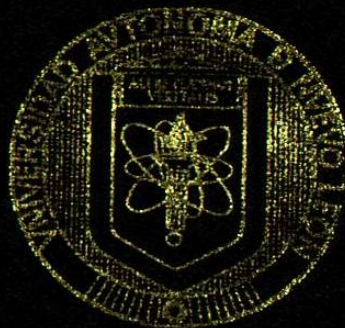


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



"DESARROLLO DE UNA BARBOTINA CERAMICA PARA
VACIADO DE ALTA PRESION MEDIANTE EL USO DE LA
DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD EN EL
FILTRO BAROID"

PRESENTA:
FRANCISCO JAVIER MELENDEZ RODRIGUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA CERAMICA

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DEL 2002

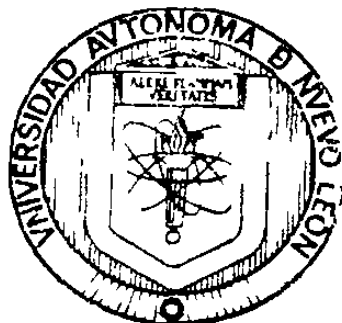
TM
Z5521
FCQ
2002
.M4

INDUSTRIE ELETTRICHE
YACIADO DE ALTA PRESSIONE
CORRIMMA CERRAMICA PER UNA DURATA
MIGLIORATA E IL USO PER LA
PULIZIA E LA MANUTENZIONE



1020148982

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



"DESARROLLO DE UNA BARBOTINA CERAMICA PARA
YACIADO DE ALTA PRESION MEDIANTE EL USO DE LA
DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD EN EL
FILTRO BAROID

PRESENTA:
FRANCISCO JAVIER MELENDEZ RODRIGUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA CERAMICA

CD. UNIVERSITARIA

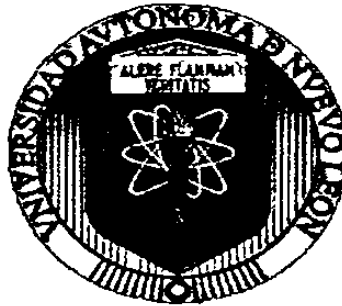
NOVIEMBRE DEL 2002

172349

TM
Z5521
FQ2.
2002
.M4



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS**



**“DESARROLLO DE UNA BARBOTINA CERAMICA PARA
VACIADO DE ALTA PRESION, MEDIANTE EL USO DE LA
DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD EN EL FILTRO
BAROID”.**

POR

FRANCISCO JAVIER MELENDEZ RODRIGUEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERIA CERAMICA**

MONTERREY, N.L.

NOVIEMBRE, 2002

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

DRA. CECILIA ORALIA RODRIGUEZ

COORDINADORA DE LA ESCUELA DE GRADUADOS EN CIENCIAS

**LA TESIS PRESENTADA POR EL ING. FRANCISCO JAVIER MELENDEZ RODRIGUEZ,
QUE LLEVA POR TITULO:**

**“DESARROLLO DE UNA BARBOTINA CERAMICA PARA VACIADO DE ALTA
PRESION, MEDIANTE EL USO DE LA DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD EN
EL FILTRO BAROID”**

**HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA CERAMICA**

DR. MARIO R. ZAMUDIO C.

PRESIDENTE

DR. AZAEL MARTÍNEZ

SECRETARIO

DR. LUIS CARLOS TORRES GONZALEZ.

PRESIDENTE

DRA. MA. IDALIA GOMEZ DE LA FUENTE

SECRETARIO

NOVIEMBRE, 2002

DEDICATORIA

**A MI AMADA ESPOSA
Y A MI PEQUEÑA ANDREA**

GRACIAS POR APOYARME Y ESTAR AL PENDIENTE

¡LAS AMO CON TODO MI CORAZÓN!

AGRADECIMIENTOS.

Antes que a nadie agradezco a Dios por darme la oportunidad de participar en el presente trabajo.

Inmediatamente después agradezco a Silvia Esthela Ortiz Lara por su apoyo incondicional y su comprensión.

Agradezco de manera muy especial al Ing. Arturo Martínez Martínez, Director General de Sanitarios Azteca S.A de C.V por todo el apoyo brindado para la realización de esta Investigación.

Agradezco también al Dr. Mario R. Zamudio C. por sus valiosos consejos cuya utilidad aplica no solo a esta tesis, sino a la vida misma.

Agradezco al Dr. Azael Martínez de la Cruz por hacer un espacio de su tiempo para revisar este trabajo.

Agradezco también el apoyo del Ing. Oscar Hernández Berlanga y del Sr. Héctor López.

Agradezco al Ing. Ricardo García por todas las facilidades otorgadas para el uso de los equipo e instalaciones de KT Clay de México.

Muchas gracias al Ing. Javier Torres y Diario González por su disposición.

También agradezco al Ing. Bill Leach por su punto de vista con respecto al trabajo.

Existe mucha ficción en cuanto al desarrollo de la cerámica en el mundo, inclusive se tiene la referencia de la transformación del hombre partiendo del barro, como es citado en la Biblia, por lo que se pudiera decir que Dios es el primer ceramista.

Contenido:

SUMARIO	1
OBJETIVOS Y METAS	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1. MINERALES ARCILLOSOS.....	6
1.1. CAOLINES Y ARCILLAS.....	6
1.1.1. ESTRUCTURA MINERALÓGICA DE LOS CAOLINES Y ARCILLAS....	7
1.2. FELDESPATO.....	8
1.2.1. ESTRUCTURA MINERALÓGICA DEL FELDESPATO.....	9
1.3. SÍLICE.....	10
1.3.1. ESTRUCTURA MINERALÓGICA DE LA SÍLICE	10
1.4. ADITIVOS.....	10
CAPÍTULO 2. FILTROPRESADO.....	11
2.1. VISCOSIDAD.....	11
2.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA	12
2.3. TIXOTROPÍA.....	12
2.4. FUNDAMENTOS DE FILTRO-PRESADO.....	12
2.5. ANALOGÍA DE FILTRO PRESADO Y VACIADO A PRESIÓN.....	13
2.6. PERMEABILIDAD.....	14
CAPÍTULO 3. PARTE EXPERIMENTAL.....	16
3.1. PREPARACIÓN DE BARBOTINA.....	16
3.2.DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD Y TIXOTROPÍA.....	17
3.3. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD REAL DE SÓLIDOS.....	18
3.4. DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	18

3.5. DETERMINACIÓN DE PERMEABILIDAD.....	19
3.6. TÉCNICAS AUXILIARES.....	21
3.6.1. DETERMINACIÓN DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS (DTP).....	21
3.6.2.DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (CDT) DE LA PASTA Y EL ESMALTE.....	21
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	23
4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS:.....	23
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS FÓRMULAS.....	25
4.3. PERMEABILIDAD DE LAS FÓRMULAS.....	30
4.4. ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD DE F1 A DIFERENTES CONDICIONES REOLÓGICAS.....	31
4.5. COMPATIBILIDAD DE F1 CON UN ESMALTE ESTÁNDAR DE PRODUCCIÓN.....	33
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	34
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	36
REFERENCIAS.....	38

APÉNDICES.

Apéndice 1.	Analogía entre el filtrado de un material y vaciado a presión de un cuerpo cerámico.....	40
Apéndice 2.	Figura No 6 Gráfica de correlación de lecturas de Gallenkamp y Viscosidad en cps.....	45
Apéndice 3.	Metodología de la determinación de densidad real de los sólidos.....	46
Apéndice 4.	Metodología para determinar el contenido de sólidos y ajuste de gravedad específica de la pasta	48
Apéndice 5.	Determinación de la absorción de agua del cuerpo cerámico	51
Apéndice 6.	Figura No. 7 Curva de quemado del horno de quemado.....	52
Apéndice 7.	Metodología para determinar la permeabilidad.....	53
Apéndice 8.	Figura No. 6. Gráficas de C.D.T. para F1 y esmalte blanco.....	56

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Análisis químicos típicos de las materias primas.....	23
Tabla 2	Distribución del tamaño de partícula de las materias primas.....	24
Tabla 3	Composición de fórmulas de acuerdo a las materias primas utilizadas.....	25
Tabla 4	Análisis químicos de las fórmulas.....	26
Tabla 5	Distribución del tamaño de partícula de las fórmulas.....	27
Tabla 6	Porcentaje de absorción de las fórmulas.....	29
Tabla 7	Permeabilidad de las fórmulas.....	30
Tabla 8	Permeabilidad de F1 a diferentes condiciones de viscosidad y BU.....	31
Tabla 9	CDT de F1 y un esmalte de producción.....	33
Tabla 10	Densidad de los sólidos de la barbotina.....	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Estructura de la caolinita.....	7
Figura 2	Estructura del feldespato.....	9
Figura 3	Filtro Baroid en funcionamiento.....	19
Figura 4	Distribución de Tamaño de partícula de las fórmulas.....	28
Figura 5	Gráfica de familia de curvas de permeabilidad.....	32
Figura 6	Gráfica de correlación de lecturas de Gallenkamp y Viscosidad en cps.....	45
Figura 7	Curva de quemado del horno de quemado.....	52
Figura 8	Gráficas de C.D.T. para F1	56
Figura 9	Gráficas de C.D.T. esmalte blanco.....	57

DEFINICIONES

Barbotina o pasta es la mezcla de materiales arcillosos suspendidos en agua con ayuda de aditivos.

C.D.T. Coeficiente de Dilatación Térmica.

Cps. Centipoises.

DTP Distribución de tamaño de partícula.

PPI. Pérdidas por Ignición.

Vaciado o colado es la acción de conformado de la pieza a través del molde.

Vaciador es la persona que da el conformado a la pieza en una sala de vaciado.

Cp Capacidad de proceso.

Sumario

El presente trabajo establece las condiciones reológicas y características que deben tener los materiales arcillosos para la formación de paredes, cuando se utiliza el proceso de formado llamado vaciado a alta presión. En este trabajo se establecen relaciones entre el tamaño de partícula, viscosidad, tixotropía y densidad para la obtención de la permeabilidad de una pared formada utilizando un filtro Baroid.

Objetivos y metas

Desarrollar y caracterizar una barbotina (pasta) cerámica que funcione en el vaciado a presión con ciclos cortos, midiendo la permeabilidad mediante un FILTRO BAROID.

Encontrar las principales características que afectan a la permeabilidad.

Establecer nuevas formulaciones y condiciones reológicas de suspensiones que presenten alta permeabilidad.

Introducción

Breve historia de la cerámica tradicional.

Los primeros productos cerámicos fabricados por el hombre fueron los utensilios primitivos formados con la mezcla de tierras arcillosas moldeadas manualmente y sometidas al fuego logrando su consolidación por la acción del calor. Las diferencias entre la cerámica de una cultura y la otra está dada por la materia prima usada y por la técnica de cocción, que podía ser a fuego abierto, en pozos y en forma más elaborada en hornos primitivos, siendo la leña el combustible.

Alrededor del 2000 A.C. en China se explotaron los yacimientos de una arcilla muy blanca de una región llamada Kao-Ling, de donde proviene el nombre de caolín. Esta arcilla se mezclaba con un feldespato llamado "Petun-tse", amasándose con agua y conformando objetos de pared delgada, aumentando la temperatura de cocción a 1200-1300°C.

En 1709 un alemán de nombre Böttger obtuvo una porcelana (que no alcanzaba las características de la porcelana China) cuya fabricación se extendió hacia Europa.

A finales del siglo XIX y en la primera mitad del siglo XX, se produce la revolución industrial de los materiales cerámicos, debido a las importantes innovaciones implementadas en los procesos, como los hornos continuos y la invención del cono pirométrico, sistema que permitió comparar las temperaturas de los hornos cuando aún no existía algún tipo de medidor. Después surgió el vidrio de bajo coeficiente de dilatación, con la *electricidad* y la necesidad de materiales aislantes se producen materiales basados en mica esteatita y luego las porcelanas eléctricas. También se habla del desarrollo del "cemento portland", abrasivos como la alúmina, el carburo de silicio y los diamantes sintéticos.

Estos ejemplos ponen de manifiesto que el desarrollo de la humanidad no se cristalizaría sin el apoyo de la cerámica, sus materiales y productos, además de que tenemos a nuestros pies la materia prima para los futuros avances con la aplicación de procesos de transformación.

El colado en la industria de muebles de baño.

En el curso del tiempo numerosos sistemas de vaciado han sido desarrollados para auxiliar al vaciador, muchos de los cuales se han apoyado con yeso e inclusive en algunos casos aditivos para permitir un tiempo de vida mayor, sin embargo en ellos se puede presentar una saturación de agua lo que impide proseguir de manera inmediata con una nueva conformación de piezas.

Con la finalidad de incrementar la productividad, desde principio del siglo XX¹ se ha tenido como objetivo el desarrollar un molde con el cual fuese posible vaciar una pieza y después de un ligero acondicionamiento poder vaciar nuevamente otra pieza, y así sucesivamente sin necesidad de interrumpir la continuidad del ciclo productivo.

Como resultado de los esfuerzos encaminados en la creación de moldes hechos con nuevos materiales (yesos sintéticos, resinas microporosas, yesos con inserciones tubulares internas, etc.) en la actualidad es posible utilizar ciclos de colado múltiples a lo largo del día.

La dirección de la tecnología actual se enfoca hacia el uso de la aplicación de presión como medio para acelerar la formación de paredes de cuerpos cerámicos en un intervalo de tiempo menor al normal, así como lograr la rápida evacuación del agua absorbida por el molde, lo que resulta en el veloz secado del mismo²⁻⁴.

Las máquinas de vaciado de alta presión permitieron mejorar la productividad, dar flexibilidad al equipo de trabajo así como reducir el área de trabajo, por lo que los beneficios serán mayores a ciclos más cortos.

Para lograr lo anterior se requiere de un compromiso entre el tipo de molde a utilizar, las condiciones reológicas y la formulación de la barbotina cerámica empleada a ciertas condiciones de presión y de temperatura.

La aceptación de técnicas de medición de parámetros depende de la factibilidad del tiempo y la información que ésta aporte al proceso, así como los instrumentos y equipos de laboratorio con los que se cuente.

Uno de los parámetros que mejor reflejan el comportamiento de la velocidad de formación de la pared del cuerpo cerámico durante el colado es la permeabilidad, obedeciendo a la importancia de poseer una suspensión cerámica apropiada con ciclos cortos de colado.

Capítulo 1. Minerales Arcillosos.

Los materiales arcillosos son el producto de la disgregación parcial o total de las rocas ígneas por acción del agua y los agentes atmosféricos, la temperatura y la presión durante millones de años. El término arcilla no corresponde a una composición química o mineralógica definida, las arcillas son mezclas de diversas especies minerales según la composición de la roca matriz y el proceso sufrido por estar a la intemperie.

1.1. Caolines y Arcillas.

Las arcillas del tipo bola “ball clays” son las representativas en los procesos de producción, con origen en depósitos sedimentarios.

El término caolín “china clay” define a una arcilla con un elevado porcentaje de pureza cuyo principal mineral es la caolinita (mínimo 80%) y un bajo contenido de impurezas, en especial el óxido férrico.

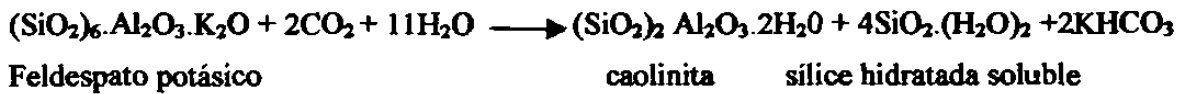
Los depósitos de caolín son de origen primario, o sea permanecen donde existió la roca madre y no han tenido transporte, mientras las arcillas han sido a veces transportados por medios acuosos o cualquier otro medio y las partículas más finas se han mezclado con materiales de origen orgánico vegetal y otros minerales.

La arcilla del tipo bola son variablemente descritas como azul, negras o rojas de acuerdo a su tonalidad, los colores azul y negro son ocasionados por la presencia de gran cantidad de materia orgánica, mientras que las de tono rojizo se deben a la presencia del óxido de fierro.

Los caolines son de color blanco o blanco-crema por el bajo contenido de carbón e impurezas en él, así como una menor cantidad de fierro.

1.1.1 Estructura Mineralógica de los caolines y arcillas.

Una reacción típica para la formación de caolinita es la siguiente:



Los caolines a diferencia de las arcillas, contienen caolinita de origen primario y en mayor cantidad, así pues con un alto grado de orden cristalino y una casi total ausencia de impurezas.

El elemento base está constituido en la asociación de una capa tetraédrica, formada por cuatro átomos de oxígeno (cada uno con dos cargas negativas) situados en los vértices de los ángulos y un átomo de silicio (con cuatro cargas positivas) ubicado en el centro, y una capa octaédrica formada por seis grupos OH que ocupan todos los vértices de la estructura y un catión (generalmente trivalente aunque también puede ser bivalente) en posición central como se muestra en la Figura 1.

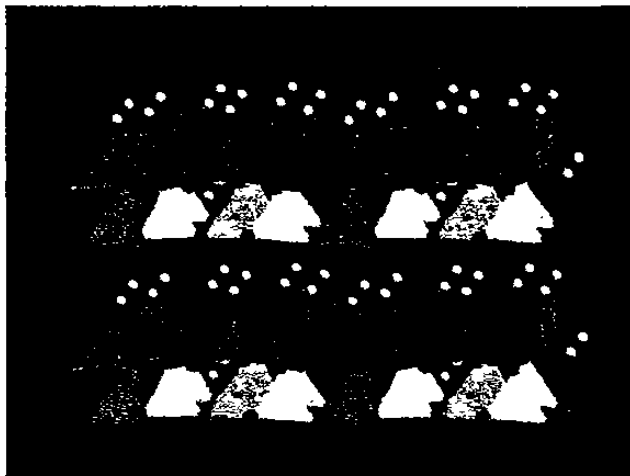


Figura 1. Estructura de la caolinita

La unidad tetraédrica presenta así cuatro cargas negativas no saturadas; aunque la octaédrica es negativa con tres (si el catión es trivalente) o cuatro (si es bivalente) cargas no saturadas.

En el elemento base caolínico las dos capas se ligan procediendo la sustitución de un oxidrilo OH⁻ de cada octaedro con la compartición del átomo de oxígeno, situado al vértice del tetraedro, que disponía de una carga libre. Este anión viene así compartido entre un tetraedro y dos octaedros en cuanto a cada grupo oxidrilo OH⁻ es enlazado por los cationes de un aluminio de dos octaedros contiguos.

Con este acoplamiento la estructura de la caolinita resulta eléctricamente neutra; ésta puede repetirse un elevado número de veces (en sentido vertical) conservando la misma distancia entre los planos iguales y próximos.

En esta rigidez estructural se explica la no expandibilidad del retículo a pesar de que las fuerzas que mantienen la estructura son débiles (Van der Waals y puente de hidrógeno).

1.2. Feldespato.

Los yacimientos de los feldespatos son de origen ígneo (o sea el resultado de la consolidación de los fluidos magmáticos) comúnmente también existen depósitos parcialmente de origen sedimentario.

Los feldespatos son silicoaluminatos, los minerales más comunes que forman las rocas de la corteza terrestre (60%) que están constituidos además por sodio, potasio y calcio los cuales pueden sustituirse mutuamente en diversas proporciones.

La fórmula general de los feldespatos es la siguiente:



donde:

X está generalmente constituido por Na⁺, K⁺, Ca²⁺.

Y representa casi siempre al Al^{3+} , Si^{4+} , aunque a veces está parcialmente sustituido por Fe^{3+} .

Para la industria cerámica interesan los feldespatos alcalinos como el de potasio (ortoclasa, microclinio), el de sodio (albita). Los feldespatos cálcicos (anortita) por lo común contienen mineral de hierro que suelen ser una impureza indeseable.

La presencia de álcalis hace que el punto de fusión sea mucho más bajo que el de la sílice y de la alúmina puras y, de hecho cumplen la función de fundentes y de introductores de álcalis en la mezcla cerámica.

1.2.1 Estructura Mineralógica del Feldespato.

En la naturaleza están presentes como soluciones sólidas de los diferentes tipos de feldespatos.

La estructura base del feldespato es un anillo formado por cuatro grupos tetraédricos como se observa en la Figura 2, en el caso de la ortoclasa (feldespato de potasio) y la albita (feldespato de sodio) son tres tetraedros de silicio y uno de aluminio mientras que en la anortita (feldespato de calcio) los cuatros grupos tetraédricos son la mitad de silicio y la otra mitad de aluminio.

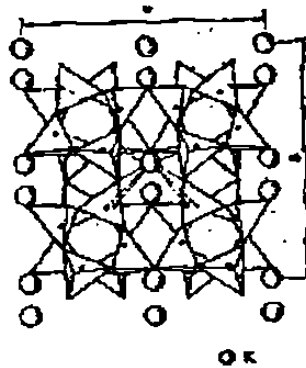


Figura 2. Estructura del feldespato.

1.3. Sílice

Su nombre proviene del latín “Silex” que significa piedra dura, es muy abundante en la naturaleza, es un componente fundamental en la porcelana vidriada por su blancura y especialmente en la cocción, durante la fase de ablandamiento impide la deformación de la masa cerámica.

1.3.1. Estructura Mineralógica de la Sílice.

La Sílice es el dióxido de silicio (SiO_2).

La estructura base de la sílice está formada de un tetraedro que tiene en los vértices los aniones de oxígeno y en el centro el átomo de silicio, de manera que un sólo tetraedro posee cuatro cargas negativas.

La sílice se presenta bajo tres formas cristalinas: cuarzo (la forma más estable a baja temperatura), tridimita y cristobalita, además una amorfa vítrea. Cada especie fundamental presenta la variedad que resulta estable entre determinados intervalos de temperatura.

1.4. Aditivos.

Es necesario hacer mención de los aditivos que sin ser materiales arcillosos contribuyen en la correcta integración de los materiales en las suspensiones cerámicas, como los agentes surfactantes (cuyo principal representante es el silicato de sodio) y algunas sales solubles catiónicas monovalentes (Na_2CO_3) que sirven para dispersar la suspensión cerámica, así como algunos otros añadidos para disminuir contaminaciones presentes en los materiales, como es el caso de BaCO_3 , que disminuye la presencia de sulfatos.

Capítulo 2. Filtroprensado.

La mezcla de los materiales arcillosos se realiza en húmedo para obtener la máxima homogeneidad en la composición, en la distribución de las partículas, de las cuales dependen las características deseadas del producto final, así como para el transporte de materia prima y el proceso de conformado de cuerpos cerámicos.

La barbotina y/o pasta cerámica es el nombre que se le da a la mezcla de los materiales arcillosos con agua, los sistemas de la materia prima son heterogéneos, por lo que cada material según su composición química y mineralógica interactuará de una manera particular con el agua. Por ejemplo, las diferentes arcillas se hidratan en distinto grado y con distinta cinética, en tanto el cuarzo y el feldespato reaccionan mucho menos.

Por lo anterior es muy importante la relación de sólidos y líquido de la mezcla, de acuerdo a las necesidades en las diferentes etapas de los procesos, por si se requiere que el material fluya o manifieste una mayor resistencia al flujo, así como características que los materiales por su naturaleza presentan.

2.1. Viscosidad.

La propiedad física que caracteriza la resistencia al flujo de los fluidos es la viscosidad⁵, sin embargo en el caso de las pastas cerámicas esto no es directo ya que la estabilidad de la barbotina cerámica se basa en la interacción de las partículas coloidales de la suspensión con el agua.

El grado de ordenamiento y la separación entre las partículas dependen de la cantidad de agua presente, de lo cual se dice que entre mayor sea la separación existente entre las partículas la viscosidad resultará menor.

2.2. Gravedad Específica.

La importancia de la relación entre sólidos y líquido que constituyen a la barbotina y uno de los principales factores que afectan la viscosidad recae en la cantidad de masa por la unidad de volumen de la suspensión acuosa, la cual es definida como gravedad específica.

La defloculación de una barbotina por medio de electrolitos permiten lograr la condición de estabilidad y fluidez necesaria en una pasta cerámica con un contenido mínimo de agua.

2.3. Tixotropía.

Es evidente que cuando una suspensión de ciertas arcillas contenga electrolitos, el sistema parece permanecer y tener muchas de las características de un gel. Este estado puede eliminarse mediante agitación o mezclado vigoroso del material por lo que el flujo de un líquido libre sol se restablece, lo cual puede traducirse en una disminución de la viscosidad al ser aplicado un esfuerzo cortante. Si la influencia de la agitación se elimina y aparece nuevamente la gelación, este fenómeno se conoce como tixotropía.

Cuando se presenta la gelación de la forma tixotrópica puede existir o no cambio de volumen sin embargo, el movimiento Browniano se detiene aún cuando el tamaño de la partícula es pequeño.

La tixotropía se considera como el estado medio de la coagulación, la adición a un sistema tixotrópico de un exceso de electrolitos causa más población de cationes en la micela coloidal y por ende una floculación.

2.4. Fundamentos de filtro-prensado.

La filtración se desarrolló como un arte práctico más que como ciencia, pero al paso del tiempo se ha refinado y se usa como información valiosa para interpretar análisis de laboratorio, buscar las condiciones óptimas de filtración y predecir los efectos de los cambios en las condiciones operacionales.

Al pasar una suspensión a través de un equipo de filtración da como resultado la formación de una capa o torta, “cake”, de partículas sólidas sobre la superficie de un cuerpo poroso, que pueden ser una tela o una resina plástica microporosa que forman el medio de filtración.

Una vez formada esta capa, su superficie actúa como medio del filtro, de modo que los sólidos se depositan y se agregan al espesor de la torta, mientras que el licor pasa por ella. Por lo que la torta se compone de una masa a granel de partículas de formas irregulares, por entre las cuales corren canales pequeños. El flujo del licor es siempre aerodinámico.

2.5. Analogía de Filtro-prensado y vaciado a presión.

El proceso de vaciado a presión es directamente comparable con el filtro-prensado, con una diferencia básica, la cual consiste en que el medio filtrante en la máquina de vaciado a presión debe tener la forma del producto final.

La remoción de agua por medio de filtración involucra la exposición de la pasta cerámica a un material poroso, el cual selectivamente permite que el fluido del medio penetre a través de él mismo, mientras las partes sólidas son retenidas. Por lo tanto, el tamaño del poro del material debe ser más pequeño que el de las partículas a ser removidas, pero para alcanzar una mayor eficiencia, el área total del poro expuesta a la suspensión debe ser lo más grande posible.

La velocidad de eliminación de agua a través de la capa filtrada es entonces un factor importante.

Debido a que la formación del cuerpo sobre un molde poroso es una operación similar a la de filtrado, se puede establecer la ecuación de Darcy⁶ (ver apéndice 1) como la que rige la ley del medio de filtración.

2.6. Permeabilidad.

La permeabilidad se define como la facilidad con la cual una sustancia permite a un fluido pasar a través de ella y es medido por la velocidad a la cual el agua, aire y otros gases fluyen a través de una masa por unidad de área, unidad de espesor y unidad de presión.

La permeabilidad es debida a los poros, espacios intersticiales y grietas las cuales se desplazan completamente a través del material o están conectados con otros formando una serie que se extiende a través de él.

El fluido que llena, sella o encierra los poros sin pasar a través de ellos, no es incluido en las mediciones de la permeabilidad.

La permeabilidad (**P**) es expresada mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V_s^2 \eta P}{S^2 t} \quad (14)$$

donde:

η = Viscosidad del agua.

t = tiempo.

V_s = Volumen del sólido depositado.

S = Area de flujo transversal.

P = Presión diferencial.

P = Permeabilidad.

Para ser un material completamente impermeable, este debe ser muy compacto y cerrado en textura a cualquier diferencia de presión a la que se exponga su superficie.

La permeabilidad de un artículo depende de:

El espesor.

El tipo, número y distribución de tamaño de partícula y de poros.

La presencia o ausencia de grietas y fisuras.

La diferencia en presión en los lados opuestos

La naturaleza del fluido penetrante.

La temperatura de la suspensión.

La permeabilidad difiere grandemente de la porosidad debido a que la última se mide por el volumen total de los poros, mientras que la permeabilidad depende de la extensión en que una masa penetra a través de ellos. Por ejemplo, un ladrillo esmaltado tiene alta porosidad, pero en uso no será permeable cuando esté completamente esmaltado, es decir, la permeabilidad depende mayormente del número de canales o poros conectados, los cuales permiten que un fluido se transporte a través del artículo o pieza probada.

Es importante señalar que la formación del espesor de un cuerpo en un sistema de filtración o vaciado a alta presión es dependiente de que tan permeable es ese material por lo que entre más alta se encuentre la permeabilidad más pronto se podrá formar dicho producto. Por lo anterior resulta evidente que este estudio tratará de encontrar los valores de permeabilidad mayores, buscando un menor ciclo del proceso en el conformado.

Capítulo 3. Parte Experimental.

Para este estudio se separaron 50 Kgs. de cada una de las materias primas utilizadas para garantizar que cada una de las mediciones y/o experimentos realizados fueran efectuados sobre materiales con las mismas características.

Esta investigación consta de dos etapas:

En la primera etapa se prueban diferentes formulaciones de barbotina manteniendo constantes las condiciones reológicas como la viscosidad, gravedad específica y tixotropía midiéndose la permeabilidad a cada barbotina.

En la segunda etapa se selecciona la fórmula con permeabilidad más elevada de la etapa 1 y se experimenta a diferentes condiciones reológicas de tixotropía y de gravedad específica.

3.1. Preparación de Barbotina.

Durante el desarrollo de las pruebas se preparará 2 kilogramos de pasta cerámica para cada fórmula.

En un recipiente con la ayuda de un agitador se dispersan los materiales siguientes:

1. Para la preparación de una pasta cerámica, que conformará el cuerpo de un mueble sanitario, se empieza agregando al agua una pequeña cantidad de silicato de sodio la cual debe ser menor al 0.1% p/p en base seca, ya que las concentraciones de los sólidos presentes (71.4%-73.8% p/p) para dicho fin son altas y requieren del uso de aditivos.
2. Posteriormente se agregan los materiales plásticos.
3. Se añaden lentamente las arcillas bola "ball clays" las cuales se usarán en este estudio en la presentación semi-seca, aeroflotada y con la ayuda del agitador se dispersan en el agua con aditivos.

4. Posteriormente se agrega el caolín o “China Clay” el cual se puede utilizar con la misma presentación semi-seca, aeroflotada o a granel, siendo agitadas a su vez.
5. Los materiales no-plásticos (silice y feldespato) finalmente son agregados y dispersados.
6. La relación de los materiales plásticos con respecto al total (base seca) oscila de un 48 a un 52% p/p y el resto es material no-plástico.

3.2. Determinación de Viscosidad y Tixotropía en el Viscosímetro Gallenkamp®.

El objetivo de estas mediciones es el conocimiento de las condiciones básicas dentro de los parámetros que rigen la formación de pared de los cuerpos cerámicos y que a la postre sirvan para evaluar los ajustes con defloculantes para el establecimiento de la condición final de la barbotina.

El Viscosímetro Gallenkamp es uno de los instrumentos usados para medir la viscosidad dado que se tiene dos cilindros, uno estático (recipiente con barbotina) y otro con capacidad de rotación que se encuentra conectado a un indicador que proyectará la resistencia al movimiento del material contenido en el recipiente estático, cuando el cilindro rotatorio aplique un esfuerzo cortante.

Para la determinación de la viscosidad se inicia agitando la muestra a 500 rpm por espacio de 3 minutos, la agitación adoptada se puede considerar tipo laminar (el número de Reynolds es menor a 7000, en estos casos se tiene $Re \approx 1300$, considerando la viscosidad puntual) para evitar que por medio de movimiento turbulento entre aire y modifique los resultados del estudio.

Se colocan 130 a 145 ml de pasta en un vaso de precipitado 150 ml, se coloca el vaso de precipitado en el Gallenkamp® y se libera el cilindro, el cual se detendrá una vez que la viscosidad presente una resistencia que detiene al cilindro.

El cilindro está conectado a un indicador que también gira y que muestra los grados de sobre giro de una revolución y la cual reporta el ángulo en el cual se detiene el aparato. Existen correlaciones entre el grado de sobregiro y centipoises (ver apéndice 2 donde se muestra la gráfica para el alambre calibre 36 y el diámetro 11/16” utilizados en este estudio). Esta primera lectura considerada a tiempo cero reporta el valor de la viscosidad.

Una segunda lectura es reportada a los 6 minutos, pero al transcurrir 5 minutos después de la segunda lectura, se elimina la nata que se genere en la superficie del vaso.

La diferencia de la lectura de los grados de sobre giro entre la primera lectura (tiempo cero) y la segunda lectura (6 minutos) es lo que se denomina BU (que proviene de “build up”, que quiere decir construcción de pared) y es una manera de representar la tixotropía, para modificar las lecturas se agrega silicato de sodio y/o agua.

3.3. Determinación de Densidad Real de los Sólidos.

Esta determinación está basada en el método estándar de pruebas para la densidad de materiales cerámicos sólidos, según se describe en la prueba de ASTM C329-88⁹ (ver apéndice 3) y este valor se utiliza para determinar el porcentaje de sólidos presentes en la barbotina y el ajuste en la gravedad específica de la suspensión cerámica.

3.4. Determinación de la Gravedad Específica.

La parte inicial del acondicionamiento de la barbotina una vez que se tiene preparada, consiste en el ajuste de la gravedad específica de la barbotina, por lo que se requiere de una balanza electrónica de precisión y el uso de un picnómetro.

Generalmente se hace uso de un picnómetro de aproximadamente 100 cm³ de capacidad, al cual se le agrega la barbotina y con el conocimiento previo de la tara del picnómetro seco, se procede a efectuar el pesaje de la barbotina.

Una vez obtenido la masa y con conocimiento del volumen exacto del picnómetro se realiza la siguiente operación:

Gravedad Específica = masa de la barbotina/ volumen del picnómetro.

Mediante los valores y ecuaciones reportadas en el Apéndice 3 se obtienen los porcentajes de los sólidos presentes y cantidades de agua o sólido a añadir para corregir la gravedad específica de la suspensión (ver apéndice 4).

3.5. Determinación de Permeabilidad.

Una vez que se tiene ajustada la barbotina en gravedad específica, viscosidad y tixotropía se procede a tomar 250 ml. de la pasta en el cilindro del filtro Baroid (mostrado en la figura 1) que previamente ha sido ensamblado con la malla, el papel filtro tarado y sus empaques.

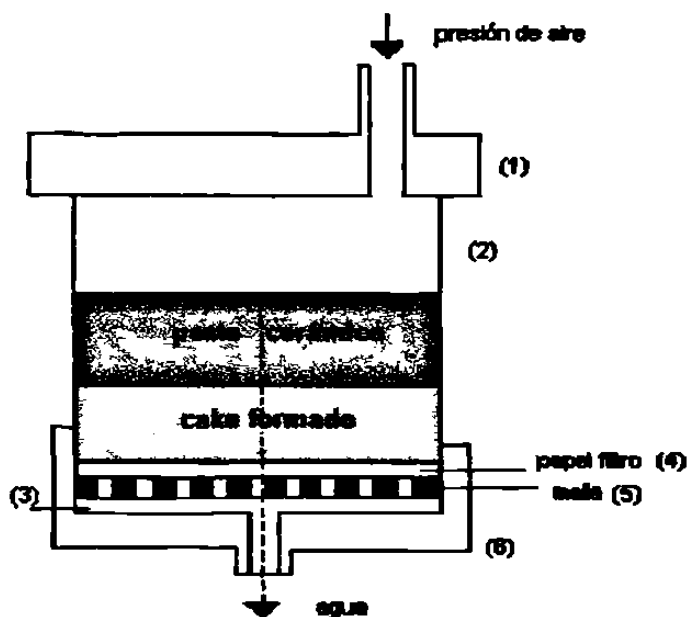


Figura 3. Filtro Baroid en funcionamiento.

El filtro Baroid mostrado en la Figura No. 4 cuenta con los siguientes componentes:

1. Tapa superior con adaptador para conexión de suministro de aire a presión.
2. Cuerpo cilíndrico contenedor.
3. Empaque plano para tapas superior e inferior.
4. Papel filtro.
5. Malla soporte del papel filtro.
6. Tapa inferior con salida para el líquido drenado.

La obtención del volumen fijado se realiza pesando la barbotina que corresponde al producto de la gravedad específica por 250 ml de la barbotina. Posteriormente se monta el cilindro en su soporte colocando un recipiente tarado en la parte inferior de la base, este cilindro se conecta por su tapa a la alimentación de presión de aire. Posteriormente se aplica una presión de 70 psi por un espacio de 10 minutos.

Al transcurrir ese lapso de tiempo se despresuriza y se remueve la tapa superior, inmediatamente se drena la pasta líquida excedente del cilindro en un tiempo de 5 minutos. Una vez que se ha drenado la barbotina se desarma el cilindro extrayendo el cake o sólido depositado, el cual se pesa, así como al papel filtro húmedo. El líquido encontrado en el recipiente debajo de la base es pesado y registrado su valor. Se procede a obtener la permeabilidad mediante el uso de las ecuaciones del Apéndice 7.

3.6. Técnicas Auxiliares.

Algunos parámetros de este estudio se realizaron con la ayuda de equipos que describen el tamaño del conjunto de las partículas que conforman la barbotina cerámica así como su compatibilidad en las posteriores etapas del proceso.

3.6.1. Determinación Distribución de Tamaño de Partícula (DTP).

La distribución del tamaño de partícula se realizó en el analizador Sedigraph 5100, el cual está constituido de un carrusel donde la muestra a analizar se dispersa en agua y más tarde provee de ésta al analizador.

El principio de este equipo se basa en sedimentación para determinar los tamaños de los diámetros de las partículas, para lo cual se considera que las partículas son esféricas y se mide el tiempo en que se desplazan de manera descendente, con una densidad real del sólido conocida.

En la práctica, esto consiste en colocar 9 g de la barbotina en 100 ml de agua, posteriormente el material es suspendido y dispersado por agitación mecánica y ultrasonido durante 5 minutos, después la suspensión se envía al Sedigraph 5100 y se analiza.

3.6.2. Determinación de Coeficiente de Dilatación Térmica (CDT) de la pasta y el esmalte.

Una parte importante de cualquier barbotina cerámica es que su uso sea compatible con el esmalte que cubre al cuerpo cerámico, para tal efecto se mide el CDT de ambos materiales en un dilatómetro ORTON.

Es necesario evitar que la cubierta vitrificada quede a tensión ya que esto debilitaría al material exponiéndolo a un posible agrietamiento en el esmalte denominado craquelado.

El procedimiento para la preparación de muestras es el siguiente:

1. La muestra de pasta o esmalte se hace vaciando en una cavidad para dar forma a una pequeña barra cuadrada de 25 mm de longitud y 8 mm de cada lado de la base.
2. Posteriormente se quema por el horno (ver apéndice 6) y una vez obtenida se somete al equipo de determinación del CDT.

Como regla práctica se considera que la barbotina debe presentar un valor mayor al esmalte de 5×10^{-7} a $8 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Capítulo 4. Resultados.

4.1 Caracterización de Materias Primas:

En esta investigación se consideraron 3 arcillas del tipo bola o "ball clay", 3 caolines o "China clay", un feldespato y una arena de Sílice a las cuales se les asigna la siguiente nomenclatura:

Arcilla 1 ó A1; Arcilla 2 ó A2; Arcilla 3 ó A3; Caolín 1 ó C1; Caolín 2 ó C2; Caolín 3 ó C3; Feldespato o F y Sílice o S.

Los resultados de los análisis químicos típicos de las materias primas fueron proporcionados por el proveedor de ellas y se muestran a continuación en la tabla 1.

	A1	A2	A3	C1	C2	C3	F	S
SiO ₂	57.80	64.4	61.00	45.1	45.10	50.80	68.57	97.50
Al ₂ O ₃	26.60	22.6	24.54	38.8	38.50	33.40	18.13	1.40
Fe ₂ O ₃	1.30	1.1	0.98	0.4	0.30	0.35	0.27	0.15
CaO	0.20	0.2	0.09	0.1	0.02	0.01	0.40	0.10
MgO	0.50	0.4	0.12	0.1	0.02	0.01	0.01	0.02
Na ₂ O	0.20	0.2	0.38	0.1	0.02	0.01	6.43	0.30
K ₂ O	1.20	1.6	1.69	0.1	0.13	0.07	5.64	0.29
TiO ₂	1.60	1.4	1.29	1.6	1.74	1.00	0.07	0.05
PPI	11.10	8.5	9.74	13.6	13.50	12.40	0.18	0.40
Carbón	1.55	0.87	3.20	0	0	0	0	0

Las arcillas del tipo bola son las únicas que contienen carbón, por otro lado se puede verificar que los caolines son los materiales que tienen más pérdidas por calcinación en su mayoría debido al agua de la que se constituyen.

El feldespato por una parte ayuda en la fusión durante la sinterización gracias al contenido rico en óxidos de sodio y potasio.

La distribución de tamaño de partícula de los materiales se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución de tamaño de partícula de las materias primas.								
Diámetro esférico equivalente (μm)	% Acumulativo más fino de la fórmula para el diámetro esférico equivalente correspondiente							
	Materiales plásticos						Materiales no plásticos	
	A1	A2	A3	C1	C2	C3	F	S
10	91.2	82.1	83.3	86.3	87.0	86.7	30.9	36.6
8	89.1	77.4	79.0	83.3	83.4	84.2	25.4	30.5
6	85.1	71.2	72.5	78.7	78.4	80.8	19.4	24.1
5	82.1	66.8	67.8	75.1	74.5	78.5	16.4	20.5
4	77.8	61.4	62.8	70.2	69.7	75.5	13.3	16.3
3	72.7	55.0	57.2	64.3	63.8	72.2	10.0	12.2
2	66.4	47.7	49.7	55.6	55.0	68.4	6.8	8.4
1.5	62.1	43.0	45.0	49.7	49.8	65.9	5.0	7.0
1	56	36.9	39.0	42.3	40.6	61.7	3.4	5.2

La distribución de tamaño de partículas presenta una diferencia notable para los materiales plásticos versus no plásticos ya que estos últimos presentan un valor pequeño en el % acumulativo más fino de la fórmula para el diámetro esférico equivalente a $1\mu\text{m}$, es decir son los materiales más gruesos. En tanto las A2, A3, C1 y C2 presentan los valores más cercanos entre sí. El C3 y A1 presentan los valores mayores, es decir, son los materiales más finos.

4.2. Caracterización de las Fórmulas.

Se probaron fórmulas que cumplieran con un requisito que estipula la Norma Oficial Mexicana NOM-009-CNA-2001, INODOROS PARA USO SANITARIO ESPECIFICACIONES Y PRUEBAS (ya que en estos sería el campo de aplicación del estudio) que considera que el porcentaje de absorción de agua deberá ser menor de 0.5% ver apéndice 5. Las fórmulas se quemaron en un horno de producción para la validación de este punto cuyo proceso pudiese describirse de la siguiente manera:

El doblaje de un cono pirométrico No. 9 elaborado por The Edward Orton Jr. Ceramic Foundation. Una vez ya quemado a través del horno debe estar en un rango de 3 a 6 h según el tradicional sistema del reloj de manecillas. Se adjunta en el Apéndice 6 la curva del horno de quemado por donde se evaluó dicha característica.

Las fórmulas fueron las siguientes:

Fórmula	% de Materiales								Total
	A1	A2	A3	C1	C2	C3	F	S	
F1	11.2	12.6	5.2	22.4	0.0	0.0	35.4	13.2	100
F2	14.4	14.4	0.0	0.0	22.8	0.0	36.1	12.3	100
F3	15.2	8.6	5.0	22.8	0.0	0.0	36.1	12.3	100
F4	11.9	11.9	5.0	22.8	0.0	0.0	36.1	12.3	100
F5	26.0	0.0	3.5	22.0	0.0	0.0	36.5	12.0	100
F6	15.2	8.6	5.0	11.4	0.0	11.4	36.1	12.3	100
F7	15.2	8.6	5.0	0.0	0.0	22.8	36.1	12.3	100

En la Tabla 3 se puede observar una columna compuesta por las distintas fórmulas probadas y en las columnas adyacentes los materiales que formaron parte de cada una de las fórmulas.

Se consideró mantener los valores en la relación entre plásticos y no plásticos casi constante en las distintas fórmulas ya que esto permite mantener en igual medida la relación de SiO₂ y Al₂O₃ para evitar presentar desviación en la absorción de agua antes mencionada y cumplir con el requisito de norma a la condición de quemado de este estudio.

En la Tabla 4. Se calcula la composición química teórica de las fórmulas a partir de los datos típicos de la Tabla 1 y en ella se puede apreciar la relación de SiO₂ y Al₂O₃ antes comentado.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
SiO ₂	65	64.6	64.43	64.6	63.8	65.1	65.72
Al ₂ O ₃	22.4	22.6	22.77	22.6	23.1	22.2	21.54
Fe ₂ O ₃	0.54	0.53	0.548	0.54	0.58	0.54	0.536
CaO	0.23	0.22	0.232	0.23	0.24	0.22	0.211
MgO	0.14	0.14	0.145	0.14	0.16	0.13	0.125
Na ₂ O	2.4	2.42	2.448	2.45	2.47	2.44	2.427
K ₂ O	2.48	2.5	2.499	2.51	2.49	2.49	2.492
TiO ₂	0.81	0.86	0.824	0.82	0.84	0.76	0.687
PPI	5.98	6.10	6.118	6.03	6.33	5.98	5.843
Total	100	99.9	100	100	100	99.8	99.57
Carbón	0.45	0.35	0.47	0.45	0.52	0.47	0.47

Esta tabla se construyó con la información del análisis de materias primas y el % de cada materia prima de la que se componen cada fórmula.

En la Tabla 5 Se muestra la distribución de tamaño de partícula de las fórmulas:

Tabla 5. Distribución de tamaño de partícula de las fórmulas							
	FÓRMULAS						
Diámetro esférico equivalente (μm)	% Acumulativo más fino de la fórmula para el diámetro esférico equivalente correspondiente						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
10	58.9	61	60.7	63	60.3	59.9	62.5
8	55	56.4	55.9	58.4	56.2	56.1	58.4
6	50.3	50.7	50.5	52.8	50.9	51.3	53.3
5	47.2	47	47.4	49.2	47.7	48	50.2
4	43.1	43	43.5	44.9	44	44	46
3	38.4	38.8	39	40.3	40	39.9	41.2
2	33	33.7	34	35.2	35.5	35.5	36.5
1.5	30.4	30.3	30.7	32.4	32.9	32.7	33.7
1	26.3	26.5	26.8	28	29	29.2	29.8

De dicha tabla se puede apreciar que la distribución de tamaño de partícula de las fórmulas tiende a ser más fina conforme se avanza hacia la derecha por lo que es más gruesa la F1 con respecto a F2; F2 es más gruesa que F3 y así sucesivamente es decir; $F1 > F2 > F3 > F4 > F5 > F6 > F7$ en tamaño de partícula lo cual se puede apreciar en la Figura No. 2.

Es importante señalar que se consideraron los valores del porcentaje acumulativo de partículas correspondientes a diámetros esféricos equivalente desde 10 micras hasta 1 micra ya que se consideran los parámetros que más influyen sobre la distribución del tamaño de partícula.

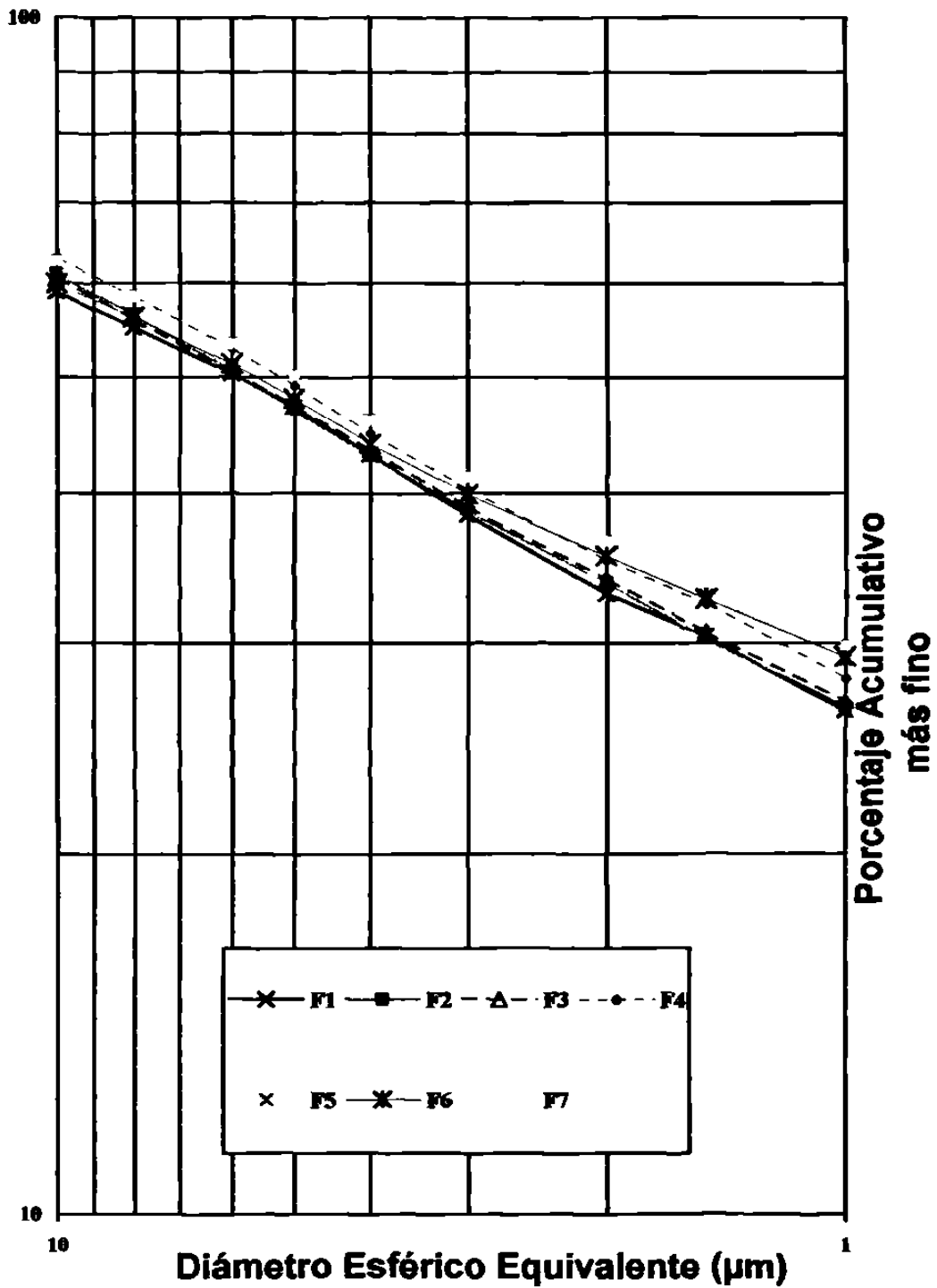


Figura No. 4. Distribución de Tamaño de Partícula de las Fórmulas

En la Figura No. 4 se aprecia que las fórmulas más gruesas son las que se presentan en la parte inferior siendo éstas F1, F2 y F3, la de tamaño medio sería F4, y las más finas F5, F6 y F7.

La Tabla 6 presenta el % de absorción de agua de las fórmulas una vez quemada:

Tabla 6. Porcentaje de absorción de agua de las fórmulas	
Fórmula	% de Absorción
F1	0.25
F2	0.27
F3	0.31
F4	0.24
F5	0.18
F6	0.19
F7	0.08

En lo que respecta a los valores de absorción de agua todas las fórmulas se encuentra dentro del rango permitido de absorción para un cuerpo cerámico con aplicación a inodoros.

4.3. Permeabilidad de las Fórmulas.

A estas fórmulas se les determinó la permeabilidad (ver apéndice 7) que se muestra en la Tabla 7, dicha determinación se evaluó para las siguientes condiciones de ajuste de la suspensión:

Densidad : 1.82 g/cm³ .

Tixotropía de 80 a 85 ° de BU.

Viscosidad o primera lectura de Gallenkamp® de 260 a 265°; es decir, 420 a 400 cps.

Tabla 7 Permeabilidad de las fórmulas.	
Fórmula	Permeabilidad (1x10 ⁻¹⁴ cm ²)
F1	18.0 ± 3%
F2	17.35 ± 3%
F3	16.99 ± 3%
F4	15.65 ± 3%
F5	13.16 ± 3%
F6	11.93 ± 3%
F7	11.3 ± 3%

La permeabilidad resultó más alta para F1, posteriormente F2 y así sucesivamente, es decir:

La permeabilidad F1>F2>F3>F4>F5>F6>F7 presenta una relación similar que la observada en la distribución de tamaño de partícula en donde las fórmulas con partículas más gruesas son primero F1, luego F2, así sucesivamente es decir; F1>F2>F3>F4>F5>F6>F7. Por esta relación anterior se puede decir que la relación entre la permeabilidad es directamente proporcional a la DTP de las fórmulas.

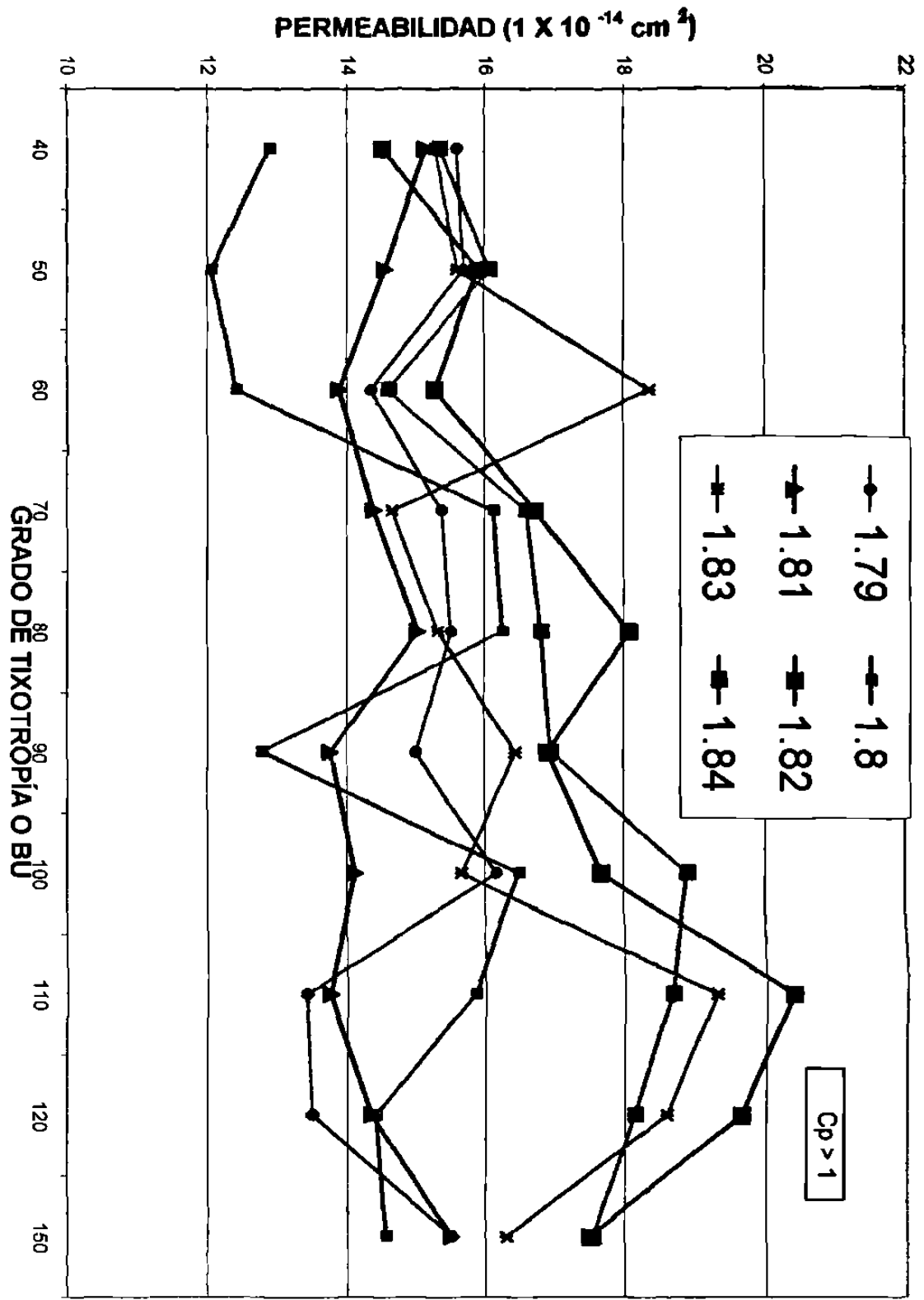
4.4. Estudio de la permeabilidad de F1 a diferentes condiciones reológicas.

En la Tabla 8 se muestran las diferentes permeabilidades a diferentes condiciones de densidad y tixotropía utilizando un rango de primera lectura de Gallenkamp® de 265 a 260° equivalente a 400-420 cps.

Tabla 8. Permeabilidad de F1 ($1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$) a diferentes condiciones de densidad y BU										
ρ g/cm³	Grado de Tixotropía o BU (Gallenkamp®)									
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
1.79	15.59	15.7	14.34	15.38	15.51	14.99	16.16	13.41	13.50	15.51
1.80	12.89	12.06	12.42	16.12	16.26	12.78	16.48	15.85	14.41	14.55
1.81	15.14	14.55	13.88	14.39	15.02	13.76	14.12	13.75	14.35	15.50
1.82	14.51	15.90	15.28	16.73	18.07	16.91	17.68	20.38	19.65	17.50
1.83	15.29	15.60	18.37	14.66	15.32	16.44	15.66	19.30	18.60	16.30
1.84	15.35	16.07	14.59	16.59	16.81	16.95	18.90	18.67	18.14	17.54

En el Figura No. 5 se presenta la permeabilidad con sus diferentes familias de curvas para cada densidad ver gráfico a continuación.

FIGURA No. 5 GRÁFICA DE FAMILIA DE CURVAS DE PERMEABILIDAD DE F1 PARA DIFERENTES CONDICIONES DE DENSIDAD Y BU



Como se puede apreciar en la Figura No. 5, F1 presentó permeabilidad con valores mayores en las familias de curvas de densidad más alta es decir, 1.82, 1.83 y 1.84 g/cm³.

Mientras en las familias de curvas de densidad menor es decir 1.80, 1.81 y 1.79 g/cm³ se encontraron los valores menores de permeabilidad. El valor más alto de permeabilidad fue $20.38 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ y se encontró a una densidad de 1.82 g/cm³ y con un BU de 110°. El valor menor fue $12.06 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ para una densidad de 1.80 g/cm³ y un BU de 50°. Para una densidad 1.81 g/cm³ se encontraron valores similares de permeabilidad a diferentes rangos de BU. F1 reportó los valores más altos y se recomienda el trabajar a una densidad de 1.82 g/cm³ en un rango de BU de 110 a 120°.

4.5. Compatibilidad de F1 con un esmalte estándar de producción.

Para este propósito se determinó el CDT de F1 y se comparó con el de un esmalte blanco estándar de producción una vez que ambas muestras se quemaron a través del horno (Apéndice 5), los valores se reportan en la Tabla No. 9 (ver Apéndice No. 8)

Tabla 9 CDT de F1 y un esmalte de producción.	
Material	CDT (°C ⁻¹)
F1	67.4×10^{-7}
Esmalte blanco	62.1×10^{-7}

La diferencia entre ambos es de $5.3 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$ por lo que sí cumple con esta característica de compatibilidad y no presentará agrietamiento.

Capítulo 5. Discusión de Resultados.

La Tabla 1 muestra que el material F presenta la mayor cantidad de óxidos de cationes monovalentes llamados comúnmente fundentes.

Las materias primas A1 y C3 fueron las más finas de acuerdo a lo observado en la Tabla 2 véase como % acumulativo más fino para el diámetro esférico de 1 μm ; de aquí que las fórmulas propuestas en las que se use en mayor proporción estos materiales serán las de tamaño de partícula menor. (ver Tabla 5)

El tamaño de partícula menor contribuye a que las fórmulas F7, F5 y F6, presenten una menor absorción de agua como se observa en la Tabla 6.

Se buscó mantener la relación de SiO_2 y Al_2O_3 (ver Tabla 4) en las fórmulas para evitar desviaciones en la absorción de agua (ver Tabla 6), para el cono de quemado establecido.

La relación de SiO_2 y Al_2O_3 se mantuvo muy similar ya que la composición de las fórmulas conservó la relación de materiales plásticos y no plásticos en la composición de las fórmulas. (ver Tabla 3)

Como puede observarse en la Tabla 7 y en la Tabla 5 ó en la Figura No. 4 la permeabilidad y la DTP de las fórmulas presentan una relación directamente proporcional ya que las fórmulas con partículas más gruesas son las que presentaron una permeabilidad mayor.

La participación de A1 y C3 fueron factor importante para disminuir la permeabilidad de las fórmulas, ya que F5, F6 y F7 presentaban en mayor proporción estos materiales (ver Tabla 3) y es también en donde la permeabilidad fue menor. (ver Tabla 7)

Para la familia de curvas de F1 en sus densidades 1.82, 1.83 y 1.84 g/cm^3 (ver Figura No. 5) se aprecia en la gráfica una tendencia ascendente conforme se incrementa el BU, también se incrementan los valores de permeabilidad por lo que se puede decir que

existe una relación directamente proporcional entre el BU y la permeabilidad hasta un BU de 110 porque la barbotina una vez que tiende a ser gel hace que disminuya la permeabilidad. Con excepción de 1.81 y 1.79 g/cm³ que puede decirse que no presentaron tendencia apreciable.

El mejor valor de la permeabilidad se dio para una densidad de 1.82 g/cm³ a un BU de 110 en donde se encontró que fluyó bien la pasta y no llegó a tener la apariencia de ser un gel. Esto probablemente ayude a una formación de un cuerpo en donde no se sellen o se cierren los poros pero que si se encuentren comunicados y también permita el paso del agua con facilidad a través del cuerpo.

Los valores de más baja permeabilidad se dieron a baja densidad y con bajo BU por lo que también afecta a la formación de espesor que las partículas estén muy desfloculadas. (sin tendencia a formar un gel)

Capítulo 6.

Conclusiones.

- A) El tamaño de partícula de una barbotina presenta una relación directamente proporcional a la permeabilidad de la misma.
- B) En el estudio se encontró que entre las diferentes barbotinas a una misma condición de densidad y tixotropía las barbotinas más gruesas presentaron una mayor permeabilidad.
- C) Las barbotinas más permeables permitirán la formación de pared (espesor del cuerpo cerámico) en un menor tiempo para las pastas gruesas.
- D) F1 fue la barbotina más permeable al presentar un valor de $18.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ así como presentó DTP de materia más gruesa.
- E) F7 fue la pasta menos permeable, así como fue la pasta más fina principalmente por el alto contenido de materias primas finas que la componen, es decir; C3 y A1.
- F) F1 al ser ajustada a condiciones de densidad de 1.82 y 1.83 g/cm^3 presentaron los valores mayores de permeabilidad en el rango de 110 a 120 y a partir de 120 presentaron una caída de casi $2 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ de permeabilidad. Mientras que para la densidad de 1.84 g/cm^3 su valor mayor se presentó a un BU de 100° .
- G) F1 a una densidad de 1.81 g/cm^3 presentó valores muy similares a las diferentes condiciones de densidad y tixotropía.

- H) F1 presentó las permeabilidades más bajas a la densidad de 1.80 g/cm^3 para el rango de BU de 40 a 60° .
- I) F1 se recomienda trabajar a una densidad de 1.82 g/cm^3 con un rango de BU de 110 a 120° de tixotropía para alcanzar los valores mayores de permeabilidad (20.38 a $19.65 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$).
- J) El estudio de la aplicación de diferentes aditivos (sulfato de magnesio, cloruro de calcio anhidro entre otros) para revisar la influencia con la permeabilidad, se recomienda como trabajo a futuro.
- K) Considerando los altos costos por consumo de gas en el quemado los hornos se recomendar investigar fórmulas dirigidas a un menor cono pirométrico (The Edward Orton Jr. Ceramic Foundation) de quemado pudiendo ubicarse para un cono pirométrico 6 ó 7 en el doblaje antes mencionado.

REFERENCIAS.

1. Scharrer, Selb, "Pressure Casting in the Ceramic Industry", DK6 71 (1994) No. 4, p.p. 157-159.
2. Sacchiero, "The Netzsch system of medium Pressure casting for Sanitaryware", Tableware and Sanitaryware seminar, Octubre 1986., p.p. 7-10.
3. Thomson Ken, "Pressure Casting Sanitaryware"., Ceramic Process Technology 1996, p.p. 105-107.
4. Dorst., "Sistema Dorst-Laufen de moldeo a Presión en moldes de plástico para sanitarios y Vajillas", Técnica Cerámica No. 108 (1982), p.p. 938-939.
5. R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lighfoot, "Fenómenos de Transporte", Editorial Reverté, S. A., 1987
6. M. Vouillement, J.J. Blanc, M. Risse, "Bodies for Fast-Cycle Sanitaryware Production", Interceram Vol. 39, No. 1, 1990, Francia.
7. David Italiano, "Effect of deflocculant on Mold Aging", ACERS, Fall 1990, p.p.61-87.
8. D.N. Italiano, M. Dempsey, R.A. Haber, "Ceramic Casting Technology Program Plaster Mold Studies: Molds Improvements using alpha Plaster Additions", ACERS p.p. 128-158, Spring 1992.
9. Standard Test Method for Specific Gravity of Fired Ceramic Whiteware Materials C329-88, p.p. 91-92
10. Edward Blanchard, "Pressure Casting Improves Productivity". Netzsch Inc., Ceramic Bulletin , Vol. 67, No. 10, 1988
11. Frederick F. Lange y Kelly T. Miller, "Pressure Filtration: Consolidation Kinetics and Mechanics" Ceramic Bulletin, Vol. 66, No. 10, 1987.

APÉNDICES

Apéndice 1

Analogía entre el filtrado de un material y vaciado a presión de un cuerpo cerámico.

La ecuación de Darcy es usada para establecer la ley del medio de filtración, un proceso similar a la formación de cuerpos en vaciado de presión. En el caso de una presión de filtración constante, las pérdidas globales de presión están expresadas como una función de parámetros de filtración, a continuación se presenta el desarrollo de ecuaciones para el vaciado a presión.

$$\Delta p = (P_1 - P_2) + (P_2 - P_0) = \text{constante} \quad (1)$$

cuerpo medio

donde:

P_1 = presión final aplicada sobre el cuerpo.

P_2 = Presión externa ejercida sobre el sistema.

P_0 = Presión inicial sobre el medio filtrante únicamente cerrado.

En lo que respecta al cuerpo, la unidad instantánea de flujo en un tanque de vacío " U_e " (velocidad aproximada) en un momento dado para la capa formada " x " localizada en " e " deberá ser:

$$U_e = \frac{1}{\eta} \frac{S dP_f}{\alpha_e W_e dV} = \frac{1}{S} \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

donde:

η = Viscosidad dinámica.

S = Superficie de filtración.

dP_f = Caída de presión del filtrado.

α_e = Resistencia específica de la capa del cuerpo " x ".

W_e = Cuerpo seco depositado por unidad de volumen filtrado en " e ".

dV = Volumen de flujo filtrado.

Para el medio filtrante, la aplicación de la ley de Darcy da la siguiente ecuación:

$$U = \frac{P_2 - P_0}{\eta R_s} \quad (3)$$

donde

R_s = Resistencia del medio filtrante por unidad de superficie.

U = Flujo volumétrico por unidad de área del medio filtrante.

P_2 y P_0 = Presiones expresadas en la ecuación 1.

Debido a que la pasta es estable (ausencia de sedimentación) y los parámetros de S y η son constantes, en una filtración ideal α_e , W_e y U_e (cuerpos incompresibles) son constantes a través del espesor total del sólido depositado y esto puede expresarse sustituyendo en la ecuación (2) el diferencial de presión " dP_f " en el cuerpo de la ecuación (1) obteniéndose la siguiente ecuación:

$$P_1 - P_2 = \frac{\eta \alpha W}{S^2} \frac{dV}{dt} V \quad (4)$$

Para el sistema del medio filtrante al emplear la ecuación de Darcy (3), la diferencia de presión en dicho sistema se expresa como:

$$P_2 - P_0 = U \eta R_s \quad (5)$$

Sustituyendo en (5) el flujo volumétrico por unidad de área visto en la ecuación (2) se obtiene:

$$P_2 - P_0 = \frac{1}{S} \frac{dV}{dt} \eta R_s \quad (6)$$

Combinando las ecuaciones 4 y 6 como se sustenta en la ecuación 1 para los sistemas cuerpo y medio filtrante tenemos:

$$\Delta p = (P_2 - P_0) + (P_1 - P_2) = \frac{1}{S} \frac{dV}{dt} \eta R_s + \frac{\eta \alpha W}{S^2} \frac{dV}{dt} V \quad (7)$$

Despejando la ecuación 7 en función del tiempo obtenemos:

$$dt = \frac{\eta R_s}{\Delta p S} dV + \frac{\eta \alpha W}{\Delta p S^2} V dV \quad (8)$$

(en el futuro P sustituye a ΔP)

La integración de la ecuación (8) se expresa como:

$$t = \frac{\eta R_s V}{\Delta p S} + \frac{\eta \alpha W V^2}{2 \Delta p S^2} \quad (9)$$

Al despejar la ecuación (9) el volumen del filtrado puede ser expresado como una función del tiempo:

$$V = S \left(-\frac{R_s}{\alpha W} + \sqrt{\left(\frac{R_s}{\alpha W}\right)^2 + \frac{2P}{\eta \alpha W} t} \right) \quad (10)$$

En general, el valor de la resistencia del medio de filtración bajo una presión de vaciado es despreciable comparada a la duración de formación de lo depositado, como las pérdidas de presión están centradas en el cuerpo, se puede simplificar (10).

Para:

$$t \gg R_s$$

$$V = S \sqrt{\frac{2P}{\eta \alpha W} t} \quad (11)$$

Esta ecuación es aplicable para un sólido depositado compresible, siempre y cuando α se reemplace por $\bar{\alpha}$ la resistencia media específica como una función de la presión y use W

como un valor medio (válido hipotéticamente, siempre y cuando la porosidad del cuerpo varíe poco a través de su espesor.), la ecuación se transformaría en:

$$V_s = S \sqrt{\frac{2P}{\eta\alpha W} t} \quad (12)$$

De la ecuación (12) se expresa el volumen del sólido V_s depositado, de la cual se puede eliminar la función del área y se obtiene otra función que explique la relación del espesor del cuerpo “x” formado, la cual ha sido definida y comprobada por varios autores previamente ^{10, 11}

$$x = \sqrt{\frac{2Pt}{\eta\alpha W}} \quad (13)$$

De esto, el espesor del cuerpo en un tiempo dado es directamente proporcional a la presión de la pasta cerámica, es así que al aumentar la presión de la pasta cerámica, se incrementará la presión hidráulica en el molde.

$$V_s^2 = S^2 \frac{2P}{\eta\alpha W} (t) \quad (14)$$

$$\frac{V_s^2 \eta P}{S^2 t} = \frac{2}{\alpha W} \quad (15)$$

La permeabilidad (**P**) es expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{P} = \frac{V_s^2 \eta P}{S^2 t} \quad (16)$$

La permeabilidad (**P**) también se puede expresar como sigue ^{7,8}:

$$P = \frac{\eta \frac{dV}{dt} x}{SP} \quad (17)$$

donde:

η = Viscosidad del agua.

dV/dt = Flujo volumétrico.

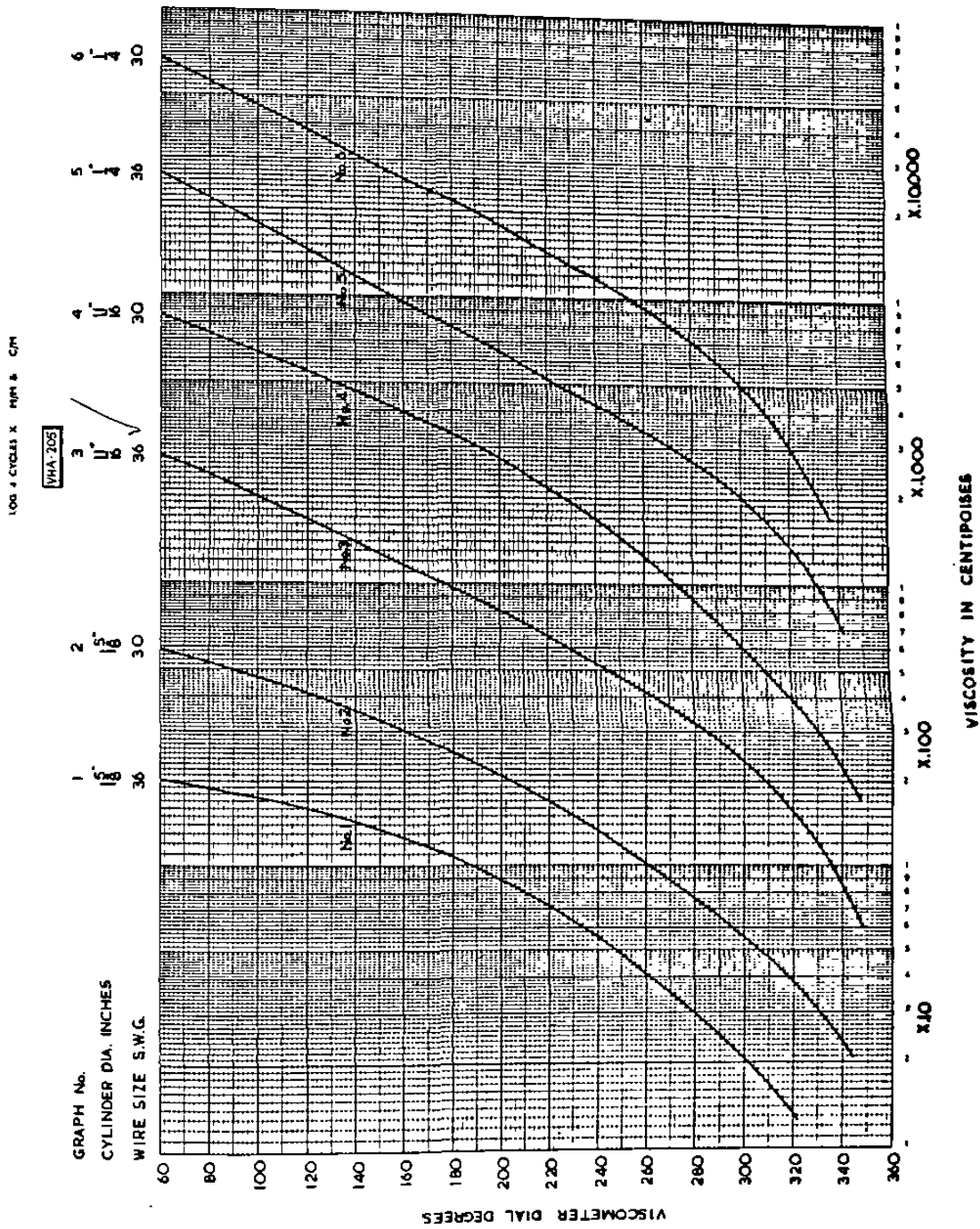
x = Espesor de la muestra.

S = Área de flujo.

P = Presión diferencial.

P = Permeabilidad.

Apéndice 2



VISCO 17 SURVEY GRAPH FIGURE 6

Figura 6. Gráfica de correlación de lecturas de Gallenkamp y Viscosidad en cps.

Apéndice 3

Metodología de la determinación de densidad real de los sólidos según la Norma ASTM C329-88.

Básicamente consiste en tomar un picnómetro de vidrio el cual se calienta de 105 a 110 °C hasta alcanzar peso constante. Se cierra el picnómetro con su tapa y se retira del secador, colocándose en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente y se registra el peso del picnómetro como "p".

Al picnómetro seco como se describe previamente se le agrega tolueno y se registra el peso como W_1 .

A su vez al picnómetro seco se agrega una muestra del cuerpo sólido seco entre 8 y 12 gr, posteriormente se registra el peso del picnómetro y del material como W .

Se agrega tolueno al picnómetro hasta la mitad del volumen del picnómetro y se remueve el aire atrapado mediante una agitación con una varilla de vidrio, posteriormente es retirada la varilla y se aplica presión de aire menor a 1 pulgada (25.4 mm) de Hg. (abs).

Por último se llena el picnómetro, y se remueve el exceso con la tapa, registrándose el peso del conjunto W_2 .

$$\text{Densidad del sólido} = d_1(W-p) / [(W_1-p)-(W_2-W)]$$

Donde:

d_1 = Densidad del tolueno (g/ml).

p = Peso del picnómetro tapado (g).

W = Peso del picnómetro tapado y con la muestra (g).

W_1 = Peso del picnómetro tapado con tolueno (g).

W_2 = Peso del picnómetro tapado con la muestra y el tolueno (g).

Lo anterior equivale a dividir la masa del sólido entre el volumen que ocupa el material..

El valor de la densidad de los sólidos contenidos en la barbotina obtenido para este trabajo se reporta en la tabla 10:

$$d_1 = 0.8616 \text{ gr/ml @ } 24 \text{ }^\circ\text{C}$$

Masa del Sólido (gr)	Volumen del picnómetro (cm ³)	Masa del Tolueno (gr)	Volumen de los sólidos (cm ³)	Densidad del sólido (gr/ cm ³)
9.9545	49.663	39.5892	3.8293	2.5995
10.1561	49.821	39.6608	3.9057	2.6003
10.0428	50.119	39.9475	3.8603	2.6015

La densidad promedio del sólido es de 2.6004 gr/cm³ y fue utilizado durante el desarrollo de este trabajo.

Apéndice 4

1. Metodología para determinar el contenido de sólidos y ajuste de gravedad específica de la pasta.

El desarrollo que se presenta a continuación tiene como objetivo el establecer una relación matemática entre el contenido de sólidos y la gravedad específica de la pasta, esto con la finalidad de realizar los ajustes a las gravedades específicas cuando esto sea necesario.

Relación entre el contenido de sólidos y la gravedad específica de la barbotina:

El concepto básico de densidad, es el siguiente:

$$\rho = \text{masa} / \text{volumen} \quad (1)$$

Para una suspensión acuosa:

$$\rho_{\text{sus}} = (m_{\text{sol}} + m_{\text{agua}}) / (v_{\text{sol}} + v_{\text{agua}}) \quad (2)$$

Sí se considera la densidad del agua como 1 gr/cm^3 , entonces:

$$\rho_{\text{sus}} = (m_{\text{sol}} + m_{\text{agua}}) / ((m_{\text{sol}} / \rho_{\text{sol}}) + m_{\text{agua}}) \quad (3)$$

$$\rho_{\text{sus}} (m_{\text{sol}} / \rho_{\text{sol}}) + \rho_{\text{sus}} (m_{\text{agua}}) = (m_{\text{sol}} + m_{\text{agua}}) = m_t \quad (4)$$

$$\rho_{\text{sus}} (m_{\text{sol}} / \rho_{\text{sol}}) + \rho_{\text{sus}} (m_t - m_{\text{sol}}) = m_t \quad (5)$$

$$(m_{\text{sol}} / \rho_{\text{sol}}) + m_t - m_{\text{sol}} = m_t / \rho_{\text{sus}} \quad (6)$$

$$m_{\text{sol}} (1/\rho_{\text{sol}} - 1) = m_t (1/\rho_{\text{sus}} - 1) \quad (7)$$

$$m_{\text{sol}} / m_t = (1/\rho_{\text{sus}} - 1) / (1/\rho_{\text{sol}} - 1) \quad (8)$$

$$m_{\text{sol}} / m_t = ((1 - \rho_{\text{sus}}) / \rho_{\text{sus}}) * (\rho_{\text{sol}} / (1 - \rho_{\text{sol}})) \quad (9)$$

Donde:

v_{sol} = Volumen del sólido (cm^3).

v_{agua} = Volumen del agua (cm^3).

m_{sol} = masa del sólido (g).

m_{agua} = masa del agua (g).

m_t = masa total de la pasta ó suspensión (g).

ρ_{sol} = densidad del sólido (g/cm^3).

ρ_{sus} = gravedad específica de las suspensión de pasta (g/cm^3).

El porcentaje de sólidos contenidos en la suspensión de pasta es igual a:

$$\% \text{ de sólidos} = m_{\text{sol}} / m_t * 100 = ((1 - \rho_{\text{sus}}) / \rho_{\text{sus}}) * (\rho_{\text{sol}} / (1 - \rho_{\text{sol}})) * 100 \quad (10)$$

Debido a que ρ_{sol} para la pasta es de 2.6004 g/cm^3 , entonces la ecuación 10 queda así:

$$\% \text{ de sólidos} = m_{\text{sol}} / m_t * 100 = ((1 - \rho_{\text{sus}}) / \rho_{\text{sus}}) * 1.625 \quad (11)$$

La ecuación 11 fue la que se empleó durante este estudio para determinar el contenido de sólidos en la pasta.

2. Ajuste de la gravedad específica de la pasta.

Un parámetro que se controla para este estudio es el contenido de sólidos presentes en la suspensión.

El ajuste en densidad se hizo utilizando la ecuación que se deduce a continuación.

Partiendo de una pasta con densidad conocida denominada densidad actual (ρ_a), para llegar a una densidad requerida (ρ_d), en donde la $\rho_a > \rho_d$ se procederá como se señala a continuación:

Densidad actual:

$$\rho_a = m_t / v_t \quad (12)$$

Densidad requerida:

$$\rho_d = m_{\text{sus}} / v_{\text{sus}} \quad (13)$$

Para llegar a ρ_d a partir de ρ_a es necesario agregar una cierta cantidad de agua:

$$\rho_d = m_{\text{sus}} / v_{\text{sus}} = (m_t + m_{\text{agua}}) / (v_t + v_{\text{agua}}) \quad (14)$$

$$\rho_d (v_t + v_{\text{agua}}) = (m_t + m_{\text{agua}}) \quad (15)$$

$$\rho_d (v_t) + \rho_d (v_{\text{agua}}) = m_t + m_{\text{agua}} \quad (16)$$

$$\rho_d (v_t) - m_t = m_{\text{agua}} - \rho_d (v_{\text{agua}}) \quad (17)$$

$$\rho_d (m_t / \rho_a) - m_t = m_{\text{agua}} - \rho_d (m_{\text{agua}}) \quad (18)$$

$$m_t (\rho_d / \rho_a - 1) = m_{\text{agua}} (1 - \rho_d) \quad (19)$$

$$m_{\text{agua}} = m_t * (\rho_d / \rho_a - 1) / (1 - \rho_d) \quad (20)$$

$$m_{\text{agua}} = m_t * (\rho_d - \rho_a) / (\rho_a * (1 - \rho_d)) \quad (21)$$

Donde:

ρ_a = densidad actual.

ρ_d = densidad deseada.

m_t = masa de la pasta a gravedad específica actual.

v_t = volumen de la pasta a la gravedad específica actual.

m_{sus} = masa de la suspensión a la gravedad específica deseada.

v_{sus} = volumen de la pasta a la gravedad específica deseada.

m_{agua} = masa de agua a agregar para alcanzar la gravedad específica deseada.

v_{agua} = volumen de agua a agregar para alcanzar la gravedad específica deseada.

La ecuación 21 es la utilizada para el ajuste de las gravedades específicas.

Apéndice 5

Determinación de la absorción de agua del cuerpo cerámico.

De acuerdo a la metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-009-CNA-2001, INODOROS PARA USO SANITARIO ESPECIFICACIONES Y PRUEBAS, la pieza cerámica a probar, durante la cocción en el horno debe haber estado en contacto con algún accesorio refractario del horno (placa del horno, etc.), la superficie de la pieza no debe ser menor a 3200 mm², no deber estar esmaltada y debe tener un espesor entre 7 y 16 mm.

Se seca la pieza en una estufa eléctrica hasta mantener una masa constante a una temperatura entre 378K y 388K (105°C a 115°C), se deja enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente y se determina su masa (peso seco) en una báscula con una precisión de 0.01g.

Se coloca la pieza dentro de un recipiente metálico con agua desmineralizada sobre una cama de bolas de alúmina colocadas en el fondo del interior del recipiente para evitar que la pieza tenga contacto directo con el fondo del mismo.

Se lleva el líquido a ebullición. Se mantiene esas condiciones durante 2 h y se deja sumergida la muestra en el recipiente por lo menos 20 h más.

Se saca la muestra del recipiente una vez transcurrido el lapso y se remueve el exceso de humedad con un trapo húmedo y se determina su masa (peso húmedo) con la báscula de precisión de 0.01 g.

Se calcula la absorción de agua por ebullición mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ Absorción agua de la pieza} = (\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}) \times 100 / \text{Peso seco}$$

Si la absorción de agua de la pieza cerámica es menor de 0.5% de su propia masa, la prueba se considera satisfactoria.

148982

Apéndice 6

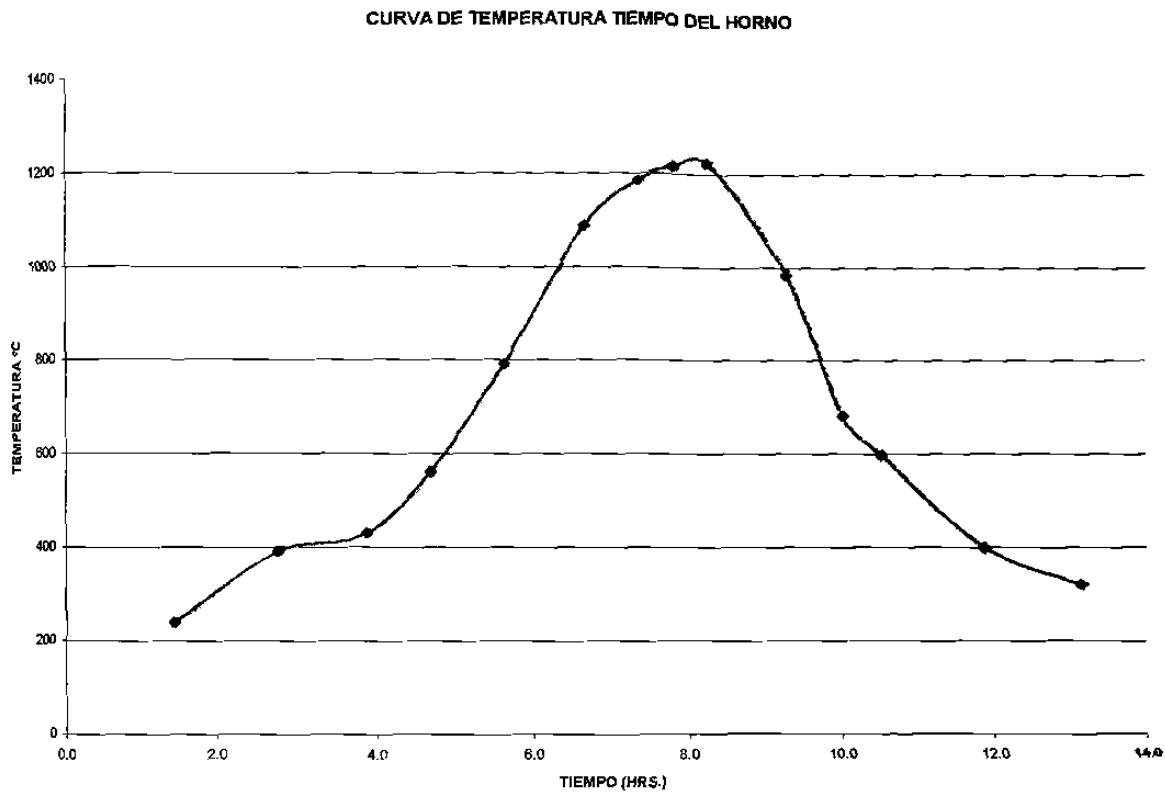


Figura No. 7 Curva de quemado del horno de quemado.

Apéndice 7

Metodología para determinar la permeabilidad.

El cálculo para determinar la permeabilidad usa una forma modificada de la ecuación para permeabilidad a través de un polvo compacto descrita por Searle and Grimshaw en "The Chemistry and Physics of clays".

$$\text{Permeabilidad} = \frac{\text{Volumen de fluido que pasa} \times \text{Espesor del cake}}{\text{Área de la sección transversal del cake} \times \text{Presión} \times \text{Tiempo}}$$

Esta ecuación asume que no existe variación en la viscosidad del fluido usando la fórmula de Poiseuille para el flujo de un líquido en una tubería:

$$\text{Volumen / Segundo} = \frac{\pi p a^4}{8 N l}$$

Donde:

$$\begin{aligned} p &= \text{presión.} & a &= \text{radio de la tubería.} \\ N &= \text{viscosidad del agua.} & l &= \text{longitud de la tubería.} \end{aligned}$$

Para una condición dada $\text{Volumen} \times \text{Viscosidad} = \text{constante.}$

$$\text{Permeabilidad} = \frac{\text{Volumen de Fluido que pasa} \times \text{Espesor del cake} \times N}{\text{Área de la sección transversal del cake} \times \text{Presión} \times \text{Tiempo}}$$

$\text{Espesor del cake} = \text{Volumen del cake} / \text{área de sección transversal.}$

$$\text{Permeabilidad} = \frac{\text{Volumen de fluido que pasa} \times \text{Volumen del cake} \times N}{(\text{Área de la sección transversal del cake})^2 \times \text{Presión} \times \text{Tiempo}}$$

$$\begin{aligned} \text{Dimensiones} &= \frac{M^3 \times M^3 \times NTM^{-2}}{M^2 \times M^2 \times NM^2 \times T} \\ &= M^2 \end{aligned}$$

Para la simplificación del cálculo se calcula una variable (C) como se menciona a continuación:

$$\text{Donde } C = \frac{\text{Área} \times \text{Área} \times \text{Presión} \times \text{Tiempo}}{N}$$

Las unidades son = $\frac{((M^2)^2 \times (NM^2) \times T)}{(NTM^2)} = M^4$

La viscosidad del agua a 20° C = 0.8904×10^{-3} g/m-s:

CALCULO DE PERMEABILIDAD	
ejemplo: BU = 120, GRAVEDAD ESPECÍFICA = 1.83 g/cm ³	
PESO DEL PAPEL FILTRO SECO (grs.) ó D8:	0.63
PESO DEL PAPEL FILTRO HUMEDO (grs.) ó D9:	1.3
PESO DEL VASO SECO (grs.) ó D10:	153.18
PESO DEL VASO CON LIQUIDO FILTRADO (grs.) ó D11:	158.16
MASA DEL CAKE (grs.) ó D12:	50.98
TEMPERATURA DE LA PASTA (°C) D13:	20
PRESION DE TRABAJO (lb/in ²) ó D14:	70
TIEMPO DE OPERACIÓN (min) ó D15:	10
DENSIDAD DE LA PASTA (gr/cc) ó D16:	1.83
PESO DEL LIQUIDO FILTRADO (grs.) ó D22 = D11-D10:	4.980
MASA TOTAL DEL LIQUIDO (grs.) ó D23= D11 + D9 - D8 -D 10:	5.650
DENSIDAD DEL AGUA A TEMP. DE LA PASTA (gr/cc) ó D24 = (1.0051-0.000316*D13):	0.999
VOLUMEN DEL LIQUIDO (cc) ó D25 = D23/D24	5.657
PESO DEL CAKE + LIQUIDO FILTRADO (grs.) ó D26 = D23+D12:	56.630
PESO DE UN LITRO DE PASTA (g.) ó D27= D16*1000:	1830
CONTENIDO DE SOLIDOS EN UN LITRO DE PASTA (kg) ó D28=(D16-1)/(D16)*1.625*D16:	1.349
CONTENIDO DE LIQUIDOS EN UN LITRO DE PASTA (kg) ó D29= D16-D28:	0.481

CONTENIDO DE AGUA EN EL CAKE Y EL FILTRADO (grs) ó D30 = D29/D16*D26	14.892
PESO DEL CAKE SECO (grs.) ó D31= D26-D30	41.738
VOLUMEN DEL AGUA EN EL CAKE (cc) ó D32= (D12-D31)/D24	9.25
VOLUMEN DE LA ARCILLA SECA EN EL CAKE (cc) ó D33 =D31/2.6	16.053
VOLUMEN DEL CAKE (cc) ó D34 =D33+D32	25.307
AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL BAROID (m ²): ó D36	4.78E-04
PRESION DE TRABAJO EN N/m ² ó D37 = D14/14.7*101300	4.82E+05
VISCOSIDAD DEL AGUA A TEMP. DE LA PASTA ó D38:	8.90E-04
C (m ⁴) ó C= (D36) ² *D15*60*D37/D38:	7.43E+04
PERMEABILIDAD (cm ²) ó PERMEABILIDAD= D25*D34/(C*1000000*10000):	1.928E-13

Apéndice 8

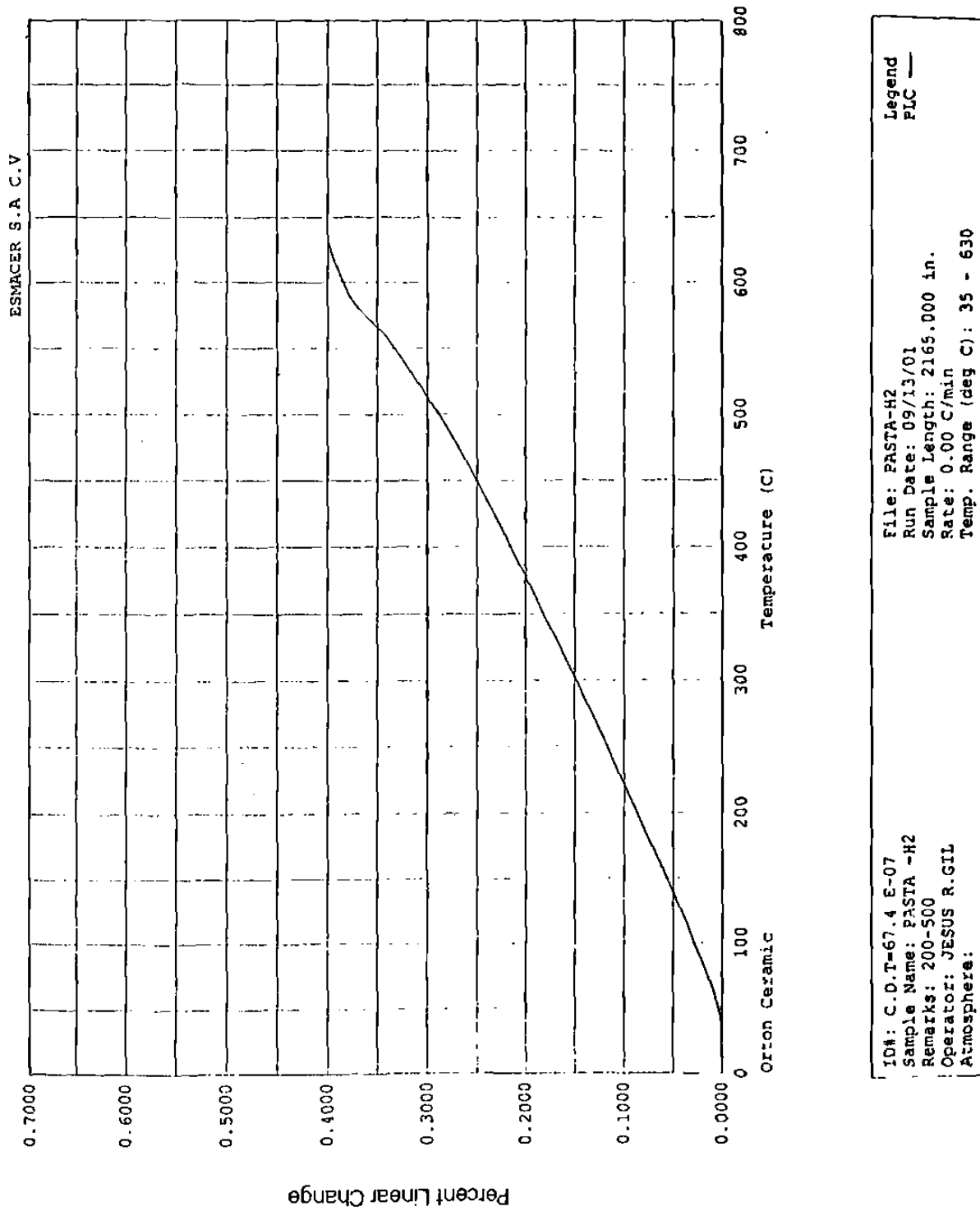
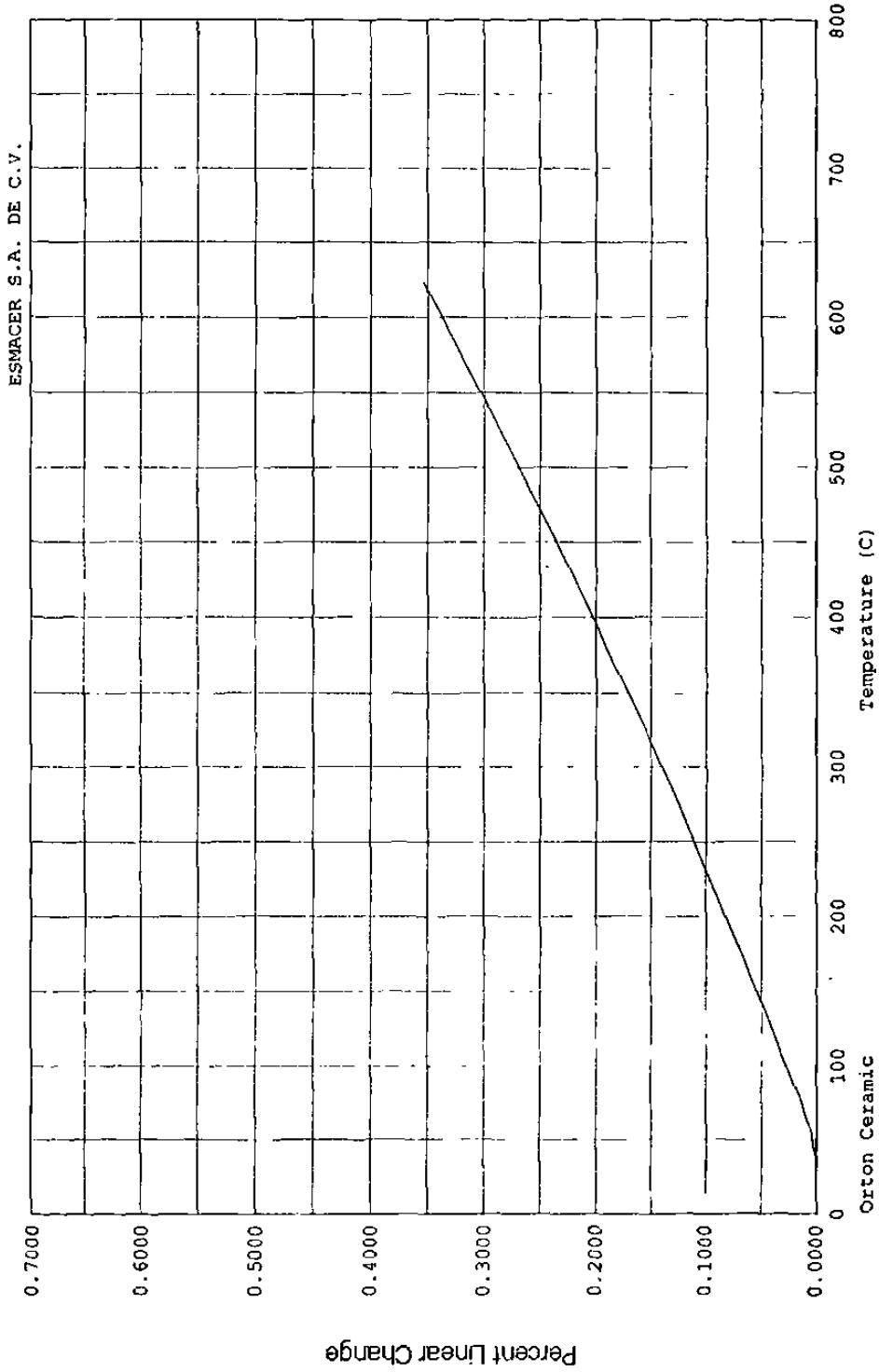


Figura 8. Gráfica de C.D.T. para F1.



ID#:	C.D.T-62.1 E-07	File:	B-H2-REP	Legend	PLC —
Sample Name:	BCO-H2	Run Date:	09/14/01		
Remarks:	200-500 C	Sample Length:	2165.000 in.		
Operator:	JESUS R. GIL	Rate:	0.00 C/min		
Atmosphere:		Temp. Range (deg C):	37 - 623		

Figura 9. Gráfica de C.D.T. para esmalte blanco

