

**VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO Y LA
PERMEABILIDAD EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE TALCO Y LA
GRANULOMETRÍA DEL REFRACTARIO (PROCESO ANTIOCH)**

CARLOS ANDRÉS ARIAS AARÓN

JOSÉ GERSON MOJICA SANCHEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2016

**VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO Y LA
PERMEABILIDAD EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE TALCO Y LA
GRANULOMETRÍA DEL REFRACTARIO (PROCESO ANTIOCH)**

CARLOS ANDRÉS ARIAS AARÓN

JOSÉ GERSON MOJICA SANCHEZ

Trabajo de Grado para optar el título de:

INGENIERO METALURGICO

DIRECTOR:

ARNALDO ALONSO BAQUERO

Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

*A **DIOS**, que es el que está conmigo.
Como Él es el que está conmigo, nada me falta.*

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 mis hermanas y hermanos **BEATRIZ, BERENICE, DANIEL, ANÍBAL, GUSTAVO, BAUDILIO**, que los llevo en mi corazón como una parte fundamental en mi vida por su apoyo incondicional, por reconocerme que de toda la familia soy un ser muy inteligente para ellos.*

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

*Aquellas personas que fueron importantes en mi formación personal y profesional.
Aquellas personas que nos rodean. Para todas aquellas personas que confiaron en mí y me dieron su apoyo y amistad.*

José Gerson Mojica Sanchez

DEDICATORIA

*Al **GRAN ESPÍRITU** y a nuestra **PACHAMAMA** por brindarme la oportunidad de gozar en cuerpo y alma de este espacio-tiempo.*

*A mi mamá **DÁLSIDA AARÓN** y a mi papá **NORBEY ARIAS**, estrellitas que me guían desde el cielo, los amo con todo mi corazón y muchas gracias por todo el apoyo que me brindaron, este triunfo es para ustedes.*

*A mi hermana **KAREN** y mi hermano **NORBEY**, los quiero mucho y gracias por la paciencia y por todos esos consejos que siempre me dieron para salir adelante y lograr esta meta.*

*A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**, mi alma máter, por abrirme las puertas y permitir mi formación académica y profesional. Agradezco especialmente a todos los **MAESTROS**, a los técnicos **MARIO, AMBROSIO, DOMINGO** y **JAVIER** de la **Escuela de Ingeniería Metalúrgica** por ayudarme en todo este proceso, ustedes son personas incondicionales.*

*A mis amigos, compañeros de luchas, conocidos y a todos los que de alguna u otra manera estuvieron presente durante esta etapa de mi vida, especialmente a **CARMEN, TEMILSON, EFFER, HÉCTOR, PEDRO, JOSÉ, VÍCTOR, JOAQUÍN, MAURO, ANDERSON, GERSON, ELVIS** y **DIANA**, gracias de verdad por acompañarme en todo momento.*

Ahó.

Carlos Andrés Arias Aarón

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	18
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 PROCESO ANTIOCH	20
3.2 MATERIAS PRIMAS	21
3.2.1 Chamota	21
3.2.2 Yeso	23
3.2.3 Talco industrial	25
3.3 TIEMPO DE FRAGUADO	25
3.3.1 Control del fraguado por la relación agua-polvo	26
3.4 PERMEABILIDAD	26
3.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO	27
4. METODOLOGÍA	29
4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	29
4.2 MATERIAS PRIMAS Y EQUIPOS UTILIZADOS. ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES DE TRABAJO	30

4.3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS (NORMA AFS PARA FUNDICIÓN) VARIANDO LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS	30
4.4 SOMETER LAS PROBETAS AL PROCESO ANTIOCH (TEMPERATURA, PRESIÓN Y TIEMPO DE RESIDENCIA CONSTANTE EN AUTOCLAVE)	35
4.5 MEDIR LA PERMEABILIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO DE LAS PROBETAS	35
4.6 VERIFICAR LA RESPUESTA DEL PROCESO EN GENERAL MEDIANTE LA COLADA DE UN PROTOTIPO	37
5. RESULTADOS	41
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
7. CONCLUSIONES	58
8. RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama para el desarrollo del trabajo de grado	29
Figura 2. Aparato Vicat	33
Figura 3. Agitador IKA RW 20 digital	34
Figura 4. Cilindros en acero inoxidable con base de caucho vulcanizado, silicona para desmoldear y probetas fabricadas	34
Figura 5. Autoclave marca Parr	35
Figura 6. Permeámetro eléctrico marca Dieter	36
Figura 7. Máquina universal de ensayos AFS Harry W. Dieter	36
Figura 8. Preparación del árbol en cera en la base de goma	37
Figura 9. Cilindro de acero	38
Figura 10. Estufa para laboratorio marca Memmert digital	38
Figura 11. Mufla eléctrica programable para laboratorio marca Vulcan	39
Figura 12. Horno para microfundición con colada al vacío marca NEUTEC USA modelo J2R	40
Figura 13. Proceso de inyección del metal en el interior del molde	40
Figura 14. Anillos fundidos con la aleación Al4-Zn con vacío parcial	55
Figura 15. Anillos fundidos con la aleación Al4-Zn con vacío parcial	55
Figura 16. Anillos fundidos con la aleación Al14-Zn con vacío parcial	56
Figura 17. Anillos fundidos con Ag con vacío parcial	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de la chamota	22
Tabla 2. Clasificación del yeso según condiciones de cocción	24
Tabla 3. Proporciones de los componentes para la primera parte del proyecto	31
Tabla 4. Proporciones de los componentes para la segunda parte del proyecto	32
Tabla 5. Condiciones de trabajo previo al proceso de fusión	39
Tabla 6. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa A	41
Tabla 7. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa B	42
Tabla 8. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa C	42
Tabla 9. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa D	43
Tabla 10. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa A	44
Tabla 11. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa B	44
Tabla 12. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa C	46
Tabla 13. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa D	47
Tabla 14. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa A	49
Tabla 15. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa B	50

Tabla 16. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa C	51
Tabla 17. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa D	52
Tabla 18. Características de la mezcla 9 y 12	54
Tabla 19. Temperaturas de colada para las diferentes aleaciones	54

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa A	44
Gráfica 2. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa B	45
Gráfica 3. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa C	46
Gráfica 4. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa D	47
Gráfica 5. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco de las mezclas en todas las etapas	48
Gráfica 6. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa A	49
Gráfica 7. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa B	50
Gráfica 8. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa C	51
Gráfica 9. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa D	52
Gráfica 10. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco de las mezclas en todas las etapas	53

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Propiedades del yeso ortopédico “alfa loteado” utilizado en la investigación	63
ANEXO B. Resultado de Difracción de Rayos X para la chamota	64
ANEXO C. Resultados de Fluorescencia de Rayos X para la chamota	65

RESUMEN

TITULO: VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO Y LA PERMEABILIDAD EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE TALCO Y LA GRANULOMETRÍA DEL REFRACTARIO (PROCESO ANTIOCH).*

AUTORES

ARIAS Aarón Carlos Andrés

MOJICA Sánchez José Gerson **

PALABRAS CLAVES

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

DESCRIPCIÓN

Estudios anteriores han comprobado la baja permeabilidad en los moldes de yeso que se usan en la fabricación de joyas y la baja resistencia a altas temperaturas cuando contienen sílice debido a sus transformaciones alotrópicas que producen fenómenos de expansión y contracción, afectando la estructura del molde causando fisuras.

Para solucionar el problema, los moldes se fabrican con una mezcla que tiene composiciones fijas de yeso, talco y un refractario térmicamente estable, y se someten a un proceso conocido como Proceso Antioch, donde se introduce el molde en un autoclave (reactor a presión con vapor sobrecalentado) durante un tiempo, luego se deja rehidratar al aire libre y el molde adquiere una estructura porosa de alta permeabilidad que permite disminuir su temperatura durante la colada (<370°C).

Una alta porosidad en el molde hace que disminuya su resistencia a la compresión en seco debido a que se pierde cohesión entre las partículas. Se varió el contenido de talco en la mezcla y la granulometría del refractario utilizado (chamota) dejando el contenido de yeso constante con el fin de mejorar la resistencia a la compresión en seco del molde manteniendo valores de permeabilidad aceptables (10-200) por la norma AFS.

Este tipo de estudios tiene la finalidad de mejorar los moldes que se fabrican con mezclas de yeso, de esta manera se pretende aumentar el uso de estos en la joyería local y un crecimiento de la técnica utilizada.

*Proyecto de Grado

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

ABSTRACT

TITLE: VARIATION OF DRY COMPRESSIVE STRENGTH AND PERMEABILITY AS FUNCTION OF CONTENT OF TALC AND GRANULOMETRY OF REFRACTORY (ANTIOCH PROCESS).*

AUTHORS:

ARIAS Aarón Carlos Andrés

MOJICA Sanchez Jose Gerson**

KEYWORDS

Permeability, dry compressive strength, Antioch process, gypsum.

DESCRIPTION

Previous studies have found low permeability in the plaster molds used in the manufacture of jewelry and low resistance to high temperatures when they contain silica because of its allotropic transformations occurring phenomena of expansion and contraction, affecting the structure of the mold causing cracks.

To solve the problem, the molds are made from a mixture having fixed compositions gypsum, talc and a thermally stable refractory, and undergo a process known as Process Antioch, where the mold is put into an autoclave (pressure reactor with superheated steam) for a time, then rehydrate it left outdoors and the mold has a porous structure that allows high permeability decrease during casting temperature (<370°C).

A high porosity in the mold lowers its dry compressive strength because cohesion between the particles is lost. Content of talc was varied in the mixture and granulometry of refractory used (chamotte) leaving constant content of gypsum in order to improve dry compressive strength of mold maintaining acceptable permeability values (10-200) by AFS standard.

This type of study is intended to improve the molds are made of gypsum mixtures, thus aims to increase the use of these local jewelry and growth of the technique used.

*Graduation Project

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

INTRODUCCIÓN

La importancia del yeso se debe a que es un material que actúa como aglomerante y cuando se mezcla con agua forma una pasta fluida que se endurece rápidamente a medida que esta fragua. Esta pasta sólida presenta una notable resistencia mecánica y puede copiar las formas de los objetos con una gran precisión. Por tal motivo, el yeso es muy utilizado en áreas como arquitectura, diseño industrial, construcción, en la fabricación de cerámicas y en la fabricación de moldes para joyería.

El yeso es uno de los materiales más antiguos que existen. Sin embargo, su uso y estudio en fundición, más específicamente en el área de microfundición (es decir, en moldes para la fabricación de piezas fundidas que necesitan de gran precisión) empezó en las últimas tres décadas. Antiguamente ya existían procesos como el de la cera perdida que aún se siguen estudiando.

Los moldes que utilizan yeso como aglomerante han sido de gran estudio en la actualidad debido a los distintos tipos de yesos, la forma como reacciona químicamente con el agua, los tiempos de fraguado y las transformaciones que tiene el yeso al calentarlo. Por consiguiente estas variables son importantes para investigaciones que se están haciendo actualmente para prototipos creados a partir de moldes de yeso para la industria de la joyería, especialmente oro y plata, metales muy importantes en Santander.

En este proyecto de grado se pretende complementar una investigación que se hizo anteriormente con moldes de yeso fabricados con composiciones fijas de los componentes (yeso, talco, refractario) y fueron sometidos al proceso Antioch durante varias horas. Al final se obtuvo una alta permeabilidad pero una baja resistencia a la compresión en seco. En esta ocasión se variará la composición de componentes como el talco y la granulometría del refractario utilizado en los moldes de yeso y se someterán al proceso Antioch, para encontrar mejores valores de resistencia a la compresión en seco y valores de permeabilidad apropiados, entendiéndose que estas dos propiedades tienen una relación inversa.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En un trabajo de grado anterior¹ se determinó la permeabilidad y la resistencia en seco de dos mezclas de yeso, talco, cemento y chamota, sometidas al Proceso Antioch (128°C de temperatura, 29 psi de presión y 6 horas de tiempo de residencia en autoclave). Las proporciones de los componentes fueron:

- ✓ **Mezcla 1:** 40% de yeso, 8% de talco, 50% Chamota (pasante malla 100), 2% de cemento.
- ✓ **Mezcla 2:** 40% de yeso, 8% de talco, 50% Chamota (pasante malla 100), 2% de cemento.

El estudio concluyó con una alta permeabilidad (mayor que 10 AFS) en las mezclas, pero con baja resistencia a la compresión en seco (19 psi para la mezcla 1 y 32,3 psi para la mezcla 2).

Debido a que las mezclas pretenden ser utilizadas para la fabricación de moldes en la industria de la joyería con el fin de adaptarlos al pre-engaste de esmeraldas colombianas, es necesario que los moldes tengan una alta permeabilidad y una buena resistencia a la compresión en seco para que no vaya a ver fisuras en el molde al momento de la inyección del metal.

Los moldes de yeso en los que se utiliza revestimientos de sílice hay que realizarles un tratamiento térmico especial para poder controlar las transformaciones de componentes como el cuarzo y la cristobalita, porque éstas sufren fenómenos de expansión y contracción que pueden causar fisuras. Por tal motivo, en la investigación anterior se trabajó con revestimientos refractarios más estables térmicamente como la chamota.

¹ SANABRIA, Oscar; MARTINEZ, Henry Jair. Comportamiento del revestimiento de yeso modificado y su respuesta al proceso Antioch. Bucaramanga, 2014. 72 p. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la respuesta de la mezcla de yeso variando el contenido de talco y granulometría del refractario sometida al proceso Antioch.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la permeabilidad (método AFS) de la mezcla de yeso utilizada en el proceso Antioch con variación del porcentaje de talco y granulometría del refractario utilizado.
- Evaluar la resistencia a la compresión en seco de la mezcla de yeso utilizada en el proceso Antioch con variación del porcentaje de talco y granulometría del refractario utilizado.
- Verificar mediante la construcción de un prototipo la respuesta del proceso en general.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 PROCESO ANTIOCH

El proceso Antioch consiste en someter moldes de yeso a un calentamiento en autoclave (reactor que usa vapor sobrecalentado a presión) bajo ciertas condiciones. Los moldes se fabrican con una mezcla de yeso, talco, arena refractaria de sílice y agua en proporción de 50 partes de agua por 100 partes de polvo seco. La composición de la mezcla es de 50% de arena de sílice, 40% de yeso, 8% de talco y pequeñas cantidades de silicato de sodio, cemento portland y óxido de magnesio. La mezcla se vierte en recipientes adecuados o cajas de machos de metal y en unos 7 minutos se desarrolla una resistencia a la compresión cerca de 70 psi. Después de reposar alrededor de 6 horas, los moldes se introducen en un autoclave a 2 atm de presión aproximadamente. A continuación se secan al aire durante 12 horas y finalmente en una estufa durante 6 a 15 horas dependiendo del diámetro en pulgadas del molde a 230°C. El proceso de autoclave y secado produce permeabilidades entre 25 y 50 AFS [1].

Los moldes de yeso que se fabrican utilizando este proceso tienen una ventaja considerable: se obtienen piezas con buena textura superficial y precisión dimensional con tolerancias de hasta 0.005 pulg.

Si a los moldes sin secar se les hace un tratamiento de deshidratación-rehidratación sin interrumpir el proceso, las partículas recristalizan lentamente en forma de gránulos aproximadamente del tamaño de los granos de arena, y el molde adquiere una estructura porosa de alta permeabilidad. 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 con moldes de yeso convencionales.

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

En la práctica, el tiempo de solidificación para una pieza fundida en un molde sometido al 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.

3.2 MATERIAS PRIMAS

3.2.1 Chamota. La chamota es una arena 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 su refractariedad 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 posible.

Las propiedades de la chamota se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de la chamota

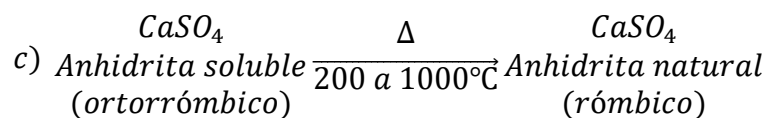
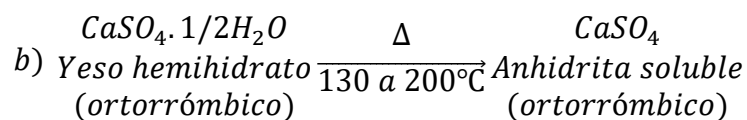
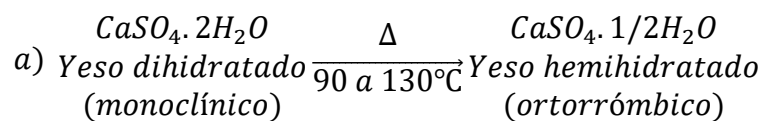
PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Refractariedad	Determinada por la temperatura a la que puede someterse sin presentar signos de fusión, ablandamiento o adherencia al metal. (Temperatura de sinterización y piros cópica).
Dilatación	Es el aumento de tamaño de los granos, a menudo por el aumento de temperatura.
Permeabilidad	Es la capacidad que tiene la arena para dejarse atravesar por los gases. La chamota presenta una estructura porosa de permeabilidad alta.
Reacción ante los ácidos	Las chamotas bien cocidas no reaccionan ante la presencia de los ácidos como si lo hace la arena silíce a, porque son materiales inertes.
Dureza	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.
Densidad	La densidad absoluta es de 2.6 a 2.7

3.2.2 Yeso. El yeso es un mineral 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 sulfato de calcio, óxido férrico, alúmina, magnesio, entre otros. Naturalmente se puede encontrar en diversas formas, aspectos y asociaciones, dependiendo del estado de formación geológica. Se presenta naturalmente con estructura cristalina (cristales de forma monoclinicas), estratificado, aglomerado y otras en forma lenticular o 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. Todas las formas de sulfato de calcio son termodinámica y cristalográficamente equivalentes, dependiendo únicamente de su pureza. Su forma puede ser de agujas, de conchas o prismática.

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. [2]

El sulfato de calcio dihidratado, por acción del calor se transforma en semihidrato y este a su vez se descompone por la misma acción del calor en sulfato anhidro tal como se muestra en las siguientes reacciones [3]:



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.

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 yeso encontrada en la naturaleza. Aproximadamente a los 1200°C el sulfato de calcio se descompone químicamente [4].

Existen dos formas diferentes de hemihidrato (ver Tabla 2), dependientes del método de calcinación [5]. Si bien todos los yesos de piedra (hemihidrato alfa) 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 necesitará menos cantidad de agua con respecto al yeso, uno de los métodos para controlar el tamaño del hemihidrato alfa es el de incorporar durante la calcinación una sustancia química dentro del autoclave.

Tabla 2. Clasificación del yeso según condiciones de cocción

Hemidrato alfa	Hemidrato Beta
Aspecto sedoso y brillante	Aspecto terroso
Se obtiene por autoclave de 120-170°C (atmósfera saturada de vapor de agua)	Fabricado en calderas
Menor tiempo de fraguado	Mayor tiempo de fraguado
Mayores características constructivas	Menor estabilidad dimensional
Mayor resistencia a la tracción y compresión	Menor resistencia mecánica

3.2.3 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 térmica. 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.

3.3 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 fraguado 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 [6], y la aguja Vicat [7], son los elementos más frecuentes para determinar los tiempos de fraguado final e inicial de los yesos.

Se puede controlar el tiempo de fraguado por medio de la relación agua-yeso, la relación agua-polvo o durante el mezclado. 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.

3.3.1 Control del fraguado por la relación agua-polvo. Esta relación se conoce como la cantidad de agua necesaria para una cantidad de polvo seco conocida con el fin de obtener una pasta de consistencia normal. Se expresa como la relación agua-polvo (a:p), que tiene unidades de mililitros de agua por cada 100 gramos de polvo seco. Una a:p de 40 ml de agua por cada 100 g de polvo se escribe a veces como 40/100, 40 o incluso 0,40. Algunos fabricantes recomiendan que en los recubrimientos de yeso para joyería pueden usarse relaciones a:p en el rango de 39 a 42 [8]. Otros pueden recomendar una relación a:p 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. Así mismo, si bien la adopción de medidas para mejorar una propiedad puede hacer que otra propiedad menos conocida pase por alto y cambie de forma 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 [9].

3.4 PERMEABILIDAD

La permeabilidad se define como la propiedad de una mezcla de arena que permita el paso de gas a través de la misma. Los moldes de yeso generalmente tienen baja permeabilidad. Si la permeabilidad del revestimiento no es lo

suficientemente alta, entonces el metal no podrá llenar la cavidad del molde completamente. [10]

Esta propiedad se determina por la cantidad de aire que puede pasar a través de la probeta cilíndrica de norma AFS (50,8 mm x 50,8 mm) bajo una presión también normalizada. La permeabilidad de moldes y machos dependen de las propiedades de la arena. Una mezcla con arena de permeabilidad alta tiene buenas propiedades de ventilación debido a su porosidad y al tamaño de los granos. Para fundición, la forma y la distribución de los granos, el tipo y cantidad de material aglomerante y la cantidad de agua utilizada para humedecer la mezcla, constituyen factores importantes para regular el grado de permeabilidad.

La permeabilidad de las mezclas de yeso para fundición se determinó mediante la norma AFS. Se emplearon probetas de ensayo cilíndricas de 50,8 mm x 50,8 mm.

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 deben prepararse con el mayor cuidado para asegurar resultados confiables.

En una misma arena, la permeabilidad en seco 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 y 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.

3.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO

Los yesos tienen valores relativamente altos de resistencia a la compresión después de fraguar. La resistencia disminuye a medida que aumenta la relación agua-yeso de la mezcla. Cuanta 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.

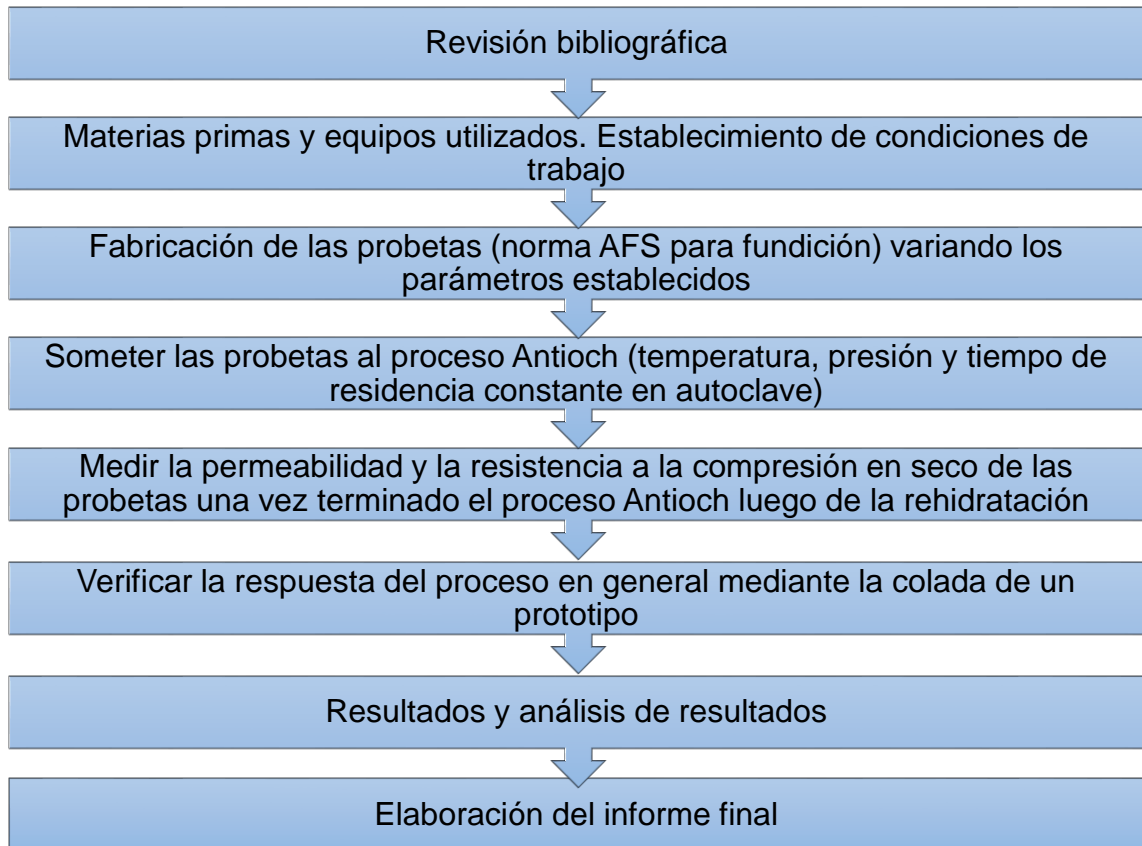
En el proceso de cocción se debilita enormemente los recubrimientos de yeso, por lo tanto la resistencia en seco es más baja que la resistencia en verde. Algunos recubrimientos, se debilitan más que otros, esto es en función de control de los productos químicos, los tamaños de partícula, los porcentajes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

Con el fin de obtener resultados precisos, es fundamental cumplir estrictamente con los procedimientos para la preparación y análisis de las mezclas en verde. Factores tales como la heterogeneidad de la mezcla, burbujas de aire y manipular los moldes antes del fraguado pueden afectar los resultados. Los programas de calentamiento y la refrigeración son también importantes para obtener buenos resultados en la resistencia a la compresión.

4. METODOLOGÍA

El trabajo de grado se desarrolló siguiendo el diagrama de la Figura 1.

Figura 1. Diagrama para el desarrollo del trabajo de grado



4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se hizo la respectiva consulta de los temas que se trabajaron en la tesis de grado como el proceso Antioch, información sobre las materias primas y variables de estudio como permeabilidad y resistencia a la compresión en seco. Se acudió a la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander para la consulta de libros, artículos de investigación, artículos de revistas, tesis y bases de datos relacionados con los temas de la investigación.

4.2 MATERIAS PRIMAS Y EQUIPOS UTILIZADOS. ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES DE TRABAJO

Las materias primas utilizadas fueron: yeso ortopédico “alfa loteado” de alta pureza, cuyas propiedades se pueden ver en el Anexo A; chamota de ladrillos refractarios molidos de baja alúmina para fundición con un alto contenido de amorfos para soportar el choque térmico y ambientes ácidos (ver Anexos B y C); y talco industrial. El proceso Antioch se efectuó en un equipo autoclave marca Parr con control preciso de temperatura y presión. El proceso de fusión se hizo en un horno para microfundición con colada al vacío. Todo esto fue proporcionado por el laboratorio de Moldeo y Fundición de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander.

4.3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS (NORMA AFS PARA FUNDICIÓN) VARIANDO LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS

Se fabricaron las probetas siguiendo la norma AFS con los contenidos de yeso, talco y chamota respectivos. Los cilindros que siguen esta norma fueron proporcionados por el laboratorio.

Las proporciones de los componentes en la mezcla fueron:

✓ Primera parte

Teniendo en cuenta el 100% de la mezcla:

Talco: varió entre los siguientes valores: 5%, 10%, 15%.

Yeso: valor constante de 50%.

Refractario: se utilizó la chamota y su composición en la mezcla varió entre los siguientes valores: 35%, 40% y 45%. Sus respectivos valores de composición de granulometría se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Proporciones de los componentes para la primera parte del proyecto

ETAPAS	MEZCLAS	COMPONENTES DE LA MEZCLA			
		TALCO	CHAMOTA		YESO
A	1	5%	45%	Pasante malla 100: 25%	50%
				Pasante malla 140: 50%	
				Pasante malla 200: 25%	
	2	10%	40%	Pasante malla 100: 25%	50%
				Pasante malla 140: 50%	
				Pasante malla 200: 25%	
	3	15%	35%	Pasante malla 100: 25%	50%
				Pasante malla 140: 50%	
				Pasante malla 200: 25%	
B	4	5%	45%	Pasante malla 100: 25%	50%
				Pasante malla 140: 25%	
				Pasante malla 200: 50%	
	5	10%	40%	Pasante malla 100: 25%	50%
				Pasante malla 140: 25%	
				Pasante malla 200: 50%	
	6	15%	35%	Pasante malla 100: 25%	50%
				Pasante malla 140: 25%	
				Pasante malla 200: 50%	

✓ **Segunda parte**

Teniendo en cuenta el 100% de la mezcla:

Talco: varió entre los siguientes valores: 5%, 10%, 15%.

Yeso: valor constante de 50%.

Refractario: su composición en la mezcla varió entre los siguientes valores: 35%, 40% y 45%. Sus respectivos valores de composición de granulometría se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Proporciones de los componentes para la segunda parte del proyecto

ETAPAS	MEZCLAS	COMPONENTES DE LA MEZCLA			
		TALCO	CHAMOTA	YESO	
C	7	5%	45%	Pasante malla 100: 20%	50%
				Pasante malla 140: 60%	
				Pasante malla 200: 20%	
	8	10%	40%	Pasante malla 100: 20%	50%
				Pasante malla 140: 60%	
				Pasante malla 200: 20%	
	9	15%	35%	Pasante malla 100: 20%	50%
				Pasante malla 140: 60%	
				Pasante malla 200: 20%	
D	10	5%	45%	Pasante malla 100: 20%	50%
				Pasante malla 140: 20%	
				Pasante malla 200: 60%	
	11	10%	40%	Pasante malla 100: 20%	50%
				Pasante malla 140: 20%	
				Pasante malla 200: 60%	
	12	15%	35%	Pasante malla 100: 20%	50%
				Pasante malla 140: 20%	
				Pasante malla 200: 60%	

Desarrollo Experimental

Una vez definidas las proporciones de los componentes, se preparó la mezcla. Se encontraron las relaciones agua-polvo (a:p) de manera empírica realizando varios ensayos, teniendo en cuenta los valores recomendados en la bibliografía y las propiedades de fluidez y vertido de cada mezcla. También se tuvo en cuenta que un exceso de agua puede afectar las propiedades mecánicas del molde. Se comenzó con una relación a:p de 0.40, la cual se recomienda para los recubrimientos de yeso empleados en joyería [11].

Los tiempos de fraguado se determinaron con ayuda de la aguja Vicat (Figura 2), siguiendo el método de la norma ASTM C191-08.

Figura 2. Aparato Vicat



Para la agitación de la pasta se empleó un agitador IKA RW 20 digital (Figura 3) y se trabajó a una velocidad constante de 640 r.p.m durante 45 segundos debido al poco tiempo de trabajo del yeso utilizado en las mezclas. El agua empleada fue agua destilada con un ph de 7 y densidad de 1 g/ml.

Se hicieron 12 mezclas en cuatro etapas (ver Tablas 3 y 4). Por cada mezcla de 500 g de polvo seco se fabricaron 3 probetas para un total de 36. Se tomó como referencia el contenido de talco.

Para la fabricación de las probetas se emplearon cilindros en acero inoxidable de 2 pulgadas de altura por 2 pulgadas de diámetro interno (2"x2") con bases de caucho vulcanizado (Figura 4), medidas que corresponden a las probetas estándar para arenas de moldeo según la norma AFS. Para desmoldear de una forma fácil se utilizó silicona spray ultrarápida que se utiliza comercialmente como lubricante. Las probetas fabricadas también se muestran en la Figura 4.

Figura 3. Agitador IKA RW 20 digital



Figura 4. Cilindros en acero inoxidable con base de caucho vulcanizado, silicona para desmoldear y probetas fabricadas



4.4 SOMETER LAS PROBETAS AL PROCESO ANTIOCH (TEMPERATURA, PRESIÓN Y TIEMPO DE RESIDENCIA CONSTANTE EN AUTOCLAVE)

El proceso Antioch tiene como variables principales la temperatura, la presión y el tiempo de residencia en autoclave. El autoclave es un reactor que trabaja con vapor sobrecalentado (Figura 5). Se tomó como referencia la tesis de grado Comportamiento del revestimiento de yeso modificado y su respuesta al proceso Antioch [12], la cual muestra que los mejores resultados de permeabilidad se obtuvieron con una temperatura alrededor de 128°C, una presión de 2 atm (29, 39 psi aprox.) y un tiempo de residencia en autoclave de 6 horas.

Terminado el proceso de autoclave, las probetas deshidratadas se dejaron rehidratar a temperatura ambiente durante 12 horas y luego se secaron en una estufa a una temperatura de 150°C durante otras 12 horas.

Figura 5. Autoclave marca Parr



4.5 MEDIR LA PERMEABILIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO DE LAS PROBETAS

Luego de secadas las probetas en la estufa, se determinó la permeabilidad utilizando un permeámetro eléctrico de lectura directa marca Dieter (Figura 6), siguiendo con la norma AFS para el ensayo de arenas de fundición

Figura 6. Permeámetro eléctrico marca Dieter



Después de tomar las medidas de permeabilidad, se determinó la resistencia a la compresión en seco utilizando la máquina universal de ensayos AFS Harry W. Dieter (Figura 7).

Se registraron todos los valores tomados de permeabilidad y resistencia a la compresión en seco. Se escogió uno de los valores más altos de permeabilidad junto con el valor más apropiado de resistencia a la compresión en seco para la elaboración de los moldes.

Figura 7. Máquina universal de ensayos AFS Harry W. Dieter



4.6 VERIFICAR LA RESPUESTA DEL PROCESO EN GENERAL MEDIANTE LA COLADA DE UN PROTOTIPO

Para verificar la respuesta del proceso y una vez seleccionada la mezcla, se fabricaron los moldes para fundir anillos mediante el método conocido como “cera perdida”. Se compraron diferentes anillos de cera y con ellos se construyó un árbol de cera (Figura 8) donde los anillos se conectan con ayuda de un cautín eléctrico a un tronco central de cera de 5 u 6 mm de diámetro por intermedio de unos vástagos (también de cera). El tronco se adapta a una base de goma que tiene el mismo diámetro del cilindro de acero que se va a utilizar para elaborar el molde. Esta goma tiene en su parte central una forma cónica (como un volcán) que será el bebedero por donde entra el material que se va a colar.

Figura 8. Preparación del árbol en cera en la base de goma



Una vez terminado el árbol de cera, el cilindro de acero se inserta en la base de goma que contiene el árbol, su parte externa se cubre con cinta y se rellena con la mezcla, dejando completamente sumergido todo el árbol de cera (Figura 9). Luego se calienta el molde a una temperatura de 140°C durante dos horas en una estufa Memmert digital (Figura 10) para derretir la cera, dejando un molde vacío con la copia del árbol de cera elaborado. Después se somete al proceso Antioch, para aumentar la permeabilidad y disminuir la temperatura del molde durante la colada.

Figura 9. Cilindro de acero



Figura 10. Estufa para laboratorio marca Memmert digital



Los prototipos se elaboraron con tres aleaciones de diferentes puntos de fusión y buenas propiedades de colabilidad, con el fin de observar el comportamiento del molde durante la colada. Antes del proceso de fusión se calentaron los moldes en una mufla eléctrica digital (Figura 11) a temperaturas, velocidades de calentamiento y tiempos específicos para evitar cambios bruscos de temperatura que puedan causar fisuras en el molde durante la colada. Esta información se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de trabajo previo al proceso de fusión

ALEACIÓN	PUNTO DE FUSIÓN	TEMPERATURA DEL MOLDE	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	TIEMPO
Al4-Zn	400°C	200°C	4,0 °C/min	3 horas
Al14-Zn	490°C	250°C	4,0 °C/min	3 horas
Ag	962°C	350°C	4,0 °C/min	3 horas

Figura 11. Mufla eléctrica programable para laboratorio marca Vulcan



Luego de calentar los moldes en la mufla se da inicio al proceso de fusión en un horno para microfundición (Figura 12). Cuando se alcanzaron los puntos de fusión de los distintos materiales, se elevó la temperatura 40°C por encima de la temperatura de fusión (temperatura de colada) dando paso al proceso de inyección del metal en el interior del molde (Figura 13).

Una vez terminado el proceso de inyección del metal se dejó solidificar y enfriar durante 15 minutos. Por último, los moldes fueron introducidos en un valde con agua a temperatura ambiente y destruidos para extraer las piezas fundidas.

Figura 12. Horno para microfundición con colada al vacío marca NEUTEC USA modelo J2R



Figura 13. Proceso de inyección del metal en el interior del molde



5. RESULTADOS

La consistencia normal se encontró de forma empírica teniendo en cuenta la bibliografía consultada y las propiedades de fluidez y vertido de cada una de las mezclas. Se observó que con una relación agua-polvo (a:p) de 0,40 las mezclas no tenían buena fluidez. También se tuvo en cuenta que el exceso de agua puede disminuir las propiedades mecánicas del molde. Por tal motivo, se probaron diferentes contenidos de agua por cada 100 gramos de polvo seco y se escogieron las relaciones a:p más apropiadas para cada una de las mezclas (ver Tablas 6, 7, 8 y 9).

El tiempo de fraguado inicial o tiempo de trabajo se determinó con la aguja de Vicat (es importante tener en cuenta que el yeso ortopédico “alfa loteado” utilizado es de fraguado rápido, por lo tanto la persona que toma el registro tiene que estar atenta). Se registró el tiempo en que la aguja tenía una penetración de 25 mm (para las relaciones a:p de cada una de las mezclas) que corresponde al tiempo de fraguado inicial (ver Tablas 6, 7, 8 y 9).

Tabla 6. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa A

MEZCLAS	COMPONENTES DE LA MEZCLA			RELACIÓN AGUA- POLVO (a:p)	TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL [s]	
	TALCO	CHAMOTA				YESO
1	5%	45%	Pasante malla 100: 25%	50%	0,55	60
			Pasante malla 140: 50%			
			Pasante malla 200: 25%			
2	10%	40%	Pasante malla 100: 25%	50%	0,60	60
			Pasante malla 140: 50%			
			Pasante malla 200: 25%			
3	15%	35%	Pasante malla 100: 25%	50%	0,65	60
			Pasante malla 140: 50%			
			Pasante malla 200: 25%			

Tabla 7. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa B

MEZCLAS	COMPONENTES DE LA MEZCLA			RELACIÓN AGUA- POLVO (a:p)	TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL [s]	
	TALCO	CHAMOTA				YESO
4	5%	45%	Pasante malla 100: 25%	50%	0,55	60
			Pasante malla 140: 25%			
			Pasante malla 200: 50%			
5	10%	40%	Pasante malla 100: 25%	50%	0,60	60
			Pasante malla 140: 25%			
			Pasante malla 200: 50%			
6	15%	35%	Pasante malla 100: 25%	50%	0,65	60
			Pasante malla 140: 25%			
			Pasante malla 200: 50%			

Tabla 8. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa C

MEZCLAS	COMPONENTES DE LA MEZCLA			RELACIÓN AGUA- POLVO (a:p)	TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL [s]	
	TALCO	CHAMOTA				YESO
7	5%	45%	Pasante malla 100: 20%	50%	0,55	60
			Pasante malla 140: 60%			
			Pasante malla 200: 20%			
8	10%	40%	Pasante malla 100: 20%	50%	0,60	60
			Pasante malla 140: 60%			
			Pasante malla 200: 20%			
9	15%	35%	Pasante malla 100: 20%	50%	0,65	60
			Pasante malla 140: 60%			
			Pasante malla 200: 20%			

Tabla 9. Relación agua-polvo y tiempo de trabajo para las mezclas de la etapa D

MEZCLAS	COMPONENTES DE LA MEZCLA			RELACIÓN AGUA-POLVO (a:p)	TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL [s]	
	TALCO	CHAMOTA				YESO
10	5%	45%	Pasante malla 100: 20%	50%	0,55	60
			Pasante malla 140: 20%			
			Pasante malla 200: 60%			
11	10%	40%	Pasante malla 100: 20%	50%	0,60	60
			Pasante malla 140: 20%			
			Pasante malla 200: 60%			
12	15%	35%	Pasante malla 100: 20%	50%	0,65	60
			Pasante malla 140: 20%			
			Pasante malla 200: 60%			

Los valores obtenidos de permeabilidad para cada una de las mezclas de la etapa A, B, C y D se registraron en las Tablas 10, 11, 12 y 13 respectivamente.

La variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco para cada una de las mezclas de la etapa A, B, C y D se muestran en las Gráficas 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Cada punto en las gráficas representa el promedio de las medidas de las tres probetas.

Tabla 10. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa A

MEZCLAS	PERMEABILIDAD AFS			PROMEDIO
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
1	6,8	7,2	6,9	6.97
2	8,2	8,3	8,5	8.33
3	9	8.6	8.8	8.8

Gráfica 1. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa A.

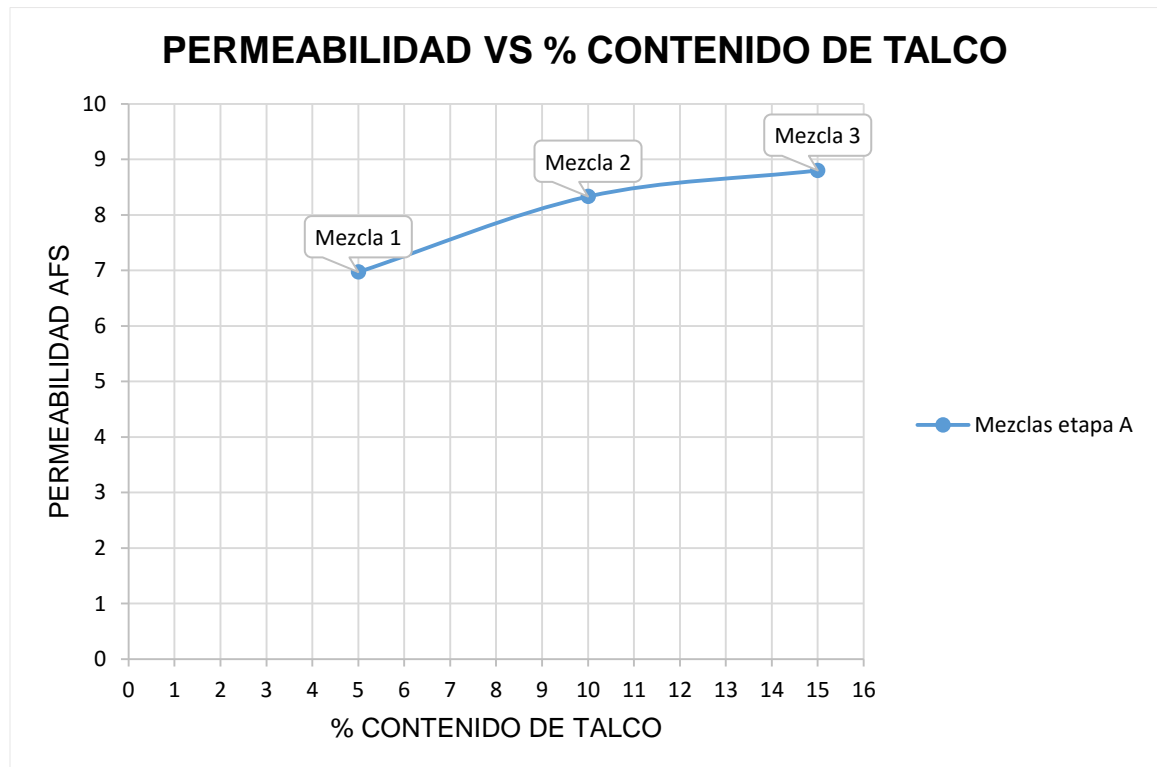


Tabla 11. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa B

MEZCLAS	PERMEABILIDAD AFS			PROMEDIO
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
4	7,2	7,5	7,3	7,33
5	8,8	8,5	8,4	8,57
6	9,0	9,0	9,3	9,1

Gráfica 2. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa B

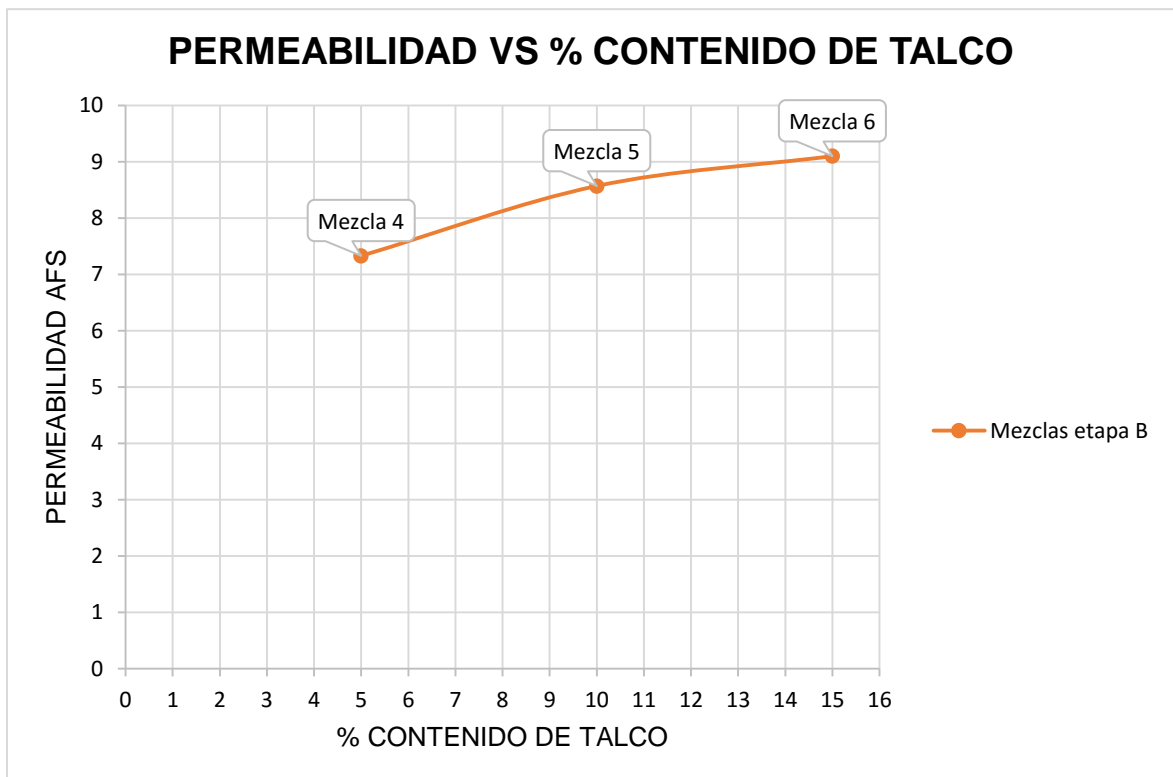


Tabla 12. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa C

MEZCLAS	PERMEABILIDAD AFS			PROMEDIO
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
7	8,9	8,6	8,5	8,67
8	10,5	10,8	10,4	10,57
9	11,5	11,4	11,6	11,5

Gráfica 3. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa C

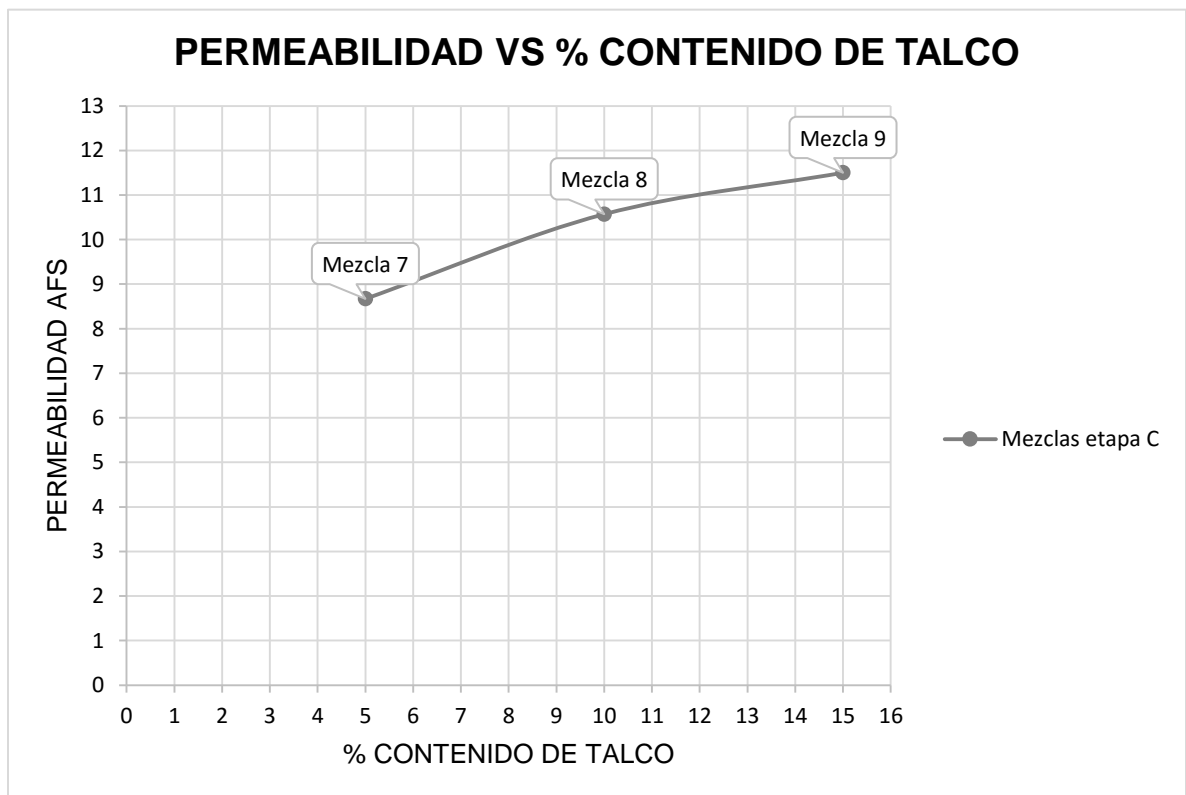
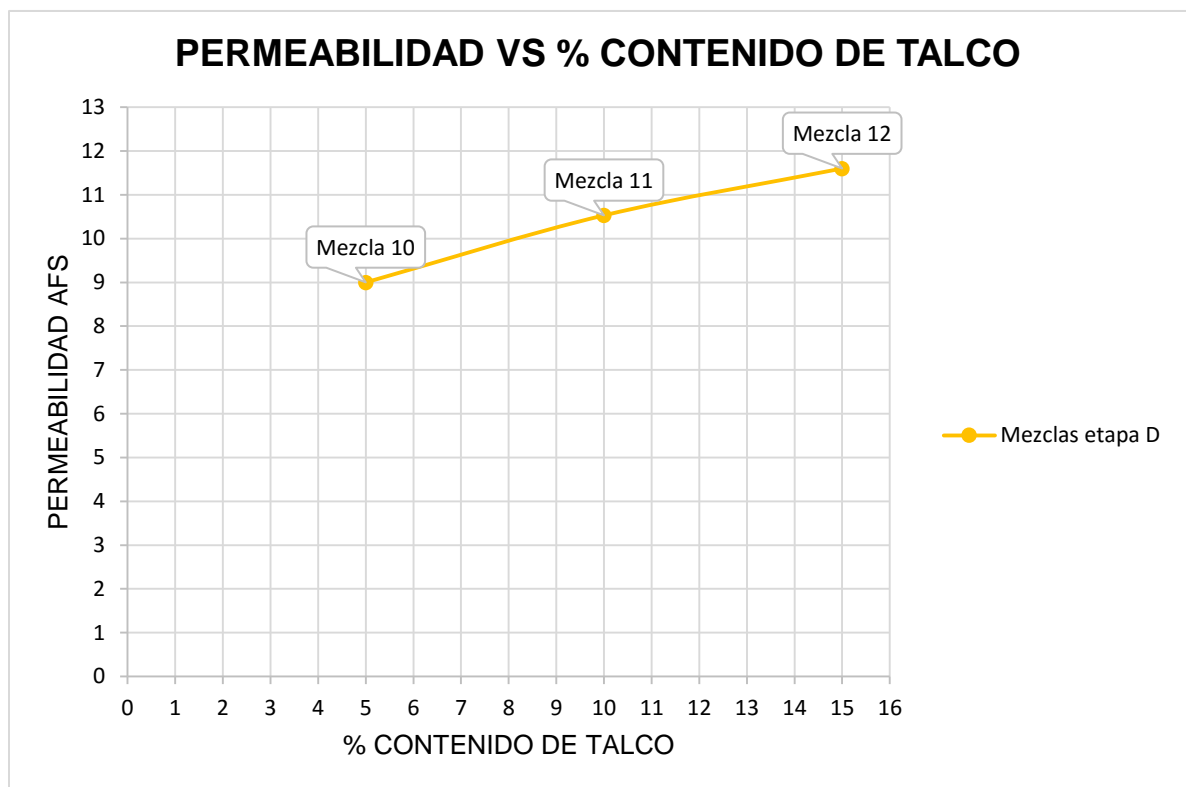


Tabla 13. Lecturas de permeabilidad para las mezclas de la etapa D

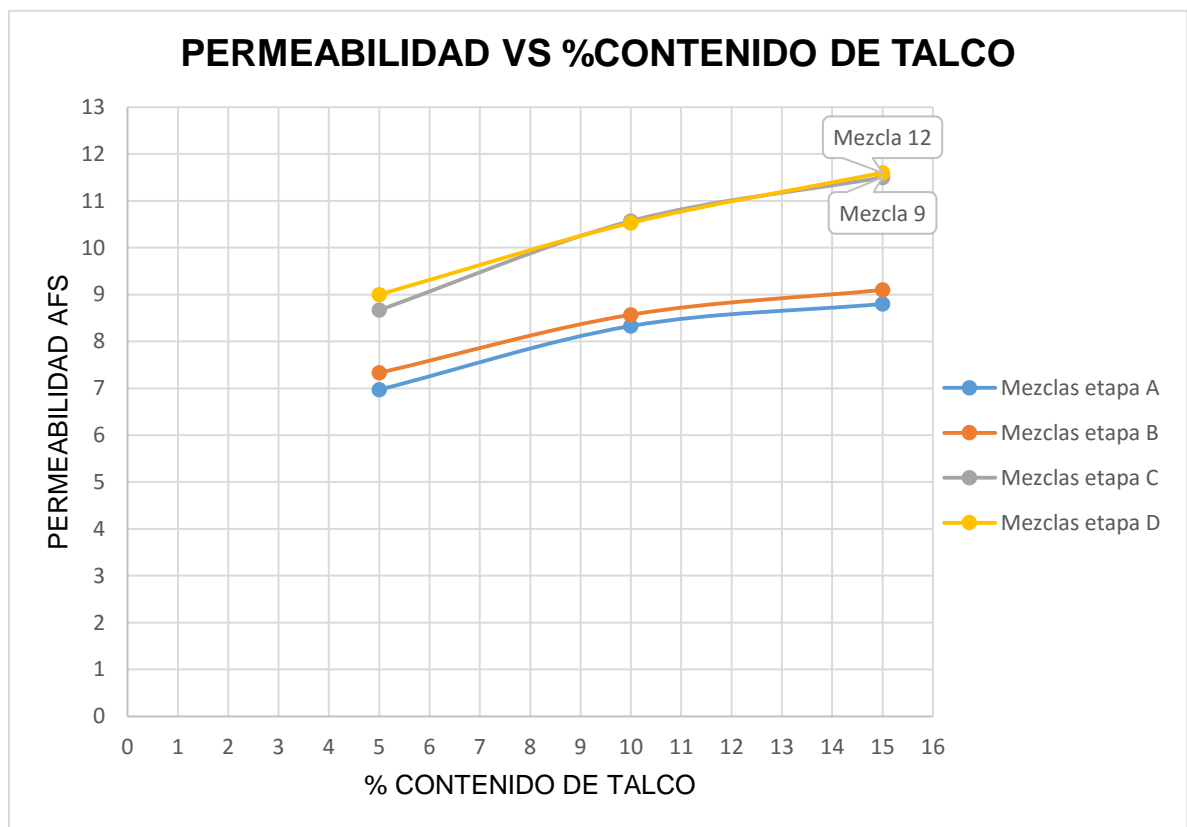
MEZCLAS	PERMEABILIDAD AFS			PROMEDIO
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
10	9,0	9,2	8,8	9,0
11	10,7	10,5	10,4	10,53
12	11,8	11,6	11,4	11,6

Gráfica 4. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa D



La comparación entre la variación de la permeabilidad y el porcentaje de contenido de talco de las mezclas en todas las etapas se muestra en la Gráfica 5.

Gráfica 5. Variación de la permeabilidad en función del porcentaje de contenido de talco de las mezclas en todas las etapas



Los valores obtenidos de resistencia a la compresión en seco para cada una de las mezclas de la etapa A, B, C y D se registraron en las Tablas 14, 15, 16 y 17 respectivamente.

La variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco para cada una de las mezclas de la etapa A, B, C y D se muestran en las Gráficas 6, 7, 8 y 9 respectivamente. Cada punto en las gráficas representa el promedio de las medidas de las tres probetas.

Tabla 14. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa A

MEZCLAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO [PSI]			PROMEDIO [PSI]
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
1	>90	>90	>90	>90
2	89	85	82	85
3	75	73,5	72	73.5

Gráfica 6. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa A

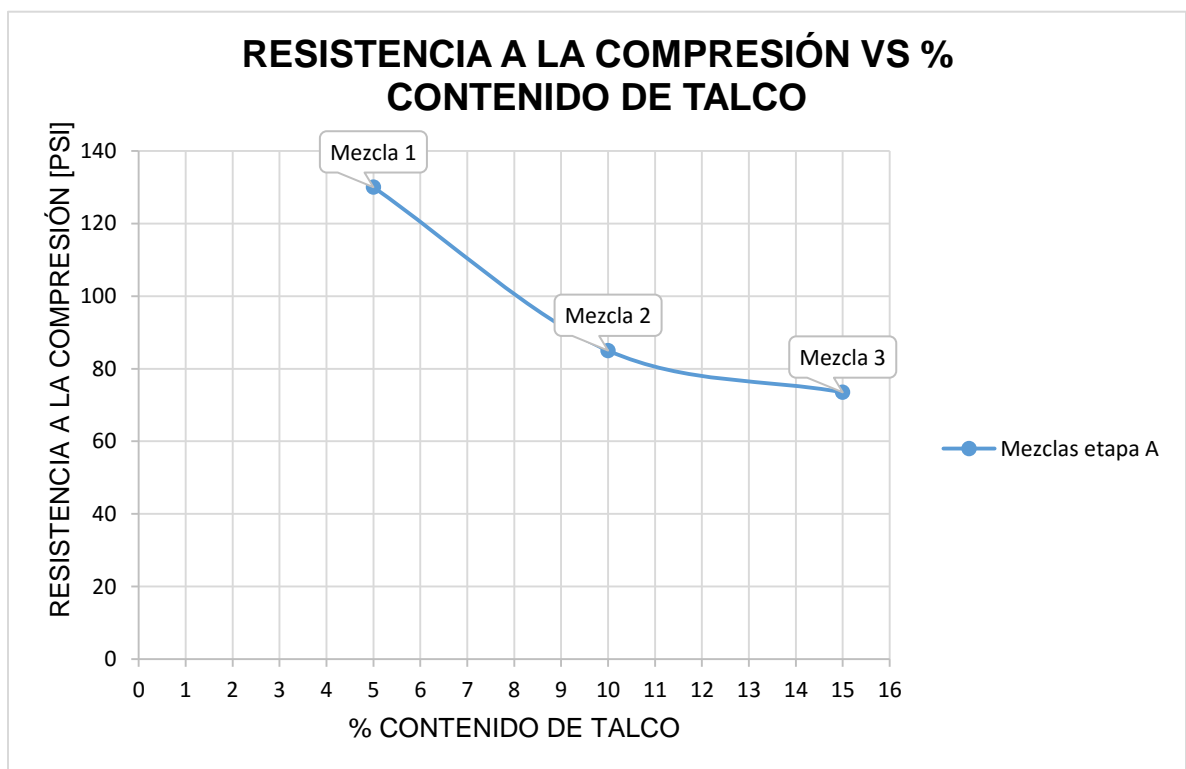


Tabla 15. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa B

MEZCLAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO [PSI]			PROMEDIO [PSI]
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
4	>90	>90	>90	>90
5	76,5	77	79	77,5
6	50,5	51,5	53	51,67

Gráfica 7. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa B

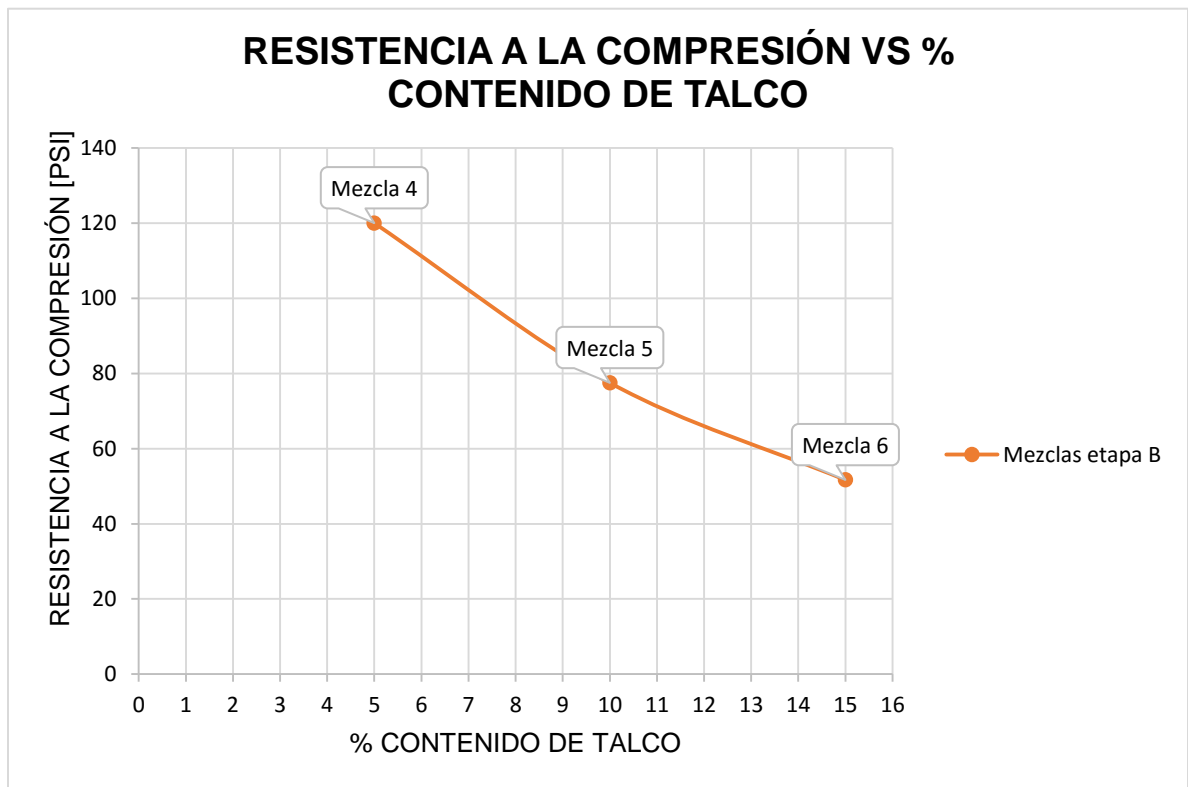


Tabla 16. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa C

MEZCLAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO [PSI]			PROMEDIO [PSI]
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
7	>90	>90	>90	>90
8	79	74	82	78,33
9	43	42	44	43

Gráfica 8. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa C

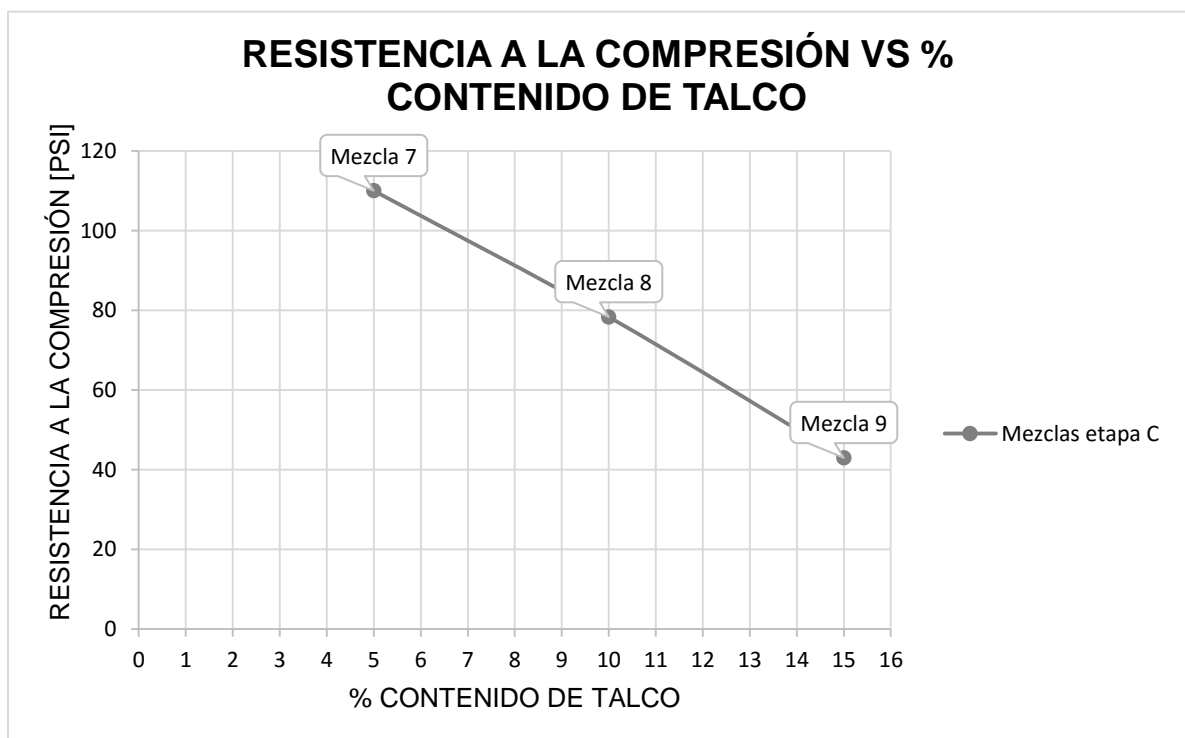
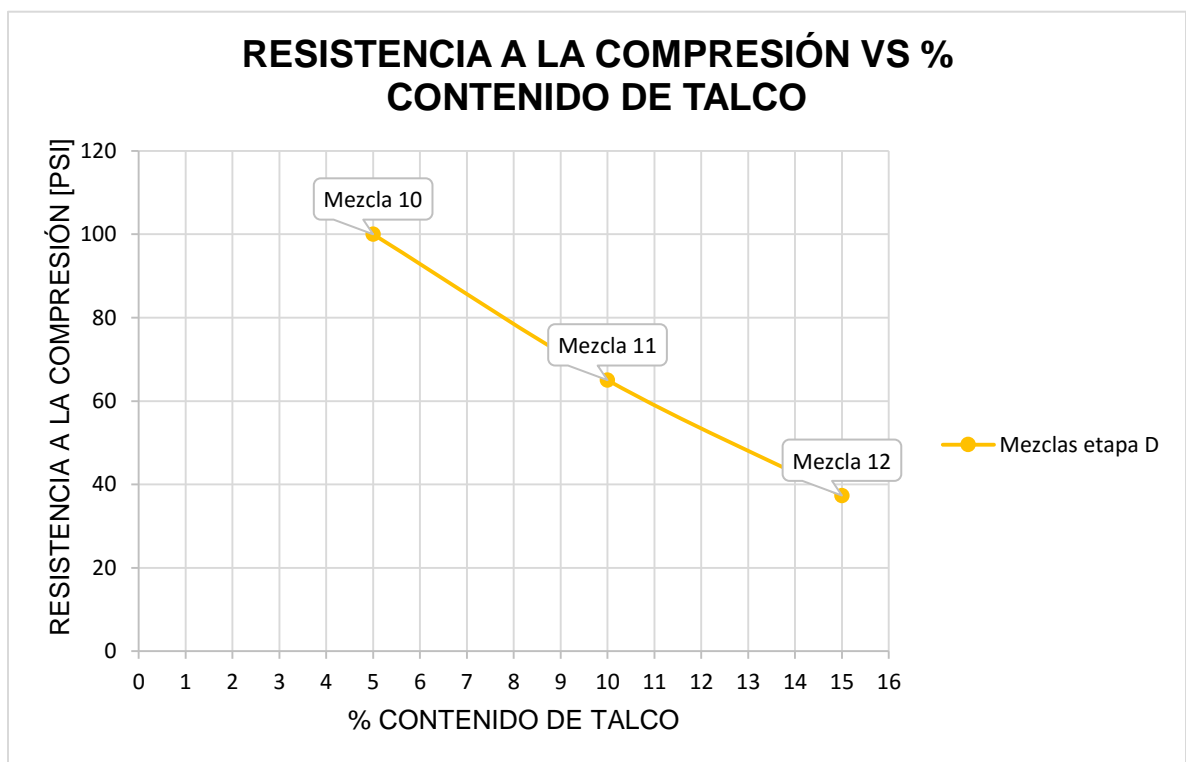


Tabla 17. Lecturas de resistencia a la compresión para las mezclas de la etapa D

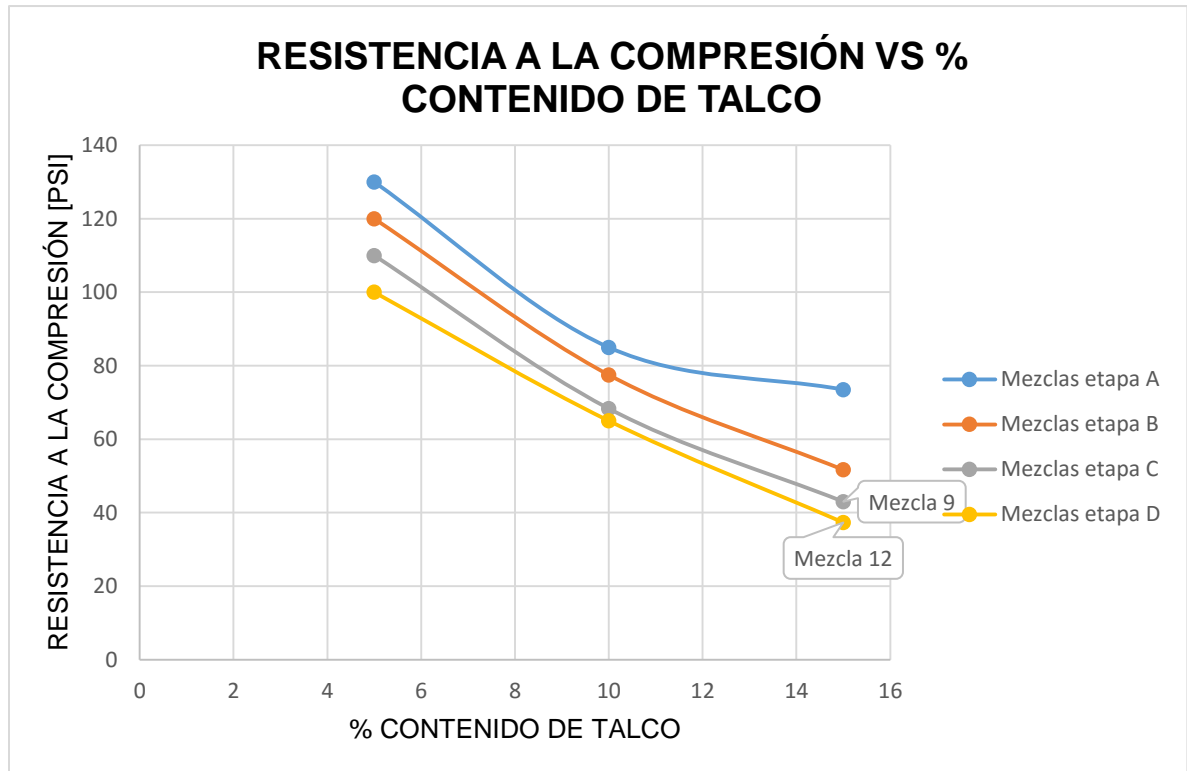
MEZCLAS	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO [PSI]			PROMEDIO [PSI]
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	
10	>90	>90	>90	>90
11	68,5	62,5	64	65
12	35	37	40	37,33

Gráfica 9. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco en las mezclas de la etapa D



La comparación entre la variación de la resistencia a la compresión en seco y el porcentaje de contenido de talco de las mezclas en todas las etapas se muestra en la Gráfica 10.

Gráfica 10. Variación de la resistencia a la compresión en seco en función del porcentaje de contenido de talco de las mezclas en todas las etapas



PROTOTIPOS

Para la elaboración de los moldes se escogió la mezcla 9. Sus características se muestran en la Tabla 18. Tiene una permeabilidad casi igual a la de la mezcla 12 pero una mejor resistencia a la compresión en seco.

Se fabricaron cuatro moldes para la elaboración de cuatro prototipos: dos con la aleación Al4-Zn, uno con la aleación Al14-Zn y uno con Ag. Se escogieron estas aleaciones por tener buenas propiedades de colabilidad y diferentes puntos de fusión.

Tabla 18. Características de la mezcla 9 y 12

MEZCLA	TALCO	REFRACTARIO		YESO	PERMEABILIDAD AFS PROMEDIO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN SECO PROMEDIO [PSI]
9	15%	35%	Pasante malla 100: 20%	50%	11,5	43
			Pasante malla 140: 60%			
			Pasante malla 200: 20%			
12	15%	35%	Pasante malla 100: 20%	50%	11.6	37,33
			Pasante malla 140: 20%			
			Pasante malla 200: 60%			

Las temperaturas de colada para los distintos materiales se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Temperaturas de colada para las diferentes aleaciones

ALEACIÓN	PUNTO DE FUSIÓN	TEMPERATURA DE COLADA
Al4-Zn	400°C	440°C
Al14-Zn	490°C	530°C
Ag	962°C	1002°C

Los prototipos se muestran en las Figuras 14, 15, 16 y 17.

Figura 14. Anillos fundidos con la aleación Al4-Zn con vacío



Figura 15. Anillos fundidos con la aleación Al4-Zn con vacío



Figura 16. Anillos fundidos con la aleación Al14-Zn con vacío



Figura 17. Anillos fundidos con Ag con vacío



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proceso Antioch permite evitar el tratamiento térmico a altas temperaturas (700°C) que se les hace a los moldes convencionales durante un período que oscila entre 14 y 16 horas, lo cual permite disminuir costos.

Se identifica que a mayor cantidad de talco se necesita una mayor cantidad de agua para que la mezcla brinde una mayor fluidez y vertido tal como se aprecia en las Tablas 6, 7, 8 y 9. La razón es que el talco debido a su granulometría fina, presenta mayor número de granos y superficies de contacto, por lo tanto se necesitará una mayor cantidad de agua para la mezcla, la cual junto con el yeso colabora con la aglomeración de todas las partículas.

Es importante resaltar que a mayor contenido de talco y por ende de agua, la permeabilidad se hace mayor tal como se aprecia en la Gráfica 5, esto se debe a que después del proceso Antioch toda el agua que actúa como aglomerante de los granos se evapora y la porosidad de las probetas aumenta notablemente.

La resistencia a la compresión en seco disminuye a medida que aumenta el contenido de agua en la mezcla debido a que esta depende de la cohesión entre las partículas. Si hay mayor cantidad de agua, una vez la mezcla fragua completamente, la cohesión entre las partículas va a ser menor. Como a medida que aumenta el contenido de talco también aumenta el contenido de agua, entonces la resistencia a la compresión disminuye tal como se aprecia en la Gráfica 10. También, durante el proceso Antioch se deshidratan las probetas y quedan muchos más espacios entre las partículas (poros), por lo tanto hay menor cohesión en seco. Por ende, la permeabilidad y la resistencia a la compresión en seco son dos propiedades inversas.

La mezcla 9 tiene el mismo contenido de talco pero un contenido de granos gruesos en la chamota mayor que la mezcla 12 (ver Tabla 18) y presenta una mayor resistencia a la compresión en seco tal como se ve en la Gráfica 10. Esto se debe a que el yeso envuelve más a la mezcla con granos gruesos porque tienen un área superficial menor que la mezcla con granos finos generando una mayor cohesión.

En general, todos los prototipos tuvieron buen copiado y textura debido a la naturaleza fina de los constituyentes del molde. En la Figura 17 se observan rebabas y porosidades en el prototipo hecho con Ag, esto se debe a que es un metal sumamente blando, sin embargo el molde tuvo el comportamiento esperado.

7. CONCLUSIONES

- Se comprobó que con un contenido de talco de 15% se obtuvo una mezcla de yeso con permeabilidad de 11.5 (aceptable por la norma AFS) luego de sometida al proceso Antioch.
- Se comprobó que con un contenido de yeso del 50% y la granulometría de la chamota empleada (20% de pasante malla 100, 60% de pasante malla 140 y 20% de pasante malla 200) se obtuvo una resistencia a la compresión en seco de 43 psi.
- Se demostró que el talco contrarresta la contracción del yeso al enfriarse.
- Se verificó mediante los prototipos la respuesta del proceso en general observándose en las Figuras 14, 15 y 16 unos anillos que se caracterizan por una alta calidad en la textura superficial.
- El proceso Antioch al aumentar la permeabilidad de los moldes en un tiempo de 6 horas y 130°C de temperatura, evita el tratamiento térmico de los moldes en el proceso tradicional (altas temperaturas y larga duración) lo que representa un ahorro económico significativo.
- Se comprobó que la chamota presenta buenas propiedades de refractariedad y resistencia al choque térmico debido al alto contenido de amorfos, obteniéndose moldes estables térmicamente.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar la investigación para mirar la posibilidad de hacer las coladas sin vacío aprovechando la permeabilidad de los moldes, lo cual permitirá popularizar el proceso disminuyendo los costos en la inversión al utilizar hornos de fusión más sencillos.
- Se podría comenzar una investigación para el pre-engaste de esmeraldas colombianas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HEINE, Richard W.; LOPER, Carl R.; ROSENTHAL, Philip C. Principles of Metal Casting. 2.^a Edición. New York: McGraw-Hill, 1967. Library of Congress Catalog Card Number 66-29476. p. 42-43

[2] HORTON, P. J. Investment powders and investment casting. Gold Tech, 2000. No. 28. p. 12-17

[3] NOVO DE MIGUEL, Luciano. El yeso en la construcción. 9.^a Edición. Barcelona: Ediciones CEAC, 1968. Depósito legal B. 20698-68. p. 18

[4] GONZÁLEZ LUNA, Jorge Eliécer; TAPIA OSPINO, Víctor Raúl. Técnicas modernas para permeabilizar moldes en yeso. Bucaramanga, 1983. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 5-7

[5] VILLARINO OTERO, Alberto. Ciencia y tecnología de los materiales. Ávila, 2011. Depósito Legal: en tramitación. ISBN: en tramitación. p. 35

[6] ASTM C266-07. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles

[7] ASTM C191 – 08. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle

[8] Ransom & Randolph W. Application Instructions Ultra-Vest Jewelry Investment. July, 1999

[9] CARTER, Ralph. Effect of water quality and temperature on investment casting powders. Proc. of the Santa Fe symposium on jewelry manufacturing technology. Met-Chem Research, 2000. p. 1-27. Also: Gold Tech, 2001. No. 32. p 7-18.

[10] CARTER, Ralph. Does Investment permeability impact jewelry castings. Santa Fe Symposium, May 2004. p. 105

[11] McCLOSKEY, John C.; et.al. An evaluation of the permeability of a jewelry casting investment. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1999. p. 431

[12] SANABRIA, Oscar Leonardo; MARTINEZ, Henry Jair. Comportamiento del revestimiento de yeso modificado y su respuesta al proceso Antioch. Bucaramanga, 2014. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 43

BIBLIOGRAFÍA

CARTER, Ralph. Effect of water quality and temperature on investment casting powders. Proc. of the Santa Fe symposium on jewelry manufacturing technology. Met-Chem Research, 2000. Also: Gold Tech, 2001. No. 32

GONZÁLEZ LUNA, Jorge Eliécer; TAPIA OSPINO, Víctor Raúl. Técnicas modernas para permeabilizar moldes en yeso. Bucaramanga, 1983. 140 p. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

HEINE, Richard W.; LOPER, Carl R.; ROSENTHAL, Philip C. Principles of Metal Casting. 2.^a Edición. New York: McGraw-Hill, 1967. 736 p. Library of Congress Catalog Card Number 66-29476

HORTON, P. J. Investment powders and investment casting. Gold Tech, 2000. No. 28

McCLOSKEY, John C.; et.al. An evaluation of the permeability of a jewelry casting investment. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 1999. 521 p.

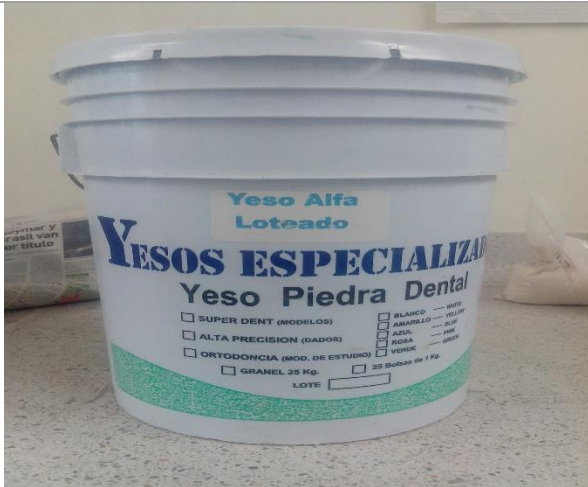
NOVO DE MIGUEL, Luciano. El yeso en la construcción. 9.^a Edición. Barcelona: Ediciones CEAC, 1968. 160 p. Depósito legal B. 20698-68

SANABRIA, Oscar Leonardo; MARTINEZ, Henry Jair. Comportamiento del revestimiento de yeso modificado y su respuesta al proceso Antioch. Bucaramanga, 2014. 72 p. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

VILLARINO OTERO, Alberto. Ciencia y tecnología de los materiales. Ávila, 2011. 128 p. Depósito Legal: en tramitación. ISBN: en tramitación

ANEXOS

ANEXO A. Propiedades del yeso ortopédico “alfa loteado” utilizado en la investigación

Presentación		
Consistencia Tipo	40 mL/100 g de polvo	
Tiempo “Vicat”	Rápido	1 – 1.5 min
	Lento	2 – 2.5 min
Resistencia a la Compresión DRY (48 hrs)	500 Kg/cm ²	
Expansión Lineal de Fraguado	0.1 – 0.5 %	
Tamaño de Partícula	74 micras	
Molienda	Por una malla #200 pasa el 90% del material	

Fuente: <http://www.yesosespecializados.com/yeso-ortopedico-alfa-loteado.html>

ANEXO B. Resultado de Difracción de Rayos X para la chamota

 	LABORATORIO DE RAYOS-X	Codigo: F-LRX-04
		Version: 1
	INFORME DE RESULTADOS DIFRACCIÓN DE RAYOS-X	Página 1

Chamota

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo	36.8 % (0.3)
	$\text{Al}_{1.52} \text{Si}_{1.48} \text{O}_{3.24}$	Mullita	9.2 % (0.3)
	Ti O_2	Rutilo	<1 %
	$(\text{Na, Ca})_x \text{Al}_y (\text{Si, Al})_z \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2 \text{O}$	Beidellita	N.C
	$\text{Fe} (\text{Al, O}_x)$	Hercinita	N.C
	$\text{Al}_2 (\text{Si, O}_x) \text{O}$	Sillimanita	N.C
	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
	Si O_2	Cristobalita Alta	1.4 % (0.1)
	Total Cristalino		48.8 %
	Amorfos y otros		51.2 %

Elaboró:

Oco. MSc. José Luis Pinto Camargo
 Profesional Analista
 PQ. 2009

Revisó:

Dr. José Antonio Henao Martínez
 Director Laboratorio
 PQ. 0321

Universidad industrial de Santander, Km. 2 Via 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 NIT 890.201.213-4

ANEXO C. Resultados de Fluorescencia de Rayos X para la chamota

	LABORATORIO DE RAYOS-X	Código: FRINFRX.01
	INFORME DE RESULTADOS FLUORESCENCIA DE RAYOS-X	Versión: 3

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Si	14	31,509%
Al	13	12,129%
K	19	2,839%
Fe	26	1,639%
Ti	22	0,739%
Mg	12	0,459%
Ca	20	0,239%
Na	11	0,209%
Ba	56	0,089%
Zr	40	0,059%
P	15	0,049%
Cu	29	0,029%
Rb	37	0,029%
Zn	30	0,019%
S	16	0,019%
Cr	24	0,019%
Sr	38	0,019%
Mn	25	94 ppm
Pb	82	85 ppm
Ni	28	54 ppm
Y	39	52 ppm
Ga	31	26 ppm
Nb	41	23 ppm
Balance (C.H.O)		---

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: frx@uis.edu.co NIT 890.201.213-4