

**ELABORACIÓN DE PASTA CERÁMICA REFRACTARIA A PARTIR DE
ARCILLA, VIDRIO RECICLADO Y CHAMOTA**

**ALBA LUCÍA BRAVO ERASO
NELSON FERNEY MUÑOZ FUERTES**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCION
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO**

2003

**ELABORACIÓN DE PASTA CERÁMICA REFRACTARIA A PARTIR DE
ARCILLA, VIDRIO RECICLADO Y CHAMOTA**

**ALBA LUCÍA BRAVO ERASO
NELSON FERNEY MUÑOZ FUERTES**

**Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

Director

**FRANCISCO CORAL ASAÍN
Ingeniero Civil**

Codirector

**CARLOS CÓRDOBA BARAHONA
Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCION
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO**

2003

“Las ideas y conclusiones aportadas en el Trabajo de Grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”

Artículo 1° del acuerdo No. 324 del 11 de octubre de 1996 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Cada día es una nueva oportunidad para cambiar, para progresar y para poder llegar al éxito.

Hoy con este triunfo empiezo a escribir un capítulo importante en mi vida, hoy es el inicio de un largo camino por recorrer.

Es por eso que quiero compartir y dedicar mi felicidad a:

Dios Por darme el milagro de la vida y ser el pilar de mi existencia.

Mis padres Guillermo y Lola por su amor, ejemplo, sacrificio, fe y apoyo incondicional, que motivan mi superación constante, haciendo de cada día un amanecer lleno de esperanza.

Mi hermana Aura María y mis abuelitas Aura y Angélica por darme amor, tolerancia y comprensión.

Mi familia y mis amigos que han compartido su corazón conmigo.

Oscar porque su recuerdo siempre será la luz inextinguible en mi destino.

ALBA LUCÍA BRAVO

*Los triunfos no sirven de nada
Si no tenemos a quien dedicarlos
Y la felicidad pierde importancia
Si no hay a nuestro lado
Alguien con quien compartirla.*

Es mi deber dedicar este trabajo a:

Dios por protegerme y estar siempre a mi lado.

Mis padres Genith y Nelson por su amor, apoyo y sacrificio.

Mis hermanos Alexandra, Helver, Andrés por su cariño y comprensión.

Y a mis familiares y amigos por sus palabras de aliento.

NELSON FERNEY MUÑOZ.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de esta investigación, en especial a:

FRANCISCO CORAL ASAÍN, Ingeniero Civil, Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño y Director de la Investigación, por sus orientaciones, aportes y constante colaboración.

CARLOS CÓRDOBA BARAHONA, Ingeniero Metalúrgico, M.Sc. Química Inorgánica – Cerámica, Profesor Titular del Departamento de Química de la Universidad de Nariño y Codirector de la Investigación, por sus orientaciones, aportes y motivación.

La fundación INNOVAR E.A.T por su valiosa cooperación en el desarrollo de esta investigación.

HERNEY LASSO ECHAVARRIA, Geotecnólogo, Jefe de Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, por compartir sus experiencias y conocimientos, por su apoyo incondicional y permanente motivación.

GUSTAVO PONCE, Auxiliar de Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, por su ayuda y colaboración.

DORIS MARTINEZ, Ingeniera Civil, Secretaria Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, por su oportuna colaboración.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	29
1. OBJETIVOS	32
1.1 Objetivos Generales	32
1.2 Objetivos Específicos	32
2. MARCO TEÓRICO	33
2.1 RESEÑA HISTÓRICA	33
2.2 ARCILLA	34
2.2.1 Clasificación de las arcillas	35
2.3 VIDRIO	35
2.3.1 Composición y propiedades	35
2.3.2 Clasificación de los vidrios	36
2.4 MATERIALES REFRACTARIOS	37
2.4.1 Clasificación de los refractarios	37
2.5 PASTAS CERÁMICAS	40
2.5.1 Pastas cerámicas refractarias	40
2.5.2 Principales materias primas usadas en la formulación de pastas	40
2.6 PROPIEDADES DE LOS REFRACTARIOS	42
2.6.1 Porosidad	42

	Pág.
2.6.2 Puntos de fusión	43
2.6.3 Comportamiento de fusión	43
2.6.4 Pruebas Mecánicas	44
2.6.5 Pruebas Físicas	44
2.6.6 Pruebas Térmicas	45
3. MATERIALES Y MÉTODOS	48
3.1 GENERALIDADES	48
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS	48
3.2.1 Arcilla gris y amarilla	48
3.2.2 Vidrio	51
3.2.3 Chamota	52
3.2.4 Cal	53
3.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EN LAS PROBETAS	53
3.4 HUMEDAD ÓPTIMA DE LAS MUESTRAS	55
3.5 EQUIPO UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	56
3.5.1 Molde para la elaboración de probetas	56
3.5.2 Trituradoras mecánicas de quijadas	56
3.5.3 Molino eléctrico de discos	57
3.5.4 Molino de bolas	58
3.5.5 Tamizador mecánico	58
3.5.6 Balanza electrónica	59

	Pág.
3.5.7 Agitador de aspas	59
3.5.8 Prensa con gato hidráulico	60
3.5.9 Capinador	60
3.5.10 Estufa de secado	61
3.5.11 Mufla de resistencia eléctrica	61
3.6 PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS	62
3.6.1 Arcilla	62
3.6.2 Vidrio	63
3.6.3 Chamota	64
3.6.4 Preparación de la pasta	65
3.6.5 Elaboración de probetas	65
3.6.6 Deseccación	66
3.6.7 Cocción	67
3.7 TAMAÑO DE LA MUESTRA	68
4. ASPECTOS RELACIONADOS CON LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS	73
4.1 PRUEBAS FÍSICA	73
4.1.1 Densidad	73
4.1.2 Absorción	73
4.2 PRUEBAS MECÁNICAS	75
4.2.1 Resistencia a la Compresión	75
4.3 PRUEBAS TÉRMICAS	76

	Pág.
4.3.1 Punto de reblandecimiento de la pasta	76
5. PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	79
5.1 DENSIDAD	79
5.2 ABSORCIÓN DE AGUA	86
5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	93
5.4 PUNTO REBLANDECIMIENTO	100
6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	108
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
7.1 CONCLUSIONES	113
7.2 RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	117

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Análisis químico de la arcilla gris	50
Cuadro 2. Análisis químico de la arcilla amarilla	51
Cuadro 6. Análisis químico del vidrio	51
Cuadro 4. Análisis químico de la chamota	52
Cuadro 5. Dosificación de las muestras para el pasante 40	54
Cuadro 6. Dosificación de las muestras para el pasante 60	54
Cuadro 7. Humedad óptima de las muestras – Pasante 40	55
Cuadro 8. Humedad óptima de las muestras – Pasante 60	55
Cuadro 9. Resistencia a la compresión, muestra piloto 100% arcilla	70
Cuadro 10. Análisis para determinar el tamaño de la muestra	71
Cuadro 11. Promedios de Densidad Pasante 40 – T°: 950°C	79
Cuadro 12. Promedios de Densidad Pasante 60 – T°: 950°C	80
Cuadro 13. Promedios de Densidad Pasante 40 – T°: 1000°C	80
Cuadro 14. Promedios de Densidad Pasante 60 – T°: 1000°C	81
Cuadro 15. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 40 – T°: 950°C	81
Cuadro 16. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 60 – T°: 950°C	82
Cuadro 17. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 40 – T°: 1000°C	82
Cuadro 18. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 60 – T°: 1000°C	83

	Pág.
Cuadro 19. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 40 – T°: 950°C	86
Cuadro 20. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 60 – T°: 950°C	87
Cuadro 21. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 40 – T°: 1000°C	87
Cuadro 22. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 60 – T°: 1000°C	88
Cuadro 23. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 40– T°: 950°C	88
Cuadro 24. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 60– T°: 950°C	89
Cuadro 25. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 40– T°: 1000°C	89
Cuadro 26. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 60– T°: 1000°C	90
Cuadro 27. Promedios de Resistencia a la Compresión Pasante 40 – T°: 950°C	93
Cuadro 28. Promedios de Resistencia a la Compresión Pasante 60 – T°: 950°C	94

	Pág.
Cuadro 29. Promedios de Resistencia a la Compresión	
Pasante 40 – T°: 1000°C	94
Cuadro 30. Promedios de Resistencia a la Compresión	
Pasante 60 – T°: 1000°C	95
Cuadro 31. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión Pasante 40 – 950°C	95
Cuadro 32. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión Pasante 60 – T°: 950°C	96
Cuadro 33. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión Pasante 40 – T°: 1000°C	96
Cuadro 34. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión Pasante 60 – T°: 1000°C	97
Cuadro 35. Resultados y observaciones de la prueba térmica	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Límites de Atterberg – Determinación del Límite Líquido	45
Figura 2. Escombros de Ladrillo Tolete – Chamota	52
Figura 3. Molde de elaboración y compactación de probetas	56
Figura 4. Trituradoras mecánicas de quijadas	57
Figura 5. Molino eléctrico de Discos	57
Figura 6. Molino de bolas	58
Figura 7. Tamizador mecánico	58
Figura 8. Balanza electrónica	59
Figura 9. Agitador de aspa	59
Figura 10. Prensa con gato hidráulico	60
Figura 11. Capinador	60
Figura 12. Estufas de secado	61
Figura 13. Mufla de resistencia eléctrica	62
Figura 14. Molino de discos: Molienda de arcilla	62
Figura 15. Vidrio molido – Pasante de las malla No. 40 y 60	63
Figura 16. Chamota – Pasante de las malla No. 40 y 60	64
Figura 17. Extracción de la muestra	66
Figura 18. Deseccación de las probetas	67

	Pág.
Figura 19. Colocación de las probetas en la mufla	68
Figura 20. Ensayo de Absorción de agua	75
Figura 21. Ensayo de Resistencia a la compresión	76
Figura 22. Ensayo de punto de fusión de la pasta	78

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Ábaco de Densidad - Pasante 40	84
Gráfica 2. Ábaco de Densidad - Pasante 40	85
Gráfica 3. Ábaco de Absorción de Agua - Pasante 40	91
Gráfica 4. Ábaco de Absorción de Agua - Pasante 60	92
Gráfica 5. Ábaco de Resistencia a la Compresión - Pasante 40	97
Gráfica 6. Ábaco de Resistencia a la Compresión - Pasante 60	98
Gráfica 7. Ábaco de Punto de Fusión – Pasante 40	106
Gráfica 7. Ábaco de Punto de Fusión – Pasante 60	107

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Clasificación de Suelos – Arcilla Gris	120
Anexo B. Clasificación de Suelos – Arcilla Amarilla	121

GLOSARIO

A

A GRAN FUEGO: uno de los dos tipos de cerámica. Los colores de las cerámicas a gran fuego se someten a temperatura entre 950° y 1050° C.

ÁLCALI: este término se aplica a los hidróxidos de amonio y otros metales alcalinos, y a los hidróxidos de calcio, estroncio y bario. Las disoluciones de álcalis colorean de azul el tornasol rojo, neutralizan los ácidos, tienen un tacto jabonoso y son conductores eléctricos. En la actualidad, el término álcali está siendo sustituido por el de base. Esta base química neutraliza los ácidos. Para el ceramista se refiere, principalmente, a los compuestos de sodio y potasio que actúan como fundentes en los esmaltes.

ALTA TEMPERATURA: uno de los dos tipos de cocción del esmalte. Estos tipos de esmaltes suelen cocer por encima de los 1250° y hasta los 1300° C.

ALÚMINA: se dice del óxido de aluminio.

AMASADO: método manual de amasar la arcilla, imitando al método del panadero.

ARCILLA: sustancia mineral plástica compuesta principalmente de silicatos de aluminio hidratados. Tierra molida muy finamente, siendo plástica cuando está mojada y volviéndose dura y sin plasticidad cuando se seca y cuece. Roca sedimentaria formada por caolín mezclado con detritus de otros minerales. Existen arcillas plásticas y arcillas incapaces de empastarse con agua.

B

BAJA TEMPERATURA: el segundo de los dos tipos de cocción del esmalte. Generalmente, en la alfarería, se cuecen las piezas de 900° a 1000° C.

BENTONITA: tipo de arcilla muy plástica, de origen volcánico, que se añade a otras pastas, en pequeñas cantidades, para que estas mejoren su plasticidad.

C

CALCINACIÓN: consiste en quemar un material cerámico o una mezcla, a una temperatura moderada, con el fin de extraer el agua química o el bióxido de carbono.

CAOLÍN: hidrosilicato de aluminio. Arcilla blanca. Muy pura empleada como ingrediente básico en la porcelana.

CHAMOTA: materiales cerámicos que han sido cocidos, molidos y reducidos a granos de varios grosores. También se puede definir como arcilla calcinada,

triturada o molida, que se agrega a arcillas demasiado plásticas para conferirles resistencia y también para reducir el encogimiento. También se lo conoce como grog. Según la cantidad que se agregue y su tamaño, la chamota aporta a las piezas cierta textura áspera o rugosa.

CERÁMICA: toda pieza de arcilla modelada y cocida, esté o no esmaltada, tanto las piezas cocidas a baja temperatura como las de alta; este término abarca desde la terracota hasta la porcelana.

CRISTALIZACIÓN: formación de cristales. Todos los esmaltes que contienen rutilo, zinc y otros óxidos tienden a formar cristales.

CONTRACCIÓN: proceso de reducción de las dimensiones de la pieza en la fase de secado. Es una consecuencia de la pérdida de la mayor parte del agua física que entra a formar parte de la obra. Cuando se procede a su cocción, se elimina el agua química y se queman los componentes orgánicos que pueda contener la pasta de arcilla, por lo que el proceso de contracción continua.

D

DESHIDRATACIÓN: expulsión del agua. La arcilla se deshidrata cuando el agua de constitución se ha evaporado a 500° C aproximadamente.

DESECACIÓN: fase de trabajo que sigue al modelado, durante la cual la pieza, antes de ser introducida en el horno para el bizcochado, se seca y sufre una contracción, es decir, una disminución de volumen, como consecuencia de la pérdida de humedad. Véase contracción.

DUREZA DE CUERO: estado de semidureza de la arcilla en el proceso de secado cuando todavía conserva parte de su humedad, aunque ya no es plástica.

F

FELDESPATO: silicato de aluminio y un álcali (potasio, calcio, sodio o raramente bario), empleado en las pastas cerámicas como una de las fuentes importantes de fundentes insolubles de álcali.

FUNDENTE: sustancia que funde y hace que fundan otros componentes, por ejemplo el feldespato.

G

GREDA: carbonato de cal terroso. Tipo de arcilla de aspecto blanco y poca plasticidad. Véase creta.

GRES: tipo de pasta compuesta de arcilla plástica, arena de cuarzo, a la que se añaden con sílice y óxidos, que se somete a cocción entre 1280° y 1300° C y produce una cerámica dura, compacta y semivitrificada.

M

MODELADO: primera fase de la elaboración de una pieza cerámica, que consiste en dar forma a una pella de barro. Puede hacerse a "mano libre" o empleando cualquier herramienta o aparato como el torno de alfarero.

MOLINO DE BOLAS: Jarra o tubo cilíndrico de porcelana con bolas del mismo material en su interior, que al girar permite moler o desmenuzar materiales secos o húmedos que servirán como ingredientes para pastas o barnices. Debido a su peso y tamaño, lo usual es que el molino sea movido por un motor eléctrico. El sentido de usar bolas de porcelana para moler o machacar, es que al ser un material muy duro, la misma porcelana se desgasta poco y no contamina el material que se está moliendo.

MUFLA: hornillo o cámara dentro de un horno que protege de la acción directa de la llama.

P

PASTA: Mezcla de arcillas y otros ingredientes susceptible de ser quemada, que sirve para fabricar las piezas cerámicas.

PLASTICIDAD: cualidad de la arcilla que permite ser modelada adoptando diferentes formas sin romperse ni agrietarse.

POROSIDAD: calidad que presentan algunos cuerpos, entre ellos las terracotas, en las que las moléculas de la materia que las forman, presentan intersticios entre sí.

R

REFRACTARIO: tipo de pasta que resiste temperaturas altas temperaturas muy superiores a la mayólica.

S

SÍLICE: es una de las sustancias más abundantes en la corteza terrestre. Forma parte de la composición de la mayoría de las pastas cerámicas y esmaltes. Se usa en los esmaltes para cambiar el coeficiente de dilatación y, de esa forma, controlar el agrietado.

V

VIDRIADO: también llamado barniz. Es un borosilicato de plomo que mezclado con fundentes básicos, sirve para recubrir el bizcocho de una capa transparente y vidriosa. También puede ser aplicado sobre engobes y esmaltes de colores a fuego lento.

VITRIFICAR: fundir al horno el vidriado de las piezas de loza o alfarería. Acción que lleva a cabo el calor sobre el objeto al que se le ha aplicado una capa de barniz o cubierta y que, al final de la cocción, aparece recubierto por una capa impermeable parecida al vidrio. Acción de volverse vítreo un esmalte, esto es, duro como vidrio y antiabsorbente.

RESUMEN

En esta investigación denominada **“ELABORACIÓN DE PASTA CERAMICA REFRACTARIA A PARTIR DE ARCILLA, VIDRIO RECICLADO Y CHAMOTA”**, se propone una alternativa para elaborar un material con características refractarias a partir de materiales de fácil obtención en la región; las arcillas provienen de la Industria Ladrillera del Sur LTDA., el vidrio es reciclado de botellas de cualquier color y la chamota se obtiene de escombros de ladrillos cerámicos de construcción.

Durante el desarrollo de la investigación se llevó un proceso constante de elaboración de probetas con diferentes dosificaciones, variando porcentajes de arcillas, vidrio molido y chamota utilizando lechada de cal para su amasado con el fin de darle a la muestra buena humedad y consistencia. Además se llevó control de variables muy importantes como el mezclado y la humedad, variando la temperatura de cocción y conservando constante el valor de compactación. Esta investigación se limita al análisis de la pasta refractaria a pruebas físicas como densidad, capacidad de absorción de agua; pruebas mecánicas como resistencia a la compresión y pruebas térmicas como punto de reblandecimiento de la pasta.

Los resultados obtenidos en esta investigación determinan que el comportamiento térmico de un material cerámico está altamente influenciado por la densidad

debido a que hay una mejor trasmisión de calor cuando el material es liviano, presenta cierto grado de porosidad y tiene baja resistencia. También se determinó que las propiedades del material se ven afectadas por el tamaño de grano de la materia prima, la temperatura de cocción y la cantidad de vidrio + chamota que se adicione a la arcilla.

ABSTRACT

In this investigation denominated "ELABORACION OF REFRACTORY PASTE CERAMICA FROM CLAY, RECYCLED GLASS AND CHAMOTA, to resolve an alternative sets out to elaborate a material with refractory characteristics from materials of easy obtaining in the region; the clays come from the Industry ladrillera of Sur Ltda., the glass is recycled of bottles of any color and chamota is obtained from ceramic brick rubbish of construction.

During the development of the investigation one took to a constant process of elaboration of test tubes with different meterings, varying percentage of clays, glass and chamota and using lime grout for kneading his whit the purpose of giving to the good sample humidity and consistency. In addition the temperature of constant baking took to control of very important variables like mixed and the humidity, varying and conserving the value of compaction. This investigation is limited the analysis of the refractory paste to physical test like density, capacity of water absorption; mechanical tests like compressive strength and thermal tests like point of fusion of the paste.

INTRODUCCIÓN

A través de la historia se ha observado la gran importancia que tienen los materiales en el crecimiento social del hombre e incluso a las diferentes etapas de la evolución, se las ha bautizado con el nombre del material de uso predominante, por ejemplo: la edad de piedra, hierro, entre otras.

Uno de los campos donde más se ha propiciado el desarrollo de los materiales ha sido la ingeniería, la cual se ve reflejada en los grandes avances tecnológicos de las diferentes culturas. Todos los ingenieros civiles manejan cotidianamente los materiales de construcción; con ellas se diseñan y construyen componentes o estructuras, se seleccionan y analizan sus fallas, o simplemente se prevé un funcionamiento adecuado de estas.

En nuestros días, los últimos avances científicos y tecnológicos además de la solución de muchos problemas han sido marcados por la modificación de ciertos materiales y la necesidad de explotar los recursos naturales que se tiene a disposición.

Los materiales se clasifican según su uso en cuatro grupos; metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos. Dentro del grupo de los cerámicos se encuentran los materiales refractarios que se pueden utilizar como revestimiento para hornos de fundición de aluminio, altos hornos e incineradores, reactores

químicos, hornos cerámicos, hornos de cal y de cemento, Pavimentos para suelos de tanques de vidrio y toberas de vertido continuo.

Por otro lado, teniendo en cuenta que el principal problema de los hornos tipo Pampa, para la cocción de ladrillos¹, existentes en la zona de San Juan de Pasto y municipios aledaños es la baja eficiencia y poco aprovechamiento de la energía calorífica debido a diferentes factores, entre los que se puede destacar la mala calidad de la arcilla con la que se fabrican sus paredes, por no presentar características refractarias y su forma geométrica no es la más adecuada.

Para evitar la pérdida de calor y lograr temperaturas homogéneas dentro de un horno cerámico industrial se utiliza para sus paredes materiales refractarios, debido a que estos están conformados por sustancias capaces de tolerar exposiciones a alta temperatura sin perder sus propiedades funcionales², es decir son estables térmicamente, además de servir como aislantes.

Los ladrillos cerámicos refractarios en el mercado tienen un alto costo, por su composición química (alta alúmina, magnesita, cromita - magnesita, sílice, zirconia, carbono de silicio y grafito), y pensar en construir un horno tipo Pampa con estos ladrillos en Nariño no es rentable.

¹ Diagnóstico realizado por la Fundación INNOVAR E.A.T. a los hornos tipo Pampa en Ipiales, San Juan de Pasto, San Pedro de Cartago y Mercaderes (Cauca). 2002.

² PEÑA CASTRO, María Pilar. Físico – Química de los Materiales Refractarios. Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. 1996. p. 3 – 15.

De aquí la necesidad de elaborar una pasta cerámica con características refractarias, utilizando materia prima de fácil adquisición como son arcilla, chamota, vidrio reciclado y lechada de cal. Se emplea vidrio reciclado molido y chamota por su contenido de sílice (SiO_2), que está por el orden de 73 - 74% y 75% respectivamente, este compuesto hace parte de la composición química de un material cerámico refractario. Además se usa lechada de cal para darle a la pasta una mejor consistencia.

La finalidad de esta investigación está orientada a elaborar una pasta cerámica con características refractarias utilizando materiales de la región Nariñense; para determinar dichas características se procedió a realizar probetas con diferentes dosificaciones en peso. A estas probetas se les realizaron pruebas de Resistencia a la Compresión, Absorción, Punto de Fusión y se comprobarán sus propiedades refractarias para temperaturas en el rango de $1000^\circ\text{C} - 1500^\circ\text{C}$.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar una pasta cerámica refractaria a partir de arcilla, vidrio reciclado y chamota, para aplicaciones en hornos de cocción de bajas temperaturas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar químicamente a la arcilla, vidrio reciclado y chamota.
- ✓ Realizar dosificaciones, a partir del contenido de Sílice y Alúmina presentes en cada uno de los materiales.
- ✓ Elaborar probetas a partir de las dosificaciones establecidas.
- ✓ Efectuar pruebas de absorción de agua, resistencia a la compresión y punto de fusión a las probetas elaboradas.
- ✓ Comprobar el efecto refractario e identificar su mayor temperatura de trabajo.
- ✓ Analizar, interpretar y seleccionar las dosificaciones más adecuadas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 RESEÑA HISTÓRICA

Los primeros refractarios industriales fueron rocas con alto contenido en sílice y arenas, las cuales se utilizaron en los primeros hornos de hierro desde 1645 hasta 1800; luego se fabricaron ladrillos de arcilla que mostraron resistencia al calor intenso. Poco a poco se fueron determinando las propiedades refractarias de la sílice y por el año de 1850 se inició la fabricación de los ladrillos de sílice³.

En 1880 con el advenimiento del convertidor para la fabricación de acero se empezaron a usar ladrillos de magnesita y minerales de cromo que resultaron muy resistentes al ataque químico de las escorias básicas y fueron conocidos como ladrillos básicos

Después se empezaron a usar arcillas diásporas de Missouri y bauxita (Mineral de aluminio) cuyas características fueron muy especiales.

Una de las principales aplicaciones que tienen los refractarios es ser utilizados en la construcción de hornos, por ejemplo los hornos pampa, que consisten en cuartos rectangulares con puertas de salida y entrada a través de las cuales se

³ MATERIALES REFRACTARIOS DE COLOMBIA. www.xtec.com Consultada Mayo 2002.

extraen e introducen los materiales antes y después de la cocción; además poseen unas bóvedas en la parte inferior⁴.

2.2 ARCILLA

Se da el nombre de arcilla a un material natural, fino granulado y de aspecto terroso, que tiene la característica de ser plástica (permite moldearla) cuando está húmeda, rígida cuando se seca y vitrificada cuando es sometidas a la acción del fuego⁵.

La arcilla que se encuentran en la naturaleza puede estar consolidada o sin consolidar. Esta tienen, al menos, dos propiedades que la hace particularmente importante en su uso con fines tecnológicos:

a) *Plasticidad*, propiedad de la arcilla que cuando se humedece, permite deformarse por aplicación de una presión relativamente suave y retiene su deformación después suspender la presión.

b) Toda arcilla está compuesta de minerales arcillosos, acompañadas o no de otras partículas minerales.

⁴ ECOCARBÓN. Hornos Ladrilleros a carbón. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín – Colombia. 1998. p. 10 – 13.

2.2.1 Clasificación de las arcillas

Una primera clasificación distingue entre *primaria o residual* casi siempre de origen hipogénico, que permaneció en el mismo lugar de su formación, y *secundarias* que han sido transportada a lugares diferentes al de su origen. Entre estas se distinguen: fluviales, lacustres, marinas, en deltas, glaciales y eólicas.

Otra clasificación distingue entre: caolines, bentonitas, hidromicas o ilitas, cloritas según el grupo mineralógico predominante.

En la industria cerámica se distingue tradicionalmente varios tipos de arcilla según su origen, características o usos finales, entre las que se citan por ejemplo: caolines, barros plásticos, arcillas refractarias, etc.

2.3 VIDRIO

Cuerpo sólido, transparente y frágil que proviene de la fusión a 1.200°C de una arena silíceo mezclada con potasa o sosa. A temperatura ordinaria constituye una masa amorfa, dura, frágil y sonora. Por lo general es incoloro, aunque también puede opaco, y su color varía según los ingredientes de la hornada.

2.3.1 Composición y propiedades

La sílice se funde a temperaturas muy altas para obtener una masa vítrea. Dado que este vidrio tiene un punto de fusión muy alto y no se contrae ni se dilata demasiado con el cambio de temperatura es muy apropiado para aparatos de

laboratorio y para los objetos que han de someterse a grandes variaciones térmicas, como los espejos de los telescopios. El vidrio por lo que suele utilizarse como aislante eléctrico y térmico. Para elaborar la mayor parte de los vidrios se combina la sílice con diferentes proporciones de otras materias primas. Los fundentes alcalinos, normalmente carbonato de sodio o de potasio, hacen que descienda la temperatura requerida para la fusión y la viscosidad de la sílice. La piedra caliza o la dolomita (carbonato de calcio y magnesio) actúan como estabilizantes en el horneado. Si se añaden otros ingredientes, como el plomo y el bórax, se confiere al vidrio propiedades físicas determinadas.

2.3.2 Clasificación del vidrio

® **Clasificación según la utilización** según la utilización el vidrio puede ser doméstico o industrial.

- ✓ **Doméstico.** Es utilizado en la fabricación de diferentes envases para el almacenamiento de productos alimenticios.
- ✓ **Industrial.** Es empleado para almacenar productos químicos, biológicos, como también vidrio plano, cristales blandos, fibra óptica, bombillos, etc.

® **Clasificación según la composición** según la composición el vidrio puede ser de tipo inorgánico, orgánico mixto y orgánico.

- ✓ **Inorgánicos.** Sus elementos constituyentes son elementos metálicos, no metálicos, óxidos, calcogenuros, oxisales u oxinitruros.

- ✓ **Orgánicos mixtos.** Se obtienen a partir de algunas siliconas.
- ✓ **Orgánicos.** Se conforman por glicoles, azúcares o polímeros (polietileno, poliestireno, poliamidas, etc.)⁶.

2.4 MATERIALES REFRACTARIOS

son materiales que soportan altas temperaturas sin fundirse, agrietarse o reblandecerse. Así mismo son materiales altamente aislantes para reducir al mínimo la pérdida de calor en un horno⁷.

En este grupo están comprendidos: materiales de forma como los ladrillos o no conformados como el hormigón, masas plásticas, etc.

Los refractarios normalmente están constituidos por chamotas, fabricadas con materias primas naturales y sintéticas y aglomerantes o aditivos especiales.

2.4.1 Clasificación de los refractarios: los refractarios se clasifican de acuerdo a su composición química. De acuerdo con la composición química los refractarios pueden ser:

⁶ OJEDA, Janeth y TORRES CORREDOR, Eduardo. Cuantificación de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos cerámicos producidos en Pasto. Trabajo de Grado Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería. San Juan de Pasto, 1988. p. 118 – 130.

⁷ PEÑA, Op Cit. p. 29.

- ® Ácidos: Sílice, Silico-aluminosas.
- ® Básicos: dolomita, magnesita, cromo-magnesita.
- ® Neutros: cromo, grafito, carburo de silicio.

® **Refractarios Ácidos:** el principal constituyente de los refractarios ácidos es la sílice (95%SiO₂). Soportan bien los fundentes ácidos. Debido a su elevada resistencia a la compresión en caliente pueden emplearse a temperaturas próximas a su punto de ablandamiento sin embargo, es muy sensible a cambios bruscos de temperatura especialmente bajo los 650°C. Tienen un gran coeficiente de dilatación lineal a baja temperatura por lo cual hay que prevenir las oportunas juntas de dilatación en la construcción de revestimiento con ladrillos, aunque no sufren variaciones sensibles de volumen en el intervalo de temperatura de 600 a 1600°C.

Los refractarios sílico - aluminosos resisten bien los cambios bruscos de temperatura pero soportan poca presión. En las pruebas se ablandan mucho antes de alcanzar el punto de fusión (1710°C)⁸.

⁸ MATERIALES REFRACTARIOS. www.raku.com. Consultada el 20 de febrero de 2003.

® **Refractarios Básicos:** la magnesita, constituida por un 80% de óxido de magnesio ($T_f = 2800^\circ\text{C}$), sílice, cal, alúmina y óxido de hierro, tiene un comportamiento básico, posee alta refractariedad y resistencia al ataque de escorias y fundentes a base de óxido de hierro.

® **Refractarios Neutros:** la cromita es un refractario a base de sesqui-óxido de cromo ($45\%\text{Cr}_2\text{O}_3$) y tiene un comportamiento neutro o sea que soporta bien las escorias y fundentes ácidos o básicos pero posee muy poca resistencia a la compresión en caliente y a los cambios bruscos de temperatura.

Se emplea para reparar los revestimientos de las bóvedas ácidas en los hornos eléctricos de arco, para los lechos de las soleras de los mismos hornos y para las paredes y soleras que han de estar en contactos con escorias o fundentes enérgicos⁹.

El carborundo o carburo de silicio tiene una elevada conductividad térmica y gran insensibilidad a las variaciones de temperatura. Se fabrican piezas especiales y se mezclan a veces con grafito para la fabricación de crisoles

Los refractarios aislantes son ladrillos porosos y de poco peso con una conductividad térmica mucho menor que los refractarios comunes y una capacidad de retención del calor superior a cualquier refractario de composición similar. Los

ladrillos aislantes se usan en la parte posterior de otros ladrillos de alta refractariedad y alta conductividad térmica aunque en algunas oportunidades se pueden emplear directamente como revestimiento de trabajo si no hay abrasión, ataque de escoria o contacto con líquidos. Las principales ventajas en el uso de aislante son la economía en el combustible y la disminución en el tamaño y peso del revestimiento del horno¹⁰.

2.5 PASTAS CERÁMICAS

Una pasta cerámica puede definirse como una mezcla de arcillas o arcilla y otras sustancias minerales terrosas, que se mezclan para lograr una finalidad cerámica determinada. Si se trata de cerámica fina o blanca, una pasta se define como una composición triaxial de arcilla, cuarzo y feldespato.

2.5.1 *Pastas cerámicas refractarias:* resistentes a elevadas temperaturas, con porosidad o vitrificadas. Resistentes a los cambios de temperatura.

2.5.2 Principales materias primas usadas en la formulación de pastas

® **Arena:** se encuentra en la naturaleza mezclada con arcillas y se obtiene beneficiando dichas arcilla. Las características de la arena son las de un material duro y de color blanco que tiene diversos nombres: arena, cuarzo, pedernal, diatomea. Su fórmula química es SiO₂. Se presenta con cristales incoloros,

⁹ Ibid., p. 52.

¹⁰ LADRILLOS REFRACTARIOS. www.utp.edu.com. Consultada septiembre 2002.

insípido, inodoro, insoluble en agua y ácidos. No combustible, resistente al calor y al choque y se puede combinar químicamente con la mayoría de los óxidos metálicos¹¹.

Su función es la de servir como material formador de producto, es decir, es el cuerpo y sostén de la pasta y regula la expansión, contracción y vitrificación.

® **Feldespato:** se encuentra en numerosas rocas naturales es el mineral común de las rocas ígneas y metamórficas. Se obtiene por trituración y molienda de las rocas. Corresponde a un aluminio – silicato de sodio - potasio o calcio y bario. Es de color blanco amarilloso hasta crema. Es no combustible y es un material duro. Los feldespatos más puros son los de sodio porque dan más brillo y mejor color de quema. Los feldespatos potásicos son oscuros e impuros dan menos brillo resultando un color gris y opaco a la quema.

La función específica de los feldespatos es la de ser fundente de la pasta, hace madurar o vitrificar la pasta y regula la absorción.

® **Otros materiales complementarios:** hay otros materiales que intervienen en las pastas en porcentajes que oscilan entre 1 y 10 % y que sirven para modificar, reforzar o alterar algunas propiedades físicas o para producir efectos secundarios

¹¹ CORDOBA, Op Cit., p. 35.

en las pastas. Entre estos se pueden citar la *caliza* que es un auxiliar del fundente, ayuda a fundir, es de color blanco y está constituido por carbonato de calcio (CaCO_3). La *Dolomita* es también un auxiliar del fundente y de mayor efectividad que la caliza. Se trata de un carbonato doble de calcio y magnesio.

El *Caolín*, compuesto por caolinita (aproximadamente, 40 % de alúmina y 55 % de sílice). Es una asociación de arena y mica, color blanco amarillento, debe usarse molido a malla 325. Sirve para regular el secado de la pasta, contrarresta la alta contracción de trabajabilidad y es un buen desmoldante.

® **Arcillas:** su extracción se realiza mediante la utilización de equipos mecánicos o manuales.

® **Chamota:** material fino obtenido del molido de cualquier material cerámico.

2.6. PROPIEDADES DE LOS REFRACTARIOS

Para elaborar un refractario adecuado para una operación definida, es necesario tener en cuenta los materiales, la temperatura máxima de trabajo, la velocidad de cambio de la temperatura, la carga aplicada durante el calentamiento y las reacciones químicas que se producen.

2.6.1 Porosidad: la porosidad está directamente relacionada con muchas otras propiedades físicas de los materiales refractarios, incluyendo la resistencia puesto

que cuanto mayor sea la porosidad menor será la resistencia, pero mayor será la conductividad térmica y capacidad calorífica.

2.6.2 Puntos de Fusión: los puntos de fusión se encuentran por medio de conos pirométricos de puntos de ablandamientos predeterminados. La mayoría de los refractarios comerciales se ablandan gradualmente a lo largo de un amplio intervalo y no tienen puntos agudos de fusión porque están compuestos de varios minerales, tanto amorfos como cristales.

2.6.3 Comportamiento de fusión. El comportamiento en la fusión de las materias primas, mezclas y productos cerámicos, es de un interés considerable en un cierto número de campo que comprenden desde la investigación de relaciones de fase hasta la necesidad práctica de materiales refractarios que permanezcan sólidos a temperaturas elevadas y a la exigencia de disponer de fundentes de baja temperatura de fusión.

Muchos materiales cerámicos carecen de punto de fusión definido, y en su lugar presentan progresivamente sinterización seguida de reblandecimiento, el cual aumenta hasta llegar a la fusión. Pueden realizarse muchos ensayos empíricos calentando el material conforme a un programa de cochura similar a aquel para el cual se requiere y apartando muestras a intervalos. Para muchos materiales

cerámicos es también muy útil en ensayo “calor – trabajo” del cono pirométrico equivalente¹².

2.6.4 Pruebas Mecánicas

® **Resistencia a la Compresión.** Cuando sobre un cuerpo actúa una fuerza exterior compresora, se entiende como tal aquella que tiende a reducir la dimensión del mismo en la dirección de la línea de acción de esa fuerza, se generan esfuerzos de compresión en toda la sección normal a la dirección de dicha carga. La relación entre aquella fuerza que produce la falla del cuerpo y el área neta de la sección mencionada, se conoce como esfuerzo último de compresión de ese cuerpo.

2.6.5 Pruebas Físicas

® **Densidad.** Es la cantidad de masa contenida en la unidad de volumen del cuerpo. La densidad se obtiene dividiendo el peso de la probeta entre el volumen de la misma.

® **Absorción.** Cantidad de agua absorbida por una muestra después de ser sumergida durante 24 horas, expresada como porcentaje del peso.

Los materiales cerámicos refractarios se caracterizan por ser poco resistentes, porosos y a altas temperaturas no presentan alteraciones volumétricas. A altas

¹² CONOS PIROMÉTRICOS. www.conospirometricos.com. Consultada el 20 de febrero de 2003.

temperaturas estos materiales sufren un cambio térmico alterando su estructura molecular¹³.

2.6.6 Pruebas Térmicas

® **Punto de fusión.** Es el cambio de la materia que consiste en pasar de estado sólido a estado líquido. Para que esto suceda la materia debe someterse a calor.

® **Punto de reblandecimiento.** Cambio volumétrico y deformación que sufre cualquier material al ser sometido a altas temperaturas; es el punto previo a alcanzar el punto de fusión.

Conos pirométricos: pequeñas pirámides, de unos 5 cm de altura, que sirven para medir la temperatura del horno, que siguen el principio de fusión y reblandecimiento de cualquier material al ser sometido a altas temperaturas; que están fabricados con tal composición que se doblan y funden al alcanzar determinada temperatura. Los diferentes conos se diferencian con números (04, 05.06) y cada uno representa un rango de temperatura. Una práctica usual es poner dos o tres conos de números consecutivos, para atender a la evolución de la quema; cuando se dobla y cae el más bajo, el ceramista está atento a la caída del siguiente, que es cuando se apagará el horno. El otro extremo sirve para atestiguar que la quema no alcanzó una temperatura excesiva. Durante la quema,

¹³ PEÑA, Op Cit. p. 29.

los conos se pueden observar a través de la mirilla, que un agujero en la puerta del horno¹⁴.

En el actual comercio se puede conseguir los conos pirométricos EL KELPER, los cuales se encuentran disponibles en temperaturas de¹⁵:

950°C	.04
1020°C	.05
1045°C	.04
1100°C	.02
1150°C	.03
1236°C	.7
1263°C	.8
1280°C	.9
1305°C	.10

Metales: los metales y aleaciones, que incluyen el acero, aluminio, magnesio, zinc, hierro fundido, titanio, cobre, níquel y muchos otros, tiene como características generales una adecuada conductividad térmica y eléctrica, alta resistencia mecánica, alta rigidez, ductibilidad o conformabilidad, punto de fusión conocido, se utilizan en forma pura o las combinaciones de ellos (aleaciones).

¹⁴ CONOS PIROMÉTRICOS. Op Cit. p. 42.

¹⁵ CONOS EL KELPER. www.elkelper.com. Consultada el 20 de febrero de 2003.

Se emplea los metales por tener punto de fusión conocido, el hierro fundido posee un punto de fusión de 1539°C¹⁶.

¹⁶ METALES Y SOLDADURAS. www.metales.com. Consultada el 25 de julio de 2003.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 GENERALIDADES

Para elaborar la pasta cerámica con características refractarias se seleccionaron diferentes materiales teniendo en cuenta el contenido de sílice y su fácil adquisición; entre los que se seleccionó: arcilla, chamota, vidrio reciclado y cal, los cuatro por su fácil adquisición y los tres últimos por el contenido de sílice.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA

3.2.1 Arcilla. Se escogió las arcillas que utiliza la Industria ladrillera del Sur, ubicada en la vía a Catambuco, Municipio de Pasto, teniendo en cuenta su calidad¹⁷ y su utilización.

Las arcillas utilizadas por ellos son primarias, cuyo origen es hipogénico (han permanecido en el mismo lugar de su formación) y de dos tipos: de color gris y amarillo, a estas arcillas se les realizó los siguientes laboratorios: granulometría, límites de Atterberg y análisis químico.

¹⁷ Diagnóstico, Op Cit., p. 28

® **Granulometría.** Norma NTC¹⁸ 77, según los resultados obtenidos se clasifica la arcilla gris como un suelo A-7-6, suelo arcilloso y la arcilla amarilla es un suelo A-7-5 (Clasificación AASHTO) el cual se describe como un limo arenoso.

® **Límites de Atterberg.** Según la clasificación SUCS¹⁹, la arcilla gris utilizada se clasifica como CL: arcilla de baja Plasticidad²⁰ y la arcilla amarilla como ML: limo de baja compresibilidad.

Figura 1. Límites de Atterberg – Determinación del Límite Líquido



¹⁸ ICONTEC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

¹⁹ SUCS. Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos.

²⁰ ...Véase Anexo A ...

® **Análisis Químico.** Para realizar el estudio químico se tomó 5 gr de la muestra de arcilla a la que se le hizo dispersión en agua destilada, posteriormente se tamizó en la malla 325, el retenido de esta malla son arenas y el pasante conforman los limos y arcillas. A estos últimos se les practicó el proceso de decantación y centrifugación obteniendo de esta forma la separación de limos y arcillas; para finalizar, a las arcilla se les hizo un nuevo proceso de centrifugación y se procedió con el análisis químico el cual tendrá como base los métodos descritos por Caillere, S. y Henin, Aubert G. Gillenin, C. y Pierrot, R²¹, los cuales permiten determinar el contenido de Sílice y Alúmina compuestos que le dan a los materiales las características de refractariedad. Los resultados de la caracterización química se reportan en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Análisis químico de la arcilla gris.

	% en peso	Moles	Cationes	Oxígenos	iones Semimalla
SiO ₂	46.81	0.78	0.78	1.56	Si 4+ 3.9
Al ₂ O ₃	23.62	0.232	0.464	0.696	Al 3+ 2.32
FeO	4.66	0.064	0.064	0.064	Fe 2+ 0.32
Na ₂ O	2.27	0.037	0.074	0.037	Na + 0.37
K ₂ O	1.81	0.019	0.038	0.019	K + 0.19
CaO	0.16	0.003	0.003	0.003	Ca 2 + 0.02
MgO	0.58	0.014	0.014	0.014	Mg 2 + 0.07
				= 2.39	

²¹ CAILLERE, S. et Henin S, Mineralogie des argiles. Massonet cie, editens, Paris 1963. p. 115.

Cuadro 2. Análisis químico de la arcilla amarilla

	% en peso	Moles	Cationes	Oxígenos	Iones Semimalla
SiO ₂	41.32	0.678	0.687	1.374	Si 4+ 3.57
Al ₂ O ₃	25.27	0.248	0.496	0.744	Al 3+ 2.57
FeO	7.88	0.108	0.108	0.108	Fe 2+ 0.56
Na ₂ O	2.53	0.041	0.082	0.041	Na + 0.43
K ₂ O	1.2	0.013	0.026	0.013	K + 0.14
CaO	0.1	0.002	0.002	0.002	Ca 2 + 0.01
MgO	0.44	0.011	0.011	0.011	Mg 2 + 0.057
				= 2.29	

Laboratorios Especializados, Universidad de Nariño.

3.2.2 Vidrio. Se utilizó vidrio reciclado de botellas sin importar su color. Se le realizó un análisis de la composición química para poder determinar el porcentaje de sílice que puede aportar a la mezcla. Los resultados del análisis químico se reporta en el cuadro 3.

Cuadro 3. Análisis Químico del Vidrio.

Vidrio	% en peso
SiO ₂	73 – 74
Al ₂ O ₃	2 – 3
FeO	-
Na ₂ O	13
K ₂ O	0.12
CaO	6.0

Laboratorios Especializados, Universidad de Nariño.

De acuerdo al análisis anterior se observa que el vidrio tiene un alto contenido de sílice, uno de los compuestos utilizados en cerámica refractaria.

3.2.3 Chamota. La chamota se obtuvo al moler escombros de ladrillos cerámicos sin importar su procedencia. La chamota se adicionó a la pasta por ser un buen aportante de sílice. Propiedad establecida por el análisis químico que se le hizo a este material y que se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 4. Análisis Químico de la Chamota

Chamota	% en peso
SiO ₂	75
Al ₂ O ₃	14.74
FeO	6.04
Na ₂ O	4.25
K ₂ O	1.44
CaO	0.67
MgO	1.01

Laboratorios Especializados, Universidad de Nariño.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el anterior análisis se puede observar que la chamota además de aportar la sílice también sirve como aportante de alúmina.

Figura 2. Escombros de Ladrillo Tolete - Chamota



3.2.4 Cal Sustancia sólida cáustica, blanca cuando es pura, que se obtiene calcinando caliza y otras formas de carbonato de calcio. La cal pura llamada también cal viva o cal cáustica, está compuesta por óxido de calcio (CaO) aunque normalmente los preparados comerciales contienen impurezas como óxidos de aluminio, hierro, silicio y magnesio. Al tratarla con agua se desprenden grandes cantidades de calor y se forma el hidróxido de calcio que se vende comercialmente como un polvo blanco denominado cal apagada o cal muerta²².

3.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Una material refractario se caracteriza por su alto contenido de alúmina, lo que no sucede con las arcillas y chamota de la región, las que solo alcanza un 25%²³ aproximadamente. Lo anterior condujo a ensayar mezclas que de acuerdo al diagrama de fases para un refractario sílico – aluminoso²⁴ se pueda obtener una refractariedad cercana a los 1200°C – 1300°C.

De acuerdo al análisis químico de los materiales, se seleccionaron dosificaciones que permitieron tener un contenido adecuado de sílice y alúmina, para que la pasta presente características refractarias, obteniendo un porcentaje en peso de

²² Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

²³ ...Ver Cuadros 1, 2 y 3...

²⁴ PEÑA, Op. Cit., p. 28.

chamota entre el 30 y 40% y el porcentaje en peso de vidrio no debe exceder el 30%.

La finura de los materiales de trabajo fue de los pasantes 40 y 60, para que la pasta quede porosa y de baja densidad, obteniendo las siguientes dosificaciones:

Cuadro 5. Dosificación de las muestras para el pasante 40.

DOSIFICACIÓN DE LAS MUESTRA PARA EL PASANTE 40									
Muestra N°	Arcillas				Chamota Peso		Vidrio Peso		
	Gris Peso		Amarilla Peso						
	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	
1	15	90	15	90	40	240	30	180	
2	25	150	25	150	40	240	10	60	
3	20	120	20	120	35	210	25	150	
4	20	120	20	120	40	240	20	120	
5	25	150	25	150	35	210	15	90	
6	24	144	24	144	40	240	12	72	
7	26	156	26	156	30	180	18	108	

Cuadro 6. Dosificación de las muestras para el pasante 60.

DOSIFICACIÓN DE LAS MUESTRA PARA EL PASANTE 60									
Muestra N°	Arcillas				Chamota Peso		Vidrio Peso		
	Gris Peso		Amarilla Peso						
	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	
10	15	90	15	90	40	240	30	180	
11	25	150	25	150	40	240	10	60	
12	20	120	20	120	35	210	25	150	
13	20	120	20	120	40	240	20	120	
14	25	150	25	150	35	210	15	90	
15	24	144	24	144	40	240	12	72	
16	26	156	26	156	30	180	18	108	

3.4 HUMEDAD ÓPTIMA DE LAS MUESTRAS

La humedad óptima se determinó teniendo en cuenta la manejabilidad de la pasta.

Para cada muestra se obtuvieron las siguientes humedades, ASTM D 2216-80²⁵.

Cuadro 7. Humedad óptima de las muestras – Pasante 40

HUMEDAD ÓPTIMA DE LAS MUESTRAS			
PASANTE 40			
Muestra No.	W muestra húmeda (gr)	W Lechada (gr)	W(%)
1	718	118	19.67
2	744	144	24.00
3	730	130	21.67
4	718	118	19.67
5	716	116	19.33
6	742	142	23.67
7	734	134	22.33

Cuadro 8. Humedad óptima de las muestras – Pasante 60.

HUMEDAD ÓPTIMA DE LAS MUESTRAS			
PASANTE 40			
Muestra No.	W muestra húmeda (gr)	W Lechada (gr)	W(%)
1	740	140	23.33
2	734	134	22.33
3	728	128	21.33
4	724	124	20.67
5	732	132	22.00
6	724	124	20.67
7	698	98	16.33

²⁵ ASTM. Sociedad Americana para Ensayos de Materiales.

3.5 EQUIPO UTILIZADO PARA LA FABRICACION DE PROBETAS

3.5.1 Molde para elaboración y compactación de probetas: el molde se construyó con tubería HG, diámetro 1", longitud = 20 cm, reducción en de 1" - 1 1/2" y tubo diámetro 1 1/2", longitud = 10cm.

Figura 3. Molde de elaboración y compactación de probetas.



3.5.2 Trituradoras de quijada: se utilizaron trituradoras mecánicas de quijadas para reducir de tamaño los escombros de ladrillo tolete.

Figura 4. Trituradoras mecánicas de quijadas.



3.5.3 Molino eléctrico de discos: es un molino tipo industrial que sirve para disminuir el tamaño del grano de las arcillas y la chamota.

Figura 5. Molino eléctrico de Discos.



3.5.4 Molino de bolas: jarra de hierro con bolas del mismo material en su interior, que al girar permite moler o desmenuzar materiales secos. Debido a su peso y tamaño el molino es movido por un motor eléctrico.

Figura 6. Molino de bolas.



3.5.5 Tamizador mecánico: dispositivo mecánico de agitación y vibración que soporta un juego de tamices junto con un fondo y una tapa, vibran durante un tiempo dado. Se accionan con un motor eléctrico. Los tamices empleados para este caso fueron los No. 200, 100, 80, 60, 40, 16.

Figura 7. Tamizador mecánico.



3.5.6 Balanza electrónica: la balanza utilizada es de sensibilidad de 0.2gr.

Figura 8. Balanza electrónica.



3.5.7 Agitador de aspa: artefacto eléctrico que sirve para agitar y mezclar soluciones. En este caso se empleo para producir la lechada de cal.

Figura 9. Agitador de aspa.



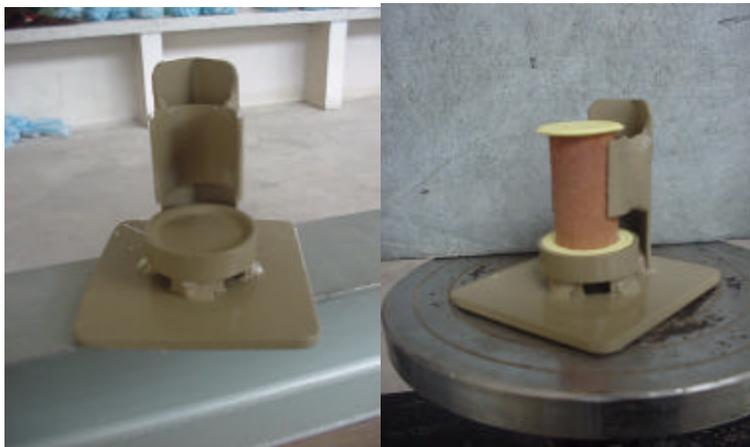
3.5.8 Prensa con gato hidráulico: este mecanismo se utilizó para la extracción de las probetas.

Figura 10. Prensa con gato hidráulico.



3.5.9 Capinador: Consta de un soporte y una base metálica empleada para darle a las probetas extremos aproximadamente planos y paralelos.

Figura 11. Capinador.



3.5.10 Estufa de secado: aparato cerrado o recinto donde se produce calor, utilizado para someter a transformaciones físicas o químicas a los objetos que se introducen en ellas manteniendo temperaturas entre los 90 100°C adecuadas para disminuir la humedad de las probetas antes de ser sometidas a cocción.

Figura 12. Estufas de secado.



3.5.11 Mufla de resistencia eléctrica: En este artefacto se llevó a cabo el proceso de cocción de las probetas.

Figura 13. Mufla de resistencia eléctrica.



3.6 PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS

3.6.1 Arcilla. Inicialmente las arcillas gris o amarilla se sometieron a un proceso de secado al aire libre para disminuir el contenido de humedad y eliminar la materia orgánica, posteriormente se sometió a un proceso de molido utilizando un molino eléctrico de discos, dejando el material de una finura del pasante de la malla No. 16.

Figura 14. Molino de discos: Molienda de arcilla.



3.6.2 Vidrio. El primer paso para pulverizar este material fue romper las botellas de vidrio recicladas con una maceta con el fin facilitar el ingreso del vidrio en la jarra del molino de bolas; se utilizó este tipo de molino porque es muy práctico para moler materiales duros. El proceso de molienda emplea un período aproximado de 3 horas.

Posteriormente se tamizó en las mallas No. 200, 100, 80, 60, 40, 16, conservando los pasantes de dichos tamices. Para esta investigación se emplearon los pasantes de las mallas No. 40 y 60.

Figura 15. Vidrio molido – Pasante de las malla No. 40 y 60.



3.6.3 Chamota. Para la obtención de la chamota se aplicó el siguiente procedimiento: como primer paso se tomaron los escombros de ladrillos toletes y se pasaron por dos trituradoras mecánicas de quijadas para reducir su tamaño, finalmente los fragmentos se pasaron por un molino eléctrico de discos obteniendo así el polvo de ladrillo (chamota).

La chamota también se tamizó en las mallas No. 200, 100, 80, 60, 40, 16, conservando los pasantes de dichos tamices. Y al igual que con el vidrio se trabajó con los pasantes de las mallas No. 40 y 60.

Figura 16. Chamota – Pasante de las malla No. 40 y 60.



3.6.4 Preparación de la pasta Las materias primas se combinan en seco teniendo en cuenta las dosificaciones especificadas en las tablas 7 y 8²⁶.

El amasado de los componentes de la pasta se realiza utilizando lechada de cal que se compone de agua y óxido de calcio (en 1000ml de agua, 200gr de CaO), esta composición se incorpora poco a poco a la mezcla de los materiales hasta obtener una pasta homogénea y teniendo en cuenta la humedad óptima.

3.6.5 Elaboración de probetas Se toman 70 gr de la pasta para que las probetas alcancen una altura de 7 cm y un diámetro de 2.75 cm aproximadamente. Los 70 gr de la pasta se vierten dentro del molde en tres capas, de tal manera que entre cada capa de pasta se reacomoden las partículas con una varilla metálica; al terminar la tercera capa se compacta con un pisón metálico (longitud 30 cm) suministrando 25 golpes para eliminar los vacíos; los golpes se realizan elevando el pisón hasta la parte superior del molde y empujándolo con una ligera presión.

Al terminar este proceso se lleva el molde con la pasta a la máquina de compresión y se le aplica una fuerza de 3000 lb, esto teniendo en cuenta que la pasta no pierda agua, no se escape por los bordes del molde y adquiera la compactación deseada.

²⁶ ...Véase en el numeral 5.3...

Terminado el proceso de compactación se procede a extraer la muestra, para este procedimiento se utilizó una prensa con gato hidráulico.

Figura 17. Extracción de la muestra.



3.6.6 Desección Las probetas se dejaron a la sombra por espacio de 5 días y luego fueron llevadas al horno, a una temperatura aproximada de 100°C, durante 24 horas, esto con el fin de que las muestras pierdan el agua que satura los poros.

Figura 18. Deseccación de las probetas.



3.6.7 Cocción Cuando las probetas están secas son sometidas a un proceso de cocción, esto se lleva a cabo en hornos tipo muflas de resistencias eléctricas con control de temperatura. La cocción de las muestras se efectuó a 950°C y a 1000°C .

El tiempo empleado para la cocción de las probetas es de 4 horas aproximadamente. Una vez la mufla alcanza la temperatura deseada se apaga y se deja enfriar hasta que llegue a temperatura ambiente.

Figura 19. Colocación de las probetas en la mufla.



3.7 TAMAÑO DE LA MUESTRA

El tamaño de la muestra se define como el número de unidades que han de ser incluidas dentro de la muestra y es uno de los primeros valores que el investigador debe calcular durante la etapa de planeación de la investigación. Si se toma una muestra demasiado grande se pierden recursos como tiempo y dinero. De otro lado si la muestra es demasiado pequeña se obtienen resultados no válidos para una investigación.

Dependiendo del parámetro de la población que se quiera estimar el del tipo de población (finita o infinita), existen diferentes fórmulas para calcular el tamaño de la muestra en las cuales está involucrada la distribución normal.

El tamaño de la muestra se calculó mediante la siguiente fórmula²⁷:

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{d^2}$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra (número de probetas por cada muestra).

Z: Valor de la tabla normal, según el grado de confianza. Para este caso se toma el 95%, lo que implica un valor de $Z = 1.96$ ²⁸.

d: Margen de error aceptable expresado como un porcentaje del promedio de datos de la muestra piloto; para este tipo de investigación se toma un error del 5%.

$$d: 5 \times X / 100$$

S^2 : varianza calculada a partir de datos obtenidos de una muestra piloto.

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

²⁷ MARTÍNEZ BECARDINO, Ciro. Apuntes y 600 problemas resueltos. 1ª. Ed. Bogotá: ECOE. 1978.

²⁸ WENDELHALL, William. Introducción a la probabilidad estadística. Universidad de Florida. Wabsworth International Iberoamérica. Belmon, California, 1982.

Donde:

\bar{X} : Esfuerzo a compresión de la unidad muestral.

\bar{X} : Promedio de las esfuerzos a compresión.

n : Número de unidades en la muestra piloto.

Para obtener los valores S y d , se debe realizar una muestra piloto de la investigación a desarrollar.

Para la muestra piloto se elaboró un número de cinco probetas con 100% de arcilla, a las cuales se les realizó el ensayo de resistencia a la compresión, datos que son empleados en el cálculo de la fórmula del tamaño de la muestra.

Cuadro 9. Resistencia a la compresión, muestra piloto 100% arcilla

Unidad Muestral	Diámetro (cm)	Area (cm)	Carga Rotura (Kg)	Esfuerzo (Kg / cm²)
1	2,70	5,73	699,51	122,08
2	2,70	5,73	680,14	118,70
3	2,70	5,73	689,32	120,30
4	2,70	5,73	756,62	132,04
5	2,70	5,73	783,13	136,67
Promedio			721,74	125,96

Cuadro 10. Análisis para determinar el tamaño de la muestra

Unidad muestral	Esfuerzo Xi (Kg / cm2)	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
1	122.08	4.31	18.58
2	118.70	7.69	59.14
3	120.30	6.09	37.09
4	132.04	-5.65	31.92
5	136.67	-10.28	105.68
Sumatoria	629.79		252.40

El promedio de los esfuerzos a compresión de las probetas piloto es:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} = \frac{629.79}{5} = 125.96$$

Para un margen de error del 5% el valor de d es:

$$d = \frac{5 * \bar{X}}{100} = \frac{5 * 125.96}{100} = 6.30$$

La varianza calculada es:

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n} = \frac{252.40}{5} = 50.48$$

$$S = 7.10$$

El número de probetas calculado para cada ensayo es:

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{d^2} = \frac{1.96^2 * 7.10^2}{6.30^2} = 4.88$$

Se toma un número de 5 probetas a ensayar por cada muestra y para cada propiedad, para un total de 560 ensayos.

4. ASPECTOS RELACIONADOS CON LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS

4.1 PRUEBAS FÍSICAS

4.1.1 Densidad: la densidad se halla dividiendo la masa de la probeta entre el volumen de la misma.

Cálculos

El volumen se calcula con la siguiente fórmula:

$$V = \pi * r^2 * h$$

De donde:

V: Volumen de la probeta

r: radio de la probeta

h: altura de la probeta

$$\text{Densidad} = \text{masa} / \text{Volumen (gr / cm}^3\text{)}$$

4.1.2 Absorción: la cantidad de agua que puede almacenar un ladrillo, en los poros o vacíos de su estructura interna, se manifiesta como un aumento en el peso de la unidad después de permanecer en contacto con el agua. Cuando el ladrillo se sumerge, la permeabilidad de la pieza permite que el líquido penetre y se difunda dentro de sus poros. La relación entre la cantidad de agua necesaria

para llenar todos los poros saturables y el peso de la unidad seca multiplicada por cien, se conoce como el porcentaje de absorción total de la misma.

Procedimiento Se toman las probetas y se sumergen en agua durante 24 horas. Luego se sacan las probetas del recipiente de inmersión se envuelve en una toalla hasta que sean eliminadas las películas visibles de agua de la superficie. Durante el secado debe evitarse la evaporación. En la condición saturada y seca superficialmente se pesa la muestra con una aproximación de 1.0 gr.

Cálculos e Informes La absorción se obtiene a partir de la siguiente expresión:

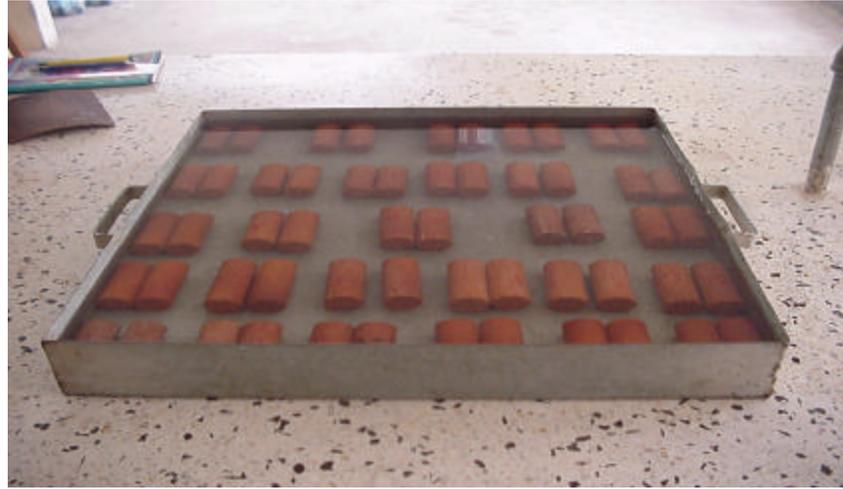
$$\% \text{ Abs (t)} = \frac{100 * (W_s) (t) - W_d}{W_d}$$

Donde:

$W_s(t)$: El peso de la muestra después de sumergida un tiempo (t).

W_d : El peso de la muestra seca.

Figura 20. Ensayo de Absorción de agua.



4.2 PRUEBAS MECÁNICAS

4.2.1 Resistencia a la Compresión: se coloca cuidadosamente cada muestra centrándola debajo del bloque superior de la máquina de ensayo, se comprueba que el bloque pueda inclinarse libremente en cualquier dirección. No deben utilizarse materiales amortiguadores entre la muestra y los bloques. En máquinas de ensayo tipo tornillo la velocidad de la cabeza móvil debe ser aproximadamente 1,0 mm/minuto. En máquinas operadas hidráulicamente, la carga debe aplicarse a velocidad constante (0,15 a 0,35 Mpa/s o 1,5 a 3,5 kgf /cm²/s).

® Cálculos

La resistencia a la compresión de cada probeta se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Resistencia a la compresión } C = \frac{W}{A}$$

Donde:

C = Resistencia de la probeta a la compresión en Kg-f/cm^2 o $\text{Pa} \times 10^4$.

W = Carga máxima (de rotura), en Kg-f o N , indicada por la máquina de ensayo.

A = Promedio del área total de las superficies de soporte superior e inferior, en cm^2 .

Figura 21. Ensayo de Resistencia a la compresión.



4.3 PRUEBA TÉRMICA

4.3.1 Punto de reblandecimiento de la pasta. El comportamiento térmico es la propiedad esencial para determinar si un material cerámico tiene características refractarias. Un alto punto de fusión determina que el material es resistente a altas temperaturas. La dificultad de definir bien el punto de fusión de los refractarios corrientemente utilizados ha obligado a realizar ensayos especiales en los que se determina la temperatura a la cual los materiales sufren un sensible ablandamiento que limita su utilización.

Un ensayo que permite establecer la temperatura de fusión o reblandecimiento de la pasta, se hace mediante la utilización de conos patrón "conos pirométricos" de temperatura de ablandamiento conocida, los que se utilizan en hornos cerámicos terrígenos o Duncan, los cuales alcanzan temperaturas máximas de 1.300°C.

Con la ayuda de un horno Duncan y conos pirométricos No. 10, se sometió las diferentes probetas a una temperatura de 1.300°C. El análisis de resultados se hace de manera visual observando los cambios en las probetas.

Las probetas que no sufrieron ningún cambio a 1.300°C. se las sometió a mayores temperaturas, con ayuda de una forja tradicional utilizada por nuestros herreros regionales, para manipular el metal a altas temperaturas, la medición de la temperatura de trabajo se hace con la ayuda de una termocupla con un lector, con conos pirométricos o en su defecto un material que se conozca su punto de fusión. Para este caso se utilizó una termocupla que alcanza una temperatura máxima de 1340°C. con un protek (Instrumento digital donde se registra la temperatura) como lector, y un metal del cual se conoce su punto de fusión (Hierro: 1539°C).

La determinación de los cambios físicos como reblandecimiento, variaciones volumétricas y fisuras, se las realizó de forma visual. El proceso que se siguió en este caso fue: se perforaron las probetas en uno de sus extremos con una broca de ¼" y una profundidad de dos cm, para colocar aquí la termocupla y hacer así la toma de lecturas, hasta una temperatura de 1.340°C., las que no sufrieron ningún

cambio se les colocó un hierro, y se aumentó la temperatura hasta que este se fundió.

Figura 22. Ensayo de Punto de fusión de la pasta.



5. PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Se debe tener en cuenta que en las gráficas obtenidas las líneas de tendencia no se siguen un modelo matemático definido, por lo tanto las gráficas reflejan resultados puntuales.

5.1 DENSIDAD

Los resultados de densidad obtenidos de las muestras en sus diferentes dosificaciones, pasantes y temperaturas de cocción, se presentan en las Cuadros 11 a la 15. En las Cuadros 16 a la 18 se dan a conocer los datos estadísticos de esta propiedad.

Cuadro 11. Promedios de Densidad Pasante 40 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 40	Peso (gr)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm³)	Densidad (gr/cm³)
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	54.07	2.75	6.01	35.70	1.515
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	52.87	2.75	6.07	36.05	1.466
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	51.60	2.74	5.79	34.14	1.511
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	52.92	2.76	5.95	35.60	1.487
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	52.44	2.76	5.99	35.84	1.463
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	51.19	2.75	5.74	34.09	1.501
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	50.97	2.75	5.57	33.08	1.541
Promedio =					1.498

Cuadro 12. Promedios de Densidad Pasante 60 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 60	Peso (gr)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm3)	Densidad (gr/cm3)
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	53.20	2.75	6.03	35.82	1.485
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	51.15	2.75	5.96	35.40	1.445
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	50.71	2.74	5.75	33.90	1.496
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	53.35	2.75	6.05	35.93	1.485
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	51.58	2.75	5.83	34.63	1.490
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	53.77	2.75	6.07	36.05	1.491
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	54.72	2.74	6.03	35.56	1.539
Promedio =					1.490

Cuadro 13. Promedios de Densidad Pasante 40 – T°: 1000°C.

Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 40	Peso (gr)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm3)	Densidad (gr/cm3)
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	53.31	2.75	6.05	35.93	1.484
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	52.45	2.75	5.96	35.40	1.482
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	54.16	2.76	5.90	35.30	1.534
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	54.21	2.76	6.03	36.08	1.503
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	56.09	2.75	6.11	36.29	1.546
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	51.19	2.74	5.94	35.02	1.462
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	53.16	2.75	5.88	34.92	1.522
Promedio =					1.504

Cuadro 14. Promedios de Densidad Pasante 60 – T°: 1000°C.

Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 60	Peso (gr)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm3)	Densidad (gr/cm3)
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	52.24	2.75	5.92	35.16	1.486
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	51.12	2.73	5.89	34.48	1.483
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	54.70	2.74	6.00	35.38	1.546
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	53.42	2.75	5.92	35.16	1.519
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	51.86	2.74	5.84	34.44	1.506
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	54.51	2.75	6.12	36.35	1.500
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	56.71	2.75	6.32	37.54	1.511
Promedio =					1.507

Cuadro 15. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 40 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 40	Valores		X (gr/cm3)	Sn	Cv
	Máx	Min			
	(gr/cm3)				
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	1.544	1.490	1.517	0.0191	1.26
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	1.488	1.441	1.461	0.0162	1.11
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	1.523	1.495	1.509	0.0096	0.64
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	1.495	1.468	1.488	0.0105	0.71
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	1.493	1.450	1.469	0.0142	0.97
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	1.521	1.495	1.506	0.0089	0.59
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	1.556	1.505	1.535	0.0173	1.13

Cuadro 16. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 60 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 60	Valores		X (gr/cm3)	Sn	Cv
	Máx	Min			
	(gr/cm3)				
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	1.502	1.477	1.484	0.0097	0.65
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	1.461	1.421	1.448	0.0142	0.98
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	1.508	1.473	1.495	0.0130	0.87
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	1.509	1.468	1.489	0.0152	1.02
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	1.502	1.469	1.487	0.0117	0.79
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	1.510	1.468	1.488	0.0173	1.16
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	1.614	1.477	1.536	0.0443	2.88

Cuadro 17. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 40 – T°: 1000°C.

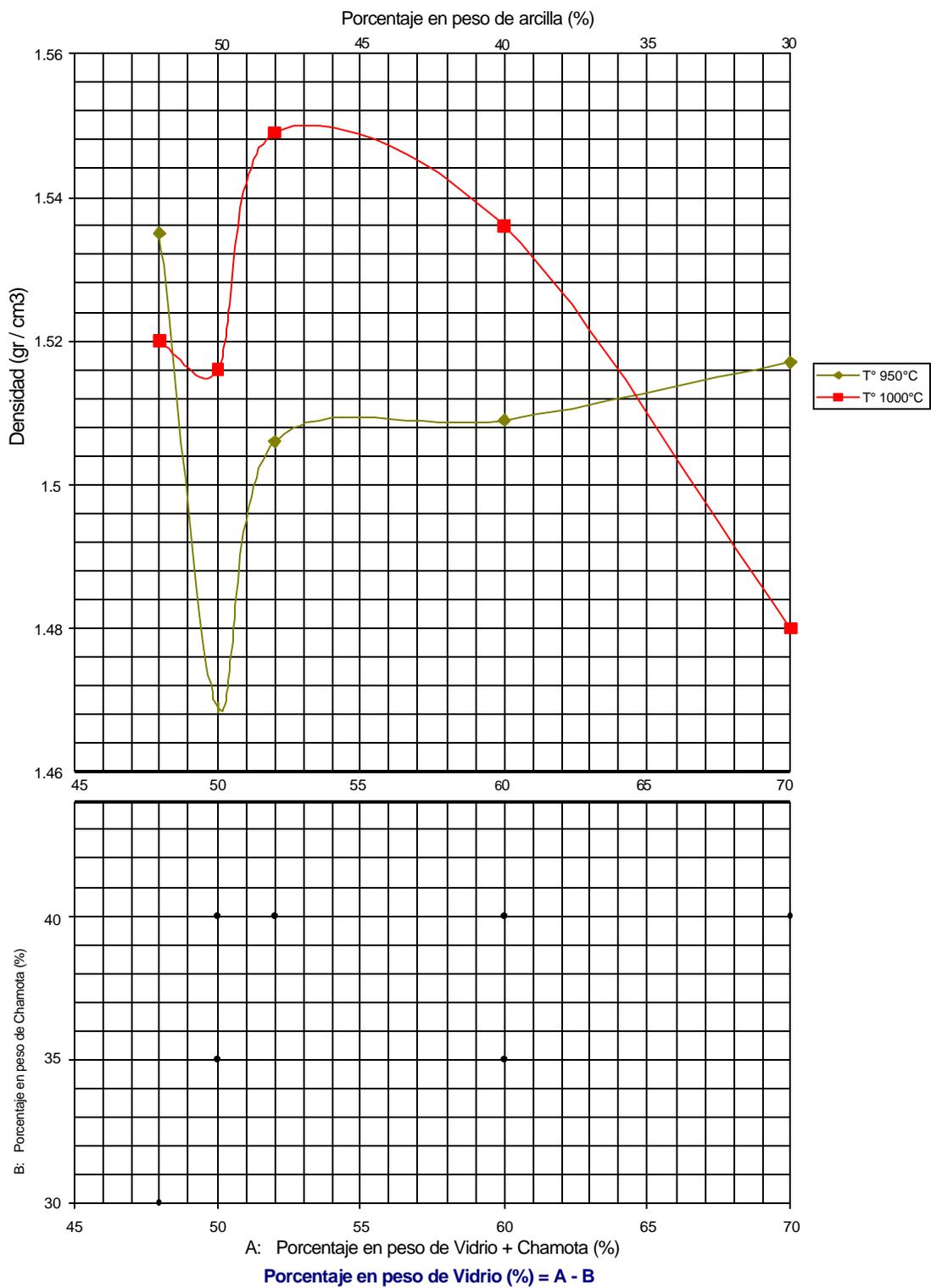
Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 40	Valores		X (gr/cm3)	Sn	Cv
	Máx	Min			
	(gr/cm3)				
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	1.500	1.452	1.480	0.0164	1.11
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	1.512	1.457	1.487	0.0209	1.41
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	1.545	1.527	1.536	0.0067	0.44
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	1.509	1.492	1.500	0.0063	0.42
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	1.565	1.531	1.544	0.0119	0.77
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	1.477	1.444	1.549	0.0131	0.85
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	1.533	1.503	1.520	0.0114	0.75

Cuadro 18. Datos Estadísticos de Densidad Pasante 60 – T°: 1000°C.

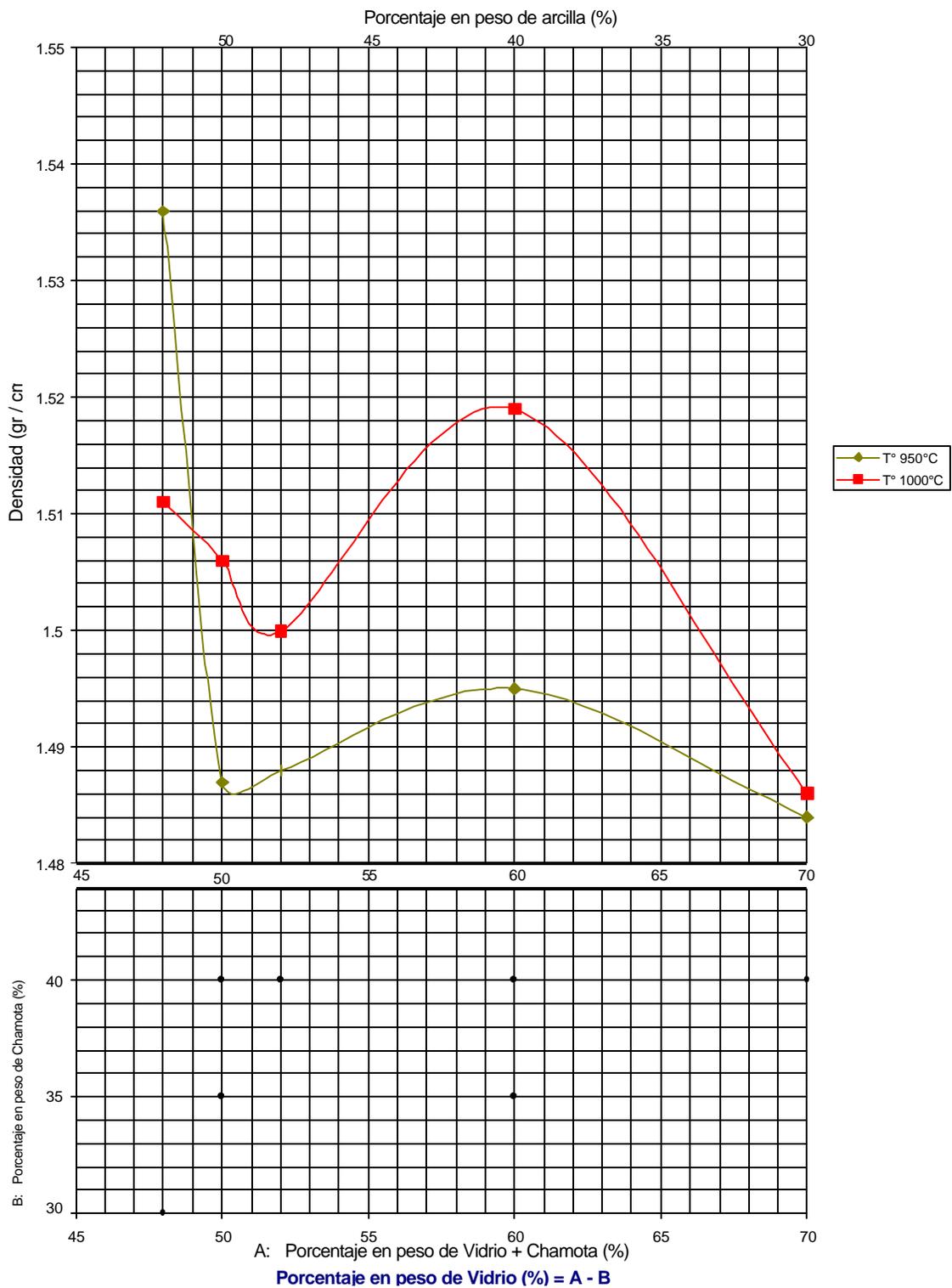
Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 60	Valores		X (gr/cm3)	Sn	Cv
	Máx	Min			
	(gr/cm3)				
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	1.512	1.467	1.487	0.0161	1.08
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	1.488	1.464	1.478	0.0079	0.53
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	1.562	1.511	1.542	0.0197	1.28
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	1.537	1.475	1.519	0.0222	1.46
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	1.517	1.498	1.508	0.0079	0.52
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	1.516	1.488	1.505	0.0091	0.60
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	1.529	1.503	1.513	0.0102	0.67

Con los datos de las Cuadros 15 a la 18, correspondientes al análisis estadístico de Densidad, se realizan los ábacos donde se visualizan % de arcilla y vidrio + chamota y los valores de densidad para cada una de las muestras, estos resultados se presentan en las gráficas 1 y 2.

Gráfica 1. Ábaco de Densidad - Pasante 40



Gráfica 2. Ábaco de Densidad - Pasante 60



5.2 ABSORCIÓN DE AGUA

Los resultados de la prueba de absorción de agua definida en el numeral 4.1.2, para cada tipo de muestra, en sus diferentes dosificaciones, pasantes y temperaturas de cocción, se presentan en las Cuadros 19 a la 22. En las Cuadros 23 a la 26 se dan a conocer los datos estadísticos de esta propiedad.

Cuadro 19. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 40 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 40	Peso Seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Absorción (%)
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	49.67	59.37	16.29
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	48.09	59.62	19.34
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	49.62	60.08	17.41
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	53.87	65.88	18.24
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	51.54	63.54	18.90
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	51.19	62.76	18.42
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	52.00	62.58	16.91

Cuadro 20. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 60 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 60	Peso Seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Absorción (%)
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	47.80	58.51	18.30
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	45.88	58.12	21.05
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	48.36	59.13	18.21
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	53.54	65.44	18.19
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	51.95	63.77	18.52
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	53.78	65.38	17.75
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	54.16	66.30	18.31

Cuadro 21. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 40 – T°: 1000°C.

Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 40	Peso Seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Absorción (%)
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	53.55	64.87	17.45
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	52.73	64.38	18.09
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	53.71	64.41	16.61
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	54.24	65.50	17.19
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	56.06	67.38	16.80
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	51.08	63.12	19.08
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	53.25	64.69	17.69

Cuadro 22. Promedios de Absorción de Agua para el Pasante 60 – T°: 1000°C.

Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 60	Peso Seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Absorción (%)
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	52.12	63.68	18.15
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	50.39	62.30	19.12
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	54.38	64.98	16.31
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	53.42	65.17	18.04
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	51.91	62.35	16.74
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	53.91	66.05	18.38
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	56.34	67.70	16.78

Cuadro 23. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 40 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 40	Valores		X %	Sn	Cv
	Máx	Min			
	%				
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	17.71	16.00	16.29	0.27	1.66
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	19.52	19.28	19.34	0.09	0.47
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	17.44	17.38	17.41	0.02	0.11
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	18.33	18.15	18.24	0.07	0.38
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	19.03	18.66	18.90	0.13	0.69
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	18.55	18.36	18.42	0.08	0.43
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	17.03	16.72	16.91	0.12	0.71

Cuadro 24. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 60–
T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 60	Valores		X %	Sn	Cv
	Máx	Min			
	%				
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	18.69	17.99	18.30	0.29	1.58
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	21.21	20.93	21.05	0.11	0.52
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	18.30	18.13	18.21	0.06	0.33
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	18.20	18.18	18.19	0.01	0.05
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	18.69	18.38	18.52	0.11	0.59
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	17.91	17.56	17.75	0.12	0.68
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	18.44	18.19	18.31	0.09	0.49

Cuadro 25. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 40–
T°: 1000°C.

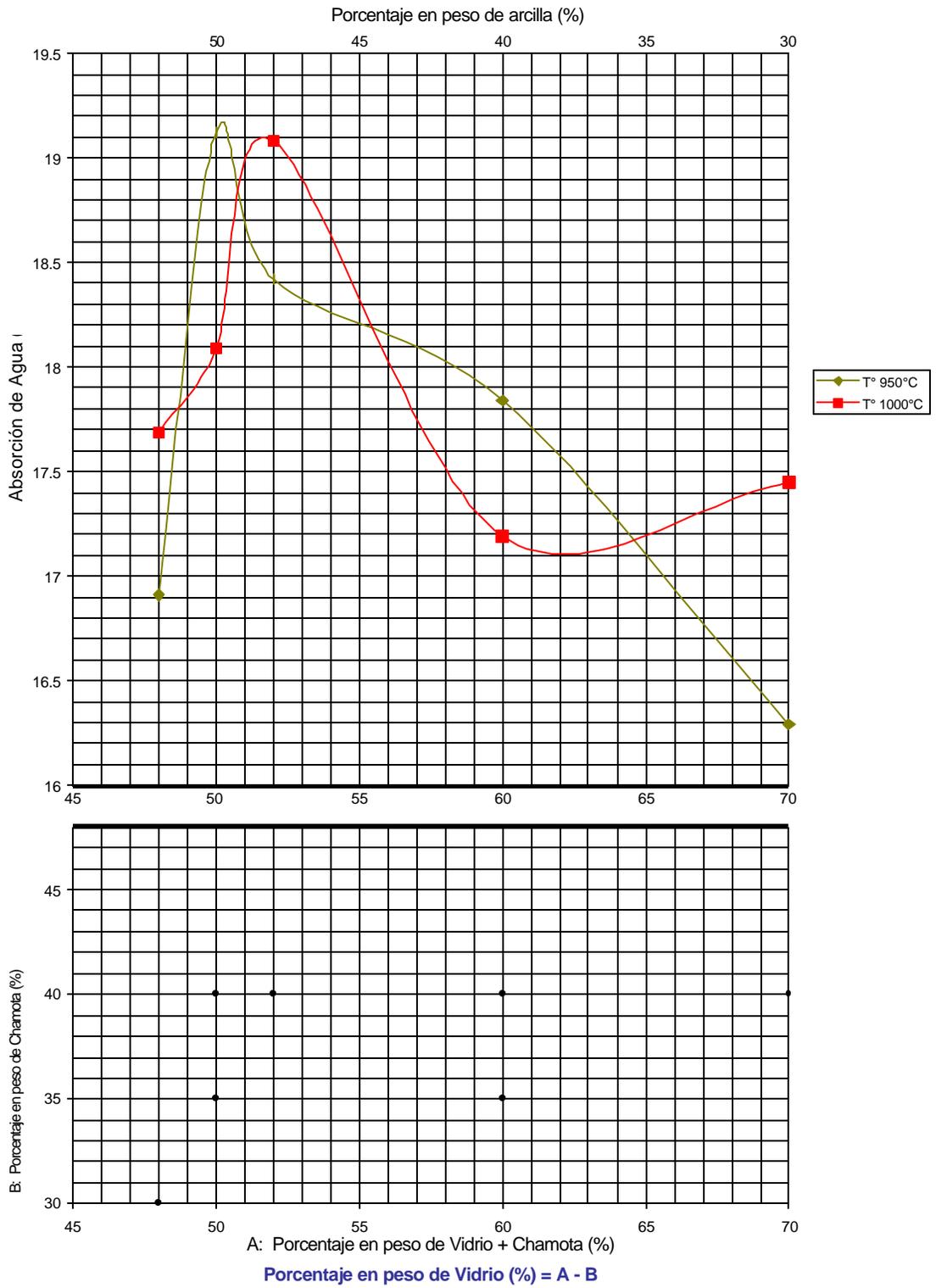
Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 40	Valores		X %	Sn	Cv
	Máx	Min			
	%				
Muestra1: 15% arc.Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	17.58	17.32	17.45	0.09	0.52
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	18.52	17.75	18.09	0.29	0.12
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	16.64	16.59	16.61	0.02	1.96
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	17.43	17.01	17.19	0.15	0.06
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	17.17	16.34	16.80	0.33	0.10
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	19.28	18.97	19.08	0.11	0.06
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	17.70	17.68	17.69	0.01	0.22

Cuadro 26. Análisis para determinar la gráfica de Absorción de agua Pasante 60–
T°: 1000°C.

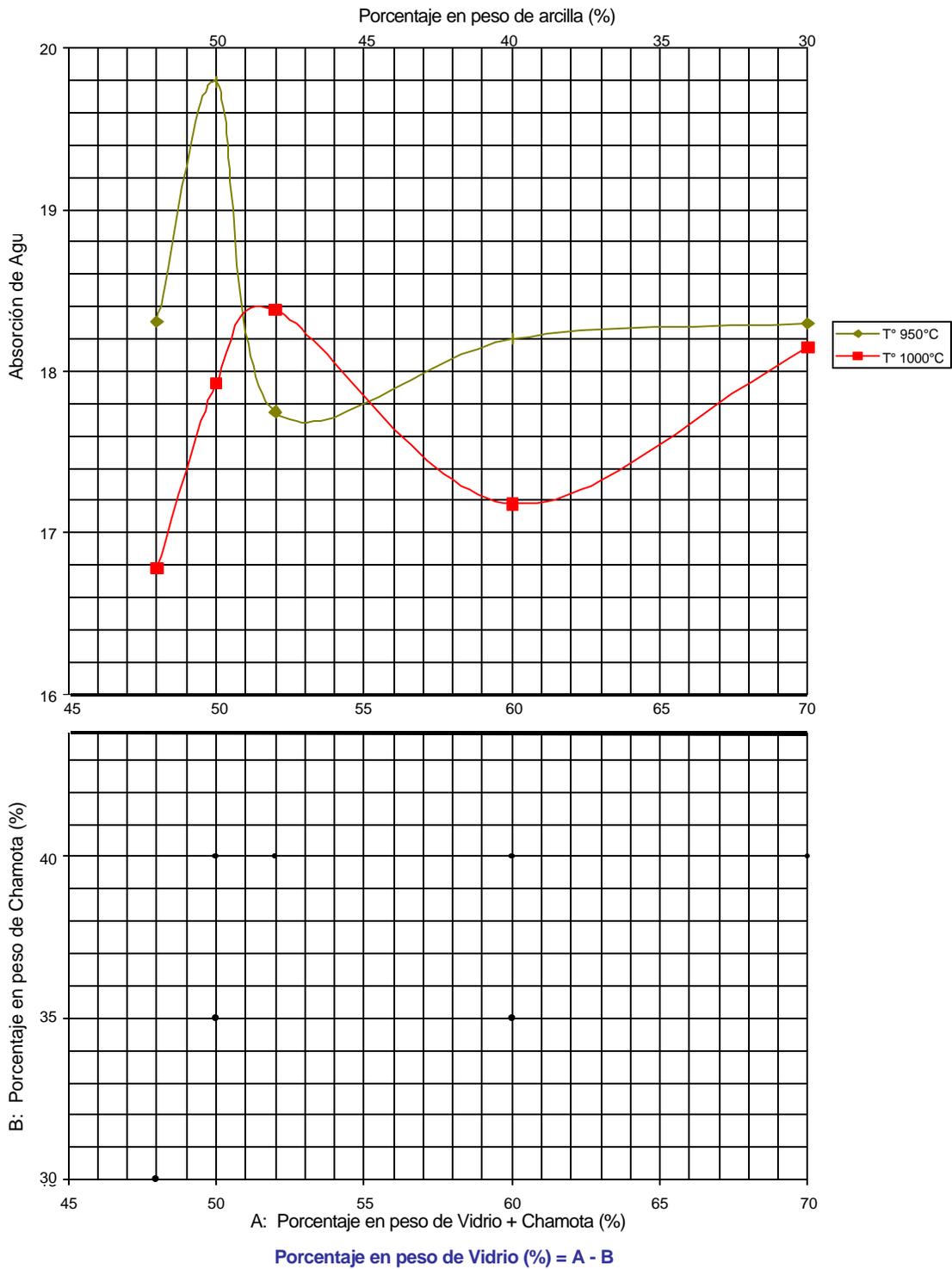
Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 60	Valores		X %	Sn	Cv
	Máx	Min			
	%				
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	18.23	18.07	18.15	0.06	1.55
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	19.14	19.10	19.12	0.02	0.10
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	16.53	16.13	16.31	0.15	0.92
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	18.05	18.02	18.04	0.01	0.06
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	16.92	16.58	16.74	0.12	0.72
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	18.44	18.33	18.38	0.04	0.22
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	17.09	16.41	16.78	0.26	1.55

Con los datos de las Cuadros 23 a la 26, correspondientes al análisis estadístico de Absorción de Agua, se realizan los ábacos donde se visualizan % de arcilla y sílice y los valores de absorción para cada una de las muestras, estos resultados se presentan en las gráficas 3 y 4.

**Gráfica 3. Ábaco de Absorción de Agua
Pasante 40**



**Gráfica 4. Ábaco de Absorción de Agua
Pasante 60**



5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión definida en el numeral 4.2.1, para cada tipo de muestra, en sus diferentes dosificaciones, pasantes y temperaturas de cocción, se presentan en las Cuadros 27 a la 30. En las Cuadros 31 a la 34 se dan a conocer los datos estadísticos de esta propiedad.

Cuadro 27. Promedios de Resistencia a la Compresión Pasante 40 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 40	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Carga de Rotura (kg)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm²)
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	2.75	5.94	180.08	30.32
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	2.75	5.94	106.86	17.99
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	2.75	5.94	158.05	26.61
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	2.76	5.98	170.70	28.53
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	2.75	5.94	140.92	23.73
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	2.75	5.94	199.66	33.61
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	2.75	5.94	255.94	43.09

Cuadro 28. Promedios de Resistencia a la Compresión Pasante 60 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 60	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Carga de Rotura (kg)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm²)
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	2.75	5.94	170.70	28.74
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	2.75	5.94	154.18	25.96
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	2.74	5.90	143.17	24.28
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	2.75	5.94	147.04	24.76
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	2.75	5.94	194.56	32.76
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	2.75	5.94	191.91	32.31
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	2.75	5.94	171.72	28.91

Cuadro 29. Promedios de Resistencia a la Compresión Pasante 40 – T°: 1000°C.

Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 40	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Carga de Rotura (kg)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm²)
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	2.76	5.98	206.59	34.53
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	2.75	5.94	225.15	37.91
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	2.76	5.98	264.51	44.21
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	2.76	5.98	183.95	30.75
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	2.75	5.94	272.87	45.94
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	2.74	5.90	149.69	25.39
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	2.75	5.94	234.53	39.49

Cuadro 30. Promedios de Resistencia a la Compresión Pasante 60 – T°: 1000°C.

Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 60	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Carga de Rotura (kg)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm²)
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	2.75	5.94	215.36	36.26
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	2.74	5.90	144.39	24.49
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	2.75	5.94	394.42	66.41
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	2.75	5.94	176.41	29.7
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	2.74	5.90	196.80	33.38
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	2.75	5.94	239.22	40.28
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	2.75	5.94	265.12	44.64

Cuadro 31. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión 40 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 40	Valores		X (Kg / cm²)	Sn	Cv
	Máx	Min			
	(Kg / cm²)				
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	33.48	27.47	30.32	2.40	7.92
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	20.60	14.94	17.99	2.19	12.93
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	32.10	23.35	26.61	3.44	7.63
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	35.62	24.71	28.53	3.71	9.63
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	26.10	20.77	23.73	1.81	7.63
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	36.40	31.59	33.61	1.88	5.59
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	49.62	38.46	43.09	4.15	9.63

Cuadro 32. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión 60 – T°: 950°C.

Tipo de muestra T°: 950°C Pasante 60	Valores		X (Kg / cm2)	Sn	Cv
	Máx	Min			
	(Kg / cm2)				
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	30.56	27.81	28.74	1.00	2.42
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	27.13	24.89	25.96	0.72	2.77
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	27.15	21.62	24.28	1.95	8.03
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	29.19	21.29	24.76	2.54	10.26
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	34.68	29.53	32.76	1.82	5.56
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	35.88	27.98	32.31	3.36	10.40
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	29.87	28.16	28.91	0.70	2.42

Cuadro 33. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión 40 – T°: 1000°C.

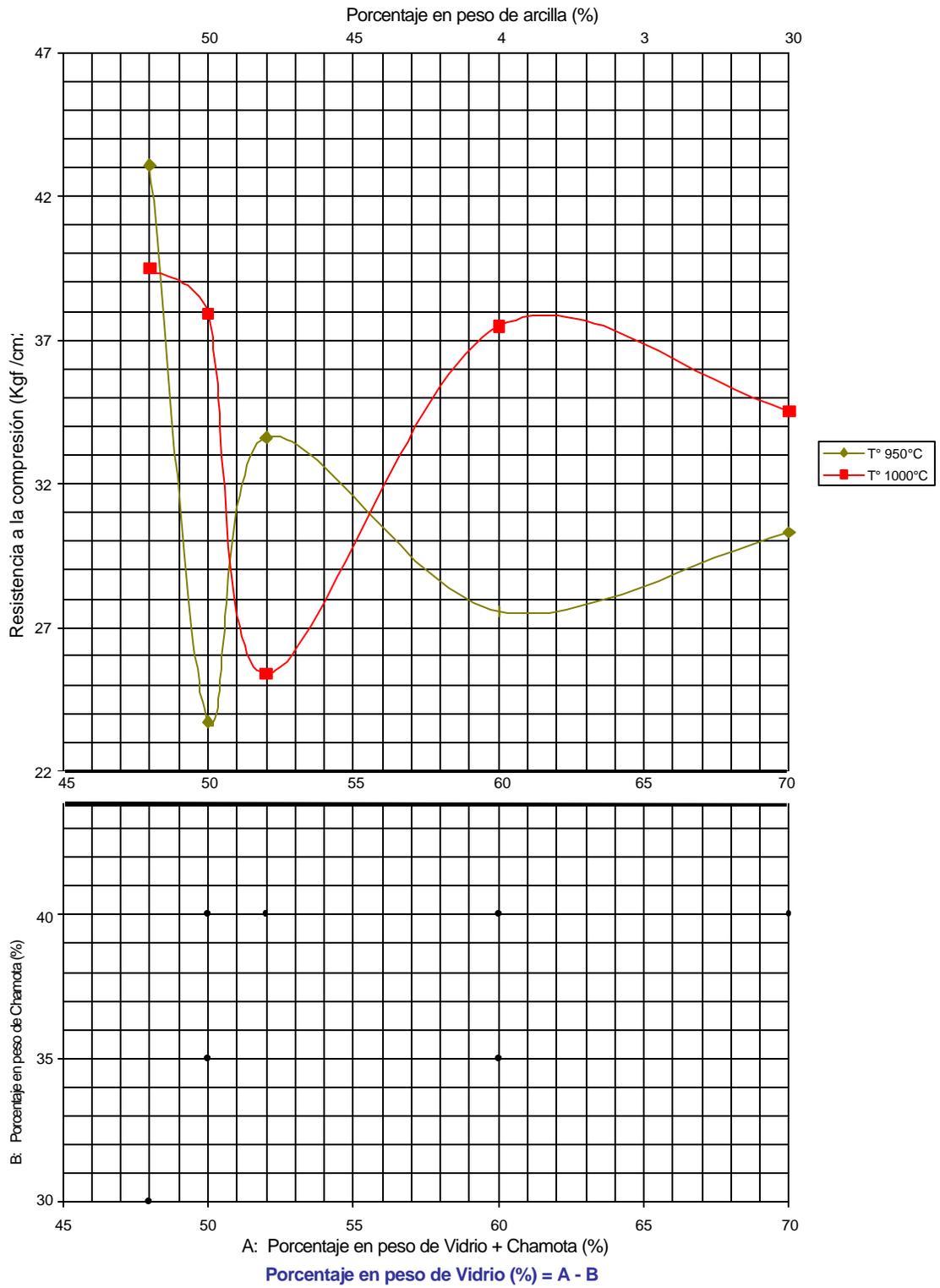
Tipo de muestra T°: 1000°C Pasante 40	Valores		X (Kg / cm2)	Sn	Cv
	Máx	Min			
	(Kg / cm2)				
Muestra1: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	37.84	31.19	34.53	2.41	6.98
Muestra2: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	41.20	33.99	37.91	2.99	3.62
Muestra3: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	46.36	42.10	44.21	1.60	6.18
Muestra4: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	35.45	28.12	30.75	2.58	5.17
Muestra5: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	49.10	40.69	45.94	2.84	6.18
Muestra6: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	28.36	23.00	25.39	1.86	7.33
Muestra7: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	41.72	35.88	39.49	2.04	5.17

Cuadro 34. Análisis para determinar la gráfica de Resistencia a la Compresión 40
 – T°: 1000°C.

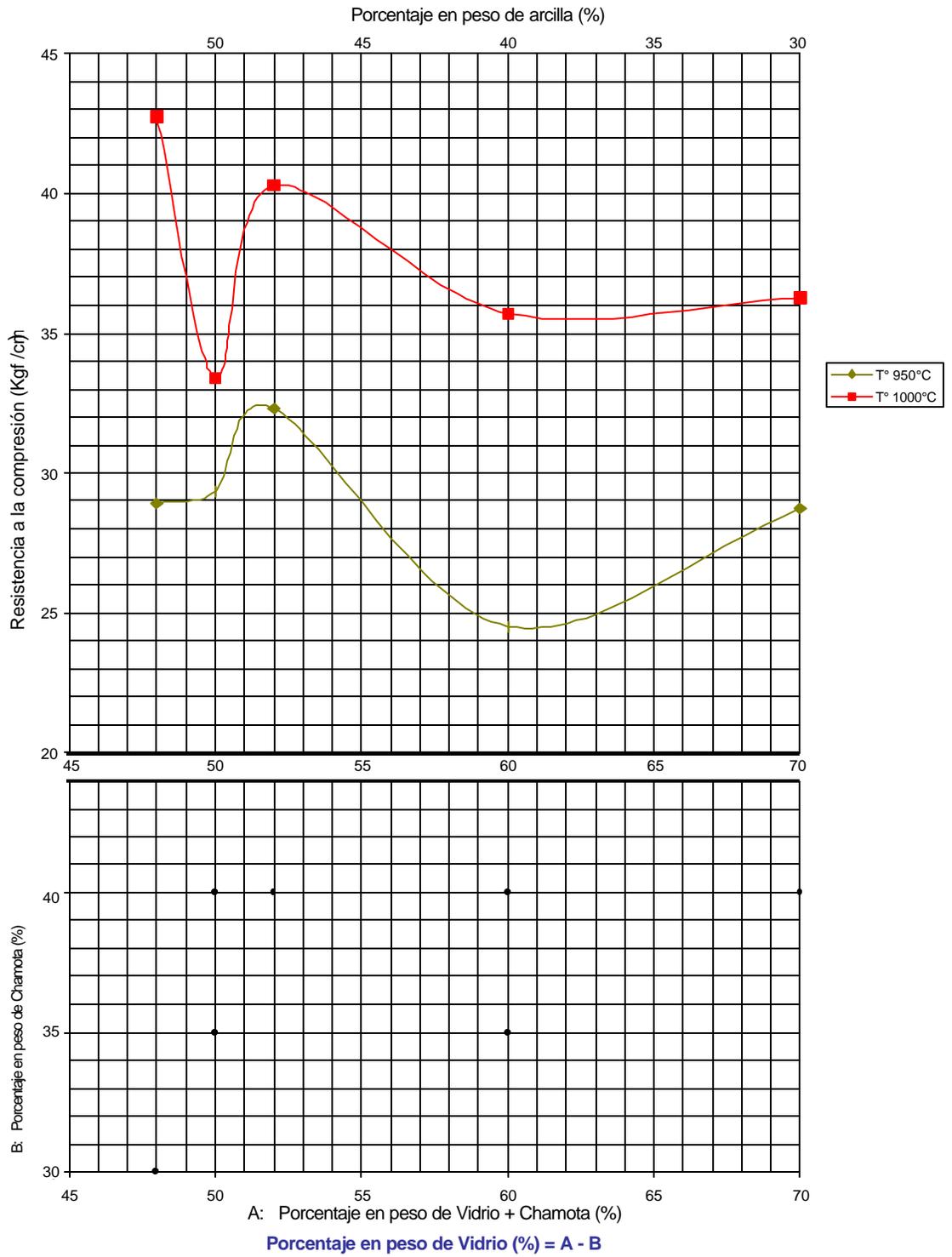
Tipo de muestra	Valores		X	Sn	Cv
	Máx	Min			
T°: 1000°C					
Pasante 60	(Kg / cm2)		(Kg / cm2)		
Muestra10: 15% arc. Gris + 15% arc. Amarilla + 40% chamota + 30% vidrio	38.80	33.82	36.26	2.15	11.30
Muestra11: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 40% chamota + 10% vidrio	26.63	23.17	24.49	1.25	5.10
Muestra12: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 35% chamota + 25% vidrio	46.87	41.55	44.81	1.82	4.06
Muestra13: 20% arc. Gris + 20% arc. Amarilla + 40% chamota + 20% vidrio	30.56	22.83	26.61	2.64	9.92
Muestra14: 25% arc. Gris + 25% arc. Amarilla + 35% chamota + 15% vidrio	37.70	26.63	33.38	4.08	12.22
Muestra15: 24% arc. Gris + 24% arc. Amarilla + 40% chamota + 12% vidrio	41.20	37.94	40.28	1.56	3.87
Muestra16: 26% arc. Gris + 26% arc. Amarilla + 30% chamota + 18% vidrio	47.73	36.91	42.75	4.83	11.30

Con los datos de las Cuadros 31 a la 34, correspondientes al análisis estadístico de resistencia a la compresión, se realizan los ábacos donde se visualizan % de arcilla y sílice y los valores de resistencia para cada una de las muestras, estos resultados se muestran en las gráficas 5 y 6.

**Gráfica 5. Ábaco de Resistencia a la Compresión
Pasanta 40**



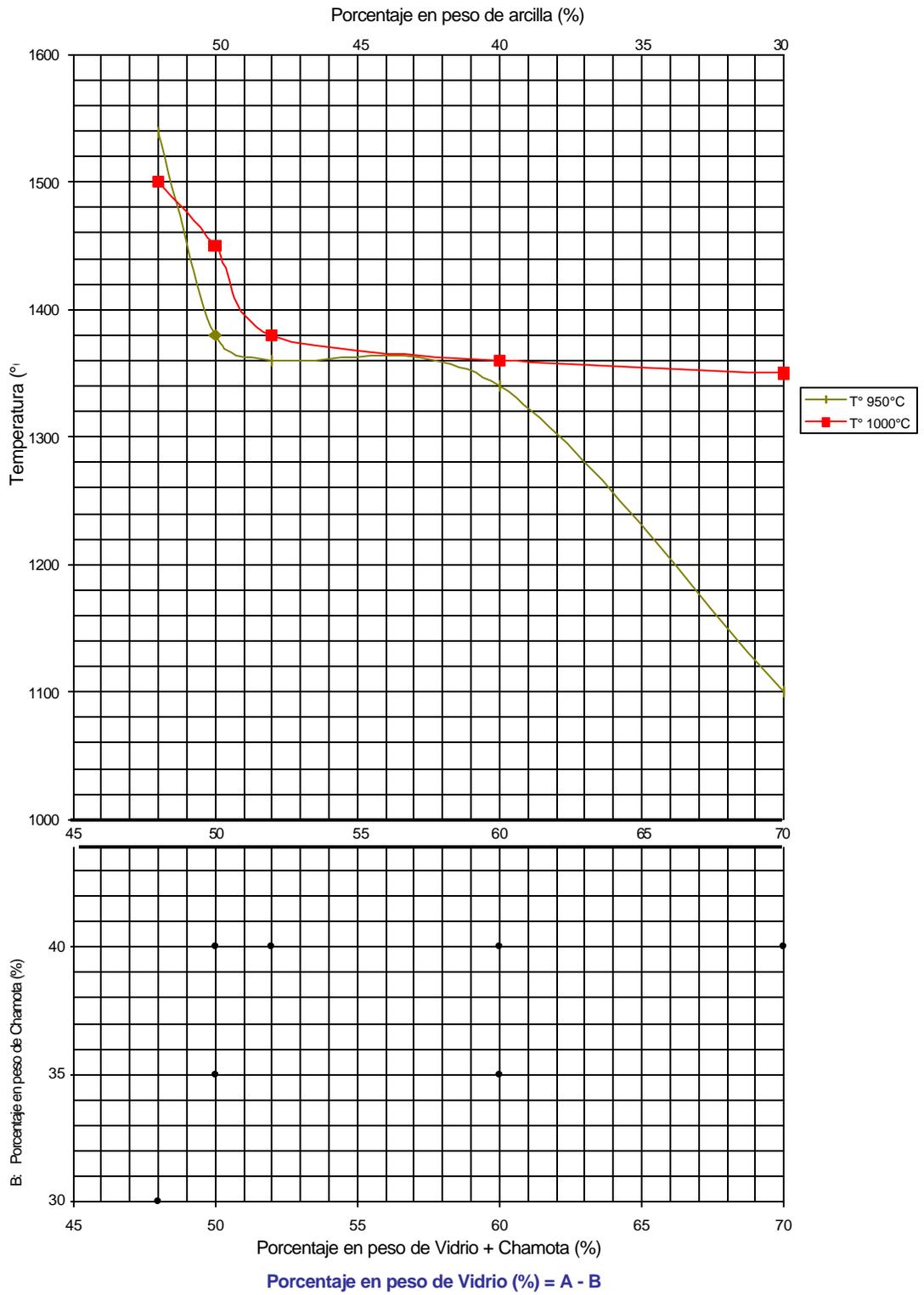
**Gráfica 6. Ábaco de Resistencia a la Compresión
Pasante 60**



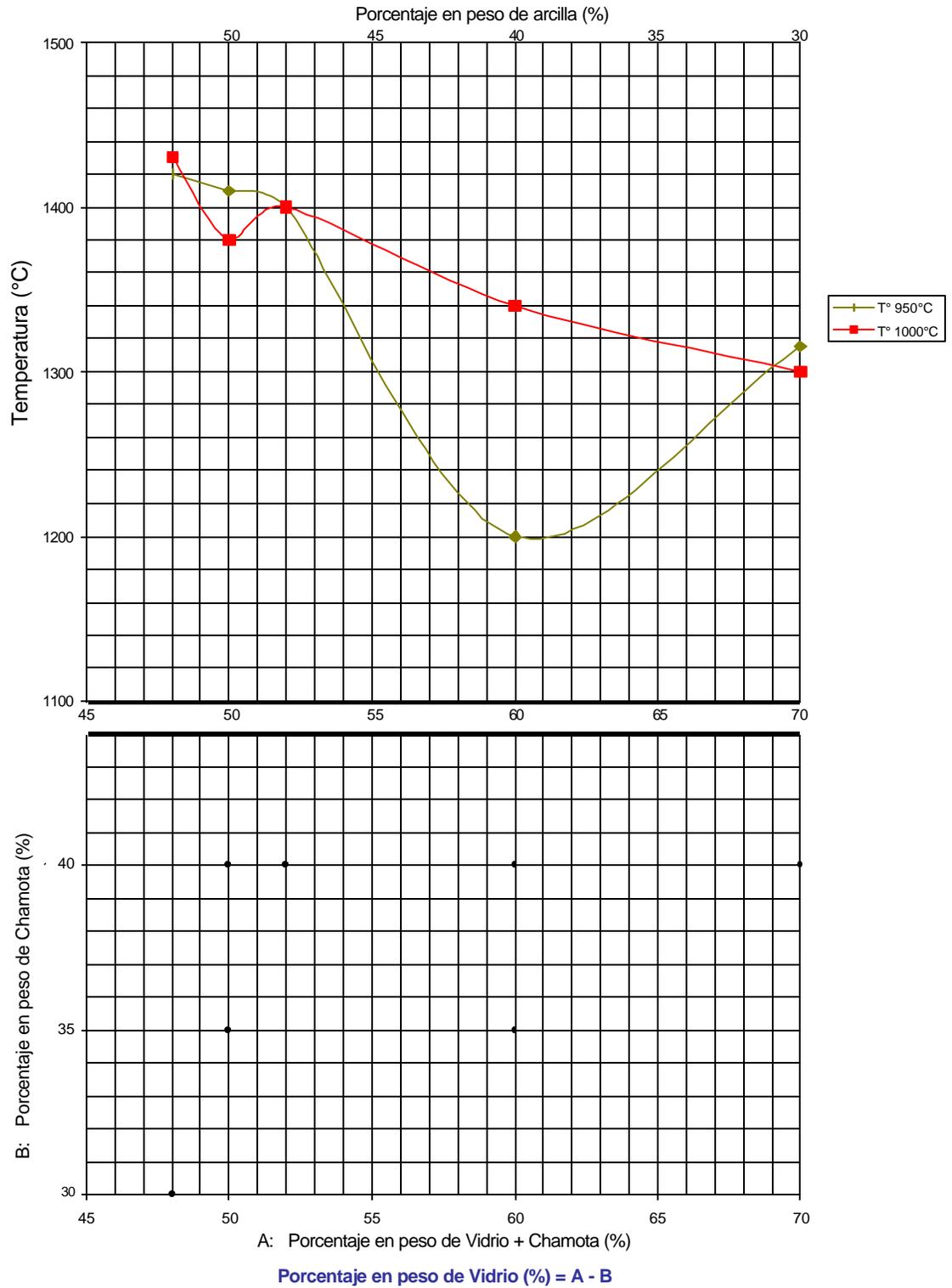
5.4 PUNTO DE REBLANDECIMIENTO

Los resultados obtenidos en la prueba de Punto de reblandecimiento – Temperatura de Ablandamiento definida en el numeral 4.3.1, para cada tipo de muestra, en sus diferentes dosificaciones, pasantes y temperaturas de cocción, se presenta en la Cuadros 35.

**Gráfica 7. Ábaco de Punto de Reblandecimiento
- Pasante 40**



**Gráfica 8. Ábaco de Punto de Reblandecimiento
- Pasante 60**



6. ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

6.1 DENSIDAD.

La densidad es una propiedad que influye mucho en las características refractarias de un material, por lo general se desea un material liviano que presente cierto grado de porosidad por ser esta una propiedad que afecta notablemente la transmisión del calor.

Las gráficas 1 y 2 muestran la influencia del tamaño del grano al ver que con pasante 40 la densidad es superior a la del pasante 60 esto se debe a que el pasante 40 presenta menor grado de porosidad. También se puede apreciar que para mayor temperatura de cocción - 1000°C se obtienen valores mayores de densidad.

En los ábacos 1 y 2 se observa que la densidad de las probetas está altamente influenciada por la cantidad de vidrio + chamota (en porcentaje de peso) que se adicione a la arcilla, ya que entre mayor sea el porcentaje menor es la densidad.

Dividiendo la cantidad de masa por unidad de volumen se obtuvo un valor mínimo de densidad de 1.45 gr/cm³ para la muestra 11(25% arcilla gris + 25% arcilla amarilla + 40% chamota + 10% vidrio) con temperatura de cocción de 950°C y finura del pasante 60; y un máximo de 1.55 gr/cm³ para la muestra 12(20% arcilla

gris + 20% arcilla amarilla + 35% chamota + 25% vidrio) y la muestra 5(25% arcilla gris + 25% arcilla amarilla + 35% chamota + 15% vidrio) con temperatura de cocción de 1000°C y finura del pasante 60 y 40 respectivamente.

6.2 ABSORCIÓN

La absorción de agua es una propiedad que está directamente relacionada con la porosidad, cuanto mayor sea la absorción mayor es la porosidad. Esta característica es determinante en el comportamiento térmico de un material debido a que su presencia permite un calentamiento uniforme y disminución en la pérdida de calor.

En los ábacos 3 y 4 se puede determinar que para una temperatura de cocción de 950°C se tienen valores mayores de absorción lo que indica que si se aumenta la temperatura de cocción la absorción de agua disminuye, se puede decir que a mayor temperatura se presenta mayor cristalización de las partículas de vidrio lo cual afecta la capacidad de absorber agua; este comportamiento es más determinante para tamaño de grano de vidrio y chamota pasantes del tamiz 60.

Para la temperatura de cocción de 950°C tanto para el pasante 40 como para el pasante 60 el máximo valor de la absorción se presenta cuando el porcentaje en peso de sílice es del 50%; el mismo caso se da a 1000°C donde el máximo se encuentra en el 52% del porcentaje en peso de vidrio + chamota.

6.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia es una característica que establece la capacidad que tiene un material de soportar cargas por lo tanto esta propiedad determina que utilización se le puede dar a la pasta elaborada.

En las gráficas de Resistencia a la compresión se alcanzan los valores máximos cuando el porcentaje en peso de vidrio + chamota es del 48% obteniendo valores de 40 kg / cm² aproximadamente. Además se puede apreciar que a mayor temperatura de cocción se tiene mayor resistencia, debido al cambio térmico que sufren los diferentes materiales presentes en las probetas.

Las gráficas 5 y 6 de resistencia a la compresión permiten observar que al adicionar chamota y vidrio a la arcilla la resistencia disminuye en un 65.79% con respecto a la muestra patrón (100% arcilla). Lo anterior indica que el porcentaje en peso de vidrio + chamota adicionado disminuye notablemente la resistencia.

El material cerámico que presenta una resistencia a la compresión baja, no ha sufrido cambio térmico total o vitrificación total, los resultados obtenidos en las diferentes probetas están muy por debajo de los resultados normales. Por lo anterior se puede decir que el material presenta características refractarias bajas y se lo puede utilizar en hornos que no superen los 1400°C.

6.4 PRUEBA TÉRMICA

Analizando los resultados obtenidos en la prueba térmica se puede decir que después de haber sometido las probetas a una temperatura de 1300°C estas sufren una contracción que varía entre el 14% y el 35% esto se debe a la formación de fase líquida que rellena los poros y solidifica dando como resultado un grado de vitrificación.

Otra característica que influye en el punto de reblandecimiento de la pasta es el tamaño de grano del vidrio puesto que entre más grande más rápida y mayor es la reacción de la cristalización de las partículas además, afecta la resistencia mecánica, la absorción y la porosidad.

Los ábacos 7 y 8 muestran que para temperatura de cocción mayor – 1000°C se obtienen puntos de fusión más altos, mayores de 1300°C. También se puede ver que a mayor cantidad de vidrio + chamota los puntos de fusión de la pasta disminuyen. Por lo tanto la mayor temperatura de fusión se da cuando el porcentaje en peso de vidrio + chamota es del 48%.

La muestra que presenta mejor comportamiento térmico y mayor punto de fusión 1.535°C es la No. 7 (26% arcilla gris + 26% arcilla amarilla + 30% chamota + 18% vidrio) con temperatura de cocción de 950°C y pasante 40 y el mínimo valor de punto de fusión es de 1.100°C para la muestra 1 (15% arcilla gris + 15% arcilla

amarilla + 40% chamota + 30% vidrio) con temperatura de cocción de 950°C y pasante 40.

Finalmente se puede decir que los factores que determinan el punto de fusión son: tipo de material, densidad, absorción de agua, porcentaje en peso de vidrio + chamota y la temperatura de cocción.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

® El comportamiento térmico de un material refractario está influenciado por la densidad, esta propiedad se reduce hasta en un 8.89% con respecto a la muestra patrón (100% arcilla), cuando a la arcilla se le adiciona vidrio y chamota. Además a mayor temperatura de cocción (1000°C) se obtienen valores mayores de densidad, en este caso tan solo decrece en 2.52% en comparación con la muestra patrón.

® Los valores máximos de la absorción de agua se obtienen a menor temperatura de cocción (950°C), esto indica que si esta temperatura aumenta, la absorción disminuye, esto se debe a que a mayor temperatura hay mayor vitrificación de partículas reduciendo así la capacidad de absorción. Por otra parte estos valores máximos se presentan cuando el porcentaje en peso de vidrio + chamota es de 50% (Chamota 40% y vidrio 10%).

® Al adicionar vidrio reciclado molido y chamota a la arcilla en proporciones hasta del 70% en peso, la resistencia a la compresión disminuye con respecto a la muestra patrón (100% arcilla) hasta en un 65.79%.

® En las muestras patrón se tiene un promedio de resistencia a la compresión de 125.96 Kgf / cm² y en las de proporción en peso de 30% de arcilla + 70% de vidrio + chamota (30% vidrio + 40% chamota), la resistencia a la compresión promedio es 32.46 Kgf / cm², lo que indica una disminución 93.50 Kgf / cm², equivalente al 74.23%.

® La refractariedad de un material Sílico – Aluminoso depende del contenido de alúmina y de las impurezas (alcalinos y óxidos de hierro), en general es deseable bajo contenido de álcalis y de hierro (menor de 1%), estos compuestos contaminan la pasta dando coloraciones y dificulta la formación de la pasta por que le quita plasticidad a la arcilla.

® El tamaño de las materias primas es de gran interés, especialmente el tamaño del vidrio, puesto que cuanto mayor es la superficie tanto más rápida es la reacción (cristalización de las partículas); además influye en la resistencia mecánica, absorción y porosidad.

® Al someter las muestra a una temperatura de prueba de 1300°C se observa que si las probetas fueron cocidas a 1000°C hay menor vitrificación, por lo tanto hay menor pérdida de absorción de agua y porosidad.

® Los materiales cerámicos refractarios se caracterizan por tener una resistencia a la compresión baja, los datos de resistencia a la compresión obtenidos en esta

investigación están por debajo de los materiales cerámicos tradicionales utilizados en construcción.

® La muestra No. 7 (26% arcilla gris + 26% arcilla amarilla + 30% chamota + 18% vidrio) con temperatura de cocción de 950°C y pasante 40 presenta mejor comportamiento térmico, con punto de fusión igual a 1535°C. El mínimo valor de punto de fusión es de 1100°C para la muestra 1 (15% arcilla gris + 15% arcilla amarilla + 40% chamota + 30% vidrio) con temperatura de cocción de 950°C y pasante 40.

7.2 RECOMENDACIONES

® Es necesario implementar metodologías que permitan controlar la densidad en el proceso de compactación, debido a que se presenta un mejor comportamiento térmico cuando el material es poroso y liviano.

® Es importante tener en cuenta que las resistencias obtenidas son relativamente bajas, lo que conduce a utilizar este material como recubrimiento interno del horno para así obtener una mayor durabilidad del mismo.

® Con los datos obtenidos en la presente investigación se sugiere que es preferible emplear materias primas de mediana finura (pasante 60), puesto que hay mayor uniformidad de la pasta, en el proceso de cocción hay menor

cristalización de partículas, presentan buen comportamiento físico - mecánico y también se obtienen puntos de fusión más altos.

® Una buena opción para tener un buen comportamiento físico, mecánico y térmico de la pasta es que la temperatura de cocción sea de 1000°C.

® Para poder optimizar los datos obtenidos es necesario realizar dosificaciones entre el 35% y el 60% de porcentaje en peso de vidrio + Chamota con variaciones del 2%.

® Para ampliar esta investigación y prever un mejor comportamiento térmico se debe realizar pruebas como: choque térmico, conductividad térmica, además de emplear otros pasantes.

® De los resultados obtenidos se podría recomendar la siguiente dosificación: 26% de arcilla gris + 26% de arcilla amarilla + 30% de Chamota + 18% de vidrio, puesto que presenta buen comportamiento térmico, con un punto de fusión de 1539°C, una contracción del 16%, resistencia a la compresión de 43.09 Kg / cm² y absorción del 17%.

BIBLIOGRAFIA

BELTRAN, Mario Fernando y CAICEDO, Diego. Estudio de Unidades de Mampostería Prismática. Fase II, Proyecto de Grado, 1997.

BOWLES, J.E., Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Ed. Mc Graw-Hill. 1968.

BEDOYA BARCO, Fernando. Fundamentos Básicos para la Formulación y Evaluación de Proyectos. Primera edición. Editorial Universitaria Universidad de Nariño. Pasto. 1997. 131 p.

CAILLERE, S. et Henin S, Mineralogie des argiles. Massonet cie, editens, Paris 1963.

CONOS EL KELPER. www.elkelper.com. Consultada el 20 de febrero de 2003.

CONOS PIROMÉTRICOS. www.conospirometricos.com. Consultada el 20 de febrero de 2003.

CORAL ASAÍN, Francisco Javier y MARTINEZ APRAEZ, Fabio. Vidriados de Ladrillos Cerámicos Utilizando Vidrio Reciclado. Universidad de Nariño. Pasto. 1998.

CORDOBA, Carlos y RODRIGUEZ, Jesús, Fundamentos de cerámica tradicional (Arcillas, Vidriados y Hornos). Editorial Universitaria, Universidad de Nariño. 1996.

Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation.
Reservados todos los derechos.

JURADO DORADO, Andrés y VITERI GUERRERO, José Ignacio. Estudio de las propiedades de absorción y resistencia a la compresión en la arcilla empleada para ladrillos de construcción adicionando vidrio reciclado molido. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. San Juan de Pasto, 2000.

HORNOS LADRILLEROS A CARBÓN. Ecocarbón. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín – Colombia. 1998. 133 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tesis y otros trabajos de grado. Bogotá. ICONTEC. 2002. 99 p.

LADRILLOS REFRACTARIOS. www.utp.edu.com. Consultada septiembre 2002.

MATERIALES REFRACTARIOS. www.raku.com. Consultada el 20 de febrero de 2003.

MATERIALES REFRACTARIOS DE COLOMBIA. www.xtec.com. consultada Mayo 2002.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC 4205, Ingeniería Civil y Arquitectura, Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida. Ladrillos y Bloques Cerámicos, 1997.

OJEDA, Janeth y TORRES CORREDOR, Eduardo. Cuantificación de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos cerámicos producidos en Pasto. Trabajo de Grado Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería. San Juan de Pasto, 1988.

PENA CASTRO, Pilar. Físico – Química de los Materiales Refractarios. Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. 1996.

QUIMICA DE LOS MATERIALES. www.Químika.com. consultada Septiembre 2002.

SINGER F. y SINGER S., Enciclopedia de la Química Industrial. Cerámica Industrial. Bilbao. URMO, V10.1971.