

**COMPORTAMIENTO DEL REVESTIMIENTO DE YESO MODIFICADO Y SU  
RESPUESTA AL PROCESO ANTIOCH.**

**OSCAR LEONARDO SANABRIA GONZALEZ**

**HENRY JAIR MARTINEZ BONILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – QUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2014**

**COMPORTAMIENTO DEL REVESTIMIENTO DE YESO MODIFICADO Y SU  
RESPUESTA AL PROCESO ANTIOCH.**

**OSCAR LEONARDO SANABRIA GONZALEZ**

**HENRY JAIR MARTINEZ BONILLA**

**Trabajo de Grado para optar el título de:**

**INGENIERO METALURGICO**

**DIRECTOR:**

**ARNALDO ALONSO BAQUERO**

**Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍA FISICO – QUIMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

A **DIOS**, por ser la luz que ilumina el sendero que a diario camino, a él todo le debo. ¿Si Dios conmigo quien contra mí?

A mi madre **GLORIA FANNY GONZALEZ BUENO**, por su infinito amor, su paciencia y apoyo incondicional, por demostrarme el verdadero poder de los buenos actos y su debida recompensa.

A mi padre **LEONARDO SANABRIA ROMERO**, por su infinito amor, sus consejos que me hicieron crecer como persona, por enseñarme lo bueno y lo malo y confiar en mí. Este logro es tuyo.

A mi hermana **DANIELA SANABRIA**, por ser una parte fundamental en mi vida.

A mi padrino **WILSON SANCHEZ CARRILLO**, por ser más que un papá, por quererme con todo su corazón y estar conmigo en cada etapa importante para mí.

A mi **FAMILIA**, por su gran apoyo.

*Aquellas personas que fueron importantes en mi formación personal y profesional.*

*Aquellas personas que nos rodean y otras que, ahora no se encuentran con nosotros, que dejaron su enorme granito de arena. Para todas aquellas personas que confiaron en mí y me dieron su apoyo y amistad.*

**Oscar Leonardo Sanabria González**

## DEDICATORIA

*A Jehová Dios. Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado la vida para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

*A mi mamá **MARTHA CECILIA BONILLA ORTIZ**, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, por su ejemplo de perseverancia y constancia, por sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, por ser la persona que me enseñó a ser quien soy, pero más que nada, por su amor incondicional.*

*A mi papá **HENRY MARTINEZ BUENO**, por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

*A mis hermanos, por su constante amor inexplicable para mi superación personal, porque siempre me han apoyado incondicionalmente.*

*Gracias a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado.*

*A mis maestros que en este andar por la vida, influyeron con sus lecciones y experiencias en formarme como una persona de bien y preparada para los retos que pone la vida, a todos y cada uno de ellos les dedico cada una de estas páginas de mi tesis.*

**Henry Jair Martínez Bonilla.**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pag.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>18</b>
<b>IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>20</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>21</b>
1.1 Objetivo general.	21
1.2 Objetivos específicos.	21
<b>2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1 Clasificación del yeso según las condiciones de cocción [8]	23
2.2 REACCIÓN QUÍMICA	24
2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FRAGUADO	25
2.3.1 Teoría del Fraguado	25
2.3.2 Medición del tiempo de Fraguado	27
2.3.2.1 Aguja de Vicat	28
2.3.3 Control del tiempo de fraguado	28
2.3.4 Control del fraguado por la relación Agua-Yeso	29
2.3.4.1 Control del fraguado por la relacion agua polvo	30
2.3.5 Control del fraguado en el mezclado	30
2.4 PERMEABILIDAD	31
2.4.1 Definición	31
2.4.2 Norma para determinar la permeabilidad en seco	32
2.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO	32
2.6 PROCESO ANTIOCH	33
2.6.1 Materiales para moldes y machos.	35
2.6.2 Patrón.	35
2.6.3 Deshidratación y Rehidratación	35
2.6.4 Temperatura de secado	36

<b>2.7 MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS PARA LA ELABORACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO DE GRADO</b>	<b>36</b>
<b>2.7.1 Chamota [16]</b>	<b>36</b>
2.7.1.2 Propiedades de la chamota	37
TABLA 2. Propiedades de la chamota.	37
<b>2.7.2 Magnesita</b>	<b>37</b>
<b>2.7.2.1 Propiedades físicas</b>	<b>38</b>
2.7.2.2 Propiedades químicas	38
<b>2.7.3 Talco industrial</b>	<b>39</b>
<b>2.7.4 Cemento portland</b>	<b>39</b>
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
<b>3.1 Revisión bibliográfica.</b>	<b>40</b>
<b>3.2 Obtención y especificación de materias primas, equipos y condiciones de trabajo de estos.</b>	<b>41</b>
<b>3.3 Fabricación de las probetas de yeso</b>	<b>41</b>
<b>3.4 Someter las probetas al proceso Antioch variando temperatura y presión</b>	<b>43</b>
<b>3.5 Medir la permeabilidad y la resistencia a la compresión en seco de las probetas en yeso</b>	<b>44</b>
<b>3.6 Verificar la respuesta del yeso modificado y el proceso en general</b>	<b>44</b>
<b>3.7 Resultados</b>	<b>47</b>
<b>3.8 Análisis de resultados</b>	<b>60</b>
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>64</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>66</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama para el desarrollo del trabajo de grado.	Pág. 40
<b>Figura 2.</b> Probetas en acero inoxidable con base de caucho vulcanizado y desmoldeador (silicona).	Pág. 42
<b>Figura 3.</b> Autoclave marca Parr.	Pág. 43
<b>Figura 4.</b> Preparación del arbolito en cera en la base de goma.	Pág. 45
<b>Figura 5.</b> Cilindro de acero.	Pág. 45
<b>Figura 6.</b> Proceso de Inyección del metal en el interior del molde sin aplicar vacío.	Pág. 46
<b>Figura 7.</b> Aparato Vicat.	Pág. 47
<b>Figura 8.</b> Revestimiento fabricado con el refractario de magnesita y con una granulometría de pasante de 140 destruidas por después del proceso autoclave.	Pág. 49
<b>Figura 9.</b> Distribución y tamaño de los poros, revestimiento fabricado con magnesita. 6 horas de proceso. 50X-Hirox.	Pág. 55
<b>Figura 10.</b> Distribución y tamaño de los poros, revestimiento fabricado con chamota. 6 horas de proceso. 50X-Hirox.	Pág. 55
<b>Figura 11.</b> Distribución y tamaño de los poros, revestimiento fabricado con chamota. 6 horas de proceso. 50X-Hirox.	Pág. 56
<b>Figura 12.</b> Molde de revestimiento de yeso modificado con refractario de magnesita fisurado después de la inyección del metal, sometido del proceso Antioch.	Pág. 57
<b>Figura 13.</b> Anillo fundido con la aleación Al4-Zn. Con vacío.	Pág. 57
<b>Figura 14.</b> Anillo fundido con la aleación Al4-Zn. Sin vacío, molde húmedo	Pág. 58
<b>Figura 15.</b> Anillo fundido con la aleación Al4-Zn. Sin vacío.	Pág. 58
<b>Figura 16.</b> Anillo fundido con la aleación Al14-Zn. Sin vacío.	Pág. 59
<b>Figura 17.</b> Anillo fundido con la aleación Cu4-Ag. Sin vacío.	Pág. 59

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación del yeso según condiciones de cocción.	Pág. 23
<b>Tabla 2.</b> Propiedades de la chamota.	Pág. 37
<b>Tabla 3.</b> Propiedades físicas de la magnesita.	Pág. 38
<b>Tabla 4.</b> Propiedades químicas de la magnesita.	Pág. 38
<b>Tabla 5.</b> Proporciones de cada material empleado en el revestimiento.	Pág. 41
<b>Tabla 6.</b> Registro de tiempo-penetración, revestimiento con magnesita. a:p 0,65. Malla pasante 100	Pág. 48
<b>Tabla 7.</b> Lecturas de permeabilidad obtenidas con el revestimiento a base de magnesita, granulometría pasante malla 100.	Pág. 49
<b>Tabla 8.</b> Lecturas de permeabilidad obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 100.	Pág. 50
<b>Tabla 9.</b> Lecturas de permeabilidad obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 140.	Pág. 50
<b>Tabla 10.</b> Lecturas promediadas de pérdida en gramos (porcentaje de pérdida) obtenidas con el revestimiento a base de magnesita, granulometría pasante malla 100.	
<b>Tabla 11.</b> Lecturas promediadas de pérdida en gramos (porcentaje de pérdida) obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 100.	Pág. 51
<b>Tabla 12.</b> Lecturas promediadas de pérdida en gramos obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 140.	Pág. 52
<b>Tabla 13.</b> Lecturas de la resistencia a la compresión en seco obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 100.	Pág. 53

**Tabla 14.** Lecturas de la resistencia a la compresión en seco obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 140.

Pág. 53

**Tabla 15.** Lecturas de la resistencia a la compresión en seco obtenidas con el revestimiento a base de magnesita, granulometría pasante malla 100.

Pág. 53

## LISTA DE GRAFICAS

- Grafica 1.** Variación de la permeabilidad promedio con el tiempo de residencia en autoclave a 128°C y 2 atm. Pág. 51
- Grafica 2.** Variación de la permeabilidad promedio con el tiempo de residencia en autoclave a 128°C y 2 atm. Pág. 52
- Grafica 3.** Variación de la compresión en seco promedio con el tiempo de residencia en autoclave a 128°C y 2 atm. Pág. 54

## **LISTA DE ANEXOS**

<b>ANEXO A.</b> Resultados de Difracción de Rayos-x para los refractarios de chamota y magnesita.	Pág. 66
<b>ANEXO B.</b> Resultados de Fluorescencia de Rayos-x para los refractarios de chamota y magnesita.	Pág. 67
<b>ANEXO C.</b> Secuencia de Operación empleado para la producción de Moldes en yeso Por el Proceso Antioch.	Pág. 68
<b>ANEXO D.</b> Otros equipos empleados durante el presente trabajo de grado.	Pág. 69
<b>ANEXO E.</b> Partes del autoclave Parr.	Pág. 71
<b>ANEXO F.</b> Árboles en cera.	Pág. 72

## RESUMEN

**TITULO:** COMPORTAMIENTO DEL REVESTIMIENTO DE YESO MODIFICADO Y SU RESPUESTA AL PROCESO ANTIOCH. \*

### AUTORES

SANABRIA González Oscar Leonardo

MARTINEZ Bonilla Henry Jair \*\*

### PALABRAS CLAVES

Permeabilidad, resistencia a la compresión en seco, proceso Antioch, autoclave.

### DESCRIPCIÓN

El yeso es un material cerámico abundante en la corteza terrestre, es empleado en diferentes industrias siendo la más destacada en joyería. La principal desventaja de los moldes de yeso para la elaboración de joyas es su baja permeabilidad, limitando el escape de los gases de la cavidad del molde durante la inyección del metal y su baja resistencia a altas temperaturas, además se debe someter a un tratamiento térmico a elevada temperatura (700 °C) para que se pueda completar la transformación del cuarzo y de la cristobalita, las cuales sufren fenómenos de expansión y contracción que afectan la estructura del molde causando fisuras.

Estas limitantes pueden ser resueltas de varias formas, siendo la principal, usar composiciones especiales del molde y un tratamiento conocido como proceso Antioch. Una de la finalidad de este proceso es aumentar la permeabilidad de los moldes. De esta manera, se puede disminuir la temperatura de los moldes durante la colada (<370°C). Este proceso consiste en utilizar cerca de un 50% de arena refractaria mezclada con yeso y algunos aditivos para proporcionarle resistencia mecánica y estabilidad térmica a dicho revestimiento, calentar el molde en una autoclave (reactor que usa vapor sobrecalentado a presión), y después secar.

Si los moldes sin secar son parcialmente deshidratados y luego dejados rehidratar sin interrumpir el proceso, los cristales recristalizan lentamente en forma de gránulos aproximadamente del tamaño de los granos de arena, y el molde adquiere una estructura porosa, de permeabilidad alta. El molde resultante tiene una permeabilidad considerable más grande, comparado con permeabilidades alrededor de 1 y 2 AFS obtenidas convencionalmente con moldes de yeso

Este tipo de estudios tiene la finalidad de mejorar el pre-engaste en joyas, de esta manera se pretende aumentar el uso de esta técnica en la joyería local y un crecimiento de esta.

---

\*Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Ing. Arnaldo Alonso Baquero

## ABSTRACT

**TITLE:** BEHAVIOR OF COATING OF MODIFIED PLASTER AND ITS RESPONSE TO ANTIOCH PROCESS.\*

**AUTHORS:**

SANABRIA González Oscar Leonardo

MARTINEZ Bonilla Henry Jair \*\*

**KEYWORDS**

Permeability fired compressive strength, Antioch process, autoclave.

**DESCRIPTION**

Gypsum is an abundant ceramic material in the earth's crust, is used in different industries being the most prominent in jewelry. The main disadvantage of plaster molds for making jewelry is its low permeability, limiting the escape of gases from the mold cavity during the injection of metal and low temperature resistance, must be subjected to further heat treatment at elevated temperature (700°C) so that it can complete the processing of quartz and cristobalite, which undergo expansion and contraction phenomena that affect the structure of the mold causing cracks.

These limitations can be resolved in several ways, the main, use special mold compositions and treatment process known as Antioch. One purpose of this process is to increase the permeability of the molds. Thus, it may decrease the temperature of the mold during casting (< 370°C). This process is to use about 50% of refractory sand mixed with gypsum and some additives to provide mechanical strength and thermal stability to said coating, heating the mold in an autoclave ( reactor pressure using superheated steam), and then dried.

If the molds are undried partially dehydrated and then rehydrated left without interrupting the crystals recrystallized slowly into pellets about the size of sand grains, and the mold takes a porous structure with high permeability. The resulting mold has a considerably larger permeability compared with permeabilities around 1 and 2 AFS conventionally obtained with plaster casts.

This type of study is intended to improve the pre - crimping jewelry, so is to increase the use of this technique in the local jewelry and this growth.

---

\*Graduation Project

\*\* School of Physical and Chemical Engineering. Metallurgical Engineering and Materials Science.  
Director Ing Arnaldo Alonso Baquero

## INTRODUCCIÓN

El yeso es un constituyente importante para los recubrimientos, debido a que al mezclarse con agua forma una pasta fluida y al reaccionar con esta se endurece formando una masa sólida. Esto puede ser vertido dentro y alrededor de los modelos para rellenar los diseños detallados. Como esto es sólido conservará su forma y tendrá gran precisión en las fundiciones de metales. Cuando se mezcla con los materiales refractarios y productos químicos adecuados el yeso conserva estas características y es por lo tanto muy adecuado para los recubrimientos en la joyería.

En la actualidad el empleo del yeso como aglomerante junto a un refractario se emplea en los moldes para elaborar joyas de todo tipo. Yeso, sulfato de calcio hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), se utiliza para producir un material de unión. Los productos químicos se utilizan para controlar las propiedades de tiempo de trabajo y la fluidez, así como para acentuar varias otras propiedades del recubrimiento.

Uno de los modos más habituales de elaborar un molde para fundir anillos se llama "a la cera perdida", donde el anillo se graba en cera, se moldea y luego se calienta para eliminar la cera, dejando un molde vacío. El yeso permite obtener piezas fundidas con alta precisión dimensional y excelente acabado si es empleado como material de moldeo.

Los moldes para fundición en yeso son similares a los de fundición en arena, excepto que el molde está hecho de yeso ( $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) en lugar de arena. Se mezclan aditivos como el talco, material refractario y cemento con el yeso para controlar la contracción y el tiempo de fraguado, reducir agrietamientos e incrementar las resistencias. El curado del molde de yeso es una de las desventajas de este proceso, al menos para altos volúmenes de producción.

El molde debe dejarse fraguar cerca de 20 minutos antes de sacar el modelo y, posteriormente, debe cocerse por varias horas para remover la humedad. Aún cocido, el yeso no se desprende de todo el contenido de humedad. El problema que enfrentan los fundidores es que la resistencia del molde se pierde cuando el yeso se deshidrata y, en el caso contrario, la humedad remanente puede causar defectos en el producto de fundición, por tanto es necesario encontrar un balance entre las alternativas indeseables.

Otra desventaja del molde de yeso es que no es permeable, limitando el escape de los gases de la cavidad del molde. Este problema puede resolverse de varias

maneras, siendo la principal, usar composiciones especiales del molde y un tratamiento conocido como proceso Antioch. Este proceso consiste en utilizar cerca de un 50% de arena mezclada con yeso, calentar el molde en una autoclave (estufa que usa vapor sobrecalentado a presión), y después secar. Si los moldes sin secar son parcialmente deshidratados y luego dejados rehidratar sin interrumpir el proceso, los cristales recristalizan lentamente en forma de gránulos aproximadamente del tamaño de los granos de arena, y el molde adquiere una estructura porosa, de permeabilidad alta. El molde resultante tiene una permeabilidad considerable más grande, comparado con permeabilidades alrededor de 1 y 2 AFS obtenidas convencionalmente con moldes de yeso.

En este trabajo de grado se desea reemplazar el refractario de arena con base de sílice por otros dos tipos de refractarios como lo son la chamota y la magnesita para observar sus propiedades de permeabilidad y la resistencia a la compresión en seco.

## IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los moldes de yeso no pueden soportar altas temperaturas, por esto no se pueden fabricar piezas de aleaciones ferrosas, además tienen como limitante la necesidad de someter a un tratamiento térmico a elevada temperatura (700 °C) para que se pueda completar la transformación del cuarzo y de la cristobalita, las cuales sufren fenómenos de expansión y contracción que afectan la estructura del molde causando fisuras.

Ante esto se ve la necesidad de cambiar el revestimiento, adicionando un refractario con mayor estabilidad térmica, como lo son la magnesita y chamota. A los moldes fabricados con estos refractarios se someterán al proceso Antioch. Una de la finalidad de este proceso es aumentar la permeabilidad de los moldes. De esta manera, se puede disminuir la temperatura de los moldes durante la colada (<370°C).

Este tipo de estudios tiene la finalidad de mejorar el pre-engaste en joyas, de esta manera se pretende aumentar el uso de esta técnica en la joyería local y un crecimiento de esta.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 Objetivo general.

Analizar la respuesta del yeso modificado utilizando el proceso de autoclave.

### 1.2 Objetivos específicos.

- Valorar la permeabilidad del yeso modificado por los métodos A.F.S y por densidad aparente en función del tiempo de residencia en el autoclave.
- Evaluar la resistencia a la compresión en seco del yeso modificado en función del tiempo de residencia en el autoclave.
- Verificar mediante prototipo la bondad o respuesta del proceso en general.

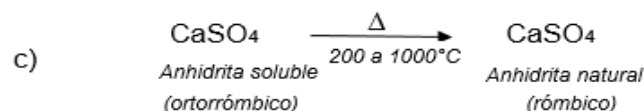
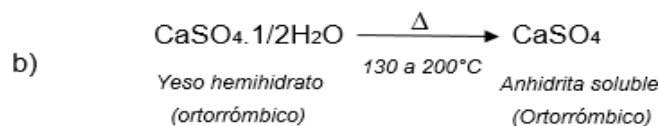
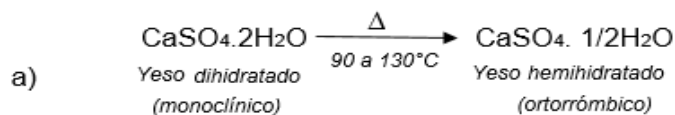
## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El yeso dihidrato (roca de yeso, gipso o aljez), es un mineral cerámico generalmente incoloro o blanco, que algunas veces puede llegar a tener un color marrón o gris, se encuentra presente en la corteza terrestre en forma muy abundante y está formado por carbonato de calcio y magnesio, óxido férrico, alúmina, entre otros. El yeso en su forma natural se puede encontrar en diversas formas, aspectos y asociaciones, dependiendo del estado de formación geológica. El yeso se presenta naturalmente con estructura cristalina (cristales de forma monoclinicas), estratificado o aglomerado y otras en forma lenticular y fibrosa.

Las diferentes propiedades y calidad se obtienen provenientes de otros factores tales como: Método aplicado en la deshidratación, tiempo y temperatura de deshidratación, tamaño de la partícula del producto final, grado de selección aplicada, calidad y composición de la piedra cantera.

Desde la década de los 90 se han realizado diferentes estudios de los tratamientos térmicos para mejorar las propiedades de los recubrimientos de yeso como la permeabilidad, estabilidad térmica, y algunas propiedades mecánicas, cuando este se trabaja con ciclos a elevadas temperaturas, con modificaciones en la composición original. Los materiales que forman el revestimiento de yeso son la Sílice la cual existe en varias formas cristalinas, que se utilizan en la producción de polvos de recubrimientos. [12]

El sulfato de calcio con dos moléculas de agua, por acción del calor se transforma en semihidrato y este a su vez se descompone por la misma acción del calor en sulfato anhidro. Los siguientes son los rangos de temperatura en los cuales ocurren las transformaciones del yeso al calentarlo [16]:



En el proceso de calcinación el yeso dihidratado en un rango de temperatura de 90 a 130°C pierde parte de esa agua de cristalización, la cual se evapora formándose el sulfato de calcio hemihidratado, este es el principal componente de los yesos utilizados en el moldeo. A temperaturas mayores de 130°C el yeso puede continuar perdiendo agua, hasta llegar al estado de anhidrita.

Todas las formas de sulfato de calcio dihidratado son termodinámica y cristalográficamente equivalentes, dependiendo únicamente de su pureza. Su forma puede ser de agujas, de conchas o prismática.

Como se muestran en las reacciones (a, b, c), a medida que se eleva la temperatura o se mantiene en las vecindades de 130°C, el hemihidrato pierde agua de cristalización para formar un compuesto soluble conocido como anhidrita soluble. Por encima de 200°C se forma anhidrita de gipso encontrada en la naturaleza. Aproximadamente a los 1200°C el sulfato de calcio se descompone químicamente. [10]

### 2.1 Clasificación del yeso según las condiciones de cocción [2]

Existen dos formas diferentes de hemihidrato, dependientes del método de calcinación. Si bien todos los yesos de piedra (hemihidrato  $\alpha$ ) necesitan menos agua que los yesos comunes (hemihidrato  $\beta$ ), las cantidades requeridas también varían de acuerdo con los diferentes tipos de yesos que se trate, esta diferencia se puede atribuir al distinto tamaño de las partículas de los cristales, a mayor tamaño se necesitara menos cantidad de agua con respecto al yeso, uno de los métodos para controlar el tamaño del hemihidrato  $\alpha$  es el de incorporar durante la calcinación una sustancia química dentro del autoclave.

**Tabla 1.** Clasificación del yeso según condiciones de cocción.

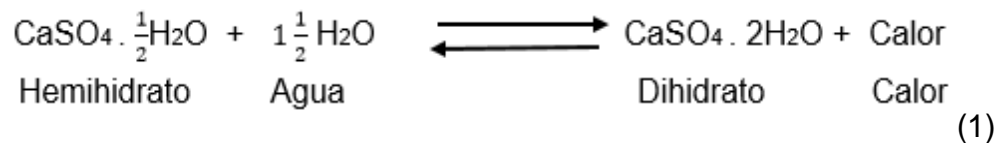
<b>Hemidrato <math>\alpha</math></b>	<b>Hemidrato <math>\beta</math></b>
Aspecto sedoso y brillante	Aspecto terroso
se obtiene por autoclave de 120-170°C(atmosfera saturada de vapor de agua)	Fabricado en calderas
Más compacto	Mayor tiempo de fraguado
mayores características constructivas	menos estable
Mayor resistencia a la tracción y compresión	menor estabilidad

**Fuente.** Autores

La diferencia de los hemidratos  $\alpha$  y  $\beta$  ha sido tratada de resolver por diferentes métodos, todos ellos muy discutidos. Parece ser que el A.T.D (análisis térmico diferencial) es la técnica más segura para identificarlos, detallando para cada caso el paso detallando para cada caso el paso del hemihidratado a la anhidrita insoluble.

## 2.2 REACCIÓN QUÍMICA

Cuando se le añade agua al semihidrato y algunas anhidritas tienen capacidad de endurecer (fraguar), quedando el yeso fraguado en su estado original (yeso dihidrato):



La doble flecha indica que esta reacción es reversible. Esto es durante el consumo del recubrimiento que esta reacción se invierte; aproximadamente a 262°F (128 °C) el gypso liberará una parte del agua adjunto molecularmente para formar yeso. El yeso puede ser obligado a liberar su agua molecular mediante calentamiento a aproximadamente 325 ° F (163 ° C)<sup>1</sup>. El compuesto resultante es sulfato de calcio anhidrita (CaSO<sub>4</sub>). Es importante eliminar toda el agua antes de la colada, para que no se escape durante la colada y causar defectos o incluso salpicaduras del metal fundido fuera del molde. [18]

El producto de la reacción del gipso y el calor desarrollado por la reacción, es equivalente al calor empleado en la calcinación. El mecanismo exacto del fraguado o endurecimiento es debido a la diferencia entre la solubilidad de la forma hemihidratada y la forma dihidratada. [7]

Durante el fraguado se produce el crecimiento y el consiguiente entrelazamiento de los cristales de yeso. Los procedimientos de manipulación que influyen en las diferencias entre las solubilidades mencionadas y en el crecimiento de los cristales del dihidrato pueden influir sobre las propiedades físicas y mecánicas de la masa del yeso.

<sup>1</sup> Petersen, Donald J., KAleta, Norbert W., Kingston Larry W., "Encyclopedia of Chemical Technology," Kirk-Othmer, 4<sup>th</sup> ed., vol. 4, pg. 813

## 2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FRAGUADO

### 2.3.1 Teoría del Fraguado

Las reacciones que se producen entre el hemihidrato y el agua son complejas y están principalmente basadas en el hecho, que las distintas formas de sulfato de calcio poseen diferentes solubilidades en el agua. De acuerdo con el calor exotérmico o con la elevación de la temperatura en función del tiempo transcurrido, se puede predecir el régimen de la reacción.

Se han planteado diversas teorías para explicar el mecanismo del yeso, siendo la teoría coloidal y cristalina como las más conocidas e importantes. En 1887 la teoría cristalina fue propuesta por el químico Henry Louis Le Chatelier, un estudio muy completo sobre sus propias investigaciones, y la recopilación de antecedentes, que se inician probablemente en Lavoisier, en 1907 recibió el apoyo del famoso químico danés Jacobus H. Van 't Hoff (primer premio Nobel de química en 1901). Pocos años después, en 1892, W. Michaelis planteó una teoría basada en la existencia de materia en estado coloidal en el yeso hidratado.

Le Chatelier realizó sus primeras investigaciones con yeso deshidratado y trató de aplicar estos conocimientos a los cementos siendo este aspecto muy notable en los trabajos de Vicat.

La tesis de Le Chatelier publicada en 1882 expresa, en resumen, cuatro condiciones para obtener el fraguado y endurecimiento de una sustancia:

- que se disuelva en agua una sal anhidra o parcialmente hidratada,
- que se produzca un nuevo compuesto de mayor grado de hidratación y con menor solubilidad para formar una solución saturada,
- que tenga lugar una formación de cristales,
- que los cristales, en relación a su medio, sean coherentes y adherentes.

Los siguientes pasos fueron la explicación del químico J. H. Van 't Hoff, sobre la teoría del fraguado:

- Cuando se mezcla el hemihidrato con el agua, se forma una suspensión de hemihidrato. En esta etapa la mezcla es completamente fluida.
- El hemihidrato forma una solución de sulfato de calcio extremadamente saturada en relación con el dihidrato que se ha de formar.

- Los iones de sulfato de calcio en solución sobresaturada, difunden para precipitar o cristalizar alrededor de núcleos de cristalización, por lo general, compuesto de cristales de gipso.

En conclusión, la causa que provoca el fraguado de estos materiales, es la diferencia entre la solubilidad del sulfato de calcio dihidratado y la del hemihidrato. [5]

En 1892, W. Michaelis resumió sus largas experiencias sobre el tema en una teoría basada en la existencia de materia en estado coloidal en el yeso hidratado.

- Admite en la hidratación de las pastas de gipso la formación de productos cristalinos: aluminatos, sulfoaluminatos e hidróxido de calcio, que dan lugar al fenómeno del fraguado, aunque no pueden explicar el fraguado bajo agua.
- Observa la formación de silicatos hidratados y atribuye a su escasa solubilidad la producción de un gel amorfo. Este gel es deshidratado por la absorción del agua que producen las partículas del propio yeso aun sin hidratar, explicando así como es posible el endurecimiento en el seno del agua.

Estas dos tesis han aparecido, en principio como contingentes y han sido seguidas por otros investigadores, manteniéndose como división de opiniones durante muchos años. Un estudio muy documentado sobre este tema ha sido realizado por el científico estadounidense Robert Herman Bogue, que amplía su teoría al admitir una fase en la que todos los productos que son producidos en la hidrólisis pasan al estado coloidal, fase que denomina “coloidación” y a la cual se debe el fenómeno del fraguado. Posteriormente, las sustancias geles se transforman en agregados cristalinos, siendo a esta fase, denominada “cristalización”, a la que se le atribuye el endurecimiento [9].

Donnan ha tratado de explicar los principios físicos y químicos que dan lugar al fenómeno de la recristalización, es decir, la nueva formación de cristales de un sistema sólido en equilibrio con su fase líquida por redisolución previo. Las fuerzas de compresión aumentan diferencialmente la solubilidad de las fases sólidas en los puntos de contacto y originan el crecimiento de cristales en las zonas sometidas a esfuerzos. Ello da lugar a lo que el autor llama “puentes cristalinos del material precipitado”. El tamaño desigual de las partículas cristalinas cambia el valor de la razón superficie/volumen y da lugar a que la capa de disolución de la partícula fina no esté en equilibrio con la capa de la partícula de mayor tamaño, produciéndose una recristalización que produce el efecto cementante.

Análogamente, las sustancias metaestables formadas en la precipitación de compuestos insolubles tienen una mayor solubilidad que las cristalinas estables, por lo que las fases cristalinas tienen a aumentar a expensas de aquellas [9].

La integración de estas acciones múltiples conduce a la cementación cristalina de la masa aglomerante, según la teoría de Donnan.

Neville observó que en el yeso se produce el fraguado inicial antes que la manifestación exotérmica de la hidratación. Ello indica la posibilidad de que se forme un estado de gel inicial, transitorio, que es corroborado por la contracción simultánea que la masa experimenta en el inicio del fraguado y que antecede a una sensible expansión durante la consiguiente cristalización y efecto exotérico.

Finalmente, autores posteriores como Desh y Hatschek han indicado que las discrepancias de las dos tesis, aparentemente contingentes, eran debidas a que se trataba de dos aspectos distintos del fenómeno. En este sentido las dos teorías se complementan y permiten una visión más amplia del fenómeno, como expresión de dos formas del estado sólido reales distintos y coexistentes.

Se ha resumido brevemente la evolución de las ideas sobre el fenómeno del fraguado y el del endurecimiento, los dos hechos fundamentales han sido la existencia del estado cristalino y del coloidal [9].

### **2.3.2 Medición del tiempo de Fraguado**

El tiempo de fraguado inicial representa la velocidad del proceso de la reacción química y desde el punto de vista práctico, da una idea del tiempo disponible para trabajar con el material. Para diferentes técnicas se puede considerar distintas etapas de la reacción química como fragua inicial, ya que los resultados varían de acuerdo al método utilizado. El tiempo final, en cambio, es considerado como el tiempo que tarda la reacción química en estar prácticamente finalizada.

En general los tiempos de fraguado inicial y final se miden arbitrariamente por medio de un ensayo de penetración, aunque se han ideado otros tipos de métodos de ensayo. Por ejemplo, la pérdida de brillo de la superficie de una mezcla de yeso piedra, es el indicio de una etapa de la reacción química y algunas veces se utiliza para indicar el tiempo de fraguado inicial. De manera similar se puede medir el tiempo de fraguado por medio del aumento de la temperatura de la masa ya que la reacción es exotérmica.

Los ensayos de penetración son los más comunes y populares de los utilizados. Las agujas Gillmore<sup>2</sup>, y la aguja Vicat<sup>3</sup>, son los elementos más frecuentes para determinar los tiempos de fraguado final e inicial de los yesos.

### **2.3.2.1 Aguja de Vicat**

En este método se utiliza el aparato de Vicat que se utiliza en la determinación de la consistencia normal, con la diferencia de que en el extremo inferior, en lugar del émbolo, se coloca una aguja de 1 mm de diámetro. El procedimiento resumido es que primero se elabora una pasta con el contenido de humedad determinado en la prueba de consistencia normal, que se introduce en un molde de tronco cónico de dimensiones estándar, en cuya parte superior se coloca la aguja de 1 mm de diámetro, el cual soporta un émbolo con una masa de 300 g y se deja que penetre en la pasta de cemento por su propio peso durante un lapso de 30 segundos. La primera lectura se realiza en 30 minutos luego que se moldea sin ser alterada en un cuarto de curado y luego se realizan lecturas a intervalos de 15 minutos hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menor. Con esta serie de datos se determina por interpolación el tiempo correspondiente a una penetración de 25 mm y éste será el tiempo de fraguado inicial del cemento. Posteriormente se realizan penetraciones hasta determinar el primer instante en el cual la aguja no deja huella visible en la pasta endurecida de cemento, y se registra como el tiempo de fraguado final.

### **2.3.3 Control del tiempo de fraguado**

El tiempo de fraguado del yeso puede ser modificado con relativa facilidad. Por ejemplo, el yeso puede tomar humedad de la atmósfera y transformarse en dihidrato, lo que altera el tiempo de fraguado y otras propiedades. La velocidad de la reacción (1) puede también modificarse agregando agentes químicos para acelerarla o retardarla.

De acuerdo con la teoría cristalina la diferencia entra la solubilidad del hemihidrato y el dihidrato, es responsable del fraguado de la masa de yeso. A 20°C se disuelve 4,5 veces más hemihidrato que dihidrato en una cantidad de agua. Si, mediante el agregado de ciertas sales, se aumenta esta relación; la reacción química se

---

<sup>2</sup> ASTM C266-07. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles

<sup>3</sup> ASTM C191 – 08. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle

producirá con mayor rapidez y se acorta el tiempo de fraguado, una sal que sea capaz de producir ese cambio se considera un acelerador. Por otro lado, si al agregar la sal se disminuye la relación entre las solubilidades del hemihidrato y dihidrato, la velocidad de reacción disminuye y el tiempo de fraguado se hace más largo, en ese caso la sal se considera retardadora.

Aunque no todos los aceleradores y retardadores funcionan según este principio, se puede considerar que la modificación de las solubilidades es una forma de modificar el tiempo de fraguado. En general, los fabricantes pueden controlar el tiempo de fraguado de los yesos por medio del agregado de agentes químicos y el operador modificando las condiciones de manipulación.

#### **2.3.4 Control del fraguado por la relación Agua-Yeso**

El operador puede cambiar en cierta medida, el tiempo de fraguado modificando las variables de manipulación, esto puede lograrse modificando la relación agua-yeso, la cantidad de espatulado, o la temperatura del agua de mezcla.

La mezcla de agua con yeso de taller, piedra o piedra mejorada fraguan formando una masa dura. La cantidad real de agua necesaria para mezclar el hemihidrato es mayor que la requerida para la reacción química (18,61 gramos de agua por cada 100 gramos de yeso se necesita para transformarse en sulfato de calcio dihidratado. En la práctica, sin embargo, se encuentra que no se puede mezclar el yeso con una cantidad tan pequeña de agua y obtener una mezcla adecuada para trabajar). El agua necesaria aparte de la que se precisa para la reacción química, se denomina exceso de agua y sirve para mojar las partículas de polvo de hemihidrato de forma tal que puedan reaccionar para formar cristales de dihidrato. El exceso de agua no reacciona con los cristales de hemihidrato y eventualmente se pierde por evaporación una vez que el yeso ha fraguado. El exceso de agua solo ayuda en la mezcla de las partículas de polvo con el agua y es reemplazada por poros al evaporarse.

El exceso de agua necesaria para la mezcla depende del tamaño, forma y porosidad de las partículas de hemihidrato. Los cristales irregulares y porosos de hemihidrato necesitan más agua que los menos porosos y más regulares. Así, el yeso taller necesita más agua para la mezcla que el yeso piedra y el yeso piedra mejorado. Este último requiere menos agua que los demás debido a que las partículas de hemihidrato son densas y de forma y de forma regular, por lo tanto,

una vez fraguada, la masa de yeso de piedra mejorado será más densa que la de yeso de taller o piedra. [13]

La relación agua-yeso tiene un pronunciado efecto sobre la resistencia a la compresión y abrasión. No existe una forma o método o una especificación aceptable para determinar la relación agua-yeso.

#### **2.3.4.1 Control del fraguado por la relación agua polvo**

Esta relación se conoce como la cantidad de agua en la cantidad de polvo del recubrimiento es comúnmente expresada como la relación agua-polvo (a: p), que tiene unidades de mililitros de agua por cada 100 gramos de polvo. Un a: p de 40 ml de agua por 100g gramos de polvo se escribe a veces como 40/100 o simplemente como 40 o incluso 0,40. Algunos fabricantes recomiendan que los recubrimientos de joyería de yeso pueden usarse con un a: p en el rango de 39 a 42.<sup>4</sup> Otros pueden dirigir sólo específica w: p como de 38, en lugar de un rango.

Es comúnmente sabido que la fuerza del recubrimiento, tiempo de trabajo y la fluidez depende de la relación agua-polvo. Sin embargo, el grado de dependencia podría no ser tan conocido. Asimismo, si bien la adopción de medidas para mejorar una propiedad, otra propiedad menos conocida puede ser pasada por alto y cambió indeseable. Esto puede dar lugar a defectos de fundición. Debido a esto, los recubrimientos se han diseñado para ser lo suficientemente robustos como para proporcionar una cierta estabilidad, a pesar de los cambios en la relación agua-polvo. Pero, con el fin de evitar grandes cambios adversos, se recomienda un intervalo limitado de esta relación. De hecho, algunos fabricantes de recubrimientos proporcionan una flexibilidad mediante la recomendación de una gama de relaciones de agua-polvo. Menores relaciones de agua-polvo se recomiendan para grandes y pesadas piezas, relaciones más altas se recomiendan para piezas más pequeñas y más detalladas. [18]

#### **2.3.5 Control del fraguado en el mezclado**

Cuando se mezcla con agua cualquiera de los tipos de yeso, se le debe espátular para obtener una masa uniforme. Esta se obtiene con mayor facilidad si se vierte

---

<sup>4</sup> Ransom & Randolph W., "Application Instructions Ultra-Vest Jewelry Investment", July 1999

en un recipiente en el cual previamente se ha colocado la cantidad requerida de agua, el espatulado puede hacerse directamente: manual o con espatuladores mecánicos movidos con un motor. Para obtener una mezcla adecuada y uniforme, se debe primero mezclar un poco a mano antes de utilizar el espatulador mecánico, a menudo se incorpora aire durante el proceso de espatulado y la masa fraguada puede ser algo porosa, se puede obtener un producto mejor, más denso y con menos porosidades sometiendo la mezcla al vacío durante y después del espatulado.

Dentro de los límites prácticos, un aumento en la cantidad de espatulado acorta el tiempo de fraguado, esa cantidad se puede deber a la velocidad o tiempo de espatulado, o, a una combinación de ambos factores, es obvio que cuando se coloca el yeso en contacto con el agua, la reacción química comienza y se forma algo de sulfato de calcio dihidratado. Durante el espatulado, ese dihidrato recién formado es roto en cristales más pequeños que constituyen nuevos centros de nucleación, alrededor de los cuales puede precipitar más sulfato de calcio dihidratado. Como la mayor velocidad de espatulado provoca la formación de más de esos núcleos, se requiere de menos tiempo para la conversión del hemihidrato en dihidrato.

De la misma manera, la expansión de fraguado del yeso es afectada por el espatulado. Una cantidad mayor de espatulado aumenta la expansión del fraguado.

## **2.4 PERMEABILIDAD**

### **2.4.1 Definición**

La permeabilidad se define como la propiedad física de la masa moldeada de una mezcla de arena que permita el paso de gas a través de la misma. Si la permeabilidad del revestimiento no es lo suficientemente alta, entonces el metal no podrá llenar la cavidad del molde completamente.<sup>5</sup>

Se determina por la cantidad de aire que puede pasar a través de la muestra cilíndrica de norma AFS (50,8 mm x 50,8 mm) bajo una presión también normalizada. Las propiedades de ventilación de moldes y machos de arena

---

<sup>5</sup> Carter, Ralph. Does Investment permeability impact jewelry casting?. Santa Fe Symposium, May 2004. Pag 105

dependen de las propiedades de permeabilidad, una mezcla de arena de permeabilidad elevada tiene buenas propiedades de ventilación debido a su porosidad, el tamaño de los granos en una arena Para fundición, la forma y la distribución de los mismos, el tipo y cantidad de material aglutinante, la densidad a que la arena se ha empacado y el porcentaje de humedad utilizado para humedecerla constituyen factores importantes para regular el grado de permeabilidad.

Para determinar la permeabilidad de las mezclas para fundición se empleará la probeta de ensayo cilíndrica de norma AFS de 50,8 mm x 50,8 mm (2 in x 2 in).

#### **2.4.2 Norma para determinar la permeabilidad en seco**

La permeabilidad se determina por la velocidad del flujo de aire bajo presión normal a través de la probeta de ensayo cilíndrica de norma AFS. El procedimiento para determinar la permeabilidad norma se utiliza para obtener datos de comparación o datos que se habrán de publicar. Las probetas deber preparase con el mayor cuidado para asegurar resultados fidedignos.

En una misma arena, la permeabilidad en seco, se define aquí, es mayor que la permeabilidad en verde, los conocimientos útiles proporcionados por el ensayo de la permeabilidad en seco de una arena para fundición incluyen: la permeabilidad relativa de un molde de arena seca hecho de la arena que se piensa usar; o la permeabilidad relativa de la superficie del molde si este fuese secado en la superficie.

En ensayo de la permeabilidad en seco no proporciona la permeabilidad exacta del molde o de su superficie, pero como ya se mencionó la permeabilidad en verde proporciona un índice por medio del cual se puede controlar la permeabilidad de las mezclas de arena para fundición en su condición de secas.

#### **2.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO**

Una vez fraguado, los yesos tienen valores relativamente altos de resistencia a la compresión. Los valores están inversamente relacionados con la relación agua-yeso de la mezcla. Cuando más agua se utilice en la mezcla, menos es la resistencia a la compresión. De la teoría de fraguado se desprende que la resistencia de un yeso común o piedra, aumenta rápidamente a medida que progresa el endurecimiento después del tiempo de fraguado inicial.

En el proceso de cocción se debilita enormemente los recubrimientos de yeso, por lo tanto la resistencia en seco es más baja que la resistencia en verde. Algunos recubrimientos, se debilitan más que otros, esto es en función de control de los productos químicos, los tamaños de partícula, los porcentajes de las materias primas y los grados de yeso.

Con el fin de obtener resultados precisos y repetibles, es fundamental para cumplir estrictamente con los procedimientos para la preparación y análisis de muestras para el verde y disparó resistencia a la compresión. Factores tales como extremos de la muestra sin igual, burbujas de aire y molestar a los moldes antes de que se establecen plenamente pueden sesgar los resultados a ser menor. Los programas de calentamiento y la refrigeración son también factores importantes para conseguir resultados consistentes de resistencia a la compresión en seco. Debido a estos factores, los procedimientos de R & R fueron seguidos de cerca.

## **2.6 PROCESO ANTIOCH**

El moldeo en el proceso de Antioch se realiza con una mezcla de arena, yeso, talco, silicato de sodio, y el agua, la arena es el ingrediente a granel y yeso aglutinante. En proporción de 50 partes de agua por 100 partes de ingredientes secos, con un contenido de 50 % de arena de sílice, 40 % de cemento de yeso, 8 % de talco, y pequeñas cantidades de silicato de sodio, cemento portland y óxido de magnesio. Esta suspensión se vierte alrededor del patrón en frascos adecuados o cajas de machos de metal, y en unos 7 minutos se desarrolla una resistencia a la zerie de cerca de 70 psi en la compresión. Después de reposar alrededor de 6 horas, los moldes se ensamblan y se tratan en un autoclave en vapor de agua a aproximadamente 2 atm de presión. A continuación, se secan al aire durante una (1) noche, y finalmente en una estufa durante 6 a 15 horas dependiendo del diámetro en pulgadas del molde, a 450°F. El proceso de autoclave y secado produce permeabilidad, sobre 25 a 50 AFS permeabilidad. [11]

Las considerables ventajas de moldes de yeso por este proceso son de fundición no ferrosa que se se puede hacer con buenas superficies de acabado y precisión dimensional. Tolerancias de 0.005 pulg.

El proceso Antioch fue desarrollado para superar las limitaciones de permeabilidad de los moldes en yeso, sin sacrificar las ventajas que nos aporta este proceso.

Si los moldes sin secar son parcialmente deshidratados y luego dejados rehidratar sin interrumpir el proceso, los cristales recristalizan lentamente en forma de gránulos aproximadamente del tamaño de los granos de arena, y el molde

adquiere una estructura porosa, de permeabilidad alta. La permeabilidad conseguida en este proceso está dentro de un rango de 15 a 30 AFS, comparado con permeabilidades alrededor de 1 y 2 AFS obtenidas convencionalmente con moldes de yeso.

La recristalización no toma lugar en la superficie del molde, porque no hay agua presente, por lo tanto la superficie permanece tersa.

Además a la buena permeabilidad desarrollada por el proceso de deshidratación-hidratación, los moldes producidos por este proceso tiene una mayor capacidad para resistir el calor que los moldes de yeso convencional.

En la práctica, el tiempo de solidificación para un pieza fundida es un molde obtenido por el proceso Antioch, es solamente cerca del 20% más largo que para una pieza idéntica fundida en un molde de arena ligeramente apisonado, y menos de la mitad del tiempo requerido para una pieza idéntica, fundida en un molde de yeso por el proceso convencional. Los moldes del proceso autoclave no se contraen, de hecho, se expanden ligeramente, en un rango entre 0.001 y 0.0025" por cada pulgada de espesor.

Debido a su estructura porosa, los moldes presentan una baja resistencia en seco. Esta característica, promueve la colapsabilidad de los machos cuando la pieza se enfría, minimiza las grietas en caliente de las piezas fundidas.

Para los moldes muy grandes se necesitan refuerzos internos el cual es conseguido con varillas de machos tales como las usadas en la fabricación de machos de arena. Cuando sea posible, se evitan los refuerzos, debido a la diferencia de expansión entre el refuerzo y el material de moldeo.

Antes del tratamiento de deshidratación-rehidratación se pueden retirar fácilmente los modelos debido a la alta resistencia en verde. Este proceso permite ser usado para la producción de moldes, para partes que tiene secciones angulares y filosas como toberas y rotores.

Los costos del proceso, el cual es alto para los moldes de yeso, es la principal desventaja de los moldes del proceso de autoclave sumada a los largos tiempos para procesarlos. Esto requiere equipos costosos de alta precisión para el control del proceso.

### **2.6.1 Materiales para moldes y machos.**

La mezcla seca para los moldes de este proceso contiene generalmente: yeso blanco de moldeo, talco, pequeñas cantidades de cemento portland, para controlar la expansión, las mezclas varían de acuerdo con la pieza de fundición a obtener. Sin embargo, una vez se pueda establecer una fórmula para esta fundición, se emplea para todas las piezas fundidas, prescindiendo de su tamaño y forma. Los mejores resultados se obtienen pesando con exactitud todos los ingredientes.

La fabricación de modelos generalmente no es diferente de los métodos empleados en el moldeo de yeso convencional.

### **2.6.2 Patrón.**

Generalmente el proceso no es diferente al moldeo en yeso convencional. Debido a que los moldes en el proceso Antioch poseen una excepcional resistencia en verde, se hace un uso amplio de patrones de goma. Los patrones deben ser recubiertos con un agente desmoldeador.

### **2.6.3 Deshidratación y Rehidratación**

Tan pronto como la mezcla frague, el modelo es retirado; usualmente, la caja de moldeo es retirada al mismo tiempo que el modelo. Sin embargo, los moldes grandes se le permiten permanecer en las cajas de moldeo a lo largo de posteriores procesos y fundición del metal. A causa de su baja resistencia en seco, los moldes del proceso autoclave algunas veces necesitan el apoyo suministrados por la caja de moldeo.

El tiempo entre el fraguado de la mezcla y el comienzo del ciclo de deshidratación no es extremadamente crítico si se tiene en cuenta ciertas precauciones; para prevenirlos del secado total se puede cubrir con telas húmedas. El ciclo de deshidratación debería comenzar tan pronto como el modelo es retirado, si el molde no puede ser guardado húmedo.

Para la deshidratación los moldes se colocan en una parrilla apropiada, dentro del autoclave, esta parrilla se cierra herméticamente y el vapor se introduce o se genera.

El autoclave se opera con una presión de vapor de dos atmosferas absolutas por seis horas, dependiendo del tamaño de los moldes. Luego, el autoclave es abierto y los moldes retirados.

La rehidratación se debe realizar por una (1) noche a temperatura ambiente. Después de la rehidratación el molde está listo para secarse en la estufa.

#### **2.6.4 Temperatura de secado**

La temperatura de secado para los moldes es de 150°C y el tiempo de secado de 6 a 15 horas. El tiempo de secado depende principalmente del tamaño del molde y de la temperatura a la cual se usará.

El centro del molde debe alcanzar una temperatura de por lo menos 120°C. Es importante que el mismo ciclo sea usado para todos los moldes del mismo espesor. Solamente con un control minucioso de los ciclos puede alcanzarse la máxima reproducción.

### **2.7 MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS PARA LA ELABORACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO DE GRADO**

#### **2.7.1 Chamota [4]**

La chamota es una mezcla de arena sintética refractaria de grano grueso que se prepara a partir de arcilla calcinada (utilizada como material inerte) y ladrillos molidos y mezclado con una arcilla cruda para dar plasticidad. Su característica principal es que es muy refractaria y conserva la resistencia mecánica a elevadas temperaturas de 700 a 800°C. Se utiliza principalmente en la industria de la fundición. Sus cualidades dependen principalmente de la elección de la arcilla y si ésta va a ser empleada en la industria de la fundición, deberá ser elaborada a partir de arcilla lo más refractarias posibles.

### 2.7.1.2 Propiedades de la chamota

**TABLA 2.** Propiedades de la chamota.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>Refractariedad</i>	Determinada por la temperatura a la que puede someterse sin presentar signos de fusión, ablandamiento o adherencia al metal. (Temperatura de sinterización y piros cópica).
<i>Dilatación</i>	Es el aumento de tamaño de los granos, a menudo por el aumento de temperatura.
<i>Porosidad o permeabilidad</i>	Es la capacidad que tiene la arena para dejarse atravesar por los gases, este es el mayor inconveniente que presenta la chamota, debido a que una buena chamota tiene una porosidad abierta del 15al 20% la cual va a absorber el aglomerante.
<i>Reacción ante los ácidos</i>	Las chamotas bien cocidas no reaccionan ante la presencia de los ácidos como si lo hace la arena silíceas, porque son materiales inertes.
<i>Dureza</i>	Capacidad de los granos para resistir la deformación o abrasión de su superficie. Esta va a depender de la calidad de la chamota. Resiste muy bien el amasado. Se sitúa alrededor de 7 en la escala de Mosh.
<i>Densidad</i>	La densidad absoluta es de 2.6 a 2.7

**Fuente.** Autores

### 2.7.2 Magnesita

El óxido de magnesio o magnesia calcinada, es obtenido por medio de la calcinación controlada del mineral de magnesita (carbonato de magnesio), y se encuentra en minerales naturales de magnesio. El óxido de magnesio es una

sustancia compuesta formada por un enlace iónico entre el catión magnesio y el anión oxido. Se obtiene por la quema de cinta de magnesio, que se oxida con una brillante luz blanca, lo que resulta en un polvo.

Es higroscópico en la naturaleza y se debe tener cuidado de protegerlo de la humedad. Por lo que es necesario almacenar separado de oxidantes fuertes y ácidos fuertes.

### 2.7.2.1 Propiedades físicas

**Tabla 3.** Propiedades físicas de la magnesita.

▪ El óxido de magnesio es un sólido blanco (polvo) de fórmula química MgO
▪ Nombre químico: Oxido de magnesio
▪ Otros nombres: Magnesia calcinada/ magnesia (polvo)
▪ Aspecto y color: Polvo blanco, muy fino.
▪ Olor: Inodoro.
▪ Densidad relativa (agua=1): 3.58
▪ Punto de ebullición: 3600° C
▪ Punto de fusión: 2852° C
▪ Masa molecular: 40.3

**Fuente.** Autores

### 2.7.2.2 Propiedades químicas

**Tabla 4.** Propiedades químicas de la magnesita.

▪ Absorbe fácilmente humedad y dióxido de carbono cuando se expone al aire
▪ Reacciona vigorosamente con halógenos y ácidos fuertes.
▪ Condiciones que deben evitarse: Evitar el contacto con el aire.
▪ Materiales a evitar: Halógenos y ácidos fuertes.
▪

**Fuente.** Autores

### **2.7.3 Talco industrial**

El talco se usa en una amplia variedad de productos, a causa de su suavidad (1 en la escala de Mohs), pureza, fragancia, retención, blancura, lustre, contenido de humedad, absorción de aceites y grasas, inercia química, baja conductividad eléctrica, alta resistencia dieléctrica y alta conductividad termica. Estas propiedades no son universales a todos los minerales talcosos, a causa de la diferencia en su composición mineralógica y forma de partícula. El principal consumidor de talco es la industria de la construcción, con aplicaciones en tejas cerámicas, artefactos sanitarios, compuestos para unión, cerámica, pinturas, papel, techos y plásticos.

Se emplea como producto aditivo que mejora el comportamiento del molde durante la colada. Sus principales propósitos de adición son: aumentar la vida útil y resistencia al secado, resistencia en caliente, acabado superficial y resistencia a la penetración del metal, inhibir la reacción entre el metal y el molde, colapsabilidad y resistencia a los defectos de expansión y contracción del molde.

### **2.7.4 Cemento portland**

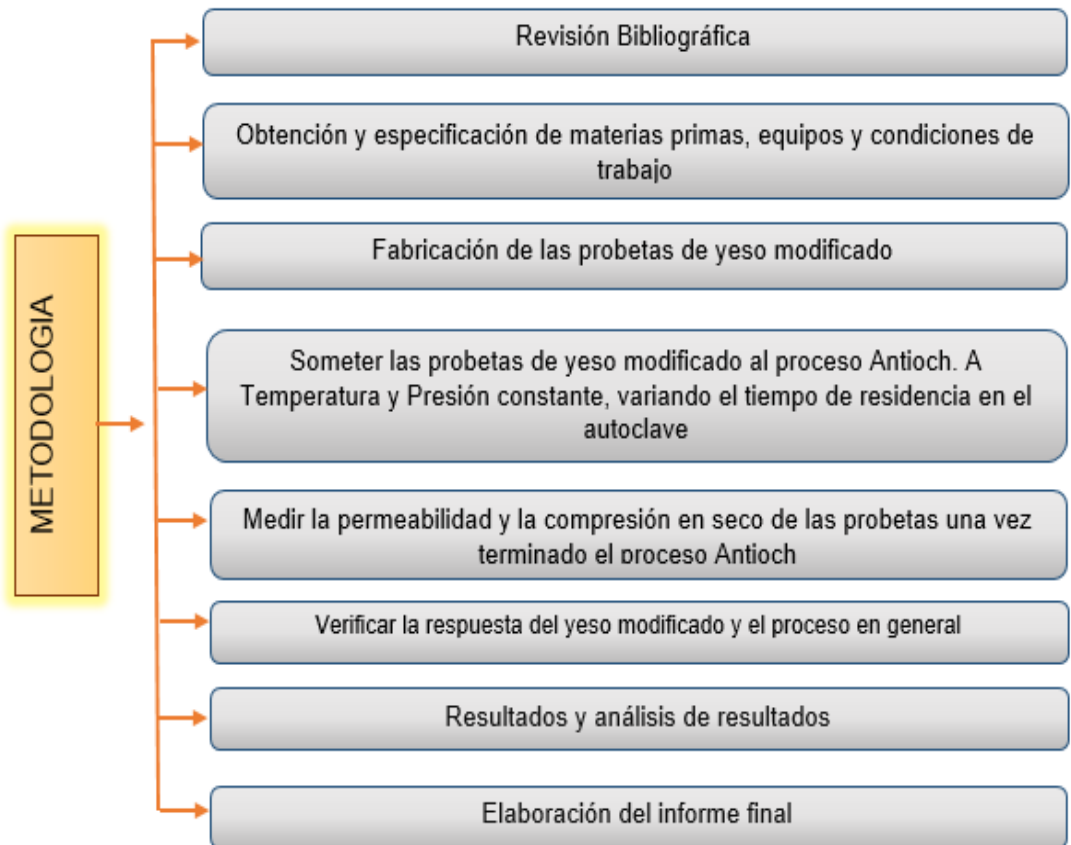
El cemento Pórtland es un compuesto formado por el silicato tricalcico, el silicato dicalcico, el aluminato tricalcico y el aluminio férrico tetracalcico. La composición química del silicato de calcio hidratado es variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO<sub>2</sub>), en una proporción sobre el orden de 3 a 2.

Se emplee como aglomerante inorgánico cementoso, en proporción de 1 a 10 para moldes de alta resistencia y buena permeabilidad. En la pasta de cemento ya endurecida, las partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los ganos de arena y a las piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La resistencia que se alcanza en las mezclas es gracias a la formación del hidrato de silicato de calcio que se forma, este es un proceso antiguo que proporciona resistencia a la erosión, pandeo, su uso es en fundiciones grandes y pesadas.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 1 se muestra un diagrama de flujo con las etapas seguidas para la elaboración del Trabajo de grado

**Figura 1.** Diagrama para el desarrollo del trabajo de grado



**Fuente.** Autores

#### 3.1 Revisión bibliográfica.

En esta etapa se realizó una documentación respecto al yeso, la modificación del revestimiento del yeso, su permeabilidad y todo lo relacionado al proceso Antioch. Esta documentación se llevó a cabo en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander y tesis relacionadas con el tema.

### 3.2 Obtención y especificación de materias primas, equipos y condiciones de trabajo de estos.

Fue necesario la búsqueda de las materias primas empleadas en los revestimientos de yeso, con las cuales posteriormente se elaboraron las probetas de yeso modificado, dichas materias primas son: yeso tipco  $\alpha$  (yeso odontológico), chamota, magnesita, talco industrial y cemento portland. Fue esencial poseer un equipo de autoclave con los requerimientos necesarios; Control preciso de la presión y de temperatura.

### 3.3 Fabricación de las probetas de yeso

Una vez identificadas las materias primas se elaboraron las probetas de yeso con las siguientes especificaciones:

- Elaboración de probetas: Se realizaron bajo la norma AFS para arenas de fundición.
- Selección de la composición de cada materia prima para la elaboración de los revestimientos con los dos diferentes refractarios. Para cada uno de los refractarios se empleó dos tamaños de grano (malla -100 y -140), en la tabla 1 se muestra las proporciones de cada material empleado en el revestimiento.

**Tabla 5.** Proporciones de cada material empleado en el revestimiento

<b>Materia prima</b>	<b>Proporción</b>
Magnesita	50%
Yeso	40%
Talco	8%
Cemento	2%

<b>Materia prima</b>	<b>Proporción</b>
Chamota	50%
Yeso	40%
Talco	8%
Cemento	2%

**Fuente.** Autores

- Preparación de la mezcla: ya efectuada la mezcla de las materias primas se encontró la relación agua-polvo (a:p), ( siglas que para su comprensión se cambiarán y empleará (a:p) la letra a corresponde a la cantidad de agua en mililitros y p para la cantidad de polvo seco en gramos), para para cada mezcla y granulometría diferente.

Para la agitación de la pasta se empleó una batidora Oster de pedestal mixmaxter y se trabajó a una velocidad constante de 640 r.p.m durante 2 minutos.

El agua empleada durante el trabajo de grado fue agua destilada con un ph de 7.03

Una relación entre el agua y el polvo seco, esta debía tener buenas propiedades de fluidez y tiempo de vertido. Se comenzó con una relación de 0,40 y un tiempo de batido de 2 minutos, el cual se recomienda para los recubrimientos de yeso empleados en joyería [14].

Para la fabricación de las probetas de yeso modificado se empleó cilindros en acero inoxidable de 2 pulgadas de altura por 2 pulgadas de diámetro interno (2"x2") (figura 2) rectificados con pendiente de desmoldeo y bases de caucho vulcanizado. Estas medidas corresponden a las probetas estándar para arenas de moldeo según la norma AFS. Para facilitar el desmoldeo se utilizó silicona spray ultrarapida empleada comercialmente como lubricante.

**Figura 2.** Probetas en acero inoxidable con base de caucho vulcanizado y desmoldeador (silicona).



**Fuente.** Autores

### 3.4 Someter las probetas al proceso Antioch variando temperatura y presión

Este proceso cuenta con variables importantes las cuales son la temperatura y la presión y una secundaria que es el tiempo de residencia en cada etapa. Se tomó como referencia la tesis de grado “Técnicas modernas para permeabilizar moldes en yeso” la cual muestra que los mejores resultados de permeabilidad se obtuvieron con una temperatura alrededor de 120 °C y una presión de 2 atm.

El tiempo de residencia en autoclave de las probetas fue de 1 a 6 horas.

Una vez terminado el proceso de deshidratación en autoclave, las probetas se dejaron rehidratar a temperatura ambiente durante una (1) noche, seguido por un secado en una estufa a una temperatura de 150°C durante 12 horas.

Se determinó experimentalmente que para alcanzar una presión de 2 atm ( $\approx 29,39$  psi) en autoclave se debía llevar a una temperatura de 128°C, estos parámetros se tomaron como constantes para cada uno de los ensayos.

**Figura 3.** Autoclave marca Parr



**Fuente.** Autores

### **3.5 Medir la permeabilidad y la resistencia a la compresión en seco de las probetas en yeso**

Luego de secadas las probetas en la estufa, se determinó a temperatura ambiente la permeabilidad para evitar que la humedad de la atmósfera las volviera a hidratar.

Este análisis se llevó a cabo mediante el uso de la norma AFS para el ensayo de arenas de fundición, para tal análisis se usó el equipo presente en el laboratorio de moldeo, permeámetro eléctrico de lectura directa, marca Dieter Detroit referencia 338.

Se propuso medir la permeabilidad de los diferentes revestimientos por densidad aparente, el cual consiste en pesar las probetas antes y después del proceso Antioch, ya que, las probetas tienen el mismo volumen, por pérdida de peso se puede analizar cual tiene mayor cantidad de poros y por ende mayor permeabilidad.

Para determinar la resistencia a la compresión en seco una vez terminado todo el proceso Antioch se empleó la máquina universal de ensayos AFS (figura 9) Harry W. Dieter Co serie 33624.

La caracterización física de los moldes se realiza por microscopia óptica mediante el uso del microscopio óptico cofocal Hirox 3D que pertenece al grupo GIMAT, para evaluar la forma, tamaño y distribución de los poros.

### **3.6 Verificar la respuesta del yeso modificado y el proceso en general**

Para verificar la respuesta del yeso modificado y el proceso en general, se fabricaron moldes con los revestimientos refractarios de chamota y magnesita. Se elaboró moldes para fundir anillos "cera perdida", donde los anillos se grabaron en cera, se produjo el llamado "Árbol de Colada" (por la forma semejante a un arbolillo que aparenta). Para preparar el árbol, las piezas de cera se conectan, con una espátulilla caliente, unos vástagos, también de cera que, a su vez, se unen del mismo modo a un tronco central (igualmente, de cera) de 7 u 8 mm de diámetro, el cual descansa sobre una base de goma que se adapta al diámetro del cilindro de acero que se va a utilizar para elaborar el molde. Esta goma tiene en su parte

central una forma cónica, a modo de volcán, que se convertirá posteriormente en el bebedero por donde entrará el metal en el molde (figura 3).

**Figura 4.** Preparación del árbol en cera en la base de goma



**Fuente.** Autores

Terminado el árbol, se empotra el cilindro de acero en la base de goma donde se han clavado las piezas de cera y se rellena el interior con el revestimiento de yeso modificado, dejando completamente sumergidas las ceras y todo el árbol. Luego se calentó el molde a una temperatura de 100°C para eliminar esta cera, dejando un molde vacío, se sometieron al proceso Antioch, para aumentar la permeabilidad de estos y así, disminuir la temperatura de los moldes durante la colada.

**Figura 5.** Cilindro de acero



**Fuente.** Autores

Para la elaboración del prototipo con el cual se medirá la bondad del proceso se trabajó con tres aleaciones diferentes: Al4-Zn, Al14-Zn, Cu4-Ag. Se emplearon estas tres aleaciones debido a sus diferentes puntos de fusión y así poder observar el comportamiento del molde y del metal durante la colada.

Los moldes obtenidos se introducen en un horno hasta una temperatura aproximada de 200°C para la aleación de Al4-Zn, para este primer molde se elevó hasta una temperatura de 200°C con una velocidad de calentamiento de 4.5 °C/min (Se utilizó esta misma rata de calentamiento para los otros 2 moldes) y se mantuvo a esta temperatura durante 3 horas. Para Al14-Zn este segundo molde se elevó hasta una temperatura de 200°C y se mantuvo 1 hora, seguido de otro incremento hasta 250°C y se mantuvo así durante 2 hoas. Para Cu4-Ag este tercer molde se elevó hasta 200°C manteniéndose así durante 1 hora seguido con otro incremento hasta 350°C donde se mantuvo por 2 horas. Estas temperaturas se alcanzaron de un modo gradual y progresivo evitando los cambios bruscos.

Alcanzada la temperatura de fusión de las aleaciones: Al4-Zn aproximadamente 400°C, Al14-Zn aproximadamente 490°C y Cu4-Ag aproximadamente 940°C, se elevó la temperatura 40°C por encima de la temperatura de fusión (temperatura de colada) y se inicio el proceso de Inyección del metal en el interior del molde sin aplicar vacío.

**Figura 6.** Proceso de Inyección del metal en el interior del molde sin aplicar vacío



**Fuente.** Autores

El proceso de microfusión continuó con la extracción de las piezas fundidas del interior de los moldes. Para ello, tras esperar unos minutos hasta que el color del metal haberse perdido la incandescencia, "destruímos" los moldes introduciéndolos bruscamente en agua fría liberando así todas las piezas.

### 3.7 Resultados

Se observó, que con esta relación de agua-polvo de 0,4 las mezclas no tenían una buena fluidez y el tiempo de vertido era demasiado corto. Así que se probaron diferentes relaciones a:p para cada mezcla y granulometría. El tiempo de fraguado se midió gracias a la aguja Vicat. (Ver figura 7)

**Figura 7.** Aparato Vicat



**Fuente.** Autores

Los registro de tiempo-penetración (tiempo de fraguado) y relación de agua-polvo seco para las diferentes mezclas, con los cuales se obtuvieron los mejores resultados de fluidez, tiempo de vertido y trabajo fueron los siguientes:

Para obtener el porcentaje de agua destilada de acuerdo al polvo seco empleado en la práctica se siguieron los siguientes pasos:

Datos (revestimiento con magnesita, malla pasante 100)

% de agua a utilizar: 65%

Peso del polvo seco: 150g

Volumen del agua\*:  $150 \times (65/100) = 97,5g = 97,5\text{cm}^3 = 97,5\text{ml}$

\*Asumiendo una densidad del agua de 1,0 g/ cm<sup>3</sup>

**Tabla 6.** Registro de tiempo-penetración, revestimiento con magnesita. a:p 0,65. Malla pasante 100

Tiempo [min]	Penetración [mm]
20	39
30	25
40	21,5
50	20
60	16
100	8
120	5
130	5
140	1
150	1
180	0,5

**Fuente.** Autores

Para determinar una penetración correspondiente a 25 mm, el cual se reporta como el tiempo de fraguado inicial, se encontró que se presentaba en el minuto 30. Para el caso del tiempo de fraguado final se anota cuando se alcance una penetración igual o menor de 0,5 mm, debido a que las probetas están fabricadas con un revestimiento para joyería, este tiempo se encontró alrededor de los 180 min.

Para los otros revestimientos se siguió el mismo procedimiento y se encontró la relación entre el agua y el polvo seco con las mejores condiciones de fluidez y tiempo de trabajo:

- El registro de tiempo-penetración para el revestimiento con magnesita, tamaño de partícula de -140 mallas y una relación a:p 0,70. El registro correspondiente a 25 mm, se tomó como el tiempo de fraguado inicial, se encontró a los 20 minutos. Para el caso del tiempo de fraguado final, la penetración de 0,5 mm, se encontró alrededor de los 130 min.
- El registro de tiempo-penetración para el revestimiento con chamota, tamaño de partícula de -100 mallas y una relación a:p 0,85. Se observó que la penetración correspondiente a 25 mm, se encuentra entre las lecturas de 12 y 14 minutos y le corresponde por interpolación a un tiempo aproximado de 13 min. Para el caso del tiempo de fraguado final, la penetración de 0,5 mm, se encontró alrededor de los 80 min.

- El registro de tiempo-penetración para el revestimiento con chamota, tamaño de partícula de -140 mallas y relación a:p 0,92. Entre las lecturas de 8 y 10 minutos se halló la penetración correspondiente a 25 mm, por interpolación el tiempo inicial de fraguado se encuentra a un tiempo aproximado de 9 min. Para el caso del tiempo de fraguado final, la penetración de 0,5 mm, se encontró alrededor de los 66 min.

**Figura 8.** Probetas con revestimiento fabricado con el refractario de magnesita y con una granulometría de -140 mallas destruidas por después del proceso autoclave



**Fuente.** Autores

Los resultados obtenidos de permeabilidad se encuentran las tablas 7 a la 9 para el proceso de autoclave.

**Tabla 7.** Lecturas de permeabilidad obtenidas con el revestimiento a base de magnesita, granulometría pasante malla 100

	Permeabilidad AFS			Promedio
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
<b>Hora 1</b>	6,0	6,0	5,9	5,97
<b>Hora 2</b>	7,2	7,3	7,0	7,17
<b>Hora 3</b>	7,8	7,7	8,1	7,87
<b>Hora 4</b>	8,5	8,5	8,8	8,60
<b>Hora 5</b>	12,8	12,5	12,6	12,63
<b>Hora 6</b>	13,8	14	14,2	14,00

**Fuente.** Autores

**Tabla 8.** Lecturas de permeabilidad obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 100

	Permeabilidad AFS			Promedio
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
<b>Hora 1</b>	6,9	6,5	6,3	6,57
<b>Hora 2</b>	7,7	8,0	8,1	7,93
<b>Hora 3</b>	8,9	9,0	9,6	9,17
<b>Hora 4</b>	10,0	11,4	13,0	11,47
<b>Hora 5</b>	12,0	14,6	14,0	13,53
<b>Hora 6</b>	15,7	15,0	16	15,57

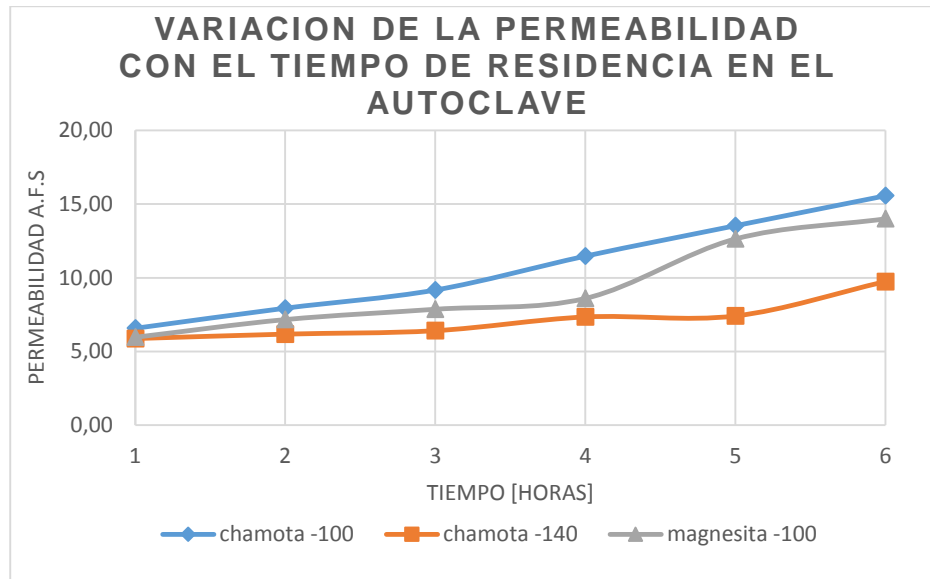
**Fuente.** Autores

**Tabla 9.** Lecturas de permeabilidad obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 140

	Permeabilidad AFS			Promedio
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
<b>Hora 1</b>	6	6	5,6	5,87
<b>Hora 2</b>	6,5	6	6	6,17
<b>Hora 3</b>	6	6,7	6,5	6,40
<b>Hora 4</b>	7	7,6	7,4	7,33
<b>Hora 5</b>	7,5	7	7,7	7,40
<b>Hora 6</b>	9,3	10	9,9	9,73

**Fuente.** Autores

**Grafica 1.** Variación de la permeabilidad promedio con el tiempo de residencia en autoclave a 128°C y 2 atm



**Fuente.** Autores

Las lecturas promediadas de pérdida en gramos se presentan en las tablas 10 a la 12.

**Tabla 10.** Lecturas promediadas de pérdida en gramos (porcentaje de pérdida) obtenidas con el revestimiento a base de magnesita, granulometría pasante malla 100.

tiempo [horas]	1	2	3	4	5	6
porcentaje perdida en peso [%]	28,11	30,76	39,94	43,98	44,94	45,465

**Fuente.** Autores

**Tabla 11.** Lecturas promediadas de pérdida en gramos (porcentaje de pérdida) obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 100.

tiempo [horas]	1	2	3	4	5	6
porcentaje perdida en peso [%]	27,29	44,06	47,25	47,89	49,05	49,892

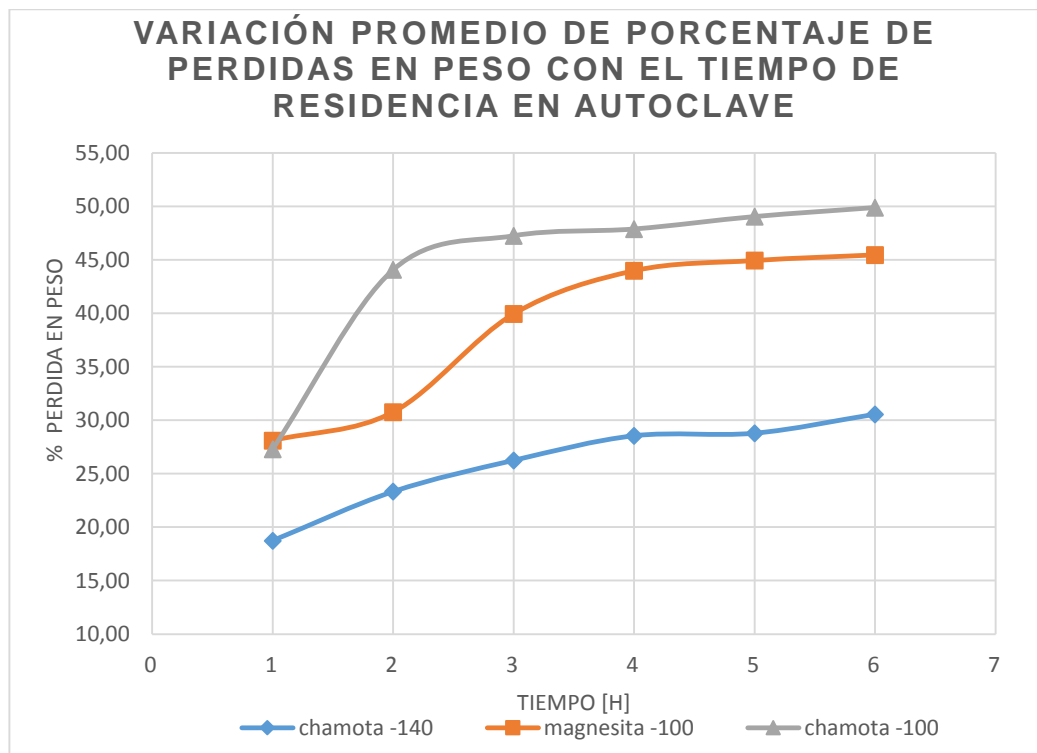
**Fuente.** Autores

**Tabla 12.** Lecturas promediadas de pérdida en gramos obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 140.

tiempo [horas]	1	2	3	4	5	6
porcentaje perdida en peso[ %]	18,74	23,32	26,24	28,54	28,78	30,55

**Fuente.** Autores

**Grafica 2.** Variación del porcentaje de pérdidas de peso con el tiempo de residencia en autoclave a 128°C y 2 atm



**Fuente.** Autores

Los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión en seco se encuentran en las tablas 13 a la 15 para el proceso de autoclave.

**Tabla 13.** Lecturas de la resistencia a la compresión en seco obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 100

Tiempo [h]	Compresión en seco [psi]			Promedio
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
1	60,0	59,0	60,0	59,7
2	53,0	50,0	52,0	51,7
3	46,0	50,5	48,0	48,2
4	38,5	38,00	40,0	38,8
5	37,5	36,5	29,0	34,3
6	18,0	20,0	21,0	19,7

**Fuente.** Autores

**Tabla 14.** Lecturas de la resistencia a la compresión en seco obtenidas con el revestimiento a base de chamota, granulometría pasante malla 140

Tiempo [h]	Compresión en seco [psi]			Promedio
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
1	76	70	73	73,0
2	63	58	60	60,3
3	55	51	53	53,0
4	48	47,5	48	47,8
5	38	35,5	40	37,8
6	35	30	32	32,3

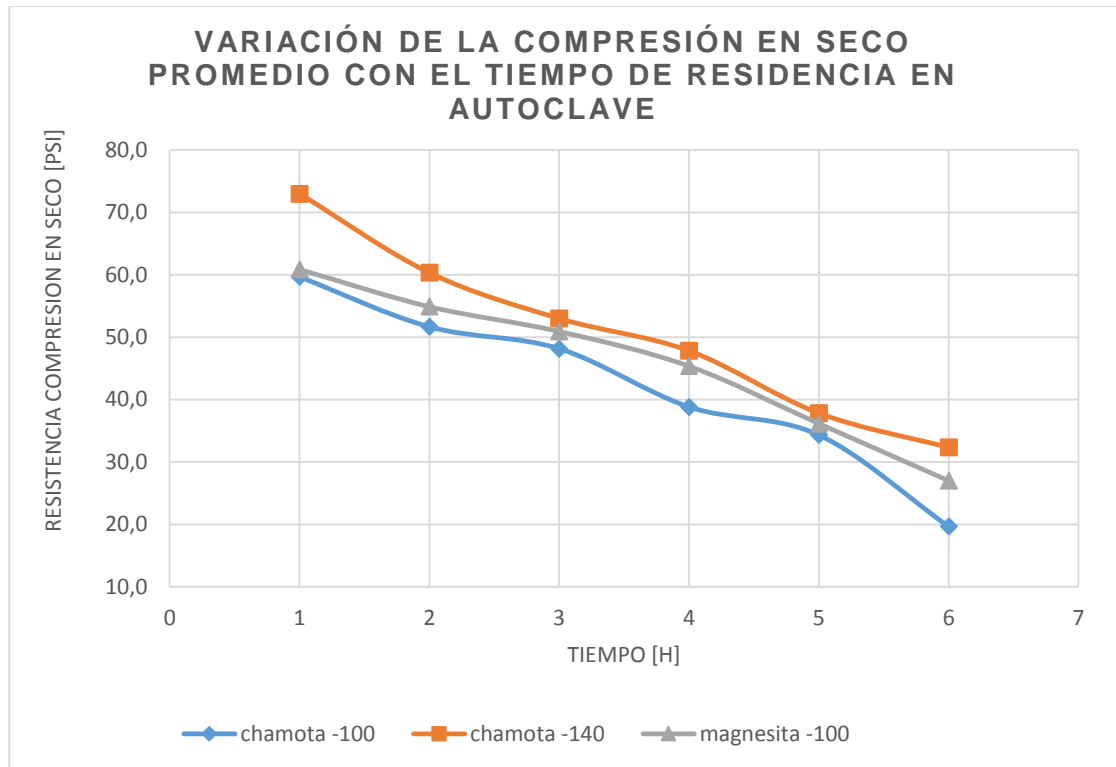
**Fuente.** Autores

**Tabla 15.** Lecturas de resistencia a la compresión en seco obtenidas con el revestimiento a base de magnesita, granulometría pasante malla 100

Tiempo [h]	Permeabilidad AFS			Promedio
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	
1	60,2	61,5	60,9	60,87
2	54,3	55,1	55,3	54,90
3	50,8	51,1	50,9	50,93
4	45,6	45,5	45	45,37
5	36,5	36	36	36,17
6	25,5	28	27,5	27,00

**Fuente.** Autores

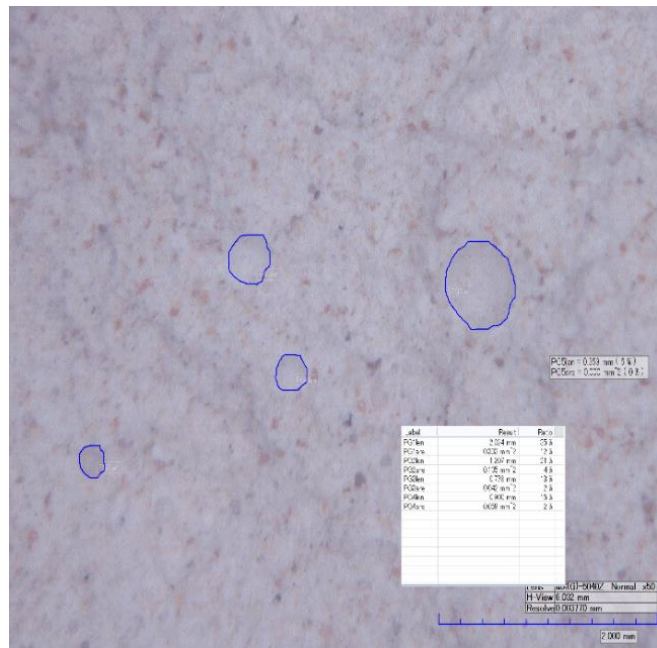
**Grafica 3.** Variación de la resistencia a la compresión en seco promedio con el tiempo de residencia en autoclave a 128°C y 2 atm



**Fuente.** Autores

Con el microscopio óptico, se observó los poros para los dos diferentes revestimientos. La figura 9 Muestra la distribución y el tamaño de poro para el revestimiento fabricado con magnesita y un tamaño de grano de la malla pasante 100 (apertura 0,150 mm), se aprecia poros con un radio alrededor de 0,137 mm.

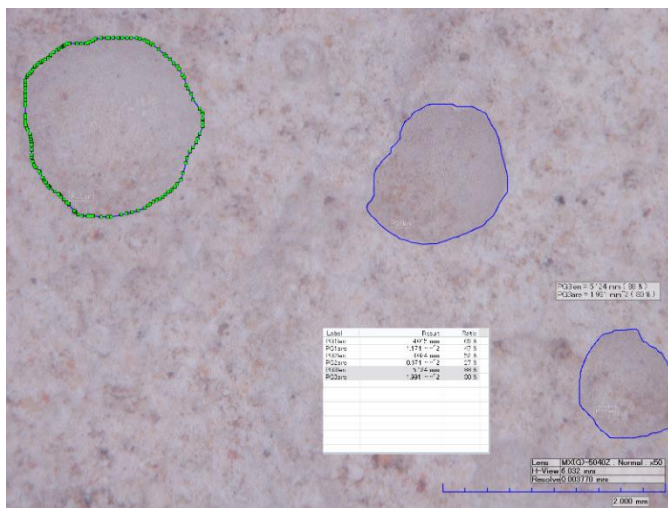
**Figura 9.** Distribución y tamaño de los poros, revestimiento fabricado con magnesita y tamaño de grano de -100 mallas. 6 horas de proceso. 50X-Hirox



**Fuente.** Grupo GIMAT

La figura 10 Muestra la distribución y el tamaño de poro para el revestimiento fabricado con chamota y un tamaño de grano -140 mallas (abertura 0,106 mm), se aprecia poros con un radio alrededor de 0,611 mm.

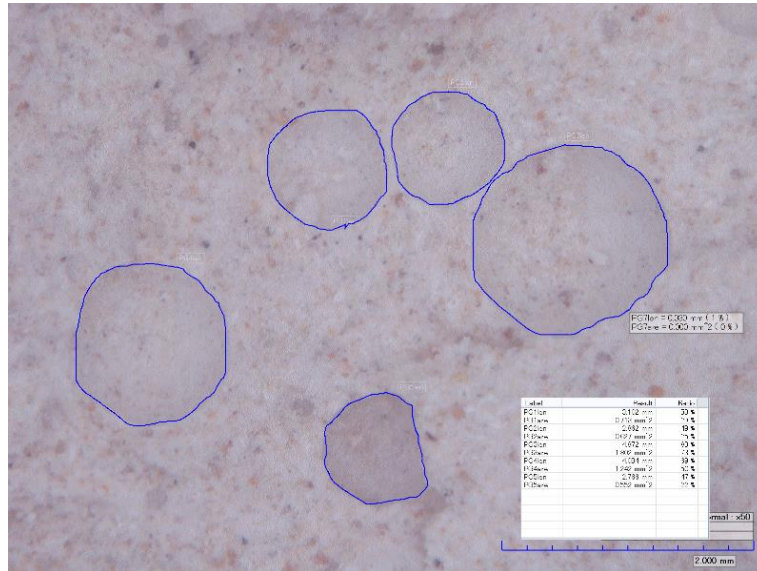
**Figura 10.** Distribución y tamaño de los poros, revestimiento fabricado con chamota. 6 horas de proceso. 50X-Hirox.



**Fuente.** Grupo GIMAT

La figura 11 Muestra una mayor distribución y un gran tamaño de poro para el revestimiento fabricado con chamota y un tamaño de grano de la malla pasante 100 (abertura 0,150 mm), se aprecia poros con un radio alrededor de 0,757 mm.

**Figura 11.** Distribución y tamaño de los poros, revestimiento fabricado con chamota y tamaño de grano de -100 mallas. 6 horas de proceso. 50X-Hirox.



**Fuente.** Grupo GIMAT

## PROTOTIPOS

En las figuras 12 a la 16 se muestra el producto de microfundición, empleando el revestimiento con el refractario de chamota y la granulometría de pasante de 100, debido a sus buenos resultados de permeabilidad, con un proceso de autoclave de 6 horas. No se empleó el revestimiento con el refractario de magnesita y tamaño de partícula -100 mallas debido que al momento de hacer la inyección del metal este se fisuró y dejó escapar el metal (ver figura 20).

**Figura 12.** Molde de revestimiento de yeso modificado con refractario de magnesita fisurado después de la inyección del metal, sometido del proceso Antioch.



**Fuente.** Autores

**Figura 13.** Anillo fundido con la aleación Al4-Zn con vacío

T. fusión del metal: 400°C  
T. Colada: 440°C  
T. molde: 200°C



**Fuente.** Autores

**Figura 14.** Anillo fundido con la aleación Al4-Zn sin vacío. Molde húmedo

T. fusión del metal: 400°C  
T. Colada: 440°C  
T. molde: 200°C



**Fuente.** Autores

**Figura 15.** Anillo fundido con la aleación Al4-Zn sin vacío

T. fusión del metal: 400°C  
T. Colada: 440°C  
T. molde: 200°C



**Fuente.** Autores

**Figura 16.** Anillo fundido con la aleación Al14-Zn sin vacío

T. fusión del metal: 490°C  
T. Colada: 530°C  
T. molde: 250°C



**Fuente.** Autores

**Figura 17.** Anillo fundido con la aleación Cu4-Ag sin vacío.

T. fusión del metal: 940°C  
T. Colada: 980°C  
T. molde: 350°C



**Fuente.** Autores

### 3.8 Análisis de resultados

Se analizaron los resultados obtenidos en las muestras con los revestimientos modificados y a su vez el impacto en la permeabilidad y la resistencia a la compresión en seco durante el proceso Antioch, teniendo como variable el tiempo de residencia en autoclave. La efectividad del proceso se aprecia con un aumento de permeabilidad notable después de 5 horas de residencia en el autoclave.

Se identifica que las granulometrías más finas, tanto para los revestimientos hechos con chamota y magnesita necesitan una mayor cantidad de agua para que brinden una mayor eficiencia para su manejo, esto se debe a que, con un mismo peso, las granulometrías más finas tendrán un mayor número de granos y por lo tanto necesitarán una mayor cantidad de agua, la cual junto con el yeso colabora con la aglomeración de todas las partículas.

Es importante resaltar que el revestimiento fabricado con el refractario de magnesita y con una granulometría de -140 mallas, no soportó ni una hora de residencia en autoclave (figura 12) y se desmoronó. La cohesión de la mezcla depende directamente de la acción y la naturaleza del aglutinante, así como del tamaño de grano y la cantidad de agua con la que se prepara la mezcla. Para este revestimiento de yeso modificado, se varió la composición de materia prima y la relación de agua-polvo seco, y se aplicó el proceso Antioch. La composición empleada fue de 65 % de yeso, 25% de Magnesita, 8% talco industrial, 2% cemento portland y un a:p de 0,65. Es necesario para esta granulometría y refractario en especial emplear una mayor cantidad de aglomerante para que así haya una mayor cohesión entre las partículas y no se desmorone al momento de efectuarse el tratamiento en autoclave.

Observando la gráfica 1 se nota un incremento de la permeabilidad a medida que se aumenta el tiempo de residencia en autoclave, a mayor tiempo de residencia se produce una mayor deshidratación y se producirá una gran porosidad en el molde.

En la gráfica 2 se aprecia que a mayor tiempo en que las probetas residen en autoclave hay una mayor pérdida porcentaje de pérdida en peso, a mayor tiempo en que las probetas son sometidas al proceso se deshidratarán más y habrá una mayor cantidad de poros. Esta densidad es directamente proporcional con la permeabilidad.

La grafica 3 muestra la variación de la resistencia a la compresión en seco según el tiempo de residencia en autoclave, a medida que se aumenta el tiempo de residencia se produce una mayor deshidratación y por lo tanto habrá una mayor porosidad lo que producirá una disminución de la resistencia del molde. Observando el revestimiento fabricado con chamota se observa que el que se elaboró con el refractario más fino presenta valores más altos de resistencia debido a que este tamaño de grano tiene mayor superficie de contacto y habrá mayor cohesión entre las partículas.

Se observó la distribución de los poros en las probetas sometidas al proceso Antioch por medio del microscopio, se nota que a medida que aumenta las horas del proceso los poros se hacen más uniformes por toda la probeta aumentando la permeabilidad pero produciendo una disminución de la resistencia en las probetas.

En la figura 15 se aprecia un anillo con un buen copiado, durante la fundición no se aplicó vacío debido a la buena colabilidad y las buenas propiedades de permeabilidad del molde. Se aprecian algunas rebabas producidas por poros formados en el molde, los cuales con un posterior pulido y acabado daría una pieza sana.

#### 4. CONCLUSIONES

- La efectividad del proceso Antioch se comprobó con lecturas de permeabilidad aceptables (mayores de 14 AFS) a condiciones de temperatura 128°C, presión 2 atmósferas y un tiempo de residencia de 6 horas en el autoclave, con el molde de revestimiento a base de chamota con tamaño de partícula pasante de tamiz malla 100.
- Se verificó la variación de la compresión en seco en los moldes que fueron sometidos al proceso Antioch, las lecturas obtenidas muestran que al aumentar el tiempo de residencia de los moldes, para los revestimientos de yeso modificado fabricado con el refractario de chamota y magnesita, la resistencia en seco disminuyó.
- Se comprobó mediante el prototipo la respuesta en general del proceso Antioch, donde los moldes fabricados con chamota con un tamaño de partícula de -100 mallas, permitieron un buen llenado de metal gracias a sus buenas características de permeabilidad y se obtuvo un excelente copiado del árbol de anillos. Mientras que el molde de yeso modificado fabricado con el refractario de magnesita en el momento de la colada se destruyó y no permitió obtener ninguna pieza sana.
- Este trabajo de grado pudo comprobar que al realizar el prototipo y al usar el molde en base de chamota con tamaño de partícula -100 mallas, la temperatura alcanzada en dicho molde fue entre 200°C y 350°C al momento de la colada. Esta temperatura es considerada ideal para trabajar piedras preciosas, como la esmeralda, no afectando sus características particulares, bondad que no posee el método en yeso convencional.

## 5. RECOMENDACIONES

Una vez terminado el proceso Antioch se debe evitar que la humedad de la atmósfera vuelva a rehidratar las probetas, para ello y evitar lecturas falsas de permeabilidad, se deben guardar en un desecador para su enfriamiento.

Se debe buscar relaciones entre el agua y el polvo seco adecuadas con mejores condiciones de manejo y de trabajo.

Es importante el empleo de un desmoldeador para el revestimiento una vez fraguada la mezcla, este desmoldeador debe ser a base de siliconas por su naturaleza inerte durante el proceso.

Es de gran importancia continuar haciendo investigaciones con nuevas mezclas que mejoren las características de los moldes, dada la efectividad del proceso de autoclave.


## REFERENCIAS

1. AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, INC. DES PLAINES, ILLINOIS, E.U.S. Manual de arenas para fundición. Séptima Edición. 1963.
2. APUNTES CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES (Tema 3 Yesos). Alberto Villarino Otero. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Ingeniería técnica de Obras Públicas.
3. BRIEN, Willian J. Materiales dentales y su selección. Editorial Medica Panamericana S.A, Buenos Aires, 1980. Pags: 64-91, 393-407.
4. BUDNIKOV, P.P. The technology of ceramics and refractaries bythe Massachusetts institute of technology 1964.
5. Carter, R. Does Invesment permeability impact jewelry casting?. Santa Fe Symposium, May 2004. p. 105.
6. Cornelis, K. MANUAL DE MINERALOGIA. *Editorial: Reverté*.pp: 344,370
7. CRARG, R. G. PhD. Materiales dentales, propiedades y manipulación. 1979. pp 158-170.
8. Determinación del tiempo de fraguado inicial y final del cemento. Lab de: Materiales de construcción. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. Disponible en < <http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/Fraguado%20inicial%20y%20final%20del%20cemento.pdf> >.
9. Gomà, F. *Cemento portland y otros aglomerantes, El*. Barcelona: Técnicos Asociados, S.A. (1979).
10. Gonzales J. Tapia V. "Técnicas Modernas para permeabilizar moldes en yeso". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, 1983.

11. Heine R. W. & Loper C. R., Philip C. Principles of Metal Casting Rosenthal Tata McGraw-Hill, 1976.
12. Investment Powder and Investment Casting. P. J. HORTON. Hoben International Limited, Newcastle-under-Lyme. Staffs., UK
13. LANE, M. K., SUMMERFIELD, J.D. Effect on participle size of plaste ron strength develoment of foamed cast. American Ceramic Society Bull. Mr 75
14. Mccloskey, J. Allen, et.al., "An evaluation of the permeability of a jewelry casting investment". Laffayette, Louisiana. p. 431.
15. Metals Handbook. Vol 5. Forging and Casting. pp. [227-230].
16. NOVO DE MIGUEL, L. El yeso en la construcción. 9<sup>na</sup> Edicion. Ediciones Barcelona CEAC, 1968.
17. Petersen, D. J. et al. "Encyclopedia of Chemical Technology," Kirk-Othmer, 4<sup>th</sup> ed., vol. 4, p. 813.
18. Ralph Carter, "Effect of water quality and temperature on investment casting powders " ,Proc. of the Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2000, Met-Chem Research,2000, p 1-27. Also: Gold Technology, no 32,Summer 2001 ,p 7-18
19. Ralph Carter, "Effects of changing water-to-powder ratio on jewelry investments " , Proc. of the Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2001," Met-Chem Research, 2001, p 31-47.
20. YBARRA, R. Fundición a la cera perdida, 2005. Disponible en: <<http://www.raulybarra.com/online>>.

## ANEXOS

### ANEXO A. Resultados de Difracción de Rayos-x para los refractarios de chamota y magnesita.

	<b>LABORATORIO DE RAYOS-X</b>	Codigo: F-LRX-04
	INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X	Versión: 1
		Página 1

#### Chamota

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	$\text{Si O}_2$	Cuarzo	36.8 % (0.3)
	$\text{Al}_{4,52} \text{Si}_{1,88} \text{O}_{9,74}$	Mullita	9.2 % (0.3)
	$\text{Ti O}_2$	Rutilo	<1 %
	$(\text{Na, Ca})_{0,3} \text{Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2 \text{O}$	Beidellita	N.C
	$\text{Fe} (\text{Al}_2 \text{O}_3)$	Hercinita	N.C
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_7) \text{O}$	Sillimanita	N.C
	$\text{Si O}_2$	Cristobalita	1.0 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	N.C
	$\text{Si O}_2$	Cristobalita Alta	1.4 % (0.1)
Total Cristalino			48.8 %
Amorfos y otros			51.2 %

#### Magnesita

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	$\text{Si O}_2$	Cuarzo	<1 %
	$\text{Mg O}$	Periclasa	56.0 % (0.2)
	$\text{Mg CO}_3$	Magnesita	1.4 % (0.1)
	$\text{Al}_2 (\text{Al}_{2,5} \text{Si}_{1,5}) \text{O}_{9,75}$	Mullita	2.0 % (0.1)
	$\text{Mg}_3 \text{Si}_2 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Talco	<1 %
	$\text{Fe}_3 \text{O}_4$	Magnetita	<1 %
	$\text{Mg} (\text{OH})_2$	Brucita	2.0 % (0.1)
	$\text{Fe O}$	Wuestita	N.C
	$\text{Si O}_2$	Cristobalita	<1 %
	$(\text{Mg, Al})_6 (\text{Si, Al})_6 \text{O}_{20} (\text{OH})_{10} \cdot 4 \text{H}_2 \text{O}$	Corrensita	N.C
	$\text{Al} (\text{OH})_3$	Gibbsita	N.C
Total Cristalino			62.7 %
Amorfos y otros			37.3 %

Elaboró:

Qco. MSc. José Luis Pinto Camargo  
 Profesional Analista  
 P.Q. 2009

Revisó:

Dr. José Antonio Henao Martínez  
 Director Laboratorio  
 P.Q. 0321

Universidad industrial de Santander, Km. 2 Vía al Refugio Sede UIS-Guatiguara, Edificio de Investigaciones,  
 Laboratorio de Rayos-X, Laboratorio 104, Piedecuesta, Santander, PBX 6344000 Ext. 3512  
 Apartado Aereo N°678, Email: [rayosx@uis.edu.co](mailto:rayosx@uis.edu.co) NIT 890.201.213-4

**ANEXO B.** Resultados de Fluorescencia de Rayos-x para los refractarios de chamota y magnesita

	<b>LABORATORIO DE RAYOS-X</b>	Código: FRINFFRX.01
	<b>INFORME DE RESULTADOS FLUORESCENCIA DE RAYOS-X</b>	Versión: 3

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Mg	12	52,39%
Al	13	1,84%
Fe	26	0,90%
Si	14	0,80%
Mn	25	0,51%
Ca	20	0,42%
S	16	0,06%
Ti	22	0,05%
P	15	0,05%
K	19	0,01%
Cl	17	90 ppm
Cu	29	77 ppm
Zn	30	35 ppm
Ni	28	25 ppm
Zr	40	24 ppm
Sr	38	15 ppm
<i>Balance (C,H,O)</i>		---

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Si	14	31,50%
Al	13	12,12%
K	19	2,83%
Fe	26	1,63%
Ti	22	0,73%
Mg	12	0,45%
Ca	20	0,23%
Na	11	0,20%
Ba	56	0,08%
Zr	40	0,05%
P	15	0,04%
Cu	29	0,02%
Rb	37	0,02%
Zn	30	0,01%
S	16	0,01%
Cr	24	0,01%
Sr	38	0,01%
Mn	25	94 ppm
Pb	82	85 ppm
Ni	28	54 ppm
Y	39	52 ppm
Ga	31	26 ppm
Nb	41	23 ppm
<i>Balance (C,H,O)</i>		---

**Elaboró:**

**Qco. John Deiver Bonilla Jaimes**  
Profesional Analista  
PQ-4175

**Revisó:**

**Dr. José Antonio Henao Martínez**  
Director Laboratorio  
PQ-0321

Universidad industrial de Santander, Km. 2 Vía al Refugio Sede UIS-Guatiguará, Edificio de Investigaciones,  
Laboratorio de Rayos-X, Laboratorio 104, Piedecuesta, Santander. PBX 6344000 Ext. 3512  
Apartado Aereo N°678, Email: [fix@uis.edu.co](mailto:fix@uis.edu.co) NIT 890.201.213-4

**ANEXO C.** Secuencia de Operación empleado para la producción de Moldes en yeso Por el Proceso Antioch

<b>Secuencia de Operación Para la Producción De Moldes en yeso Por el Proceso Antioch</b>	
<b>Paso</b>	<b>Tipo de Operación</b>
<b>1</b>	Pesar y mezclar los ingredientes secos.
<b>2</b>	Agregar los ingredientes secos al agua destilada, ph=7.03
<b>3</b>	Remojar 15 segundos.
<b>4</b>	Mezclar (Dos minutos).
<b>5</b>	Cubrir los moldes con el desmoldador, Silicona.
<b>6</b>	Verter la suspensión sobre el modelo.
<b>7</b>	Dejar fraguar a temperatura ambiente (1 a 2 horas).
<b>8</b>	Desmoldar el modelo.
<b>9</b>	Deshidratar en el autoclave (1 a 6 horas), a una temperatura de 128°C y una presión de 2 atmosferas.
<b>10</b>	Rehidratar a temperatura ambiente. (1 noche).
<b>11</b>	Secar los moldes a 150°C y el tiempo de secado de 6 a 15 horas.

**ANEXO D.** Otros equipos empleados durante el presente trabajo de grado

Horno para tratamiento térmico del yeso Ney Dental Inc/3-550. Ubicada en e laboratorio de microfusión.



**Fuente.** Autores

Balanza. Ubicada en el laboratorio de procesos de moldeo



**Fuente.** Autores

Horno para microfusión Neutec/J2R. ubicado en el laboratorio de microfusión.



**Fuente.** Autores

Desecador. Ubicado en el laboratorio de procesos de moldeo.



**Fuente.** Autores

Estufa. Ubicada en el laboratorio de Moldeo.



Fuente. Autores

Herramientas para la preparación de las probetas de yeso modificado.



Fuente. Autores

Permeámetro eléctrico



Fuente. Autores

Máquina Universal de Ensayos



Fuente. Autores

ANEXO E. Partes del autoclave Parr

Funcionamiento de la electroválvula de salida, evacuando el exceso de presión dentro del reactor



Fuente. Autores

Caja de control del autoclave, tablero "logo" (donde se introduce los valores de set point para temperatura y presión), botones de arranque (verdes), botones de parada (rojos).



Fuente. Autores

Portaprobetas diseñada en acero inoxidable para introducir 6 probetas AFS en autoclave



Fuente. Autores

Tapa del reactor donde se encuentran dos electroválvulas (entrada y salida) manómetro, termopar y valvula de seguridad



Fuente. Autores

## ANEXO F. Árboles en cera



**Fuente.** Autores



**Fuente.** Autores



**Fuente.** Autores



**Fuente.** Autores