

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO DEL PROCESO DE VITRIFICACION DE UN CUERPO
CERAMICO TRADICIONAL

POR:

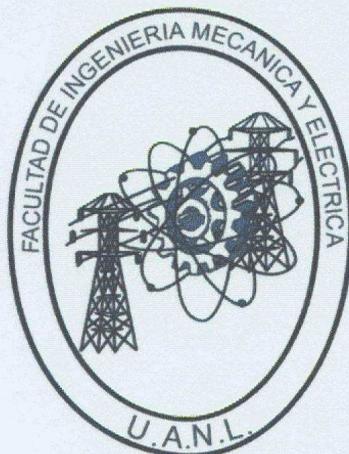
ING. FRANCISCO MARES VARGAS

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

MONTERREY; NUEVO LEON, NOVIEMBRE DEL 2011

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO DEL PROCESO DE VITRIFICACION DE UN CUERPO
CERAMICO TRADICIONAL

POR:

ING. FRANCISCO MARES VARGAS

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

MONTERREY; NUEVO LEON, NOVIEMBRE DEL 2011

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis Estudio del Proceso de Vitricación de un Cuerpo Cerámico Tradicional realizada por el Ing. Francisco Mares Vargas con número de matrícula 0022246 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Dr. José Luís Cavazos García

M.C. María de Jesús Nañez Rodríguez

M.C. Dante Alberto Jiménez Domínguez

VoBo
Dr. Moisés Hinojosa Rivera

Cd. Universitaria; Noviembre del 2011

DEDICATORIA

- A Dios gracias por haberme permitido llegar a la culminación de este trabajo de tesis.
- A mi esposa Martha por su tiempo, comprensión y apoyo para estudiar esta Maestría.
- A mis hijos Alejandra y David, que son junto con mi esposa lo que más quiero.

AGRADECIMIENTOS

- A la UANL y la FIME por su apoyo económico y humano para la realización de esta maestría.
- A todo el cuerpo de maestros que integran la maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales, mi más sincero agradecimiento.
- A la Empresa KT-Clay de México, por su apoyo en materias primas.
- A la Dra. Ana María Guzmán Hernández por su participación desinteresada en la sección correspondiente a la Microscopía.
- A un gran compañero y amigo, por su estímulo para estudiar esta maestría
Gracias! Dr. Carlos Guerrero Salazar
- Mi más sincero agradecimiento al MC Alvaro Rodríguez Ramos por su asesoría, apoyo técnico y experiencia profesional en esta disciplina científica Gracias!

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN	1
CAPITULO 1. INTRODUCCION	3
CAPITULO 2. MATERIALES CERAMICOS	5
2.1 Silicio	5
2.1.1 Grupos de Silicatos	6
2.1.2 Estructuras de Silicatos	8
2.2 Materias primas para el soporte de un cuerpo cerámico	11
2.2.1 Materias primas plásticas	11
2.2.2 Materias primas no plásticas	18
2.3 Clases de Arcillas	21
2.4 La pasta cerámica o barbotina	23
2.4.1 Características	23
2.4.2 Procesos de formado cerámico	27
2.4.3 Moldeo con barbotina	28
2.4.4 Tipos de pastas cerámicas	28

2.5	Secado	31
2.6	Cocción	32
CAPITULO 3. EXPERIMENTACION		34
3.1	Metodología a seguir para la síntesis y evaluación del cuerpo cerámico	34
3.2	Selección y origen de los materiales	35
3.3	Formulación	35
3.4	Propiedades típicas de referencia en los materiales seleccionados	35
3.5	El producto en verde	36
3.6	El secado del producto en verde	37
3.7	Cocción	39
3.8	Evaluación y mediciones en el cuerpo cerámico	39
	3.8.1 Distribución del tamaño de partícula	39
	3.8.2 Area superficial	39
	3.8.3 Análisis químico	40
	3.8.4 Evaluación física	40
	3.8.5 Análisis térmico diferencial / termogravimétrico	42
	3.8.6 Microscopía electrónica de barrido	43
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSION		44
4.1	El análisis químico	44
4.2	Evaluación	45
CAPITULO 5. CONCLUSIONES		49

REFERENCIAS	53
FIGURAS	55
TABLAS	75
APENDICE A	90
APENDICE B	106
LISTADO DE FIGURAS	133
LISTADO DE TABLAS	136

RESUMEN

El proceso de cocción en los productos cerámicos tradicionales, es una de las etapas más importantes en su proceso de fabricación. Es el proceso de cocción, el cual convierte el producto suave en producto duro y resistente. En la mayoría de los cuerpos cerámicos esto se realiza por la reacción entre los materiales fundentes y los otros componentes del cuerpo, formando un líquido el cual durante el enfriamiento solidifica en un vidrio, uniendo las partículas o cristales formados, que no han sido fundidos. Este proceso de sinterización por vitrificación, es típico de la cerámica de silicatos o tradicional.

Analizaremos con especial atención esta etapa debido a la importancia que tienen los cambios que presentan las arcillas y otros materiales al aumentar su temperatura.

De acuerdo a su composición química las arcillas están constituidas por una gran variedad de silicatos en varias condiciones y combinaciones. Cuando una arcilla se calienta, algunos de sus componentes se transforman químicamente, desprendiéndose vapor de agua y otros gases, mientras que el oxígeno se combina. Posteriormente viene la fusión de la masa en proceso de cocción, formándose una variedad compleja de silicatos (sodio, potasio, magnesio, calcio, hierro y aluminio).

Cuando el calentamiento se acerca a las temperaturas de vitrificación, el volumen exterior disminuye, por el fenómeno de tensión superficial de las porciones que se funden. Este efecto continúa hasta que el espacio de los poros se cierra, a lo que se llama vitrificación total. Generalmente la vaporización de alguno de los constituyentes contribuye al aceleramiento de la

vitrificación, puesto que las presiones de vapor de algunos óxidos metálicos es muy alta a temperaturas elevadas.

Finalmente, la importancia del estudio del proceso de vitrificación nos llevará a la comprensión de los fenómenos que ocurren, sus reacciones, la influencia de su composición química y las condiciones de cocción del material cerámico con la finalidad de determinar las características finales del material.

La presente investigación trata sobre un estudio del proceso de vitrificación de un cuerpo cerámico tradicional hecho a base de arcilla, caolín, feldespato y sílice cuyo objetivo es comprender los fenómenos que ocurren durante su cocción, así como la influencia de su composición química y las condiciones de cocción en las características finales del producto cerámico.

Para la realización de este trabajo de tesis se desarrollaron tres formulaciones para pastas cerámicas con características y propiedades para su aplicación en el área industrial correspondiente. En lo que respecta a la parte experimental se obtendrá su comportamiento térmico con la curva de cocción, el análisis térmico diferencial / termogravimétrico, su comportamiento mecánico a través del ensayo de flexión y el estudio de su microestructura en el microscopio electrónico de barrido. Los resultados de este estudio se describen al detalle en la parte experimental.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Los materiales cerámicos son compuestos inorgánicos y no metálicos de carbono, oxígeno, nitrógeno, boro, silicio y otros elementos; unidos en forma iónica y/o covalente. Debido a las uniones tanto iónicas como covalentes, los cerámicos tienen puntos de fusión relativamente altos, gran dureza, resistencia mecánica, son frágiles, duros y quebradizos, escasa conductividad eléctrica y térmica. Por lo anterior, la mayor parte de sus usos en Ingeniería es como: materiales a altas temperaturas, refractarios, tratamientos térmicos, en revestimientos, materiales en los motores de turbina de gas para uso aéreo y terrestre. Se emplean como abrasivos y en aplicaciones que requieren resistencia al desgaste. Asimismo, se utilizan para contener productos químicos (ácidos y bases) debido a sus propiedades de resistencia a la corrosión.

En la actualidad, los materiales cerámicos han tenido un desarrollo tecnológico muy importante, y debido a esto se han clasificado como cerámicos tradicionales y cerámicos avanzados. Los cerámicos tradicionales son los que proceden y se elaboran a base de arcillas; y los cerámicos avanzados de minerales no arcillosos, que son principalmente óxidos, nitruros y carburos.

Los productos cerámicos tradicionales son: refractarios, cemento, cerámicas blancas, esmalte en porcelana y productos estructurales de arcilla.

Los cerámicos avanzados, también conocidos como cerámicas técnicas o de ingeniería, se sintetizan por lo común con una gran pureza. En consecuencia, presentan mejores propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas que las cerámicas tradicionales.

Independientemente del tipo de material cerámico, el proceso de cocción es relevante para su manufactura, por lo que en el presente estudio se hablará del efecto del calor durante el proceso de vitrificación de un cuerpo cerámico tradicional bajo condiciones de cocción establecidas, con el objeto de comprender los fenómenos que ocurren durante este proceso; así como la influencia de la composición química del cuerpo cerámico.

CAPITULO 2

MATERIALES CERAMICOS

2.1 SILICIO

En las formulaciones de las arcillas está implícito el elemento silicio, el aluminio, el oxígeno y otros compuestos. Como el elemento silicio está en todas ellas, es conveniente y necesario hablar del mismo ya sea en forma pura o en forma combinada.

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre; el primero es el oxígeno y abajo del silicio está el aluminio, el hierro, el calcio, el sodio, el potasio, el manganeso, el hidrógeno, etc.; por lo que el elemento silicio desempeña un papel muy importante en la naturaleza. Exceptuando las calizas y dolomitas, además de otras rocas sedimentarias, el resto de las rocas están formadas por silicatos que son combinaciones silicio – oxígeno.

El silicio pertenece al Grupo II, tiene un número atómico de 14, con índice de coordinación constante de 4 y formando predominantemente enlaces covalentes dirigidos en el espacio. Como lo muestra la fig. 2-1, la combinación silicio – oxígeno forma un tetraedro con los oxígenos situados en los vértices y el silicio en el centro.

Como el oxígeno tiene una valencia de -2 , a cada oxígeno le sobra una valencia que empleará para combinarse con otros átomos de silicio, centros a su vez de otros tetraedros que quedan así unidos. Hay que enfatizar que un tetraedro queda solo con 4 cargas negativas, que lógicamente deberá de

compensar de alguna manera. Este 4- tetraedro se puede representar como SiO_4

En la fig. 2-2 están representadas las diferentes formas de esta molécula.

Como se aprecia en la tabla 2-1, los átomos de silicio no forman enlaces lo suficientemente fuertes como para formar cadenas $-\text{Si}-\text{Si}-\text{Si}-$ como la química del carbón en los polímeros, este hecho se debe a que la energía de enlace de la cadena $-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$ es mayor que la energía de enlace de la cadena $-\text{Si}-\text{Si}-\text{Si}-$ sin embargo, el enlace $\text{Si}-\text{O}$ es más estable, por lo que se pueden formar cadenas $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ de longitud indefinida.

Es importante enfatizar que la base de toda la química de los silicatos se fundamenta en el hecho de que el ión Si^{4+} pueda coordinarse con cuatro iones oxígeno formando el tetraedro $\text{Si}-\text{O}$. Por otra parte, el ión oxígeno puede ser común a dos tetraedros para formas tetraedros dobles y más aún, cadenas de silicio / oxígeno.

Todos estos compuestos se llaman silicatos.

2.1.1 Grupos de silicatos

Existe una gran variedad de silicatos debido a las diferentes formas de unión entre los tetraedros $\text{Si}-\text{O}$, o de la sustitución en algunos casos de alúmina en la estructura de éstos, que da lugar a los diferentes grupos en que pueden clasificarse los silicatos.

En la tabla 2-2, se distinguen los diversos grupos de silicatos partiendo de tetraedros $\text{Si}-\text{O}$, aislados con uniones y sustituciones en su estructura, por orden de complejidad.

Como los minerales arcillosos son de mucha importancia en el estudio de las materias primas cerámicas; el Grupo IV, correspondiente a los silicatos ordenados en estructuras en hojas, es el que se analizará en la sección correspondiente a las materias primas de soporte.

Estructuras en hojas:

Forman este grupo un gran número de compuestos de interés, entre los que se encuentran los minerales arcillosos.

Conviene en primer término, clasificar los conceptos de "hoja" y "capa" usados con frecuencia en la descripción de los silicatos de este grupo.

- Hojas

En estas estructuras cada hoja forma un conjunto de capas superpuestas.

- Capas

Cada capa es la repetición en el plano de una misma configuración de tetraedros.

Se trata, por tanto, de una estructura en pisos que será responsable de una serie de propiedades como la exfoliación (propiedad para presentar fracturas según planos definidos), etc.

Según el espesor de cada nivel, es decir, según el número de capas que presente el silicato por hoja, se pueden distinguir varios subgrupos:

- Grupo del caolín (Caolinita)
- Grupo de la mica (Talco, illitas, montmorillonita)
- Grupo de la clorita (Clorita)

2.1.2 Estructura de silicatos

El ejemplo más simple de minerales que contienen iones SiO_4^{4-} es la forsterita (Mg_2SiO_4), un mineral frecuentemente utilizado como refractario de alta temperatura, ya que su punto de fusión es 1890°C . En el Mg_2SiO_4 , el ión SiO_4^{4-} ha recibido cuatro electrones de los cuatro átomos de magnesio adyacentes. Cada átomo de magnesio proporciona un segundo electrón a otras unidades SiO_4 . En consecuencia, se forma una estructura fuerte en la que los iones Mg^{2+} sirven como uniones entre iones SiO_4^{4-} . Como los grupos tetraédricos SiO_4^{4-} están separados unos de otros, han recibido el nombre de estructuras tipo "isla". cuando la forsterita se funde finalmente, el fundido tiene iones Mg^{2+} y SiO_4^{4-} que poseen cierta movilidad y, por lo tanto, conductividad iónica. Debe notarse que el Mg_2SiO_4 no es una molécula en el sentido estructural, ya que las unidades están ligadas sobre todo por enlaces iónicos y covalentes.

Cuando están presentes las fuerzas secundarias de van der Waals, no son evidentes. Asimismo, la estructura resultante tiene un patrón compacto de iones oxígeno con átomos de silicio en parte de los sitios intersticiales de coordinación 4 y iones magnesio en parte de los sitios de coordinación 6.

Unidades tetraédricas dobles.

El segundo de los dos métodos disponibles para remediar la deficiencia de electrones produce una unidad tetraédrica doble. Uno de los oxígenos pertenece a las dos unidades (fig. 2-3).

La composición resultante de la unidad doble es Si_2O_7 , que produce un ión $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ cuando se obtienen electrones de los átomos metálicos adyacentes.

Cadenas de silicatos.

Es inmediatamente evidente que si uno de los oxígenos puede ser compartido por dos tetraedros adyacentes, también es posible compartir los oxígenos en los otros vértices de los tetraedros. Las figuras 2-4 y 2-5, muestran ejemplos en los cuales los tetraedros de sílice forman parte de cadenas simples y dobles.

Estas estructuras de cadena, teóricamente, pueden ser casi infinitas en longitud y es posible compararlas directamente con la polimerización en materiales orgánicos, excepto por una diferencia fundamental. Con materiales orgánicos, las cadenas adyacentes por lo general están unidas por fuerzas de Van der Waals débiles, pero en cerámicas las cadenas están casi siempre unidas por enlaces iónicos, como se muestra en forma esquemática en la figura 2-6.

Dado que los enlaces iónicos entre las cadenas no son tan fuertes como los enlaces Si-O parcialmente covalentes dentro de la cadena, la fractura o la exfoliación tiene lugar paralelamente a la cadena. Los minerales piroxena y anfíbol muestran ejemplos de esta partición. De la misma manera, las características fibrosas de los asbestos están asociadas con la menor resistencia entre las cadenas de silicatos más bien que dentro de ellas.

Silicatos laminares.

La extensión de unidades tetraédricas de silicato en un plano y no solo en una línea, hace posible las estructuras de un gran número de minerales cerámicos tales como arcillas, micas y talco. La estructura laminar de unidades tetraédricas de silicato se muestra en dos representaciones en la fig. 2-7

En la parte inferior de la lámina cada oxígeno está completo con un total de ocho electrones, ya que estos oxígenos comparten pares de electrones con silicios adyacentes. Por lo tanto, solo hay disponibles enlaces secundarios para ligar cada lámina con las láminas adyacentes. La exfoliación de la mica, la plasticidad de la arcilla y las características lubricantes del talco son consecuencia de este arreglo estructural.

Silicatos reticulares.

En SiO_2 puro no hay iones metálicos, y cada oxígeno es un átomo de puente entre dos átomos de silicio (y cada átomo de silicio está entre cuatro átomos de oxígeno, como lo muestra la fig. 2-8)

Esto forma una estructura reticular. La sílice (SiO_2) puede tener varias estructuras cristalinas diferentes, de la misma manera que el carbón puede estar en forma de grafito o de diamante. La estructura mostrada en la figura anterior es la forma de alta temperatura. Una estructura más común de la sílice es el cuarzo, el material predominante encontrado en las arenas de muchas playas. Al igual que la forma de SiO_2 en la figura anterior, el cuarzo contiene tetraedros SiO_4 , pero en una red cristalina más compleja.

Otra sílice natural es el feldespato. La fase rosada del granito es KAlSi_3O_8 , el cual puede ser visualizado como un silicato reticular donde uno de los cuatro silicios está reemplazado por un ión Al^{3+} . Este último, sin embargo, tiene solo tres cargas, comparado con las cuatro de silicio. Así, el K^+ está presente para balancear las cargas. Afortunadamente la mayoría de las estructuras reticulares son bastante abiertas de modo que hay espacio suplementario para que

estén presentes otros iones (como lo muestra la figura anterior). De hecho, el ión K^+ puede verse como un ión intersticial.

2.2 MATERIAS PRIMAS PARA EL SOPORTE DE UN CUERPO CERAMICO

En cerámica, una pasta es la mezcla equilibrada de materias primas que cumplen con una serie de exigencias que la hacen útil y rentable para la fabricación de productos cerámicos.

La pasta conforma lo que se denomina el soporte del producto, es decir, el “cuerpo” del producto cerámico, que puede ir esmaltado o no.

Las materias primas utilizadas en la preparación de pastas cerámicas, rara vez son sustancias puras. De ellas es conveniente conocer su composición química y mineralogía, así como su comportamiento durante el proceso de fabricación y las propiedades en el producto terminado. A la medida y el conocimiento de todos estos parámetros, se denomina caracterización de una materia prima.

De lo anterior se desprende que en la composición de una pasta cerámica se pueden emplear dos tipos de materias primas que constituyen el soporte de un cuerpo cerámico; tales materiales son:

- Materias primas plásticas
- Materias primas no plásticas

2.2.1 Materias primas plásticas

Los materiales plásticos más utilizados como parte integrante de un cuerpo cerámico son:

- Las arcillas
- Los caolines
- La bentonita

de las cuales hablaremos brevemente.

Las Arcillas

En el Grupo IV de la clasificación de los silicatos (tabla 2-2), se describe de una manera general el estudio de las arcillas que pasa necesariamente como el de los minerales arcillosos (silicatos con estructura en hojas).

El término arcilla es usado en el lenguaje común en un sentido muy amplio, a fin de simplificar definiciones muy complejas. En este sentido, se entiende por arcilla a un producto natural, no tratado previamente, formado por una mezcla de minerales tales como caolinitas, cloritas, illitas, etc.; con otros minerales que no lo son; como el cuarzo, carbonatos, feldespatos, óxidos, etc.

Según lo anterior; las arcillas, están por lo tanto, formadas por mezclas de muchos minerales de los cuales algunos de ellos pueden ser predominantes.

De esta manera, en una arcilla donde predominen los carbonatos de cal, se denominará habitualmente como arcilla calcárea; de la misma forma que una arcilla caolinítica, es aquélla en la que la estructura de la caolinita es mayoritaria.

En general, las propiedades de cada arcilla son el resultado del efecto de cada uno de los componentes de ésta. No tiene, por tanto, ningún

sentido hablar de arcillas puras, ya que éstas no existen en la naturaleza; aunque en algunos casos se puedan aislar minerales arcillosos puros a escala de laboratorio.

De acuerdo a la clasificación de los silicatos (Grupo IV), los silicatos con estructura en hojas se dividen en tres subgrupos; según el número de capas por hoja que presenten:

- Grupo de la caolinita
- Grupo de la mica
- Grupo de la clorita

La tabla 2-3, describe de una manera más general esta clasificación.

- **Grupo de la Caolinita:**

Los minerales de este grupo presentan una capa octaédrica de aluminio (Al) y una de tetraedros Si-O, como se muestra en las figuras 2-9 y 2-10

En la figura 2-10, se observa en la parte superior la capa de tetraedros de Si-O (tetraedros unidos por un vértice – oxígeno), y en la parte inferior la capa formada por octaedros en cuyo centro se encuentra situado el aluminio (Al) y en los vértices el oxígeno o grupos OH

Con esta descripción estructural, se obtiene que la fórmula de la caolinita es:



Este tipo de mineral presenta una de las estructuras mas sencilla y mas estable de los minerales arcillosos, en donde las características de este tipo de estructura son:

- ◆ Son raras las sustituciones
- ◆ Son de redes muy estables
- ◆ Son abundantes

Tipos de caolinitas:

1. Hidratados.-

Se caracterizan porque tienen sus capas separadas por una capa de moléculas de agua, siendo el mineral tipo la halloisita, que es inestable; transformándose en metahalloisita por pérdida de agua.



2. No Hidratados.-

Materiales en que no existe la posibilidad de intercalación de moléculas de agua, otro tipo de moléculas o iones entre sus capas.

A este grupo corresponden:

- ◆ Caolinita
- ◆ Dickita
- ◆ Nacrita

- **Grupo de la Mica:**

En los minerales de este grupo es característico encontrar tres capas, una octaédrica de Al o Mg, situadas entre dos capas hexagonales de tetraedros Si-O (fig. 2-11)

Por su grado de hidratación, estos materiales cerámicos se clasifican en:

- 1.- No Hidratados.
- 2.- Parcialmente Hidratados.
- 3.- Hidratados.

1.- No Hidratados:

A este grupo corresponden:

- ◆ Talco 3MgO 4SiO₂ H₂O
- ◆ Pirofilita Al₂O₃ 4SiO₂ H₂O

Como se observa en sus fórmulas moleculares, la diferencia estructural está en el elemento que ocupa el centro de los octaedros de la capa octaédrica, el Mg en el talco y el Al en la pirofilita; como se observa en la fig. 2-12.

El conjunto de las capas es neutro y no aparecen elementos alcalinos ni alcalinotérreos.

Las micas tienen la misma estructura que el talco y la pirofilita, pero presentan cationes Ca²⁺, K⁺ y Na⁺ que forman parte del retículo cristalino.

Las fórmulas moleculares de algunas micas son:

Moscovita	K_2O	$3Al_2O_3$	$6SiO_2$	H_2O
Paragonito	Na_2O	$3Al_2O_3$	$6SiO_2$	H_2O

Como se observa, la moscovita es una mica potásica, y el paragonito es sódica. A continuación se hace la representación esquemática de la moscovita. (fig. 2-13)

2.- Parcialmente Hidratados:

A este grupo corresponden las illitas que suelen estar presentes en la mayoría de las arcillas y son utilizadas en la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos, siendo su estructura de tres capas; una octaédrica situada entre dos capas hexagonales aunque con un alto grado de sustitución.

Illitas	K_2O	Al_2O_3	$6SiO_2$	$2H_2O$
---------	--------	-----------	----------	---------

que tienen contenidos en sílice y alúmina próximos a los de la caolinita, pero con menores pérdidas en calcinación y una cantidad apreciable de óxido de potasio (11.8%). En la práctica real contienen una composición muy variable, con contenidos de agua y sílice.

3.- Hidratados:

Como la estructura está formada por un conjunto de capas superpuestas de hojas; estas hojas están separadas por un número variable de capas de agua que pueden provocar un hinchamiento de la estructura.

La acción del calor provoca que entre los 300 a 500 °C, disminuya la distancia reticular hasta la interposición de una sola molécula de agua. Como el proceso es reversible, el mineral puede rehidratarse a menos que la temperatura no sobrepase los 550 °C.

- **Grupo de la Clorita:**

La estructura ideal de este grupo comprende dos capas trioctaédricas de magnesio alternadas con dos capas tetraédricas de Si-O. Por tanto tienen cuatro capas por hoja como se describe en la fig. 2-14

Los Caolines

Los caolines también son arcillas de alto contenido de caolinita, de baja plasticidad, cocción blanca y alta refractariedad. Su adición a una pasta obedece a la necesidad de aumentar su temperatura de cocción, o bien, su blancura. Cuando son recién extraídos, presentan un alto contenido de sílice y una granulometría gruesa, como se muestra en la tabla 2-4.

Cuando éstos se lavan, varía su composición mineralógica presentándose como mineral arcilloso predominante, así como la presencia de otros minerales como la illita, mezcla de illita – montmorillonita, etc.

En la tabla 2-5, se presenta el análisis químico de diversos tipos de caolines, en donde la sílice y la alúmina son los componentes principales; encontrándose combinados en los minerales arcillosos, y en menor proporción como feldespatos, micas, así como otros aluminosilicatos.

Cabe señalar que los compuestos de hierro que acompañan a las arcillas y caolines, son los causantes de la coloración de éstos tras la cocción. Esta acción es favorecida por la presencia del óxido de titanio. Como la cocción de los caolines es blanca, éstos deberán de tener un contenido en óxido de hierro inferior al 1%

La Bentonita

Las bentonitas tienen como principal mineral arcilloso a la montmorillonita. Este mineral hace que se absorba agua con facilidad, dilatándose su estructura hasta 4 o 5 veces su volumen en seco. Este mineral es extremadamente plástico, hasta el punto de que la adición de 1% de bentonita a una pasta, puede mejorar su plasticidad en la misma medida que lo haría un 10% de una arcilla grasa.

2.2.2 Materias primas no plásticas

Al grupo de los minerales no arcillosos corresponde el cuarzo y el feldespato, y son considerados como materiales no plásticos.

El cuarzo:

Es la forma cristalina que predomina en la sílice (SiO_2). Este se añade como materia prima para soporte, en la forma de arena cuarcífera finamente dividida.

El objetivo del cuarzo como carga de soporte en las arcillas, es disminuir la plasticidad de la composición o el de aumentar su coeficiente de dilatación.

Los feldespatos:

Son aluminosilicatos de alcalinos y alcalinoterreos, minerales ígneos, muy comunes en las rocas primarias en las que aparece junto a cuarzos y micas.

Raramente se encuentran yacimientos del mineral puro; generalmente se encuentran mezclas variables de aluminosilicatos de sodio, potasio, calcio y litio.

En la tabla 2-6 se muestran las fórmulas moleculares teóricas de algunos de los feldespatos más frecuentes, aclarando que las fórmulas corresponden al mineral puro.

El punto de fusión de los feldespatos está en el rango de 110°C y 1530°C . Estas temperaturas relativamente bajas, se deben a la presencia de alcalinos y alcalinotérreos que actúan como fundentes. La temperatura real a la cual reblandecen y comienzan a fundir los feldespatos depende mucho de su composición, de las impurezas y del tamaño del grano que presenten.

El carbonato de calcio y dolomita:

Se utilizan en pastas de productos porosos en las que es difícil introducir arcillas calcareas, como es el caso de las pastas blancas utilizadas para revestimiento, en donde es difícil encontrar arcillas de cocción blancas y un alto contenido de carbonatos. Por otra parte, la dolomita se puede considerar como un carbonato doble de calcio y magnesio, esto debido a que se encuentran juntos en cantidades moleculares iguales.



El calcio es un silicato de magnesio con estructura laminar (de tres capas por hoja); y en algunos casos asociado con impurezas que contienen hierro, calcio y alcalinos, es de color blanco tras la cocción a 1350 °C.



La tabla 2-7 muestra el análisis químico de algunos talcos.

El talco que se añade a las pastas cerámicas aumenta su resistencia a los ácidos y reduce la expansión por humedad. En el caso de que el talco sea el constituyente principal, se pueden obtener composiciones que sean adecuadas para ser usadas como aislantes eléctricos.

2.3 CLASES DE ARCILLAS

Existen diversos tipos de arcillas que se usan habitualmente en cerámica y entre ellas están: el caolín, arcilla de bola (ball clay), arcillas blancas para loza, arcillas refractarias, arcillas para gres, arcillas rojas y bentonita.

Caolín o arcilla de China

Es una arcilla primaria que se utiliza como componente principal en la fabricación de las pastas de porcelana y tiene la misma fórmula química que la arcilla. Su color es blanco en seco y después de la cocción. Funde sobre los 1800 °C. Para rebajar su punto de fusión se le mezcla con materiales fundentes como el feldespato, y se le introduce en las pastas de loza para aumentar su temperatura. Es un material poco plástico por lo que no se puede moldear a mano, pero si con moldes. Se encuentra en estado muy impuro, por lo que debe someterse a diversos lavados para su purificación. (fig. 2-15)

Arcillas de bola (ball clay)

Estas arcillas son secundarias, muy plásticas y fusibles. Se les mezcla con el caolín para la preparación de pastas cerámicas. Su gran plasticidad impide que se trabaje sola y en contacto con el agua es pegajosa. Tiene un encogimiento del 20% aproximadamente y vitrifica sobre los 1300 °C. Se le utiliza para mejorar la plasticidad de otras arcillas. (fig. 2-16)

Arcillas para loza

Después de la cocción debe tener color blanco (900 – 1,050 °C) y se utilizan para la fabricación de pastas para loza. Es importante que el contenido de óxido de hierro de estas arcillas no sobrepase el 1%, pues de lo contrario su color después de la cocción sería marfileño (fig. 2-17)

Arcillas refractarias

Son resistentes al calor y tienen un punto de fusión muy alto (entre 1600 y 1750 °C). En estas arcillas la caolinita y la alúmina aparecen en porcentajes elevados. Son bastante puras y prácticamente exentas de hierro. Deben ser bastante plásticas para que pueda introducirse en ellas chamota. Su color después de la cocción es muy variable, del crema al gris (fig. 2-18)

Arcillas para gres

Son refractarias y plásticas, y se vitrifican alrededor de los 1250 – 1300 °C. En ellas el feldespato actúa como material fundente. Después de la cocción su color es variable, desde el gris muy claro al oscuro y del color gamuza al pardo (fig. 2-19)

Arcillas rojas

Son muy fusibles y plásticas, con un alto contenido de óxido de hierro. Generalmente resisten temperaturas de hasta 1100 °C, pero funden a mayor temperatura y pueden utilizarse como barnices para gres. Su color varía del rojo; en húmedo, hasta el marrón; una vez bizcochada, oscureciéndose cada vez más al acercarse a su límite de cocción (fig. 2-20)

Bentonita

Es una arcilla volcánica muy plástica, con mayor porcentaje de silicio que de alúmina. Tiene un tacto graso y puede aumentar entre 10 y 15 veces su volumen al entrar en contacto con el agua. Se introduce en las pastas para aumentar su plasticidad y funde alrededor de los 1200 °C (fig. 2-21)

Su fórmula química es: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

La tabla 2-8 presenta el análisis químico de algunas arcillas blancas.

2.4 LA PASTA CERAMICA O BARBOTINA

Una barbotina cerámica es una suspensión constituida por mezclas de material arcilloso y llevadas a un estado de defloculación óptimo para ser usado. Para el caso de barbotinas utilizadas para procesos de vaciado (alfarería, refractarios, sanitarios, etc.), los polvos cerámicos en su granulometría se mezclan con agua y defloculante (silicato de sodio y carbonato de sodio), para ser vaciada en un molde de yeso cerámico que tenga la forma de la pieza deseada.

Las suspensiones de arcilla en agua, presentan en general un comportamiento muy característico, típico de las soluciones coloidales. Generalmente, cuando las partículas de arcilla están dispersas en agua, éstas se cargan negativamente, por lo que son rodeadas de una capa de iones positivos, formando un campo eléctrico con la existencia de una curva de potencial llamado potencial zeta.

2.4.1 Características

Las propiedades de interés desde el punto de vista cerámico en las arcillas, se manifiestan en presencia del agua, por lo que es necesario considerar el sistema arcilla / agua en su conjunto, y en nuestro caso hablaremos de su comportamiento reológico.

Cuando se habla del comportamiento reológico de las arcillas se hace referencia, lógicamente, a suspensiones de arcilla en agua; es decir, a barbotinas cerámicas.

a).- Floculación / defloculación:

En los sistemas arcilla / agua, las partículas arcillosas presentan en su superficie una capa de cargas negativas. Con la finalidad de asegurar su neutralidad eléctrica, deben disponerse iones positivos envolviendo esta capa. Estos iones pueden ser:

H^+	para arcillas purificadas
$Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , etc.$	para arcillas naturales

En los sistemas arcilla / agua, se puede por lo tanto, distinguir un núcleo arcillosos cargado negativamente, una capa de iones arcillosos (que es en realidad una doble carga positiva) absorbidos en la partícula de arcilla y las moléculas de agua que circundan la partícula. Al conjunto formado por la partícula arcillosa cargada negativamente y la capa positiva, se le llama " micela " como lo muestra la figura 2-22

La existencia de capas eléctricas cargadas con signos diferentes, permiten que éstas sean tratadas matemáticamente como si fuesen un condensador, por lo que es posible determinar la diferencia de potencial entre dos capas de cargas de distinto signo. Esta diferencia de potencial se denomina " potencial zeta ".

La determinación del potencial zeta nos permite evaluar cuantitativamente las fuerzas de repulsión entre las partículas arcillosas en suspensión.

El potencial zeta se puede modificar por adición de electrolitos a la suspensión (barbotina). La acción sobre el potencial zeta es una acción sobre las características reológicas de la suspensión, es decir, al modificar este potencial se altera el estado de la suspensión provocando la atracción o repulsión de las partículas en suspensión.

Defloculación:

Se dice que una suspensión está defloculada cuando predominan las fuerzas de repulsión entre las partículas sólidas que la constituyen. Estas partículas están, por tanto, dispersas por las fuerzas de repulsión predominantes.

Floculación:

Una solución está floculada cuando prevalecen las fuerzas atractivas entre las partículas arcillosas.

Para el caso de una suspensión defloculada, las partículas están separadas repeliéndose entre sí, disminuyendo su viscosidad para obtener una suspensión fluida. Por otra parte, para el caso de las suspensiones floculadas, se produce un espesamiento debido a las ya citadas atracciones moleculares que provocan la formación de "flocs" (agregados de partículas) que retienen agua inmovilizándola para aumentar la viscosidad.

- Sustancias que actúan como agentes defloculantes:
 - Bases monovalentes
 - Carbonato sódico
 - Silicato sódico
 - Polifosfatos

- Sustancias que actúan como agentes floculantes:
 - Ácidos fuertes (clorhídrico, nítrico, etc.)
 - Sales derivadas de bases débiles (CaCl_2 , MgSO_4 , etc.)
 - Sales amoníacas.

No todos los defloculantes son igualmente eficaces en su acción. Las adiciones sucesivas de un defloculante conducen a un mínimo de viscosidad para una determinada suspensión y este mínimo es diferente para otros defloculantes como lo muestra la figura 2-23

Donde se observa la variación de la viscosidad aparente de la superficie con respecto al porcentaje de defloculación añadido, a lo que se conoce como "diagrama de defloculación", que es de gran importancia en la elección del defloculante adecuado y optimización del proceso en aquellas etapas de producción en las que intervienen suspensiones.

El mínimo de viscosidad que se puede alcanzar depende también del contenido en sólidos de la barbotina, así como de la dureza del agua utilizada en la preparación de la suspensión.

La figura 2-24 muestra que para adiciones iguales de defloculante se obtienen menores viscosidades aparentes al aumentar el contenido de sólidos de la suspensión.

La dureza del agua ejerce una marcada influencia en la defloculación. Un aumento en la dureza va a la par con un aumento de la cantidad necesaria de defloculante para llevar la barbotina a su viscosidad de trabajo, como lo muestra la figura 2-25

Para aguas de alta dureza, se dá el caso en donde no se puede rebajar la viscosidad hasta un valor deseado con un determinado defloculante.

La defloculación de una barbotina preparada con agua muy dura (superior a 50 °F) puede resultar, por tanto, muy problemática.

Al añadir un exceso de defloculante, se puede presentar el fenómeno conocido como "sobredifloculación". Es decir, un aumento de la

viscosidad aparente con la adición de defloculante, que en realidad está floculado.

b).- Tixotropía:

Las suspensiones de arcilla y agua se comportan como fluidos tixotrópicos, lo que significa que su viscosidad aumenta con el tiempo una vez dejadas en reposo como lo muestra la figura 2-26

Al dejar en reposo una suspensión arcillosa, ésta adquiere cierta rigidez. Se forma por atracción intermolecular una red desordenada en todo el volumen (como lo muestra la figura 2-27) que desaparece por agitación debido a la debilidad de las fuerzas que lo sustentan.

2.4.2 Procesos de formado cerámico

Las proporciones óptimas de polvo y agua dependen del proceso de formado que se usa. Algunos procesos de formado requieren alta fluidez; otros actúan sobre una composición que tiene bajo contenido de agua. Por ejemplo, con cerca del 50% de agua, la mezcla es una pasta aguada que fluye como líquido. Al reducir el contenido de agua, se hace necesario aumentar la presión sobre la pasta para producir un flujo similar. Por tanto, los procesos de formado pueden clasificarse sobre la base de la consistencia de la mezcla en cinco categorías, como se resume en la tabla 2-9

En este trabajo de tesis, se obtendrá el producto cerámico en verde, siguiendo el proceso de vaciado en barbotina para la obtención de las muestras a estudiar.

2.4.3 Moldeo con barbotina

En este proceso se requiere que el material inicial tenga la forma de una pasta plástica, compuesta de finos polvos cerámicos mezclados con agua; su consistencia determina la facilidad para formar el material y la calidad del producto final.

Esta etapa del formado del producto cerámico en verde se describe en la figura 2-28 en donde se indica la secuencia de los pasos a seguir en un vaciado drenado, una forma del vaciado deslizante.

- Se vacía la suspensión (barbotina) en la cavidad de un molde de yeso.
- El agua de la suspensión es absorbida por el molde de yeso para formar una capa firme de un espesor adecuado en su interior.
- El exceso de suspensión que no perdió humedad en el molde, se drena fuera de él.
- Se seca la cáscara dura en el interior del molde.
- Liberación de la pieza formada en el molde para obtener finalmente el producto en verde

2.4.4 Tipos de pastas cerámicas

Las pastas pueden clasificarse, de manera general, en dos grandes grupos: las pastas porosas (no vitrificadas) y las pastas vitrificadas. Entrarían en el primer apartado aquellas pastas hechas con arcillas ferruginosas y también blancas para loza (aunque esta última es menos porosa que la anterior, aún lo es).

Entre las pastas vitrificadas hay las variantes del gres y de la porcelana.

Estos tipos de pastas son muy usados por los ceramistas y resultan fáciles de preparar artesanalmente.

Pastas de arcilla roja

Están formadas por arcillas ferruginosas (con alto contenido de hierro), lo que les da su color característico. Su cocción varía desde los 950 a los 1100 °C. De gran plasticidad son útiles para trabajos modelados a mano y en torno.

Fórmulas de preparación:

Arcilla roja 60, caolín 30, sílice 10.

Arcilla roja 85, arcilla refractaria 15

Pastas de loza

Son pastas porosas de color blanco o marfileño y necesitan de un vidriado posterior. Hay diversas clases de lozas: dura, mixta y blanda. La loza dura se cuece entre los 1180 y los 1300 °C en bizcocho, mientras que la temperatura de cocción del vidriado es de 1050 a 1180 °C.

Fórmula: caolín 50, cuarzo 40, feldespato 8, creta 2

La loza mixta se cuece en bizcocho a 1050 – 1180 °C y el vidriado de 1000 a 1100 °C.

La loza blanda tiene una cocción entre 960 y 1080 °C, tanto en el bizcocho como en el vidriado.

Fórmula: Arcilla de bola (ball clay) 48, sílice 34, caolín 12, creta 6

Pastas de gres

Estas pastas, después de cocidas son impermeables, vitrificadas y opacas. La temperatura de cocción va desde los 1150 a los 1300 °C y el color resultante puede ser gris, marfil, beige, marrón entre otros.

Su porosidad debe ser inferior al 3%.

Fórmula: Feldespato 40, arcilla refractaria 30, caolín 30.

Temperatura de cocción: 1250 °C

Fórmula: Arcilla refractaria 50, arcilla de bola (ball clay) 20, feldespato 15, sílice 15

Temperatura de cocción: 1280 °C

Pastas de porcelana:

Son pastas muy blancas, vitrificadas y translúcidas, cuando su espesor no es superior a 3 mm. su temperatura de cocción varía entre los 1250 y los 1460 °C.

Su componente principal es el caolín, aunque también entra en su composición el feldespato, que actúa como fundente y el cuarzo.

Se clasifica en dos tipos: porcelana dura y blanda.

En la porcelana dura, la pasta tiene una gran resistencia y se cuece a alta temperatura, entre los 1380 y los 1460 °C.

Fórmula: caolín 50, feldespato 25, cuarzo 25

Temperatura aproximada de cocción: 1450 °C

La porcelana blanda tiene menor resistencia y su temperatura de cocción oscila entre los 1250 y los 1300 °C.

Fórmula: caolín 54, feldespato potásico 26, cuarzo 18, bentonita 2

Temperatura de cocción: 1250 °C

Pastas refractarias

Son aquéllas que tienen un punto de fusión muy alto, por encima de los 1600 °C. Estas pastas deben poder aguantar repetidos choques térmicos sin deteriorarse y en su composición no debe encontrarse el hierro. Su color es variable después de la cocción.

Su utilización en la industria cerámica produce ladrillos, crisoles, placas para hornos y materiales aislantes.

Son pastas arcillosas mezcladas con chamota (40 al 60%). Esta procede de arcillas esquistosas carboníferas (arcillas petrificadas), que han sido trituradas y cocidas. La chamota reduce la contracción de la pasta y está formada con granos de diferente tamaño.

En la figura 2-29 se describen las pastas cerámicas mas usuales

2.5 SECADO

El agua juega un papel importante en la mayoría de los procesos tradicionales de formado cerámico. Pero en adelante ya no tiene ningún objeto y debe removerse del cuerpo de la pieza antes de quemarla. La contracción es un problema durante este paso porque el agua aporta volumen a la pieza y cuando se retira, el volumen se reduce. El efecto se puede ver en la figura 2-30

Al añadir agua inicialmente a la arcilla seca, ésta reemplaza simplemente al aire de los poros entre los granos cerámicos y no hay cambio de volumen. Al incrementarse el contenido de agua por arriba de cierto punto, los granos empiezan a separarse y el volumen aumenta, resultando una arcilla húmeda que tiene plasticidad y facilidad de formado. Al aumentar el contenido de agua, la mezcla se convierte eventualmente en una suspensión líquida de partículas de arcilla en agua.

El proceso inverso ocurre en el secado. Al remover agua de la arcilla húmeda, el volumen de la pieza se contrae. El proceso de secado ocurre en dos etapas, como se describe en la figura 2-30.

En la primera etapa, la velocidad de secado es rápida y constante, debido a que el agua de la superficie de la arcilla se evapora con el aire circundante; y el agua interior emigra, por acción capilar, hacia la superficie para reemplazarla. Durante esta etapa ocurre la contracción, con el riesgo asociado de deformación y agrietamiento debido a las variaciones del secado en diferentes secciones de la pieza. En la segunda etapa de secado, el contenido de humedad se ha reducido hasta que los granos cerámicos han quedado en contacto, y ocurre poca o ninguna contracción.

El proceso de secado se hace mas lento, como se puede ver en la gráfica de la velocidad decreciente.

En producción, el secado se realiza en cámaras donde se controla la temperatura y la humedad para lograr el programa apropiado de secado. Debe tenerse cuidado de no remover demasiado rápido el agua de la pieza, para evitar que se formen altos gradientes de humedad, haciendo el material mas propenso a las grietas. El calentamiento se hace normalmente por una combinación de convección y radiación usando fuentes infrarrojas. Los tiempos típicos de secado van desde 15 minutos para secciones delgadas, hasta varios días para secciones muy gruesas.

2.6 COCCION

La cocción de los artículos cerámicos es la etapa final y la mas importante en los procesos de fabricación, por lo que son de interés los cambios sufridos por las arcillas y otros materiales al elevar su temperatura. Durante esta etapa se obtienen la rigidez y la resistencia de la pieza. Durante el calentamiento, la arcilla se deshidrata eliminando el agua que forma parte

de la estructura cristalina de la arcilla y empieza la vitrificación, o la fusión, como lo muestran las figuras 2-31 y 2-32

La cocción de artículos cerámicos generalmente ocurre en tres etapas:

1.- Deshidratación.-

a).- Física 20 a 150 °C

b).- Química 150 a 600 °C

2.- Oxidación 350 a 950 °C

3.- Vitrificación seguida por fusión del material de 900 °C o más

En los productos de arcilla, estos períodos varían según el tipo e impurezas presentes y terminan generalmente a temperaturas cercanas a los 1200 °C, para la mayoría de los productos; excepto refractarios, el cemento y el vidrio. En el caso del cemento la cocción se lleva hasta fusión incipiente y para el vidrio hasta fusión completa.

Durante la cocción, una serie de reacciones y transformaciones toman lugar en las materias primas y, en general, las características del producto final dependen no solamente de las reacciones que ocurren, sino también de la forma en que se llevan a cabo.

Para la elaboración de piezas cerámicas y refractarios estructurales, la forma cerámica, la pieza en verde, se calienta para secar la cerámica, quemar los aglutinantes y plastificantes agregados, realizar cambios en la estructura de los minerales, vitrificar o ligar las partículas y densificar la masa.

La tabla 2-10 muestra los cambios que las piezas cerámicas a base de arcilla experimentan cuando se calientan.

CAPITULO 3

EXPERIMENTACION

Durante el desarrollo de esta sección se describen las diferentes etapas experimentales realizadas a nivel práctico, desde la selección de la materia prima, preparación de las barbotinas, moldeo, secado, cocción y evaluación del cuerpo cerámico, tal como se describe a continuación:

3.1 METODOLOGIA A SEGUIR PARA LA SINTESIS Y EVALUACION DEL CUERPO CERAMICO



3.2 SELECCIÓN Y ORIGEN DE LOS MATERIALES

Las materias primas seleccionadas son de las más utilizadas por las empresas en el ramo cerámico. Los proveedores más importantes de estas materias primas se muestran en la tabla 3-1. Para las formulaciones de cada cuerpo cerámico se seleccionaron 8 materias primas como se describe en la tabla anterior.

3.3 FORMULACIONES

Sobre la base de la investigación bibliográfica de las materias primas, se seleccionaron 8 materiales y con ellos se desarrollaron tres formulaciones para la síntesis del cuerpo cerámico tradicional, como lo muestra la tabla 3.2

Se observa que la cantidad de feldespato es grande debido a que se requiere formar abundante fase líquida durante la cocción para que permita catalizar el proceso de sinterización con la finalidad de obtener las propiedades deseadas en el producto final.

3.4 LAS PROPIEDADES TÍPICAS DE REFERENCIA EN LOS MATERIALES SELECCIONADOS

En esta sección se indican las propiedades típicas más importantes de las materias primas seleccionadas para la conformación del cuerpo cerámico, como se indica en las tablas 3-3, 3-4 y 3-5 para las arcillas, caolines y feldespatos respectivamente.

3.5 EL PRODUCTO EN VERDE

En esta etapa experimental se obtuvo el producto cerámico en verde según el proceso de vaciado en barbotina, siguiendo la técnica tradicional para la obtención de las muestras por analizar (F 1, F 2 y F 3)

A continuación se describe la técnica utilizada, aunque en la actualidad es relativamente fácil encontrar cualquier pasta cerámica ya preparada y lista para trabajar; es conveniente saber como preparar cualquier pasta necesaria para la conformación de la pieza.

En el comercio especializado en productos cerámicos, se encuentran las pastas húmedas y preparadas. A continuación se describe la técnica tradicional del ceramista:

- 1.- Troceado de terrones
- 2.- Trituración de gránulos
- 3.- Tamizado
- 4.- Pesado
- 5.- Volumen de agua
- 6.- Espolvoreado de la pasta en el agua
- 7.- Mezcla de arcilla – agua
- 8.- Reposo de la barbotina por 48 horas
- 9.- Filtrado de la pasta
- 10.- Vaciado en el molde
- 11.- Obtención del producto en verde

3.6 EL SECADO DEL PRODUCTO EN VERDE

Esta etapa del proceso es el punto de partida para iniciar mediciones en el comportamiento de la pieza, en lo que respecta a la reducción de volumen por la pérdida de agua, durante el secado y que se denomina contracción, encogimiento o merma.

Las arcillas en contacto con el agua se ablandan y aumentan de volumen, absorbiendo el líquido poco a poco. Por el contrario las arcillas húmedas se endurecen al contacto con el aire y, al mismo tiempo, su volumen disminuye con el secado.

Cuanto mas agua acepte una arcilla mayor será su contracción; y así las arcillas muy plásticas, al absorber mayor cantidad de agua, se contraerán mas que las arcillas menos plásticas, y durante la contracción en el secado, las partículas de arcilla se acercan entre sí al perder parte del agua, como se describe en la figura 2-30.

También las arcillas que contengan las partículas mas pequeñas encogerán mas que las arcillas con partículas grandes. Por lo tanto, la merma depende de la medida de las partículas y del volumen de agua que las separa.

Por otra parte, las materias primas no plásticas que se introducen en una pasta cerámica facilitan el secado, ya que éstas al no absorber tanta agua, se secan con mayor rapidez. Este secado se produce por capilaridad, así, a medida que se seca la superficie, el agua del interior sube hasta ésta, evaporándose poco a poco.

Las piezas secadas a temperatura ambiente, aún conservan humedad. Únicamente, mediante la introducción de las mismas en el horno, y

subiendo la temperatura arriba de 100 °C , puede considerarse que las piezas están realmente secas, pero hay que recordar que solo ha desaparecido el agua de constitución física.

Hay que recordar que en esta etapa se elimina el agua de constitución física que se utilizó en la barbotina y que sirvió de vínculo para darle forma al polvo cerámico en su moldeo correspondiente como se mencionó con anterioridad.

Aquí las formulaciones F 1, F 2 y F 3, en verde, se secaron en un horno marca Felisa modelo 291-A a 120 °C durante 24 horas.

Los resultados se presentan en la tabla correspondiente a la sección 3.8.4.2

La longitud de las piezas se determinó con un vernier digital Mitutoyo modelo CD24 y el cálculo de su contracción lineal para esta etapa del proceso es:

$$\% C = \frac{L 1 - L 2}{L 1} \times 100$$

en donde:

% C es el porcentaje de concentración lineal

L 1 es la longitud inicial de la pieza

L 2 es la longitud final de la pieza

3.7 COCCION

Como se mencionó en la sección 2.6, la cocción es la etapa mas importante en la manufactura de los productos cerámicos. En lo que respecta a la parte experimental, los cuerpos cerámicos en seco, como se indica en la sección anterior, se cocieron de 25 °C a 1200 °C con un gradiente de 25 °C / min., en un horno marca Lindberg /Blue M, modelo Box furnace 1700 max, con el objetivo de describir las reacciones que ocurren durante la cocción de las piezas cerámicas.

3.8 EVALUACION Y MEDICION EN EL CUERPO CERAMICO

Después de que se hicieron las formulaciones de los materiales seleccionados, se procedió a su evaluación correspondiente, así como las mediciones de cada uno de los cuerpos cerámicos tal como se indica a continuación:

3.8.1 Distribución del tamaño de partícula

Este estudio del tamaño de partícula en caolines y arcillas se realiza en un analizador sedigraph 5100. En este análisis se colocan 100 grs. de la muestra seca en 10 ml. de agua, sometiendo la suspensión a un proceso de agitación mecánica y ultrasonido durante 5 min., para su análisis posterior en el equipo.

3.8.2 Area superficial

El área superficial específica de los caolines y las arcillas se determina por el método BET en un equipo Gemini 2375 de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se pesa 1 gr. de polvo para analizar
- Se desgrasifica la muestra a 200 oC, durante un tiempo de 2 horas.
- Se coloca la muestra en el equipo haciéndose la determinación usando nitrógeno líquido.

3.8.3 Análisis químico

El análisis químico de las muestras seleccionadas se obtienen por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X; siendo uno de los equipos utilizados para este propósito el Espectómetro secuencial de rayos X.

3.8.4 Evaluación física

En esta etapa experimental, se evaluó en las muestras su % de absorción de agua, el % de contracción y su resistencia mecánica a la flexión.

- ❖ El porcentaje de absorción de agua:

Es muy común que en esta evaluación se determine primero el porcentaje de absorción, debido a que la absorción de agua de la muestra cocida se relaciona con su porosidad. Esta propiedad se determina de acuerdo a la norma europea EN-99 con la siguiente fórmula:

$$\% A = \frac{W2 - W1}{W1} \times 100$$

en donde:

% A es el porcentaje de absorción de agua

W1 es el peso de la muestra seca

W2 es el peso de la muestra húmeda

❖ El porcentaje de contracción lineal:

El porcentaje de contracción lineal total mide el cambio dimensional de la muestra durante la etapa de cocción, debido a la pérdida de agua tanto higroscópica como de constitución, así como la pérdida de materia orgánica, densificación, desgrasificación, cambios alotrópicos, etc.

La longitud de las piezas se mide con un vernier digital marca Mitutoyo, modelo CD-24, usando la fórmula:

$$\% C = \frac{L 1 - L 2}{L 1} \times 100$$

en donde:

% C es el porcentaje de concentración lineal

L 1 es la longitud inicial de la pieza

L 2 es la longitud final de la pieza

❖ El ensayo estático de flexión:

Finalmente, se determina la resistencia mecánica a la flexión de las muestras en verde, en seco y en bizcocho.

Esta propiedad se determina siguiendo la norma europea EN-100 usando la siguiente fórmula:

$$S = \frac{3 F L}{2 b h^2}$$

en donde:

- S es la resistencia a la flexión
- F es la carga en la fractura en N de la pieza
- L es la distancia entre los rodillos de apoyo en mm.
- b es el ancho de la pieza en mm.
- h es el espesor de la pieza medida después del ensayo en la sección de rotura, en mm.

3.8.5 Análisis térmico diferencial / termogravimétrico

El comportamiento térmico de las muestras se determina mediante el método de análisis térmico diferencial / termogravimétrico.

Este estudio se realiza en equipo TA Instruments, modelo Thermal Analyst 2100; en donde los datos del procedimiento son:

Rango del calentamiento:	25 °C a 1200 °C
Velocidad de calentamiento:	20 °C / min.
Tipo de crisol:	Platino
Atmósfera:	Aire (100 ml. / min.)
Referencia:	Alúmina

3.8.6 Microscopía electrónica de barrido

La microscopía en las muestras F1 , F2 y F3, se realiza por la técnica de microscopía electrónica de barrido en el microscopio electrónico marca Philips, modelo XL-30.

Aquí se visualizan las micrografías de las muestras (F1 , F2 y F3), analizadas en la zona de fractura y fuera de ella a diferentes aumentos.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSION

En el presente capítulo se discutirán los resultados obtenidos en la parte experimental correspondiente al análisis de las formulaciones establecidas, según el siguiente orden:

4.1 EL ANALISIS QUIMICO

El análisis químico de las materias primas está representado en la tabla 4-1 para las arcillas, caolines y feldespato.

En lo que respecta a la familia de las arcillas, la arcilla 2 tiene un contenido mayor de SiO_2 y Al_2O_3 con respecto a la arcilla 1.

El color de las arcillas es beige, debido al contenido de Fe_2O_3 .

Para el grupo de los caolines se observa una diferencia considerable en el contenido de SiO_2 y Al_2O_3 con relación a las arcillas; siendo muy superior en los tres caolines utilizados.

Los caolines tienen una coloración blanca después del quemado, debido a su bajo contenido de Fe_2O_3 , permaneciendo constante la composición de TiO_2 .

El feldespato utilizado se caracteriza por tener un contenido de SiO_2 muy superior al de caolines y arcillas, con una mezcla de óxidos alcalinos de sodio y potasio alto.

El análisis químico para las formulaciones F1, F2 y F3 ; se determinó por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X, utilizando un espectro secuencial de rayos X, marca Philips, modelo X' unique II

La tabla 4-2 resume este análisis.

Con referencia al SiO_2 y Al_2O_3 , se observa que aún cuando hay diferencias considerables entre cada una de las formulaciones individuales, el análisis químico comparativo entre las materias primas y las formulaciones, revela que solamente difieren en 4.8 % y para el K_2O , solo varía ligeramente; mientras que para el Al_2O_3 hay diferencias considerables.

Al comparar la tabla 4-2 con la tabla 2-8, correspondiente al análisis químico de las arcillas blancas, se observa que la composición química de las formulaciones F1, F2 y F3 es casi similar al de estas arcillas.

Después de la cocción a 1200°C , la coloración de las muestras es marfil, en lugar de ser blanca en F1 y F2; no así en F3 ; esto se debe al contenido de Fe_2O_3 en ellos.

Al analizar la tabla 4-2 , el % de Fe_2O_3 es de 1.21 % en las muestras F1 y F2, sin embargo en la muestra F3 es de 0.83 %. Lo anterior se debe a que cuando el contenido de Fe_2O_3 sobrepasa el 1 % , el color es marfileño; y cuando es menor al 1 % , conserva su coloración blanca.

4.2 EVALUACION FISICA

Como ya se estableció en la sección 3.8.4, en donde se especifica la forma de evaluar los parámetros físicos tales como % de absorción de agua, el % de contracción y la resistencia mecánica a la flexión de las

muestras según las secciones 3.8.4.1 , 3.8.4.2 y 3.8.4.3, los resultados así obtenidos de estos parámetros son presentados en la tabla 4-3.

4.3 ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL / TERMOGRAVIMETRICO

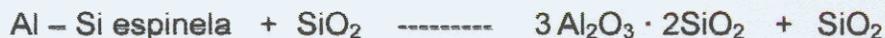
En esta etapa experimental, las figuras 4.1 , 4.2 y 4.3 muestran las curvas ATD / TG para las formulaciones F1 , F2 y F3.

Al analizar las figuras se puede concluir que ocurren los siguientes procesos o reacciones:

- ◆ El primer proceso ocurre con pérdida de masa aproximadamente a 525°C; siendo un proceso endotérmico, en donde la masa que se pierde es agua inherente a la estructura de la caolinita llamada comúnmente como agua de estructura o de constitución. Este efecto de pérdida de agua origina la formación de metacaolinita.
- ◆ El siguiente proceso ocurre aproximadamente a 1000 °C sin pérdida de masa, siendo exotérmico; y es provocado por el acomodamiento de los iones oxígeno que están dentro de la estructura de la metacaolinita, dando lugar a la formación de una espinela de aluminio – silicio, como se muestra en la reacción



- ◆ A los 1200 °C, ocurre el tercer proceso con una reacción exotérmica a masa constante, en donde se forma la mulita; como se describe en la siguiente reacción:



Esta etapa del proceso no es visible en las gráficas debido a la velocidad de calentamiento que se estableció y que no permitió la formación de esta fase.

La curva de cocción se puede ver en la figura 4-4.

4.4 LA MICROESTRUCTURA DE LAS FORMULACIONES

La microestructura se realizó mediante la técnica del microscopio electrónico de barrido.

En la tabla 4-4 se presenta la relación de figuras que indican el área de las muestras en donde se efectuó la microscopía.

Las micrografías de las formulaciones cocidas a 1200 °C se realizaron utilizando aumentos de 500, 1000, 2000 y 5000 con electrones retrodispersados.

Como se indica en la tabla 4-4, las figuras A-1 a la A-7, están referidas a la muestra F1, las figuras A-8 a la A-17 están referidas a la muestra F2 y las figuras A-18 a la A-26 corresponden a la muestra F3

El análisis de las muestras en la fractura nos muestra el efecto cortante del ensayo mecánico de flexión, siendo más pronunciado en la muestra F2, en donde se observan algunas partículas de titanio presentes; así como el efecto de la vitrificación con huellas de fusión de la anortoclasa en la microestructura de la pieza.

En el análisis de las muestras pulidas se observa una superficie más regular y compacta en la muestra F2, no siendo así en la muestra F3 que presenta una microestructura granular y poco densa, con algunas partículas de anortoclasa.

Finalmente; en el análisis de las figuras, se observa en la superficie una microestructura más regular con granos más finos en una matriz vítrea e incrustaciones de partículas de sílica y la presencia aislada de partículas de titanio.

En el Apéndice B se presentan las difractoramas correspondientes a las microestructuras analizadas en la fractura, pulidas y área superficial.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

1. Como la resistencia mecánica de un cuerpo cerámico nos indica su resistencia a la ruptura cuando se le aplican fuerzas mecánicas bajo diferentes condiciones, en este sentido la resistencia depende de la conexión de sus partículas y de la resistencia a la presión de los granos individualmente.

La mayor parte de los artículos o productos cerámicos, consisten de partículas sólidas unidas por un aglutinante vítreo, de cuya naturaleza depende grandemente la resistencia del artículo a varias temperaturas.

Puesto que la unión con el aglutinante es producida por la combinación de los constituyentes de la mezcla original, la resistencia depende de la cantidad de aglutinante, en este caso la fase vítrea y de los fundentes presentes en la masa que promovieron su formación.

En un cuerpo cerámico cocido habrá mayor resistencia mecánica en cuanto mayor sea la cantidad de fundente presente, siempre y cuando la cocción sea a una temperatura suficientemente alta para que los fundentes actúen y se forme una cantidad suficiente de fase vítrea

Lo anterior explica el porqué las formulaciones analizadas tienen cantidades de fundentes elevadas, que oscilan entre 33 % para F3, 43.5 % para F1, y mayor para F2, que es del 44.5 %. Ahora, con respecto al sílice; F3 tiene casi el doble que F1 y F2. De esto concluimos, que entre mayor sea la cantidad de fundente (feldespato), y menor la cantidad de sílice en nuestras

formulaciones; la resistencia a la flexión será mayor, por lo que será conveniente balancear estos componentes para obtener el producto óptimo requerido.

En el cuerpo cerámico, la adición de sílice reduce la contracción por secado del cuerpo, así mismo la plasticidad. Esto permite hacer al cuerpo permeable, permitiendo la salida de gases durante la cocción, sin afectar el cuerpo.

Durante el período de vitrificación, éste se combina con los óxidos básicos del fundente para formar la fase vítrea.

2. Este estudio de las propiedades de las mezclas de feldespatos, caolines, arcillas y sílice; forzosamente nos lleva a los diagramas de fases ternario de los sistemas $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2$ y $NaO - Al_2O_3 - SiO_2$; y aún cuando en los procesos de cocción a que se someten las formulaciones de pastas cerámicas de este tipo (nuestro caso), no se llega al equilibrio; nos sirve de guía para la investigación de nuevas formulaciones.

Según los resultados de este estudio, las propiedades físicas de los cuerpos cerámicos formulados se pueden relacionar con su composición química con referencia al diagrama de fases ternario $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2$ representado en la fig. 5-1 que fue la base de nuestras formulaciones.

En esta figura, la línea b - c es la línea básica para la formulación de estas pastas cerámicas.

En la zona 1 tenemos las pastas con mayor resistencia mecánica.

En la zona 2 tenemos las pastas vitrificadas y translúcidas.

En la zona 3 están las pastas con mayor resistencia al choque térmico.

El resto de las zonas marcadas en el diagrama, indican también las composiciones más útiles para los tres tipos de pastas usadas comúnmente.

- Vitrificadas
- Semivitrificadas o semi – vítreas
- Pastas porosas

3. El análisis térmico diferencial / termogravimétrico como se discutió en la sección anterior, nos confirma las reacciones que ocurren durante la conformación de un cuerpo cerámico. Dependiendo de las condiciones de cocción, estas reacciones o etapas del proceso pueden ser tres para nuestro caso: F1 , F2 y F3

- ❖ A 525 °C se pierde el agua que es inherente a la estructura de la caolinita, originándose la formación de la metacaolinita.
- ❖ A 1000 °C se acomodan los iones oxígeno en la estructura de la metacaolinita, formándose una espinela aluminio – silicio. A esta temperatura se fusiona la anortoclasa, catalizando la sinterización y densificando al cuerpo cerámico.
- ❖ Al cambiar las condiciones de cocción, como se puede apreciar en la figura 5.2, para un gradiente de 10°/min y en una atmósfera de nitrógeno de 1200 °C , se visualiza una reacción exotérmica a masa constante, formándose la mulita.

Para estas condiciones se obtiene una microestructura muy densa y compacta formándose una matriz vítrea, sílice residual (cristobalita) y mulita.

Para las condiciones de cocción de 20°/min de gradiente y en atmósfera normal, no aparece el pico exotérmico donde se forma la mulita, esto es debido a la velocidad de calentamiento.

Concretando, los factores de que depende la resistencia mecánica de un cuerpo cerámico son:

- a) Composición química y mineralógica.
- b) Tamaño y forma de sus partículas
- c) Procesamiento.
- d) Las reacciones durante el proceso de cocción, las cuales definirán la composición mineralógica final del cuerpo cerámico.

REFERENCIAS

- 1.- Pat L. Mangonon, Ph. D. PE., FASM., "Ciencia de Materiales, Selección y Diseño", Prentice Hall, 1999.
- 2.- Ceramic Tile Institute, "Ceramic tile institute's manual", (1991).
- 3.- William. F. Smith, "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales", Mc. Graw Hill, 1998.
- 4.- Singer, F., Singer, S., "Cerámica Industrial", (1976).
- 5.- Donald R. Askeland, "La Ciencia e ingeniería de los materiales", Mc. Graw Hill.
- 6.- Escardino, A., Amoros, J.L., Enrique, J.E., "Estudio de pastas de gres para pavimentos", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 1, 17-24, (1981).
- 7.- Peter A. Thorton, Vito J. Colangelo, "Ciencia de Materiales para ingeniería", Prentice Hall, 1985.
- 8.- Chakravorty, A.K., Ghosh, D.K., "Kaolinite – mullite reaction series: the development and significance of a binary aluminosilicate phase", Cerámica Información, 202, 14-9, (1994)
- 9.- Richard A. Flinn, Paul K. Trojan, "Materiales de ingeniería y sus aplicaciones", Mc. Graw Hill, 1979.

- 10.- Bowen, N.L., Greig, J.W., "The system: $Al_2O_3 - SiO_2$ ", Journal of the American Ceramic Society, 7, 238-254, (1924).
- 11.- Rafael Galindo Renau, "Pastas y Vidriados", Faenza Editrice Ibérica, 1994.
- 12.- Settembre, D., "Gresificación y microestructura en pastas de gres porcelánico", Cerámica Información, 225, 49-57, (1999).

FIGURAS

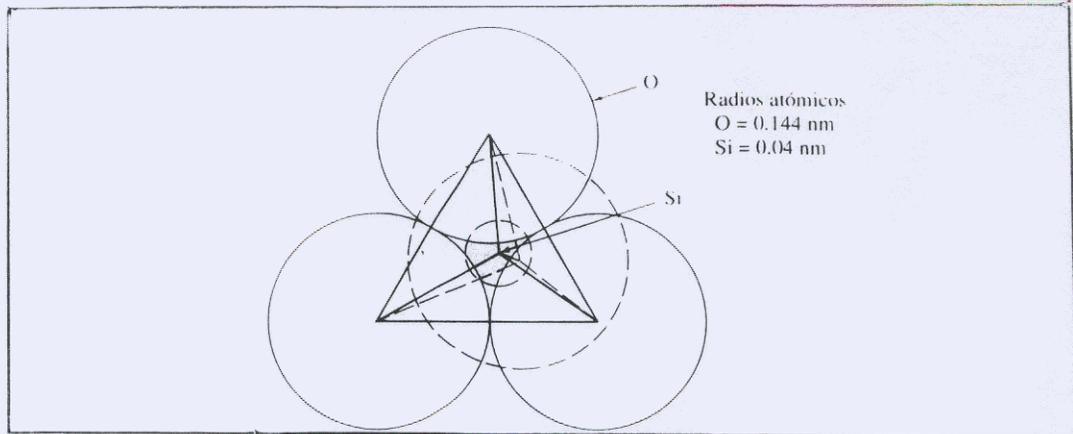


Fig. 2-1 Tetraedro de silicato

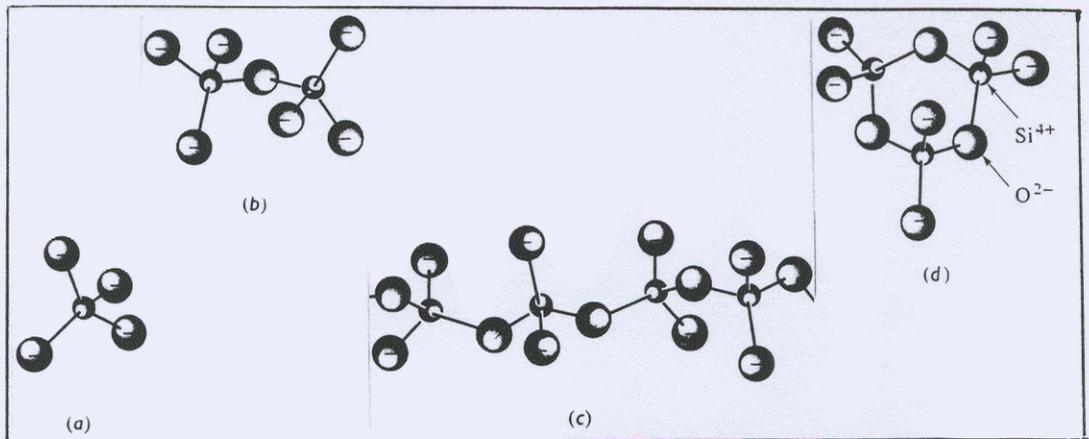
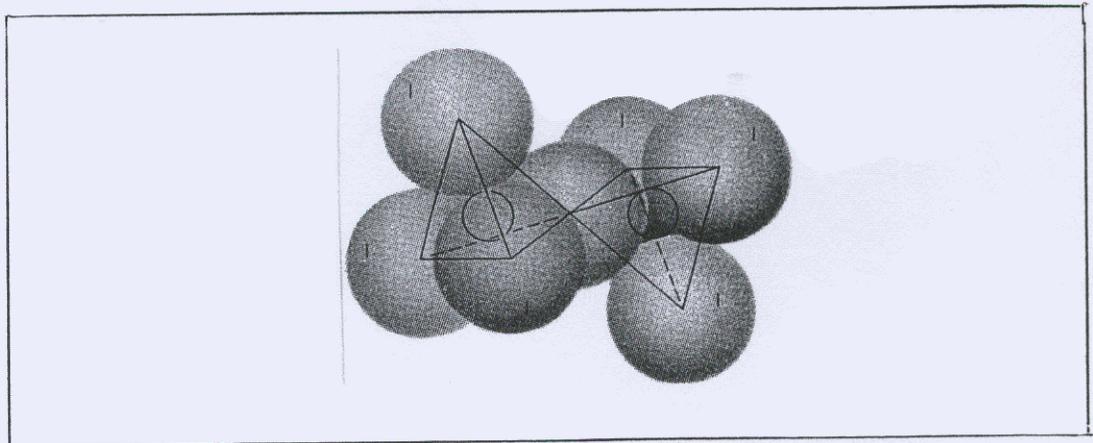
Fig. 2-2 Disposición de los tetraedros de sílice
(a) Isla de ortosilicato, (b) Isla de piroxilicato, (c) Cadena, (d) Anillo

Fig. 2-3 Unidades tetraédricas dobles de silicato

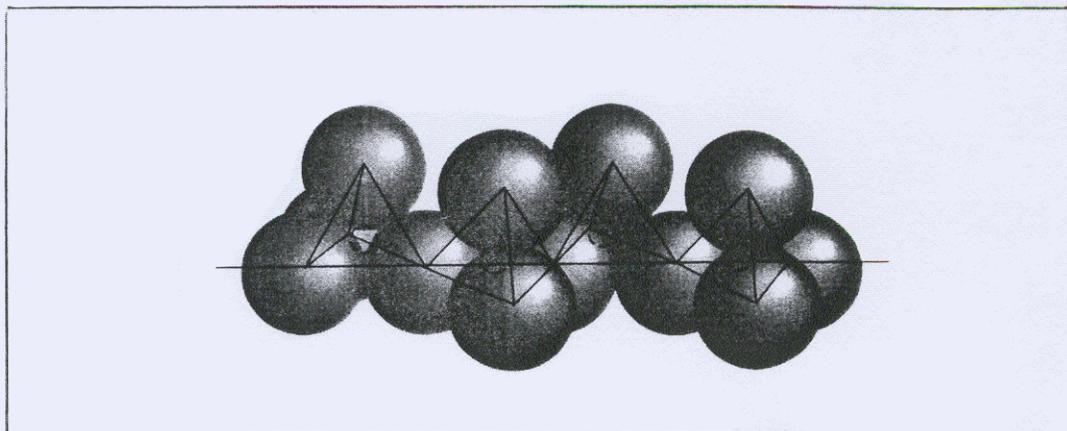


Fig. 2-4 Cadenas simples de silicato

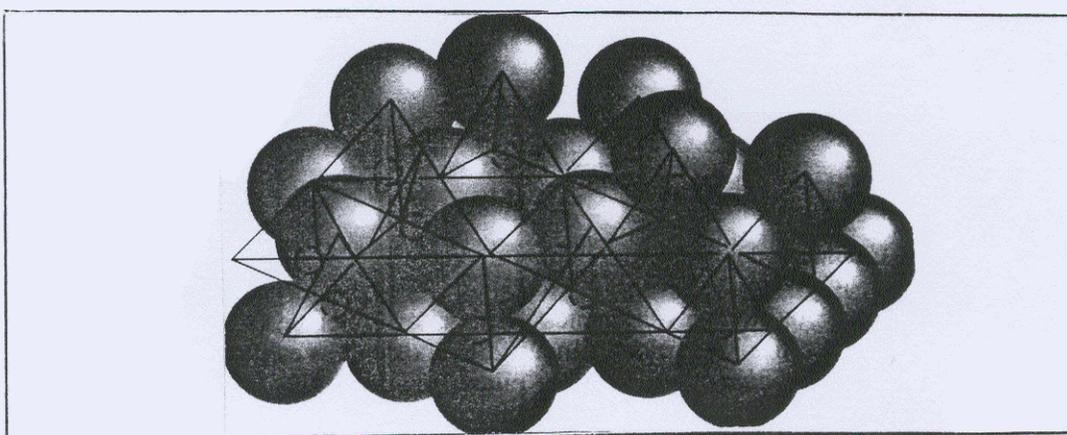


Fig. 2-5 Cadenas dobles de silicato

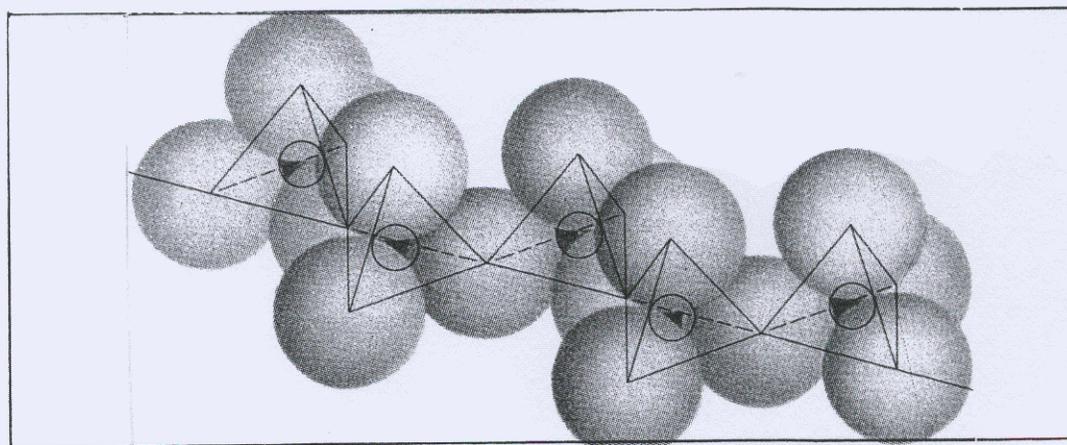


Fig. 2-6 Estructuras en cadena

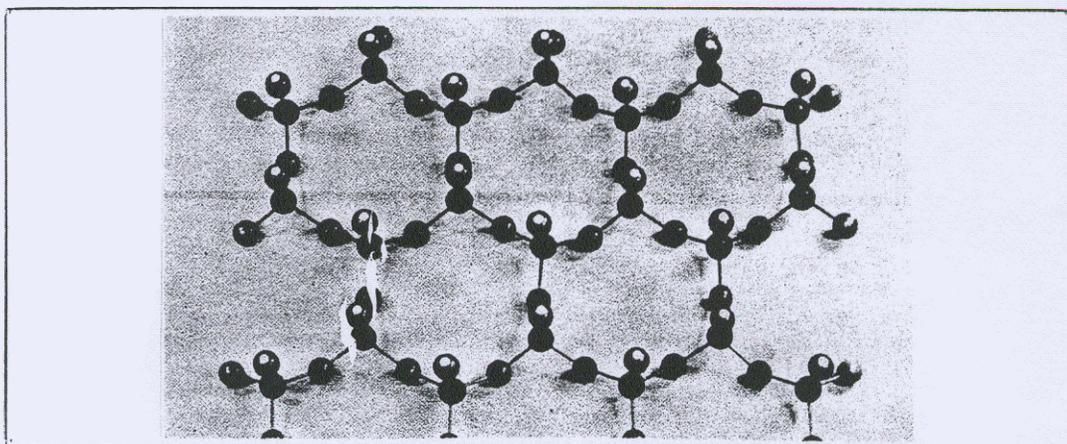


Fig. 2-7 Estructura de silicato en forma laminar

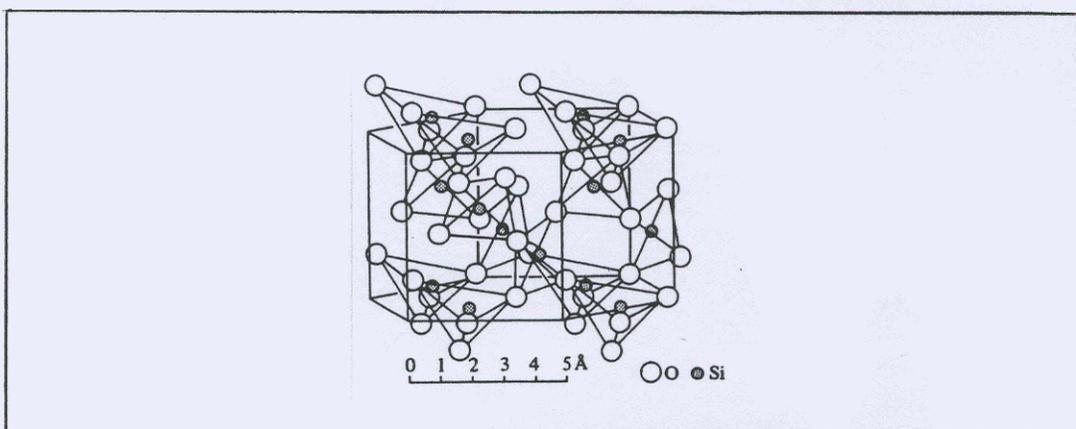


Fig. 2-8 Estructura reticular del SiO_2 (cuarzo)

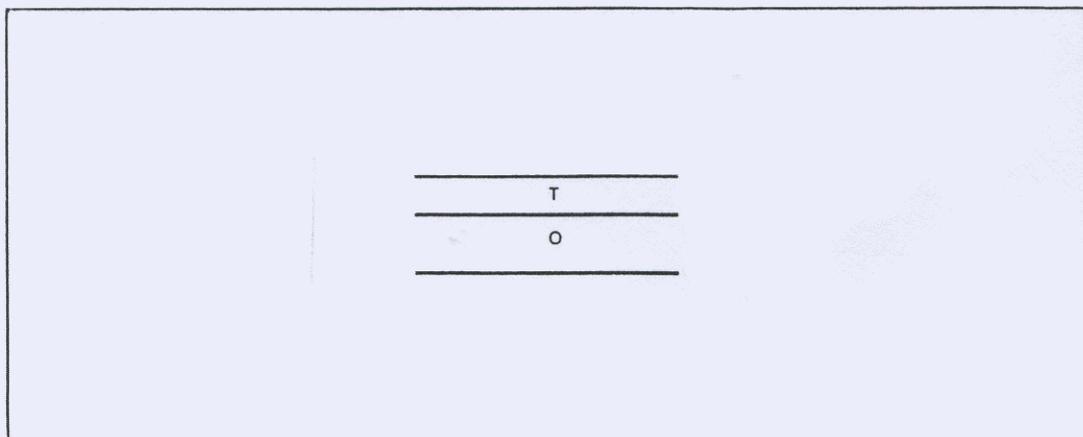


Fig. 2-9 Representación planar de una capa octaédrica de Al una de tetraedros Si - O

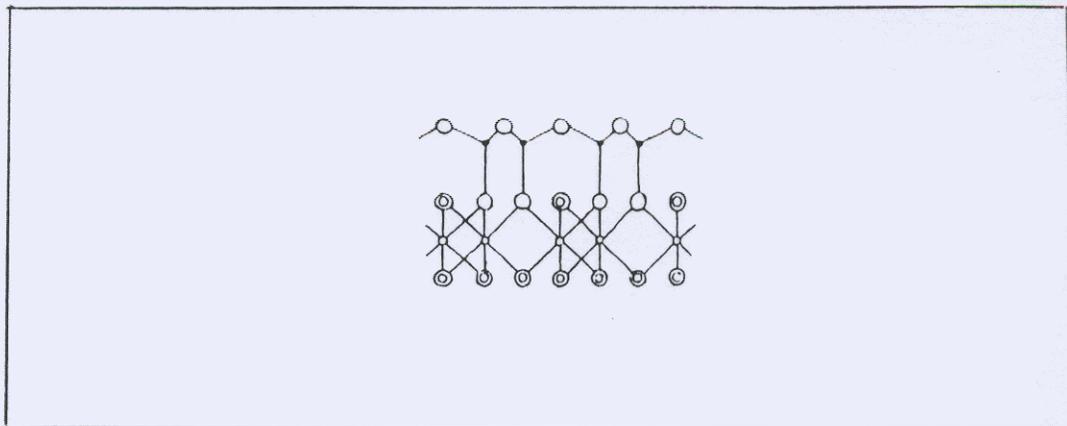


Fig. 2-10 Representación espacial

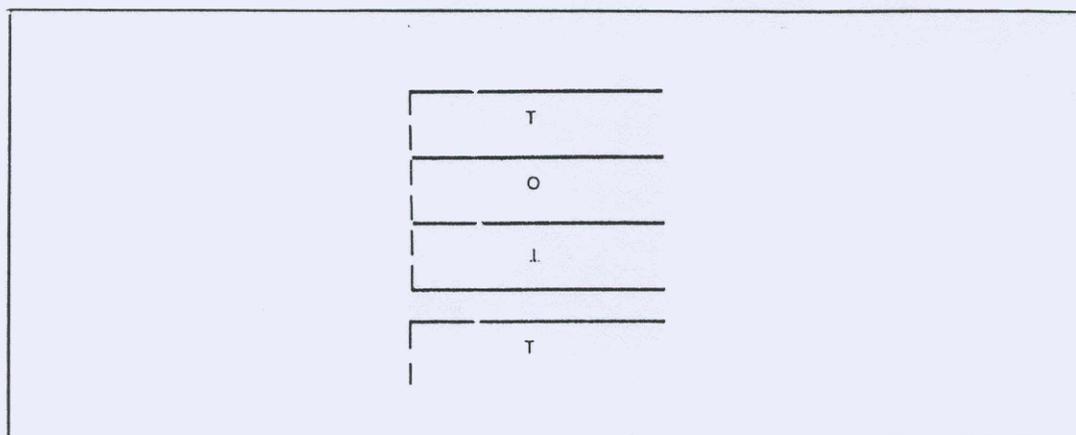


Fig. 2-11 Estructura esquemática. Grupo de la Mica

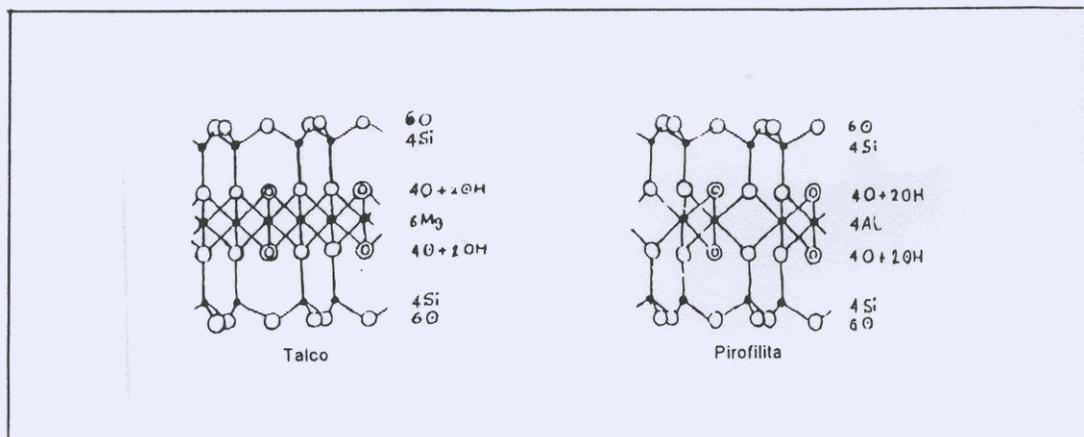


Fig. 2-12 Estructura del talco y pirofilita

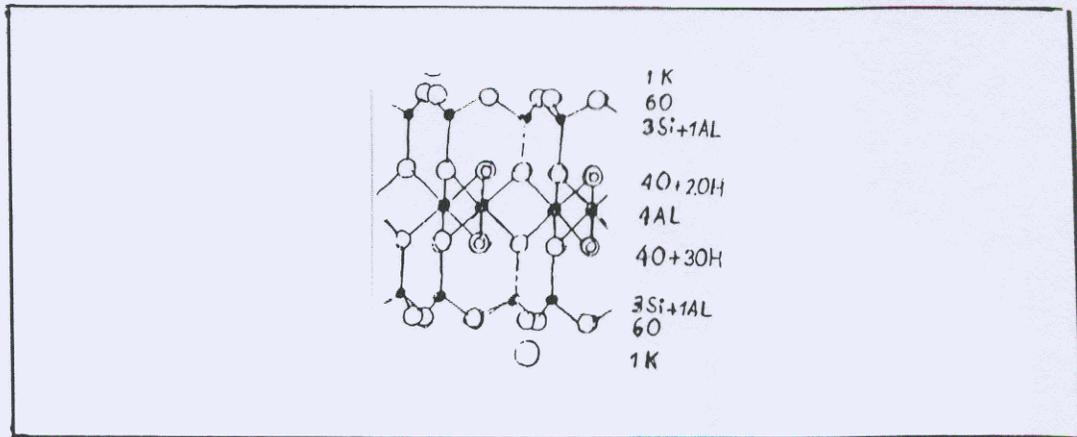


Fig. 2-13 Estructura simplificada de la moscovita

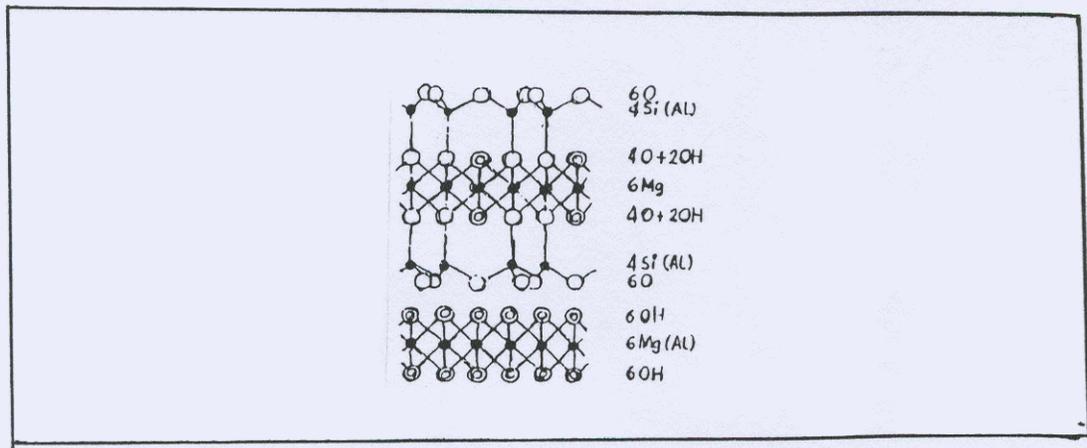


Fig. 2-14 Estructura simplificada de la clorita



Fig. 2-15 Arcilla de china

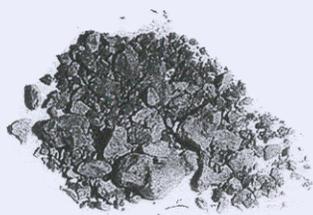


Fig. 2-16 Arcilla de bola



Fig. 2-17 Arcilla para loza



Fig. 2-18 Arcillas refractarias



Fig. 2-19 Arcilla para gres

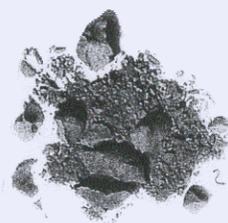


Fig. 2-20 Arcillas rojas



Fig. 2-21 Bentonita

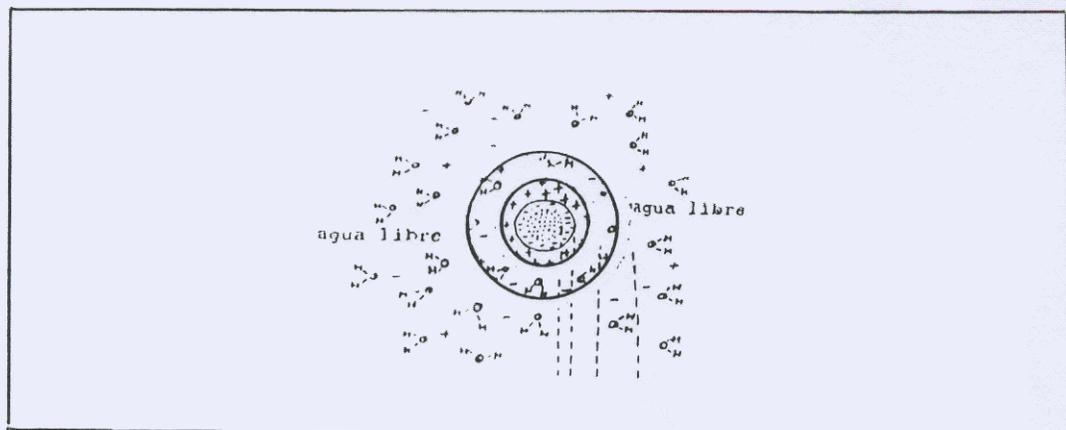


Fig. 2-22 Micela

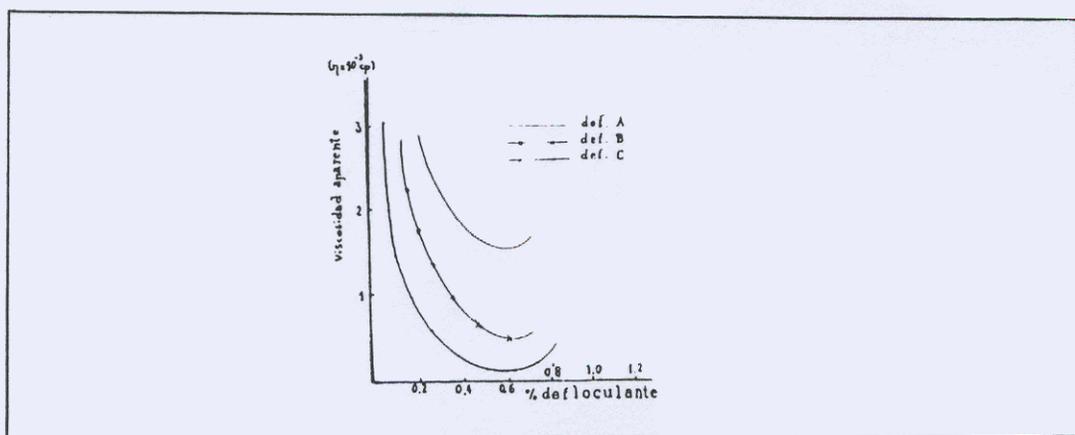


Fig. 2-23 Curvas de defloculación de diferentes defloculantes

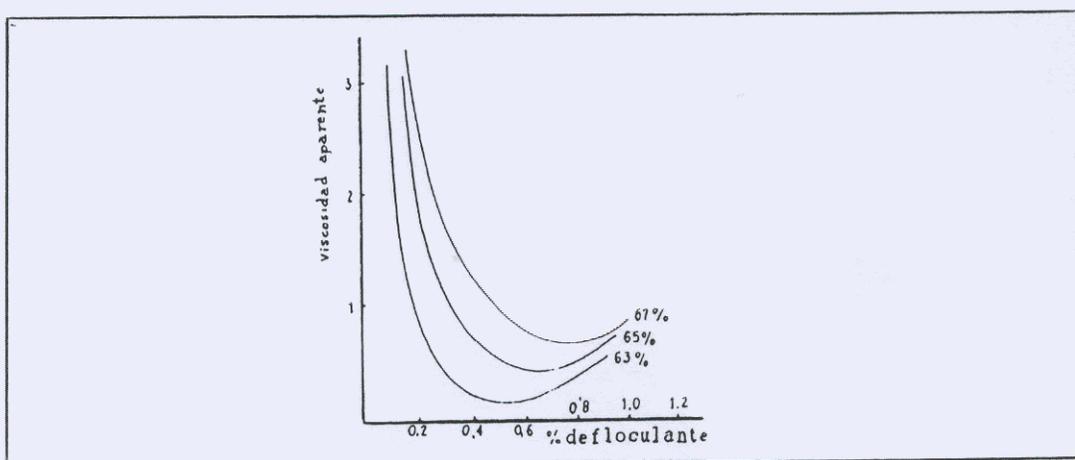


Fig. 2-24 Efecto del contenido de sólidos

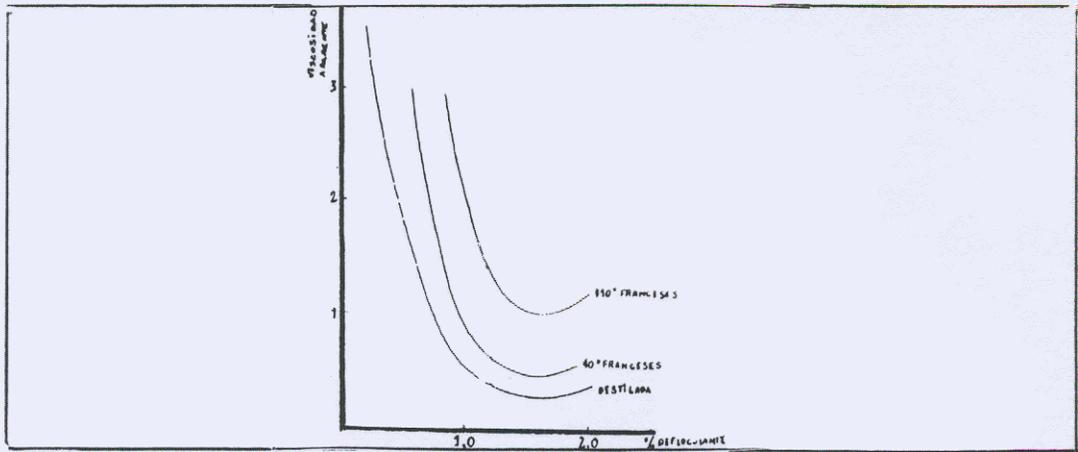


Fig. 2-25 Efecto de la dureza del agua

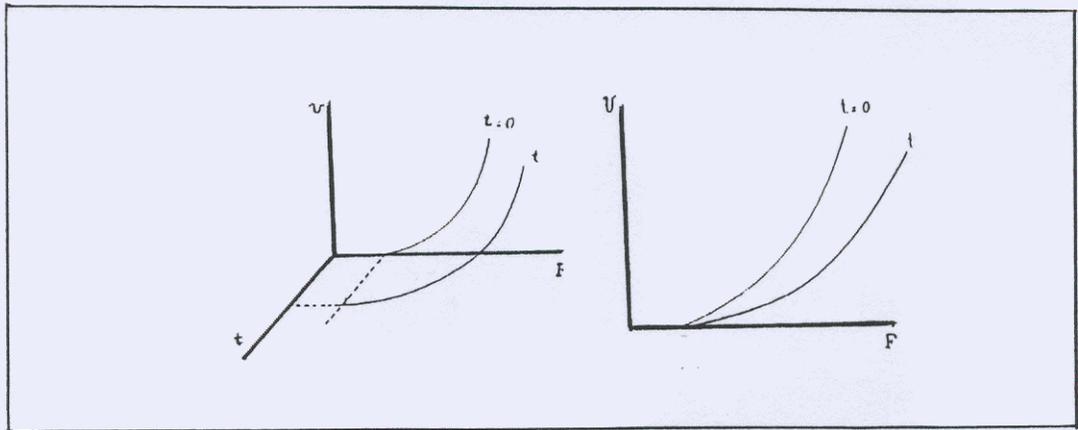


Fig. 2-26 Reograma de un fluido tixotrópico

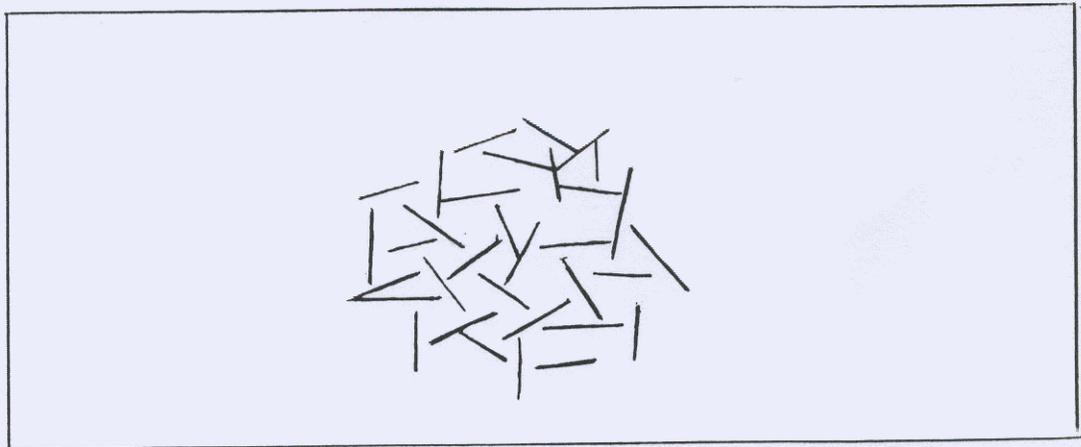
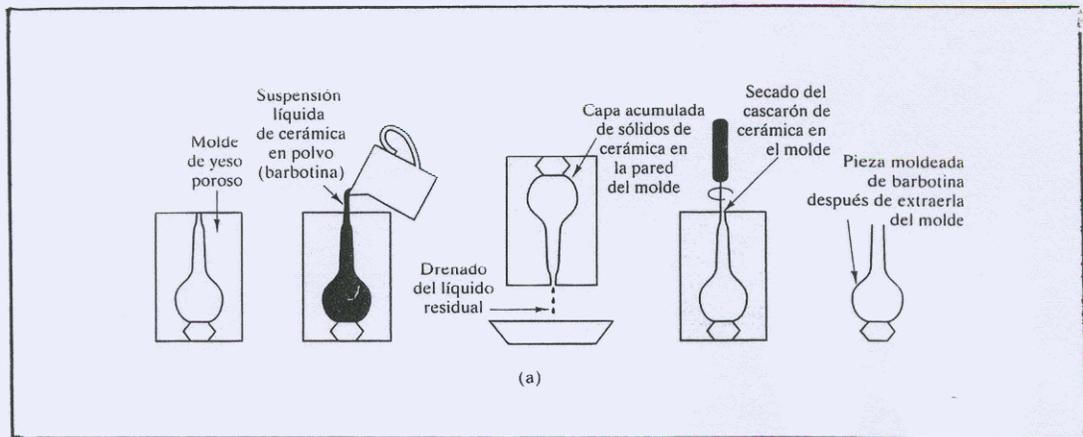
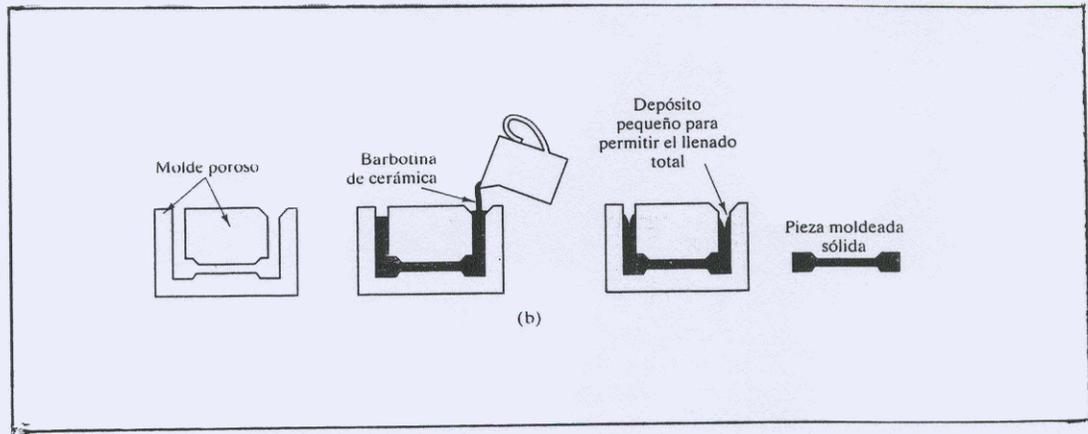


Fig. 2-27 Tixotropía: estructura tipo castillo de naipes



(a) Vaciado por drenado



(b) Vaciado sólido

Fig. 2-28 Proceso de vaciado de barbotina cerámica

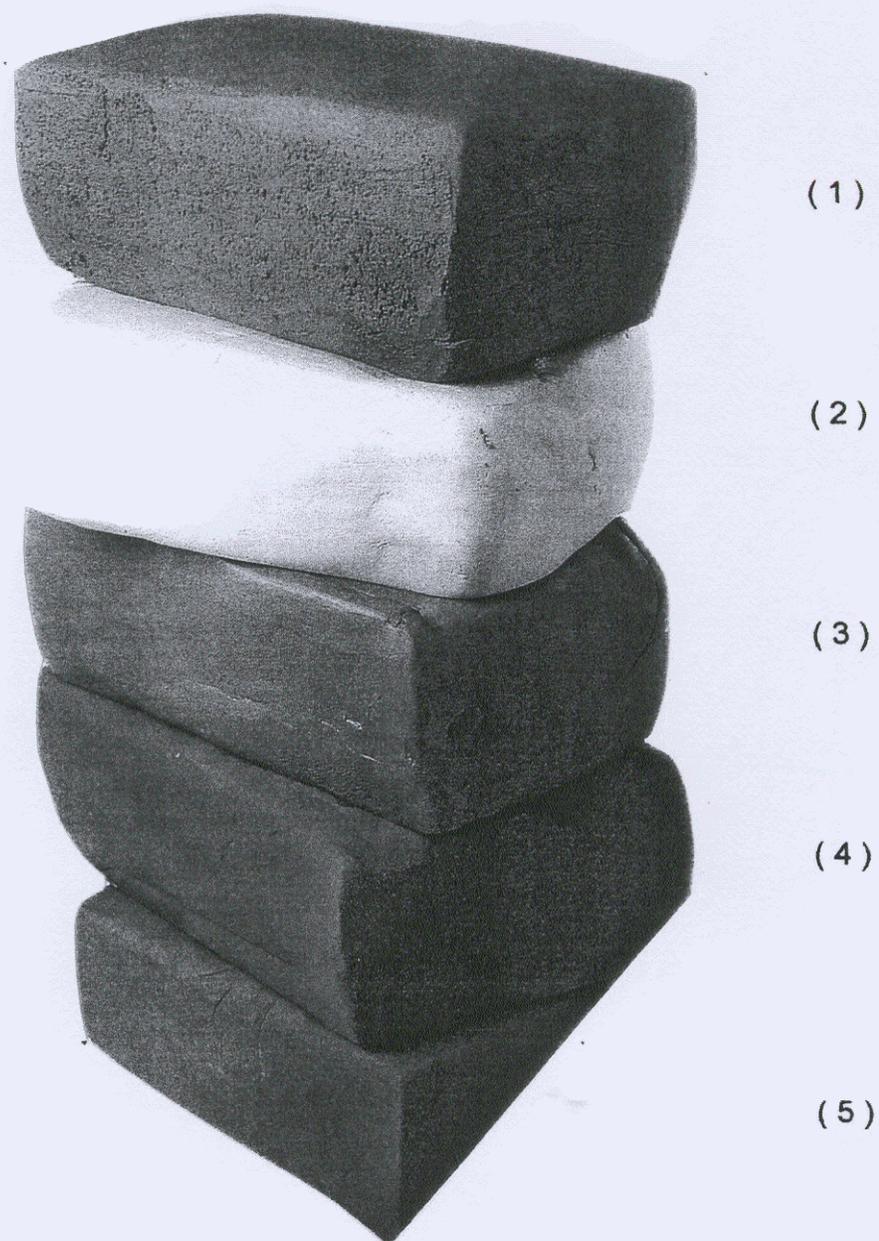


Fig. 2-29 Pastas cerámicas más usuales

- (1) Pasta chamotada (2) Porcelana (3) Loza
(4) Pasta de arcilla roja (5) Gres

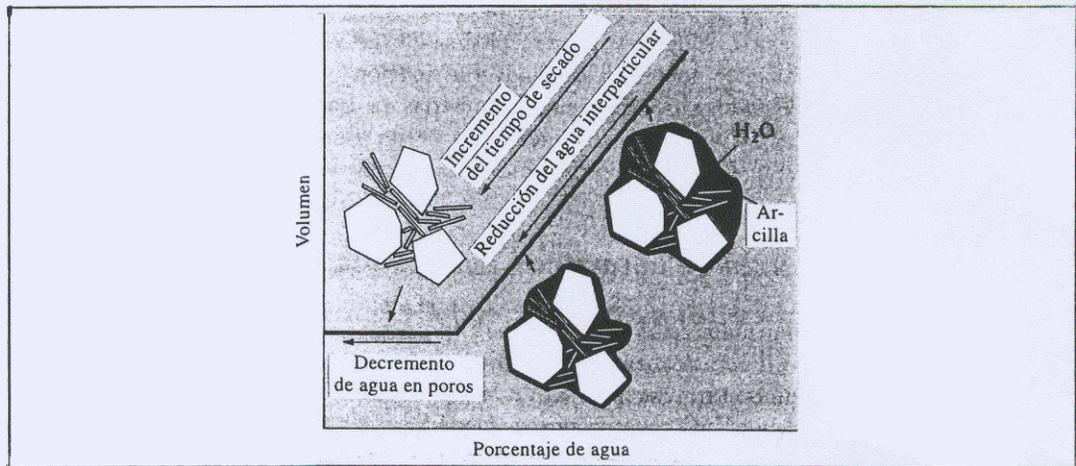
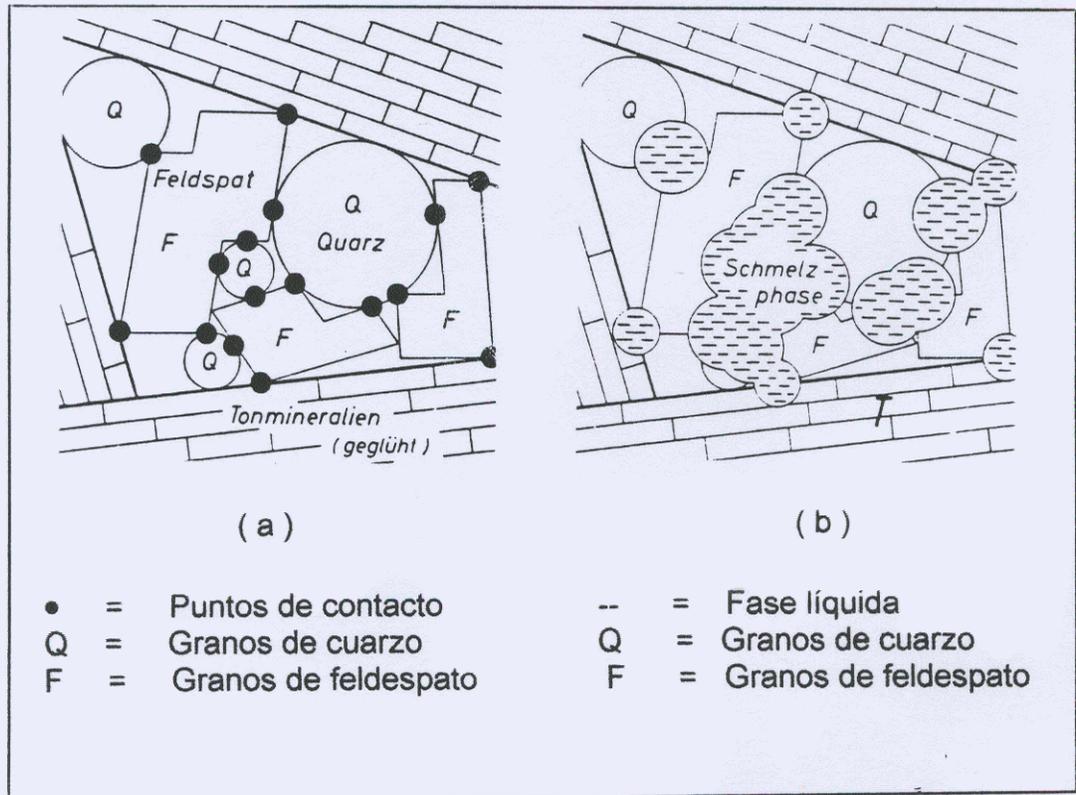


Fig. 2-30 Cambio de volumen de un cuerpo cerámico al eliminar la humedad durante el secado



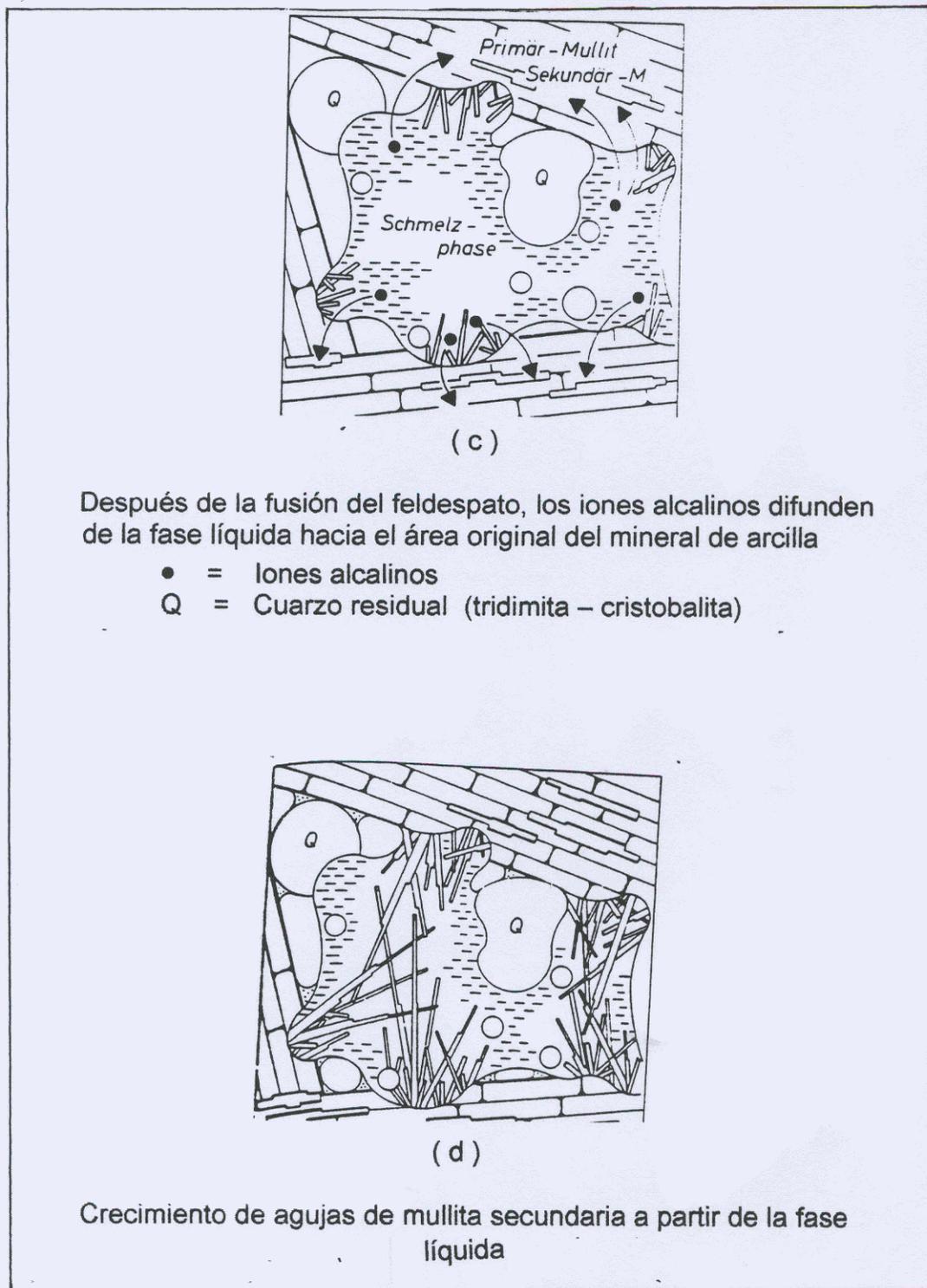


Fig. 2-31 Etapas de la vitrificación y densificación de una pieza cerámica durante la sinterización. Representación esquemática de la acción del feldespato como fundente.

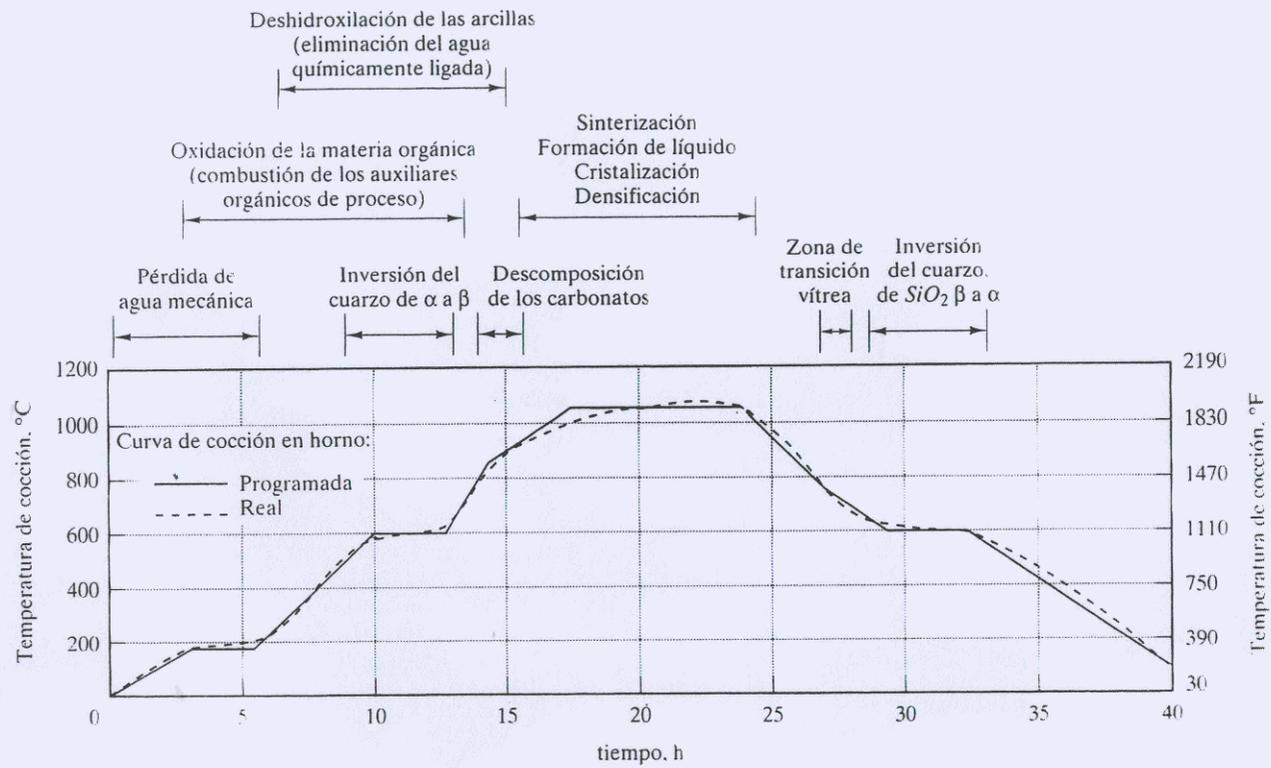


Fig. 2-32 Curva de cocción en horno

Fig. 4.1

Análisis térmico diferencial / termogravimétrico para la muestra F1

Sample: M1
Size: 13.0469 mg
Method: INDUSTRIA
Comment: RAMPA 20°C/MIN 1200°C, AIRE 100 ML/MIN

TGA-DTA

File: C:\MARES.001
Operator: ANABEL ALVAREZ MENDEZ
Run Date: 10-Jul-03 17:59

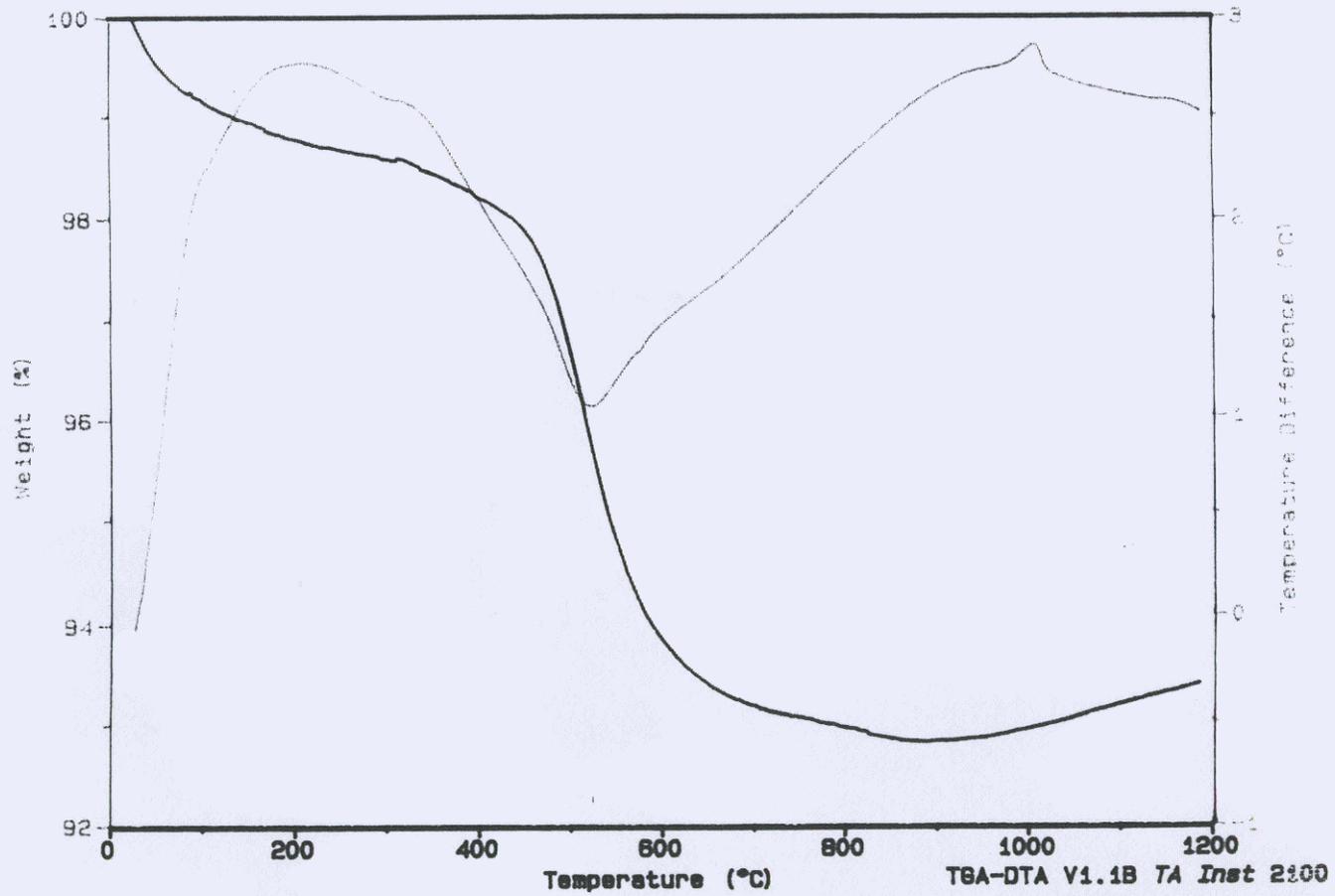


Fig. 4.2

Análisis térmico diferencial / termogravimétrico para la muestra F2

Sample: M2
Size: 12.9265 mg
Method: INDUSTRIA
Comment: RAMPA 20°C/MIN 1200°C, AIRE 100 ML/MIN

TGA-DTA

File: C: MARES.002
Operator: ANABEL ALVAREZ MENDEZ
Run Date: 11-Jul-03 10:17

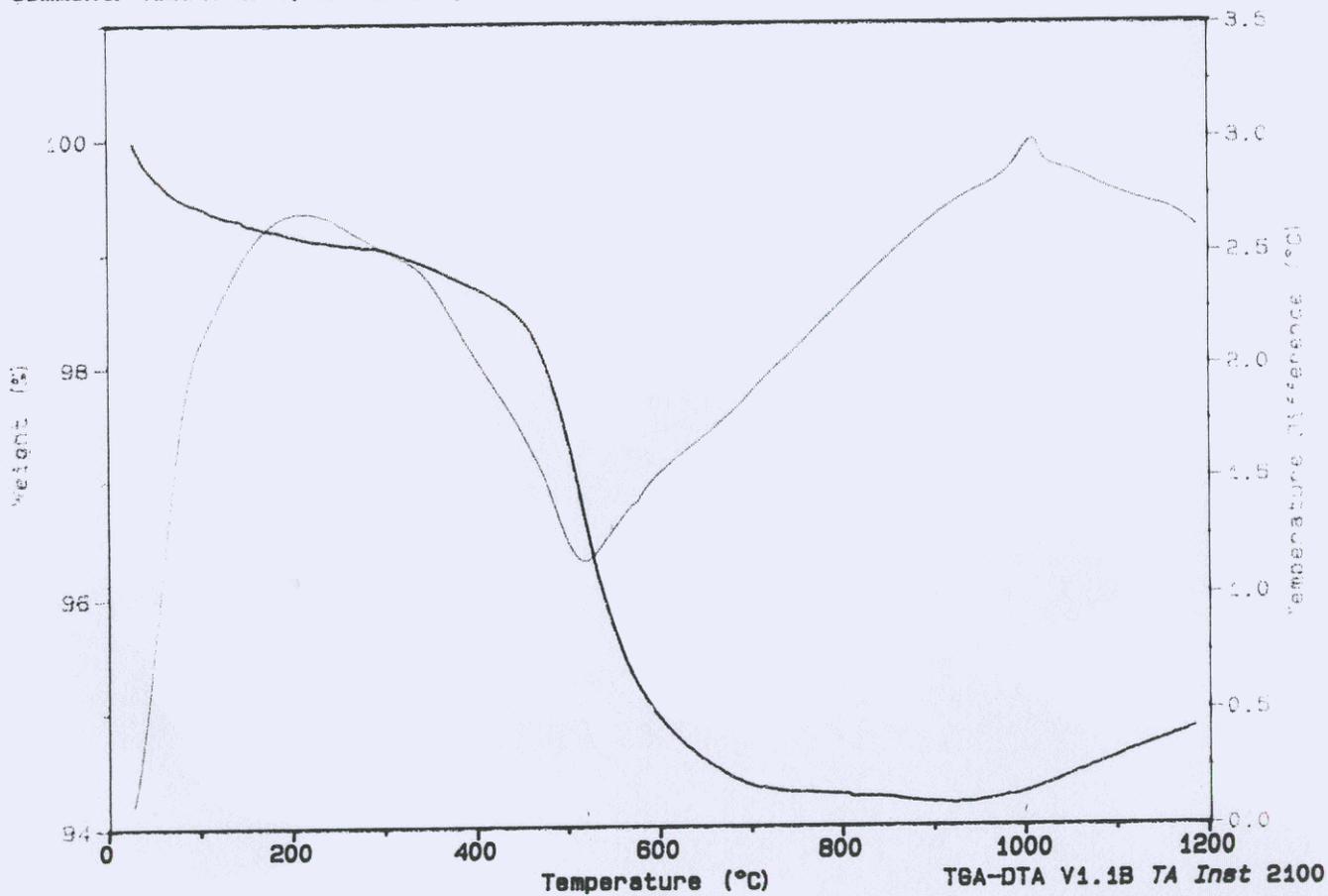


Fig. 4.3

Análisis térmico diferencial / termogravimétrico para la muestra F3

Sample: M3

Size: 12.7347 mg

Method: INDUSTRIA

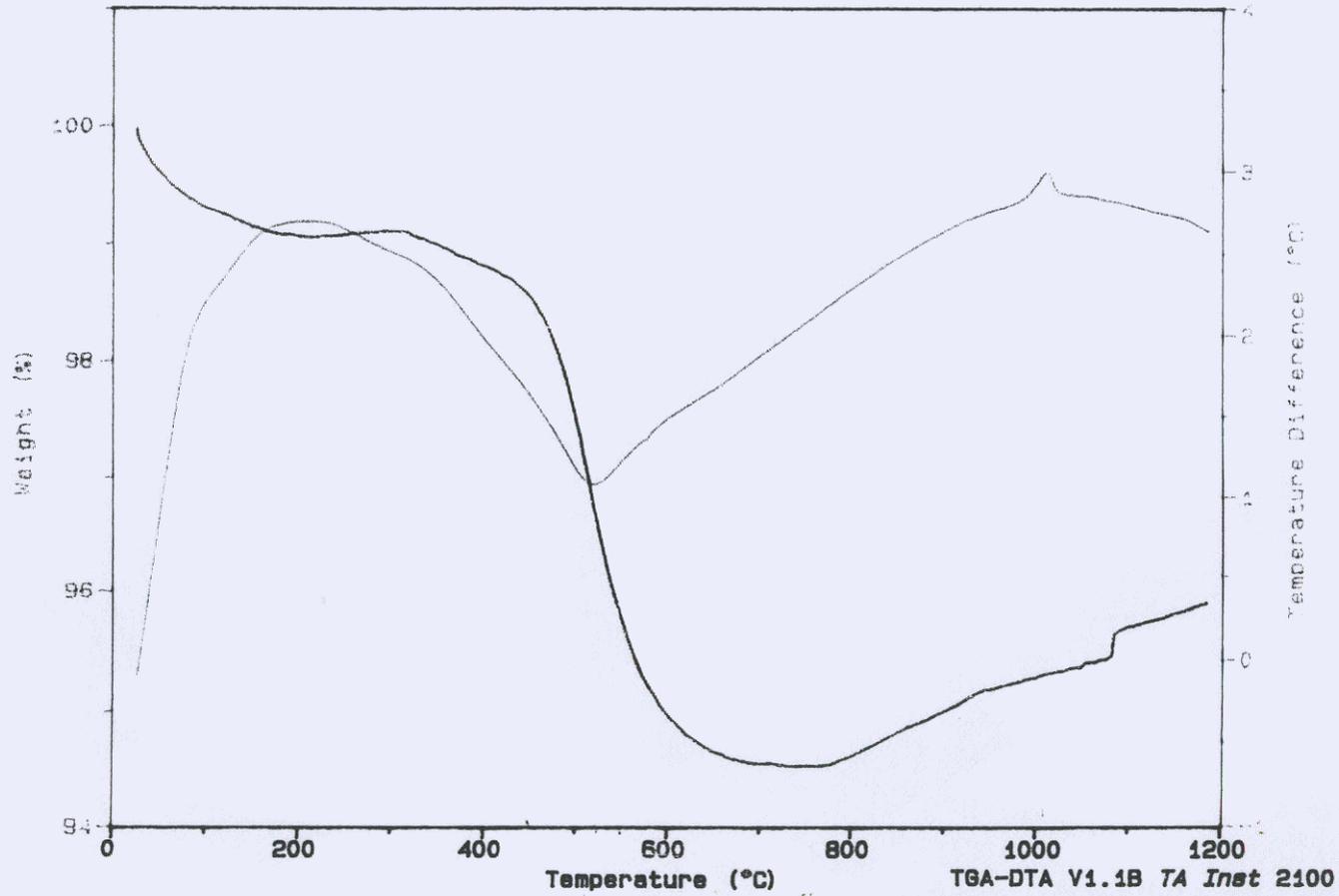
Comment: RAMPA 20°C/MIN 1200°C, AIRE 100 ML/MIN

TGA-DTA

File: C:\MARES.003

Operator: ANABEL ALVAREZ MENDEZ

Run Date: 11-Jul-03 15:31



FIGURAS

Fig. 5.1
Zonas de composiciones recomendadas para pastas vitrificadas,
semi-vitrificadas y porosas

A: Feldespato

B: Arcilla

C: Sílice

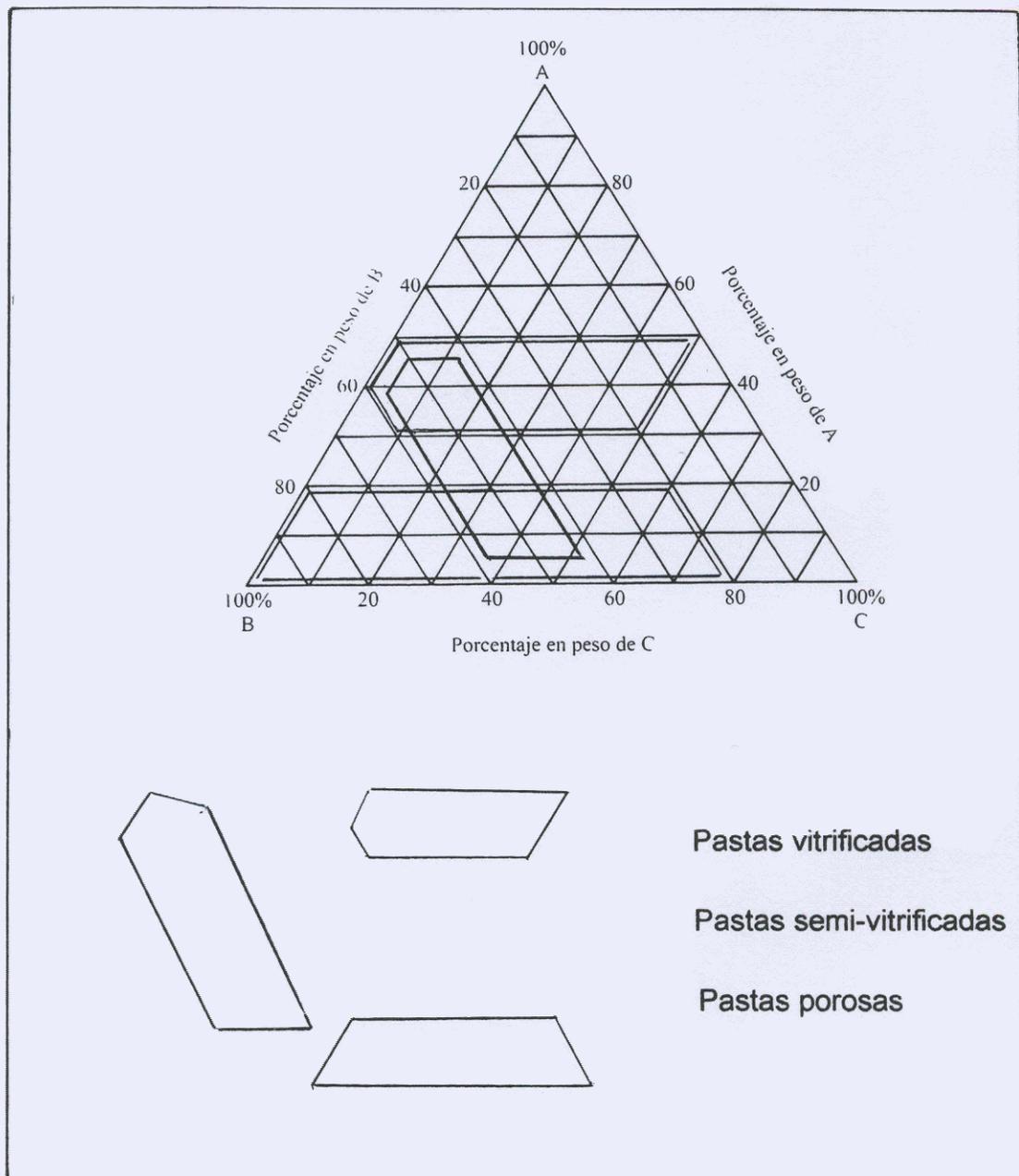
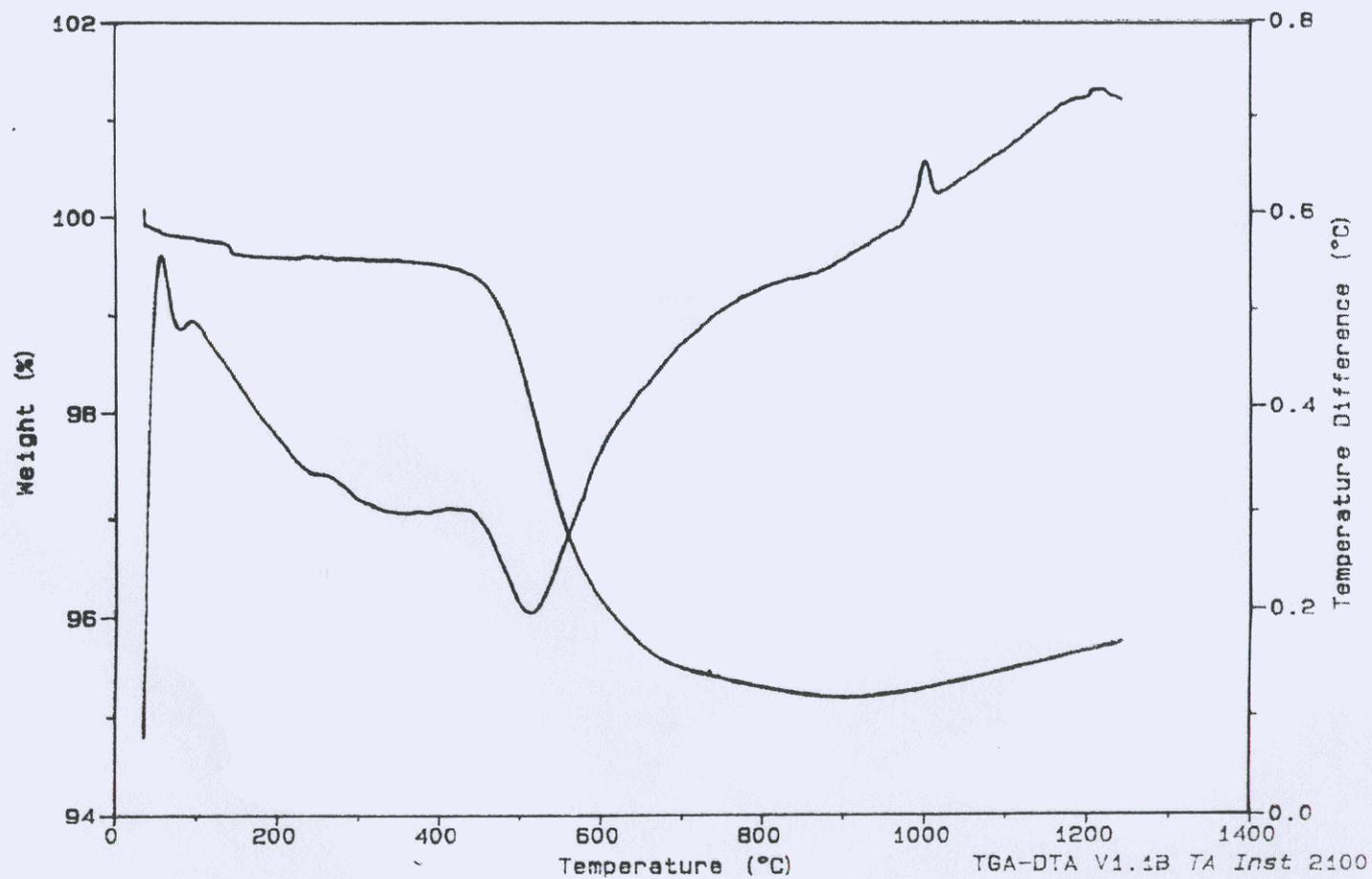


Fig. 5.2

Curva de ATD/TG para F1 en atmósfera de nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

TGA-DTA

Comment: 10°C/MIN A 1250 ATMN2 100ML/MIN



TABLAS

Tabla 2.1
Energías de Enlace

Enlace	Energía de enlace (Kcal. / mol)
Si - Si	42
C - C	83
C - H	99
Si - O	111

Tabla 2.2
Grupos de silicatos

		Clas. geológica	
I	Tetraedros aislados	Ortosilicatos	Nesosilicatos
II	Grupos complejos	Tetraedros dobles Estructura cíclica	Sorosilicatos Ciclosilicatos
III	Estructura en cadena	Piroxenos Anfiboles	Inosilicatos
IV	Estructura en hojas	Grupo caolín Grupo micas Grupo clorita	Filosilicatos
V	Estructura en armazón	Sílice Feldespatos	Tectosilicatos

Tabla 2-3
Clasificación de los silicatos con estructura en hojas

A.- Grupo Caolinita	Hidratados	Halloisita
	No Hidratados	Caolinita Dickita Nacritra
B.- Grupo de la Mica	No Hidratados	Talco Pirofilita
	Parcialmente Hidratados	Illitas
	Hidratados	Montmorillonita
C.- Grupo de la Clorita		Clorita

Tabla 2.4
Composición mineralógica de caolines

	Cuarzo	Feldespatos	Caolinita	Micas
Caolín bruto	80	5	10	5
Caolín lavado	25	5	50	20

Tabla 2.5
Análisis químico de caolines

SiO ₂	53.75	63.46	50.04
Al ₂ O ₃	33.26	23.47	33.97
Fe ₂ O ₃	0.32	0.39	0.69
CaO	0.37	0.39	1.28
MgO	0.09	0.16	0.23
Na ₂ O	0.16	0.56	0.06
K ₂ O	0.52	3,47	0.09
TiO ₂	0.54	0.54	0.23
P.C.	11.33	6.57	12.44

Tabla 2.6
Minerales de feldespato

Mineral	Fórmula molecular	Densidad (gr/cc)	Dureza (Mohs)
Ortosa	K ₂ OAl ₂ O ₃ 6SiO ₂	2.56	6
Albita	Na ₂ OAl ₂ O ₃ 6SiO ₂	2.61 / 2.64	6.0 / 6.5
Anortita	CaOAl ₂ O ₃ 2SiO ₂	2.70 / 2.76	6.0 / 6.5
Celsiana	BaOAl ₂ O ₃ 2SiO ₂	3.37	> 6
Petalita	Li ₂ OAl ₂ O ₃ 8SiO ₂	2.41	6.5

Tabla 2-7
Análisis químicos de talcos comerciales

SiO ₂	60.86	58.49	48.32
Al ₂ O ₃	0.60	1.76	8.66
Fe ₂ O ₃	0.42	1.16	3.51
CaO	0.12	1.82	0.85
MgO	32.35	30.36	30.52
Na ₂ O	0.02	0.08	0.12
K ₂ O	0.03	0.06	0.21
TiO ₂	0.04	0.03	0.04
P.C.	5.77	6.46	7.86

Tabla 2.8
Análisis químico de arcillas blancas

Arcilla	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	PC
WTU	64.7	23.8	1.6	0.2	0.2	0.1	1.3	0.9	7.8
HSM	64.0	24.0	1.1	0.3	0.4	0.4	2.4	1.2	7.0
TA	59.8	26.4	1.0	0.2	0.5	0.4	2.4	1.4	7.9
HP-64	63.0	24.0	0.9	0.2	0.4	0.4	2.3	1.5	6.8
HP-67	66.0	22.0	0.9	0.2	0.4	0.4	2.1	1.5	6.2

Tabla 2.9
Principales procesos de conformado de materiales cerámicos

Proceso de conformado	Tamaño del componente	Forma del componente	Volumen de producción
Vaciado de barbotina	Grande	Compleja	Bajo
Vaciado de cinta	Láminas delgadas	Simple	Alto
Extrusión	Amplia variedad	Sección transversal constante	Alto
Moldeo por inyección	Pequeño	Compleja	Alto
Prensado en seco	De pequeño a mediano	Simple, razón de apariencia pequeña	Alto

Tabla 2.10
Reacciones que ocurren durante la cocción

Temperatura		Reacción
oC	oF	
≤ 100	≤ 212	Pérdida de humedad libre.
100 – 200	212 – 390	Pérdida de agua absorbida.
200 – 450	390 – 840	Se altera la estructura cristalina de los minerales de arcilla por eliminación de grupos OH. La pirofilita muestra una notable expansión
400 – 700	750 – 1290	La materia orgánica en forma de lignito se oxida. La pirofilita se expande aún mas.
573	1065	El cuarzo se invierte al polimorfo de alta temperatura.
700 – 950	1290 – 1740	La pirofilita alcanza su máxima expansión: el metacaolín se convierte en espinela en la arcilla.
950 – 1100	1740 – 2010	Se destruye la estructura de la mica. El talco se descompone en protoenstatita y vidrio. Se forma mulita a partir de la espinela. La pirofilita se convierte en mulita y vidrio.
1100 – 1200	2010 – 2190	Los feldespatos se derriten, la arcilla y la cristobalita se disuelven. Comienza la vitrificación, la porosidad disminuye y la contracción aumenta.
> 1200	> 2190	La protoenstatita formada a partir del talco, se convierte en clinoenstatita. La mica se descompone en alúmina y vidrio. El contenido de vidrio aumenta y las agujas de mulita crecen; solo se conserva la porosidad cerrada.

Tabla 3.1
Origen de materias primas

Materia Prima		Origen	
Arcilla	1	Kentucky	USA
Arcilla	2	Tennessee	USA
Caolín	1	Georgia	USA
Caolín	2	Georgia	USA
Caolín	3	Hidalgo	México
Feldespatos	1	North Carolina	USA
Silice	1	Puebla	México
Silice	2	Puebla	México

Tabla 3.2
Formulaciones

Materiales		F 1	F 2	F 3
Arcilla	1	18.5	15.5	16.0
Arcilla	2	21.0	21.0	16.0
Caolín	1	13.0	---	12.0
Caolín	2	---	---	6.0
Caolín	3	---	13.0	---
Feldespatos		43.5	44.5	38.0
Silice	1	4.0	---	12.0
Silice	2	---	6.0	---
Total		100 %	100 %	100 %

Tabla 3.3
Propiedades típicas de referencia en arcillas

BALL CLAY	KY										TN										MS	
	KENTUCKY #5 BOND	KENTUCKY STONE	KT-556	OLD MINE #4	TODD LIGHT	BELL DARK	HTP	J-2	JACKSON	KT #1-4	KTS-2 SLURRY	KTS CLASSIC SLURRY	L-1	MARTIN #5	MARTIN #5/L-1 SLURRY	TENNESSEE #1 SCP	TENNESSEE #5	TENNESSEE #6	TENNESSEE #10	M&D	#3380	
PHYSICAL PROPERTIES																						
Dry M.O.R. psi ²	513	776	507	675	803	572	777	670	616	497	600	618	665	405	483	464	534	469	405	1751	876	
M.B.I., meq/100g	8.3	10.2	8.0	10.1	11.4	8.0	9.8	9.1	7.9	7.1	7.1	7.4	6.8	5.3	5.9	6.6	7.0	8.7	6.4	19.2	10.1	
Surface Area, m ² /g	20.9	20.0	20.8	22.8	26.0	22.3	24.7	25.4	23.5	18.8	18.4	18.4	16.2	14.4	15.5	18.0	19.9	21.3	18.8	43.1	30.6	
pH	4.5	3.9	4.6	4.5	4.4	4.1	5.3	4.3	4.2	4.5	4.4	4.4	4.4	4.6	4.6	4.5	4.5	4.0	5.0	7.2	6.8	
Soluble SO ₄ ²⁻	Med	Med	Low	Med	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Med	Med	Med	Low	Med	Low	Low	Low	Low	Low	Med	
% Dry Shrinkage ²	6.0	5.4	5.7	6.4	6.7	5.8	5.1	6.4	5.8	5.3	5.3	5.5	5.9	3.9	4.7	5.1	5.4	6.3	4.3	7.1	5.6	
PARTICLE SIZE																						
+325 Mesh, % Retained	2.8	3.3	2.1	3.0	2.1	3.2	1.3	3.1	3.5	3.0	3.4	3.2	3.0	4.8	3.6	3.2	3.0	2.3	0.7	0.4	1.9	
% Finer than 20 μ	97	91	97	96	98	96	98	96	96	96	95	94	93	96	94	96	96	98	100	100	99	
10 μ	95	81	95	92	95	91	95	92	92	90	86	86	82	86	84	89	90	94	97	99	96	
5 μ	90	70	90	86	89	84	90	85	85	79	75	74	68	72	70	78	80	85	92	97	91	
2 μ	72	55	73	70	73	72	80	74	75	62	58	57	50	51	50	61	64	71	80	91	82	
1 μ	57	46	60	57	61	64	70	66	67	51	48	46	40	39	39	49	54	61	68	86	75	
0.5 μ	40	36	44	43	46	53	57	55	56	38	38	35	30	28	28	37	42	51	52	78	66	
CHEMICAL ANALYSIS %																						
SiO ₂	57.7	66.4	57.3	57.8	57.7	57.9	53.8	58.5	56.3	57.8	62.7	63.1	66.4	63.4	64.4	57.6	56.4	61.3	52.1	56.6	59.3	
Al ₂ O ₃	27.7	21.4	28.1	26.6	27.0	27.3	31.1	26.6	28.4	27.4	23.4	23.2	20.6	23.6	22.6	27.4	29.2	24.8	33.2	27.8	27.1	
Fe ₂ O ₃	1.1	1.6	1.0	1.3	1.4	1.1	1.2	1.2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.4	0.8	2.3	1.3	
TiO ₂	1.6	1.3	1.9	1.6	1.5	1.9	1.9	1.7	1.9	1.6	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.5	1.7	1.7	1.8	1.4	1.6	
CaO	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.3	
MgO	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.7	0.4	
K ₂ O	1.4	1.3	1.1	1.2	1.3	0.7	1.0	0.5	0.6	1.5	1.2	1.3	1.4	1.8	1.6	1.5	1.3	0.7	1.1	0.6	0.7	
Na ₂ O	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
L.O.I.	9.8	7.6	10.0	11.1	10.7	10.6	10.8	11.0	11.4	10.3	9.7	9.5	9.2	8.3	8.5	10.3	11.1	10.1	11.3	10.8	9.3	
Carbon	0.35	0.34	0.25	1.55	1.09	0.53	0.15	0.68	0.74	0.89	1.16	1.19	1.59	0.65	0.87	0.90	1.14	0.40	0.11	0.19	0.13	
Sulfur	0.04	0.16	0.03	0.06	0.05	0.03	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.03	0.04	0.05	0.06	0.04	0.01	0.05	0.07	
FIRED PROPERTIES																						
% Total Shrinkage ³ Cone 5	11.9	8.1	11.5	12.4	12.3	12.5	12.3	13.9	13.5	11.8	11.2	10.9	10.3	9.4	9.9	11.7	13.1	11.4	12.3	13.6	13.8	
Cone 10	14.5	10.1	14.4	14.6	13.8	15.4	14.8	16.0	16.0	14.6	14.4	13.9	13.8	12.1	12.8	14.7	15.7	14.4	15.6	14.1	15.2	
% Total Absorption ³ Cone 5	10.5	12.1	10.9	11.0	8.8	12.3	9.0	11.9	11.9	11.6	12.2	11.9	12.8	11.5	12.1	11.0	11.6	13.0	12.2	0.0	7.2	
Cone 10	3.2	5.1	4.1	3.2	1.4	6.0	3.9	5.0	5.1	4.3	5.6	5.2	7.3	3.3	4.6	4.6	4.0	7.0	4.8	0.0	1.6	

Tabla 3.4
Propiedades típicas de referencia en caolines

KAOLIN

PHYSICAL PROPERTIES	GA										SC
	ALLEN G.	DIAMOND*	KAOLIN SLURRY	KINGSLEY	KT-CAST	optiKasT	ROGERS*	SAMSON	SAPPHIRE*	WILSON	
Dry M.O.R. psi*	300	450	300	275	225	225	950	450	650	350	300
M.B.I., meq/100g	3.5	6.5±1.0	3.5	3.3	2.5	2.4	10.5	6.5	9.5±1.0	4.0	4.5
Surface Area, m ² /g	13.5	18.0	13.0	12.5	12.0	11.0	24.0	18.0	22.0	15.0	24.0
pH	5.5	4.8	5.5	5.5	5.5	5.7	4.5	4.7	5.0	5.5	4.0
PARTICLE SIZE											
+325 Mesh, % Retained	0.5	0.5	5.0	2.5	5.0	6.0	1.0	2.5	0.5	3.0	2.0
% Finer than 20 μ	97	97	96	97	95	94	99	98	99	98	99
10 μ	92	93	89	91	87	85	97	94	97	93	98
5 μ	82	83	78	80	75	74	94	86	91	81	95
2 μ	63	68	57	58	60	55	85	71	74	63	89
1 μ	47	59	43	44	41	37	76	59	62	50	83
0.5 μ	28	38	23	25	21	18	65	44	48	34	69
CHEMICAL ANALYSIS %											
SiO ₂	45.0	45.6	45.3	44.8	45.1	45.2	46.5	46.7	46.3	46.1	44.0
Al ₂ O ₃	38.5	37.9	38.2	38.4	38.8	38.7	37.5	38.1	38.2	38.1	38.8
Fe ₂ O ₃	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	1.0	0.7	0.7	0.5	1.3
TiO ₂	1.5	1.4	1.6	1.6	1.6	1.6	1.3	1.5	1.4	1.7	1.5
CaO	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2
MgO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.1
K ₂ O	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Na ₂ O	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
L.O.I.	13.6	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.2	13.4	13.4	13.5	14.0
Carbon	0.04	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.10	0.07	0.08	0.04	0.03
Sulfur	0.04	0.07	0.05	0.04	0.03	0.04	0.13	0.09	0.10	0.04	0.08

Tabla 3.5
Propiedades típicas de referencia en feldespatos

FELDSPAR

	NC		
	MINSPAR1	MINSPAR 200	MINSILSPAR
PHYSICAL PROPERTIES			
Refractive Index Average	↔	1.53	↔
Mohs Hardness	↔	6.0-6.5	↔
Mean Particle Size μ	175	12	19
Surface Area, m ² /g	0.1-0.2	0.9-1.2	0.7-1.1
Dry Brightness (Green Filter)	91	94	91
pH	8.0	8.7	8.2
% Moisture Content	0.1	0.1	0.1
Bulk Density Loose	95	44	52
(lb/ft ³) Packed	100	70	83
Bulk Density Loose	1522	705	833
(Kg/m ³) Packed	1602	1121	1330
PARTICLE SIZE			
U.S. Sieve Series			
% Retained 20 mesh	0.0	0.0	0.0
“ 30 mesh	0.7	0.0	0.0
“ 40 mesh	11.3	0.0	0.0
“ 100 mesh	60.0	Trace	0.1
“ 140 mesh	12.0	Trace	0.3
“ 170 mesh	6.0	0.1	0.4
“ 200 mesh	4.0	0.3	1.2
“ 325 mesh	5.0	3.6	10.0
% Through 325 mesh	6.0	96	88.0
% FINER THAN 30 μ	0.3	87.0	75.0
“ 20 μ	Trace	72.0	60.0
“ 10 μ	Trace	40.0	30.0
“ 5 μ	Trace	19.0	12.0
CHEMICAL ANALYSIS %			
SiO ₂	68.6	68.6	76.8
Al ₂ O ₃	18.5	18.5	14.0
Fe ₂ O ₃	0.05	0.06	0.06
CaO	1.5	1.5	1.1
MgO	Trace	Trace	Trace
K ₂ O	4.1	4.1	2.8
Na ₂ O	6.5	6.5	4.9
L.O.I.	0.3	0.3	0.3

Tabla 4.1
Análisis químico de las materias primas

Materiales		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C	S	LQ1
Arcilla	1	57.8	26.6	1.3	1.6	0.2	0.5	1.2	0.2	1.55	0.06	11.1
Arcilla	2	64.4	32.6	1.1	1.4	0.2	0.4	1.6	0.2	0.87	0.04	8.5
Caolín	1	45.1	38.8	0.4	1.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.03	0.03	13.6
Caolín	2	45.2	38.7	0.5	1.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.03	0.03	13.6
Caolín	3	46.0	39.0	0.5	1.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.03	0.03	13.5
Feldespató		68.6	18.5	0.06	----	1.5	----	4.1	6.5	-----	-----	0.03

Tabla 4.2
Análisis químico de las formulaciones F1, F2 y F3

		F1 (%)	F2 (%)	F3 (%)
SiO ₂	Dióxido de silicio	61.30	62.56	62.60
Al ₂ O ₃	Oxido de aluminio	23.12	22.45	23.41
Fe ₂ O ₃	Oxido de hierro	1.21	1.21	0.83
CaO	Oxido de calcio	0.53	0.42	0.32
MgO	Oxido de magnesio	0.29	0.16	0.18
Na ₂ O	Oxido de sodio	3.03	3.20	2.78
K ₂ O	Oxido de potasio	3.77	3.27	3.54
TiO ₂	Oxido de titanio	0.93	0.84	0.89
P.C.	Pentóxido de fósforo	0.05	0.06	0.04
Pérdidas por ignición (950 °C)		5.77	5.83	5.41
Total		100.00	100.00	100.00

Tabla 4.3
Evaluación física de las formulaciones

Formulación	F1	F2	F3
Resistencia en verde (Kg / cm ²)	3.87	3.97	3.99
Resistencia en seco (Kg / cm ²)	14.97	15.76	15.92
Resistencia en cocido (Kg / cm ²)	335.40	344.78	252.90
% de Contracción	8.5	8.5	8.0
% de Absorción	1.029	0.929	1.65

Tabla 4.4
Relación de figuras que indica el área específica de las muestras en donde se realizó la microscopía

Figuras	Muestra	Microestructura
A- 1	F1-001	En la fractura
A- 2	F1-002	En la fractura
A- 3	F1-001	Muestra pulida
A- 4	F1-002	Muestra pulida
A- 5	F1-003	Muestra pulida
A- 6	F1-001	En la superficie
A- 7	F1-002	En la superficie
A- 8	F2-002	En la fractura
A- 9	F2-003	En la fractura
A-10	F2-001	Muestra pulida
A-11	F2-002	Muestra pulida
A-12	F2-003	Muestra pulida
A-13	F2-004	Muestra pulida
A-14	F2-001	En la superficie
A-15	F2-002	En la superficie
A-16	F2-003	En la superficie
A-17	F2-004	En la superficie
A-18	F3-001	En la fractura
A-19	F3-002	En la fractura
A-20	F3-003	En la fractura
A-21	F3-001	Muestra pulida
A-22	F3-002	Muestra pulida
A-23	F3-003	Muestra pulida
A-24	F3-001	En la superficie
A-25	F3-002	En la superficie
A-26	F3-003	En la superficie

APENDICE A

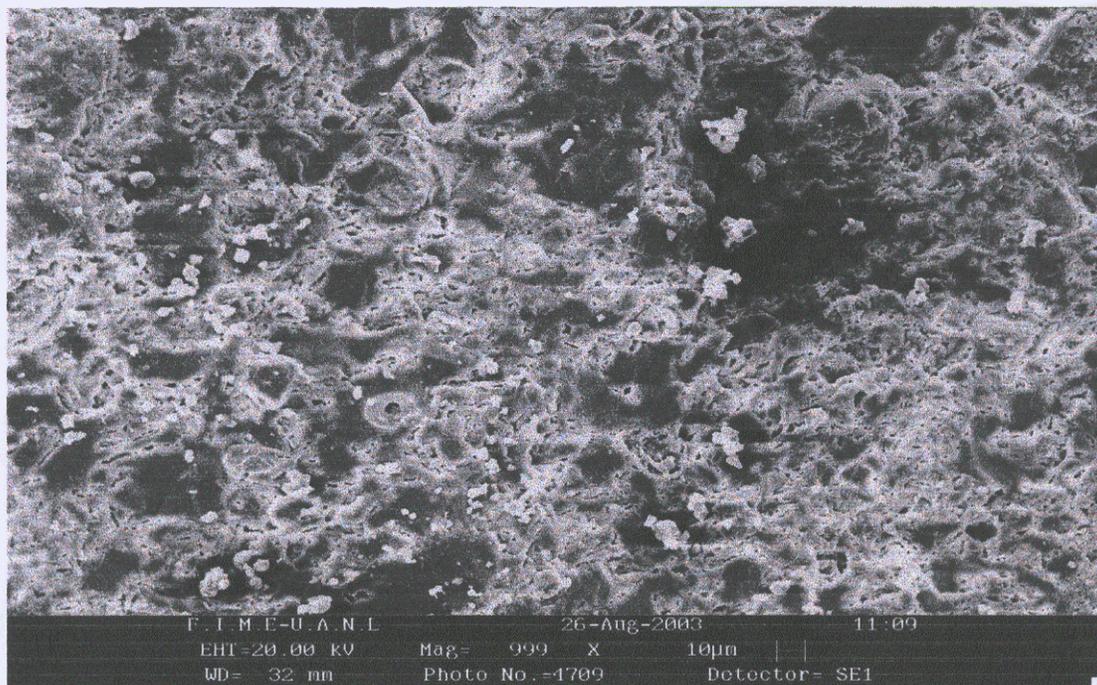


Fig. A-1
Microestructura vista a 1000X en la muestra F1 en la fractura (F1-001)

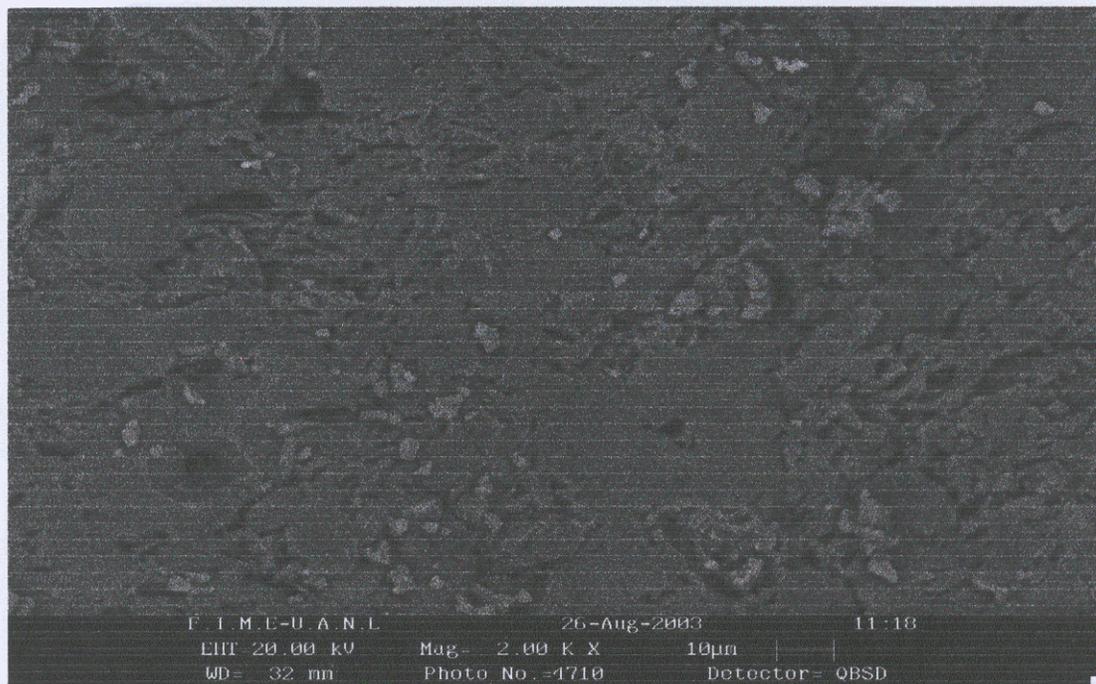


Fig. A-2
Microestructura vista a 2000X en la muestra F1 en la fractura (F1-002)

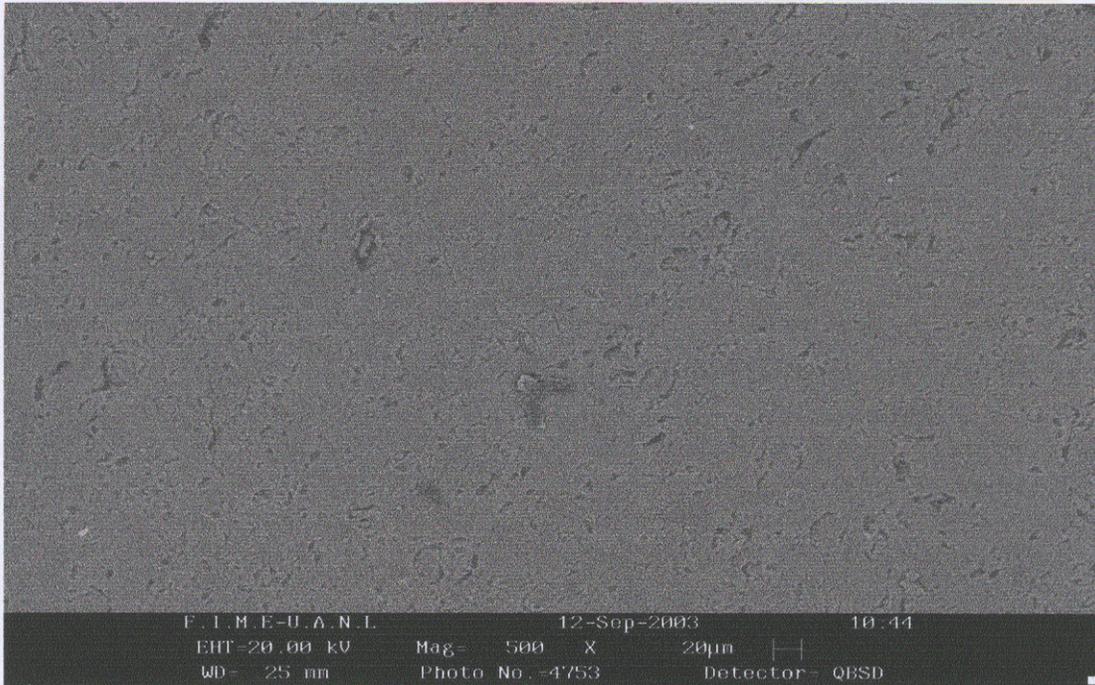


Fig. A-3
Microestructura vista a 500X en la muestra F1 pulida (F1-001)

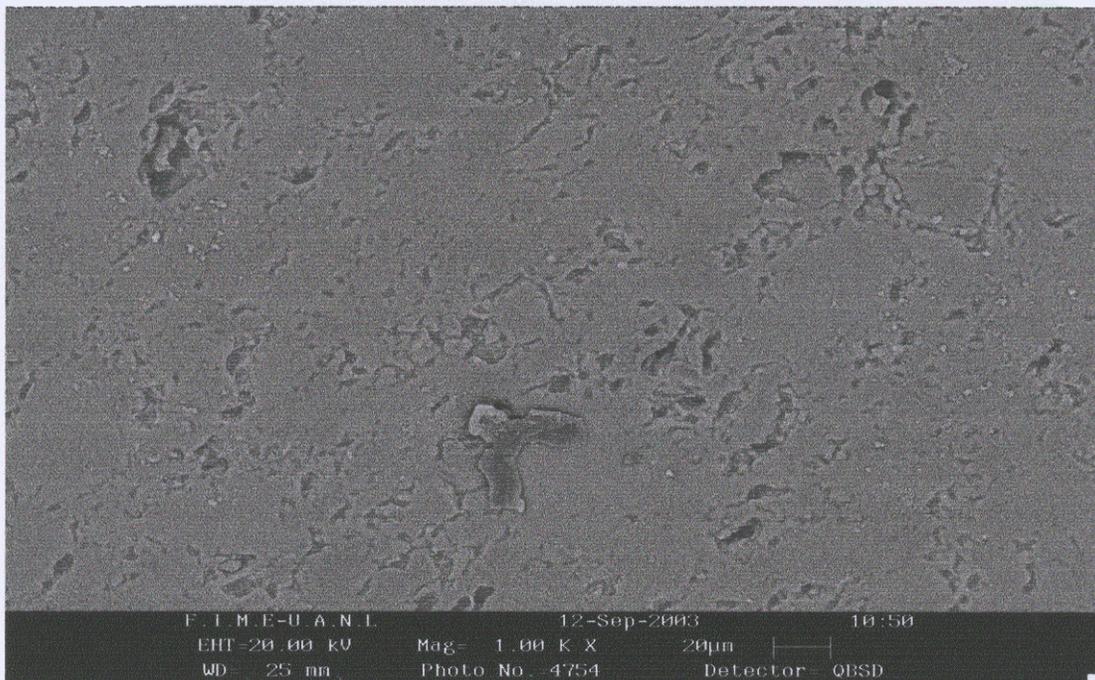


Fig. A-4
Microestructura vista a 1000X en la muestra F1 pulida (F1-002)

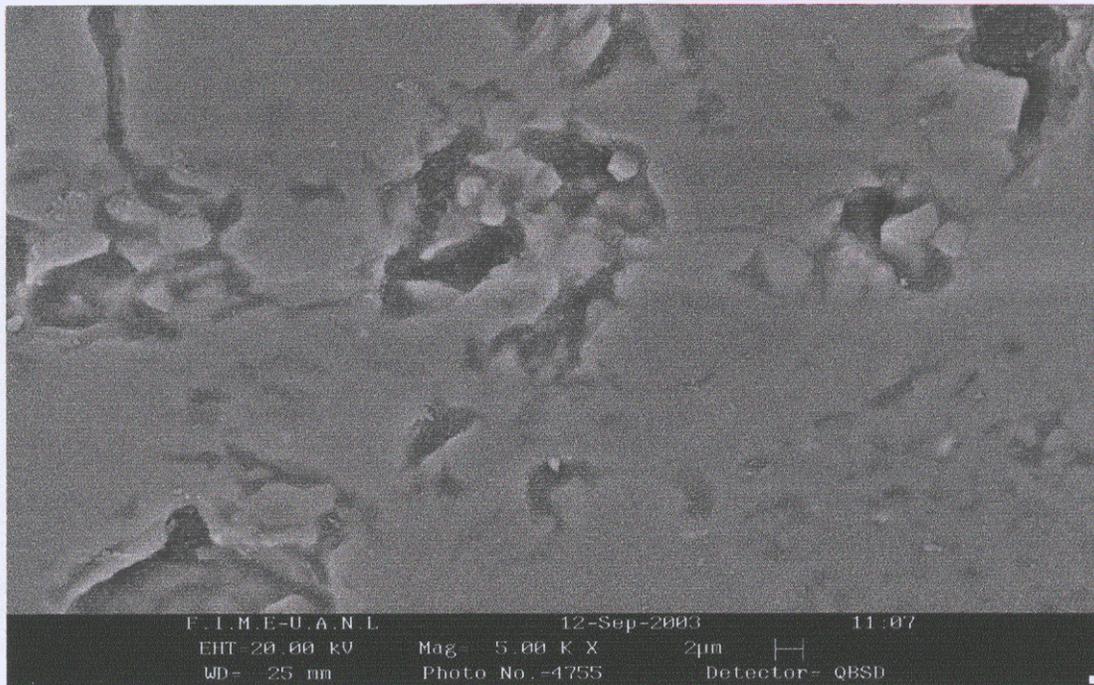


Fig. A-5
Microestructura vista a 5000X en la muestra F1 pulida (F1-003)

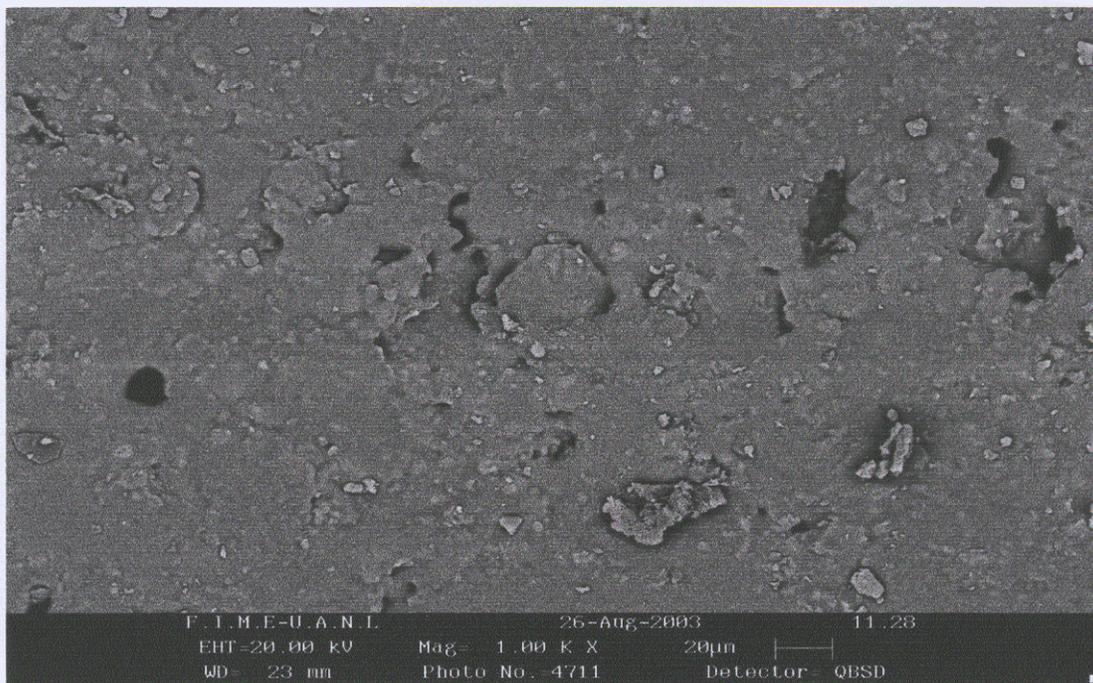


Fig. A-6
Microestructura vista a 1000X en la muestra F1 en la superficie (F1-001)

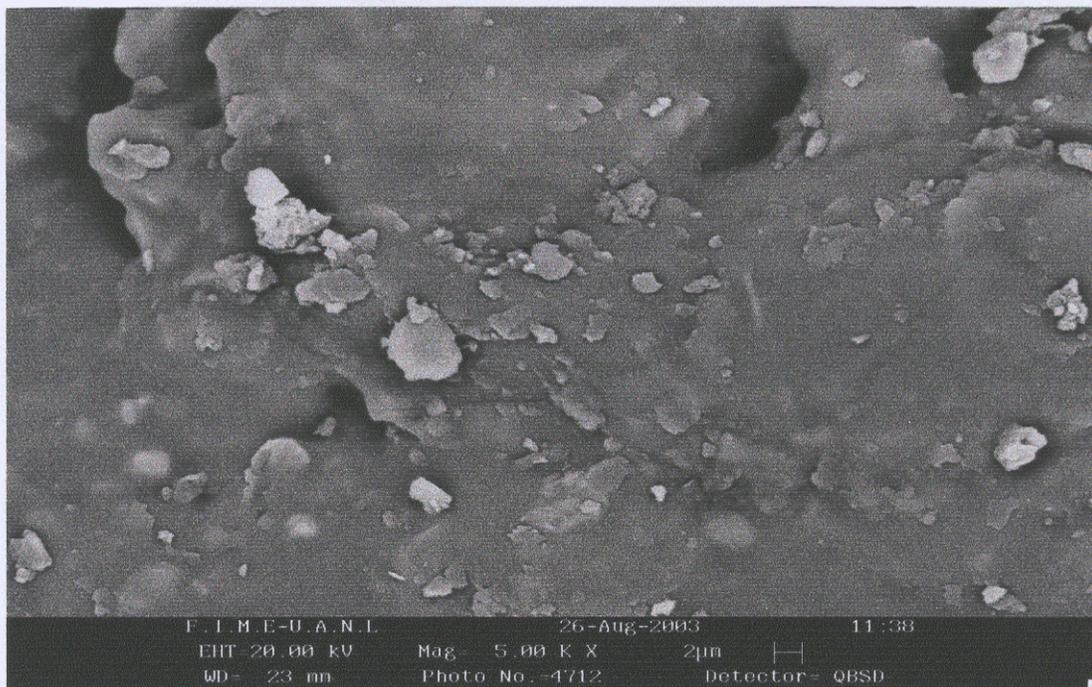


Fig. A-7
Microestructura vista a 5000X en la muestra F1 en la superficie (F1-002)

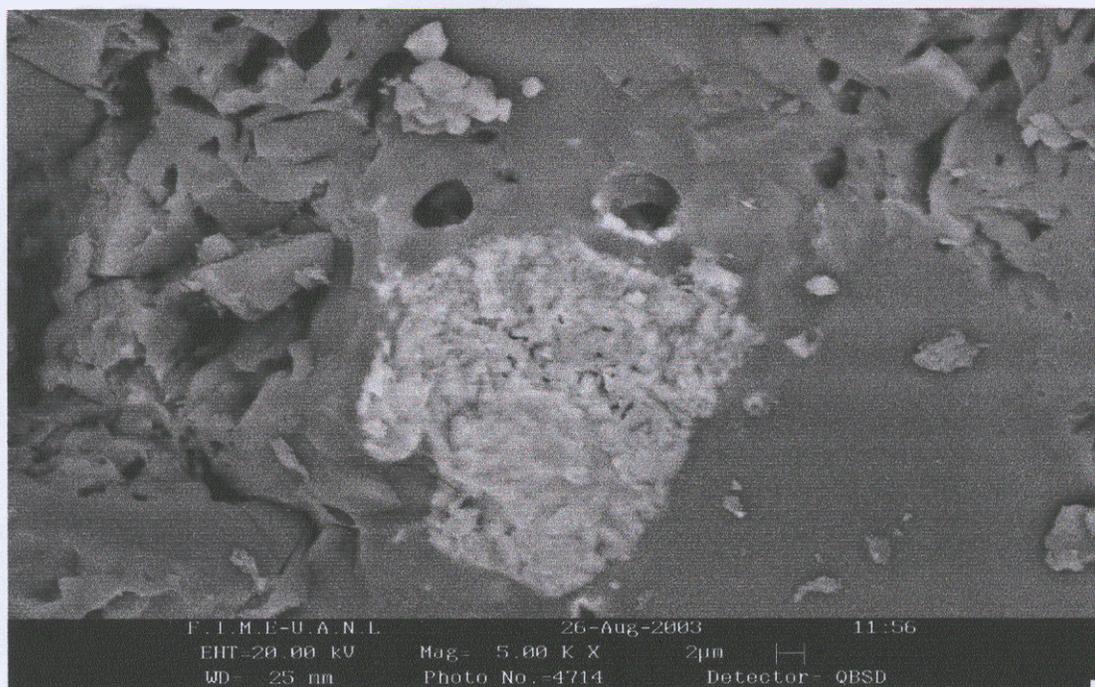


Fig. A-8
Microestructura vista a 5000X en la muestra F2 en la fractura (F2-002)

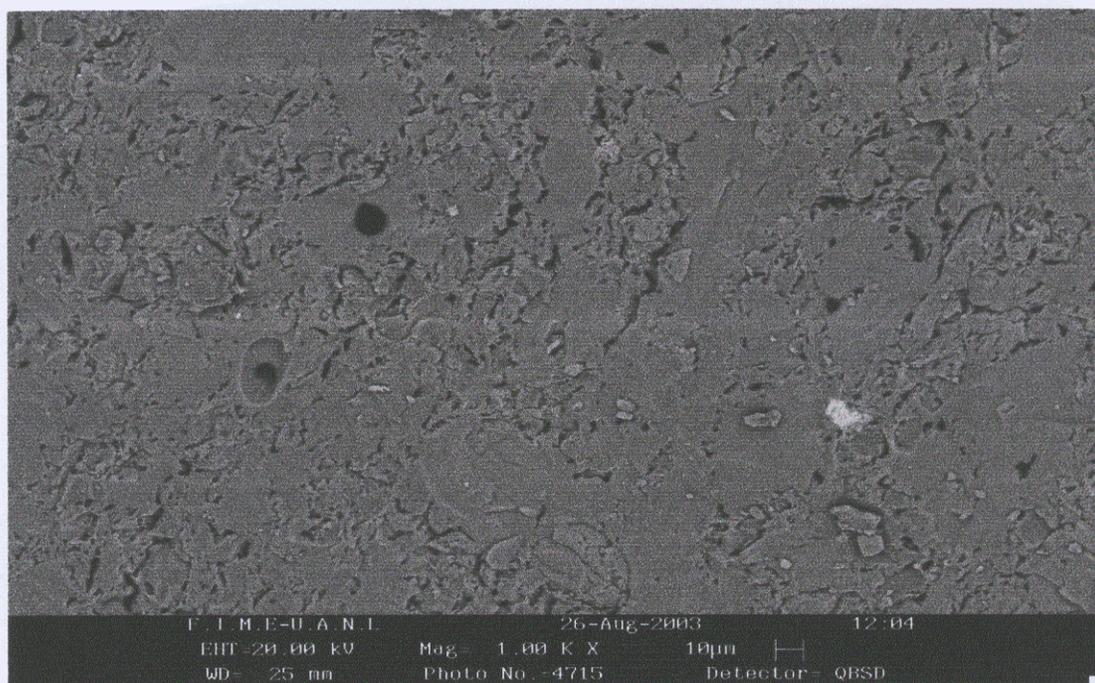


Fig. A-9
Microestructura vista a 1000X en la muestra F2 en la fractura (F2-003)

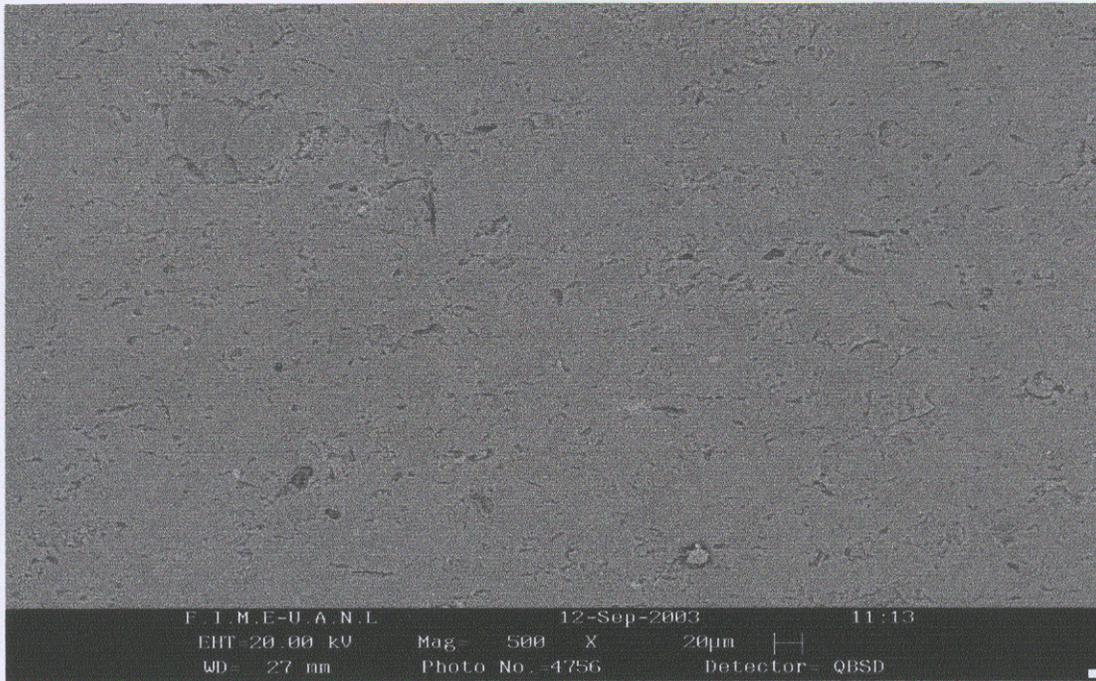


Fig. A-10
Microestructura vista a 500X en la muestra F2 pulida (F2-001)

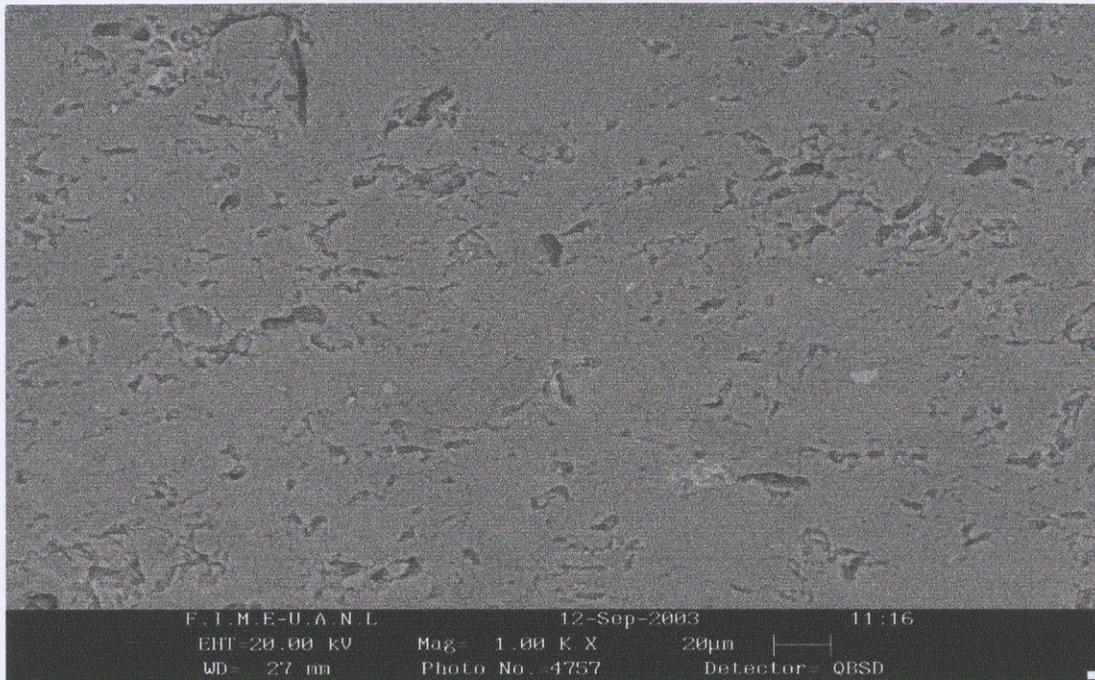


Fig. A-11
Microestructura vista a 1000X en la muestra F2 pulida (F2-002)

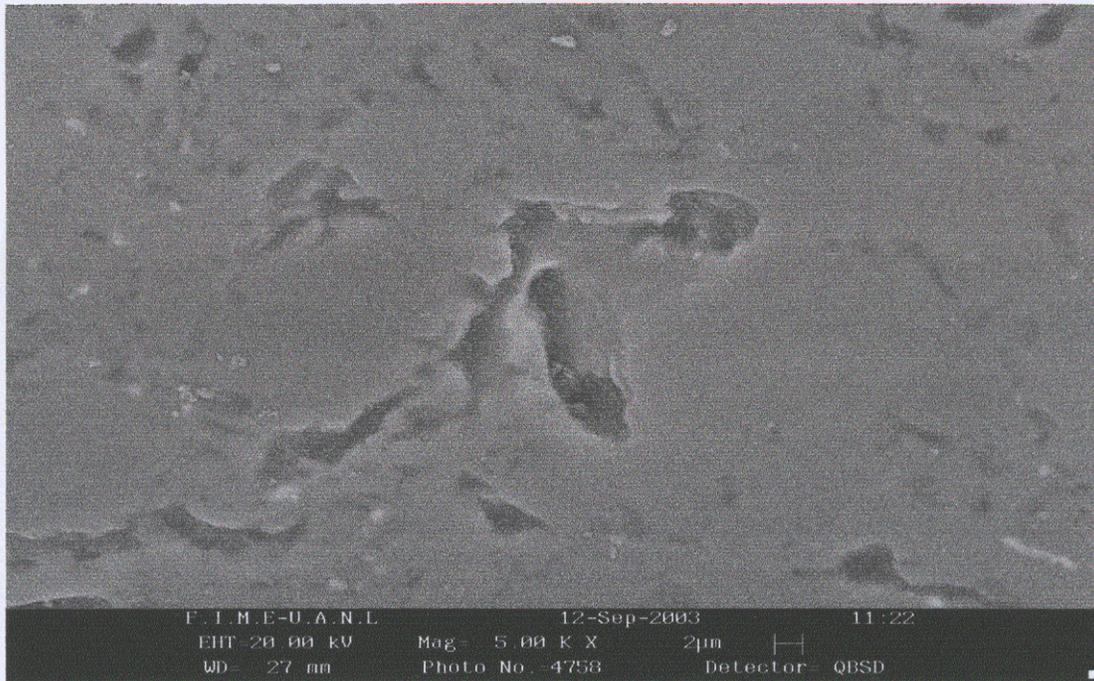


Fig. A-12
Microestructura vista a 5000X en la muestra F2 pulida (F2-003)

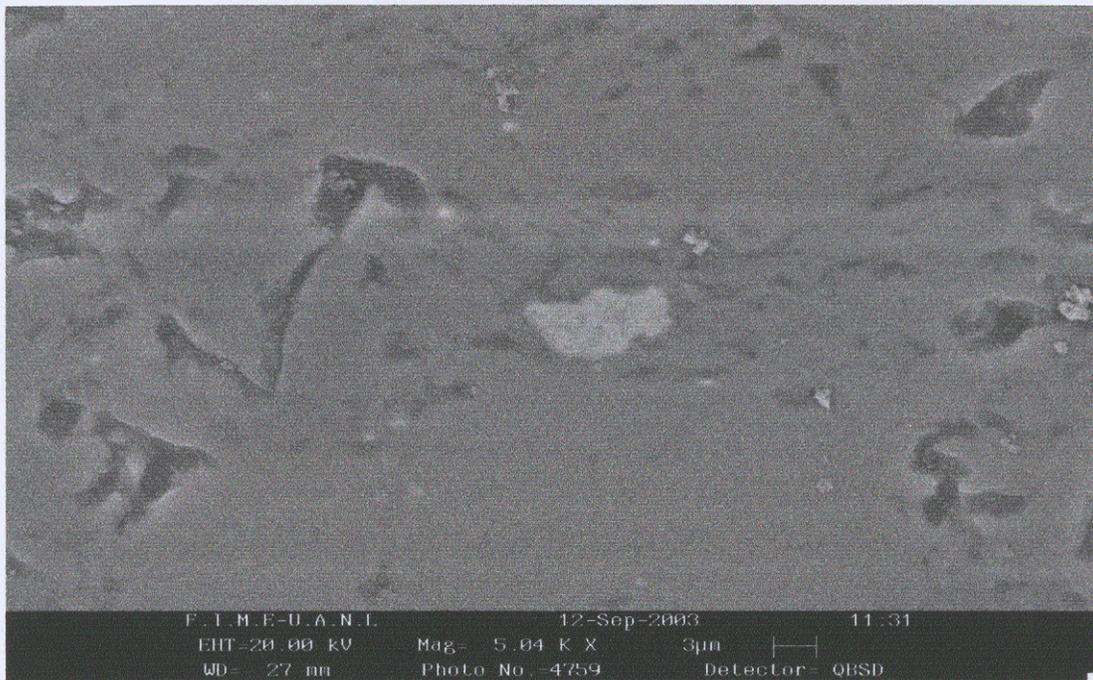


Fig. A-13
Microestructura vista a 5000X en la muestra F2 pulida (F2-004)

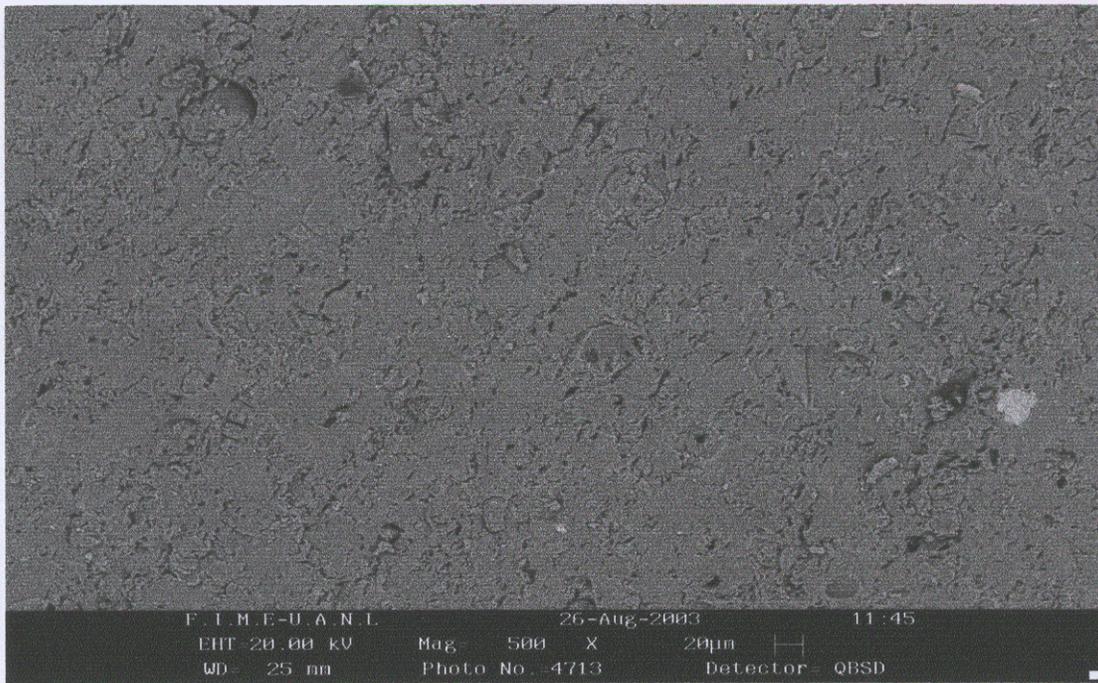


Fig. A-14
Microestructura vista a 500X en la muestra F2 en la superficie (F2-001)

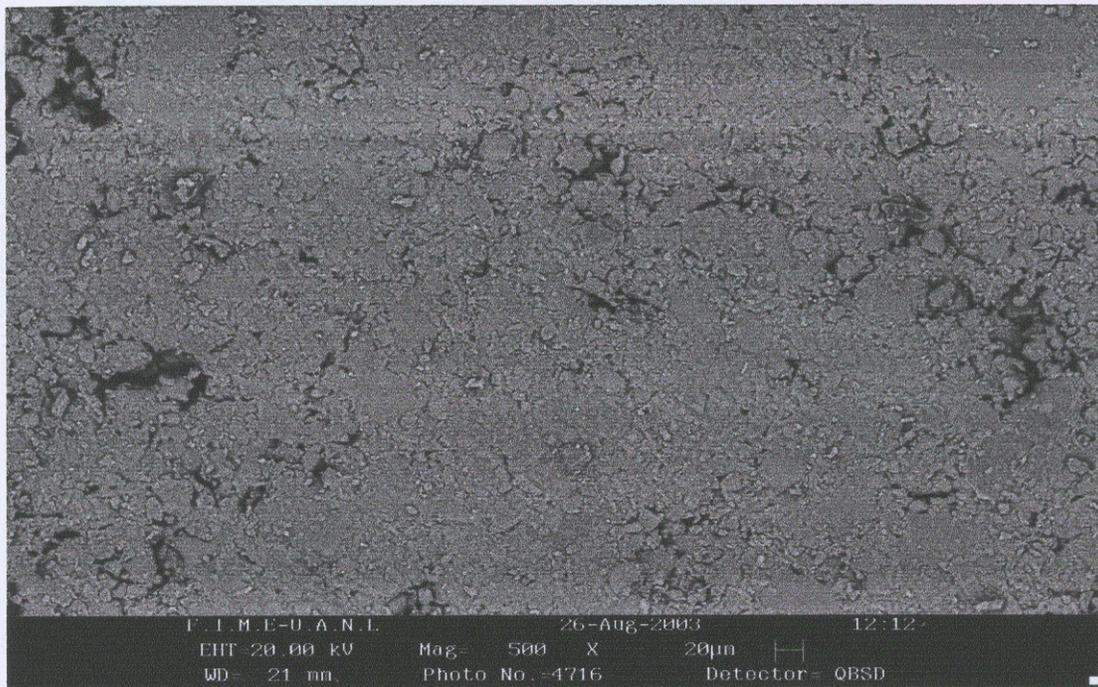


Fig. A-15
Microestructura vista a 500X en la muestra F2 en la superficie (F2-002)

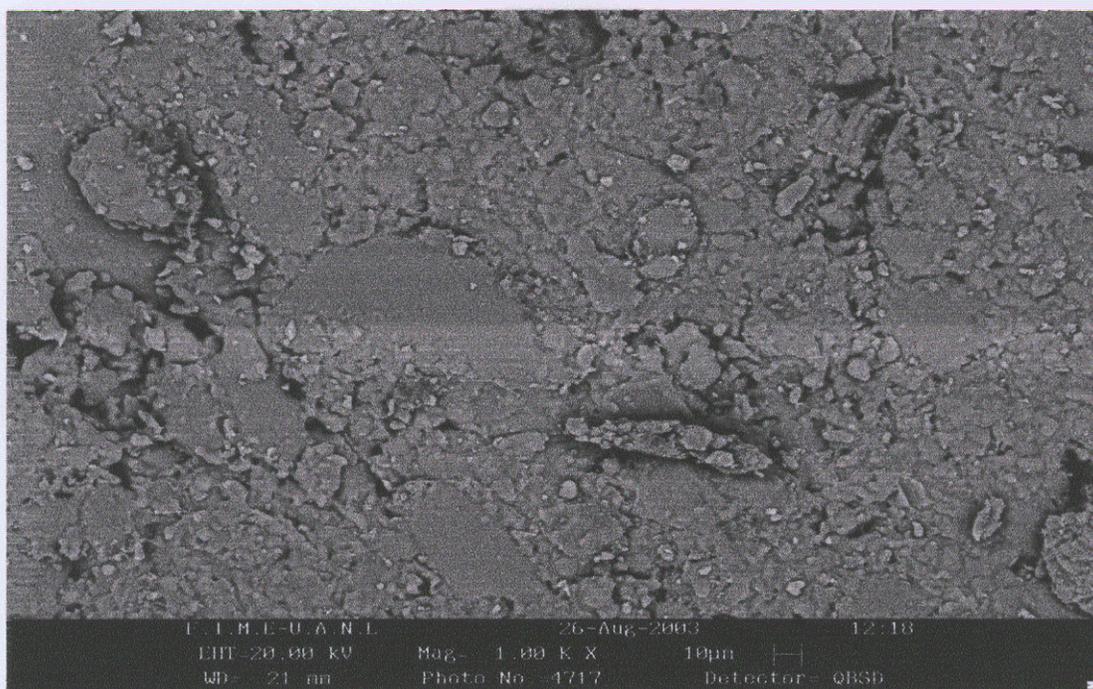


Fig. A-16
Microestructura vista a 1000X en la muestra F2 en la superficie (F2-003)

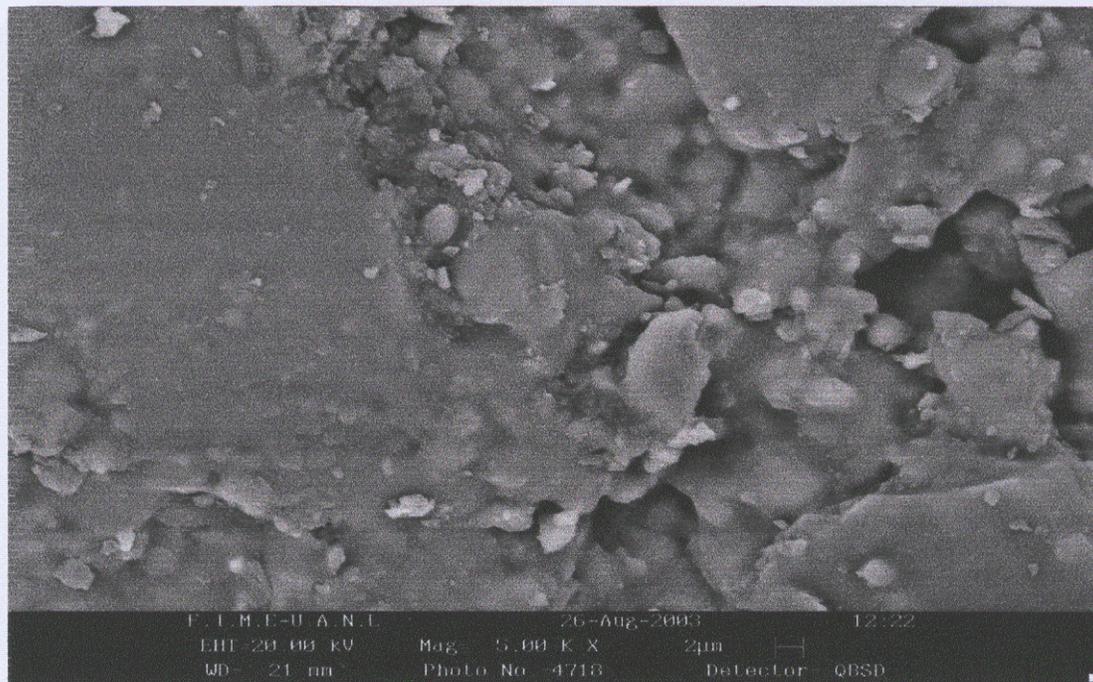


Fig. A-17
Microestructura vista a 5000X en la muestra F2 en la superficie (F2-004)

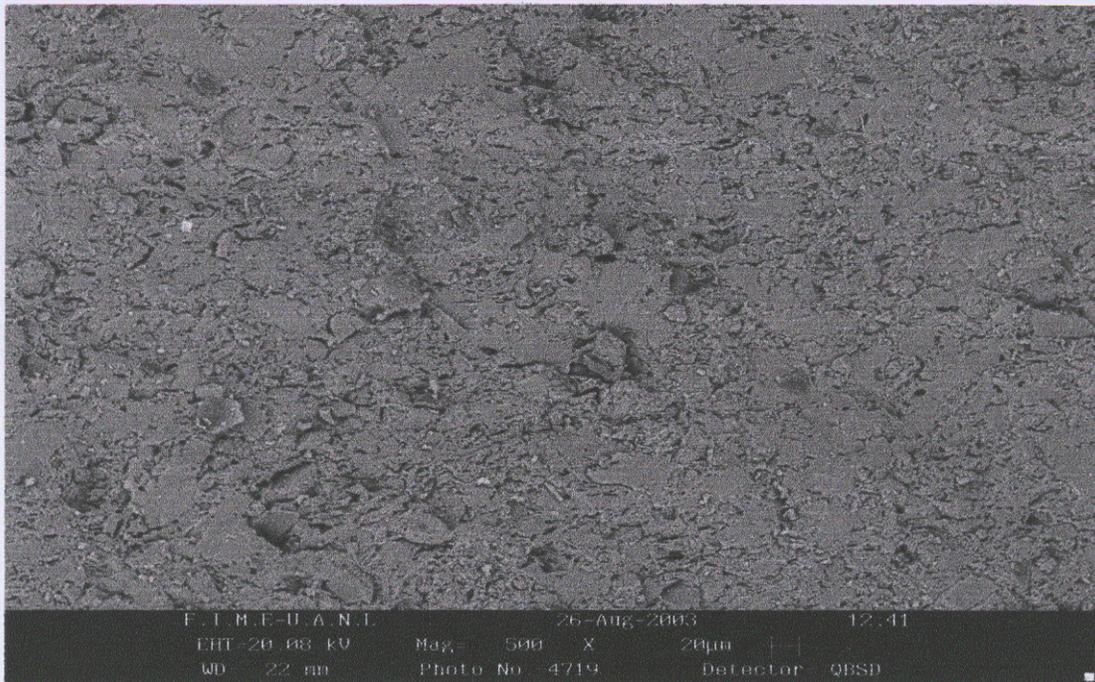


Fig. A-18
Microestructura vista a 500X en la muestra F3 en la fractura (F3-001)

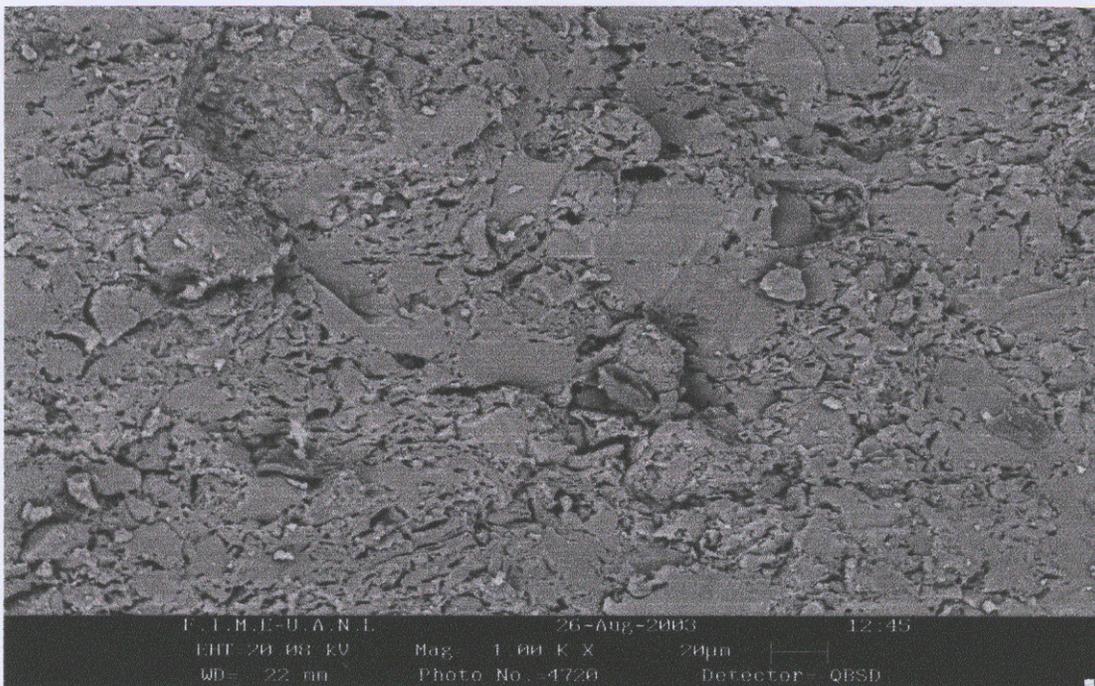


Fig. A-19
Microestructura vista a 1000X en la muestra F3 en la fractura (F3-002)

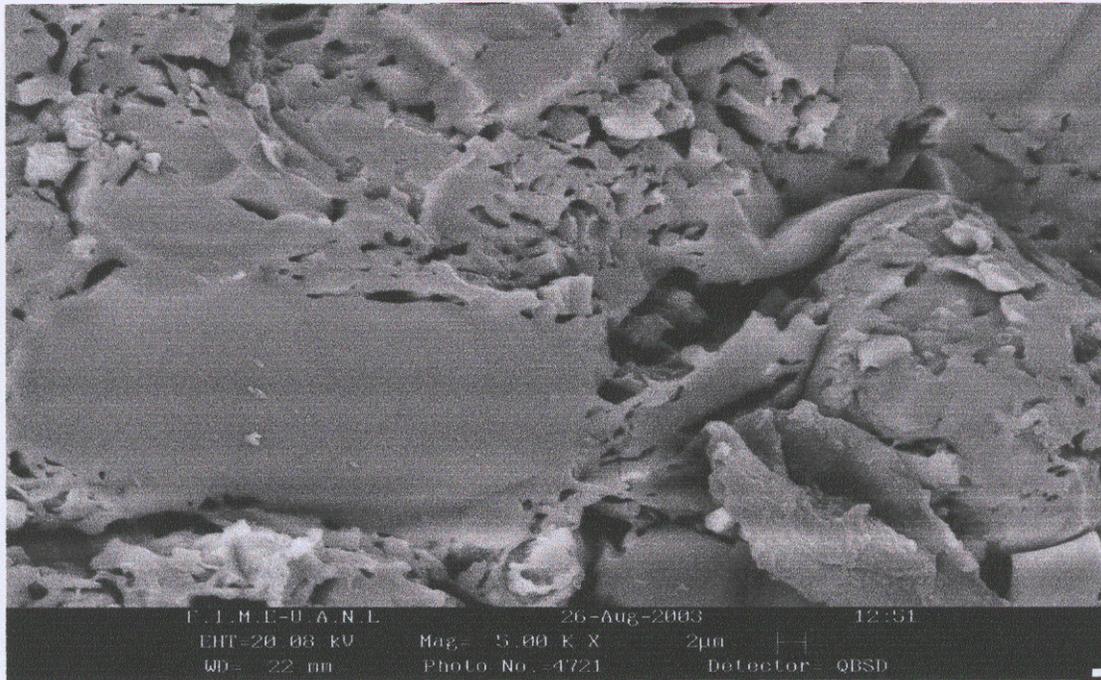


Fig. A-20
Microestructura vista a 5000X en la muestra F3 en la fractura (F3-003)

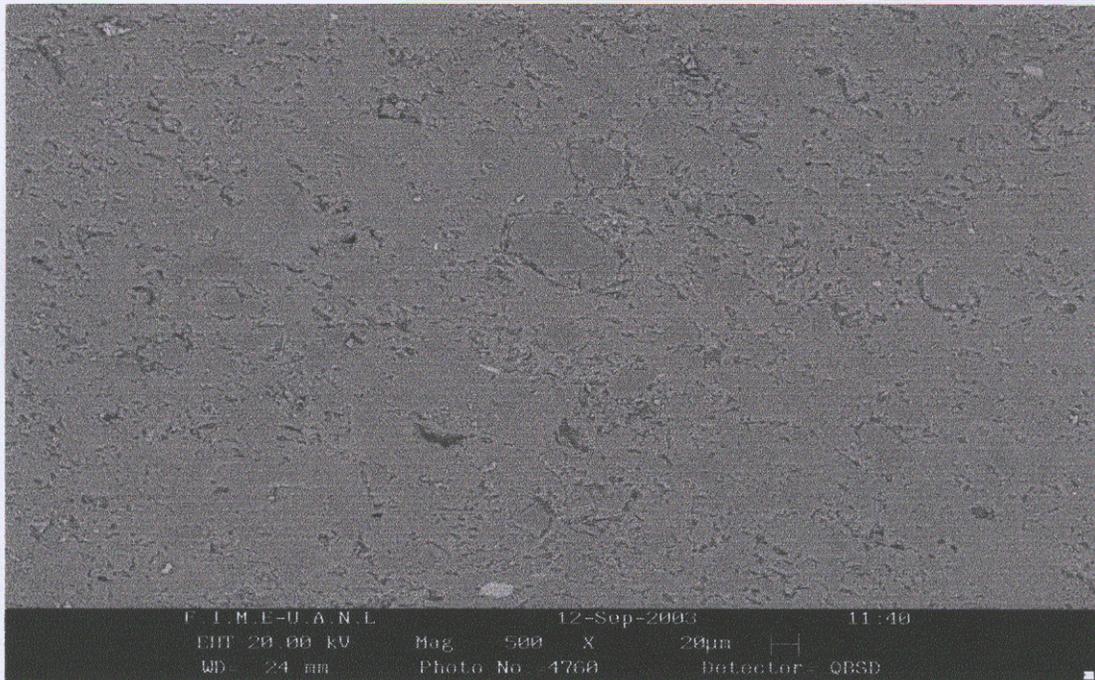


Fig. A-21
Microestructura vista a 500X en la muestra F3 pulida (F3-001)

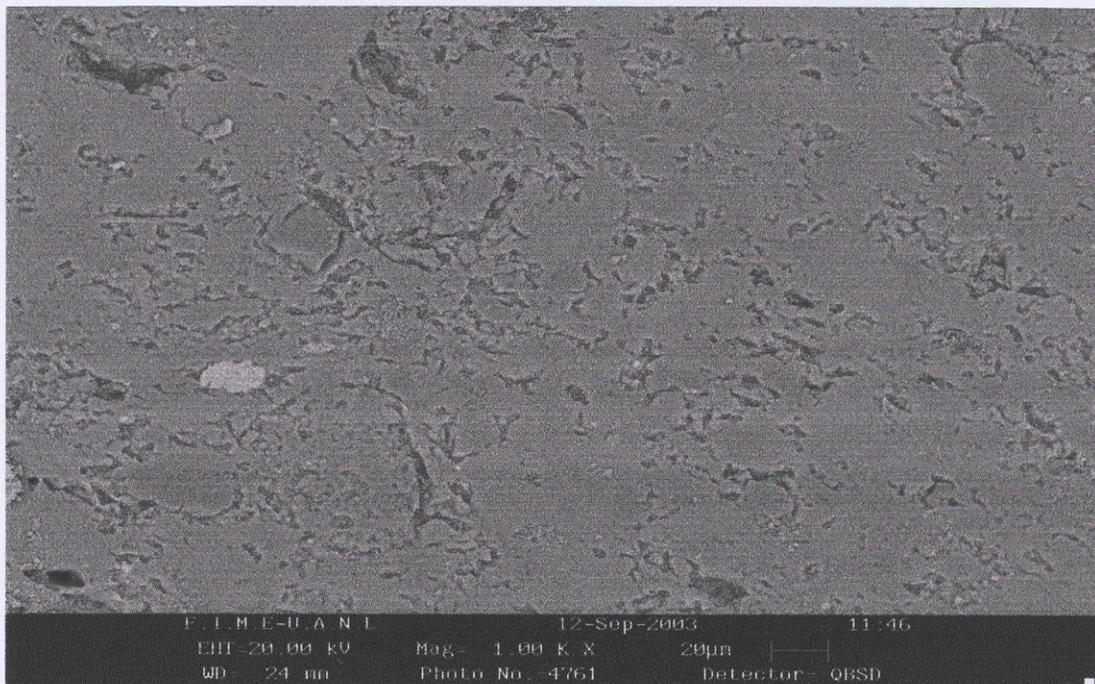


Fig. A-22
Microestructura vista a 1000X en la muestra F3 pulida (F3-002)

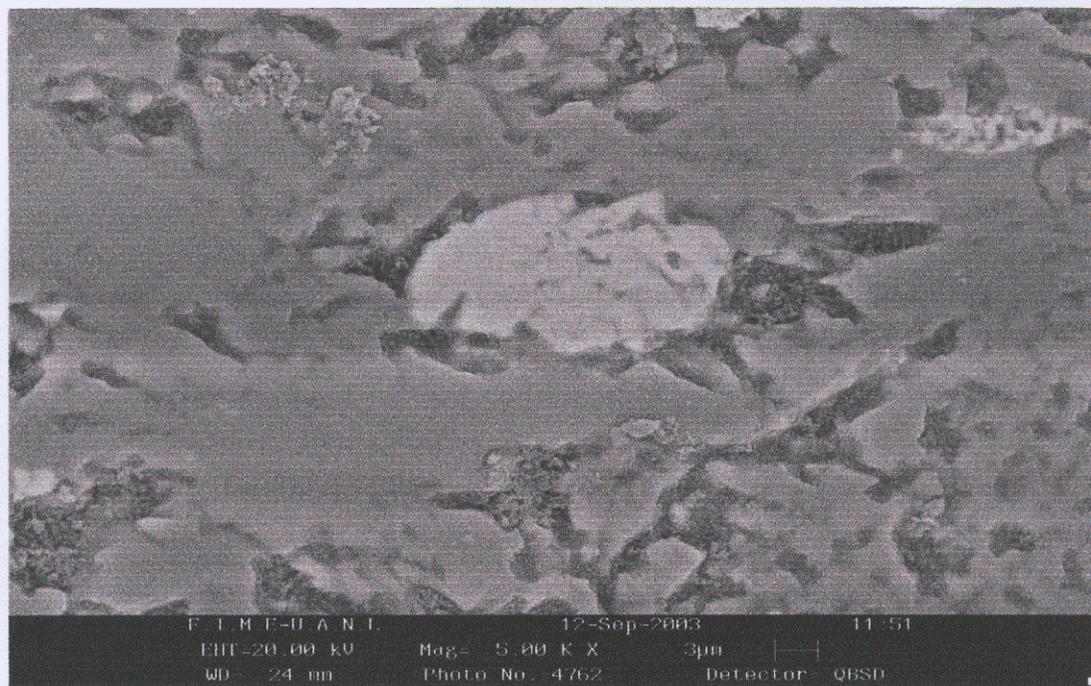


Fig. A-23
Microestructura vista a 5000X en la muestra F3 pulida (F3-003)

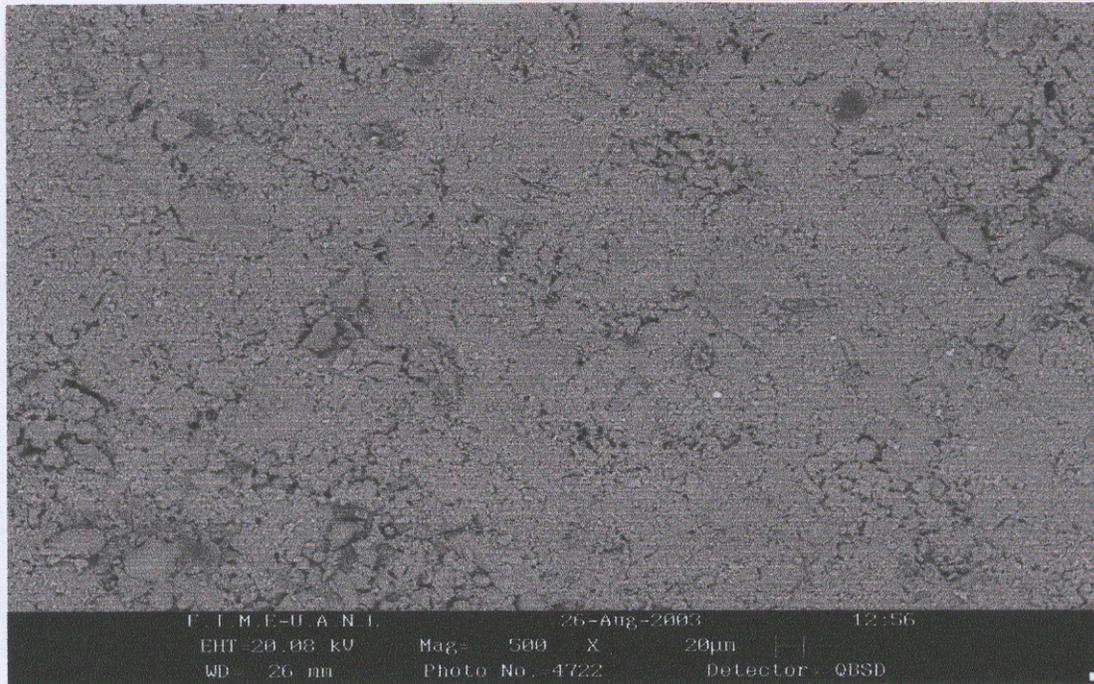


Fig. A-24
Microestructura vista a 500X en la muestra F3 en la superficie (F3-001)

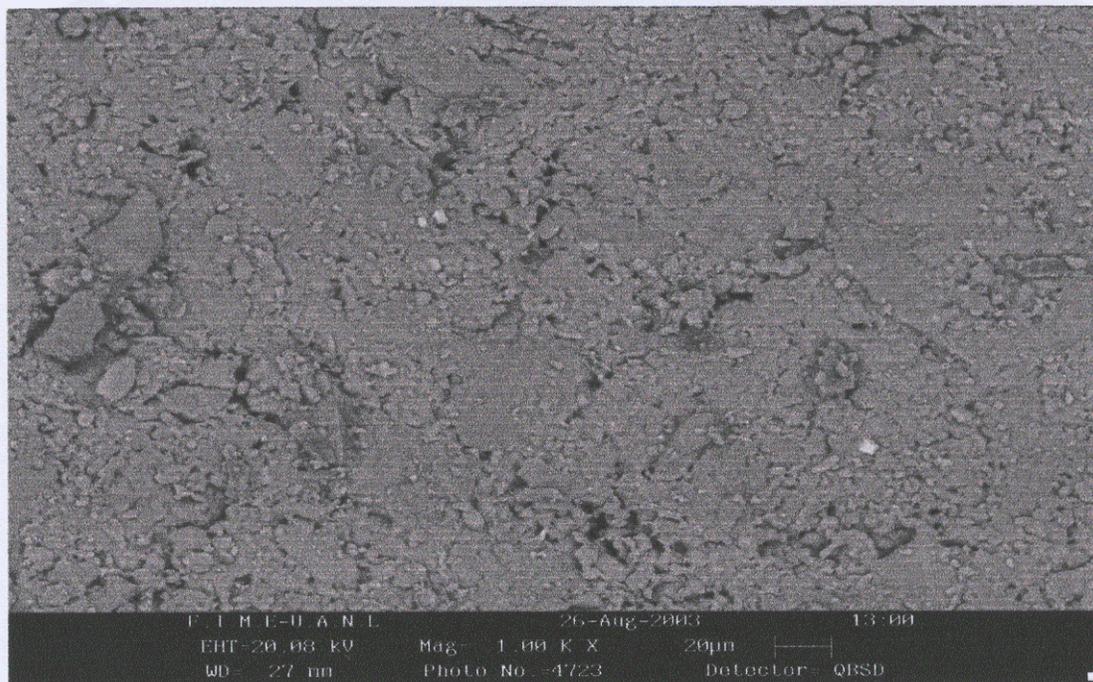


Fig. A-25
Microestructura vista a 1000X en la muestra F3 en la superficie (F3-002)

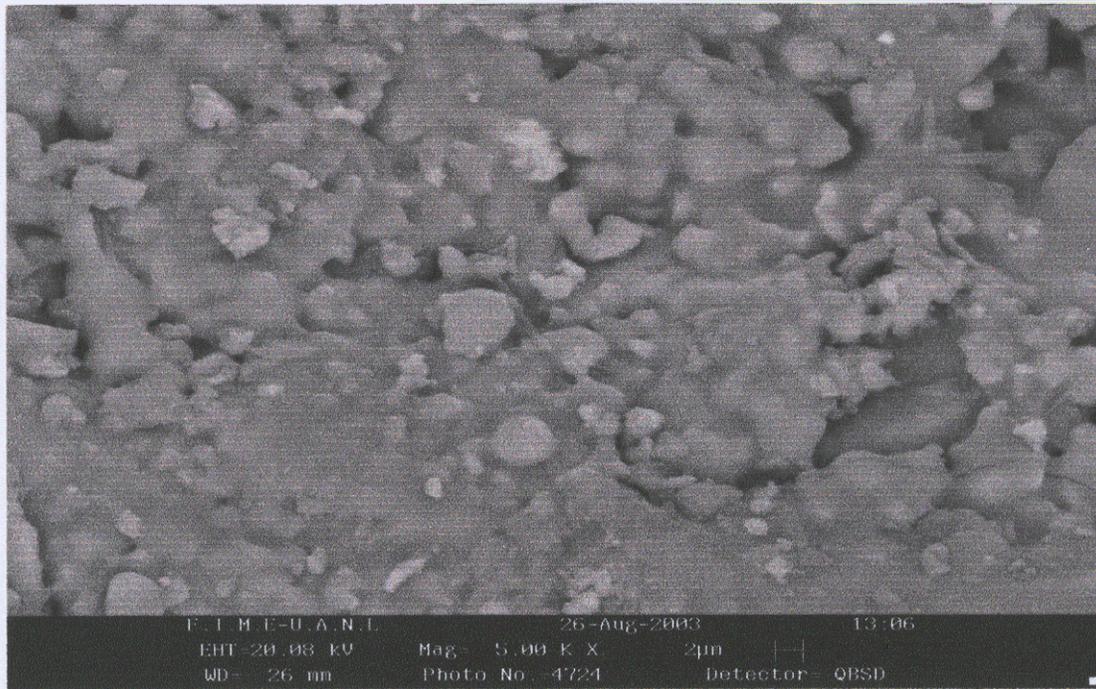
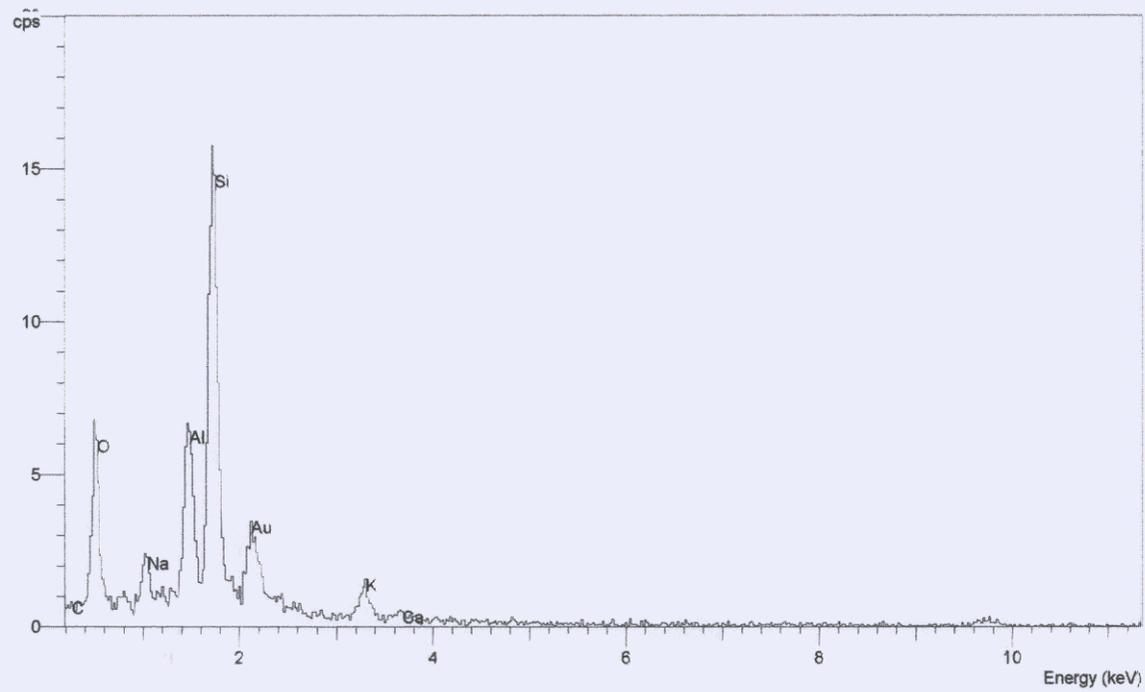


Fig. A-26

Microestructura vista a 5000X en la muestra F3 en la superficie (F3-003)

APENDICE B



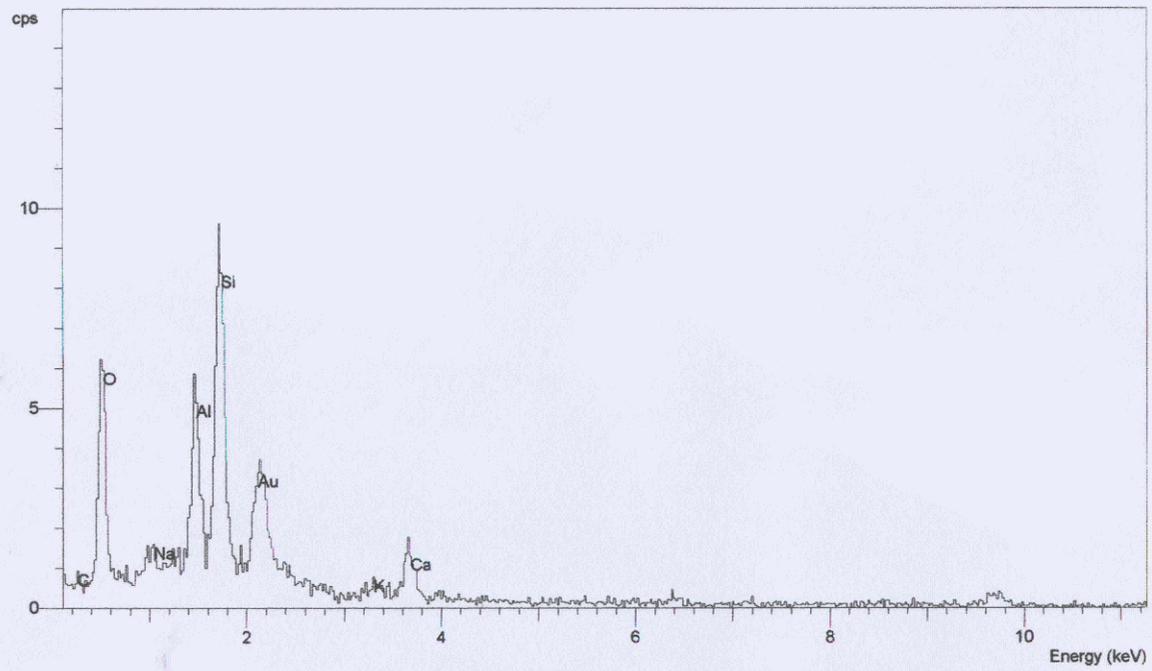
Muestra 1 (sup) a 5000

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	10.466	2.003	0.315	1.25	10.82	0.61	15.94	CO2	39.65	14.24
Na K	8.398	1.054	0.820	0.89	3.34	0.14	2.57	Na2O	4.50	2.30
Al K	18.158	0.999	0.846	0.94	7.00	0.15	4.59	Al2O3	13.22	4.10
Si K	48.460	1.313	0.845	1.01	18.71	0.28	11.78	SiO2	40.02	10.53
K K	5.241	0.717	1.024	0.99	1.67	0.08	0.75	K2O	2.01	0.67
Ca K	1.262	0.540	0.975	0.99	0.42	0.06	0.19	CaO	0.59	0.17
O					58.04	0.63	64.18			57.33
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	57.33

* = <2 Sigma



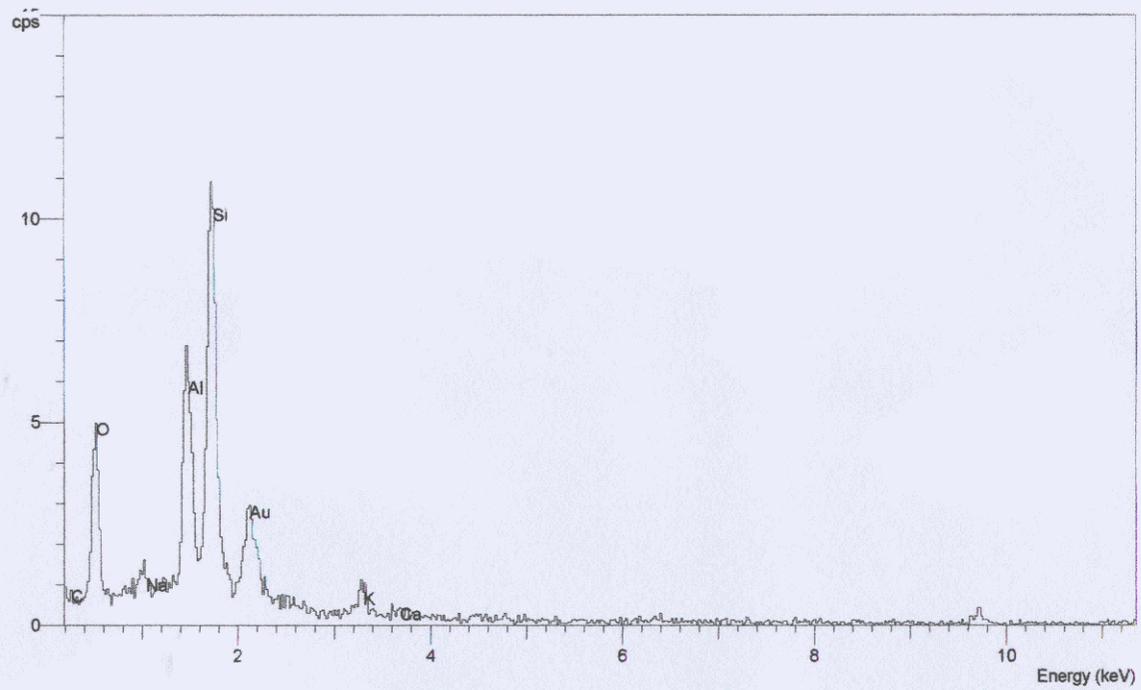
Muestra 1 (sup) puntual a 5000

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %		Compound %	Nos. of ions
C K	8.907	1.844	0.355	1.25	12.34	1.13	17.94	CO2	45.20	16.21
Na K	3.010	0.944	0.793	0.89	1.87	0.29	1.42	Na2O	2.52	1.28
Al K	12.410	0.859	0.846	0.94	7.22	0.29	4.67	Al2O3	13.64	4.22
Si K	26.759	1.026	0.843	1.01	15.61	0.46	9.71	SiO2	33.39	8.77
K K	1.149*	0.582	1.043	0.99	0.54*	0.13	0.24*	K2O	0.65*	0.22*
Ca K	6.632	0.722	0.991	0.99	3.29	0.19	1.44	CaO	4.61	1.30
O					59.14	1.18	64.58			58.34
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	58.34

* = <2 Sigma



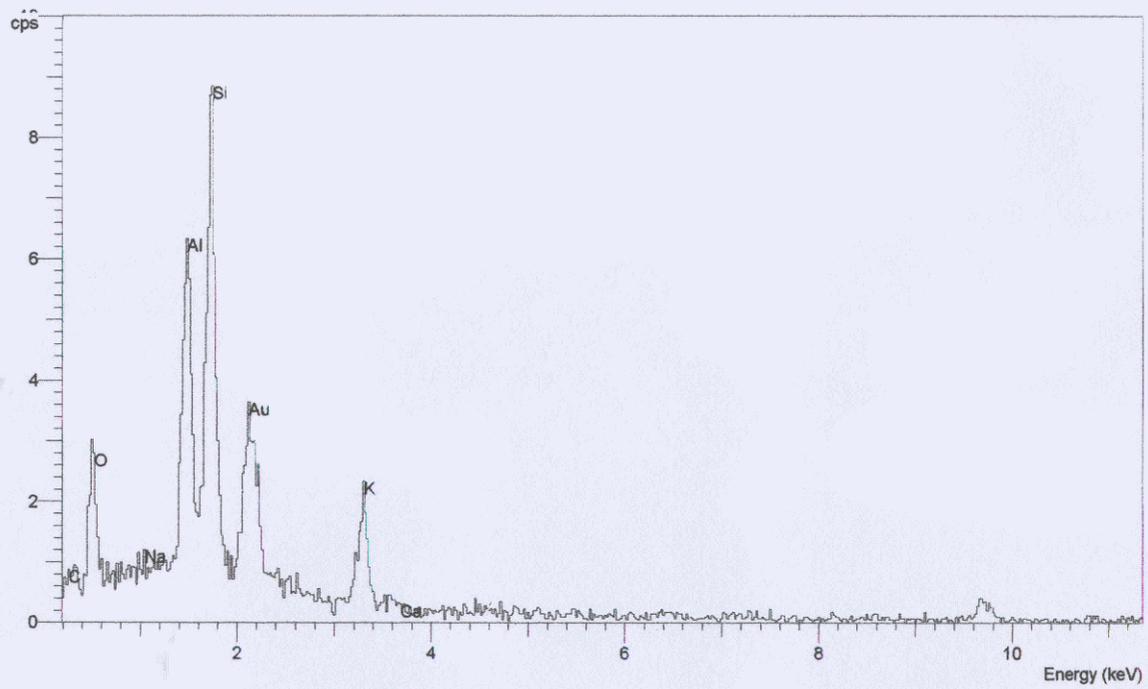
Muestra 1 (superficie)

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	18.027	1.921	0.403	1.25	15.44	0.50	21.50	CO2	56.58	19.82
Na K	2.434	0.910	0.777	0.89	1.08	0.14	0.79	Na2O	1.46	0.73
Al K	16.641	0.931	0.846	0.94	6.80	0.14	4.22	Al2O3	12.85	3.89
Si K	31.282	1.094	0.848	1.01	12.74	0.20	7.59	SiO2	27.26	6.99
K K	3.450	0.608	1.051	0.99	1.13	0.07	0.49	K2O	1.37	0.45
Ca K	0.995	0.478	0.997	0.99	0.35	0.06	0.14	CaO	0.48	0.13
O					62.45	0.53	65.28			60.17
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	60.17

* = <2 Sigma



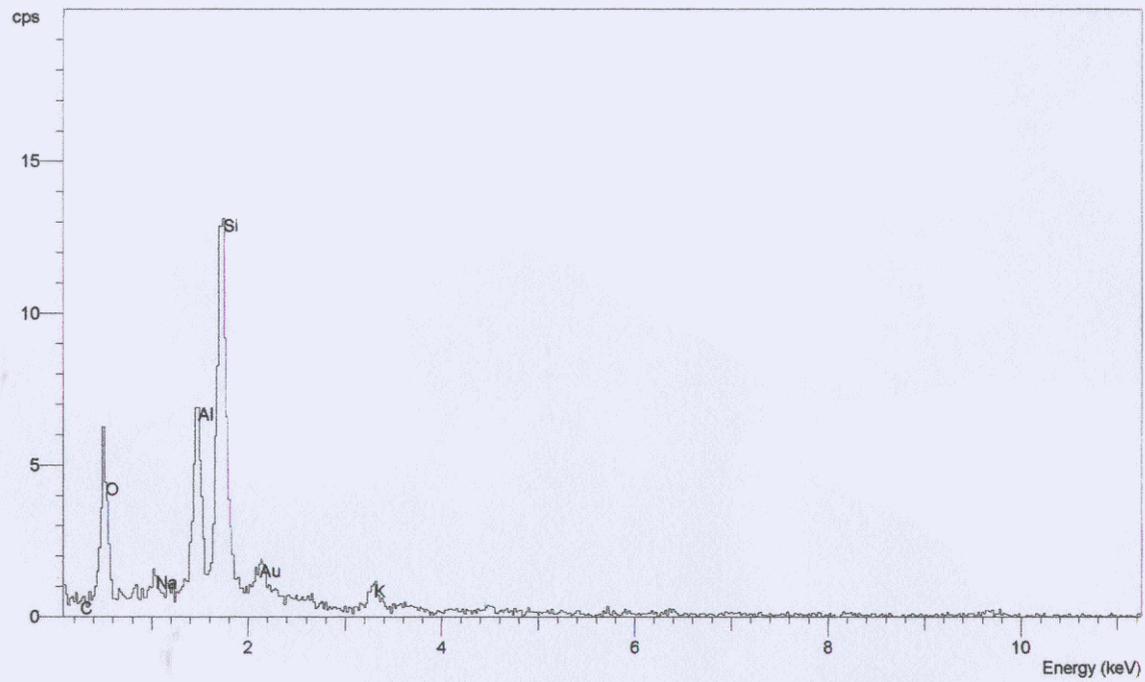
Muestra 1 (sup) puntual 5000

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	8.077	1.857	0.353	1.25	12.08	1.32	17.70	CO2	44.27	15.98
Na K	0.216*	0.836	0.798	0.89	0.14*	0.29	0.11*	Na2O	0.19*	0.10*
Al K	15.495	0.907	0.868	0.94	9.42	0.38	6.14	Al2O3	17.80	5.55
Si K	23.721	0.996	0.835	1.01	15.01	0.52	9.40	SiO2	32.10	8.49
K K	8.752	0.793	1.038	0.99	4.45	0.24	2.00	K2O	5.37	1.81
Ca K	0.352*	0.453	0.969	0.99	0.19*	0.13	0.08*	CaO	0.27*	0.08*
O					58.70	1.37	64.56			58.29
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	58.29

* = <2 Sigma



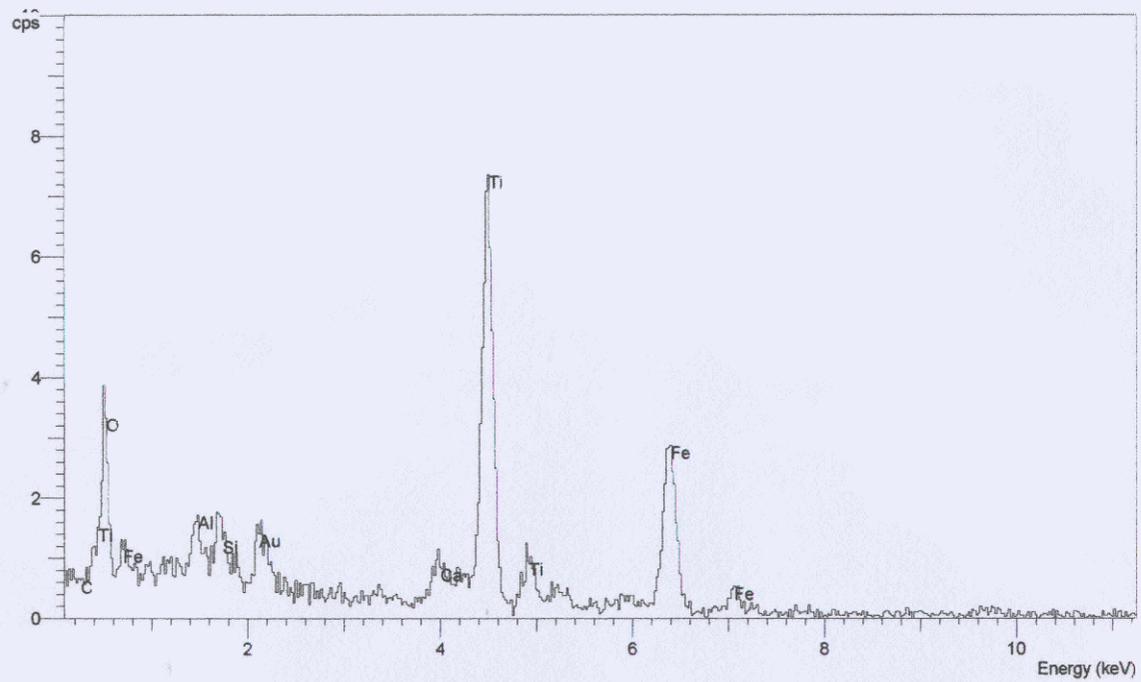
Muestra 2 (fractura) area

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %		Compound %	Nos. of ions
C K	7.112	1.784	0.299	1.25	10.05	0.97	14.93	CO2	36.82	13.51
Na K	3.378	0.863	0.822	0.89	1.74	0.19	1.35	Na2O	2.34	1.22
Al K	17.048	0.922	0.865	0.94	8.32	0.25	5.50	Al2O3	15.72	4.98
Si K	39.883	1.178	0.843	1.01	19.98	0.46	12.69	SiO2	42.75	11.49
K K	4.215	0.648	1.018	0.99	1.75	0.12	0.80	K2O	2.11	0.72
Ca K	0.447*	0.479	0.970	0.99	0.19*	0.09	0.09*	CaO	0.27*	0.08*
O					57.97	0.99	64.65			58.52
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	58.52

* = <2 Sigma



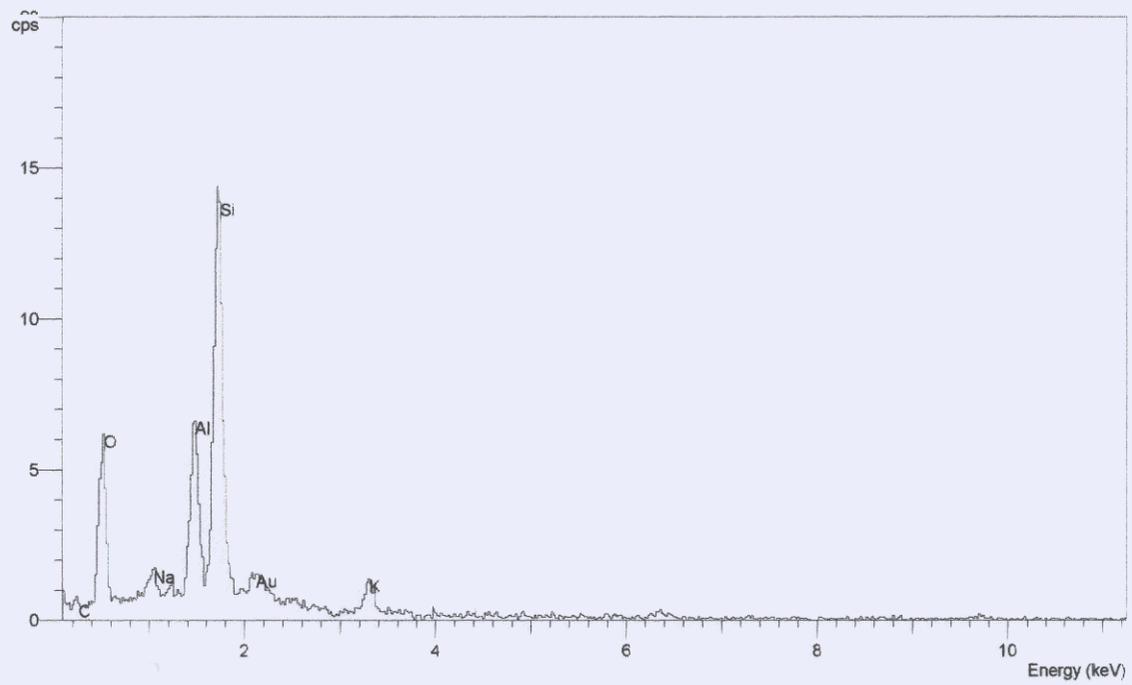
Muestra 2 (frac) p. blanca 5000

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	3.613*	1.954	0.512	1.25	19.72*	25.97	26.12*	CO2	72.26*	24.93*
Na K	-0.566*	0.792	0.751	0.89	-2.11*	8.51	-1.46*	Na2O	-2.84*	-1.39*
Al K	2.240	0.551	0.841	0.94	7.45	6.46	4.39	Al2O3	14.08	4.19
Si K	2.213	0.555	0.841	1.01	7.35	6.45	4.17	SiO2	15.73	3.98
K K	0.501*	0.517	1.073	0.99	1.31*	3.79	0.53*	K2O	1.57*	0.51*
Ca K	-0.208*	0.486	1.013	0.99	-0.57*	3.79	-0.23*	CaO	-0.80*	-0.22*
O					66.85	27.09	66.47			63.45
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	63.45

* = <2 Sigma

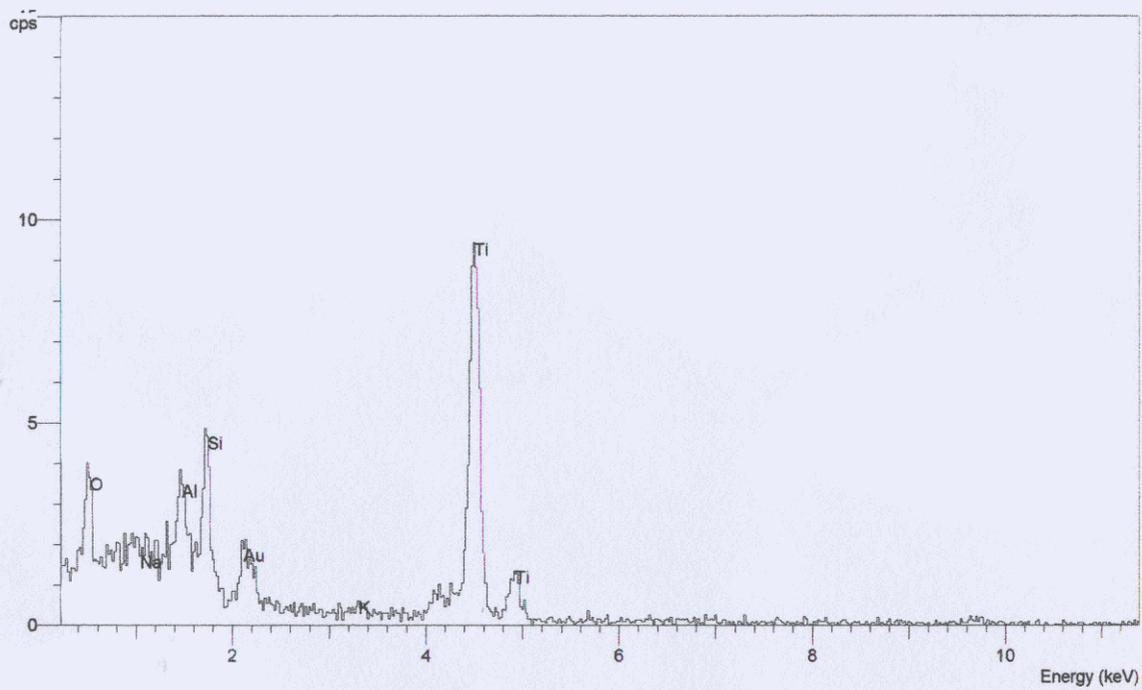


Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	25.421	1.814	0.414	1.25	15.91	0.26	22.04	CO2	58.29	20.32
Na K	4.347	0.961	0.773	0.89	1.46	0.08	1.06	Na2O	1.97	0.97
Al K	16.213	0.949	0.839	0.94	5.01	0.08	3.09	Al2O3	9.47	2.85
Si K	44.133	1.233	0.864	1.01	13.24	0.11	7.84	SiO2	28.32	7.23
K K	5.646	0.688	1.053	0.99	1.39	0.04	0.59	K2O	1.67	0.55
Ca K	0.783*	0.426	0.997	0.99	0.20*	0.03	0.08*	CaO	0.28*	0.08*
O					62.79	0.28	65.30			60.22
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	60.22

* = <2 Sigma



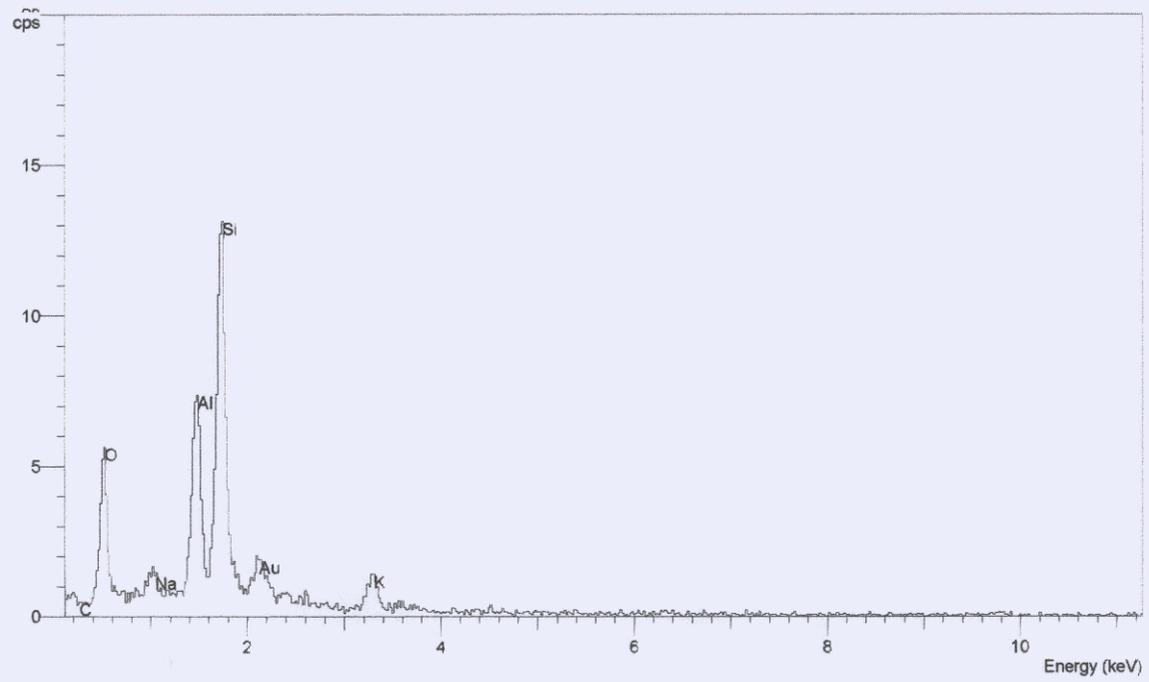
M2 pulida 5000x

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	3.754*	2.219	0.394	1.25	14.94*	12.26	20.95*	CO2	54.72*	19.24*
Na K	0.628*	0.993	0.780	0.89	1.26*	3.10	0.92*	Na2O	1.70*	0.85*
Al K	3.511	0.653	0.845	0.94	6.51	2.49	4.06	Al2O3	12.30	3.73
Si K	7.323	0.619	0.851	1.01	13.48	3.95	8.08	SiO2	28.84	7.43
K K	0.869	0.422	1.049	0.99	1.30	1.04	0.56	K2O	1.56	0.51
Ca K	0.397*	0.358	0.994	0.99	0.63*	0.89	0.26*	CaO	0.88*	0.24*
O					61.89	12.48	65.16			59.85
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	59.85

* = <2 Sigma



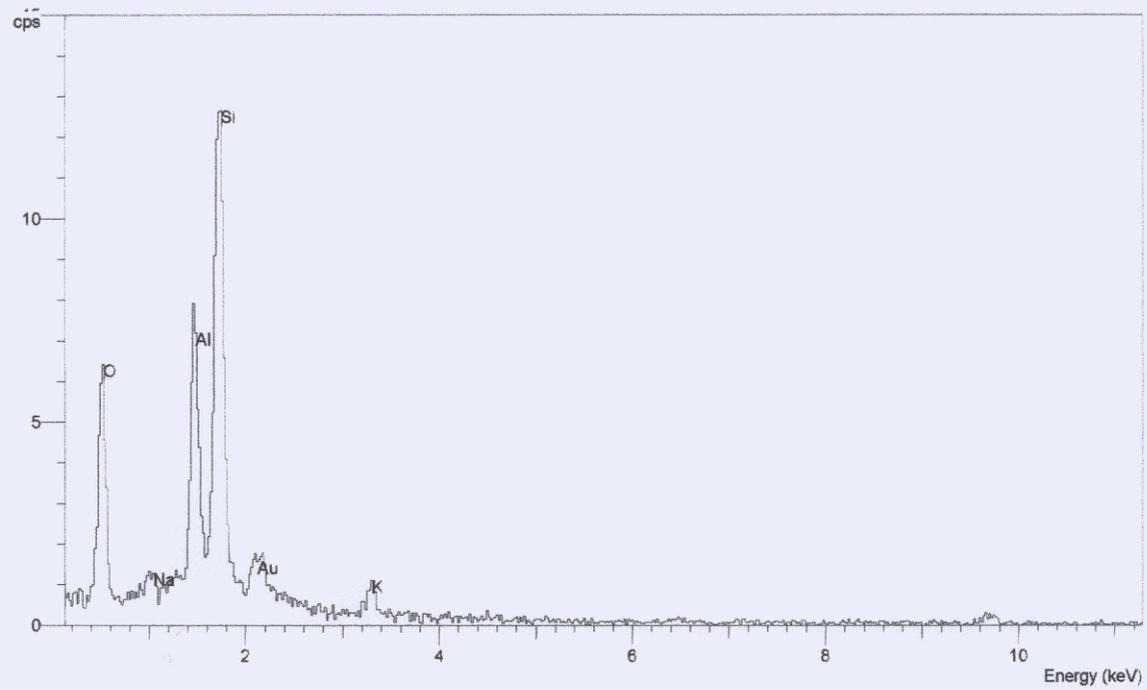
Muestra 2 (sup) a 5000

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	19.080	1.774	0.388	1.25	14.73	0.37	20.69	CO2	53.99	18.92
Na K	4.352	0.901	0.785	0.89	1.66	0.10	1.22	Na2O	2.24	1.12
Al K	19.000	0.959	0.844	0.94	6.75	0.11	4.22	Al2O3	12.75	3.86
Si K	38.452	1.170	0.848	1.01	13.60	0.15	8.17	SiO2	29.10	7.47
K K	5.658	0.688	1.046	0.99	1.62	0.06	0.70	K2O	1.95	0.64
Ca K	-0.076*	0.474	0.991	0.99	-0.02*	0.04	-0.01*	CaO	-0.03*	-0.01*
O					61.65	0.39	65.01			59.45
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	59.45

* = <2 Sigma



Muestra 3 (fractura)

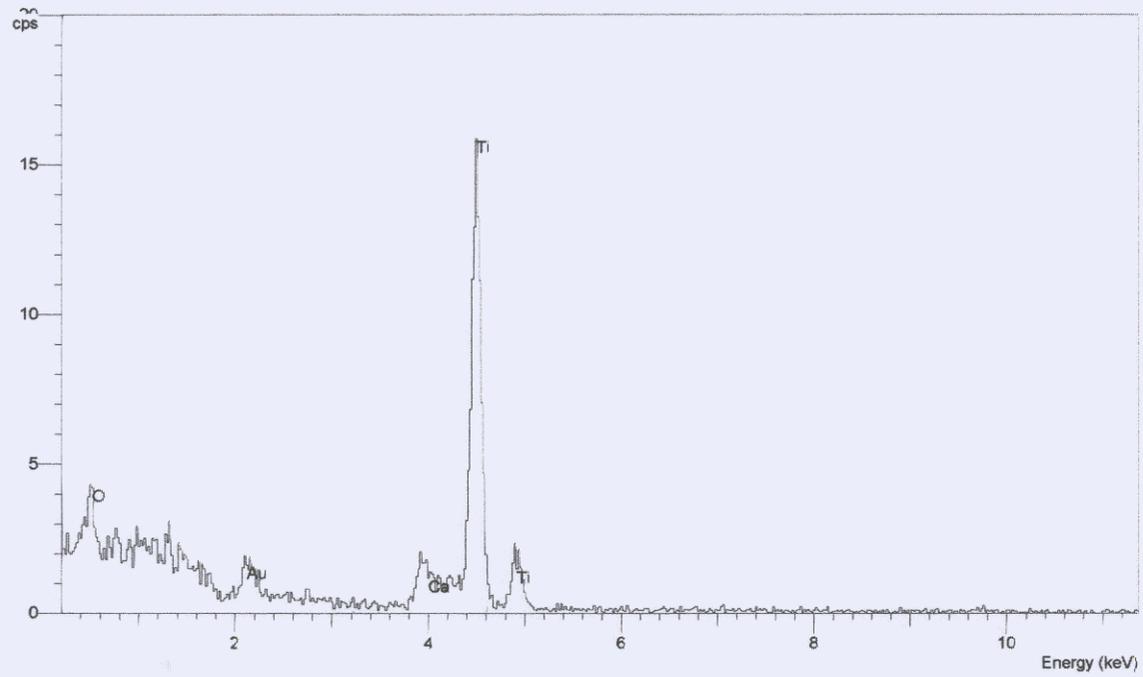
1 peak possibly omitted: 9.70 keV

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	7.727	1.633	0.316	1.25	11.39	1.02	16.61	CO2	41.72	15.20
Na K	2.011	0.766	0.810	0.89	1.16	0.20	0.88	Na2O	1.56	0.81
Al K	15.379	0.828	0.865	0.94	8.28	0.26	5.38	Al2O3	15.65	4.92
Si K	33.312	1.003	0.843	1.01	18.41	0.46	11.48	SiO2	39.37	10.51
K K	2.777	0.511	1.024	0.99	1.26	0.11	0.57	K2O	1.52	0.52
Ca K	0.261*	0.349	0.977	0.99	0.12*	0.08	0.05*	CaO	0.17*	0.05*
O					59.38	1.04	65.03			59.50
Total					100.00		100.00		100.00	
								Anion sum		59.50

* = <2 Sigma



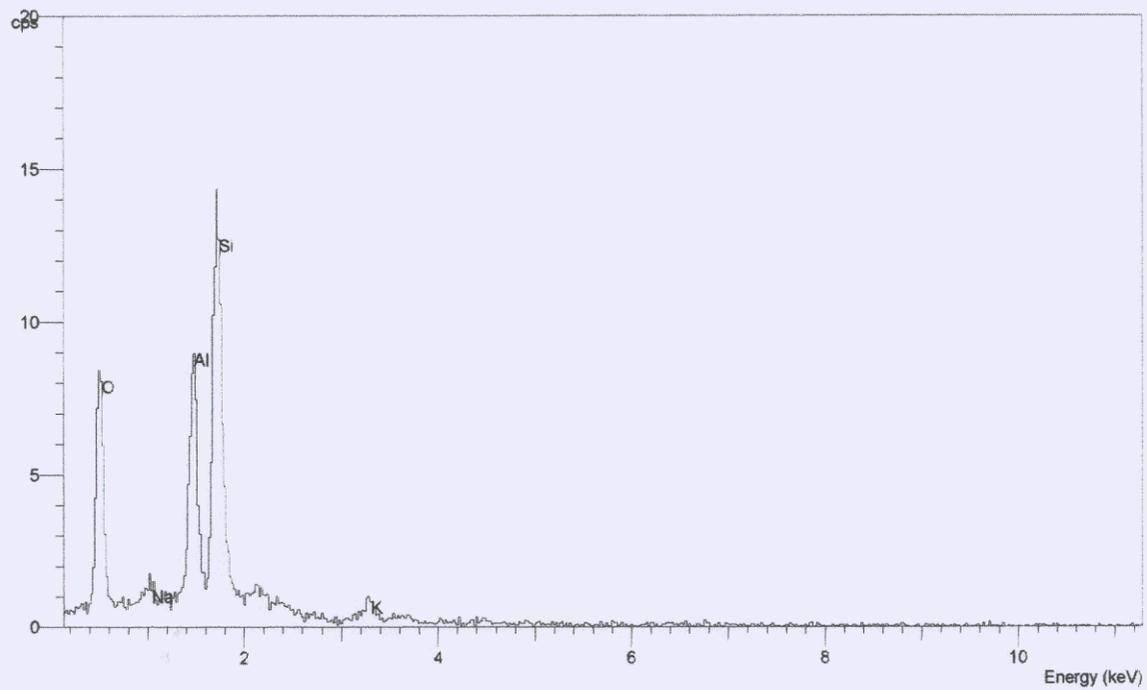
m3 pulida 5000x

Standards :

Ca K Wollas 23/11/93
 Ti K Ti 01/12/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %		Compound %	Nos. of ions
Ca K	0.505*	0.421	1.257	0.99	0.32*	0.22	0.22*	CaO	0.45*	0.21*
Ti K	69.008	1.856	0.933	1.00	59.68	0.83	33.19	TiO2	99.55	31.79
O					40.00	0.83	66.59			63.79
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	63.79

* = <2 Sigma



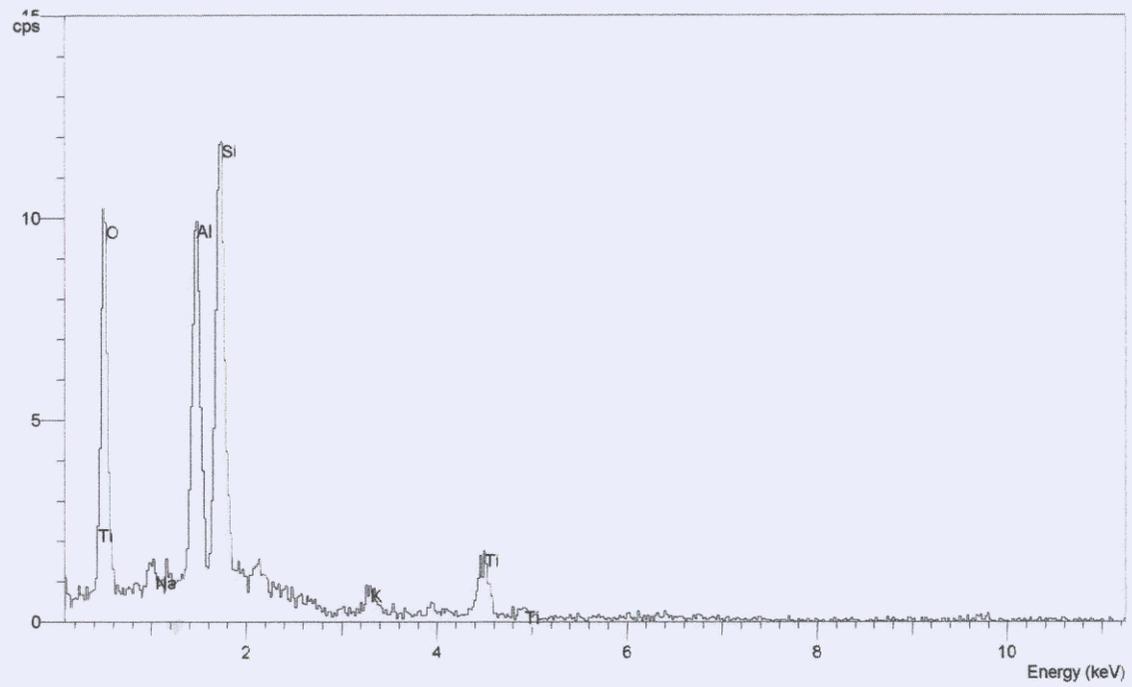
Muestra 3 sup. area

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	21.490	1.598	0.408	1.25	15.88	0.32	21.96	CO2	58.20	20.35
Na K	2.492	0.788	0.775	0.89	0.97	0.09	0.70	Na2O	1.31	0.65
Al K	18.379	0.868	0.845	0.94	6.56	0.10	4.04	Al2O3	12.40	3.74
Si K	35.531	1.035	0.851	1.01	12.60	0.13	7.45	SiO2	26.96	6.90
K K	2.683	0.515	1.052	0.99	0.77	0.04	0.33	K2O	0.93	0.30
Ca K	0.473*	0.386	1.000	0.99	0.14*	0.04	0.06*	CaO	0.20*	0.05*
O					63.07	0.34	65.46			60.65
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	60.65

* = <2 Sigma



Muestra 3 (sup) part.blanca 5000

2 peaks possibly omitted: 4.50, 4.92 keV

Standards :

C K CaCO3 01/12/93
 Na K Albite 02/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 K K MAD-10 02/12/93
 Ca K Wollas 23/11/93

Elmt	Apparent Conc.	Stat. Sigma	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %	Compound %	Nos. of ions	
C K	7.981	1.654	0.314	1.25	11.10	0.91	16.25	CO2	40.67	14.76
Na K	1.819	0.791	0.818	0.89	0.97	0.18	0.74	Na2O	1.31	0.68
Al K	22.855	0.910	0.871	0.94	11.48	0.29	7.48	Al2O3	21.69	6.80
Si K	30.268	0.989	0.812	1.01	16.29	0.38	10.20	SiO2	34.85	9.27
K K	2.650	0.494	1.024	0.99	1.13	0.09	0.51	K2O	1.36	0.46
Ca K	0.188*	0.340	0.978	0.99	0.08*	0.07	0.04*	CaO	0.12*	0.03*
O					58.94	0.93	64.78			58.86
Total					100.00		100.00		100.00	
									Anion sum	58.86

* = <2 Sigma

LISTADO DE FIGURAS

Fig. 2. 1	Tetraedro de silicato	56
Fig. 2. 2	Disposición de los tetraedros de silice	56
	a).- Isla de ortosilicato	b).- Isla de pirosilicato
	c).- Cadena	d).- Anillo
Fig. 2. 3	Unidades tetraédricas dobles de silicato	56
Fig. 2. 4	Cadenas simples de silicato	57
Fig. 2. 5	Cadenas dobles de silicato	57
Fig. 2. 6	Estructuras en cadena	57
Fig. 2. 7	Estructura de silicato en forma laminar	58
Fig. 2. 8	Estructura reticular del SiO ₂ (cuarzo)	58
Fig. 2. 9	Representación planar de una capa octaédrica de Al y una de tetraedros Si – O	58
Fig. 2.10	Representación espacial	59
Fig. 2.11	Estructura esquemática. Grupo de la mica	59
Fig. 2.12	Estructura del talco y pirofilita	59
Fig. 2.13	Estructura simplificada de la mascovita	60
Fig. 2.14	Estructura simplificada de la clorita	60
Fig. 2.15	Arcilla de china o caolín	61
Fig. 2.16	Arcilla de bola	61
Fig. 2.17	Arcilla para loza	61
Fig. 2.18	Arcillas refractarias	61
Fig. 2.19	Arcilla para gres	61
Fig. 2.20	Arcillas rojas	61
Fig. 2.21	Bentonita	61

Fig. 2.22	Micela	62
Fig. 2.23	Curvas de defloculación de diferentes defloculantes	62
Fig. 2.24	Efecto del contenido de sólidos	62
Fig. 2.25	Efecto de la dureza del agua	63
Fig. 2.26	Reograma de un fluido tixotrópico	63
Fig. 2.27	Tixotropía: estructura tipo castillo de naipes	63
Fig. 2.28	Proceso de vaciado de barbotina cerámica	64
	a).- vaciado por drenado	b).- vaciado sólido
Fig. 2.29	Pastas cerámicas más usuales	65
	(1) Pasta chamotada	
	(2) Porcelana	
	(3) Loza	
	(4) Pasta de arcilla roja	
	(5) gres	
Fig. 2.30	Cambio de volumen de un cuerpo cerámico al eliminar la humedad durante el secado	66
Fig. 2.31	Etapas de la vitrificación y densificación de una pieza cerámica durante la sinterización	66
Fig. 2.32	Curva de cocción en horno	68
Fig. 4. 1	Análisis térmico diferencial / termogravimétrico para la muestra F1	69
Fig. 4. 2	Análisis térmico diferencial / termogravimétrico para la muestra F2	70
Fig. 4. 3	Análisis térmico diferencial / termogravimétrico para la muestra F3	71
Fig. 4. 4	Curva de cocción de las muestras	72

- Fig. 5.1 Zonas de composición recomendadas para pasta vitrificadas, semi – vitrificadas y porosas 73
- Fig. 5.2 Curva de ATD / TG para la formulación F1, teniendo como referencia alúmina en atmósfera de nitrógeno, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/ min. 74

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2. 1	Energías de enlace	76
Tabla 2. 2	Grupos de silicatos	76
Tabla 2. 3	Silicatos con estructura en hojas	77
Tabla 2. 4	Composición mineralógica de caolines	77
Tabla 2. 5	Análisis químico de caolines	78
Tabla 2. 6	Minerales de feldespatos	78
Tabla 2. 7	Análisis químico de algunos talcos comerciales	79
Tabla 2. 8	Análisis químico de arcillas blancas	79
Tabla 2. 9	Principales procesos de conformado de materiales cerámicos	80
Tabla 2.10	Reacciones que ocurren durante la cocción de las piezas cerámicas a base de arcillas	81
Tabla 3. 1	Origen de materias primas	82
Tabla 3. 2	Formulaciones	82
Tabla 3. 3	Propiedades típicas de referencia en arcillas	83
Tabla 3. 4	Propiedades típicas de referencia en caolines	84
Tabla 3. 5	Propiedades típicas de referencia en feldespatos	85
Tabla 4. 1	Análisis químico de las materias primas	86
Tabla 4. 2	Análisis químico de las formulaciones	87
Tabla 4. 3	Evaluación física de las formulaciones	88
Tabla 4. 4	Relación de figuras que indica el área específica de las muestras en donde se realizó la microscopía	89