lo anterior, fue necesario establecer variables que influyen dentro del proceso, tales como, la cantidad de gas propano, la cual se dejó como variable fija (a un mismo caudal), la cantidad de aire que entra al sistema, que se varió en cada una de las pruebas, el material a fundir (aluminio), que se utilizó siempre el mismo peso. Por otro lado, se hizo uso del software statgraphic con el fin de establecer un modelo matemático que estime el tiempo de fundición.

Palabras clave: Caracterización, fundición, tiempo, material, modelo.

ABSTRACT

In this research work, a characterization of the casting process that is carried out in a stove made of SCH 40 ASTM A-53 material was carried out, where conventional aluminum is melted for educational and research purposes at the UPB Montería branch university. The reason for this research is associated with the execution time of each experiment, therefore, a descriptive-experimental methodology is developed to obtain a predictive model that estimates the time spent. Taking into account the above, it was necessary to establish variables that influence the process, such as the amount of propane gas, which was left as a fixed variable (at the same flow rate), the amount of air entering the system, which was The material to be melted (aluminum) varied in each of the tests, and the same weight was always used. On the other hand, statgraphic software was used in order to establish a mathematical model that estimates the casting time.

Keywords: Characterization, casting, time, material, model.

1 INTRODUCCIÓN

La fundición de metales es uno de los sectores más importantes de la economía manufacturera. Es una industria de 46.000 millones de dólares que proporciona directamente más de 160.000 puestos de trabajo sólo en Estados Unidos, y muchos más en Canadá y México. La fundición de metales también respalda indirectamente más de otros 300.000 puestos de trabajo en toda la cadena de suministro, en fabricantes de equipos, proveedores de servicios y proveedores de materiales para la industria, y especialmente en empresas que adquieren piezas fundidas para usar en sus propios productos. Alrededor del 90 por ciento de los bienes duraderos incluyen piezas fundidas(American Foundry Society, 2022).

Los principales metales que se emplean en la creación de aleaciones con aluminio comprenden al cobre, silicio, cinc, magnesio y manganeso. De manera secundaria, se utilizan otros metales como el níquel, titanio, hierro, cromo y cobalto. Además de los mencionados, hay casos especiales donde se adiciona plomo, cadmio, antimonio y bismuto en aleaciones que presentan usos bastante exclusivos (Muratalla, 2022).

En el país hoy en día existen más de cien empresas dedicadas a la fundición y siderurgia. Principalmente, son medianas y pequeñas las cuales se han especializado en los diferentes campos como los repuestos para maquinaria agrícola e industrial. Las grandes empresas realizan producción estándar de maquinaria o partes para la industria automotriz. Se pueden destacar: Acerías De Caldas S.A., Acerías Paz Del Rio, Diaco, Filpa S.A., Siderúrgica Del

Occidente, Siderúrgica Del Pacifico y Sidet; las cuales se disputan el mercado colombiano. En Santander la fundición llegó en 1926 donde se instaló en las principales ciudades del departamento, Bucaramanga y Cúcuta, en las cuales se comenzaron a desarrollar gran cantidad de productos agrícolas para atender las necesidades de la producción del café y caña de azúcar; que contribuyeron de manera especial al desarrollo de esta industria (Vicente & Rodríguez, 2008).

A nivel local, el panorama de la industria de fundición se caracteriza por su limitada presencia, ya que solamente existen dos actores en este sector: Fundiciones MAMS y Fundición HAGA. Es importante destacar que estas fundiciones operan en una escala que se encuentra alejada de la magnitud requerida para cumplir con los estándares industriales convencionales, dado que sus procedimientos de producción se adhieren a métodos artesanales y tradicionales. En un análisis más profundo, la industria de la fundición en el ámbito local se encuentra inmersa en una dinámica peculiar, porque se caracteriza por estas dos entidades que, si bien desempeñan un papel significativo en la economía regional, enfrentan ciertas limitaciones en términos de capacidad de producción, tecnología y eficiencia operativa. La relevancia de este aspecto radica en que la adopción de técnicas artesanales podría conllevar a restricciones en la calidad del producto final, así como a una menor capacidad para satisfacer la demanda a gran escala.

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería cuenta con programas de pregrado como ingeniería mecánica e ingeniería industrial que incluyen contenidos que requieren un acercamiento al proceso de fundición para afianzar los conocimientos adquiridos en el aula

sobre los procesos de manufactura y tipos de procesos utilizados para la transformación de la materia prima, buscando la fabricación de piezas de manera industrial. En el laboratorio de máquinas y herramientas del programa de ingeniería mecánica se cuenta con un horno de gas propano y dos crisoles de grafito, con capacidad de 1.5 kg de aluminio disponible para las labores académicas e investigativas de la universidad.

Sin embargo, el proceso de fundición cuenta con variables como el material a fundir, la temperatura ambiente, la temperatura de vertimiento, el caudal de gas y el caudal de aire que afectan el tiempo total del proceso. El inconveniente es que no se tiene una caracterización de este procedimiento, lo que conduce a resultados variables en cada práctica y a desconocer el tiempo necesario para fundir el material, lo que puede generar pérdidas de tiempo y una administración inadecuada de los recursos humanos y equipos necesarios para la ejecución de este proceso. Por lo tanto, surge la pregunta: ¿cómo se puede caracterizar de manera efectiva el proceso de fundición utilizado en el Laboratorio UPB Seccional Montería, identificar los factores críticos que influyen en la calidad del producto final y proponer mejoras en el proceso para optimizar su rendimiento y eficiencia?

Para responder este interrogante, resulta necesario llevar a cabo una caracterización del proceso de fundición en la UPB seccional Montería. En este contexto, se llevarán a cabo mediciones temporales mientras se manipulan las variables de mayor relevancia en el proceso. El propósito es desarrollar un modelo predictivo para estimar los tiempos de fundición. Este enfoque busca no solo lograr una mayor eficiencia operativa en la transformación de la materia prima, sino también potenciar la productividad del laboratorio

mediante una optimización de los recursos existentes. Este proceso de optimización se traduce en una gestión más eficaz del tiempo y en la búsqueda constante de la excelencia en la ejecución del proceso. Por otra parte, este proyecto se hace con el ánimo de contribuir a la metodología de aprendizaje de los estudiantes, dando paso a un aumento en las capacidades investigativas y competitivas que serían aprovechados por estos.

1.1 OBJETIVOS:

1.1.1 Objetivo general.

Caracterizar las condiciones del proceso de fundición que se lleva a cabo en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería.

1.1.2 Objetivos específicos.

- Diagnosticar las condiciones de operación actuales del proceso de Fundición de aluminio llevado a cabo en el laboratorio de fundición de la UPB Montería.
- Validar mediante pruebas experimentales las variables que afectan significativamente el tiempo total del calentamiento del metal del proceso de fundición llevado a cabo en la Universidad.
- Desarrollar un modelo predictivo basado en los datos obtenidos de las pruebas experimentales definiendo los parámetros óptimos para el tiempo de calentamiento del metal.

2 MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE:

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Aluminio

El aluminio es un metal muy ligero con un peso específico de $2,7 \text{ g/cm}^3$, un tercio el peso del acero. Su resistencia puede adaptarse a la aplicación que se desee modificando la composición de su aleación. Además, es un excelente conductor del calor y la electricidad y, en relación con su peso, es casi dos veces mejor conductor que el cobre. Además, es dúctil y tiene una densidad y un punto de fusión bajos (660°C). En situación de fundido, puede procesarse de diferentes maneras. Su ductilidad permite que los productos de aluminio se fabriquen en una fase muy próxima al diseño final del producto. (netvision.es. (s. f.). *Home page* | AEA.)

Este se utiliza rara vez 100% puro y casi siempre se usa aleado con otros metales para mejorar alguna de sus características. El aluminio puro se emplea principalmente en la fabricación de espejos, tanto para uso doméstico como para telescopios reflectores. Otros usos del aluminio son, Transporte; como material estructural en aviones, automóviles, trenes de alta velocidad, metros, tanques, superestructuras de buques y bicicletas. Estructuras portantes de aluminio en edificios. Embalaje de alimentos; papel de aluminio, latas y tetrabriks. En carpintería metálica; puertas, ventanas, cierres, armarios. Bienes de uso doméstico; utensilios de cocina, herramientas y muchas otras presentaciones que vemos habitualmente.

Ampliando a lo anterior, se puede decir que el aluminio es un metal que se encuentra abundante en nuestro entorno y que, gracias a sus propiedades físicas, térmicas, mecánicas y aplicaciones, lo que lo hacen ideal para trabajar con él. A continuación, se evidenciará a detalle de cada una de las propiedades.

Tabla 1

Propiedades generales del aluminio y aleaciones.

Propiedades generales del aluminio y aleaciones			
Módulo de elasticidad	MPa	69 x 10 ³	
	Psi	10 x10 ⁶	
Porcentaje de elongación % (Dependiendo de cómo se trabaje el aluminio y su aleación)			4% - 40%
Dureza	Brinell HB	20 - 90	
	Rockwell HR ^a	44 - 52	
Físicas	Densidad	Coefficiente expansión térmica	Punto fusión
	2.70 g/cm ³	24°C ⁻¹ x 10 ⁻⁶	660°C
Propiedades térmicas	Calor específico	Conductividad térmica	
	0.21 Cal/g°C ^a	0.22 J/smm°C	
Coeficientes de resistencia y endurecimiento por deformación	MPa	175 - 400	
	Psi	25000 - 60000	
Resistencia a deformación	MPa	28 - 175	
	Psi	4000 - 25000	
Resistencia a tensión	MPa	69 - 350	
	Psi	10000 - 50000	

Nota. En la tabla se muestran las propiedades generales del aluminio y sus aleaciones.

Elaboración propia.

2.1.2 Proceso Fundición

La fundición es un proceso de manufactura, donde se lleva el metal a su estado líquido, llamado metal fundido y que fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde donde al ir enfriando, se solidifica y toma la forma de la cavidad del molde (ingeniería, 2019). La calidad para la reacción química en el proceso de fundición se basa en las condiciones ambientales, la calidad de los combustibles y las condiciones de la cámara de combustión, estas crean múltiples variables como la generación de productos secundarios y reacciones competitivas.

Algunos conceptos que se deben tener en cuenta para la fundición son, el punto de fusión, que es la energía requerida para separar los átomos del metal. Esta puede variar dependiendo de la aleación o si es metal puro, que tiene un punto definido de fusión. El rango de temperatura dentro del cual un componente o una estructura se diseña para funcionar es un factor que debe considerarse en la selección de materiales. La fluidez del metal que es la capacidad para llenar las cavidades del molde, que consta de dos factores básicos: (1) las características del metal fundido y (2) los parámetros de fundición. Algunos parámetros para tener en cuenta para el proceso son:

2.1.3 Velocidad de vaciado: Cuanto menor sea la velocidad de vaciado del metal fundido dentro del molde, menor será la fluidez, debido a que la velocidad de enfriamiento es mayor cuando se vacía lentamente.

- 2.1.4 Grado de sobrecalentamiento o temperatura de vertimiento:** El sobrecalentamiento, definido como el incremento de temperatura por encima de su punto de fusión, mejora la fluidez al retrasar la solidificación. Con frecuencia se especifica la temperatura de vaciado en lugar del grado de sobrecalentamiento, porque aquélla se determina más fácilmente.
- 2.1.5 Llama adiabática:** Es la máxima temperatura teórica que la flama de una combustión real de un combustible puede alcanzar en ausencia de transferencia de calor que, por razones termodinámicas, no es factible evitar, con lo que la temperatura efectiva observada siempre es menor (SciELO, 2020).
- 2.1.6 Crisol:** Es el recipiente que contiene el metal mientras se calienta, se funde y se vierte en el molde. Este debe ser resistente al calor y a altas temperaturas, por eso debe ser fabricado en materiales refractarios capaces de soportar altas temperaturas sin deformarse ni fundirse. Algunos de los materiales utilizados para fabricar crisoles son la arcilla refractaria, el grafito, el carburo de silicio y el óxido de aluminio.
- 2.1.7 Molde:** Es la cavidad en la cual se vierte el material fundido para obtener la pieza deseada. El molde puede estar hecho de diferentes materiales, como arena, metal, cerámica, yeso o resina, dependiendo del método de fundición utilizado y de las

propiedades del material a fundir. El objetivo del molde es mantener el material fundido en su forma deseada hasta que se solidifique y se enfríe.

2.1.8 Horno para fundición

Es el equipo utilizado en el proceso para calentar y fundir materiales. Su objetivo principal es proporcionar el calor necesario para convertir el material en estado sólido en estado líquido, permitiendo así su posterior conformado y moldeo.

Tipos de hornos:

Horno de crisol: Utiliza un crisol resistente al calor para contener el material a fundir. Se calienta mediante combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, como carbón, gas natural, aceite o electricidad.

Figura 1

Horno de crisol



Nota. Horno de crisol. Elaboración propia

Figura 2

Horno de arco eléctrico



Nota. Horno de arco eléctrico. Tomado de
(Refratechnik, 2023)

Horno de arco eléctrico: Utiliza un arco eléctrico generado entre dos electrodos para calentar y fundir el material. Este tipo es adecuado para fundir metales y aleaciones de alta conductividad eléctrica.

Figura 3

Horno de inducción



Nota. Horno de inducción. Tomado de
(Made-In-China, 2023)

Horno de inducción: Usa el principio de inducción electromagnética para fundir el material. Un campo electromagnético generado por una bobina induce corrientes eléctricas en el material, generando calor y elevando su temperatura hasta el punto de fusión.

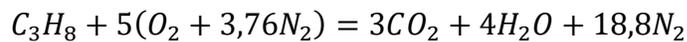
2.1.9 Combustión

Es un proceso químico fundamental en el que se libera energía en forma de luz y calor. Se caracteriza por ser exotérmica, lo que significa que la energía se desprende hacia el entorno. Este fenómeno puede involucrar materia en estado gaseoso o en estados heterogéneos, como líquido-gaseoso o sólido-gaseoso. En la mayoría de los casos, la combustión ocurre de manera rápida y eficiente.

2.1.10 Generalidades de la combustión

Teniendo en cuenta que el combustible de la fundición es propano se hace referencia a la ecuación estequiométrica para lograr establecer una combustión completa teóricamente en el sistema y compararla con la experimental.

Ecuación estequiométrica de combustión completa del propano balanceada



Ecuación de la relación aire/combustible

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{N_{aire} \times M_{aire}}{N_c \times M_c + N_{h2} \times M_{h2}}$$

Ecuación 1

Donde:

M_{H_2} = Masa molar de hidrógeno

N_c = Moles de carbono

M_c = Masa molar de carbono

Ampliando a lo anterior, se debe tener en cuenta los siguientes conceptos para la facilidad de comprensión del documento.

2.1.10.1 Necesidad de oxígeno: La mayoría de las combustiones requieren oxígeno para suceder. Puede provenir del aire circundante o de un oxidante específico.

2.1.10.2 Productos de combustión: Los productos de la combustión varían según el combustible y las condiciones. Los más comunes son el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O). También pueden formarse otros compuestos, como el monóxido de carbono (CO) o los óxidos de nitrógeno.

2.1.10.3 Combustión completa: Son aquellas reacciones en las que se oxida (consume) totalmente el material combustible y se producen otros compuestos oxigenados, como el dióxido de carbono (CO_2) o dióxido de azufre (SO_2), según sea el caso, y agua (H_2O).

2.1.10.4 Combustión incompleta: Son aquellas reacciones en que aparecen compuestos que no se oxidaron completamente en los gases de combustión. Tales compuestos pueden ser monóxido de carbono (CO), hidrógeno, partículas de carbono, etcétera.

2.1.11 Propano: Es un gas incoloro e inodoro. Se trata de un hidrocarburo alifático que contiene tres átomos de carbono. Este gas se deriva del petróleo y tiene diversas aplicaciones tanto en la industria como a nivel doméstico ¹. Su fórmula química es C_3H_8 y forma parte de los alcanos, ya que está compuesto únicamente por átomos de hidrógeno y carbono unidos por enlaces simples.

2.2 Estado del Arte

Hasta la fecha, la investigación en el ámbito de la caracterización del calentamiento del aluminio a través del proceso de fundición ha sido notablemente escasa. A pesar de la amplia gama de estudios centrados en la optimización de este proceso, mediante la implementación de enfoques de calidad en la producción, como aplicación del método de las 5's, utilizado para organizar y estructurar de cierta forma la fundición y resulta sorprendente la falta de trabajos previos que se adentren en la detallada comprensión de cómo el calentamiento del material influye directamente en el tiempo. Aunque la literatura existente se ha esforzado en la mejora general de los métodos de fundición y su eficiencia, existe una oportunidad significativa para explorar más a fondo los aspectos específicos del calentamiento en este ámbito. Esta investigación podría arrojar resultados importantes, consideraciones térmicas y

cambio en sus propiedades, llenando así un vacío de conocimiento en este campo crucial de la ingeniería de materiales y la fabricación industrial.

El trabajo presentado por Rahul Srinivasa y Ravigoda Patil en su artículo “Characterization of Casting and Deformation Process of a Metal Alloy” (Rahul Srinivasa, Ravigoda Patil, 2017) hablan sobre lo importante que es la fluidez en el proceso de fundición, la cual es la distancia que un metal fundido puede fluir en un molde de un área de sección transversal constante antes de solidificarse; lo cual influye directamente en el buen estado y acabado final de la pieza. Teniendo en cuenta, variables de entrada importantes como el material del cual está formado el molde, que en este caso es aluminio puro y aleaciones con Silicio (Si) para observar variaciones en la fluidez del material a vertir. Además, de la temperatura a la que puede llegar el molde para que tenga influencia en la variable de salida (fluidez). En la investigación se verificó los distintos efectos que tiene la fluidez, la composición, el sobrecalentamiento, el material del molde, tamaño y refinado del grano. Esto se realizó a través de dos pruebas de fluidez, las cuales fueron: Prueba de molde en forma de espiral y la prueba de fluidez al vacío. Mediante el cual obtienen que, en todos los sobrecalentamientos de fusión probados, la fluidez aumenta con el recubrimiento del molde. También demostraron que la conductividad de los materiales de recubrimiento, su grosor y la rugosidad del molde, también afectan a la fluidez. Además, la química de la aleación de aluminio tiene un papel importante y el contenido de Silicio tiene un significado serio. Sin embargo, pequeñas variaciones en los elementos de aleación menores no afectan significativamente la fluidez (Srinivasa & Patil, 2017).

Por otra parte, la tesis realizada por Fabián Leonardo Granados y Mónica Marcela Puentes Ávila titulada “Sistema de gestión de operaciones en el área de fundición de la siderúrgica METALMEC S.A.S.”, se realiza un análisis acerca del procedimiento y actividades que se realizan en dicha empresa. Ellos identificaron procesos no estandarizados dentro del área de fundición, como lo es el tiempo que se demoran los operarios en algunas tareas, generando demoras y tiempo inoficioso que significa pérdidas de dinero a largo plazo, también lleva a una ausencia de unas funciones claras y responsabilidades que deben asumir las personas que trabajan en esta área.

Para recolectar dichos datos se utilizó como fuente primaria las entrevistas abiertas, encuestas y la observación directa, y como fuente secundaria libros, internet y documentos con que cuenta la empresa. Se logró con este estudio un plan donde se plasme el cambio de los procesos y operaciones apoyados en la realización de un sistema de gestión de operaciones que dé estándares en los procesos de fundición de la empresa, genere una política de gestión, establezca divisiones jerárquicas, y realice una ingeniería de métodos, otorgando claridad en la forma de hacer las tareas(Granados & Puentes, 2016).

De la misma manera, John Jairo Florián Marín y José Ferneli Gil Hernández en su trabajo de postgrado llamado “Propuesta de modelo de estandarización de los procesos productivos como base para la implementación de un sistema de gestión de calidad en la empresa MECANIZAMOS F.M. S.A.S.” (John Florián, José Gil, 2016), tuvieron como finalidad estandarizar los procesos de la empresa MECANIZAMOS F.M S.A.S, ya que allí todavía existe la desorganización, la falta de estandarización, la carencia de documentación en los procesos productivos en la elaboración de sus productos, lo cual provocaba pérdidas de

tiempo, servicio, calidad y costos trayendo consigo baja productividad y provocando que la empresa no sea competitiva a nivel local, nacional e internacional. Para la solución de eso, los autores se basaron en la norma ISO 9001:2008 para la planificación, ejecución y verificación de los parámetros, rangos, especificaciones, bajo las cuales se logra un desarrollo adecuado del proceso. Finalmente concluyeron que los procesos operativos estandarizados promueven el aseguramiento de la calidad de los productos, también las capacitaciones que recibe el personal sobre sus funciones y responsabilidades disminuyen los inconvenientes que afectan el proceso, por lo que satisface los requisitos del cliente (Florian & Gil, 2016).

Igualmente, los autores Cristian José Almánzar Corredor, Daniel Ballén Hernández, Bryan Humberto Ramos Calderón, en su trabajo de grado llamado “Propuesta de estandarización para la fundición de lingotes de aluminio en la empresa recuperadora de Metales RUBY C”, realizaron una propuesta a una empresa que se dedica a procesos productivos en hornos de fundición de metal, en la que su principal producto es el lingote de aluminio de material reciclado procedente de ollas, latas, láminas, rines, repuestos automotores, entre otros. El proceso productivo de fundición finaliza con un producto llamado lingote de aluminio de diferentes tamaños adaptados a las necesidades del cliente. El desarrollo de esta empresa siempre se ha realizado de manera empírica, dando resultados ineficientes lo que ha provocado una desorganización empresarial. Aplicando la metodología de las 5's, llegaron a la conclusión de que su principal problema es la desorganización total del proceso productivo, lo que ha conllevado a tener baja productividad, costos excesivos de producción y la calidad de producto es variable. También concluyeron que, implementando esta metodología, la empresa obtendrá la oportunidad de reducir los desplazamientos

innecesarios, mejorar el flujo de los materiales, mediante la organización y limpieza de sus áreas de trabajo.

Una de las 5's aplicadas es Seiketsu (Estandarización). Está enfocada en modelar los procesos y definir claramente las áreas, la ubicación de las herramientas en tableros, la separación de insumos y los tiempos de operación. Esta actividad se debe llevar en paralelo con un proceso continuo de entrenamiento para garantizar el cumplimiento del estándar. La estandarización de las áreas de trabajo, las rutinas de aseo, los elementos de protección personal y el cumplimiento de la normatividad interna son la base para que la metodología de las 5'S sea viable dentro de la empresa, esto se logra con la capacitación de los trabajadores, manuales o cartillas informativas sobre los procesos, el correcto uso y los beneficios de los elementos de protección personal (Almánzar & Ballén, 2017)

También, la autora Laura Catalina Silva Muñoz en su proyecto de grado llamado "Estudio del Proceso de Fundición de Aluminio por Gravedad para la Fabricación de Herrajes Eléctricos y Propuesta de Plan de Mejoramiento en Metallan S.A.S." (Laura Silva, 2018), el cual tiene como objetivo presentar el diseño y una propuesta de un plan de mejoramiento para el proceso de fundición de aluminio por gravedad en coquilla de la empresa METALLA S.A.S, la cual se dedica principalmente a la fabricación de herrajes eléctricos. Este proceso se realiza de manera empírica, lo que atenta contra la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Para eso se realiza un diagnóstico dividido en tres etapas: análisis, búsqueda y solución. En la primera etapa, se realiza el estudio de los flujos productivos determinantes para la distribución, (flujo de materiales, información, operadores, etc.) y se desarrolla una

matriz de relaciones en la que se asigna por pares de instalaciones una etiqueta de acuerdo con la razón de cercanía que refleja la mayor o menor necesidad de situar próximas secciones de dicho par. Luego, se realiza una primera aproximación de la distribución satisfaciendo en la medida de lo posible los requerimientos definidos en la matriz de relación. En la segunda etapa, se elabora un diagrama de relaciones espaciales detallando la geometría de cada área e incluyendo pasillos y requerimientos técnicos. Finalmente, se obtiene un manual básico de estandarización y capacitación, y un sistema básico de mantenimiento de los equipos. Por lo cual se espera que una vez sean aplicados incrementen las capacidades de producción, calidad y productividad de la empresa (Silva, 2018).

De la misma manera, Andrea Katherine Torres Angarita en su trabajo de grado titulado “Identificación de las causas que ocasionan el problema de porosidad en el proceso de fundición del hierro gris y propuesta de mejora para reducción de indicador por esta causa de PNC en industrias LAVCO LTDA” (Andrea Torres, 2018), el cual tiene como objetivo ayudar a la empresa Lavco Ltda, la cual se dedica a la metalmecánica. Dentro de sus procesos, el más complejo es la fundición de hierro gris. En dicho proceso hay un problema de inclusiones en la fundición, lo que trae como consecuencia continuos rechazos de producto no conforme (PNC), lo que ha generado disentimiento en la productividad de la empresa. Por lo cual fue necesario cuantificar mediante mejoras en los indicadores de calidad, el porcentaje de pérdidas mes a mes de la producción. También aplicando la metodología causa-efecto, la cual ayudó para analizar cada causa, y a través de la metodología solución sistemática de problemas (S.S.P), se encontró que los problemas tenían que ver con la falta de control y seguimiento a los procesos. Por lo cual se implementaron acciones relacionadas con

capacitaciones al personal, ajuste de equipos y maquinarias, esto ayudó a mejorar el indicador de PNC por poros, ratificando las acciones propuestas (Torres, 2018).

Asimismo, Eliana Andrea Álvarez Jiménez y su compañera Ingrid Carolina Medina Farfán en su trabajo de grado “Desarrollo de un sistema de estandarización y optimización en la línea de producción de conos de Acerías de los Andes S.A.S, tuvieron como objetivo realizar una optimización y estandarización de una línea de fundición. Como primer paso hicieron un diagnóstico inicial de las condiciones de la empresa en relación a la línea de producción de conos y las metodologías de trabajo. Como segundo paso analizaron el comportamiento de los factores y las teorías aplicables al proceso de producción de conos de Acerías de los Andes S.A.S, para después evaluar el sistema planteado a través de un estudio cualitativo y cuantitativo de los indicadores de gestión (tiempo de ciclo del sistema, porcentaje de devolución del producto terminado y eficiencia de la producción) y financieros afectados en el sistema de producción actual para validar el funcionamiento del sistema por medio de simulación. Las falencias halladas dentro del proceso, se evidenciaron a través de una recolección de datos que posteriormente se analizaron, arrojando unos resultados no esperados, llevando a la utilización de herramientas que garanticen un mejoramiento en cada fase y área donde se trabaja este proceso de fundición; logrando que se evidenciara cómo cada sección trabaja de manera independiente, por lo que se buscó la forma de lograr la sinergia en la realización de las actividades que conllevan finalmente a la fabricación de un producto de calidad (Álvarez & Medina, 2011).

Por otro lado, Amit Chaudhari y Hari Vasudevan en su artículo titulado “Reliability based design optimization of casting process parameters using Markov chain model” el cual se centra en el desarrollo de un modelo de cadena de Markov para predecir fallas en el proceso de fundición y optimizar los parámetros del mismo. Se consideran diferentes defectos de fundición tales como cierre en frío, inclusión, cambio de molde, contracción, orificio de soplado y porosidad. También tuvieron en cuenta distintos parámetros del proceso, como la temperatura de vertido, resistencia a la compresión en verde, dureza del molde, contenido de humedad, permeabilidad y manejo inadecuado. Luego, implementan el modelo de cadena de Markov, el cual proporciona información sobre las probabilidades de falla de fundición en función de dichos parámetros. De esta manera concluyen que la temperatura de vertido es el parámetro más crítico en el proceso de fundición con un porcentaje de falla de 49.65%, seguido de la resistencia a la compresión en verde y la dureza del molde que contribuyen con un 18,75 % y un 12,5 % respectivamente a las fallas de fundición. Además, los resultados dicen que el modelo de cadena de Markov puede implementarse en la optimización de los parámetros del proceso de fundición. También que el uso de la teoría de confiabilidad proporciona una solución veraz en comparación con las técnicas convencionales. Incluso que, el modelo de cadena de Markov puede ayudar a determinar las probabilidades de diferentes parámetros del proceso que conducen a fallas de fundición.(Chaudhari & Vasudevan, 2022).

En cambio, Wilson Villabon en su trabajo de grado titulado “Diseño de una nueva línea de moldeo en sistema de cold box para la planta de Fundición Mosquera” (Wilson Villabon Ahumada, 2016) planteó un esquema para el sistema productivo de la línea de fabricación de

moldes en la empresa Fundicom S.A. Esta empresa se dedica principalmente a crear piezas para el sector automotor, las cuales se fabrican por un proceso de fundición de moldeo por arena en verde. La demanda de estas piezas con el pasar del tiempo ha incrementado, por lo que se necesitan realizar inversiones para mejorar la infraestructura de la empresa, ya que la maquinaria no cuenta con un plan de mantenimiento adecuado, lo que ocasiona una producción muy lenta y que los clientes estén insatisfechos por entregas muy tardías. Mediante estudios comparativos de mantenimiento, área de ocupación, capacidad de fabricación, elementos a transportar, costos y montaje entre tipos de máquinas de moldeo, el autor logró diseñar un sistema productivo que disminuye los tiempos de entrega, cumpliendo con los requerimientos del proceso de acuerdo con la capacidad de fabricación de moldes a niveles de seguridad y calidad (Villabon et al., 2016).

Por otra parte, Lina Consuelo Carvajal Fernández y Laura Melisa Suárez Díaz en su artículo titulado “Estandarización del proceso de fundición para arenas con resinas autofraguantes en la industria militar fábrica SANTA BÁRBARA” publicado en la Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo Volumen 15 N.º 1 pp. 13-19, Julio, 2015, describieron la estandarización del método de fundición para arenas con resina autofraguantes. La fabricación de los moldes inicia con la activación del sistema neumático que transporta la arena nueva desde la tolva de recepción y la arena recuperada desde la tolva del shake out, hasta la tolva de los mezcladores. Se dosifica la arena en los moldes y se compacta. Se hace el estudio del proceso realizando ensayos con diferentes métodos de fabricación de piezas para diseñar una hoja de cálculo para estándares de mano de obra especializada en el moldeo de arenas con resinas autofraguantes. La comparación de las dos referencias de piezas

estudiadas en los diferentes métodos de trabajo se evidenció que el moldeo con arenas para resinas autofraguantes permite reducir los costos de mano de obra en comparación con el moldeo mecánico. Cabe resaltar que el material que utilizan para verter en el molde no lo especifican. Ellos recomiendan hacer una inversión en cajas de moldeo estándar que permitan realizar los cálculos de materia prima y mano de obra adecuados y reducir los costos de producción. Generar planes de producción de las diferentes piezas para crear líneas de fabricación, disminuyendo tiempos y siendo más oportunos, evaluar la cantidad ideal de operarios en cada etapa del proceso de manera que se pueda optimizar, diseñar soportes para facilitar el manejo de piezas de gran tamaño en la sección de pulido y terminado (Consuelo et al., 2015).

3 METODOLOGÍA

En esta investigación se aplica la metodología de tipo descriptivo – experimental, ya que se describen y analizan las características o condiciones de operación del proceso de fundición que se lleva a cabo en los laboratorios de la universidad, se identifican las variables críticas que pueden afectar el tiempo del calentamiento del metal y generar la ecuación que mejor describa este tiempo de calentamiento. Por otro lado, es experimental, ya que se realizarán pruebas y mediciones en diferentes condiciones para determinar qué factores afectan significativamente el proceso de fundición y cómo se pueden controlar para lograr resultados más eficientes mediante la recopilación de datos y la realización de análisis estadísticos para identificar patrones y tendencias en el proceso. También el diseño de investigación empleado para este proyecto es mediante un estudio de caso, ya que se recolecta y analiza los datos de un fenómeno en particular que en este caso es el proceso de fundición de aluminio en el equipo de la Universidad, llegando a conocer el proceso a profundidad y analizar las interacciones de las diferentes variables que afecta este proceso. En este caso, se recopilaría información a través de observación directa, entrevistas con el personal involucrado en el proceso de fundición, y la revisión de los resultados encontrados en las pruebas experimentales. Por tanto, se han definido 3 etapas del proyecto:

Etapa 1: Diagnóstico de condiciones actuales.

Para llevar a cabo esta etapa se realiza un reconocimiento y diagnóstico del equipo de fundición encontrado en el laboratorio de ingeniería mecánica. Se necesitan elementos y equipos para el correcto funcionamiento de la hornilla, tales como, ventilador centrífugo, cilindro de gas propano, crisol de grafito, válvulas de paso (una para aire, una para gas), pistola láser para medir la temperatura del material (rango máximo de 650°C), anemómetro para medir el caudal de aire que entra a la cámara de combustión y una balanza para pesar la cantidad de aluminio a fundir.

Adicionalmente, se realizaron encuestas a docente y mecánico del laboratorio con preguntas sobre el funcionamiento de cada una de las partes que conforman el proceso de fundición de la universidad. Las preguntas realizadas fueron: ¿De dónde se obtuvo el material para fundir? ¿Cómo encienden la hornilla? ¿Cuántas vueltas de gas se necesitan para que se dé proceso? ¿Cuántas vueltas de aire se necesitan para hacer que este estable la llama? ¿A qué temperatura vierten el material fundido? Y ¿Cómo es el proceso en general?

Finalmente, para esta etapa se asistió una prueba experimental realizada en una clase de procesos de manufactura y a través de la observación se pudo establecer las condiciones y variables necesarias para la operación del proceso de fundición dentro de la Universidad.

Etapa 2: Validación de Pruebas Experimentales.

Para inicio de esta etapa, se realiza revisión de la bibliografía con el fin de identificar y seleccionar variables significativas del proceso, metodologías utilizadas para el proceso de calentamiento en fundición y recomendaciones de estudios y/o experimentos previos que ayuden a obtener mejores resultados en la práctica.

Como segundo paso, se determina las pruebas experimentales con las variables significativas seleccionadas. En este caso particular, se determinaron 9 pruebas conservando constante la entrada de gas el cual se cuadro a $\frac{1}{4}$ de giro de la válvula, la temperatura de vertimiento ($739^{\circ}\text{C} - 747^{\circ}\text{C}$) y la cantidad de material de 1.225 Kg de aluminio. Solo se hicieron variaciones en la entrada de aire que van desde $14.524092 \text{ m}^3/\text{h}$ (apertura de válvula de 1 vuelta) hasta $29.302956 \text{ m}^3/\text{h}$ (apertura de válvula de 1.5 vueltas) como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2

Detalle pruebas experimentales

# Exp.	Cantidad de pruebas	Apertura de válvula gas	Apertura de válvula aire	Temp. Vertimiento ($^{\circ}\text{C}$)	Cantidad de material (Kg)
1	1	$\frac{1}{4}$	1	740	1.225
2	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{1}{16}$	740	1.225
3	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{1}{8}$	740	1.225
4	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{3}{16}$	740	1.225
5	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{1}{4}$	740	1.225
6	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{5}{16}$	740	1.225
7	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{3}{8}$	740	1.225
8	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{7}{16}$	740	1.225
9	1	$\frac{1}{4}$	1- $\frac{1}{2}$	740	1.225

Nota. Detalle de las pruebas experimentales. Elaboración propia.

Para llevar a cabo adecuadamente el conjunto de pruebas experimentales propuestas resulta necesario contar con una serie de dispositivos y herramientas especializadas de medición. Estos equipos de medición desempeñan un papel fundamental en el proceso, ya que son los instrumentos a través de los cuales se captura y registra la información cuantitativa vinculada a las variables que se están investigando.

Tabla 3

Herramientas usadas para realizar las pruebas experimentales

Pirómetro	
	Marca: Kaemeasu infrared thermometer 8000 series Rango Medición: -50°C – 1600°C -58°F – 2912°C
Balanza digital	
	Marca: Ohaus Ranger 3000 r31p30 Rango de medición: 1g – 30000g

Anemómetro	
	<p>Marca: EXTECH EN300</p> <p>Rango de medición: Velocidad del aire: 0.4 – 30 m/s</p>

Nota. Herramientas usadas para realizar las pruebas experimentales. Elaboración propia.

Etapas 3: Desarrollo del modelo predictivo.

Tras la evaluación de los resultados derivados de las pruebas experimentales llevadas a cabo, se procederá a la elaboración de una representación gráfica que encapsule la información recopilada. Esta representación gráfica constituirá el punto de partida para un análisis detallado, cuyo objetivo primordial será la obtención de un modelo predictivo de segundo grado que mejor se adapte a la forma y tendencias reflejadas en dicha gráfica.

Este proceso será respaldado por un análisis estadístico, específicamente a través de un análisis de varianza elaborado por el software Statgraphics. Dicha técnica estadística tiene como finalidad fundamental identificar y cuantificar las variaciones presentes en los factores involucrados en la ecuación propuesta. Mediante esta metodología, se busca garantizar una base sólida para la formulación y validación de este modelo resultante, la cual se convertirá en una herramienta fundamental para comprender y predecir las relaciones y comportamientos a los datos experimentales.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados diagnóstico inicial.

Teniendo en cuenta la etapa, el resultado de las encuestas realizadas a la persona encargada y docentes que tienen acceso al uso de la hornilla en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería, registrados en anexo 7 se evidencia los siguientes resultados con base a sus respuestas.

1. Los encuestados coinciden en que el material que se funde en la hornilla es aluminio, obtenido de los procesos de manufactura y reciclados que se encuentran dentro de las instalaciones de la universidad.
2. Además, coinciden en que el proceso de encendido de la hornilla se basa en la combinación de gas propano, un flujo de aire y una llama o chispa. Basándose en su experiencia en situaciones anteriores donde han encendido la hornilla tanteando la chispa y el volumen de gas.
3. Al preguntar acerca del grado de apertura de la válvula de gas y aire que se necesitan para que el equipo funcione, los resultados fueron variables ya que, por un lado, está claro el grado de apertura de la válvula, mientras que por otra parte se define de forma empírica.

4. Los encuestados concuerdan en que no tienen una temperatura de vertimiento definida para este proceso, ya que no se cuenta con un equipo que alcance a medir la temperatura a la que llega el material, entonces recurren a la observación del color del material para compararlo con la escala de colores correspondiente a la temperatura aproximada a la que se encuentra.

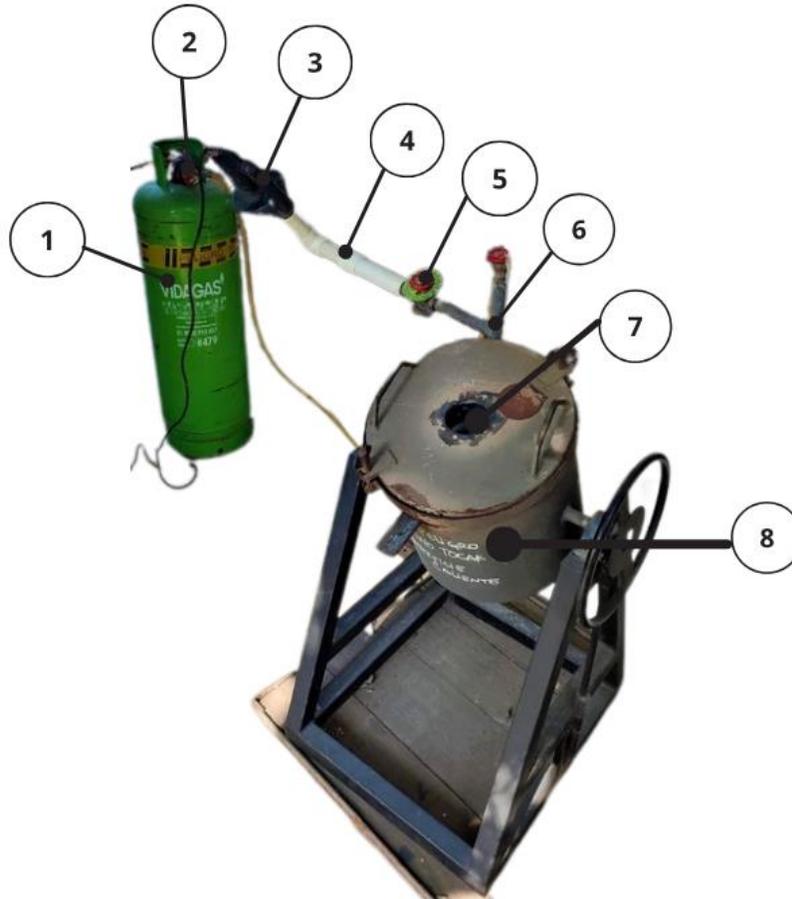
5. Finalmente, el proceso que se realiza tiene mucha variabilidad, ya que los equipos para mediciones no son los adecuados o no tienen la capacidad suficiente. Además, teniendo en cuenta que esta práctica se realiza en horario de clase, es fundamental el tiempo que demora el sistema en fundir el material para que no exceda los tiempos tanto de clase como el del encargado del taller. También, utilizan los sentidos para tomar decisiones que son importantes en el desarrollo de esta práctica, generando resultados diferentes en cada uno de los ensayos que se realizan.

Por otra parte, se obtuvieron resultados de la clase a la que se asistió, donde se encendió el equipo y se realizó una prueba piloto con el fin de tener un acercamiento real a lo que ocurre en este proceso. De esta manera se establece las características del equipo:

Sistema de fundición del laboratorio UPB Montería.

Figura 4

Sistema de fundición



Nota. Se muestra el sistema de fundición que está en la UPB Montería. Elaboración Propia.

Tabla 4

Elementos y características del equipo

Tanque de gas propano	
1	 <p>Descripción: Tanque gas propano VIDAGAS Capacidad: 90LB Cantidad: 1</p>
Regulador de gas	
2	 <p>Descripción: VICTOR EDGE 2.0 ACETYLENE Capacidad: 2 – 15 PSIG Cantidad: 1</p>
Ventilador centrifugo	
3	 <p>Descripción: Marca Makita de serie M4000. Capacidad: 1.2 a 2.9 m³/min. Cantidad: 1</p>
Adaptación para ventilador centrifugo	
4	 <p>Descripción: Tubo PVC Capacidad: Tubo Ø1-1/2 Cantidad: 1</p>

Válvula		
5		<p>Descripción: Válvula de paso de Ø 1/2 in SCH 40, roscada, con una longitud de 7,5 cm</p> <p>Cantidad: 2</p>
Adaptación en “Y”		
6		<p>Descripción: Adaptación en tubería Ø1-1/2” SCH 40 ASTM A-53 para realizar la mezcla de aire y gas que ingresa a la hornilla.</p>
Crisol		
7		<p>Descripción: Crisol en forma de cono truncado, tiene una altura de 12.5 cm, sus diámetros internos en la parte superior de 8.9cm y en la parte inferior de 4.98cm, cuenta con un espesor de 1.13cm</p> <p>Capacidad: 478.75 cm³</p> <p>Cantidad: 1</p>
Hornilla		
8		<p>Descripción: Tiene un diámetro exterior de 43cm. Altura de 40.5cm. Además, cuenta con lámina de acero ASTM A-36 espesor 1/4” y tiene un recubrimiento interno de concreto de 3000 Psi</p> <p>Capacidad:</p> <p>Cantidad: 1</p>

Nota. Elementos y características del equipo. Elaboración propia.

Con respecto al procedimiento observado durante la clase, se hicieron evidentes diversas etapas claves, incluyendo la cuidadosa fusión del material en el horno, la eliminación de impurezas en forma de escoria y, finalmente, el vertido del metal fundido en un molde especialmente preparado. Conforme el metal se iba calentando, se manifestaron patrones en la flama de combustión resaltando la importancia crucial de controlar el caudal de gas para obtener el proceso en un tiempo estipulado.

Procedimiento de prueba piloto.

1. Para hacer este proceso de fundición, se debe tener en cuenta el volumen del crisol el cual contendrá la cantidad necesaria del aluminio que se va a fundir, entonces se procede a sacar las medidas del crisol que son: Altura: 12.5 cm, espesor: 1.13 cm, diámetro interno (arriba): 8.892 cm, diámetro interno (abajo): 4.975 cm y con esto tener un volumen: 478.75 cm^3 .
2. Teniendo en cuenta el volumen antes hallado y sabiendo la densidad del aluminio, el crisol podría con 1.292 kg de material.
3. Al hacer los cálculos de cuanto material se va a fundir, se procede a ponerlo en el crisol y a su vez dentro del equipo de fundición.

4. En este momento, se tiene un combustible que en este caso es gas propano, una fuente de oxígeno que es un ventilador centrífugo y el equipo tiene un orificio por donde se le suministra la chispa o fuego para lograr una llama, aquí con todos los EPP y la pistola láser se pudo saber la temperatura a la que se encontraba el material.

Figura 5

Medición de temperatura



Nota. Se muestra el proceso de medición de temperatura. Elaboración Propia.

5. Cuando el equipo se mantiene estable, se estima que demora aproximadamente 40 minutos para que este llegue a su temperatura de fusión (aluminio líquido), donde se pudo medir la temperatura a la que estaba el material gracias al pirómetro que tiene un rango máximo de 650°C , luego se dejó 25 minutos más con el fin de que llegara a

la temperatura de vertimiento que en este caso es de 100°C por encima de la temperatura de fundición que es de 650°C.

Tabla 5

Pirómetro utilizado en la prueba piloto.

Pirómetro	
	<p>Marca: ERASMUS EIR-650 Termómetro Infrarrojo. Rango Medición: -50°C a 650°C</p>

Nota. Pirómetro utilizado en la prueba piloto. Elaboración propia.

6. Luego de pasar el tiempo, se mueve el material fundido a otro crisol con el fin de ponerlo en el molde de tubo de acero galvanizado de 1.5 in.

Figura 6

Paso de material fundido a crisol



Nota. Se muestra como es el proceso para pasar el material fundido de la hornilla a otro crisol. Elaboración propia.

7. Luego se pasa al molde de acero galvanizado con se muestra en la Figura 6, esto con el fin de dejarlo reposar y se enfríe el material. Posteriormente, se realiza otro trabajo para sacar el eje de aluminio que será llevado a los laboratorios de máquinas de manufactura para su uso y procesamiento.

Figura 7

Vertimiento de material fundido en el molde



Nota. Se muestra el proceso de vertimiento en el molde. Elaboración propia.

8. Cuando se terminó de vaciar el aluminio fundido en el molde, se le hizo un proceso de enfriado rápido, se le suministro agua para lograr que enfriara en menor tiempo posible.

Considerando lo previamente mencionado, se estableció que la práctica del proceso de fundición en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con déficit en varios aspectos que son indispensables para que se dé de una manera óptima, como lo es la combustión que se da dentro de la hornilla, porque no está claro la relación de aire y gas que

se necesita. Además, la variabilidad en el tiempo que demora el proceso genera incertidumbre, ya que, esto se hace para fines académicos dentro de la institución, la cual cuenta con tiempo limitado para realizar la actividad.

Asimismo, en esta etapa prevalecieron las condiciones iniciales del equipo y su funcionamiento, el método de estudio está enfocado en la operación y factores que afectan el proceso, más allá de las propiedades finales del material, posibles aleaciones o resultado que se puedan obtener. Tomando en consideración el trabajo de Amit Chaudhari y Hari Vasudevan en su artículo titulado “Reliability based design optimization of casting process parameters using Markov chain model”, donde se establece que la temperatura de vertido es el parámetro más crítico en el proceso de fundición, se decidió fijar una temperatura de vertimiento en las pruebas experimentales que se realizaron en este proyecto, llegando a la conclusión de una temperatura de $740^{\circ}\text{C} \pm 7^{\circ}\text{C}$ para estandarizar todas las pruebas y verter a la misma temperatura.

También se evidenció que el manejo de este equipo fue netamente empírico, sin algún tipo de guía, referencias o método establecido para su puesta en marcha. Esta falta de orientación clara plantea desafíos significativos en términos de eficiencia y seguridad en la operación. En este sentido, es crucial considerar la implementación de protocolos y procedimientos estandarizados que garanticen un funcionamiento más efectivo y confiable de este equipo, asegurando así resultados más consistentes y un mejor aprovechamiento de sus capacidades.

4.2 Resultados validación de pruebas experimentales.

Para la ejecución de las pruebas experimentales, se llevaron a cabo variaciones controladas del flujo de gas y de aire. Además, se registró y se evaluó el tiempo como un factor determinante en el proceso de fundición. Cabe destacar que las mediciones de temperatura se iniciaron una vez el crisol alcanzó el volumen que se consideró a utilizar, a partir de eso, se realizaron tomas de datos de temperatura en intervalos de tiempo entre 3 y 5 minutos. Asimismo, el peso del aluminio utilizado se mantuvo constante en todas las pruebas.

En las pruebas experimentales, se restringió el ajuste de la válvula de aire a un rango de 1 a 1.5 giros. Más allá de este punto, la flama quedaba por fuera de la hornilla y el flujo de aire se volvía turbulento como se muestra en la Figura 8, lo que afectaba la integridad de los estudiantes en las pruebas. Además, el flujo de gas se mantiene constante ya que, según investigaciones previas, se determinó que el gas tiene un impacto limitado en este proceso.

Figura 8

Hornilla con la llama expuesta



Nota. Hornilla en funcionamiento con la llama expuesta. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la Figura 8, fue posible identificar los rangos óptimos de funcionamiento del equipo de fundición, estipulando los caudales de aire con los cuales se trabajaría, ya que, un parámetro importante dentro del proceso es no exponer la llama, debido a que las pruebas experimentales deben ser seguras de realizar y se hacen con fines educativos.

Para complementar el desarrollo de esta etapa fue necesario el uso de un software estadístico que tuviera la capacidad de evaluar, analizar y dar resultados acerca de la información recaudada en las pruebas experimentales, en este caso, se utilizó el programa statgraphics, donde los resultados fueron coherentes con las pruebas experimentales que se realizaron con el sistema de fundición que se lleva a cabo en los laboratorios de ingeniería mecánica de la UPB seccional Montería. Con la ayuda de esta herramienta fue posible hallar la relación entre

la temperatura ambiente del día (t), giros válvula (GV) con el caudal de aire (Q) que entraba al sistema.

En este proceso se tomaron medidas sobre la velocidad del aire que pasa a través del tubo schedule 40 para determinar el caudal, esto se hizo variando el giro de la válvula de 1/16 en 1/16, teniendo en cuenta que se trabajaría de 1 giro de válvula hasta 1.5 giros y con ayuda de un anemómetro (ver Tabla 7) se obtuvieron los datos de velocidad. Se tomaron 4 mediciones en diferentes horarios del día, en las cuales se obtuvieron como caudal mínimo de 14.26 m³/h y caudal máximo de 29.30 m³/h. También se evidenció que la temperatura ambiente provocaba variaciones en la velocidad del aire.

Tabla 6

Variables usadas para validar caudal de aire

Prueba	Giro de válvula	Temperatura ambiente (°C)	Caudal de aire (m ³ /h)
1	1	29	14.80
2	1.0625	28	16.06
3	1.125	28	17.70
4	1.1875	34	21.15
5	1.25	28	21.76
6	1.3125	29	21.99
7	1.375	28	24.86
8	1.4375	27	26.23
9	1.5	30	30.01

Nota. Resultados caudales de aire validado por Statgraphics.

Para la comprobación de esto, en el software Statgraphics, se realizó una regresión no lineal teniendo como variable dependiente el caudal de aire y como variables independientes el giro de la válvula de aire y la temperatura ambiente. Se utilizó el método de estimación de Marquardt, debido a que este es un método útil en problemas de optimización no lineales donde se busca encontrar los parámetros óptimos que minimizan una función de error. Se estimó la función $a * GV^m * T^n$ en la que a, m y n son parámetros iniciales, los cuales equivalen a 0.1. Donde, GV = giro de válvula de aire y T = temperatura ambiente.

$$Q = 2.00427 * GV^{1.69281} * T^{0.593899} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$Q = \text{Caudal de aire}$

$GV = \text{Giro de valvula}$

$T = \text{Temperatura ambiente}$

La Ecuación 2 cuenta con el 95% de confianza para la ejecución de estas pruebas experimentales, garantizando que futuras pruebas, con los mismos parámetros utilizados para este modelo, tenga una alta confiabilidad y que garantice que el caudal de aire disponible dentro del sistema.

A partir de la Ecuación 2, se validaron los caudales obtenidos con el anemómetro y se observó una correlación entre la toma de datos con el modelo ajustado del software. Dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 7

Relación entre giro de válvula y caudal de aire

Giro de válvula	Caudal de aire (m ³ /h)
1	14.80
1.0625	16.06
1.125	17.70
1.1875	21.15
1.25	21.76
1.3125	21.99
1.375	24.86
1.4375	26.23
1.5	30.01

Nota. Relación entre el giro de la válvula y su equivalente en caudal de aire validado por statgraphics.

Figura 9

Hornilla sin llama expuesta



Nota. Hornilla en funcionamiento sin la llama expuesta. Elaboración propia.

La

Figura 9, hace referencia al equipo de fundición encendido, pero sin la llama expuesta, logrando una ejecución del sistema de manera segura y óptima para los fines educativos e investigativos que la universidad plantea.

A continuación, se presentan las tablas que contienen los resultados obtenidos de las pruebas experimentales efectuadas. Estas tablas ofrecen una visión detallada de las variables analizadas, incluyendo la cantidad de aire, el tiempo total para el llenado del crisol, las mediciones de temperatura con el tiempo en el que se hizo dicha medición, temperatura ambiente, fecha y hora de la prueba, el caudal de gas empleado, la presión del cilindro y los valores iniciales y finales de la masa del cilindro.

Tabla 8

Resultados experimento con un caudal de 14.80 m³/h de aire

14.80m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Jueves 27 de Julio 2023 - 9:35am
T ambiente (°C)	29
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	46.85
Peso cilindro final (Kg)	45.35
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
37.27	638
40.28	666.7
43.10	681.8
46.20	705.2
49.58	720.7
52.27	739.6

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 14.80 (m³/h) y temperatura ambiente 29°C.

Tabla 9

Resultados experimento con un caudal de 16.06 m³/h de aire

16.06 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Martes 15 de agosto 2023 - 10:50am
T ambiente (°C)	28
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	43.95
Peso cilindro final (Kg)	42.8
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
31.48	631.6
34.33	658.9
38.06	675.2
42.33	708.8
44.1	726.1
48.43	742.6

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 16.06 (m³/h) y temperatura ambiente 28°C.

Tabla 10

Resultados experimento con un caudal de 17.70 m³/h de aire

17.70 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Jueves 24 de agosto 2023 - 9:24am
T ambiente (°C)	28
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	41.00
Peso cilindro final (Kg)	39.55
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)

31.57	620.9
35.3	641.4
39.2	677.1
42.20	702.3
45.15	727.6
47.3	742.2

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 17.70 (m³/h) y temperatura ambiente 28°C.

Tabla 11

Resultados experimento con un caudal de 21.15 m³/h de aire

21.15 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Miércoles 30 de agosto 2023 – 4:19pm
T ambiente (°C)	34
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	39.55
Peso cilindro final (Kg)	38.25
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
30.53	636.3
33.51	665.2
37.34	697.1
40.20	715.6
44.40	742.3

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 21.15 (m³/h) y temperatura ambiente 34°C.

Tabla 12

Resultados experimento con un caudal de 21.76 m³/h de aire

21.76 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Jueves 3 agosto 2023 - 8:56am

T ambiente (°C)	28
Gas (vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	45.35
Peso cilindro final (Kg)	43.95
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
30.27	655.4
34.34	685.6
37.02	702.3
39.58	727.5
42.5	740.8

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 21.76 (m³/h) y temperatura ambiente 28°C.

Tabla 13

Resultados experimento con un caudal de 21.99 m³/h de aire

21.99 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Martes 5 de septiembre 2023 - 9:05am
T ambiente (°C)	29
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	38.25
Peso cilindro final (Kg)	36.9
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
27.17	625.9
30.40	645.4
33.02	680.7
38.29	705.2
40.28	724.4
42.35	746.1

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 21.99 (m³/h) y temperatura ambiente 29°C.

Tabla 14

Resultados experimento con un caudal de 24.86 m³/h de aire

24.86 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Miércoles 6 septiembre 2023 - 8:48am
T ambiente (°C)	28
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	39.90
Peso cilindro final (Kg)	35.40
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
27.16	635
30.36	662.7
33.10	697.3
35.59	724.6
38.57	739.4

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 24.86 (m³/h) y temperatura ambiente 28°C.

Tabla 15

Resultados experimento con un caudal de 26.23 m³/h de aire

26.23 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Jueves 7 septiembre 2023 - 9:24am
T ambiente (°C)	27
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	35.40
Peso cilindro final (Kg)	34.00
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
26.2	618.3

29	641
32.46	676.7
34.11	706.9
36.53	726.1
37.15	742.8

Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 26.23 (m³/h) y temperatura ambiente 27°C.

Tabla 16

Resultados experimento con un caudal de 30.01 m³/h de aire

30.01 m ³ /h de aire	
Fecha y hora	Martes 25 de Julio 2023 - 10:22am
T ambiente (°C)	30
Gas (Vueltas)	1/4
Presión del cilindro (Psi)	6
Peso cilindro inicial (Kg)	48.85
Peso cilindro final (Kg)	46.85
Tiempo transcurrido t(min)	Temperatura del aluminio T(°C)
23.35	605.9
26.24	636.6
29.1	670.2
32.25	715.5
35.21	739.7

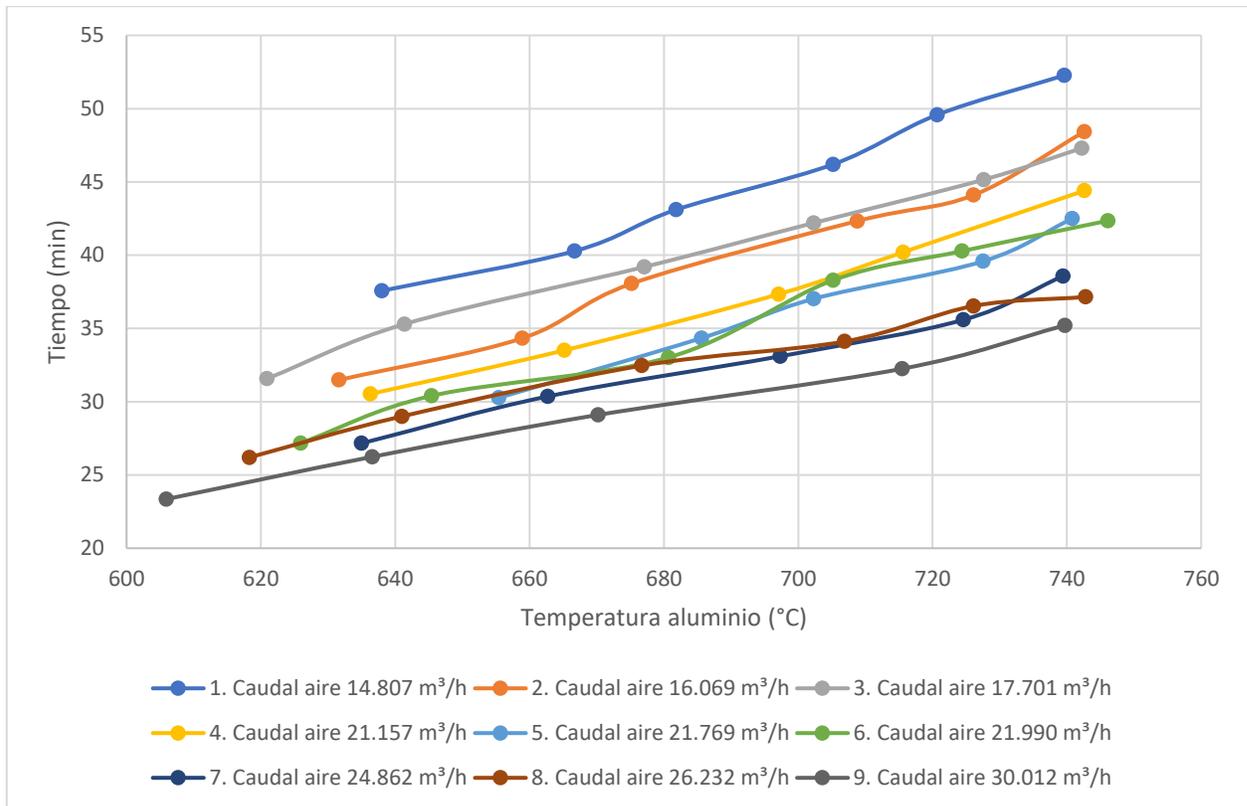
Nota. En esta tabla muestra los valores obtenidos en la prueba experimental con caudal de aire 30.01 (m³/h) y temperatura ambiente 30°C.

Analizando los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y lo que se observó en el desarrollo de la actividad, es evidente que el aire desempeña un papel relevante en el proceso. Tanto es así que guarda una relación inversamente proporcional con respecto al tiempo. Se llevaron a cabo pruebas con el máximo y mínimo caudal de aire, lo que arrojó como resultado

un mayor tiempo requerido para alcanzar la temperatura de vertimiento con el mínimo de aire y, por el contrario, un tiempo menor con un mayor caudal de aire.

Figura 10

Gráfico de tiempo vs temperatura vertimiento



Nota. Se muestra el gráfico de tiempo del proceso de fundición vs temperatura de vertimiento.

En la

Figura 10, se puede analizar la relación que existe entre el tiempo que demora el material en llegar a su temperatura de vertimiento con la apertura de la válvula, donde se observa una

tendencia, a mayor apertura de la válvula, menor tiempo para que el aluminio llegue a la temperatura fijada.

Por otra parte, la temperatura ambiente no parece ser un factor determinante en el proceso, ya que las mediciones del caudal de aire realizadas en diferentes momentos del día y en distintos días no mostraron una variación considerable. Por otro lado, se registró el consumo de gas en cada prueba en términos de peso (Kg) y se observó que el equipo consumió aproximadamente 1 Kg de gas propano en cada prueba. Además, Es importante destacar como recomendación para futuras pruebas experimentales o actividades académicas que involucren el uso de la hornilla, encontrar una manera óptima y fácil de encender el mecanismo, ya que, en ocasiones, resulta complicado y tedioso.

Relación aire/combustible

Para esta investigación fue necesario establecer una serie de ecuaciones que ayudarán a entender la relación que hay entre el aire y el combustible que entran a la hornilla, esto se hace con el fin de determinar si es combustión completa o incompleta. Teniendo en cuenta lo anterior se creó una tabla con los datos a utilizar para comparar la relación aire/combustible teórica y experimental.

La ecuación 3, es una relación aire/combustible ligada a la masa de ambos elementos ya que, los datos obtenidos en los experimentos facilitan el cálculo.

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{N_{aire} \times M_{aire}}{N_c \times M_c + N_{h2} \times M_{h2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

m_{aire} = Masa del aire

$m_{combustible}$ = Masa del combustible

N_{h2} = Moles de hidrógeno

M_{h2} = Masa molar de hidrógeno

N_c = Moles de carbono

M_c = Masa molar de carbono

N_{aire} = Moles del aire

M_{aire} = Masa molar del aire

En la ecuación 4, podemos encontrar la masa en relación con las moles y masa molar de cada elemento que se encuentra en la combustión.

$$m = N \times M$$

Ecuación 4

Donde:

m = masa

N = Moles estequiométricos

M = Masa molar elemento

Con el fin de encontrar la relación aire/combustible óptima (si la combustión es completa) que debe tener en la parte experimental de la investigación se lleva a cabo la solución de la

ecuación 3 en la ecuación 4, dando la referencia a la cual debemos llegar o estar aproximado.

Dando como resultado una relación de $15,68 \frac{Kg \text{ Aire}}{Kg \text{ Combustible}}$

$$M_{aire} = 29 \frac{Kg}{Kmol}$$

Ecuación 5

$$M_{carbono} = 12 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$M_{h2} = 2 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$AC_{Teórico} = \frac{(5 \times 4,76Kmol) \left(29 \frac{Kg}{Kmol}\right)}{(3Kmol) \left(12 \frac{Kg}{Kmol}\right) + (14 Kmol) \left(2 \frac{Kg}{Kmol}\right)}$$

$$AC_{Teórico} = 15,68 \frac{Kg \text{ Aire}}{Kg \text{ Combustible}}$$

Donde:

M_{aire} = Masa del aire

$M_{carbono}$ = Masa del carbono

M_{h2} = Masa de hidrógeno

$AC_{Teórico}$ = Relación aire / combustion teórico

A continuación, se exponen los datos recopilados en cada prueba experimental con el objetivo de desarrollar las ecuaciones anteriores y las que se muestran luego para comparar la relación teórica con la práctica.

Tabla 17

Datos para calcular la relación de aire/combustible

Prueba	Caudal de aire (m ³ /h)	Peso cilindro inicial (kg)	Peso cilindro final (kg)	Consumo (kg)	Tiempo de la prueba (min)	Tiempo prueba (h)
1	14,80	46,85	45,35	1,5	52,27	0,87
2	16,06	43,95	42,8	1,15	48,43	0,80
3	17,70	41,00	39,55	1,45	47,3	0,78
4	21,15	39,55	38,25	1,3	44,4	0,74
5	21,76	45,35	43,95	1,4	42,5	0,70
6	21,99	38,25	36,9	1,35	42,35	0,70
7	24,86	36,9	35,4	1,5	38,57	0,64
8	26,23	35,4	34	1,4	37,15	0,61
9	30,01	48,85	46,85	2	35,21	0,58

Nota. En esta tabla muestra los datos necesarios para calcular la relación aire/combustible

experimental

La ecuación 6, se utiliza para hallar el flujo másico del aire ya que, se varia en todas las pruebas realizadas.

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{v}}$$

Ecuación 6

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{v}$$

Donde:

$\rho = \text{Densidad aire}$

$\dot{m} = \text{Flujo masico del aire}$

$\dot{v} = \text{Caudal de aire}$

En la tabla 17, se observan los resultados del desarrollo de la *ecuación 6*, teniendo en cuenta el caudal de aire de cada prueba y la densidad.

Tabla 18

Flujo másico del aire

Prueba	Flujo másico del aire (Kg/h)
1	18,13
2	19,68
3	21,68
4	25,91
5	26,66
6	26,93
7	30,45
8	32,13
9	36,76

Nota. En esta tabla muestra el resultado de los flujos másicos del aire calculado con densidad del aire = 1,225 Kg/h

Así mismo, se utilizan ecuaciones que faciliten el análisis de la combustión dentro de la hornilla como en este caso, la *ecuación 7*, la cual hace referencia al combustible utilizado para la parte experimental (propano) debido a que, se cuenta con los datos de la masa del

cilindro y su consumo, teniendo en cuenta la duración de cada prueba, expuesto en la tabla 17.

$$\dot{m}_{combustible} = \frac{\Delta m}{t} = \frac{m_{Icilindro} - m_{Fcilindro}}{t} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$\dot{m}_{combustible}$ = Flujo masico del combustible

Δm = diferencia de masa del cilindro

t = tiempo de la prueba

En la *tabla 18*, se muestra los datos obtenidos luego de realizar los cálculos del flujo másico de combustible utilizado en cada prueba.

Tabla 19

Flujo másico del combustible

Prueba	Flujo másico del combustible (Kg/h)
1	1,72
2	1,42
3	1,83
4	1,75
5	1,97
6	1,91
7	2,33
8	2,26
9	3,40

Nota. En esta tabla muestra el resultado de los flujos másicos del combustible calculado con la diferencia de masa del cilindro dividido con el tiempo de cada prueba

En la *tabla 19*, se encuentran resultados de la relación aire/combustible de cada prueba teniendo en cuenta masa de aire que entra al sistema y el propano que se consume.

Tabla 20

Relación aire/combustible experimental

Prueba	Relación Aire/Combustible (Kg aire / Kg combustible)
1	10,53
2	13,81
3	11,78
4	14,75
5	13,49
6	14,08
7	13,05
8	14,21
9	10,78

Nota. En esta tabla se muestra el resultado de la relación aire/combustible experimental

La relación aire/combustible es un factor crítico en los procesos de combustión. En este contexto, se realizó una ecuación teórica para determinar la cantidad óptima de aire necesaria para lograr una combustión completa. El resultado fue una relación de 15.68 kg de aire por Kg de combustible. Sin embargo, las pruebas experimentales indicaron que la combustión fue incompleta. Con respecto a que esto, se debe a la falta de oxígeno en las pruebas ya que, se limitó la entrada de aire al sistema debido a exposición de la flama fuera de la hornilla, se puede evidenciar en la figura 8, siendo peligroso para personas y dificultando la toma de datos.

4.3 Resultados desarrollo del modelo predictivo.

Para el desarrollo del modelo predictivo se utilizó statgraphics, se empleó una regresión no lineal donde se consideró la siguiente función cuadrática $a + n * Q^2$ para estimar un modelo ajustado que relacione el tiempo como variable dependiente del caudal de aire, donde a y n son parámetros iniciales cuyos valores son igual a 0.1 y donde Q representa el caudal calculado en la etapa anterior. Este se hizo con el fin de encontrar la relación que hay entre el caudal y su incidencia en el tiempo que demora el equipo para fundir aluminio convencional.

La ecuación obtenida en el programa estadístico con la cual se estima el tiempo de duración del proceso de fundición está dada por la siguiente expresión:

$$tiempo = 55.1262 - 0.0253454 * Q^2 \qquad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal de aire}$$

En la Ecuación 8, se cuenta con el 95% de confianza para la ejecución de estas pruebas experimentales, garantizando que futuras pruebas, con los mismos parámetros utilizados para este modelo, tenga una alta confiabilidad y que garantice que el tiempo que demora del proceso sea el estipulado por la ecuación o se aproxime.

$$Tiempo = 55.1262 - 0.0253454 * (2.00427 * GV^{1.69281} * T^{0.593899})^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$GV = Giro\ valvula$

$T = temperatura\ ambiente$

La Ecuación 9 es la combinación de la Ecuación 2 y Ecuación 8 . Hace referencia a un modelo predictivo preciso, ajustado para incorporar los factores más significativos relacionados con el proceso de fundición. Este modelo goza de una confiabilidad notable del 95%. En particular, esta ecuación se centra en dos parámetros cruciales: el giro de la válvula y la temperatura ambiente. A través de estos valores, el modelo puede predecir con precisión cuánto tiempo tomará para que el horno caliente el material a la temperatura deseada.

Con la Ecuación 9, se validaron los tiempos obtenidos en las pruebas experimentales y se observó una correlación entre la toma de datos con el modelo ajustado del software. En la siguiente tabla se muestra la relación entre, el caudal y el tiempo de ejecución del sistema para llegar a la temperatura estipulada.

Tabla 21

Relación de giros con caudal de aire y tiempo.

Giro de Válvula (GV)	Caudal (Q)	Tiempo validado con Statgraphics (min)	Tiempo real en pruebas experimentales (min)
1	14.80	49.56	52.27
1.0625	16.06	48.58	48.43
1.125	17.70	47.18	47.3
1.1875	21.76	43.11	44.40
1.25	21.15	43.78	42.5
1.3125	21.99	42.87	42.35
1.375	24.86	39.45	38.57
1.4375	26.23	37.68	37.15
1.5	30.01	32.29	35.21

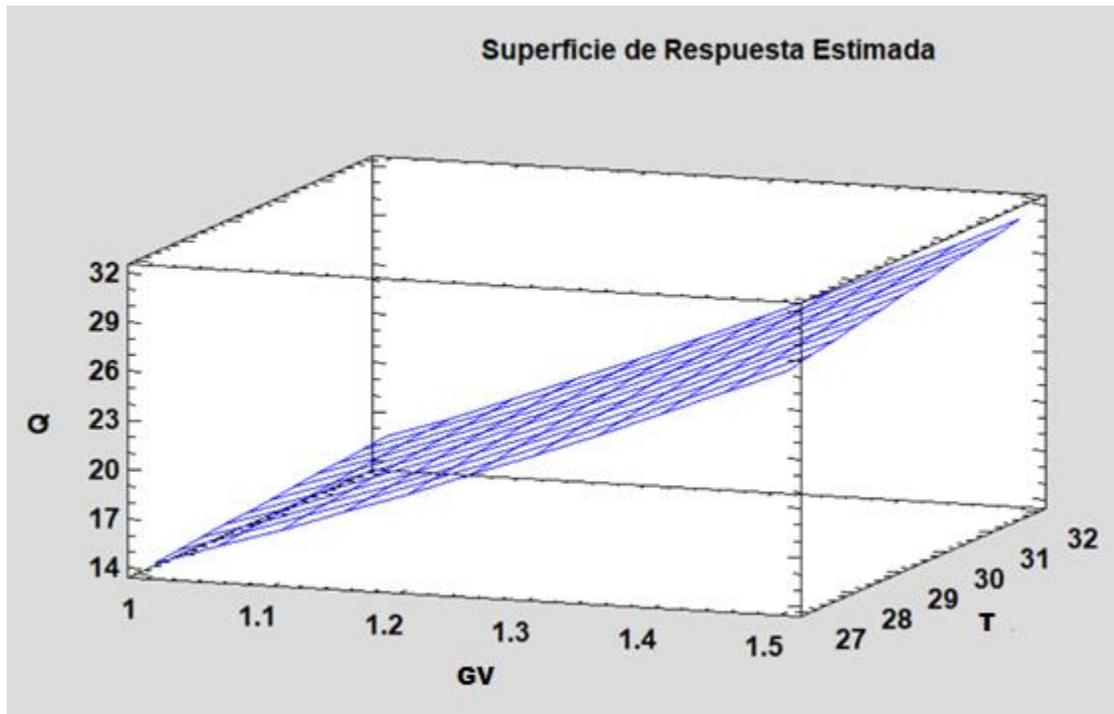
Nota. Se muestra la relación entre el giro de la válvula y lo equivalente a caudal de aire y tiempo que demora validado por Statgraphics.

En la Tabla 21 se muestra los resultados validados mediante el análisis comprendido en el software estadístico Statgraphics, en el que los caudales y tiempos son aproximados a los tomados en las pruebas experimentales. Lo que le da validez a la ecuación resultante de este trabajo.

A continuación, se encontrarán gráficos que simulan el comportamiento del sistema relacionando los diferentes factores que influyen en la práctica.

Figura 11

Superficie de respuesta



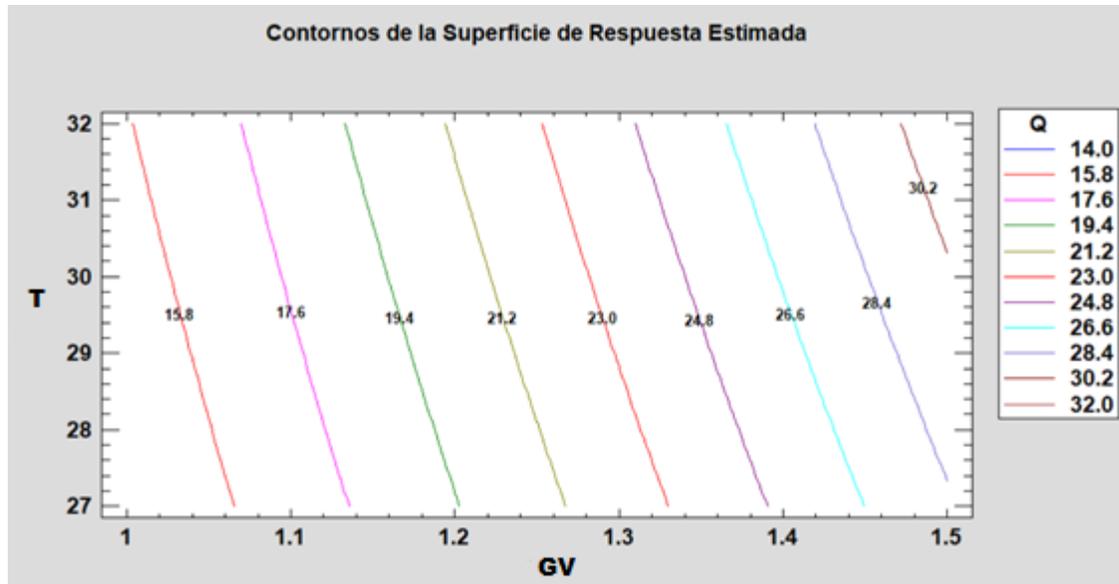
Nota. Superficie de respuesta relacionando Q , GV y T . Tomado de (Statgraphics, 2023)

En la Figura 11, se relacionan tres variables que afectan el proceso de fundición de manera significativa y, además, como muestra como es la relación de estos factores en el sistema. Las variables están dadas de la siguiente manera, caudal (Q), giro de válvula (GV) y temperatura ambiente (t).

- El comportamiento del caudal es directamente proporcional a la apertura de la válvula, entre más se abre la válvula, mayor será el caudal de aire que pasará a través de la tubería del sistema.
- La apertura de válvula se toma entre un 1 y 1.5, debido a que es el porcentaje de apertura óptimo para lo que se quiere lograr con este modelo, siendo el 20% a 30% respectivamente.
- La variable temperatura ambiente tiene influencia en el caudal de aire que se dispone para la práctica de fundición debido a que, cambios en la densidad del aire debido a que, si la temperatura del aire aumenta, su densidad disminuye. Esto afecta la capacidad del aire para viajar a través de la tubería. Un aire menos denso tiende a tener un caudal menor en comparación con el aire más denso a la misma presión. Por lo tanto, a temperaturas más altas, el caudal de aire puede disminuir debido a la menor densidad del aire.
- La temperatura ambiente puede modificar el caudal de aire en una tubería de metal debido a cambios en las propiedades físicas del aire y del material de la tubería.

Figura 12

Contorno de la superficie de respuesta



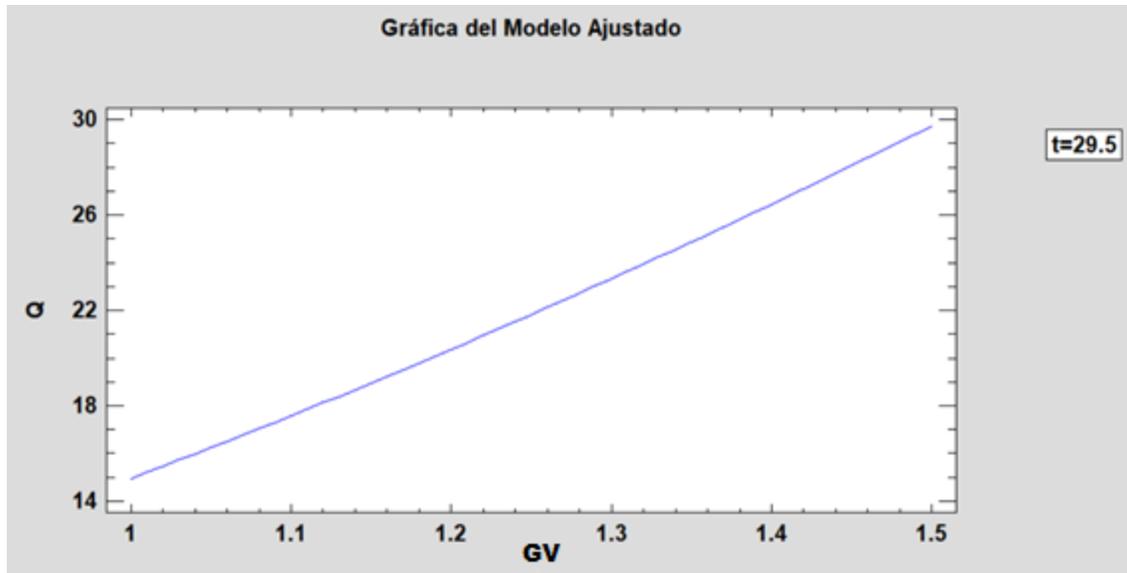
Nota. Contornos de la superficie de respuesta estimada.

Considerando la Figura 12, como referencia, se puede llevar a cabo una observación más detallada de la interacción entre la variable de la temperatura ambiente (t) y el giro de la válvula (GV). Este análisis se lleva a cabo con el propósito de obtener una estimación del caudal de aire que estaría disponible para el sistema de fundición destinado a la operación de la hornilla.

Este análisis no solo permitirá obtener una comprensión más profunda de la relación entre estas variables críticas, sino que también nos proporcionará una evaluación cuantitativa de la capacidad del sistema de fundición para adaptarse a las condiciones cambiantes de la temperatura ambiente.

Figura 13

Modelo ajustado



Nota. Modelo ajustado de la relación Caudal vs tiempo

En la Figura 13, tenemos el modelo ajustado de las pruebas experimentales enfocadas en la relación que tiene el giro de válvula con el caudal de aire, teniendo en cuenta una temperatura ambiente promedio de 29.5°C.

Se evidencia una relación directamente proporcional entre la variable caudal con el giro de la válvula que se tiene, ya que, a mayor giro de válvula, mayor caudal en el proceso de fundición de aluminio.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con relación al primer objetivo específico de este estudio, que consiste en diagnosticar y evaluar las actuales condiciones de operación del proceso de fundición de aluminio realizado en el laboratorio de fundición de la UPB Montería, se identificó desconocimiento en algunas variables del proceso. Esta falta de claridad ha generado importantes deficiencias y preguntas sin respuesta, lo que a su vez ha resultado en la obtención de resultados variables en cada prueba, dado que el proceso se lleva a cabo de manera empírica. Por lo tanto, es necesario abordar estas limitaciones para mejorar la eficiencia y la consistencia de las operaciones de fundición de aluminio en el laboratorio.

El segundo objetivo de este estudio consistió en la validación de las variables que ejercen un impacto significativo en el tiempo total necesario para calentar el metal durante el proceso de fundición. El cual, se dio a través de la ejecución de nueve pruebas experimentales, en las cuales se varió el caudal de aire que ingresaba a la cámara de combustión, donde se obtuvieron resultados coherentes con la tarea realizada por la hornilla. Los resultados revelaron una correlación clara, a un mayor caudal de aire, se redujo el tiempo requerido para que el aluminio alcance la temperatura de vertimiento, que en este caso se fijó en 740°C. No obstante, se debe tener en cuenta que factores ambientales, como la temperatura ambiente ejercen influencia sobre el proceso, llegando a modificar el caudal de aire debido a que menor temperatura ambiente, aire más denso. Estos resultados destacan la importancia de comprender las variables que inciden en el proceso de fundición para lograr una mayor

eficiencia y consistencia en las operaciones de este equipo, con el objetivo de garantizar que pruebas a futuro se realicen en el horario de clase establecido por la Universidad.

Finalmente, los resultados obtenidos en los dos objetivos específicos previos, se procedió a abordar el tercer objetivo, que se enfoca en el desarrollo de un modelo predictivo fundamentado en los datos derivados de las pruebas experimentales. A través de este proceso, se definieron los parámetros óptimos para el tiempo de calentamiento. Esto dio lugar a la construcción de un modelo de ecuaciones ajustadas, respaldado por un alto nivel de confiabilidad, que posibilita la predicción precisa del tiempo requerido para el proceso de fundición. Este modelo matemático proporciona a los docentes de la universidad una herramienta de inmenso valor para la gestión del tiempo en sus actividades académicas, incluyendo la planificación de clases y prácticas. Además, les brinda una sólida base para anticipar con certeza los resultados futuros en el ámbito de la fundición, optimizando así los recursos y la eficiencia.

Recomendaciones

1. La optimización del sistema de encendido del equipo se ha identificado como una necesidad primaria para modificar en la metodología de activación de la hornilla, debido a que es tediosa la manera actual de realizar. La complejidad y la falta de eficiencia del proceso de encendido han generado inconvenientes operativos y han aumentado los tiempos de inactividad del equipo, lo que a su vez impacta negativamente. La implementación de mejoras en este aspecto resultará en una mayor eficiencia, una reducción significativa de los tiempos de arranque y, en última instancia, una mejora sustancial en la eficacia de las operaciones del equipo.
2. La necesidad de realizar una estandarización de las variables operativas del horno y su posterior adaptación a las posibles variaciones dimensionales se presenta como un requisito técnico fundamental en aras de garantizar la consistencia y la calidad de los resultados del proceso. Es esencial llevar a cabo una revisión de la replicabilidad de estos resultados. La estandarización permitirá mitigar posibles desviaciones dimensionales que puedan surgir, asegurando una uniformidad en las condiciones de operación, mientras que la evaluación de la replicabilidad proporcionará una validación adicional de la precisión y consistencia de los resultados obtenidos, respaldando así la robustez del proceso.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Almanzar, C., & Ballén, D. (2017). *PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN PARA LA FUNDICIÓN DE LINGOTES DE ALUMINIO EN LA EMPRESA RECUPERADORA DE METALES RUBY C.*
- Álvarez, E., & Medina, I. (2011). *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ESTANDARIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE CONOS DE ACERÍAS DE LOS ANDES S.A.S.*
- American Foundry Society. (2022). *ESTADÍSTICAS DE LA INDUSTRIA*. American Foundry Society. <https://www.afsinc.org/industry-statistics>
- Chaudhari, A., & Vasudevan, H. (2022). Reliability based design optimization of casting process parameters using Markov chain model. *Materials Today: Proceedings*, 63, 602–606. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.189>
- Consuelo, L., Fernández, C., Melisa, L., & Díaz, S. (2015). Investigación y Desarrollo Volumen 15 N° 1 pp. In *Revista Ingeniería*.
- Florian, J., & Gil, J. (2016). *PROPUESTA DE MODELO DE ESTANDARIZACION DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS COMO BASE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD EN LA EMPRESA MECANIZAMOS F.M. S.A.S.*
- Granados, F., & Puentes, M. (2016). *SISTEMA DE GESTIÓN DE OPERACIONES EN EL ÁREA DE FUNDICIÓN DE LA SIDERÚRGICA METALMEC S.A.S.*

- Made-In-China. (2023). *inducción eléctrica*. Horno de Inducción Electromagnético.
https://es.made-in-china.com/co_jinlaiem/product_1-2kg-Gold-Induction-Furnace-Electric-Melting-Furnace-JL-15-_heohurssu.html
- Muratalla, H. (2022, February 3). *Guía / Las aleaciones de aluminio más usadas*. Ulbrinox.
<https://www.ulbrinox.com.mx/blog/guia-las-aleaciones-de-aluminio-mas-usadas>
- REFRATECHNIK. (2023). *Aplicaciones acero & hierro Conceptos para hornos de arco eléctrico*. Aplicaciones Acero & Hierro Conceptos Para Hornos de Arco Eléctrico.
<https://www.refra.com/es/Hornos-de-arco-electrico/>
- Silva, L. (2018). *Estudio del Proceso de Fundición de Aluminio por Gravedad para la Fabricación de Herrajes Eléctricos y Propuesta de Plan de Mejoramiento en Metallan*.
- Srinivasa, R., & Patil, R. (2017). Characterization of Casting and Deformation Process of a Metal Alloy. In *International Research Journal of Engineering and Technology*.
www.irjet.net
- Torres, A. (2018). *IDENTIFICACION DE LAS CAUSAS QUE OCASIONAN EL PROBLEMA DE POROSIDAD EN EL PROCESO DE FUNDICION DEL HIERRO GRIS Y PROPUESTA DE MEJORA PARA REDUCCIÓN DE INDICADOR POR ESTA CAUSA DE PNC EN INDUSTRIAS LAVCO LTDA*.
- Vicente, J., & Rodríguez, H. (2008). *PLAN DE NEGOCIO PARA LA EMPRESA FUNDICIONES JOVIHE CIUDAD BUCARAMANGA*.
- Villabon, W., Universidad, A., Francisco, D., De Caldas Especialización En, J., De Producción, I., & Logística, Y. (2016). *DISEÑO DE UNA NUEVA LÍNEA DE MOLDEO EN SISTEMA DE COLD BOX PARA LA PLANTA DE FUNDICIÓN DE FUNDICOM MOSQUERA*.

Ing. Jose Arturo / Wom Group. (s/f). Válvulas de Gas: qué son y recomendaciones de uso.

(Válvula)

7 ANEXOS

7.1 Encuesta – Profesor 1 (Docente de facultad de ingeniería mecánica)

En el contexto de obtener una comprensión completa y precisa del proceso de fundición, se ha diseñado esta encuesta con fines puramente informativos. La presente encuesta tiene como objetivo principal recopilar percepciones y opiniones relevantes sobre el proceso de fundición, que posteriormente serán utilizadas como insumo fundamental en la elaboración de un trabajo de grado: Caracterización de las condiciones del proceso de fundición en el laboratorio UPB seccional Montería. Su participación en esta encuesta contribuirá significativamente a la generación de conocimiento en este campo y ayudará a arrojar luz sobre diversos aspectos relacionados con dicho proceso. Agradecemos de antemano su colaboración en proporcionar información valiosa que enriquecerá la investigación en desarrollo. Preguntas dirigidas a encargado del taller de ingeniería mecánica y docente de la facultad.

1. ¿Qué material se funde en la hornilla y de dónde se obtuvo el material?

El material que se funde en la hornilla es aluminio. Este son los residuos obtenidos de los procesos de arranque de viruta de los cursos de manufactura del programa de ingeniería mecánica. También es obtenido de materiales reciclados como latas o piezas automotores.

2. ¿Cómo encienden la hornilla?

La hornilla se enciende generando una combustión entre el gas propano y el aire que se obtiene desde un ventilador centrífugo. Se le agrega un papel con fuego para generar esta combustión. El horno tiene un orificio por donde debe introducirse este papel con fuego. El orden en que debe encenderse es primero el aire, y en paralelo la entrada de gas y la chispa.

3. ¿Cuántas vueltas de gas se necesitan para que se dé proceso?

$\frac{1}{4}$ de vuelta

4. ¿Cuántas vueltas de aire se necesitan para hacer que la llama este estable?

Esto es variable, puede ser 1 vuelta o $1 - \frac{1}{2}$ de vuelta. El indicativo que se tiene es que se genere la combustión y que la flama no salga al ambiente.

5. ¿A qué temperatura vierten el material fundido?

Para la ejecución de los laboratorios no se tiene un equipo para esta medición. La relación que se maneja es que al notarse líquido el aluminio en el crisol se deja de 20 a 30 minutos más para el vertimiento. En algunos casos el indicativo era el fondo rojo, en ese momento se sabía que ya era el momento de verte, ya que se estaba sobrecalentando el material.

6. ¿Cómo es el proceso en general de fundición? Responda esta pregunta teniendo en cuenta condiciones del proceso, condiciones ambientales e implementos de seguridad.

El proceso de fundición por lo general se lleva a cabo en horas de la mañana. Se debe garantizar que no exista probabilidad de lluvia. Es llevado a cabo a la intemperie y en un sitio de tráfico de personal casi nulo.

Como se dijo antes es un horno que funciona generando la combustión de gas propano y aire. Primero se verifica que el aire si recorra toda la cavidad del horno. Esto con una apertura de 1 vuelta a 1 - ½ vuelta. Posteriormente, en simultáneo se realiza apertura de gas y entrada de fuego al horno. La entrada de gas se ajusta a que este no sea expulsado por el aire y se realice la quema de gas encima del crisol. Se debe garantizar que la combustión sea interna. Esto se realiza tantas veces como aplique. Luego se hace la adición de material poco a poco (dependiendo la forma y tamaños que ocupen el espacio del crisol). Por lo general, se toma la capacidad de crisol completo de aluminio que es aproximadamente 1.225 Kg de aluminio. Este se va añadiendo poco a poco con pinzas metálicas. Se espera que el material se vea líquido. Esto puede durar aproximadamente 30 minutos, todo depende de la mezcla gas – aire. En todo momento se realizan mediciones de temperatura con pistola láser hasta los 620°C que es la capacidad. Después por medio de observación se verifica el estado del metal en el crisol. En todo momento, las verificaciones se realizan con los EPP, esto es polainas, mangas, peto, careta de fundición, botas de seguridad y guantes de carnaza. Siempre se tiene un extintor cerca.

Cuando el material se encuentra líquido, se procede al vertimiento. El horno es basculante así que se gira y se llena el molde que por lo general es un tubo acero ASTM A-53 SCH 40 (los diámetros del tubo varían entre 1'' a 1 - ½''). Luego se procede al enfriamiento y desmolde.

7.2 Encuesta – Mecánico (Encargado del taller de la facultad de ingeniería mecánica)

En el contexto de obtener una comprensión completa y precisa del proceso de fundición, se ha diseñado esta encuesta con fines puramente informativos. La presente encuesta tiene como objetivo principal recopilar percepciones y opiniones relevantes sobre el proceso de fundición, que posteriormente serán utilizadas como insumo fundamental en la elaboración de un trabajo de grado: Caracterización de las condiciones del proceso de fundición en el laboratorio UPB seccional Montería. Su participación en esta encuesta contribuirá significativamente a la generación de conocimiento en este campo y ayudará a arrojar luz sobre diversos aspectos relacionados con dicho proceso. Agradecemos de antemano su colaboración en proporcionar información valiosa que enriquecerá la investigación en desarrollo. Preguntas dirigidas a encargado del taller de ingeniería mecánica y docente de la facultad.

1. ¿Qué material se funde en la hornilla y de dónde se obtuvo el material?

El material que se funde es aluminio, se obtiene de reciclaje de objetos ya dado de baja y de viruta del torno.

2. ¿Cómo encienden la hornilla?

La hornilla se enciende por medio de un flujo de aire y otros de gas propano, estos dos flujos se someten a una implosión por medio de una llama y por medio de la vista y sonido se abre o cierra las válvulas para obtener un equilibrio de la llama para poder fundir.

3. ¿Cuántas vueltas de gas se necesitan para que se dé proceso?

El equipo se enciende con método de prueba error, ya que no se sabe con certeza cuántas vueltas de aire y de gas para poder encender el equipo.

4. ¿Cuántas vueltas de aire se necesitan para hacer que la llama este estable?

Se abre el aire y el gas en proporciones, pero no sé sabe cuánto en si se pueden abrir ambas para lograr esa estabilidad de la llama se hace a prueba error.

5. ¿A qué temperatura vierten el material fundido?

Después de prender y lograr una estabilidad se espera un aproximado de 50 minutos, se le saca residuos y se deja otros 20 mimitos para verter el material fundido en el molde.

6. ¿Cómo es el proceso en general de fundición? Responda esta pregunta teniendo en cuenta condiciones del proceso, condiciones ambientales e implementos de seguridad.

El proceso es complejo, ya que al no tener algo estandarizado se hace a prueba y error, es complicado el manejo de las válvulas para cuadrar los flujos de aire y de gas para lograr una estabilidad y así poder fundir el metal en el tiempo establecido que es de una hora a dos horas.

7.3 Encuesta – Profesor 2 (Docente de facultad de ingeniería industrial)

En el contexto de obtener una comprensión completa y precisa del proceso de fundición, se ha diseñado esta encuesta con fines puramente informativos. La presente encuesta tiene como objetivo principal recopilar percepciones y opiniones relevantes sobre el proceso de fundición, que posteriormente serán utilizadas como insumo fundamental en la elaboración de un trabajo de grado: Caracterización de las condiciones del proceso de fundición en el laboratorio UPB seccional Montería. Su participación en esta encuesta contribuirá significativamente a la generación de conocimiento en este campo y ayudará a arrojar luz sobre diversos aspectos relacionados con dicho proceso. Agradecemos de antemano su colaboración en proporcionar información valiosa que enriquecerá la investigación en desarrollo. Preguntas dirigidas a encargado del taller de ingeniería mecánica y docente de la facultad.

1. ¿Qué material se funde en la hornilla y de dónde se obtuvo el material?

Los materiales que comúnmente se funden en la hornilla es el aluminio. Este material se obtiene al inicio de cada periodo como compra de consumibles que están plasmados en el presupuesto de operación del laboratorio.

2. ¿Cómo encienden la hornilla?

Se utiliza una combinación entre oxígeno (ventilador), calor (fuego) y combustible (gas).

3. ¿Cuántas vueltas de gas se necesitan para que se dé proceso?

Ignoro las vueltas que se necesiten para el proceso de encendido.

4. ¿Cuántas vueltas de aire se necesitan para hacer que la llama este estable?

Ignoro las vueltas que se necesiten para el proceso de encendido.

5. ¿A qué temperatura vierten el material fundido?

Dependiendo del material, una temperatura superior a los 500°C.

6. ¿Cómo es el proceso en general de fundición? Responda esta pregunta teniendo en cuenta condiciones del proceso, condiciones ambientales e implementos de seguridad

Inicialmente se debe definir modelo que se requiere fundir. Luego armar el molde con los insumos necesarios. Mientras esto sucede, se debe realizar el proceso de encendido y fundición del material. Cuando se alcance la temperatura requerida, se hace vaciado. Esperar

tiempo adecuado de solidificación, se extraer la pieza y se termina con el proceso de mecanizado y/o remoción de material.

En cuanto a al lugar destinado para la fundición, no está apto para realizar este proceso. Se cuenta con todos los EPP y herramientas técnicas de metrología como pirómetro, calibrador entre otros.