



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

Dr. “ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA- QUÍMICA

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

**Determinación de la resistencia MOR de los moldes
cerámicos a través del ensayo de flexión variando el
tiempo de secado y número de capas.**

AUTOR: Dayron Guerra Rivas**Firma:** _____

TUTOR: Ms.C Yunior Correa Cala**Firma:** _____

TUTOR:Ms.C José I. Gonzales Santana**Firma:** _____

Moa, 2017

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor de este trabajo y autorizo al Departamento de Metalurgia- Química y al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" para que hagan el uso que estimen pertinente con el mismo.

Para que así conste firmo la presente a los días del mes de del ____ .

Firma del Autor

Dayron Guerra Rivas

Firma del Tutor

Yunior Correa Cala

PENSAMIENTO

Si uno ha elegido la carrera en la que más puede hacer por el bien de la humanidad nunca se doblegará bajo las cargas del oficio.

Carlos Marx

Dedicatoria

A...

*En especial a mis padres máximos inspiradores en
mi formación, a toda mi familia,
a mi novia, a mis verdaderos amigos y a Dios,
por todos ellos tengo el valor de abrir los ojos cada
día y
prometerme ser mejor.*

Agradecimientos

Agradezco sinceramente y de todo corazón:

A: Mis padres

Por estar conmigo en todo mi transcurso estudiantil, a mi familia por apoyarme en todo momento, a mi novia y su familia, a mis compañeros de cuarto Amable, Alejandro y Ramón que vivieron de cerca todas mis vicisitudes, al colectivo de profesores de mi carrera y mis compañeros de aula en especial a mi mejor amiga Aylén.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito determinar la resistencia MOR de los moldes cerámicos a través del ensayo de flexión variando el tiempo de secado y número de capas, ya que la empresa TECAL s.a obtiene los materiales para la construcción de moldes correspondientes a la microfusión de forma importada a muy altos precios. Para ellos se calculó la resistencia MOR a varias probetas con diferentes combinaciones de capas y tiempos de secado, con el propósito de encontrar una similitud de resistencia MOR con la tecnología existente para proponer una nueva tecnología basada en ahorros económicos y materiales.

Abstract

The present work has as purpose to determine the resistance MOR of the ceramic molds through the flexion test varying the time of drying and number of layers, since the company TECAL s.a obtains the materials for the construction of molds corresponding to the form microfusión cared to very high prices. For them the resistance MOR was calculated to several test tubes with different combinations of layers and times of drying, with the purpose of finding a resistance similarity MOR with the existent technology for proposing a new technology based on economic savings and materials.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Fundamentos del Proceso de Fundición a la Cera Perdida.	4
1.2. Ventajas del proceso de microfusión o cera fundida	6
1.3. Etapas o pasos tecnológicos del proceso de fundición a la cera perdida.....	7
1.3.1. Moldes para el proceso de microfusión	8
1.3.2. Modelos de cera.....	9
1.3.3. Inyección de la cera	10
1.4. Principales materiales empleados para la obtención de los moldes cerámicos. Aglutinantes y Arenas	11
1.4.1. Características de los moldes cerámicos	12
1.4.2. Componentes del molde.....	13
1.4.3. Características y propiedades de las arenas o harinas	15
1.5. Principales métodos de control de calidad de la suspensión y las cáscaras cerámicas.....	16
1.6. Métodos existentes para el control de la calidad de cascarillas	17
1.6.1. Control del peso de la cáscara del molde.....	17
1.6.2. Control visual.....	17
1.6.3. Control de la permeabilidad.....	17
1.6.4. Control de la resistencia MOR.....	17
1.7. Proceso tecnológico de obtención del recubrimiento cerámico	18
1.8. Trabajos precedentes.....	21
CONCLUSIONES CAPITULO I.	22
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1. Materiales empleados en la fabricación de las probetas.	23
2.2. Equipamientos utilizados para la fabricación de las probetas	26
2.3. Planificación Experimental	35
2.3.1. Selección de los niveles de las variables	36

2.4. Cálculo de la resistencia MOR	42
CAPITULO 3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	45
3.1. Análisis del ensayo de flexión	45
3.2. Fuerza ejercida para lograr las fracturas de las probetas.....	48
3.3. Resultados del cálculo de resistencia MOR	52
3.4. Comparación entre la tecnología propuesta y la tecnología que se utiliza en la empresa.	56
3.5. Estudio económico entre la tecnología propuesta y la tecnología actualmente utilizada en TECAL s.a	58
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	65

INTRODUCCIÓN

La obtención de piezas por fundición es una de las actividades laborales más antiguas del hombre, en sus inicios el proceso para la obtención de formas metálicas, fue concebido tallando los moldes sobre piedras blandas. El dominio de esta técnica así como el perfeccionamiento y desarrollo de nuevos metales y aleaciones, es parte indispensable del desarrollo histórico de la humanidad.

Los primeros contactos del hombre con metales en estado natural como fueron el oro, la plata y el cobre, se estima que ocurrió de 7 000 a 4 000 años a.n.e. En su afán de desarrollo por lograr nuevas técnicas, su verdadera labor como fundidor se inicia cuando fue capaz de fundir cobre a partir del mineral. Cuatro siglos antes de nuestra era ya el hombre conocía y procesaba el bronce al estaño, o sea, había aleado el cobre, obteniendo un producto con mejores propiedades de fundición, de donde fabricó sus herramientas, sus armas y sus obras de arte.

Evolucionaron también junto a los metales, los métodos de fundición y los materiales de moldeo. Los métodos de fundición con el decursar de los años, han sido una preocupación para los productores de piezas fundidas. La aplicación de la fundición por cera perdida o microfusión ha tomado fuerza en los últimos 50 años con el fin de perfeccionar el proceso de fundición y lograr así mayor calidad en sus producciones.

Las ventajas de este método de fundición son apreciables, sobre todo si se compara con el método en moldes de arenas ya que la microfusión garantiza un mejor acabado de las piezas a conformar y una mejor exactitud en las piezas con mayor complejidad en sus estructuras. Las principales diferencias entre estos métodos de fundición consiste en sus métodos de moldeo ya que la microfusión parte de un modelo de la pieza en cera la cual se va recubriendo con diferentes capas refractarias con tiempo determinado de secado entre cada capa, mientras el

otro método consiste en la impresión de los modelos de las piezas en cofres de arena refractaria dejando así una cavidad similar a la pieza a obtener.

Los moldes de microfusión se confeccionan mayormente con arenas de circonio, arenas de sílice y aglutinantes refractarios compuestos por sílice coloidal , agua y pequeños % de estas mismas arenas. La principal desventaja de este proceso se encuentra en que las materias primas necesarias para la conformación de los moldes son un poco costosa para nuestro país, principalmente las arenas de circonio y los aglutinantes a base de sílice coloidal.

La empresa mixta Cuba – Venezuela TECAL sa (Tecnologías Alternativas sociedad anónima), situada en el km 8 de la circunvalación norte de la ciudad de Camagüey, provincia Camagüey, fue concebida para la elaboración de piezas de gran complejidad en sus estructuras y gran complejidad en los materiales que las conforman, enclavada en esta empresa se encuentra la Unidad Básica Estatal de Fundición por Cera Perdida, esta cuenta con los equipos necesarios para la conformación de piezas con este método de fundición.

Para la conformación de los moldes de microfusión esta empresa utiliza una tecnología de 7 capas de recubrimiento cerámico y 2 capas de secado entre cada capa de secado, a raíz de esto se hace necesario la comprobación de las resistencia MOR de diferentes tecnologías variando el número de capas y el tiempo de secado, para lograr una disminución en algunas de las variables antes mencionadas y así ahorrar los materiales utilizados en dicha conformación.

Por lo antes expuesto se plantea como problema de la investigación:

Problema:

Necesidad de disminuir el consumo de las materias primas para la confección demoldes cerámicos por su alto costo en el mercado internacional.

Objeto de investigación:

Moldes cerámicos para microfusión de la empresa TECAL s.a.

Campo de acción:

Moldes utilizados para microfusión.

Hipótesis:

Si se determina la resistencia MOR de los moldes cerámicos a través del ensayo de flexión variando el tiempo de secado y el número de capas, se podrá modificar la tecnología reciente y entonces se podrá disminuir el consumo de las materias primas para la confección de moldes cerámicos.

Objetivo general:

Determinar la resistencia MOR de los moldes cerámicos a través del ensayo de flexión variando el tiempo de secado y número de capas.

Objetivos específicos:

1. Calcular las variables independientes para determinar la resistencia MOR.
2. Proponer una tecnología para la construcción de los moldes cerámicos en la empresa TECAL s.a.

CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se abordan los aspectos que sustentan el marco teórico de la investigación, en el mismo se utiliza el método de análisis y síntesis en el procesamiento de la información obtenida, así como el método histórico-lógico. Esto fue posible realizarlo a partir de una extensa y actualizada revisión de la literatura sobre las temáticas abordadas en la investigación. Luego de correlacionar los diferentes aspectos abordados, se exponen las conclusiones parciales del mismo.

1.1 Fundamentos del Proceso de Fundición a la Cera Perdida.

El moldeo por cera perdida o microfusión es un procedimiento escultórico de tradición muy antigua que sirve para obtener figuras o piezas de metal por medio de un molde que se elabora a partir de un prototipo tradicionalmente modelado en cera de abeja (Valencia, 2006).

El proceso llamado fundición a la cera perdida para la fabricación de piezas, tiene una antigüedad de miles de años. En su esencia básica, el proceso consiste en la fabricación de un modelo de cera u otro material fusible, luego se construye un molde alrededor de él, entonces se funde la cera dejando una cavidad que es una réplica exacta del modelo original (Solórzano, 2013).

El proceso de fundición por cera perdida (FCP) frente a los demás métodos de fundición, posibilita piezas de formas muy complicadas. Generalmente tampoco es necesario disponer hoyos para la obtención de aberturas o cavidades. El proceso se viene utilizando desde hace tiempo para obtener reproducciones fundidas de pequeños seres vivientes o plantas, como objetos de adorno, por esta razón se han podido realizar diferentes esculturas como un gorrión, este fue recubierto con material cerámico, luego quemada y después en el espacio hueco fue vertido el bronce fundido. Es digna de señalar la fidelidad en la reproducción de los detalles,

pero además se divisa la dificultad de realizar piezas de espesores delgados, llegando a ser inclusive macizas (Solórzano, 2013).

Las piezas más antiguas que se conocen fundidas por este método provienen del Asia Menor y tienen unos 4000 años. Este método fue utilizado en Egipto y en China unos 1500 años más tarde. También en Perú y Ecuador han sido desarrolladas piezas de esta índole. Es así que fueron fundidas en aluminio, recipientes, utensilios, piezas de adorno, estatuillas, entre otros. Las piezas, en parte, con paredes muy delgadas y gran riqueza ornamental (Valencia G, 2006).

Según (Robert E, 1979), la microfusión es un método para fabricar formas metálicas complejas al crear un molde de cerámica, con el cual se pueden crear ciertas piezas metálicas. Los minerales fundidos son una materia esencial usada en el proceso de construcción de moldes de cerámica. El molde de cerámica se construye con una variedad de materiales fundidos para permitir que resista la exposición a temperaturas muy altas por el proceso de caldeo y colada. Luego que se desprende el molde de cerámica, la pieza metálica se revela y en muchas ocasiones se necesita pulir o acabar con un material abrasivo. Muchas piezas metálicas o de aleación se fabrican con la fundición a cera perdida. En el proceso de reproducción se conjugan dos factores muy importantes, una técnica depurada con el paso de los años, y una elaboración artesanal, que dan a cada pieza un trato individualizado. Se utiliza el método por su probada fiabilidad a la hora de reproducir cualquier superficie. La calidad del metal una vez terminado es la copia exacta de la obra que salió de manos del artista, cumpliendo por lo tanto con las máximas exigencias.

(Robert, 1979), menciona todo el proceso a la cera perdida, se desarrolla teniendo en cuenta dos factores:

- Factor técnico: los materiales y medios han evolucionado hasta una mayor calidad a través del tiempo.

- Factor artesanal: aquí siempre el proceso sigue un trato de artesanía exclusiva para cada pieza.

El método de microfusión es, sin duda, el más utilizado para la creación de grandes y pequeñas obras de metal, dado su gran fiabilidad para copiar cualquier superficie y así poder conseguir la mejor copia del original.

En cuanto a la cera, podemos decir que, está esencialmente destinada a constituir el delgado espacio que el metal ocupará a continuación, sustituyendo a la cera. Esta va a perderse en cada tirada, de ahí viene el nombre de este sistema. Además la cera pérdida o microfusión se denomina al más antiguo estilo de fundición de los metales. Actualmente mediante avances tecnológicos se le ha transformado en el más moderno y versátil proceso. Los distintos métodos de moldeo pueden variar para crear piezas únicas o producción masiva, por esta razón la microfusión fue la solución para muchas piezas complejas con superficies planas, dimensiones precisas y pequeños detalles, que combinan con los conocimientos de la industria.

1.2 Ventajas del proceso de microfusión o cera fundida

Trabajar con este método ofrece varias ventajas con respecto a otras formas de fundición a continuación se muestran algunas de ellas:

1. Se adapta principalmente a la producción de formas extremadamente compleja por lo tanto, ofrece la máxima libertad en el diseño y configuración de las piezas.
2. Permita reproducir los más finos detalles de las piezas quedando las superficies lisas y uniformes.
3. Mediante estos procesos se pueden controlar estrictamente las propiedades metalúrgicas de las aleaciones obtenidas tales como; tamaño y orientación de los granos, solidificación direccional, control de la segregación y del contenido de inclusiones, eliminar las micro cavidades, etc., lo cual resulta en un estrecho control de las propiedades mecánicas.

4. Excelente precisión dimensional, lo cual minimiza el mecanizado, y en algunos casos lo elimina; lo cual lo hace adaptable para la fabricación de matrices y para la producción de aleaciones de difícil maquinado.

Los procesos de microfusión producen los mejores resultados en cuanto a propiedades mecánicas se refiere, cuando se utilizan sistemas de fundición que incluyen Hornos de Inducción, por las siguientes razones metalúrgicas.

1. Se reduce considerablemente la cantidad de gases disueltos.
2. Se obtienen aleaciones de adecuada pureza al ser eliminadas las impurezas (Pb, Bi, Sn, y Zn) por volatilización.
3. En el proceso de afino, puede utilizarse el bióxido de carbono (CO_2), eliminando así la práctica convencional de utilizar escorias para la refinación del metal, con lo cual se consigue disminuir considerablemente el contenido de inclusiones en las piezas.

1.3 Etapas o pasos tecnológicos del proceso de fundición a la cera perdida.

A continuación se muestran los pasos para la obtención de una pieza por microfusión:

- Inyección de cera para obtener los modelos: la presión de inyección se debe mantener algunos segundos de acuerdo al tamaño del modelo con el propósito de compensar la contracción de la cera. Extraídos los modelos de la matriz, se desbarban si es necesario.
- Se arman los racimos (o esqueletos de modelos de cera).
- Se aplica revestimiento refractario; de finura de orden de 200 a 325 mesh (grano fino); lo cual se logra por 2 o 3 inmersiones de los racimos en la pasta refractaria.
- Sobre el recubrimiento cerámico se espolvorea arena de finura del orden de los 100 mesh; lo cual proporciona una adecuada unión con el relleno posterior.

- Encamisado y relleno con arena de moldeo gruesa, provista de aglomerante. El propósito de este relleno es proporcionar estabilidad en la forma de la capa interna de grano fino, al derretir cera y al efectuar la colada del metal.
- Los arbolitos se llevan a una autoclave donde se funde y se escurre la cera.
- Los arbolitos pasan por un horno calcinador de estera donde se cocinan para una mejor resistencia.
- Se vierte el metal en la cavidad del molde, lo que sigue el enfriamiento, desmoldado y limpieza con acabado en caso que sea necesario.

1.3.1 Moldes para el proceso de microfusión

Según (Soh, 2009), la cera se inyecta en la matriz para obtener la forma requerida del producto final, la precisión, los aspectos dimensionales como la rugosidad de la superficie y la expansión térmica de la matriz son los factores significativos que influyen en esta etapa de la microfusión. Por lo tanto el molde es un aspecto importante en la producción de una fundición de precisión, es habitual que el operador utilice matrices de metal para producir patrones de cera cuando se requieren un gran número componentes o producción en masa.

Un molde es muy costoso de producir, los fabricantes de moldes siempre han querido producir una matriz de alta precisión, con pocas tolerancias y tan cerca a la exactitud que requiere la pieza final. El material de la matriz debe ser elegido cuidadosamente en función del coeficiente de dilatación térmica, ya que un error de elección sumara tiempo de entrega considerable en el proceso si se da el caso que el fabricante tenga que volver a trabajar el dado si la herramienta falla.

Existen varios materiales que son adecuados para la producción de moldes, tales como metales, aleaciones y polímeros, como el caucho vulcanizado. Los metales son de mayores conductores de calor que los polímeros y por lo tanto son capaces de producir patrones de cera con más alta calidad, mientras tanto, las matrices de

acero son las más satisfactorias para largos mecanizados y asegura el más alto nivel de precisión.

Hay varios procesos que pueden utilizarse para fabricar moldes tales como forja, fundición y mecanizado. La selección de procesos para la fabricación de moldes depende de la complejidad estructural y la forma de la matriz por razones económicas, los moldes son a menudo tratados térmicamente para obtener la resistencia e integridad necesaria.

1.3.2 Modelos de cera

El patrón para el moldeo se hace inyectando el material del patrón en moldes de la forma deseada. La cera es el material patrón más utilizado en el proceso de microfundición, para lograr su mejor calidad la cera debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Menor dilatación térmica posible.
- Su punto de fusión no debe ser mucho mayor que la temperatura ambiente.
- Rápida solidificación.
- Buena resistencia a la rotura.
- Superficie lisa y notable.
- Baja viscosidad.
- Bajo contenido de cenizas.

Las ceras de patrón consisten comúnmente en los siguientes componentes:

- Ceras de petróleo.
- Ceras naturales.
- Resinas naturales.
- Rellenantes orgánicos.

Las ceras de petróleo, como la parafina, se utilizan comúnmente debido a su bajo precio en comparación con otras materias primas.

Las ceras naturales más comunes son, cera de bayberry, cera de candelilla y la cera de carnauba, las mismas son derivados de plantas, hortalizas, árboles y hojas. Otras ceras naturales son la cera de abejas, cera de laca y cera de lanaolin, estas derivadas de animales. Las ceras naturales afectan el acabado superficial, la dureza y las propiedades de la mezcla de cera para los patrones.

Se usan resinas tales como naturales y sintéticas para mejorar el cuerpo y la fuerza de cera de patrón. Algunos factores que están influenciados por las resinas son las características de contracción y solidificación de la cera de molde, además de la pegajosidad y su rigidez. Las resinas naturales se derivan de fuentes como pinos, petróleo crudo y alquitrán de hulla, mientras que las sintéticas se elaboran por la esterificación de componentes orgánicos.

Los rellenos orgánicos se utilizan como alternativa para mejorar las características de la cera del modelo. Unos de los más conocidos es el del uso de la soya, ya que tiene características como bajo contenido de cenizas y alta proteína, influyendo en la fluidez, reduciendo la rugosidad superficial y mejora los resultados de expansión térmica.

1.3.3 Inyección de la cera

La manipulación de cera puede afectar en gran medida la etapa de inyección, así como la calidad del patrón de cera. La preparación comienza con la fusión de la cera ya que la misma se almacena típicamente como forma sólida cuando no está en uso, la temperatura común utilizada para fundir la cera son de unos 80 a 90 °C.

El sobrecalentamiento de la cera puede oxidar algunas de las materias primas y puede hacer que la cera se vuelva quebradiza o gomosa, el acondicionamiento de la cera es también un aspecto importante, ya que su mal tratamiento afectará la conformación del modelo en términos de precisión dimensional y suavidad superficial, el porcentaje de contracción de la cera aumentará sicausa inexactitud dimensional.

Algunos de los factores importantes que afectan la cantidad de la contracción dimensional son: temperatura de inyección y tiempo de ciclo, flujo de inyección, viscosidad y presión.

La mayoría de las ceras se inyectan por debajo de su punto de fusión, las temperaturas de inyección oscila entre 43 y 77 °C, de esta manera la cera esta de forma pastosa y esto asegurar su expansión durante la inyección y el consumo de energía puede minimizarse. Para la cera de forma pastosa, la presión de inyección debe ser alta para asegurar el menor tiempo de permanencia y menos cavitación en la sección de pesada.

La inyección de la cera también se puede hacer en forma líquida, sin embargo, esto requiere el control de la velocidad de su inyección para el relleno ideal del molde. Las desventajas de la cera en forma líquida es que puede tener una expansión térmica más alta que la forma semisólida o pastosa y las ceras líquida son propensas a las inclusiones de aire y la turbulencia durante la inyección.

1.4 Principales materiales empleados para la obtención de los moldes cerámicos. Aglutinantes y Arenas

Suspensión refractaria

Después que de que la cera de patrón haya sido expulsada del molde, se recubre con diferentes materiales refractarios. Los materiales de recubrimiento se dividen en lechada y estuco. La suspensión se compone además de un aglutinante refractario y de un material de relleno refractario.

El aglutinante y el relleno juegan un papel importante para la obtención de la fuerza y la resistencia del molde cerámico, el recubrimiento se realiza mezclando el aglutinante refractario y el relleno midiendo hasta obtener la viscosidad el pH requerido, luego el patrón se sumerge en el recipiente que contiene la suspensión durante algún tiempo, esta duración es necesaria para permitir que la suspensión excesiva gotee para luego recibir las siguientes capas.

Cada revestimiento o capa cerámica requiere una duración de gelificación, dependiendo del tipo de material refractario usado, esto es importante para controlar la eliminación de la humedad.

La primera capa de suspensión sobre el patrón se denomina revestimiento primario, este recubrimiento requiere generalmente materiales de rellenos más finos para obtener un buen acabado superficial. Los recubrimientos segundos o sucesivos se denominan recubrimientos secundarios o de respaldo, estos con unos mayores tamaños de partículas para dar fuerza a la estructura que luego soportara las altas temperaturas del descerado y el peso de metal fundido.

Estuco

Cada capa de lechada esta estucada con partículas refractarias más gruesas. El objetivo del estuco consiste en minimizar las tensiones de secado en los revestimientos presentando una serie de tensiones, también tiene como propósito presentar una superficie rugosa, facilitando un enlace mecánico entre el recubrimiento primario y el secundario, el tamaño de la partícula se incrementa a medida que más capas son añadidas con el objetivo de mantener la permeabilidad del molde y para proporcionar resistencia a granel al mismo.

1.4.1 Características de los moldes cerámicos

Según (Lozano, 2011) para la elaboración de los moldes de cascarilla cerámica se debe tener muy en cuenta sus características, las mismas son determinantes para la elección de los métodos de trabajo, así como los materiales que lo componen.

Características del molde cerámico

El molde cerámico debe cumplir:

- Propiedades específicas respecto al metal que se utiliza.
- Resistencia a elevadas temperaturas.
- Variedad de material en su composición.

Para ello debe tener:

- Naturaleza refractaria, para permanecer estable a las elevadas temperaturas del horneado y el metal fundido.
- Aglutinante en su composición que ligue las partículas y forme paredes firmes.
- Porosidad.
- Permeabilidad que posibilite la evacuación del conjunto de gases, y no se formen defectos en la pieza.
- Compatibilidad y adherencia entre los materiales del modelo y molde. En el caso de modelos de cera, es un material graso y los moldes generalmente acuosos, por lo que se debe aplicar una capa de goma-laca, jabón o alcohol de quemar, para que el material del modelo y el molde sean compatibles y evitar que se produzcan burbujas que dañarían el aspecto de la obra.

1.4.2 Componentes del molde

Para la conformación del molde es necesario contar con diferentes grupos de materia prima, a continuación se hace cita a estos materiales:

- Refractario.
- Aglutinante.
- Otros componentes.

El refractario: deriva directamente de un material tan antiguo como la cerámica (cerámica cocida), las arcillas proceden de la descomposición de diferentes minerales sílico-aluminosos de la naturaleza; feldespato, micas y caolín.

El refractario que se usa para los baños cerámicos proviene directamente de las arcillas puras dentro de los cuales se encuentran:

- Los caolines.
- Arcillas refractarias.

Ambas sometidas a una temperatura de 1600 °C no presentan indicios de fusión.

Las arcillas presentan unas características principales que justifican su uso como refractarios.

- Plasticidad: mediante la adición de agua la arcilla puede adquirir la forma necesaria.
- Hidratación: el agua produce un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.
- Tixotropía: se caracteriza por la pérdida de resistencia al amasarlo y su posterior recuperación de cohesión con el tiempo necesario.
- Contracción: al secarse las moléculas de agua que las constituyen, los materiales reducen su volumen pudiéndose producir resquebrajamientos.

El aglutinante: material aglutinante inorgánico que confiere cohesión y plasticidad a la mezcla y se hace posible la unión de los granos de los materiales refractarios. Este es imprescindible para conformar el molde y que este mantenga su forma durante la cocción y colada, tienen como componente fundamental el dióxido de silicio (sílice) y son coloides.

El aglutinante debe ser compatible con el refractario y complementarlos en características propias, para ello debe tener:

- Elevada porosidad para evacuar gases de metal en el momento de colada.
- Mayor índice de refractariedad.
- Imprime dureza al refractario: todas las arcillas son por naturaleza plásticas, pero la dureza del molde de cáscara se justifica por las sustancias coloidales que contiene.

Otros componentes del molde

Grafito: se encuentra dentro del grupo de los refractarios sólidos. Las características más importantes que aportan al molde son:

- Refractariedad.
- Capacidad desoxidante al contacto del metal con el molde.

Reblandece la cáscara lo que facilita el descascarillado y lo hace recomendable para utilizar en las primeras capas sobre todo de piezas que exijan gran calidad superficial y su sección sea compleja o con espacios de difícil acceso.

Talco: se aplica también con la función de facilitar el descascarillado, pero no es desoxidante, se suele utilizar en las primeras capas, dada su finura que lo hace apropiado para buena capacidad de registro superficial.

1.4.3 Características y propiedades de las arenas o harinas

Características necesarias de las arenas que conforman las capas del molde.

Los refractarios más utilizados en fundición a la cascarilla cerámica se pueden agrupar en dos tipologías: los refractarios silícicos, y los sílico-aluminosos. Todos ellos se utilizan en la preparación de la papilla o en los rebozados con grano. Existen también otros refractarios utilizados con menor densidad o frecuencia, como son los aluminosos, el grafito o el talco.

En el caso de la fundición de precisión se utilizan como refractario de capas dos grupos, las harinas para las capas primarias y las arenas para las capas de refuerzos.

Harinas:

- Granulometría de 1 a 5 micrones.
- Alta refractariedad.
- Alta conductividad térmica.
- Alta resistencia al choque térmico.

Arenas:

- Granulometría no mayor de 25 micrones.
- Granos con buena rugosidad.
- Alta refractariedad.
- Alta conductividad térmica.

- Alta resistencia al choque térmico.

1.5 Principales métodos de control de calidad de la suspensión y las cáscaras cerámicas

Para lograr la mejor calidad del producto deseado hay una serie de parámetros a controlar durante el proceso de recubrimiento, a continuación mostramos algunos de estos:

Suspensión Refractaria

Una buena formulación de la suspensión refractaria o “slurry” es determinante para producir moldes cerámicos de alta calidad. El revestimiento primario es especialmente importante ya que determina la calidad superficial de las piezas fundidas, además si la suspensión tiene baja adherencia al modelo de cera se generan defectos importantes como agrietamientos.

Los principales factores que afectan la calidad de la suspensión son:

- Tipo de refractario.
- Granulometría.
- Sólidos en suspensión.
- Viscosidad.
- Peso de la placa.

Existen varios parámetros que afectan la calidad de la suspensión, la estabilidad y la vida de la suspensión, y estos a su vez influyen en la fuerza verde (fuerza para soportar la eliminación de la cera sin falla y soportar el peso del metal) del molde cerámico producido, la resistencia a la fluencia y la permeabilidad del molde. Estos parámetros son: la viscosidad de la suspensión, el valor de pH y la densidad. Algunos de los parámetros están interrelacionados entre sí, estos parámetros son a su vez influenciados por el aglutinante y la carga refractaria utilizada, el tamaño de las partículas refractarias también afectan la viscosidad y el valor de pH de la suspensión.

1.6 Métodos existentes para el control de la calidad de cascarillas

En todos los procesos industriales es de vital importancia el control de la calidad, cada operación se debe hacer con precisión, es por esto que el hombre ha buscado formas de asegurar que su producto este lo más cercano a la perfección. La microfundición o fundición de precisión es un ejemplo palpable de lo anterior afirmado, hay muchos métodos para controlar la cascarilla previa al vaciado del metal líquido, a continuación se mencionan algunos de ellos.

1.6.1 Control del peso de la cáscara del molde

Este es un factor importante para controlar porque la variación en el peso del molde afectará las propiedades mecánicas y térmicas de la envuelta. Como resultado, la variación del peso del molde afectará a la calidad de la colada, afectando las propiedades de colada tales como el tamaño del grano y la tendencia de agrietamiento incluso.

1.6.2 Control visual

Este procedimiento se debe utilizar para controlar la calidad de la cáscara. La inspección de los moldes antes y después del descerado reducirá los problemas de la cubierta en la fundición y reducirá los problemas de calidad con las fundiciones.

1.6.3 Control de la permeabilidad

Este control nos va a garantizar una buena evacuación de los gases luego de verter el metal líquido, es necesario que los gases emitidos se liberen de la estructura cerámica.

1.6.4 Control de la resistencia MOR

Esta característica es la encargada de aportar el poder resistente del molde.

Se necesita que el molde no sea frágil, ya que el mismo será manipulado y debe aguantar irregularidades cometidas por los traslados de las áreas de conformación del mismo, sin obviar que debe resistir el peso del metal y el impacto del mismo al

verterlo. Este control es objeto de estudio de nuestra investigación, en este caso la resistencia MOR la evaluaremos a través del ensayo de flexión.

1.7 Proceso tecnológico de obtención del recubrimiento cerámico

Para la formación de un molde cerámico se sigue una secuencia de capas, utilizando en cada una de ellas los materiales correspondientes. En la empresa TECAL s.a se conforman los moldes atribuyendo a la pieza de cera, 7 capas cerámicas, 2 capas primarias y 5 capas de refuerzo.

Capa 1:

- Princote (aglutinante); 159 L
- Harina de circonio (refractario); 800 kg
- Agua desionizada.

Princote: es una sílice coloidal que funciona como aglutinante para el moldeo de precisión, las cáscaras cerámicas hechas con este aglutinante ofrecen ventajas para el proceso de moldeo, ya que ofrece al fundidor una mayor libertad de diseño con un nivel mayor de complejidad puesta en los moldeados. Presenta excelente propiedades refractarias, resistencia, resistencia térmica y una buena resistencia a los choques térmicos, además posee elevada porosidad e imprime dureza al refractario.

Composición: 25-30% de sílice

pH: 10

Harina de circonio: el silicato de circonio se produce por la molturación de arena de zircón con lo que se altera el tipo de superficie del grano, tiene una textura rugosa obtenida por la fractura generada durante la molturación. Se aplica en la primera capa de contacto sobre el molde de cera, pues por un lado permite reproducir fielmente su textura con un acabado de superficie lisa y detallada, y por otro, al ser duro, resiste la dilatación térmica de la cera y la presión del metal fundido.

Características:

- Alto punto de fusión, funde a altas temperaturas en un rango de 2100-2300 °C.
- Forma redonda de sus granos que resulta en mayor calidad superficial.
- Baja expansión térmica.
- Compatibilidad con diversos aglutinantes.
- Estabilidad dimensional térmica.

Agua desionizada: es agua común procesada por filtros de desionización a temperatura ambiente, esta será la encargada de garantizar una buena homogenización de la mezcla que buscamos para esta primera capa y aumenta o disminuye la resistencia mecánica del conjunto.

Capa 2:

- Customcote; 178 L
- Harina de circonio; 550 kg
- Ranco-sil; 94 kg

Customcote: es también una sílice coloidal que funciona como aglutinante, solo se diferencia del Princote por el contenido de sílice.

Composición: 20-25 % de sílice

pH: 10

Ranco-sil:

Es una sílice fundida que se forma con la fusión de arena de cuarzo natural y luego solidificarlo para formar vidrio fusionado. La sílice también se llama cuarzo fundido o vidrio vítreo, por lo tanto, la sílice fundida está en estado amorfo, la sílice fundida se utiliza comúnmente como refractario en la fundición debido a su cerca de cero expansión térmica, también tiene excepcionalmente buena resistencia al choque térmico y buena inercia química durante el calentamiento a alta temperatura esto evita que haya alguna reacción entre el molde cerámico y el molde de la aleación.

La sílice fundida es baja en densidad, proporcionando aproximadamente un 23 % más de volumen por unidad de peso, lo que hace que las carcadas más ligeras sean más fáciles de quitar después Knockout y operaciones de limpieza.

Capas de refuerzos (3, 4, 5, 6 y 7):

- Customcote.
- Harina de moloquita.
- Ranco-sil.

Harina de moloquita: es un silicato aluminoso producido industrialmente por la calcinación de caolín, se conoce como el material standard en la producción de moldes para microfundición. La harina del mismo se logra a través de un proceso de molturación de los ladrillos constituidos por mullita (55%), sílice amorfo (45%) y un sistemático proceso de cribado que permite la selección en función del tamaño del grano. Entre sus características resaltan; estabilidad a altas temperaturas, forma y tamaño de partículas adecuadas, compatibilidad con metales líquidos, compatibilidad con diversos aglutinantes y resistencia al choque térmico.

Como harina de moldeado responde de forma adecuada presentando:

- Permeabilidad: porosidad de la arena que permite el escape de los gases y vapores formados por el molde en la entrada del metal.
- Resistencia: presenta un buen factor de cohesión.
- Resistencia en seco: mantiene la forma de la cavidad del molde durante el secado.
- Refractariedad: resistencia a altas temperaturas sin fundirse, comienza a deformarse en el rango de 1750 a 1770 °C.
- Resistencia en caliente: estabilidad dimensional una vez que el metal se solidifica.
- Desprendimiento: fácil desmoldeo.

1.8 Trabajos precedentes

El tema relacionado con la microfusión ha sido muy poco estudiado nacionalmente, pero en la búsqueda de información para la conformación de este trabajo de diploma encontramos varios trabajos investigativos logrados por autores internacionales, a continuación se da cita a algunas de ellas.

Varela, *et al*, (2001) en las jornadas San – Conamet –AAS 2001 celebrada en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto en Argentina, analizaron a través del ensayo módulo de elasticidad en flexión las posibilidades de la disminución de los por cientos de dióxido de silicio para la formación de caldos cerámicos, realizaron 5 experimentos, cada uno con diferentes porcentajes del dióxido en los caldos refractarios para así conformar probetas derivados de los moldes de microfusión, a la cual le aplicaron el ensayo para luego comprobar si era factible algún resultado para proponer una nueva racionalización de las materias primas utilizadas para la conformación de un molde par fundición por cera perdida.

El año 2007 la revista del Instituto de Investigación FIGMMG publicó un artículo donde se muestran los resultados de los ensayos de permeabilidad realizados a moldes cerámicos para microfusión, los ensayos fueron aplicados a probetas de moldes antes de calcinar y luego de calcinar.

López *et al*, 2008, en el X Congreso Nacional de Materiales (Donostia – San Sebastián, España), exponen un trabajo donde proponen la sustitución de las arenas de zirconio por arenas de alúmina (Al_2O_3) para la conformación de los moldes cerámicos para la microfusión, ya que la obtención del zirconio en el mercado se dificultaba por su alto costo, en cambio ofrecía propiedades similares y era menos costosa.

En diciembre del 2009 en la Universidad Tecnológica de Malasia el ingeniero mecánico SohWenHann, propone en su trabajo doctoral la integración de fibras de palma a los caldos refractarios para la construcción de moldes cerámicos, el

ingeniero hace esa propuesta porque en sus experimentos disminuye las cantidades de materiales que integran los aglutinantes y al realizar el ensayo MOR y el ensayo de permeabilidad logra resultados favorables. Donde obtiene una resistencia MOR de 3,5 MPa para 7 capas refractarias y 2 horas de secado.

Lozano, 2011, en su tesis doctoral expuesto en la Universidad de Granada, España, propone la sustitución de arenas refractarias para la conformación de capas cerámicas con pinturas refractariasgasificables, esta investigación fue realizada con fines de utilizar estos moldes en esculturas de arte ya que la piezas a conformar son mayormente de plásticos, ceras y estas no exigen mucha resistencia en sus moldes cerámicos.

Petrillo, 2012, en su tesis doctoral (La cascarilla cerámica como material escultórico), hace alusión a la conformación de los moldes, propone en su trabajo la sustitución de algunas de las capas cerámicas por materiales alternativos como las fibras de vidrio, obteniendo resultados favorables para el trabajo escultórico es decir, estos moldes fueron probados con la fusión de materiales de poco peso como las ceras, los plásticos y el aluminio.

CONCLUSIONES CAPITULO I

1. El análisis de las fuentes bibliográficas actualizada internacionalmente demuestran que la resistencia de la cáscara cerámica es uno de los parámetros más importante que determina la calidad final del molde.
2. En la bibliografía utilizada no se reportan trabajos a nivel nacional referentes al tema de investigación.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo, se abordarán los temas relacionados con los materiales, equipos y métodos para la construcción de probetas cerámicas y la realización del ensayo de flexión que nos dará el valor MOR, y así poder identificar las resistencias logradas con las diferentes combinaciones de tiempo de reposo y número de capas.

2.1 Materiales empleados en la fabricación de las probetas

La cera que se utiliza para el modelo de las probetas es del tipo XL21, (cera de tronco) la misma posee las siguientes características.

Está compuesta por ceras naturales y sintéticas, polímeros, y resinas naturales refinadas.

- Apariencia: sólido ceroso.
- Color: verde oscuro.
- Olor: hidrocarburo parafínico.
- Punto de fusión: 55 a 80°C.
- Punto de ebullición: >200°C.

Para lograr el recubrimiento cerámico la tecnología se basa en 7 capas de arenas refractarias y aglutinantes con 2 horas de secado entre cada capa, cada capa con diferentes características.

Caldo de recubrimiento de la primera capa, se integra por la unión en un bombo giratorio de 159 L de Princote, 800 kg de harina de zirconio y 3,5 L de agluadesionada. Esta mezcla debe tener las siguientes características:

- Viscosidad 20 a 23 con copa Zahn num.5.
- Densidad 2,92 a 2,98 g/cm³.
- pH 9 a 10.

Los requisitos se cumplen en la investigación, los rangos fueron comprobados con los mismos métodos existentes en el laboratorio de la planta, arrojando los siguientes valores:

- Viscosidad 22 con copa Zahn.
- Densidad, 2,9g/cm³.
- pH 9,4.

Luego que la mezcla posee todos sus componentes se debe dejar de 50 a 60 horas antes de recubrir los arbolitos.

Caldo de recubrimiento de la segunda capa, al igual que el primer caldo este se forma en un bombo giratorio con, 178 L de Customcote, 550 kg de harina de zirconio y 94 kg de Ranco Sil, cumpliendo las siguientes especificaciones:

- Viscosidad 8 a 10 con copa Zahn.
- Densidad 2,55 a 2,90 g/cm³.
- pH 8 a 10.

Los rangos fueron cumplidos en la investigación, al comprobarlos se obtuvo:

- Viscosidad 9,3 con copa Zahn.
- Densidad 2,73 g/cm³.
- pH 9.

Caldo de recubrimiento de las capas de refuerzo 3, 4, 5, 6, 7, se logra con la unión de 220 L de Customcote, 284 kg de harina de Moloquita y 130 kg de Ranco Sil. Guiándose por las siguientes especificaciones:

- Viscosidad 16 a 20 con copa Zahn
- Densidad 1,60 a 1.80 g/cm³
- Ph 8 a 10

Estas especificaciones fueron cumplidas en la investigación:

- Viscosidad 17,5 con copa Zahn

- Densidad 1,68 g/cm³
- Ph 9

Realización de las probetas

Para la realización de las pruebas de resistencia mecánica de los moldes cerámicos, se emplea el ensayo de flexión, donde se hace necesario hallar el módulo de ruptura (MOR), el cual se determina a partir de probetas ilustradas en las figuras 1 y 2, fabricadas por inyección de cera en matriz metálica.



Figura 2.1 Modelos de las probetas.

En la figura 2.2 se observa las dimensiones de todas las probetas que se utilizaron en los ensayos, exceptuando sus alturas ya que la misma varía a medida que las probetas poseen más capas cerámicas.

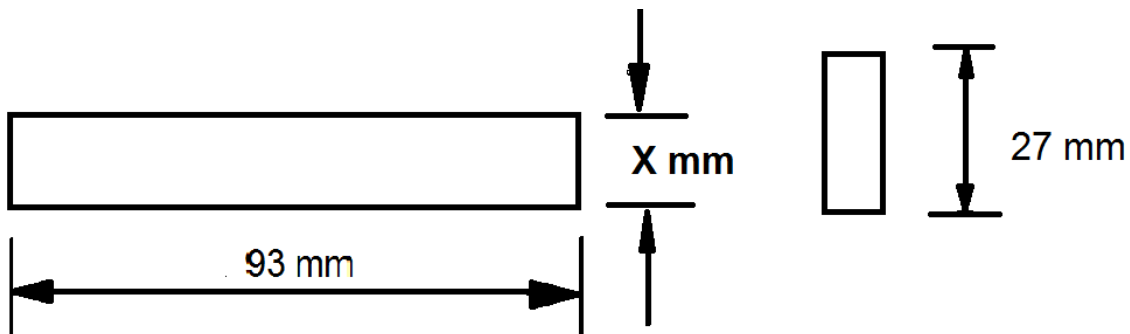


Figura 2.2 Dimensiones de las probetas.

Los modelos en cera se montan en racimos, tal como se observa en la figura 2.3 y se va construyendo la cáscara cerámica, aplicando una mezcla de elementos cerámicos refractarios y aglutinantes hasta lograr una cáscara que varía en su grosor de acuerdo al número de capas aplicadas.



Figura 2.3 Esqueleto de cera.

2.2. Equipamientos utilizados para la fabricación de las probetas

Para la fabricación de las probetas se emplea exactamente la secuencia de equipos utilizados por la empresa en su producción, la misma se rige por los pasos de la MICROFUSION CATALANA que fue la empresa encargada del montaje de la tecnología existente en la empresa TECAL y además fue la encargada de la preparación y capacitación de los operarios.

Primeramente partimos de los moldes de aluminio con la forma de los troncos que sostendrán las tabletas rectangulares (probetas) como se observa en la figura 2.4, que antes también se formaron a través de la inyección de cera en moldes de aluminio con la forma de las probetas. Estos moldes de aluminio se conforman luego que el diseñador envía el dibujo técnico de la pieza al taller de utillaje, allí los operadores maquinan los semiproductos metálicos hasta lograr las dimensiones exigidas por el dibujo.



Figura 2.4 Molde del tronco.

Para los lograr los modelos de cera los moldes se someten a la inyección de la misma en su forma líquida a través de una inyectora semiautomática como la que se observa en la figura 2.5. La inyectora que se utiliza es del tipo vertical en forma de C, con las siguientes características:

Tabla 2.1 Características de la inyectora.

Fuerza de aplicación	25 toneladas
Abertura máxima	10mm
Boquilla esférica con radio	10mm
Inyección lateral	Ajuste hidráulico de la boquilla
Volumen del disparo de cera	5 L
Presión de inyección	5 a 50 BAR
Velocidad de inyección	0 a 50 ml/s
Capacidad del tanque	100 L



Figura2. 5 Inyectora de cera semiautomática en forma de c.

Luego que se tiene el tronco y las tabletas de cera se pasa a la unión de las mismas a través del calentamiento centrado en los puntos a unir con una varilla de acero que es calentada con un soplete de gas GLP como se aprecia en la figura 2.6



Figura 2.6 Ensamble de las probetas de cera en el tronco.

Para empezar el recubrimiento cerámico los esqueletos de cera deben ser lavados con agitación neumática en unos tanques de agua que poseen una pequeña cantidad de arena de zirconio (5%), figura 2.7. El proceso es el encargado de descontaminar el esqueleto de cualquier residuo que afecte el proceso de recubrimiento.



Figura 2.7 Tanques de lavado.

Como se menciona anteriormente los moldes cerámicos se logran a través de varias capas de aglutinantes y arenas con tiempos de secado entre ellas. Para formar las capas se pasa al local de revestimiento donde se encuentran los tanques giratorios que poseen las mezclas aglutinantes, figura 2.8, bombos con efectos de lluvias para arenas finas y bombos con efecto suspensión para las arenas más gruesas, figura 2.9 y figura 2.10



Figura 2.8 Tanques con la mezcla aglutinante.



Figura 2.9 Bombo de arena con efecto lluvia para arenas finas.



Figura 2.10 Bombo con efecto suspensión para arenas gruesas.

Para el secado entre intervalos de capa los arbolitos se trasladan a una cámara de secado donde existe una humedad relativa de 44 a 45 %, y a temperatura ambiente de 24°C, para su medición se utiliza un termohidrómetro como se ilustra en la figura 2.11



Figura 2.11 Termohidrómetro

Estos rangos de secado se logran a través de la inclusión de los arbolitos en una cámara de secado que posee 5 consolas de aire acondicionado, 2 ventiladores de alta potencia y un vectorizador giratorio de aire. Esta cámara es un local hermético

con paredes impermeables ideales para mantener las condiciones ideales sin interrupciones, figura 2.13



Figura 2.13 Cámara de secado.

Luego que los arbolitos se encuentran con todas sus capas cerámicas correspondientes son trasladados hasta el proceso de descerado, el mismo es efectuado en una autoclave como se observa en la figura 2.14, la cual ostenta las siguientes características:

Tabla 2.3 Características de la autoclave.

Presión de trabajo	10 kgf/cm ²
Temperatura máxima	179°C
Insulación térmica	100 mm
Dimensiones de trabajo	900 mm(diámetro) y 1000 mm(profundidad)



Figura 2.14 Autoclave para descerado.

Una vez ya sometidos los arbolitos a las condiciones de la autoclave estos son calcinados en horno de estera Solar Impiant, como se observa en la figura 2.15, para eliminar la humedad adquirida en la autoclave y los residuos de cera que queden en sus interiores, este horno posee la siguientes características:

Tabla 2.4 Características del horno calcinador.

Longitud externa	4,100 mm
Ancho interno útil	350 mm
Altura interna útil	600 mm
Dimensiones de la placas	350x350 mm
Capacidad de carga de los hornos	10 placas
Temperatura máxima	1150°C
Temperatura de trabajo	1100°C
Sistema de calentamiento	Resistencias eléctricas

Potencia eléctrica de calentamiento	90 kW
Tensión eléctrica	440-480 V. 3F+T 60 Hz



Figura 2.15 Horno de estera para la calcinación de los arbolitos.

Para lograr las probetas que utilizamos en la investigación los arbolitos fueron sometidos a rasgados en una cierra con un disco de corte para obtener las geometrías que se aprecia en la figura 2.16, que luego se clasificaron de acuerdo al número de capas y al tiempo de secado.



Figura 2.16 Disco de corte.

2.3 Planificación Experimental

Para el desarrollo de la investigación se decide emplear un diseño del tipo factorial completo. Las variables estudiadas en el proceso fueron dos: el número de capas cerámicas y el tiempo de secado entre cada capa del proceso, respetando todos los demás parámetros de la tecnología que actualmente se utiliza en la fábrica. Se emplearon tres niveles de las variables, por lo que la cantidad de experimentos realizados fue de:

$N=3^2= 9$ experimentos.

Los experimentos se llevaron a cabo en forma intercalada y se realizaron 9 réplicas para garantizar un mayor intervalo de confianza de los resultados obtenidos.

2.3.1 Selección de los niveles de las variables

Para la definición de los niveles de las variables se eligen rangos utilizados por la empresa extranjera MICROFUSION CATALANA proveedora de la tecnología que se utiliza actualmente en la fundición de la empresa TECAL.

Los rangos utilizados son: 5 a 7 capas cerámicas y de 1 a 3 horas de secado entre cada capa.

Definición de las variables y los niveles:

En el presente diseño tomaremos como variables independientes el número de capas cerámicas aplicadas a las estructuras de cera y el tiempo de secado entre cada capa, y como variables respuestas o dependientes tenemos los tres grupos de combinaciones de tiempo de secado y capas cerámicas, como se observa en la tabla 2.5

Tabla 2.5 Combinaciones y grupos de las probetas.

Grupo y número de capas	Grupo y tiempo de secado
Grupo 1	Grupo 1
5 capas cerámicas	1 hora de secado
5 capas cerámicas	2 horas de secado
5 capas cerámicas	3 horas de secado
Grupo 2	Grupo 2
6 capas cerámicas	1 hora de secado
6 capas cerámicas	2 horas de secado
6 capas cerámicas	3 horas de secado

Grupo 3	Grupo 3
7 capas cerámicas	1 hora de secado
7 capas cerámicas	2 horas de secado
7 capas cerámicas	3 horas de secado

Las réplicas fueron nombradas con el número correspondiente al ensayo acompañadas de (1), ejemplo para el ensayo número 1 la réplica es 1.1.

Realización del ensayo

El ensayo correspondiente a la investigación fue el ensayo de flexión sobre dos puntos de apoyo, éste fue ejecutado en el laboratorio central de la empresa TECAL s.a.

Anteriormente se menciona que la evaluación de las resistencias de las cáscaras logradas en el proceso se comprobarían a través del MOR, para el cálculo de este se necesita obtener algunas variables como, largo de la probeta, distancia entre los puntos de apoyo, ancho y altura del punto de ruptura. Todas estas variables fueron medidas con un Pie de Rey digital, el cual se observa en la figura 2.17. La distancia entre los puntos de apoyos es de 57,30 mm y la misma para todos los ensayos.

Tabla 2.6 Variables medidas.

Probetas	Largo (mm)	Ancho(mm)	Altura del punto de ruptura(mm)
1	93	27	4,45
1.1	93	27	4,45
2	93	27	5,08

2.1	93	27	5,08
3	93	27	5,25
3.1	93	27	5,25
4	93	27	5,30
4.1	93	27	5,30
5	93	27	5,45
5.1	93	27	5,45
6	93	27	5,80
6.1	93	27	5,80
7	93	27	6,00
7.1	93	27	6,00
8	93	27	6,10
8.1	93	27	6,10
9	93	27	6,17
9.1	93	27	6,17



Figura 2.17 Pie de Rey utilizado para las mediciones.

El ensayo de flexión es realizado en el equipo de ensayos denominado MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS ELECTROMECAÁNICA, esta fue adquirida por la compra al grupo empresarial S.A.E IBERTEST, la cual se muestra en la figura 2.18, y posee las siguientes características.

Tabla 2.6 Características de la máquina de ensayos.

Fuerza máxima	300kN
Medida de la fuerza	Célula de carga universal (tracción compresión) con bandas extensométricas
Campo de medida	1 al 100% de la capacidad nominal de la célula de carga (autoescala)
Clase	0,5 según ISO 7500
Resolución (en fuerza)	5 dígitos, con coma flotante
Luz libre vertical, con célula de carga, sin accesorios	Ajustable de 0 a1300 mm

Número de columnas guía	2, cromadas y rectificadas
Número de husillos	2 husillos a bolas de alta precisión
Luz libre horizontal	600 mm
Travesaño móvil	Con finales de carrera incorporados mediante detectores de proximidad y retorno automático a posición inicial, prefijada
Accionamiento	Servomotor síncrono (Brushless) con transmisión a husillos mediante correa dentada y reductores. Permite realizar el control en lazo cerrado (servoncontrol) en desplazamiento (mm/min) y en fuerza (kN/s)
Velocidad de desplazamiento	Programable por teclado entre 0.01 y 1/10 de la fuerza máxima, en kN/s (otras velocidades son posibles bajo demanda)
Medida del desplazamiento	Mediante encoder con resolución de 0,001 mm
Resolución en desplazamiento	5 dígitos (3 enteros y 2 decimales)
Potencia total	6kW
Parada de emergencia	Tipo "seta ", situada en la mesa de trabajo

Dimensiones del marco de trabajo de ensayos (mm)	1200x650x2600
Peso aproximado (sin cabezales de tracción)	1400kg
Dimensiones/peso de la mesa de trabajo	1200x800x900 mm (ancho x fondo x alto) 40 kg aproximadamente



Figura 2.18 Máquina de ensayos universal.

2.4 Cálculo de la resistencia MOR

Un molde para microfusión o fundición a la cera perdida, está sujeto a diversas sollicitaciones mecánicas, ya sea cuando el mismo está en servicio, o bien durante las etapas de construcción del mismo.

En consecuencia, las propiedades mecánicas de los moldes constituyen parámetros fundamentales para establecer la calidad de los mismos. A fin de determinar dichas propiedades mecánicas, tradicionalmente se utiliza el módulo de ruptura MOR o resistencia MOR (modulus of rupture), que es el valor de tensión de rotura de una placa plana de material de molde con una sollicitación de flexión.

La resistencia MOR es un buen punto de partida para la determinación de propiedades mecánicas de cáscaras cerámicas. Sin embargo, una completa caracterización debe incluir otras determinaciones.

A fin de estimar las propiedades físicas del molde, tradicionalmente se utiliza la resistencia MOR y es calculado como se muestra en la ecuación 2.1; el cual se determina preparando una placa plana de cerámica utilizando como modelo una barra de cera rectangular. La barra se reviste utilizando el sistema de cáscara deseado. Luego de secado, se recortan las probetas con un disco de corte, produciendo sendos especímenes para el ensayo. La muestra se rompe utilizando un dispositivo de ensayo de flexión en 3 puntos (figura 2.18).

La resistencia MOR se determina de la siguiente manera:

$$MOR = \frac{3PL}{2bh^2}; MPa \quad (2.1)$$

Donde:

MOR, Resistencia MOR; MPa

P, Carga de rotura; N

L, Distancia entre soportes; m

b, Ancho de la muestra en el punto de rotura; m

h, Espesor de la muestra en el punto de rotura; m

La resistencia MOR es un buen punto de partida para caracterizar cáscaras. Las ventajas de esta herramienta son: medición sensible a pequeños cambios en resistencia de cáscara y espesor; facilidad de preparación de muestras de ensayo, utilizando barros y procesos de producción; método de ensayo rápido y aplicable con equipamiento fácilmente disponible.

Las desventajas de este método de medición son: problemas de medición del espesor debido a que la superficie exterior es irregular y en general el espesor de cáscara no es uniforme; y gran desviación standard, razón por la cual se requiere analizar gran cantidad de muestras.

En la figura 2.19 se muestra el dibujo donde se detalla la operación realizada por el equipo para lograr la fractura en las probetas.

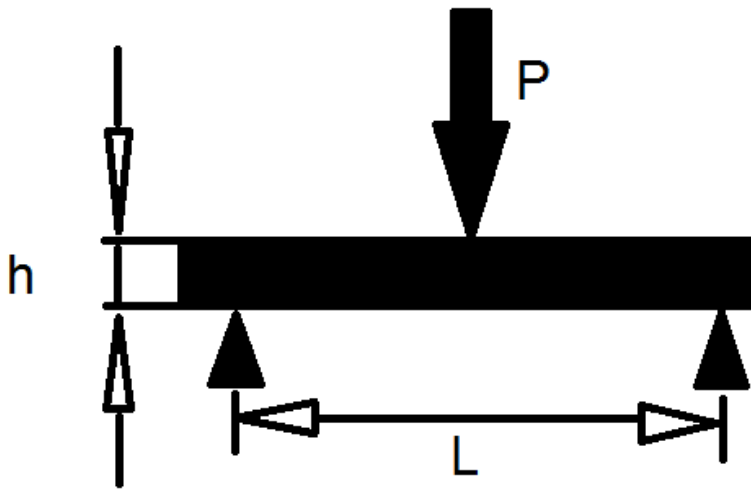


Figura 2.19 Esquema del ensayo para obtener el MOR.

Conclusiones del capítulo 2.

- ✓ Los materiales, métodos y técnicas utilizadas garantizan la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.
- ✓ Los experimentos fueron realizados bajo las mismas condiciones y procedimientos que las utilizadas en la empresa TECAL.

CAPITULO 3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para nuestros ensayos se utilizaron probetas de moldes cerámicos con los 3 tiempos del rango propuesto, como se mencionó en el capítulo anterior se formaron 3 grupos en dependencia del número de capas 5,6, 7 y cada grupo con los 3 tiempos de secado, 1 hora, 2 hora y 3 horas.

A continuación se realiza el análisis de los resultados obtenidos a partir de la realización del ensayo considerando la secuencia experimental expuesta anteriormente. Se analiza la influencia de las variables número de capas y tiempo de secado entre cada capa en la resistencia MOR, por el ensayo de flexión.

3.1 Análisis del ensayo de flexión

Como se mencionó anteriormente cada ensayo fue enumerado en forma de grupos para una mejor comprensión y organización, en el siguiente gráfico (grupo 1) se muestra la forma ascendente de la altura de los punto de fractura de la probeta con respecto al tiempo de secado, esta es una variable necesaria para el cálculo de resistencia MOR a través del ensayo de flexión.

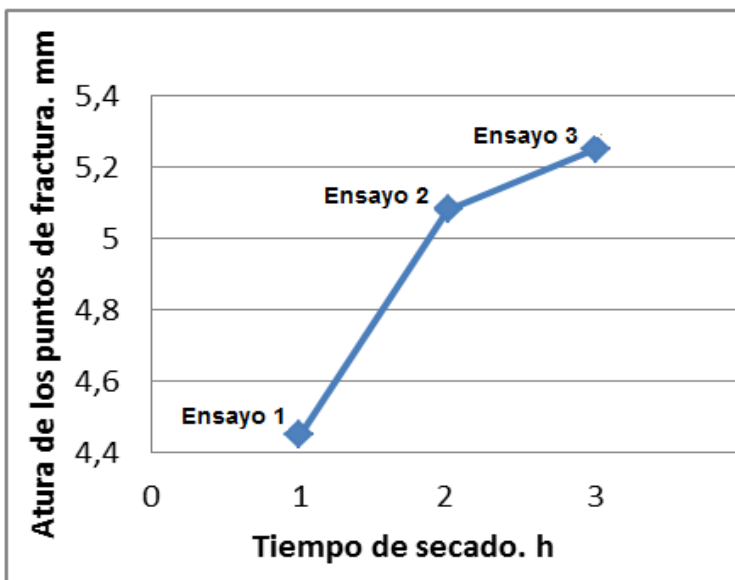


Figura 3.1 Altura de los puntos de fractura para 5 capas cerámicas.

Como se observa en la figura, la altura de los puntos de fractura varía a medidas que se llevan a cabo los ensayos, para el ensayo 1 con un tiempo de secado de 1 hora entre capas se alcanza valor de 4,45 mm; para el ensayo 2, con un tiempo de secado de 2 horas entre capas, se alcanza valor de 5,08 mm y para el ensayo 3, con un tiempo de secado de 3 horas entre capas, se alcanza el máximo valor de 5,25 mm. La mayor diferencia entre las alturas de los puntos de fractura ocurre entre los ensayo 1 y 2, siendo la misma de 0,63 mm, esto es debido fundamentalmente a que los arbolitos con una hora de secado no garantizan el secado completo de las capas y al sumergirlos en los caldos cerámicos sufren desprendimiento de las arenas al estas no estar compactas del todo.

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de los ensayos del grupo 2, este es realizado con 6 capas cerámicas.

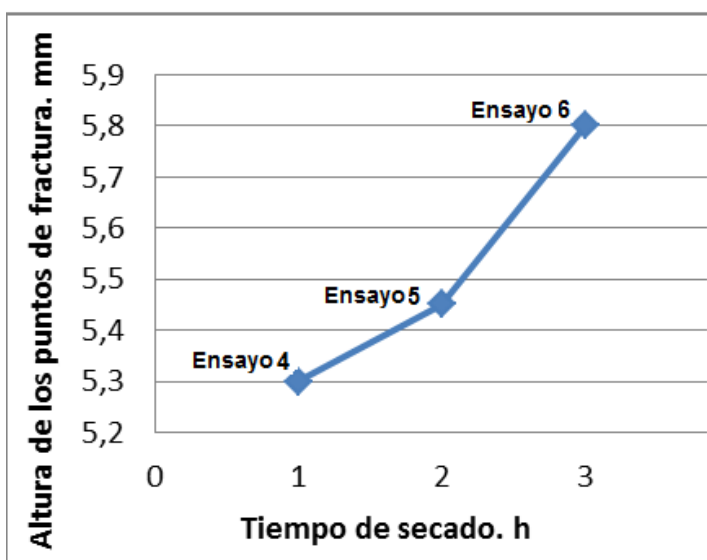


Figura 3.2Altura de los puntos de fractura para 6 capas cerámicas.

En la figura 3.2 para el ensayo 4 con un tiempo de secado de 1 hora entre capas, la altura de los puntos de fractura alcanza valor de 5,30 mm; para el ensayo 5, a 2 horas de secado, la altura de los puntos de fractura es de 5,45 mm, existiendo una pequeña diferencia entre estas alturas debido fundamentalmente a lo anteriormente explicado sobre el tiempo de secado con 1 hora. Para el ensayo 6,

con un tiempo de secado de 3 horas entre capas, la altura de los puntos de fractura es de 5,80 mm. Entre los ensayos 5 y 6 ocurre la mayor diferencia entre las alturas de los puntos de fractura, siendo la misma de 0,35 mm, esto es debido fundamentalmente a la influencia del tiempo de secado entre cada demostrando en este grupo que un tiempo de 3 horas garantiza la mayor altura de los puntos de fractura.

En el gráfico siguiente se muestra el comportamiento de los ensayos del grupo 3, este es realizado con 7 capas cerámicas.

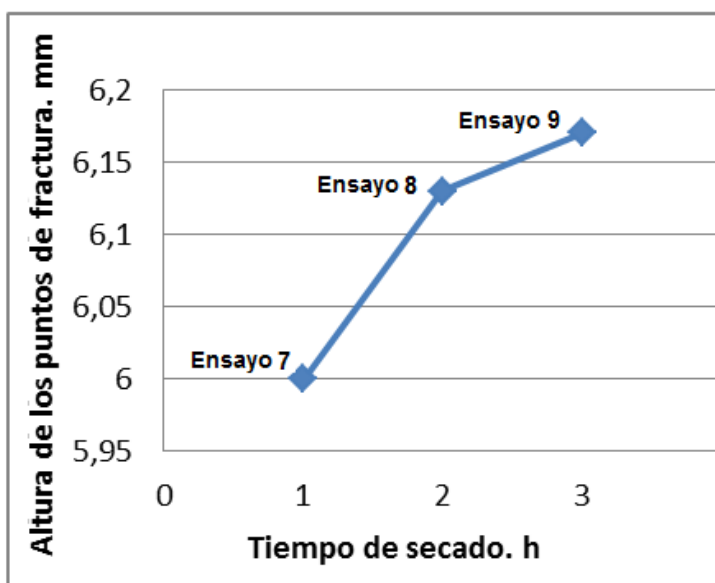


Figura 3.3Altura de los puntos de fractura para 7 capas cerámicas.

En la figura 3.3 para el ensayo 7, con un tiempo de secado de 1 hora entre capas, la altura de los puntos de fractura alcanza valor de 6,00 mm; para el ensayo 8, a 2 horas de secado, la altura de los puntos de fractura es de 6,10 mm, existiendo la mayor diferencia entre las alturas de los puntos de fractura, siendo la misma de 0,10 mm, esto es debido fundamentalmente a lo explicado anteriormente sobre las

consecuencias de 1 hora de secado. Para el ensayo 9, con un tiempo de secado de 3 horas entre capas, la altura de los puntos de fractura es de 6,17mm.

En el gráfico 3.4 se muestran las alturas de los puntos de fractura para los tres grupos estudiados, observándose la forma ascendente desde el primer experimento (4,45 mm) hasta el número 9 (6,17 mm).

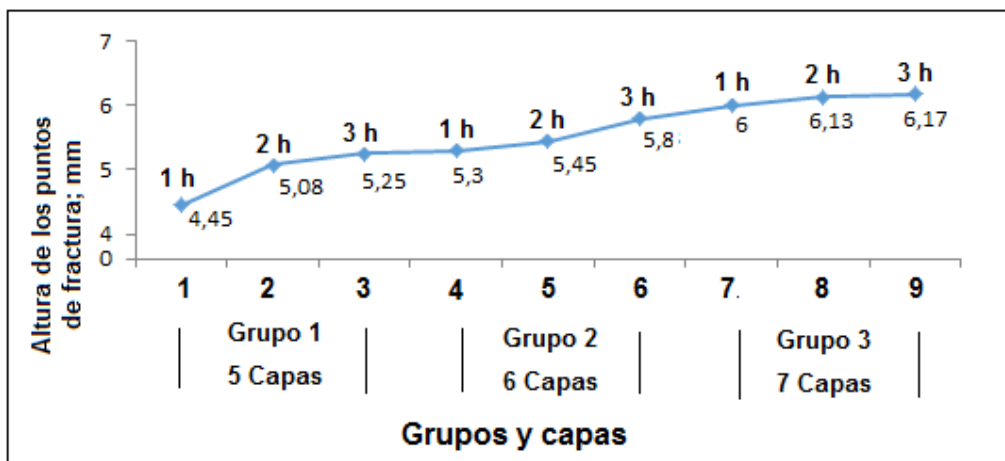


Figura 3.4Altura de los puntos de fractura para los 3 grupos.

3.2 Fuerza ejercida para lograr las fracturas de las probetas

EL siguiente gráfico representa la fuerza que ejerce el equipo de ensayo para lograr las fracturas de las probetas del grupo 1, el cual posee 5 capas cerámicas.

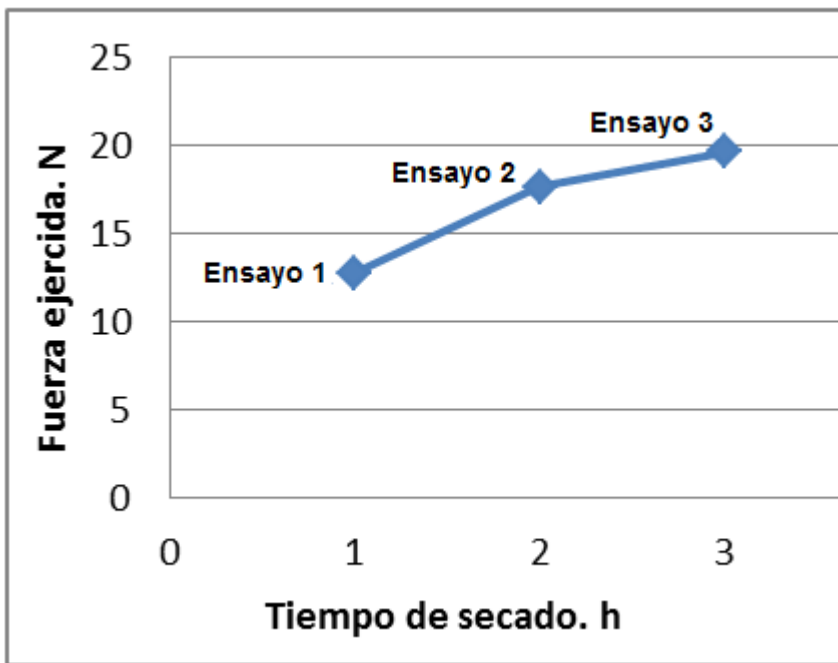


Figura 3.5 Fuerza ejercida en el ensayo para 5 capas cerámicas.

Como se puede observar en el gráfico 3.5 a medida que las probetas de ensayo poseen un mayor tiempo de secado existe un crecimiento de la fuerza de forma ascendente. Para el ensayo 1, con un tiempo de secado de 1 hora, la fuerza ejercida es de 12,753 N; para el ensayo 2, con un tiempo de secado de 2 horas, el valor de la fuerza ejercida es de 17 N y para el último ensayo, a 3 horas de secado, la fuerza es de 19,620 N.

EL siguiente gráfico representa la fuerza que ejerce el equipo de ensayo para lograr las fracturas de las probetas de grupo 2, el cual posee 6 capas cerámicas.

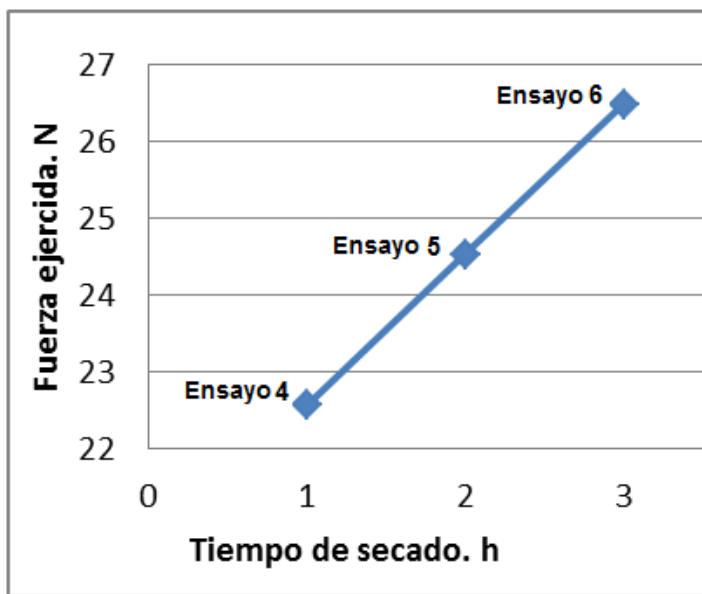


Figura 3.6 Fuerza ejercida en el ensayo para 6 capas cerámicas.

En el gráfico 3.6 se observa un comportamiento lineal y ascendente de las probetas de ensayos a medida que va creciendo el tiempo de secado. Para el ensayo 4, con un tiempo de secado de 1 hora, la fuerza ejercida es de 22,8 N; para el ensayo 5, con un tiempo de secado de 2 horas, el valor de la fuerza ejercida es de 23 N y para el ensayo 6, a 3 horas de secado, la fuerza es de 26,6 N.

EL siguiente gráfico representa la fuerza que ejerce el equipo de ensayo para lograr las fracturas de las probetas de grupo 3, el cual posee 7 capas cerámicas.

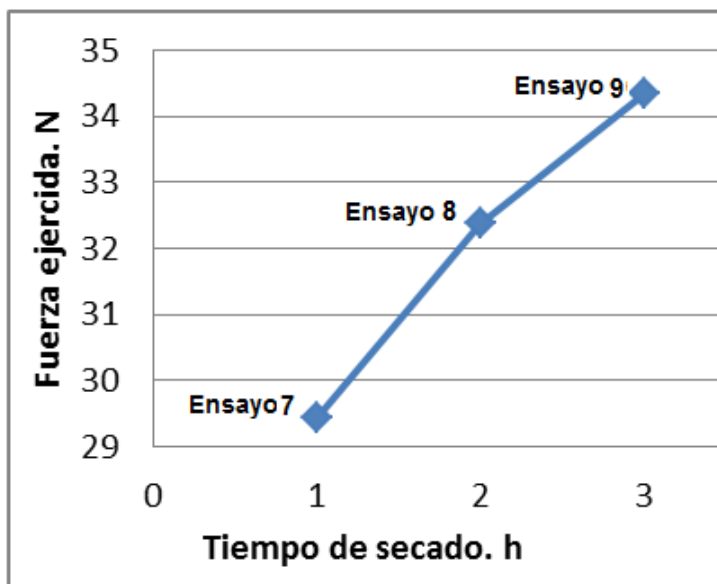


Figura 3.7 Fuerza ejercida en el ensayo para 7 capas cerámicas

En el gráfico 3.7 se describe un comportamiento ascendente de las probetas de ensayos a medida que va creciendo el tiempo de secado. Para el ensayo 7, con un tiempo de secado de 1 hora, la fuerza ejercida es de 29,5 N; para el ensayo 8, con un tiempo de secado de 2 horas, el valor de la fuerza ejercida es de 32,5 N y para el ensayo 9, a 3 horas de secado, la fuerza es de 34,335 N. Los mayores valores de la fuerza ejercida corresponden a los 2 últimos ensayos realizados a las probetas de este grupo ya que poseen los dos mayores tiempos de secado y el mayor número de capas.

En el gráfico 3.8 se muestran las fuerzas ejercidas para los tres grupos estudiados, observándose la forma ascendente desde el primer experimento con 5 capas (12,753 N) hasta el número 9 con 7 capas (34,335 N).

Este ascenso de la fuerza se debe a que a medida que las probetas tienen un mayor tiempo de secado y un mayor número de capas aumenta el espesor de las probetas y esto lógicamente obliga al equipo a ejercer un mayor esfuerzo para lograr la fractura en cada probeta. Este también es una variable que se necesita para conformar el cálculo de resistencia MOR.

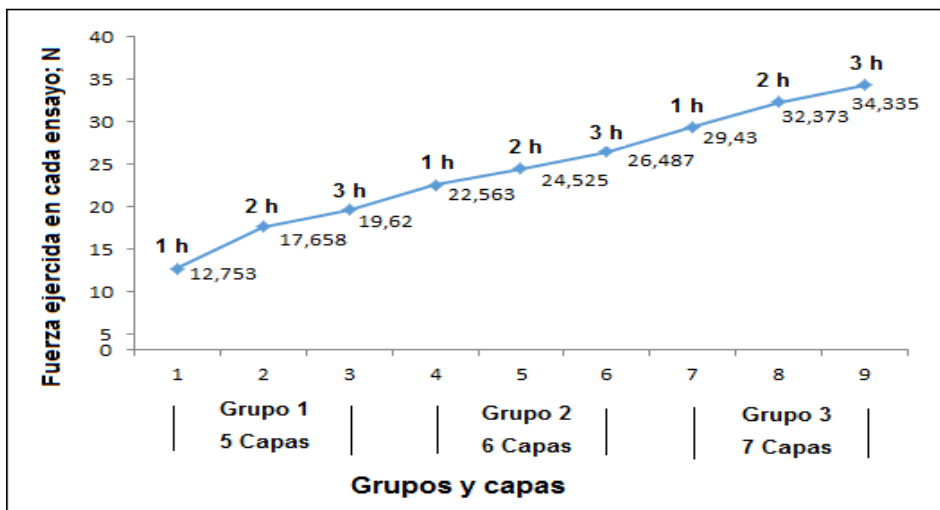


Figura 3.8 Fuerza ejercida para los 3 grupos.

3.3 Resultados del cálculo de resistencia MOR

A continuación se muestran una serie de gráficos basados en los cálculos de la resistencia MOR.

El primer gráfico corresponde al grupo 1 el cual posee 5 capas cerámicas.

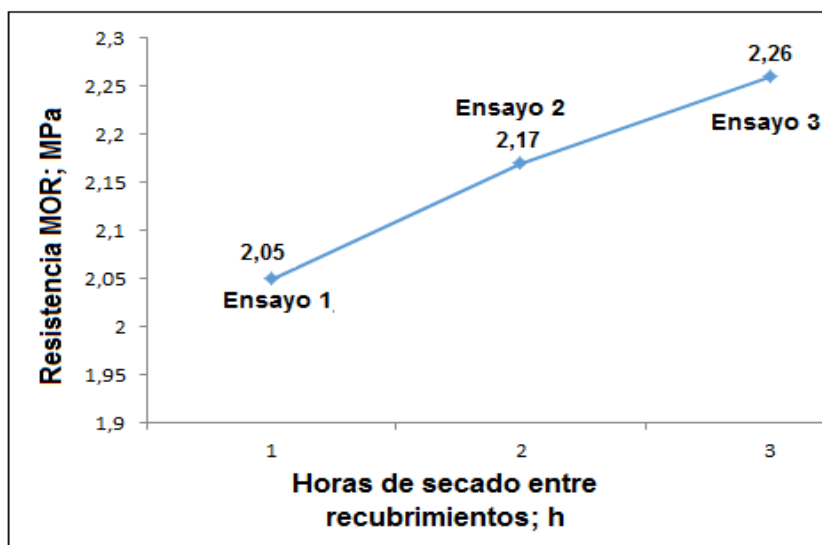


Figura 3.9 Resistencia MOR para 5 capas cerámicas.

Como se puede observar en el gráfico, el ensayo 1, con 1 hora de secado, la resistencia MOR alcanza un valor de 2,05 MPa; para el ensayo 2 con un tiempo de secado de 2 horas, posee una resistencia MOR de 2,17 MPa y para el tercer ensayo a 3 horas de secado, se alcanza una resistencia MOR de 2,26 MPa. Para los tres ensayos se describe un comportamiento ascendente.

A continuación se muestra el gráfico correspondiente al grupo 2, el cual posee 6 capas cerámicas.

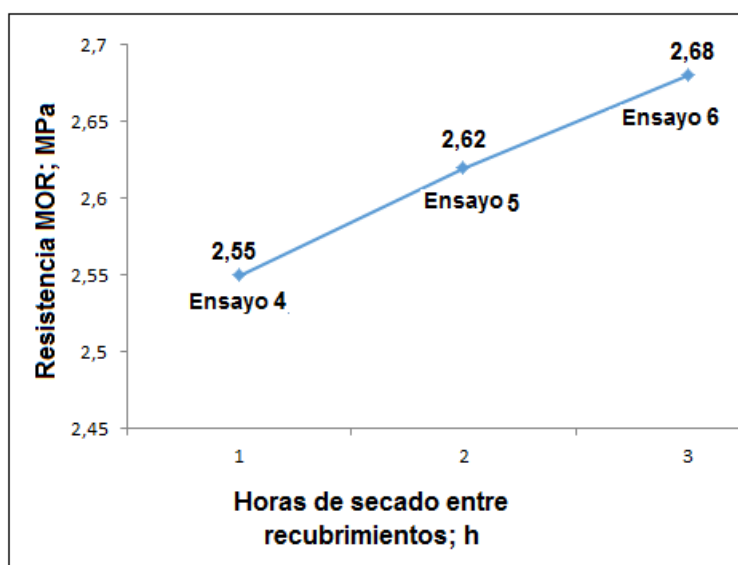


Figura 3.10 Resistencia MOR para 6 capas cerámicas.

Como se observa en el gráfico 3.10 para el ensayo 4, con 1 hora de secado, la resistencia MOR alcanza un valor de 2,55 MPa; para el ensayo 5 con un tiempo de secado de 2 horas, posee una resistencia MOR de 2,62 MPa y para ensayo 6, a 3 horas de secado, se alcanza una resistencia MOR de 2,68 MPa. Para los tres ensayos se describe un comportamiento ascendente similar al grupo 1.

En el gráfico siguiente se muestra el comportamiento del grupo 3, el cual posee 7 capas cerámicas.

Como muestra el gráfico 3.11 para el ensayo 7, con 1 hora de secado, la resistencia MOR alcanzada es de 2,59 MPa; para el ensayo 8, a 2 horas de secado, la resistencia MOR es 2,74 MPa y para el ensayo 9, a 3 horas de secado, el valor de la resistencia MOR es de 2,86 MPa.

En este grupo se encuentra la resistencia MOR que posee el ensayo correspondiente a la tecnología de la empresa TECAL s.a.

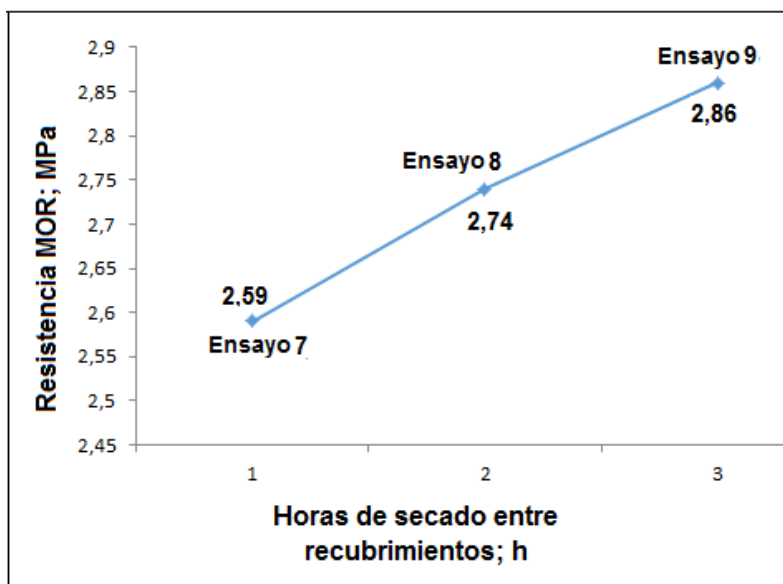


Figura 3.11 Resistencia MOR para 7 capas cerámicas.

En el gráfico anterior también se puede apreciar que el ascenso en los ensayos en un espacio de tiempo ordenado aumenta la resistencia MOR, pero también el tiempo de secado juega un importante papel para obtener la resistencia MOR óptima que necesitan los moldes. El aumento de la resistencia, en relación al número de ensayos y el tiempo de secado está dado en que los arbolitos que poseen una hora de secado entre cada capa no garantiza la fijación de las arenas refractarias al no estar secos del todo, esto también es acompañado de que al no estar preparadas para recibir otra capa cerámica se desprenda una gran cantidad de partículas de arenas al sumergirlos en los caldos cerámicos que se encuentran con una constante agitación. Es por esto que se refleja el aumento de la resistencia entre 1 y 3 horas de secado.

En el gráfico 3.12 se hace una integración de los resultados de todas las resistencias MOR obtenidas en cada uno de los ensayos. El gráfico facilita la apreciación de cada uno de los resultados de los ensayos, ya que aparecen identificados con colores, al juntar los resultados se aprecia cada una de las diferencias entre cada una de las combinaciones, se observa la diferencia entre los ensayos que poseen las mismas horas de secado pero con diferentes números de capas.

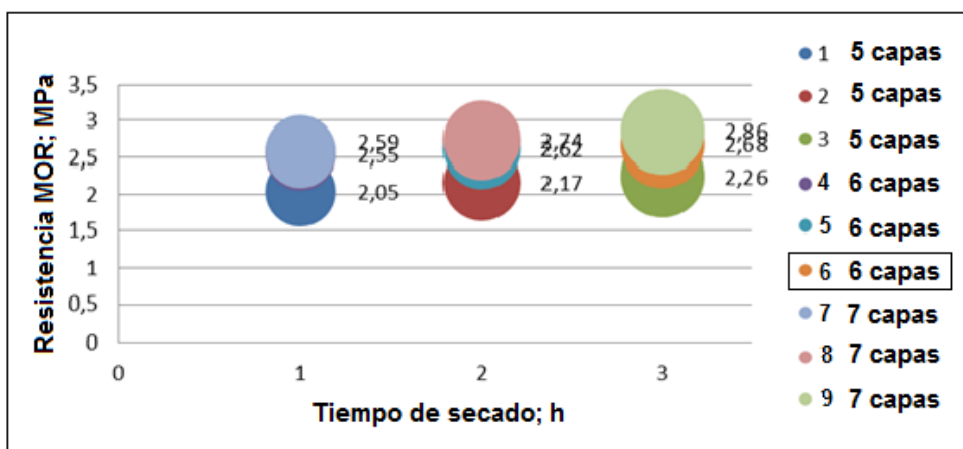


Figura 3.12 Resistencia MOR para todas las capas cerámicas.

En el gráfico anterior se puede observar que existe poca diferencia entre la resistencia MOR del ensayo 8, aportado por la empresa TECAL (7 capas cerámicas y 2 horas de secado) 2,74 MPa y el ensayo 6 perteneciente al grupo 2 basado en la variante de 6 capas de cerámicas a 3 horas de secado, obteniéndose una resistencia MOR de 2,68 MPa (variante encerrada en un cuadro en el gráfico). En tal sentido se propone esta variante para ser utilizada en la empresa TECAL s.a, ya que esta variante es factible desde el punto de vista económico, pues se disminuye una capa de refuerzo, se ahorra material, mano de obra, ya que se consumiría menos materia prima en el arbolito.

Es válido analizar el porqué de la diferencia entre los ensayos 6 y 8 con el ensayo 7 (2,59 Mpa) con 7 capas cerámicas y 1 hora de secado entre cada capa, esto se debe a que con 1 hora de secado no se garantiza el secado de las arenas

refractarias utilizadas para los recubrimientos cerámicos y al sumergirlos en los bombos de caldos de aglutinantes existe un desprendimiento de estas arenas, lo que conlleva un poco espesor en el acabado cerámico de los arbolitos. En el gráfico 3.13 se muestra el comportamiento de los tres ensayos.

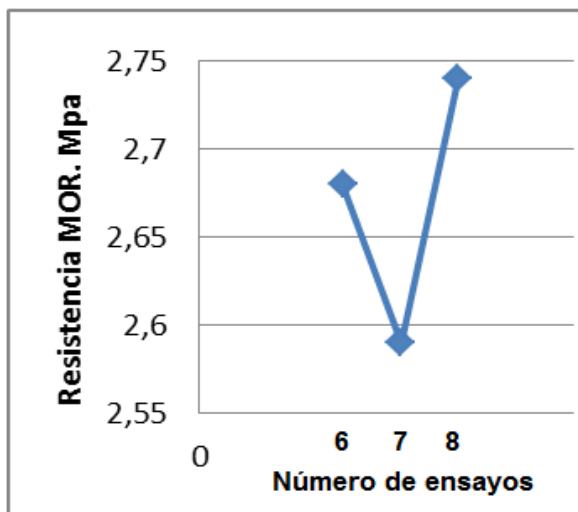


Figura 3.13 Resistencia Mor para los ensayos 6, 7 y 8.

3.4 Comparación entre la tecnología propuesta y la tecnología que se utiliza en la empresa.

Debido a los resultados obtenidos en el ensayo 6, (6 capas cerámica y 3 horas de secado entre cada capa) el cual posee la mayor aproximación entre todas las resistencias MOR calculadas a la resistencia MOR del ensayo 8 que utiliza actualmente la empresa TECAL s.a, se le propone a la planta de MICROFUSIÓN de Camagüey utilizar la tecnología del ensayo 6 que se observa a continuación.

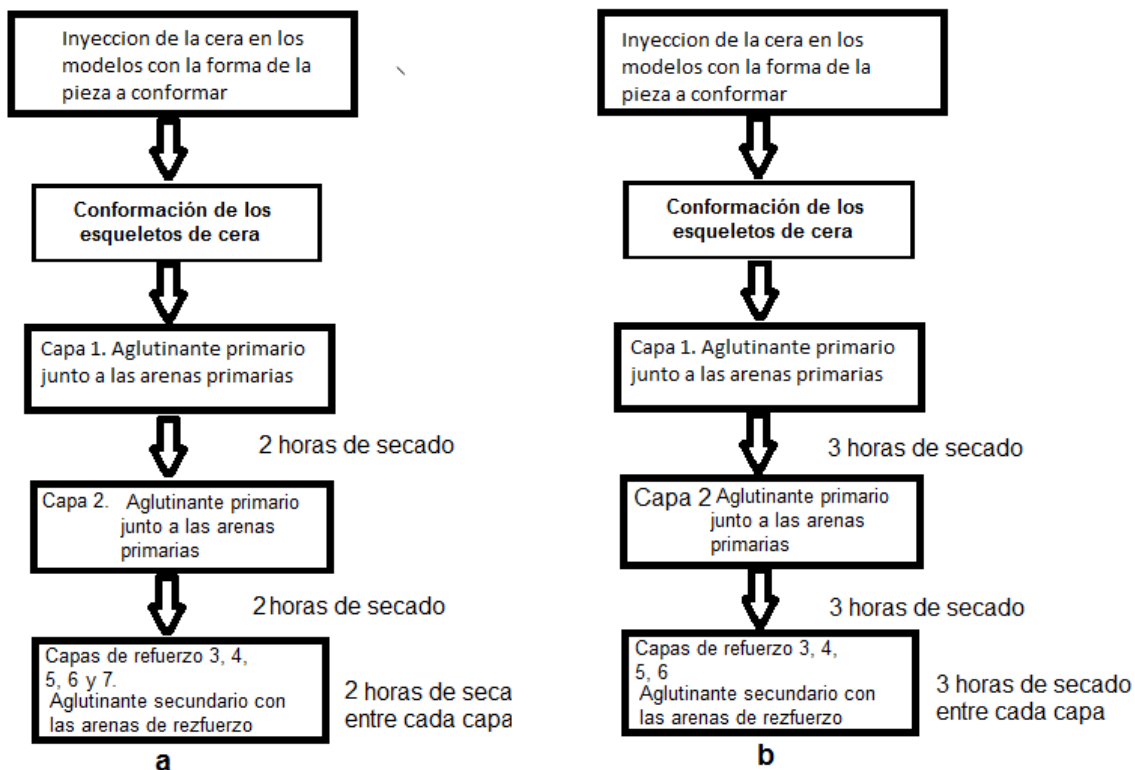


Figura 3.14 Esquema tecnológico utilizado por TECAL s.a (a); esquema tecnológico propuesto (b).

En el esquema se muestra las principales diferencias de las dos tecnologías, el esquema (a) describe la tecnología actualmente utilizada en la empresa TECAL s.a y el esquema (b) la tecnología propuesta. Las principales diferencias están basadas en el número de capas y el tiempo de secado, la tecnología propuesta propone 6 capas de refuerzos y 3 horas de secado, diferenciándose de la anterior en 1 capa de refuerzo menos y 1 hora de secado más.

Estas diferencias ayudan grandemente a la economía de la empresa ya que al disminuir el número de capas empleadas disminuye el consumo de materia y como se mencionó anteriormente estas materias primas son importadas y ostentan un alto precio en el mercado internacional, dicho esto la disminución de las materias primas utilizadas (1 capa menos), compensa la hora aumentada en el tiempo de secado entre cada capa, ya que las cámara donde se efectúa el secado

al ser herméticas mantienen las condiciones de secado deseadas sin un consumo energético significativo.

Es válido señalar que los moldes de la tecnología propuesta se realizarían bajo las mismas condiciones, es decir, los secados se efectuarían bajo la misma humedad de 44 – 45 % y bajo la misma temperatura de 24° C, además estos moldes al tener una capas menos brindan una mejor permeabilidad al verter la fusión metálica ya que los gases se evacuarían con mayor facilidad.

3.5 Estudio económico entre la tecnología propuesta y la tecnología actualmente utilizada en TECAL s.a

La operación en la planta de fundición con la tecnología del ensayo número 6 tendría una serie de ahorros tanto material y económico, así como operacional en la mano de obra, ya que se consumiría menos materia prima al recibir el arbolito una capa refractaria menos, esto compensa menos trabajo para el obrero encargado de dichos recubrimientos. A continuación se muestran las tablas donde aparecen las principales diferencias de las proporciones de materia prima para la conformación del molde de una sola pieza en las fichas de consumo de materiales de la tecnología propuesta y la tecnología empleada en la empresa actualmente.

Tabla 3.1 Materia prima consumida empleando 7 capas cerámicas.

Principales materiales	Cantidad de materia prima consumida, kg; L
Arena de refuerzo Moloquita	0,1600 kg
Aglutinante Customcote	0,1200 L
Arena de refuerzo Ranco Sil	0,0800 kg

A continuación se muestra la tabla donde aparecen los consumos de materiales empleados para un molde cerámico con la tecnología propuesta para la

conformación de una pieza, es decir esta tecnología con una capa de refuerzo menos que la tecnología empleada por TECAL s.a.

Tabla 3.2 Materia prima consumida empleando 6 capas cerámicas.

Principales materiales	Cantidad de materia prima consumida, kg ; L
Arena de refuerzo Moloquita	0,1300 kg
Aglutinante Custmcote	0,0900 L
Arena de refuerzo Ranco Sil	0,0500 kg

Luego de hallar las diferencias entre las cantidades de materia prima consumida por las tecnologías expuesta en las tablas anteriores, representamos en la siguiente tabla los ahorros de materiales obtenidos por la tecnología propuesta y la tecnología empleada actualmente por la empresa.

Tabla 3.3 Diferencia entre el consumo de materiales de la tecnología empleada y la tecnología propuesta.

Principales Materiales	Cantidad de materia prima ahorrada, kg ; L
Arena de refuerzo Moloquita	0,0300 kg
Aglutinante Custmcote	0,0300 L
Arena de refuerzo Ranco Sil	0,0300 kg

Luego de observar los ahorros de materiales de la tabla anterior se reafirma que la tecnología propuesta trae beneficios considerables a la empresa a la hora de conformar una sola pieza. También es válido mencionar que la microfusión es un

proceso que se realiza para la producción de piezas en masas, es decir, que el ahorro no sería solamente para una pieza, sino para miles de piezas.

Para una mejor comprensión se llevó este ahorro de material a una producción habitual de la empresa, realizada en una semana y esta producción sería de alrededor de 5600 piezas, esta al multiplicarla por los ahorros de materiales nos da como resultados los valores mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 3.4 Cantidad de materiales ahorrados para una producción en masa.

Materiales consumido por 5600 piezas	Cantidad de materia prima ahorrada en 5600 piezas
Arena de refuerzo Moloquita	168 kg
Aglutinante Custmcote	168 L
Arena de refuerzo Ranco Sil	168 kg

Como se aprecia en el gráfico anterior el ahorro de materiales logrado en la producción de 5600 es bastante considerable para solamente una semana de operación, este ahorro lógicamente será mayor en un plan de producción anual, el ahorro de estos materiales es fundamental para la empresa ya que todos estos se adquieren por importaciones, es decir, su compra es lograda en el mercado internacional a precios relativamente altos.

CONCLUSIONES

- Se determinó la resistencia MOR de los moldes cerámicos a través del ensayo de flexión variando el tiempo de secado y número de capas para la tecnología actual y la tecnología propuesta, alcanzando valores de 24,3 MPa y 24,0 MPa respectivamente.

- La tecnología propuesta está basada en 6 capas cerámicas y 3 horas de secado, disminuyendo una capa cerámica y aumentando 1 hora de secado con respecto a la tecnología actual.

RECOMENDACIONES

1. Determinar el costo económico en términos monetarios para ambas tecnologías.
2. Realizar el ensayo de permeabilidad la tecnología propuesta para una mejor fiabilidad de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

- Albadejo.G.J. Técnica de fundición por crisol fusible. Recursos para un desarrollo individualizado. Proyecto de investigación. Sta Cruz de Tenerife.
- Blanco. A.1971. Arte Griego. C.S.I.C. Madrid.
- Catálogo de equipos. MICROFUSION CATALANA.
- Cellini. B. 1989. Tratados de orfebrería, escultura, dibujo y arquitectura. Madrid.
- Claude.R. 1977. Aislamiento acústico y térmico en la construcción. Editores técnicos asociados s.a. Barcelona.
- Corredor.M.J. 1997. Técnicas de fundición artística. Universidad de Granada.
- Gerling.H. 1979. Moldeo y conformación. Libro De Consulta Acerca De Los ProcedimientosDe Fabricación. Ed Reverte.
- Lopez . K. 2008. Fabricación de moldes de microfusión mediante el empleo de materiales alternativos al silicato de zirconio. X Congreso Nacional de Materiales. Donostia San Sebastián.
- Lozano. R. I. 2011. Nuevos modelos gasificables aplicados a la técnica de la cascarilla cerámica uso pinturas refractarias. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Mrcos. C. 2000. Fundición a la cera perdida. Técnica de la cascarilla cerámica. Departamento de escultura. Valencia.
- Martinez. C. M. 2001. Fundición a la cera perdida técnica de la cascarilla cerámica. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Martin. S. O. 2005. Escultura en cascarilla cerámica. Acto del Congreso Nacional de Bellas Artes. Universidad la Laguna.
- Mohen. J. P.1992. Metalurgia Prehistórica. Introducción a la Paleometalurgia.EdMasson, s.a. Paris.

- Navarro. L. J. 2002. Maquetas, modelos y moldes; materiales y técnicas para dar forma a las ideas. Castello de la Plana.
- Petrillo. L. 2009. Experiencias y estudios de resistencia de la cascarilla cerámica para su uso como material escultórico. En libro de actas II Congreso Nacional de Investigación en fundición artística. Valencia.
- Petrillo. L. 2012. La cascarilla cerámica como material escultórico. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona.
- Revista del Instituto de Investigación FIGMMG. 2008. Permeabilidad y resistencia mecánica de cascara cerámica empleadas en el proceso de microfusión.
- Varela. P. G. 2001. Propiedades de moldes de fundición de precisión, módulo de elasticidad en flexión. Jornadas Sam Conamet. Universidad Nacional de Rio Cuarto.
- Wen. H. S. 2009. Effect of oil palm fibre addition on the mechanical properties of shell mould investment casting. Universidad de Malasya.

ANEXOS

Anexo # 1. Montaje en el tronco del esqueleto de los modelos de las probetas en cera.



Anexo # 2. Recubrimiento de los esqueletos de cera con los aglutinantes refractarios.



Anexo # 3. Recubrimiento de los esqueletos con arenas refractarias.



Anexo # 4. Ensayo de flexión realizado a las probetas para la obtención de la resistencia MOR.

