

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA



ANÁLISIS QUÍMICO Y MINERALÓGICO DE MATERIA PRIMA DE
DIVERSAS REGIONES DE EL SALVADOR Y SU FORMULACIÓN
PARA USO EN CERÁMICA FINA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO POR:

VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ SANTAMARÍA
OSWALDO HORACIO LUNA MÉNDEZ
FERNANDO VALDEMAR MEMBREÑO MONZÓN

PARA OPTAR AL GRADO DE:
LICENCIADO EN QUÍMICA Y FARMACIA

MARZO 2002

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMÉRICA



© 2001, DERECHOS RESERVADOS

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento,
sin la autorización escrita de la Universidad de El Salvador

SISTEMA BIBLIOTECARIO, UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

DRA. MARIA ISABEL RODRÍGUEZ

SECRETARIO GENERAL

LIC. MARGARITA MUÑOZ VELA

FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA

DECANO

LIC. MARIA ISABEL RAMOS DE RODAS

SECRETARIO

LIC. ANA ARELY CACERES MAGAÑA

ASESOR:

DR. MAURICIO RENE LARA ORTIZ

COLABORADOR:

FEDERICO JOSA

JURADO CALIFICADOR:

DRA. GLORIA RUTH CALDERÓN

LIC. GLORIA LETICIA JEREZ DE JUÁREZ

LIC. MARTA ILDA LUNA DE FLAMENCO

AGRADECIMIENTOS

A los Honorables Miembros de la Junta Directiva de la Facultad de Química y Farmacia, período 1999-2001, por la colaboración prestada para poder terminar nuestro proceso de graduación.

A los miembros del Jurado Calificador del Trabajo de Graduación.

Al Dr. Mauricio Lara y al Sr. Federico Josa por el apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

Al personal del laboratorio del Instituto de Investigaciones Geotécnicas de CEL, por habernos permitido realizar nuestra investigación.

A todas las personas que nos incentivaron a la culminación de nuestro estudio.

Muchas Gracias

Víctor, Fernando y Horacio

DEDICATORIA

A Jesús, María y José, por quererme tanto y permitir terminar mi carrera.

A mi hija Alexandra Verónica, por ser la inspiración de mi vida, te amo.

A mi mamá Cristabela, con todo mi amor, por su apoyo incondicional en todas mis actividades.

A mis hermanas Cecilia y Virginia, con mucho cariño.

A mis tíos, primos, sobrinos y demás familiares, con cariño.

A mis amigos, profesores, compañeros de estudio y de trabajo, con mucho respeto.

VÍCTOR MANUEL

DEDICATORIA

A Dios con amor y fé.

A mi madre Julia Josefa Méndez, con respeto.

A mis hermanos Tulio y William, con cariño.

A mi esposa Catalina, con mucho aprecio.

A mis hijas Frida, Zulma y Wendy, con todo mi amor.

A los demás miembros de la familia y amigos, con agradecimiento.

OSWALDO HORACIO

DEDICATORIA

A

DIOS

Con

AMOR

y

Mis PADRES, HERMANOS, ESPOSA e HIJAS

DEVOCIÓN

ENTREGA

UNIDAD

SOLIDARIDAD

Fernando V. Membreño.

ÍNDICE

	Página No.
INTRODUCCIÓN	i
OBJETIVOS	1
I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	2
1.0 MATERIAS PRIMAS CERÁMICAS	2
1.1 ARCILLAS	4
1.1.1 ORIGEN	5
1.1.2 CLASES	7
1.1.3 MINERALES	11
1.1.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA	16
1.1.5 ESTRUCTURAS	19
1.2 APLÁSTICOS	28
1.2.1 SÍLICA	28
1.2.2 FELDESPATO Y OTROS FUNDENTES	30
1.3 PASTAS CERÁMICAS	35
1.3.1 CLASIFICACIÓN	35
1.3.2 PROPIEDADES	37
1.3.3 FORMULACIONES	50
1.3.4 PROCESOS DE FORMACIÓN	56
1.3.5 SECADO	56

1.3.6 COCCIÓN	59
II METODOLOGÍA	62
2.0 MATERIAL, EQUIPO Y REACTIVOS	62
2.1 MATERIAL	62
2.2 EQUIPO	63
2.3 REACTIVO	64
2.4 INVESTIGACIÓN DE CAMPO	64
2.4.1 LUGARES DE MUESTREO	64
2.4.1.1 TÉCNICA DE MUESTREO	65
2.4.1.2 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS	66
2.4.1.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	66
2.5 TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS	67
2.5.1 ARCILLOSAS	67
2.5.2 APLÁSTICAS	68
2.6 PARTE EXPERIMENTAL	70
2.6.1 PRUEBA TÉRMICA PREVIA	71
2.6.2 ANÁLISIS QUÍMICO	72
2.6.3 ANÁLISIS MINEROLÓGICO	76
III. RESULTADOS	81
3.0 PRUEBA TÉRMICA PREVIA	81
3.1 ANÁLISIS QUÍMICO	83

3.2 ANÁLISIS MINEROLÓGICO	85
3.3 FORMULACIONES	86
3.4 ESPECIFICACIONES DE LAS MATERIAS PRIMAS Y DE LA PASTA FORMULADA PARA USO EN CERAMICA FINA.	95
IV. CONCLUSIONES	97
V. RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	
GLOSARIO.	

INTRODUCCIÓN

En El Salvador, la actividad de la cerámica tiene un gran potencial artesano con experiencia, pero un amplio porcentaje de éste, carece total o parcialmente de conocimientos básicos de química-cerámica.

Existen en nuestro país ciertos materiales que pueden emplearse en la fabricación de cerámica fina, cuya existencia, aunque conocida por muchas personas, son aprovechadas por muy pocas; en su mayoría emplea materia prima importada.

Es necesario proporcionar los conocimientos elementales de la química-cerámica tanto al recién iniciado como al artesano experto, y ampliar los de aquellos que ya posean una base teórica, permitiéndoles entre otros, conocer más y mejor nuestros recursos cerámicos, probar y emplear nuevos materiales, elaborar nuevas y mejores formulaciones, explicar algunos de los fenómenos físico-químicos que suceden en cerámica. Consecuentemente esto, podrá conducirnos a una reducción en la dependencia de materia prima extranjera.

Por lo tanto en el presente trabajo se estudiaron los aspectos químicos mineralógicos de algunos materiales cerámicos nacionales para la formulación y elaboración de cerámica fina.

Se colectaron materiales cerámicos en doce lugares, de los cuales ocho corresponden a muestras plásticas (arcillosas) y cuatro aplásticas.

El estudio comprende la evaluación del comportamiento térmico de las muestras, determinación de su composición química por absorción atómica utilizando el método de fusión con metaborato de Litio, e identificación mineralógica por difracción de rayos -X, empleando el método del polvo.

Con base a los resultados anteriores se elaboraron tres formulaciones, obteniéndose en una de ellas propiedades aceptables para ser utilizada en cerámica fina.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

Conocer química y mineralógicamente, algunas materias primas utilizadas o no, actualmente, en la industria cerámica.

Determinar la clase y uso más apropiado de las formulaciones propuestas, basándose en la composición y comportamiento de las pastas cerámicas.

Objetivos Específicos

Cualificar por difracción de rayos-X los minerales presentes en los diferentes materiales en estudio.

Cuantificar mediante técnica de espectrofotometría de absorción atómica los elementos presentes en las muestras analizadas.

Elaborar diferentes formulaciones con base a los resultados de los análisis químico y mineralógico.

Establecer las propiedades físicas de los cuerpos formulados basados en pruebas térmicas.

Proporcionar los conocimientos elementales de la química-cerámica al artesano-ceramista.

I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.0 MATERIAS PRIMAS CERÁMICAS

Los tipos de minerales encontrados en la naturaleza son regulados principalmente por la abundancia de los elementos y las características geoquímicas. Puesto que el oxígeno, silicio y aluminio juntos dan cuenta del 90% de los elementos en la corteza terrestre, no es sorprendente que los minerales dominante son cuarzo, silicatos y aluminosilicatos. Estos junto con otros minerales compuestos de oxígeno constituyen un gran volumen que producen naturalmente materias primas cerámicas.

Las materias primas minerales usadas en la industria de la cerámica son principalmente inorgánicas, no metálicas, sólidos cristalinos formados por complejos procesos geológicos. Sus propiedades cerámicas son grandemente determinadas por la estructura cristalina y composición química de sus constituyentes esenciales, la naturaleza y cantidad de minerales accesorios presentes. Las características mineralógicas de tales materiales, y por lo tanto sus propiedades cerámicas, están sujetas a amplia variación entre diferentes casos o aún dentro del mismo caso, dependiendo del ambiente geológico en el cual el depósito mineral fue formado y las modificaciones físicas y químicas que han tenido lugar durante la subsecuente historia geológica.

Importantes materias primas fueron formadas en los tres de los grandes tipos de ambientes geológicos, los cuales están clasificados como ígneos, sedimentarios y metamórficos. Estos grandes tipos pueden ser además subdivididos dependiendo de las condiciones químicas y físicas prevalecientes. La mineralogía de cada ambiente depende

de la temperatura y presión de cristalización y la variación en la composición química de los materiales presentes. Ambientes ígneos son caracterizados por altas a moderadas temperaturas, un amplio rango de presión, y variación relativamente limitada en composición química. Ambientes sedimentarios son caracterizados por moderadas temperaturas (0-45°C) y generalmente presión constante (atmosférica); los materiales originados pueden ser derivados de una variedad de materiales pre-existentes los cuales varían ampliamente en la composición real. En ambientes metamórficos los depósitos minerales resultan de procesos que toman lugar abajo de la zona de desgaste; estos ambientes son caracterizados por un amplio rango de temperatura, presiones y composición real.

Un mineral o asociación mineral estable, es uno que tiene la más baja energía libre posible bajo las condiciones físicas y químicas particulares prevalecientes y por eso no tiene tendencia al cambio. Así los feldespatos, vidrio volcánico, y otros aluminosilicatos formados a elevadas temperaturas en un ambiente ígneo no son estables bajo las condiciones diferentes prevalecientes en un ambiente sedimentarios y cambian para formar minerales de arcilla (los cuales son estables en este ambiente). Muchos de los procesos geoquímicos relacionados con la formación de rocas y minerales son reproducidos bajo condiciones controladas de temperatura, presión y composición química en la fabricación de productos cerámicos ¹².

1.1 ARCILLAS

Arcilla es una roca sedimentaria compuesta de uno o varios minerales, rica en silicatos hidratados de aluminio, hierro o magnesio, alúmina hidratada u óxido férrico, con predominio de las partículas de tamaño coloidal o casi coloidal y dotada comúnmente de plasticidad cuando está suficientemente pulverizada y humedecida¹³, dura y compacta cuando seca¹⁷ y vitrificada cuando es cocida a temperatura suficientemente alta¹.

Las arcillas pueden estar libres de materia orgánica pero frecuentemente contienen otras impurezas tales como cuarzo, micas, feldespatos, óxidos de hierro, carbonatos de calcio y magnesio, las cuales afectan su color y temperatura de cocción.

El material clasificado como arcilla es considerado menor que 0.002mm o $< 2\mu$ de diámetro esférico efectivo. Hay un rompimiento natural en la continuidad del desgaste material en el límite más bajo de tamaño del limo, el cual es 2 micrones. En el material natural o roca triturada los granos más grandes clasificados como arena son, en examen microscópico, diferente de los granos monomineralógicos.

En la grava o arena gruesa, los granos pueden consistir de solo cuarzo o de cuarzo y otros granos. Tales granos son frecuentemente agregados. A simple vista el más fino material, arcilla, parece ser amorfo, pero aunque los granos son muy pequeños ellos son alumino-silicatos cristalinos.

La arcilla tiene diferentes reacciones químicas superficiales y distintas la mayoría de las propiedades físicas de las de granos grandes del limo, arena y grava de rocas

desgastadas. Cualquier cosa que sea la composición final, las partículas finas son llamadas arcillas.

Hay muchas clasificaciones del tamaño de los granos en los materiales naturales, pero la mayoría esta de acuerdo que la arcilla es < 2 micrones (0.002mm) en diámetro de grano.

Científicos de suelo formularon una clasificación internacional de los tamaños de los granos en suelos. La mayoría de los exámenes de la distribución del tamaño de los granos en suelos se refiere a estos tamaños a menos que sea declarado diferente. Los tamaños de los granos en la clasificación internacional son³:

Arena gruesa	$2 - 0.2\text{mm}$
Arena fina	$0.2 - 0.02\text{mm}$
Limo	$0.02 - 0.002\text{mm}$
Arcilla	$< 0.002\text{mm}$

1.1.1 ORIGEN DE LAS ARCILLAS

La arcilla es esencialmente un producto de desgaste de la desintegración y descomposición química de rocas ígneas y de algunos tipos de rocas metamórficas. En rocas sedimentarias es descompuesto grandemente (en detritos), pero durante el tiempo geológico una cierta cantidad de diagénesis generalmente toma lugar. En sedimentos no marinos y marinos no consolidados, la arcilla es también primero descompuesta (en detritos), pero puede subsecuentemente ser modificado por el medio ambiente. Los depósitos de arcilla comercial son mayormente residuales. Las arcillas pueden ser separadas de su medio ambiente original y acumularse como filones^{3,17}. Algunos de tales

depósitos de arcilla sedimentaria, son extraordinariamente puros, pero en general, las arcillas sedimentarias están constituidas principalmente de partículas relativamente finas¹⁷ y contienen muchas impurezas minerales y alguna materia orgánica. Esos que han sido derivados de transportación de vidrio volcánico en un medio ambiente acuoso forman los yacimientos de bentonita³.

Las arcillas pueden producirse por diferentes procedimientos: 1) hidrólisis e hidratación de un silicato (silicato alcalino + agua → silicato aluminico hidratado + hidróxido alcalino); 2) disolución de una caliza u otra roca que contenga impurezas arcillosas relativamente insolubles que quedan como residuo; 3) acción de los agentes atmosféricos sobre los esquistos (rocas sedimentarias ricas en arcilla); 4) sustitución de una roca por arcilla invasora y arrastre de los componentes de aquella en parte o en su totalidad por el agua; 5) depósito de arcilla arrastrada por agua en cavidades o venas.

La acción de los agentes atmosféricos y otros procesos afines pueden operar en todos los casos arriba indicados y evidentemente han predominado en la formación de arcilla durante las épocas geológicas, pero las soluciones acuosas calientes elevándose de rocas ígneas en vías de solidificación pueden desempeñar un papel importante en los procesos 1) y 4). Las arcillas pueden producirse a profundidades considerables gracias a esas alteraciones hidrotermales, en tanto que los yacimientos debidos a la acción de los agentes atmosféricos en la superficie no se forman a profundidades mayores que aquellas a las cuales pudieran circular las aguas superficiales en la época en que se produjo la meteorización¹³.

1.1.2 CLASES DE ARCILLA

La clasificación de las arcillas se ha basado en su geología, mineralogía, composición, propiedades y uso, y ninguna clasificación es totalmente completa¹².

Según son extraídas, las arcillas pueden ser clasificadas como cualquiera de las dos, residual o sedimentaria. Las arcillas residuales han quedado más o menos en el sitio de la roca descompuesta. Ellas son menos plásticas que las arcillas sedimentarias, porque ellas han sido sujetas a muy pocas fuerzas erosivas, el tamaño de sus partículas es muy grande. Las arcillas sedimentarias son éstas que, por acción del viento o agua lluvia, han sido transportadas lejos del sitio de la roca madre. Esta acción tuvo considerable efecto en la mezcla y descomposición en los minerales, y por lo tanto las partículas son muy finas y la arcilla más plástica.

Algunos de los tipos comunes de arcillas son los siguientes:

Caolin o Arcilla China: es la forma más pura y blanca de las arcillas tanto en seco como cocida, es extremadamente refractario o sea que vitrifica (ponerse sin poros y como vidrios) sólo a muy altas temperaturas, no es muy plástico y tiene muy poca dureza de secado, por estas razones el caolin es raramente usado solo, y no resulta conveniente a la ejecución alfarera, salvo cuando se mezcla con otros ingredientes. Se compone fundamentalmente de minerales del grupo del caolín, principalmente del tipo de la caolinita, es un importante ingrediente en todos los cuerpos de porcelana y loza blanca de alta temperatura.

Se reconocen 2 tipos de caolín, como son: a) **Caolín Residual**: el que se encuentra en el lugar en que se formó por meteorización de las rocas y b) **Caolín Sedimentario**: el que ha sido transportado desde su lugar de origen. Muestra propiedades coloidales más acentuadas que el caolín residual.

Arcilla de Bola: sedimentaria, de cocción blanca y de partícula de fino tamaño, excelente plasticidad y resistencia en seco. Químicamente similar al caolín después de cocción. En su estado sin cocer, sin embargo, posee rangos de color de un amarillento claro a un gris oscuro por el material orgánico presente. Tanto en el secado como en la cochura se registra generalmente gran encogimiento y, por esta razón no pueden usarse solas. Suele dar un cuerpo poco absorbente entre los conos (pirométricos) 5 (1180°C) y 10 (1260°C), pero en algunos casos hasta el cono 15 (1410° C). Su función es principalmente de agente aglutinante o de suspensión.

Arcillas Compactas o de Gres: son generalmente muy plásticas y cocen en la mitad del rango de temperatura, de alrededor de cono 5 a cono 10. Los cuerpos de arcilla compacta vitrifican como algunas clases de arcillas de bola, pero es muy difícil su generalización porque tienen un amplio intervalo de colores, composiciones y propiedades. Comparada con el caolín, ellas contienen mucho más impurezas, tal como calcio, feldespato y hierro, todos los cuales bajan la temperatura de maduración e imparten color a la arcilla. Dependiendo de las condiciones atmosféricas de la cocción, el color podría variar de amarillo (ante) a gris.

La experiencia indica que una arcilla corriente mejora en general sus propiedades, añadiéndole mejor una arcilla de gres que pedernal o feldespato.

Un intervalo típico de composición para una arcilla de gres que vitrifica entre 1120 – 1180° C es: 50-67% de SiO_2 ; 21-32% Al_2O_3 ; 0.5-2.5% TiO_2 ; 0.8-8% Fe_2O_3 .

Arcillas de Loza Común: comprende un grupo de arcillas de baja cocción que maduran a temperatura comparativamente bajas, que oscilan del cono 08 al cono 02. Ellas contienen un porcentaje relativamente alto de hierro el cual sirve como un fundente (sustancia que baja la temperatura de maduración de la arcilla), de modo que cuando cocida son algo frágiles y bastante porosas. El hierro también da a los objetos de loza quemada su color café-rojo oscuro. A diferencia de los cuerpos de gres, el cuerpo de loza corriente, después de cocido, tiene una porosidad entre 5 y 15 por ciento. Por los varios fundentes que contiene, los objetos de loza no pueden ser hechos vítreos, por lo deforme y frecuentes burbujas arriba de 1150°C. Todos estos factores limitan su uso comercial a cosas tal como ladrillos de construcción, floreros y baldosas (tejas o azulejos).

Algunas arcillas de loza varían grandemente en su composición. Ellas frecuentemente contienen sulfatos solubles que son sacados a la superficie durante el secado. Cuando la arcilla es cocida, una película blanca aparece en la superficie. Este defecto puede ser eliminado por una adición al cuerpo de arcilla de un 2 por ciento de carbonato de bario¹³.

Arcillas Refractarias: arcilla de carácter sedimentario o residual, que tiene un E.C.P. (cono pirométrico equivalente) no inferior al cono 19 (1515°C). Tiene un porcentaje

ligeramente más bajo de fundentes que la arcilla pura (caolín). Puede variar en plasticidad y otras propiedades físicas, y si bien a menudo adquiere color anteaado (amarillento) o gris por la cocción, no lo hace necesariamente. Las arcillas con un E.C.P. comprendido entre 19 (1515°C) y 26 (1595°C) inclusive, se llaman arcillas refractarias de baja resistencia, y las que tienen un E.C.P. de 27 (1605°C) o más alto, se llaman arcillas refractarias de alta resistencia.

Usada comúnmente para ladrillo aislante, ladrillo refractario duro y accesorios de horno (los estantes y pilares que sostienen las ollas en un horno). Sus características físicas varían. Algunas arcillas refractarias tienen una cualidad plástica fina, mientras que otras son ásperas y granulares y más convenientes para hacer a mano que para torneado. Las arcillas refractarias generalmente contienen algo de hierro pero raramente tienen calcio o feldespatos.

Bentonita: es una arcilla poco común, en pequeñas cantidades funciona como un plastificante. Tiene el tamaño de partícula más fina de cualquier arcilla conocida.

La bentonita fue formada en épocas prehistóricas del polvo de las erupciones volcánicas transportado por el aire. Comparado con el caolín, es un poco más alto en sílica y más bajo en alúmina, con una pequeña cantidad de hierro. Un vidriado no arcilloso puede incluir hasta 3% de bentonita para un adhesivo sin cambiar notablemente el vidriado. Cuando es usado en arcillas aplásticas (bajo), una parte de bentonita es igual a 5 partes de arcilla de bola. El cuerpo debe ser mezclado en seco, dado que la bentonita se pone bastante pegajosa cuando es mezclada solamente con agua.

Las arcillas de bola y los caolines son las arcillas comerciales usadas más comúnmente en la industria cerámica. Los alfareros y artistas pueden usar otras arcillas que encuentren localmente para sus trabajos.

Por lo que antecede puede verse que el ceramista se ha preocupado más por los caracteres físicos de los materiales, como la finura del grano, la plasticidad y el poder aglutinante, que por la composición mineralógica y química exacta, sin embargo, se tiende a apreciar mejor la composición y la estructura mineralógica con el fin de que se puedan preparar cuerpos cerámicos que den las propiedades óptimas en las diversas fases de la fabricación de los productos, permitiendo así al técnico producir artículos de mejor calidad.

1.1.3 MINERALES DE ARCILLA

La naturaleza cristalina de los minerales de arcilla fue anticipada mucho tiempo por los mineralogistas, pero no fue hasta 1930 que Hendricks y Fry, del Departamento de Agricultura de Estados Unidos Americanos fueron capaces de comprobar por fotografías de polvos por rayos-X que la arcilla consiste de partículas minerales cristalinas. Aún cuando el hecho de la cristalinidad era conocido, no fue hasta después de la II Guerra Mundial que usando goniómetros de amplio-rango en unidades de rayos-X proporcionaron los medios para la rápida identificación de los minerales presentes en arcilla. Como resultado de los esfuerzos iniciales de muchos científicos, la identificación de los minerales de arcilla en todas las clases de materiales sedimentarios ha llegado a

ser rutina en muchas universidades, instituciones de gobierno, institutos de investigación e industria privada.

Los minerales principales en las arcillas son silicatos retículo-laminar (filosilicatos), excepto el grupo Sepiolita-Paligorsquita los cuales son silicatos en cadenas. Los silicatos retículo - laminar están compuestos por la combinación de dos unidades estructurales, un tetraedro silicio-oxígeno y un octaedro aluminio-oxígeno-oxhidrilo³. Los minerales de arcilla generalmente presentan partículas de gran tamaño (ejemplo: mica y clorita) y muchos minerales no arcillosos (ejemplo: cuarzo, feldespato, anfíboles y varios carbonatos) pueden presentar partículas menores que 2 mm de diámetro. Puesto que los silicatos de partículas de fino tamaño influyen muy fuertemente en la característica propia de la arcilla, la plasticidad, estos constituyen los grupos básicos que nosotros llamamos “ minerales de arcilla”¹⁵. Los minerales de arcilla generalmente establecen cada uno de los grupos mayores, caolinita, mica, montmorillonita, clorita y paligorsquita-sepiolita³.

CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES ARCILLOSOS.

1. *Por su Estructura cristalográfica*³

Grupo de la Caolinita

a) **Estructuralmente y Químicamente similar a la caolinita:**

Caolinita

Caolinita desordenada y pobremente cristalina

Haloisita

Diquita

Nacrita

Metahaloisita

Haloisita desordenada

Anauxita

b) **Similar al subgrupo a) pero con agua adicional**

Alofana (amorfa a los rayos X; contiene agua adsorbida)

Haloisita (contiene agua interlaminar) también llamada Endellita

Grupo de Mica

Muscovita

Glaucónita

Celadónita

Biotita

Illita (Hidromuscovita o hidrómica)

Vermiculita

Grupo de la Montmorillonita:

Montmorillonita

Nontronita

Saponita

Stevensita

Hectorita

Sauconita

Beidelita

Grupo de la Clorita:

Clorita

Chamosita

Grupo de la Palygorsquita – Sepiolita:

Palygorsquita (Pilolita, Lassalita o Atapulgita)

Sepiolita.

2. De acuerdo con la Sucesión de las Láminas Estructurales Componentes⁷:

- a) Bilaminares o minerales 1:1 aquellos compuestos por una lámina de tetraedros y otra de octaedros. Entre ellos: la caolinita; la haloisita; la diquita; la nacrita.
- b) Trilaminares o minerales 2:1 aquellos compuestos por la sucesión de láminas de tetraedros, octaedros y otra de tetraedros. Entre ellos: la illita (dioctaédrico); la vermiculita (trioctaédrico); la montmorillonita (dioctaédrico); la nontronita; la beidelita; la atapulgita.
- c) Tetralaminares o minerales 2:2 formados por la sucesión de láminas de tetraedros, octaedros, tetraedros y octaedros, entre ellos: la clorita.
- d) Amorfos, (como la alófana) e intergradados o interestratificados, de carácter no bien definido por estar sus paquetes formados por diferentes minerales arcillosos en su proceso de síntesis o de descomposición.

Cuadro No. 1 Clasificación y formulas estructurales de algunos de los minerales arcillosos mas comunes (X=Ca, Mg, K, Na, H₂O: Y= moléculas H₂O.)⁷

Minerales	Cationes interlaminares y adsorbidos	Atomos centrales de octaedros	Atomos centrales de tetraedros	
Minerales Bilaminares, 1:1				
Caolinita		Al ₄	Si ₄	O ₁₀ (OH) ₈
Haloisita		Al ₄	Si ₄	O ₁₀ (OH) ₈ · 2H ₂ O
Minerales Trilaminares, 2:1				
Ilita (dioctaédrico)	K _{0,58} X _{0,17}	(Al _{1,55} Fe ³⁺ _{0,20} Mg _{0,25})	(Si _{3,50} Al _{0,50})	O ₁₀ (OH) ₂ · y H ₂ O
Vermiculita (trioctaédrico)	X _{0,66}	(Mg _{2,61} Fe ³⁺ _{0,10} Al _{0,29})	(Si _{0,95} Al _{1,05})	O ₁₀ (OH) ₂ · y H ₂ O
Montmorilonita (dioctaédrico)	X _{0,33}	(Al _{1,50} Mg _{0,66})	(Si _{3,91} Al _{0,09})	O ₁₀ (OH) ₂ · y H ₂ O
Minerales Tetralaminares, 2:2				
Clorita		(Mg _{4,65} Fe ³⁺ _{0,40} Al _{0,90})	(Si _{3,20} Al _{0,80})	O ₁₀ (OH) ₈
Minerales amorfos				
Alófana				
Minerales integrados				

1.1.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química de los minerales arcillosos varía dentro de grandes límites, inclusive dentro de un mismo mineral. Esto se debe sobre todo al intercambio isomórfico y a los cationes adsorbidos entre paquetes laminares y en las superficies externas del mineral. Sólo la caolinita y la haloisita tienen una composición química más o menos estable y definida⁷.

Cuadro No.2 Variaciones en la composición química de algunos minerales arcillosos⁷.

Mineral arcilloso	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% TiO ₂	% CaO	% MgO	% K ₂ O	% Na ₂ O
Caolinita	45-48	38-40	-	-	-	-	-	-
Montmorillonita	42-55	0-28	0-30	0-0,5	0-3	0-2,5	0-0,5	0-3
Illita	50-56	18-31	2-5	0-0,8	0-2	1-4	4-7	0-1
Vermiculita	33-37	7-18	3-12	0-0,6	0-2	20-28	0-2	0-0,4
Clorita	22-35	12-24	0-15	-	0-2	12-34	0-1	0-1

Cuadro No. 3. Análisis Químico de las Arcillas Típicas, en porcentajes¹⁷

Componentes	Arcilla de Porcelana Inglesa †	Caolín de Carolina del N. †	Caolín plástico de Florida †	Ball clay de Kentucky	Ball clay Tennessee	Arcilla compacta de Nueva Jersey	Arcilla roja de ladrillo
Sílice (SiO ₂)	48	46	47	53	61	68	57
Alúmina (Al ₂ O ₃)	38	36	37	29	25	22	19
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₂)	0.5	0.6	0.8	2	1	1.6	7
Magnesio (MgO)	-	0.4	0.2	0.3	0.1	0.2	3
Cal (CaO)	-	0.4	0.2	0.4	0.1	0.3	4
Titanio (TiO ₂)	-	0.4	0.2	0.8	1.3	-	1
Alcalis (K,NaO) *	2	0.7	0.3	2	2	2.5	5
Agua combinada	12	13	15	12 ‡	10 ‡	6	4
Oxido básicos	2.5	2.1	1.5	4.7	3.2	4.6	19
Oxidos neutros	38	36.4	37.2	29	25.0	22.0	19
Oxidos ácidos	48	46	47.0	53.8	62.3	68.0	58

† Lavada.

‡ Incluye algunas materias orgánicas.

* Representa la suma de los óxidos K₂O y Na₂O en igual proporción

La composición química de los materiales cerámicos nos dice algo de lo que podemos esperar cuando los usemos en una pasta, particularmente de como se comportará en la cochura. Por ejemplo, los caolines altamente puros son muy refractarios; por otra parte, las arcillas compactas que contienen potasa (K_2O) y cal (CaO) se quemarán fácilmente. El análisis de la cantidad de óxido de hierro (Fe_2O_3) presente en la arcilla nos dice cual será el color quemado¹⁷.

El análisis químico hecho a la materia prima, nos indica los elementos químicos presente en el material usualmente en forma de óxidos^{17,18}: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , etc.

Los óxidos componentes los podemos clasificar en tres grupos de acuerdo al efecto de éstos en el cuerpo formado: (1) los óxidos básicos, (2) los óxidos neutros y (3) los óxidos ácidos¹⁷.

RO BASES	R_2O_3 NEUTROS (<i>Oxidos anfotéricos</i>)	RO_2 ACIDOS
Li_2O^*	Al_2O_3	SiO_2
Na_2O^*	B_2O_3	TiO_2
K_2O^*		ZrO_2
CaO		Formadores de vidrio ¹⁵ .
MgO		
BaO		
ZnO		
FeO		
MnO	Fe_2O_3	
PbO	Sb_2O_3	
CdO	Cr_2O_3	

Agentes fundentes¹⁵

Elementos refractorios¹⁵

* Una de las pocas excepciones; 2 átomos de litio, sodio o potasio unidos con 1 de oxígeno para formar el óxido.

Los óxidos básicos RO llamados también agentes fundentes; son principalmente elementos alcalinos o metálicos que forman sus óxidos por combinación con un átomo de oxígeno, tienen el efecto de fundir¹⁵. Entre más alto es el porcentaje de los óxidos básicos, más baja es la temperatura requerida para la quema. Un contenido demasiado alto en álcalis puede originar la distorsión y deformación del producto en la cocción¹⁸.

Los óxidos neutros R_2O_3 u óxidos anfotéricos, también llamados elementos refractarios, no son fáciles de clasificar pueden en ocasiones funcionar tanto como una base o como un ácido. Sin embargo, el mejor óxido en este grupo, alúmina (Al_2O_3), siempre tiene efecto refractario¹⁵. Cuanto mayor es el contenido en alúmina de un material tanto mejor suele ser su refractariedad¹⁸. En cambio, el óxido rojo de hierro (Fe_2O_3) es un activo fundente también como un colorante, se ajusta a la relación del óxido R_2O_3 pero no posee las cualidades refractarias que tiene la alúmina¹⁵.

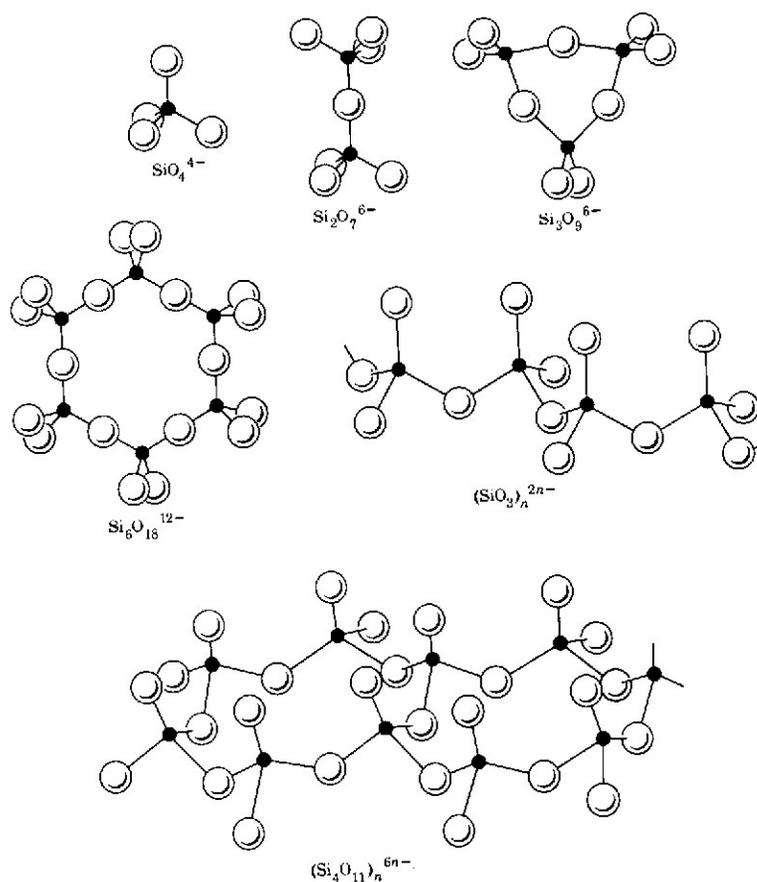
Los óxidos ácidos RO_2 , son los formadores de vidrio. El óxido más importante de este grupo es la sílica (SiO_2)¹⁵ y es el principal componente en la formación del vidrio que inicialmente aglutina a los granos y que posteriormente llena los espacios entre ellos, durante el período final de la cocción de una arcilla o pasta; agregando fuerza al cuerpo formado^{16, 12}

1.1.5 ESTRUCTURAS

Los silicatos están formados por el tetraedro silicio-oxígeno como unidad básica. Al centro se encuentra el átomo de silicio (diámetro 0.78 \AA), y en los cuatro vértices se

encuentran cuatro átomos de oxígeno (diámetro 2.64 Å). Los cuatro átomos de oxígeno satisfacen las cuatro valencias positivas del Si quedando por satisfacerse cuatro valencias negativas de los oxígenos cuya saturación permite la formación de silicatos simples y también la polimerización de los tetraedros que da origen a los silicatos más complejos⁷.

Figura No. 1 Algunas estructuras de Silicatos¹²



© 2001, DERECHOS RESERVADOS

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento,
sin la autorización escrita de la Universidad de El Salvador

SISTEMA BIBLIOTECARIO, UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

Figura No. 2 Dibujo esquemático mostrando: a) un tetraedro de SiO_4 sencillo, y b) estructura hojosa de tetraedros dispuestos en red hexagonal⁹

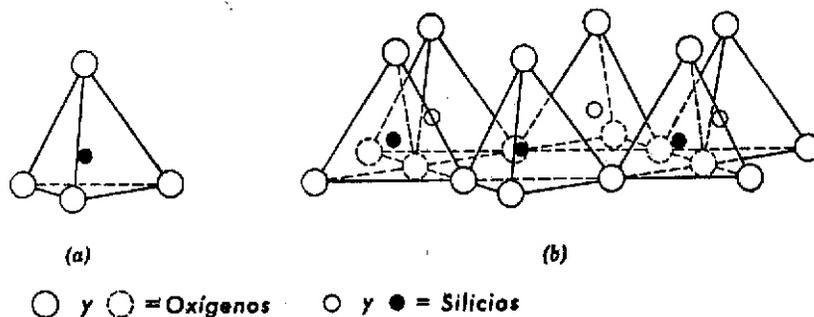
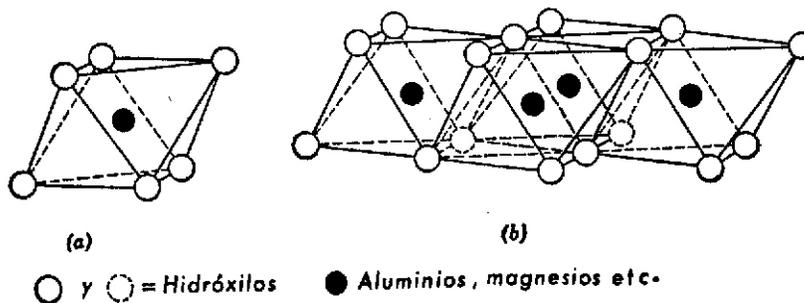


Figura No. 3 Dibujo esquemático mostrando: a) Unidad octaédrica sencilla, y b) Hojas de unidades octaédricas⁹

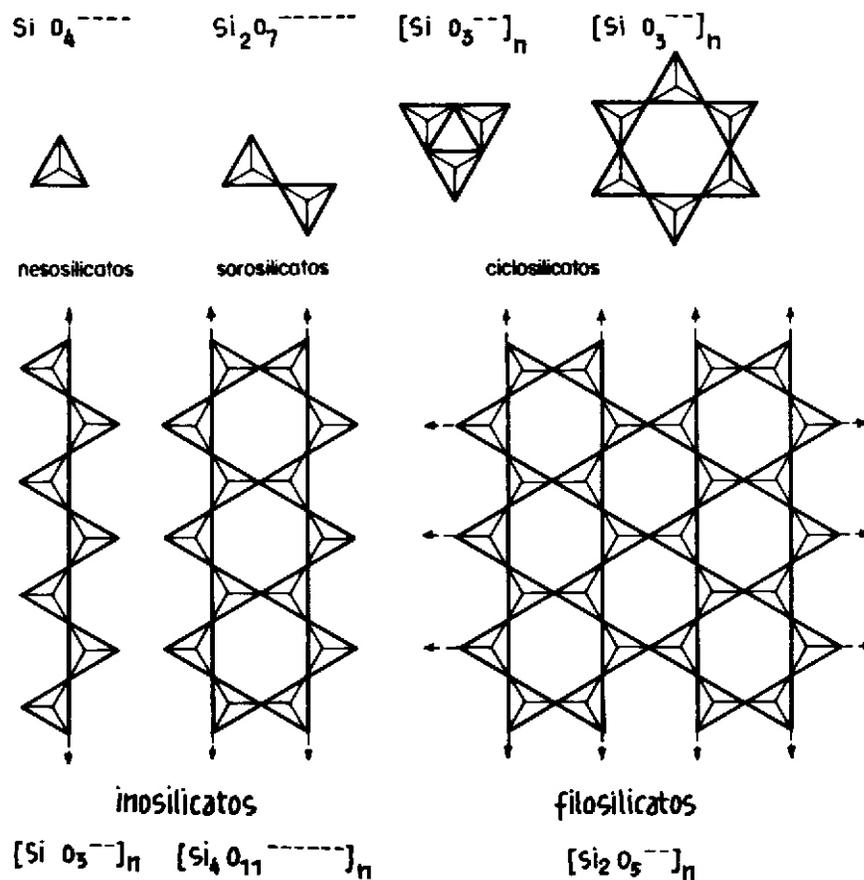


Se forman varias estructuras según como se unen los tetraedros cada uno de los cuales comparte tres oxígenos y esta es la forma que se encuentra en los minerales de arcilla.

La relación Si/O es de 2:5.¹⁶

Se pueden agrupar tres, cuatro y seis tetraedros formando anillos (ciclosilicatos); después cadenas simples o dobles (Inosilicatos); y por último, láminas (filosilicatos) y estructuras en andamiaje de tetraedros (tectosilicatos). Al aumentar el número de tetraedros que forman un polímero disminuye la relación Si:O⁷.

Figura No. 4 Estructura Atómica de los Silicatos⁷



Los minerales arcillosos están constituidos básicamente por láminas formadas por la unión de tetraedros de sílice, que en su disposición dejan espacios hexagonales en los que caben iones OH⁻. El vértice superior de los tetraedros quedan libres y por lo tanto disponen de una valencia en el átomo de oxígeno correspondiente. Si dos láminas así formadas se unen entre sí dejando el lado de los vértices de los tetraedros hacia adentro, se forman cavidades “octaédricas” en cuyos vértices se encontraran oxígenos u

oxidrilos. Dentro de esas cavidades octaédricas se disponen cationes pequeños como Al^{3+} , Fe^{2+} y Mg^{2+} que satisfacen las cargas negativas de oxígenos y oxidrilos⁷.

En las arcillas de alta calidad sólo se encuentran Al^{3+} .¹⁶ Cuando estos lugares se llenan con iones divalentes (por ejemplo Mg^{2+} o Fe^{2+}) todos los sitios posibles quedan ocupados; si se llenan con iones trivalentes (por ejemplo Al^{3+} o Fe^{3+}) sólo dos, de cada tres cavidades octaédricas se ocupan. En el primer caso se dice que son minerales trioctaédricos; en el segundo, dioctaédricos⁷.

Al igual que en los tetraedros de Si, los octaedros de Al están formados por un ión central relativamente pequeño ($\text{Al} = 1.14 \text{ \AA}$ de diámetro) rodeados por 6 iones de tamaño más grande de oxígeno ($\text{O} = 2.64 \text{ \AA}$ de diámetro). Los octaedros de Al se disponen también en forma laminar y las cargas negativas de las láminas de los tetraedros de Si y de los octaedros de Al se satisfacen a base de iones de oxígeno formando así paquetes de minerales arcillosos. Cada sucesión laminar descrita constituye un paquete unitario. Los cristales de los minerales arcillosos están constituidos por una serie de paquetes elementales (llegan a 10 y 20).

Los iones centrales Si y Al pueden ser reemplazados isomórficamente por átomos que tengan un diámetro similar. Si (0.78 \AA) es reemplazado generalmente por Al (1.14 \AA) en los tetraedros. El Al de los octaedros es reemplazado a veces por Mg (1.56 \AA), Fe^{2+} (1.16 \AA), o Fe^{3+} (1.34 \AA) o por Mn (1.82 \AA)⁷.

La lámina tetraédrica encaja en la octaédrica para formar las capas típicas de los minerales de arcilla. Esto ocurre al sustituir cuatro de los seis OH^- en la zona de la célula

unitaria por el vértice superior O^{2-} de la capa tetraédrica. También son posibles las estructuras de dos láminas, una tetraédrica y otra, octaédrica entrelazadas y los de tres laminas con una octaédrica entre dos tetraédricas. Entre los minerales de dos láminas se cuentan los de caolín y los de tres se dan entre las micas y las montmorillonitas.

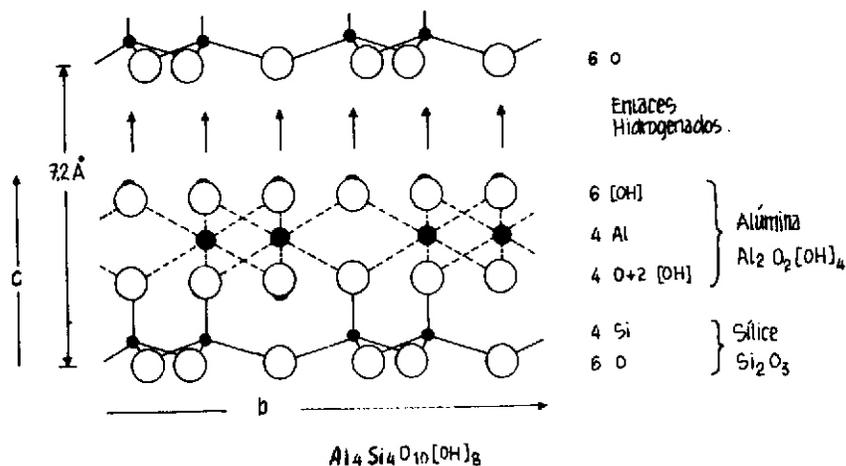
La célula unitaria o elemental de los minerales de arcilla pueden tener dos o más capas superpuestas. Cuando una capa queda exactamente sobre la inferior, resulta una estructura ortorrómbica. Sin embargo, por lo general, las capas están desplazadas en una dirección (monoclínico) o en dos (triclínico). Algunos minerales como la montmorillonita parecen tener una disposición completamente al azar de una capa sobre la contigua¹⁶.

La caolinita y en un grado menos la haloisista, son los minerales más abundantes del grupo del caolín, al igual que la montmorillonita lo es del grupo del mismo nombre. Las arcillas en que predominan los minerales del grupo de la montmorillonita solo tienen usos secundarios en la fabricación de productos cerámicos, como pequeñas adiciones a los cuerpos cerámicos para aumentar la plasticidad y la resistencia en seco. De los cuatro grupos generalmente admitidos de minerales cristalinos de arcilla, el de la caolinita y el de la illita son los que tienen importancia en las arcillas más usadas en la fabricación de productos cerámicos¹³.

Caolinita. La fórmula estructural es : $(OH)_8 Al_4Si_4O_{10}$. Se presentan como láminas pseudo hexagonales aproximadamente equidimensionales¹³. Su estructura está formada por una lámina tetraédrica de SiO_2 y otra octaédrica de Al_2O_3 . Las posiciones centrales de

los octaedros y tetraedros están ocupadas por Al y Si respectivamente. El enlace entre paquetes o unidades laminares se produce a base de puentes de hidrógeno⁷. El espacio basal (entre planos similares de los paquetes laminares) es de 7.15 \AA^3 . Presenta algunas formas isómeras): la dickita de un mayor grado de cristalización y la nacrita de bajo grado de cristalización⁷.

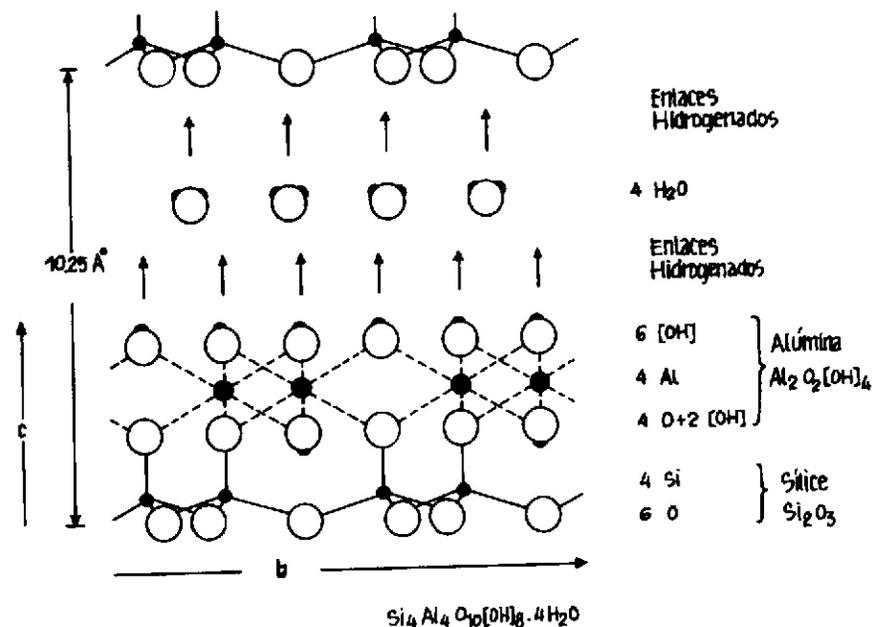
Figura No. 5 Estructura de la Caolinita⁹



Haloisita. De fórmula estructural $(\text{OH})_8 \text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ¹³. Se presenta en forma de tubos¹⁶. Es una polimorfa de la caolinita. La forma hidratada, haloisita, consiste de una secuencia regular de láminas de caolinita separadas por agua interlaminaar. La forma deshidratada, metahaloisita, contiene agua hidroxilada. La haloisita deshidrata irreversiblemente a metahaloisita³. Puede contener hasta cuatro moléculas de hidratación, con este grado de hidratación, se llama endelita y se caracteriza porque la distancia entre sus aristas aumenta de 7.2 \AA a 10.1 \AA ^{3,7}. La diferencia entre la haloisita

y la caolinita es pequeña; en su estructura tienen el mismo tipo de capas de silicato de aluminio, pero las capas están sobrepuestas de una manera menos ordenada en la haloisita que en la caolinita¹³.

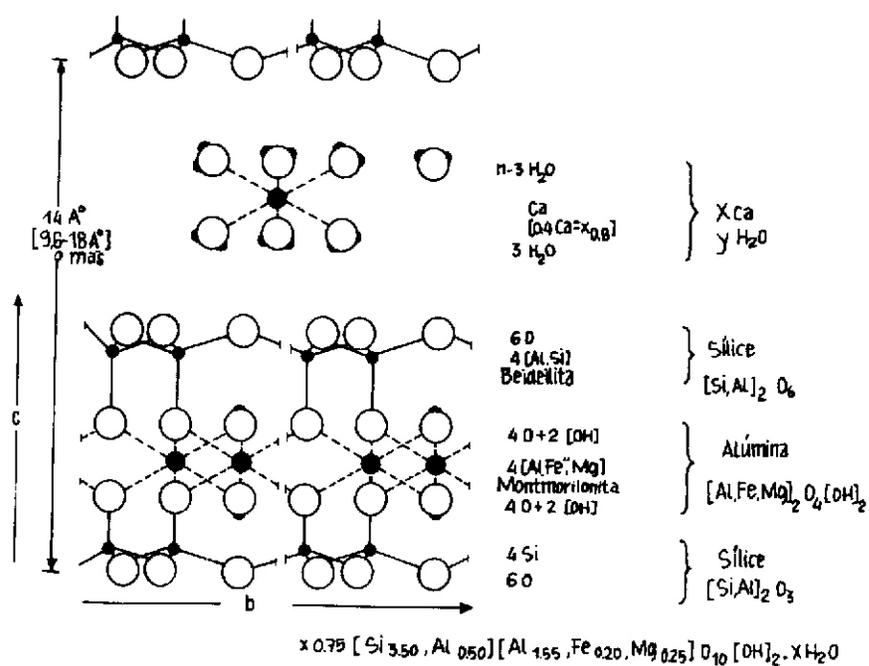
Figura No. 6 Estructura de la Haloisita⁹



Montmorillonita. Su fórmula estructural es: $[Al_{1.67}Mg_{0.33}(Na_{0.33})Si_4O_{10}(OH)_2]$, en él, figura primeramente, el grupo que tiene coordinación octaédrica, luego, el grupo que tiene coordinación tetraédrica y después los hidróxilos¹³. La estructura es similar a la mica, pero tiene agua interlamilar en lugar de iones K^+ entre las láminas³. La montmorillonita tiene red cristalina de tres capas¹⁶ y puede acumular agua u otros cationes entre las capas del cristal y aumentan considerablemente la distancia entre aristas de paquetes unitarios (es expandible), tanto que a veces se produce la separación

de los paquetes estructurales⁷. De ordinario la montmorillonita seca al aire tiene un espaciamiento de aproximadamente 15 \AA ¹³ Característico en la montmorillonita es el reemplazo de Al^{3+} por Mg^{2+} en los octaedros.⁷

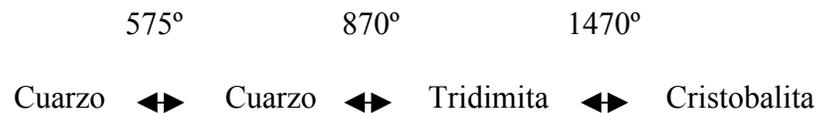
Figura No. 7 Estructura de lo Montmorillonita⁹



1.2 APLASTICOS

1.2.1 SILICE (SILICA) ¹⁷

El óxido de silicio (SiO_2) se encuentra en los suelos, tanto en forma amorfa como cristalina. Dentro de las formas cristalinas se conocen el cuarzo, la tridimita y la cristobalita; se trata de modificaciones enantiotropicas y las temperaturas de transformación son las siguientes:



La forma más común es el cuarzo; la cristobalita se ha encontrado sólo en algunas tobas volcánicas. El cuarzo cristaliza como un entramado de tetraedros de SiO_2 y, es el componente cristalino de las arenas blancas, su andamiaje es tridimensional, característico de los minerales denominados tectosilicatos.

Sílica, SiO_2 es un importante ingrediente en vidrio, vidriados, esmaltes, refractarios, abrasivos y composiciones de cerámica blanca. Es ampliamente usado porque es económico, duro, químicamente estable, y relativamente infusible y tiene la capacidad para formar vidrios. Hay una variedad de formas minerales, en las cuales se encuentra la sílica, pero con mucho el más importante como materia prima es el cuarzo.

El cuarzo es usado en forma de cristales, grandes, casi perfectos, como roca cuarzita, como arena de cuarzo y como “pedernal de alfarero” molido finamente. La estructura

del cristal de SiO_2 es tal que hay espacio pequeño para acomodar átomos extra, tampoco puede el silicio ser reemplazado fácilmente por otros cationes. Así el contenido de SiO_2 en el cuarzo, la forma mineral principal de sílica es cercano al 100%. Con base a la naturaleza, sin embargo, el cuarzo generalmente se encuentra junto con minerales asociados, las propiedades de las cuales pueden hacer el depósito inutilizable.

La mayor fuente de sílica para la industria cerámica es la arenisca, consistente de granos de cuarzo enlazado levemente. La arena para la elaboración de vidrio debe ser grano de tamaño uniforme y alta pureza. En particular, el contenido de hierro debe ser más bajo que 0.015% para vidrio óptico y abajo de 0.06% para vidrio plano y cilindrado de alta calidad. Esa misma arena es generalmente molida en molino de guijarro hasta un tamaño de partícula menor que 200 mesh para usar como “pedernal de alfarero” en vidriados y composiciones de cerámica blanca.

Otra importante fuente de sílica es cuarzita densa o “ganister” de la cual son elaborados ladrillos de sílica refractaria en techos de crisoles abiertos, depósitos de vidrio y hornos de coque. Para este propósito, las rocas seleccionadas deberán molerse para obtener una mezcla de granos gruesos y finos y los cuales tendrán menos de 0.5% de Fe_2O_3 y alúmina. La cual no es perjudicial puesto que alrededor de 0.5% es añadida en el proceso de cocción.

Otra forma comercial de sílica es la tierra de diatomeas la cual consiste de esqueletos de diminutos animales marinos, diatomeas. Su composición es cerca de 90% de sílica y puesto que consiste de gran número de poros microscópicos, es muy efectivo y ampliamente usados en aislante térmico.

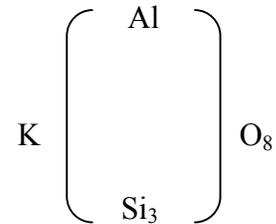
CUADRO No. 4. Composición de la sílice natural en porcentaje¹⁶

Constituyente	Cuarzo Molido	Guijarros de sílex
SiO ₂	99.80	97.85
Al ₂ O ₃	0.17	0.09
Fe ₂ O ₂	0.02	0.89
TiO ₂	--	0.01
CaO	0	0.20
MgO	0	0.09
K.NaO	0	0.56
Agua	0	1.10
Materias Orgánicas	0	0.50

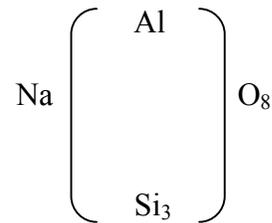
1.2.1 FELDESPATOS

Los feldespatos son aluminosilicatos anhidros conteniendo K⁺ Na⁺ y Ca²⁺ , ellos están presentes en virtualmente todas las rocas ígneas. Las sustituciones isomórficas en la arcilla cristalina de catión por otro da una elevada diversidad de variedades. Los de mayor interés comercial son:

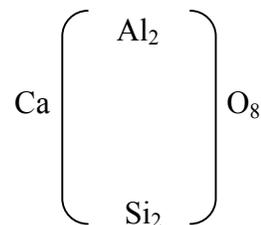
Feldespato potásico : microclina ortoclasa,



Feldespato sódico : albita,



Feldespato cálcico: anortita ,



Los feldespatos potásicos siempre contienen algo de albita y los feldespatos sódicos algo de anortita. Los feldespatos están extendidos en la naturaleza pero generalmente existen en pequeños granos asociados íntimamente con otros minerales, depósitos comerciales no son abundantes. Mucha de la producción viene de pegmatitas las cuales son groseramente rocas cristalinas formadas gradualmente después de la cristalización de un magma. La formación de cristales grandes es promovida por la baja viscosidad y alta concentración de volátiles. Los principales minerales accesorios son: cuarzo, mica y otros silicatos. Métodos de beneficiación perfeccionados, incluyen flotación y separación magnética, han hecho posible obtener feldespato no explotable por métodos

más antiguos. Concentrados de feldespatos resultan del procesamiento de rocas y arenas feldespáticas por flotación ahora responsable por más de una tercera parte del rendimiento total del feldespato crudo.

Se usan los feldespatos como liga en las pastas cerámicas. Cuando se quema la pasta se funden el feldespato y forma vidrio derretido que determina la unión de las partículas de arcilla; al solidificar tal vidrio concede fuerza y dureza a la pasta. La translucidez de las pastas porcelana hay que atribuir las a ese vidrio. La acción fundente es incrementada por la fineza del tamaño de las partículas. El potásico forma un vidriado más duro que el sódico y decrece la expansión térmica. Las composiciones más altas en potasa (K_2O) se usan en pastas cerámicas, mientras las de alto contenido en sosa (Na_2O) se emplea en barnices.

El cuarzo libre disminuye el poder fundente de los feldespatos. Es más efectivo en disminuir el rango de vitrificación de los cuerpos cerámicos conteniendo espato sódico que los que contienen espato potásico. La presencia de álcalis controla el punto de ablandamiento de un feldespato el cual llega a ser muy bajo cuando el contenido de soda se incrementa y el contenido de potasio decrece.

La industria del feldespato depende casi enteramente de la industria cerámica para su mercado. Los más grandes consumidores son los fabricantes de vidrio quienes usan feldespato como una fuente de bajo costo de alúmina fácilmente fundible. El espato sódico es preferido porque es de más bajo punto de fusión; el requerimiento más crítico para el feldespato de vidrio es bajo contenido de hierro. Otros consumidores importantes son los fabricantes de cerámica y esmalte. El espato potásico es preferido para estas

aplicaciones por su más largo rango de vitrificación. El feldespato es normalmente suministrado para el comercio en forma molida. El feldespato de vidrio es generalmente suministrado como material 20- mesh, mientras que para otros usos cerámicos material 200 – mesh es preferido.

Nefelina sienita, una roca ígnea libre de cuarzo compuesta de nefelina, $\text{Na}_2 \left[\begin{array}{c} \text{Al}_2 \\ \text{S}_2 \end{array} \right] \text{O}_8$,

albita, y microclina. Ha sido usada como un sustituto de feldespato en las dos industrias cerámica y vidrio¹².

El feldespato es una roca cristalina compuesta de aluminosilicato de potasio, sodio y calcio. Estos silicatos nunca se encuentran en estado puro pero si en una mezcla con uno o el otro predominando.

Por conveniencia en cálculos cerámicos sus fórmulas son usualmente dadas como siguen:

Feldespato potásico (microclina) $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$

Feldespato sódico (albita) $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$

Feldespato de Cal (anortita) $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$

Otros Fundentes:

Sienita Nefelina

Granito gráfico

Arena “peco”

Piedra de Cornualles

Albita

Cenizas de huesos

Cuadro No. 5 Composición de los Feldespatos¹⁷

COMPONENTES	A	B	C	D	E	F	G
Sílice (SiO ₂)	73.4	69.8	71.5	66.1	66.0	70.0	60.2
Alúmina (Al ₂ O ₃)	15.0	17.1	16.6	18.7	18.7	18.1	23.7
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cal (CaO)	0.2	Tr	0.3	0.2	0.2	1.5	0.4
Magnesio (MgO)	Tr	0	Tr	Tr	Tr	Tr	0.1
Sosa (Na ₂ O)	3.1	3.5	3.7	3.0	2.8	6.5	10.1
Potasa (K ₂ O)	8.0	9.4	7.5	11.8	12.0	3.5	5.0
Pérdida en quema	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5
Microclina	48	56	45	69	70	21	20
Albita	26	30	32	25	23	55	54
Anortita	1	0	2	1	1	8	0
Cuarzo	22	12	18	3	4	13	0
Nefelina	-	-	-	-	-	-	22
Otros minerales	3	2	3	2	2	3	4
A Topsham, Me. (Consolidated Feldspar Co.). B Portland, Conn. (Eureka Flint and Spar Co.). C Koma, N.C. (Consolidated Feldspar Co.) D Rochester, N.Y. (Derry Feldspar). E Kingman, Arizona (Mojave Feldspar). F North Carolina (Glaze Spar) G Nepheline – Syenite (Am. Nepheline Corp.)							

CUADRO No. 6 Puntos de Fusión de los Feldespatos y Sienitas¹⁸

	Inicial	Final	Notas
Feldespatos potásico	1160°C	1530°C	} Incongruente, perezoso; fundido muy viscoso
Feldespatos sódico	1170°C	--	
Feldespatos cálcico	1150°C	--	
Nefelina sienita: Sinteriza	1060°C	1200°C	Fundente energético
Funde	1150°C		

1.3 PASTAS CERÁMICAS

1.3.1 CLASIFICACIÓN¹⁷

Pueden clasificarse de muchas maneras, sólo usamos aquí los más importantes.

I. De acuerdo con la Estructura:

a) Pastas de Loza Común (absorción por encima de un 3%)

Roja de Loza Común

Roja de Terracota

Blanca de Loza Común

Blanca con Talco

Blanca con Alto Contenido de Feldespato.

b) Pastas de Arcilla Compacta (absorción de 1 a 5%)

Arcilla Compacta Roja

Arcilla Compacta Gris

Arcilla Compacta Negra o Basáltica

Arcilla Compacta Coloreada o Jaspeada

Arcilla compacta con Terracota

c) Porcelana (absorción de 0 a 2%)

De Paros

Baja Cochura

Mediana Cochura

Alta Cochura

De Hueso

De Frita

d) Pastas Refractarias

De Arcilla Refractaria

De Alúmina

De Silicio

Aislantes

e) Pastas Comerciales

II. De acuerdo con la Temperatura de Cochura

a) Baja Temperatura (1010°C, Cono 06)

Pastas de Tierra Roja

Pasta de Talco

b) Temperatura Mediana (1150°C, cono 4)

Pasta de Arcilla Compacta Roja

Porcelana de Paros

Porcelana de Nefelina – Sienita

Terracota Roja

c) Alta Temperatura (1230°C, Cono 8)

Arcilla Compacta Gris

Arcilla de Loza Blanca

Porcelana

d) Muy Alta Temperatura (1450°C, Cono 16)

Porcelana de Alta Cochura

Refractarios.

1.3.2 PROPIEDADES

Estas pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- a) Propiedades Plásticas (plasticidad)
- b) Propiedades de Secado
 - Contracción
 - Resistencia
- c) Propiedades de Cochura
 - Color
 - Contracción
 - Porosidad y absorción
- d) Cambio de Base

a) Propiedades Plásticas (Plasticidad).

Se conoce bajo el nombre de plasticidad, la propiedad que poseen los sólidos en virtud de la cual conservan su forma permanentemente, bajo la acción de pequeños esfuerzos cortantes, pero se deforman, se labran o se moldean con facilidad aplicándoles esfuerzos algo mayores¹³.

La mayoría de los procesos de trabajo de la industria cerámica se basan sobre la propiedad que posee la arcilla de transformarse en plástica al ser mezclada con cierta cantidad de agua⁶.

Los principales factores que influyen en la plasticidad son: 1. Tamaño y forma de partículas; 2. Sales solubles; 3. Tensión superficial; 4. Envejecimiento y fermentación^{16,18}.

Tamaño y forma de partículas. Cualquier arcilla o materia prima preparada para usar en una pasta es decir, en estado pulverizado, al ser analizada se descubre que consiste en grupos de partículas de diferentes tamaños de grano. A la relación de estos diversos tamaños se denomina distribución del tamaño de partículas (granulometría)¹⁸.

La influencia del tamaño de las partículas sobre la plasticidad de la caolinita ha sido estudiada ampliamente y se observa que el alargamiento máximo y el punto de fluencia crecen a medida que las partículas son más finas¹⁶.

Las arcillas altamente plásticas, como las arcillas de bola, no pueden usarse solas para hacer piezas porque se torcerían hasta perder la forma al secarlas. Es corriente modificar la granulometría adicionando partículas mas grandes, por ejemplo feldespato, pedernal. chamota triturada¹⁸.

La forma de las partículas influyen tanto en la plasticidad de las arcillas como también en el comportamiento de los materiales no plásticos¹⁸. Las arcillas dan un elevado punto de fluencia y, a la vez, un gran alargamiento antes de la rotura. La fluencia gradual es característica de los materiales en placas¹⁶.

La forma de las partículas de las arcillas y materiales no plásticos en las pastas cerámicas, es también importante por otra razón: el comportamiento de las arcillas en el trabajo (torneado, colado, extrusionado, etc), depende de la presencia de sales solubles. Las grandes áreas superficiales ofrecidas por las láminas de colinita a la absorción de tales sales, juegan un papel importante en los sistemas arcilla-agua, no solamente en el desarrollo de la plasticidad, sino en la estabilidad de las barbotinas de colado¹⁸.

Sales solubles. La interacción de la superficie sólida y el agua puede modificarse según sea la sustancia (floculante o defloculante) y cantidad de ella que se adicione a las pastas líquidas de arcilla¹⁶. Compuestos químicos solubles, tales como ácidos, sulfatos y cloruros, que tienden a hacer que las partículas de arcilla se adhieren y formen flóculos, mejoran la plasticidad de muchas arcillas. Por otra parte las sales solubles, como el carbonato sódico y silicato sódico, cuya tendencia es forzar a que las partículas de arcilla se separen, tienen un efecto contrario sobre la plasticidad¹⁸.

Tensión superficial. Se ha observado que el punto de fluencia de la masa plástica baja en proporción a la caída de la tensión superficial. Si la tensión superficial es baja, la masa resulta tan poco trabajable que es difícil formar con ella simples barras¹⁶.

Envejecimiento y fermentación. En algunas arcillas ocasiona un aumento de la plasticidad e incremento en la trabajabilidad de las pastas con frecuente amasado¹⁶. El

efecto ha sido atribuido a la acción química de los ácidos orgánicos formados cuando se descompone la materia orgánica por acción bacteriana. Tales ácidos tienden a flocular las partículas arcillosas y mejorar así la plasticidad¹⁸. Parece que influye, también, la hidratación completa de las superficies sólidas¹⁶.

Por todo lo anterior podemos resumir que las causas responsables de la plasticidad de las arcillas son: 1. La forma de placa de las partículas de arcilla. 2. El pequeño tamaño de las partículas. 3. La relación eléctrica entre el agua y las partículas ultrafinas de dimensiones coloidales².

Hay muchas teorías sobre la plasticidad, pero las dos más importantes y consistentes son: la teoría de la atracción entre las partículas o de los dipolos y la teoría de la repulsión equilibrada por las fuerzas de tensión superficial.

La atracción entre partículas. Esta teoría sostiene que existe una distancia de equilibrio entre partículas, si éstas se acercan más, interviene una repulsión pero si se apartan, hay una atracción. Las Fuerzas de Van der Waals pueden ser significativas en la atracción entre partículas.

La teoría de los dipolos supone que las cargas no son uniformes en toda la superficie de la partícula de arcilla y que hay regiones negativas equilibradas, de forma que el total es cero. En este caso, es razonable suponer que la región positiva de una partícula podría atraer a la región negativa de otra. Esto no supone un contacto real entre partículas, ya que pueden estar ligeramente separadas por películas de agua fuertemente adsorbidas.

La teoría de la membrana alargada. Esta teoría establece que las partículas de arcilla se repelen mutuamente y tienden a apartarse lo máximo que la envoltura del sistema

permite. Esta fuerza de repulsión es equilibrada por la fuerza de contracción elástica de la película de agua que rodea la masa de arcilla-agua¹⁶.

b) **Propiedades de secado:**

Contracción (Encogimiento)

Una pieza recién hecha se compone de una mezcla de granos de materiales plásticos y no plásticos. Las partículas están rodeadas por películas de agua de naturaleza y comportamiento muy complejas, que implican la existencia de fuerzas de atracción. Agua fijada, agua ligada rápidamente y agua aparente son términos técnicos usados por el reologista para explicar el comportamiento al sistema arcilla-agua.

Durante el secado las películas de agua son eliminadas y las partículas sólidas se acercan; en otras palabras, el material arcilloso se contrae. Cuanto más fina la arcilla más películas habrá y mayor será la merma. Los materiales ásperos y aplásticos tales como el cuarzo y el feldespato tienden consecuentemente a reducir esa merma o encogimiento. La contracción total depende de muchos factores que incluyen la naturaleza de la arcilla, tamaño de las partículas y velocidad de calentamiento^{17,18}.

Lo más importante en la contracción de las pastas arcillosas es hacer que suceda dentro de los límites de resistencia del artículo que se seca, ya que sino podría quebrarse.

Un hecho muy importante a considerar en el secado de una arcilla es que el cese de contracción no quiere decir que la pieza esté perfectamente seca. Las partículas se acercan en el secado pero las últimas trazas de humedad desaparecen después de que haya cesado el movimiento de aquellos (o sea, la contracción)¹⁸. Prácticamente toda la

contracción ocurre en la primera parte del secado. Después de alcanzar el estado de “dureza de cuero”, registrase poco cambio en el tamaño porque ya han establecido contacto las partículas y no pueden aproximarse más de lo que están¹⁷.

Tan pronto como se elimina la humedad del material arcilloso, los poros comienzan a llenarse de aire¹⁸.

El conocimiento de las características de contracción de las arcillas y de las pastas es útil al establecer un plan de secado porque, al terminar la contracción, el resto de agua puede eliminarse fácilmente.

Las arcillas naturales dan curvas de contracción variables con la frecuencia de las películas de agua y con las características de empaquetamiento de las partículas. Algunas arcillas en especial, las grasas presentan una contracción secundaria que no llega al 1%, al perderse la última porción de agua, indudablemente debido a la eliminación del agua reticular de la pequeña porción de montmorillonita presente. En cambio, algunos caolines presentan expansión al final del período de secado. La explicación no está del todo clara, pero tal vez se deba a la relajación de tensiones por vaciado de los últimos capilares.

Las pastas cerámicas se contraen menos que la arcilla porque con la incorporación de una fracción relativamente gruesa de no plástico disminuye la frecuencia de las películas de agua y la porosidad en seco es menor. Por ejemplo, la pasta de cerámica blanca triaxial es un sistema de empaquetamiento cerrado de tres fracciones, el pedernal y el feldespato significan la fracción gruesa, el caolín de media y la arcilla grasa la fina¹⁶.

Resistencia (Resistencia Mecánica o Fuerza de Secado)

La resistencia de la arcilla seca (en verde) se atribuye a las fuerzas de Van der Waals entre las caras planas de los cristales de arcilla y se presenta máxima cuando la arcilla o pasta está completamente seca. Esta resistencia se incrementa cuando se adsorben iones sodio¹⁶.

Esta resistencia es de gran importancia en las arcillas no sólo porque permite preservar al material moldeado, su forma durante el secado y transporte sino también porque facilita procesos posteriores como retocado al torno, hacer incisiones y esgrafiado a mano, bañar y decorar. La resistencia en verde está estrechamente relacionada con la plasticidad. Las arcillas muy aplásticas, de grano fino y por lo tanto de muchas superficies, tienen por lo general mayor resistencia mecánica^{17,18}.

c) Propiedades de Cochura

Color

El color de la cochura depende en gran parte de la cantidad de los minerales de hierro presentes¹⁷, y comunica color marfil, rosa, anteado, pardo, rojo castaño o negro, según que estén o no presentes otros materiales y según el carácter de la atmósfera que rodea a la arcilla en la cocción y el enfriamiento. La cal en cantidad suficiente, por lo general triple de la cantidad de óxidos de hierro “blanquea” al hierro y da como resultado un color amarillo en lugar de rojo¹³. El dióxido de Titanio, TiO_2 , es de especial importancia en presencia de óxido férrico ya que el hierro es un pigmento mucho más fuerte en su presencia¹⁸. Se atribuye al óxido de titanio unido al óxido de

hierro en pequeñas cantidades el color ante que tienen muchas arcillas refractarias cocidas. Las arcillas que después de la cocción quedan blancas contienen menos de 1% de óxido de hierro. Las arcillas que toman color ante, suelen tener 3-4% de óxido de hierro y las arcillas cocidas rojas contienen 5% o más. Estas últimas suelen adquirir color rosado cuando se cuecen a baja temperatura pero el color se hace más fuerte al subir la temperatura, pasando sucesivamente por salmón, rojo, rojo oscuro y negro purpúreo en una atmósfera oxidante. En condiciones reductoras los colores se modifican hacia los tonos grises¹³.

CUADRO NO. 7. Coloración del Hierro en diversos tipos de Arcillas¹⁸*

OXIDOS EN LA ARCILLA	COLORACION ARCILLA COCIDA
1-5% Fe ₂ O ₃ 1-8% CaO Al ₂ O ₃ , Bajo	En oxidación da rojo; en reducción ante, rosa o gris.
1-10% Fe ₂ O ₃ 10-25% Al ₂ O ₃ 0-1% CaO	Rojos de todo tipo; con temperaturas altas introduce una tonalidad púrpura.
1-3% Fe ₂ O ₃ 25-30% Al ₂ O ₃ nada CaO	Coloraciones ante o paja

* La presencia de TiO₂ intensifica siempre el poder colorante del Fe₂O₃

Contracción.

La contracción producida en la quema está íntimamente ligada con el tamaño de las partículas en determinadas arcillas¹⁸, en algunas llega a producir agrietamientos; en otras es apenas perceptible el encogimiento¹⁷.

Las principales causas de la contracción de cochura son: (1) pérdida de volumen debida a la expulsión de agua, bióxido de carbono o sulfúrico, y, (2) la reunión de cristales por las fuerzas de capilaridad del vidrio y la consecuente expulsión de aire por los poros¹⁷.

Los artículos en verde contienen entre el 25 y el 50% de porosidad por volumen. La cantidad depende del tamaño de las partículas, distribución del tamaño de las partículas y el método de formación. Durante el proceso de cocción esta porosidad es eliminada; el volumen de contracción por cocción es igual al volumen de poros eliminados. Esta contracción puede reducirse substancialmente por adición de material que no se contrae a la mezcla, el ladrillo de arcilla refractaria son generalmente elaborados con adiciones de arcilla precocida, la cual ayuda a disminuir la contracción por cocción. Del mismo modo, ésta es una de las funciones del pedernal en un cuerpo de porcelana; provee una estructura que no se contrae la cual reduce la contracción durante la cocción.

Las composiciones de terracota, formadas por la mezcla de arcilla y arcilla precocida pueden ser hechas en grandes formas porque una gran parte de la materia prima ha sido precocida y la contracción por cocción es baja.

Si la cocción es llevada a densificación completa, la porosidad ínfima originalmente presente es equivalente a la contracción que toma lugar durante la cocción. Estas cantidades generalmente es tanto como 35% de contracción volumétrica o 12 o 15% de contracción lineal y causan dificultad en sostener tolerancias cercanas. A menudo, las principales dificultades son alabeo o distorsión causadas por cantidades diferentes de contracción por cocción de las diferentes partes de los artículos. Contracción no uniforme pueden algunas veces, incluso causar grietas hasta abrirse¹².

Porosidad y Absorción.

Estas propiedades son muy importantes en los artículos cerámicos. La porosidad es la relación del volumen de los poros al volumen de la pieza. La absorción expresa el espacio ocupado por los poros que pueden llenarse de agua y se expresa en peso. Ambas propiedades dependen de la calidad de la arcilla y del tratamiento térmico que ha recibido¹³. Resultan una indicación muy útil del grado de vitrificación de la mayoría de las pastas cerámicas cuanto mayor es la formación vítrea. Cuanto mayor sea el grado de vitrificación, menor será la porosidad de la pieza y menor será la cantidad de agua absorbida¹⁸.

Al comienzo de la cocción, pueden considerarse los poros como canales que se intercomunican y tienen acceso a la superficie de la arcilla. Según progresa la cocción se encoge la arcilla y los canales se cierran progresivamente. Los “poros cerrados” aumentan en número y tanto los poros abiertos como los cerrados disminuyen de tamaño a medida que sube la temperatura hasta que ésta empieza a ser excesiva. Al llegar a este punto la reacción en el interior de la arcilla ha generado gases, que buscan salida y crean un nuevo sistema de poros. Este es el fenómeno de la “hinchazón”; esto es: una dilatación general de la arcilla y la producción en ella de una estructura vesicular. Tal estado no es conveniente en ningún producto de arcilla, si se exceptúa el agregado de arcilla dilatado para el concreto aislante ligero, que requiere la sobrecocción deliberada. Por debajo del punto de sobrecocción el mínimo de espacio de poros. No todas las arcillas se hinchan. Las variedades más puras se deforman y se funden sin que se produzcan gases¹³.

La porosidad del material cerámico crudo y de las masas después de su cocción, es uno de los factores de mayor importancia para poder apreciar el proceso de los cambios en el material, que se producen a las distintas temperaturas soportadas por el cuerpo durante su cocción. Especialmente, la temperatura de cocción correcta del material, es decir, la temperatura bajo efecto de la cual el material, se vuelve tan compacto como para tornarse prácticamente impermeable, se determina por la absorción de las porosidades.

Cuanto menor sea la temperatura de cocción, tanto más fácil es obtener, en igualdad de condiciones, un producto sólido y compacto, a partir de un material crudo dado. Mediante la porosidad se puede también apreciar el intervalo de cochura, es decir, el intervalo de la temperatura comprendido entre la cocción y el principio de deformación de los productos cerámicos y las arcillas. La cocción y el intervalo de cochura, juegan un papel preponderante en la posibilidad de utilización de varios productos cerámicos, y en especial, en la fabricación de productos similitéicos. Las arcillas de cocción rápida, cuyo intervalo de cochura es mayor a 10°C , se consideran las mejores. Los cambios de porosidad, juntamente con los índices de contracción, permiten establecer con exactitud una curva de la temperatura de cocción de los productos y evitar, en esta forma, su agrietamiento, deformación u otros desperfectos. Además, los índices de porosidad, permiten establecer la cocción excesiva de los productos, el momento inicial de la deformación, etc⁶.

d) **Cambio de Base** (cambio Iónico o Cambio Catiónico).

Es una propiedad que muestran los minerales arcillosos en grado variable.

Por cambio de base quiere significarse la capacidad de los materiales arcillosos para “cambiar alguno o algunos de sus cationes por otros, mediante el tratamiento de una solución acuosa que contenga el segundo catión”. La estructura de la arcilla no cambia¹³.

El fenómeno del cambio iónico es importante para comprender el comportamiento de las arcillas, se ha mencionado ya que el cambio iónico afecta la plasticidad. Es también parte del mecanismo responsable del comportamiento de las barbotinas de colado.

Pequeñas cantidades de sales en pastas arcillosas y barbotinas pueden ejercer un efecto desproporcionadamente grande en las propiedades.

La plasticidad y la fluidez de las mezclas arcilla-agua depende de los iones presentes, si se varían es posible modificar las propiedades de las barbotinas cerámicas. Más aún, muchas de sus propiedades físicas están gobernadas por fuerzas eléctricas y otras de índole distinta entre las partículas y, por otra parte, entre los iones en el agua y aquéllas.

La forma en que los iones cambian de lugar en el mineral y en disolución es de gran importancia para la tecnología cerámica. Los iones positivos y negativos pueden estar moviéndose entre el líquido y el sólido, y así lo hacen continuamente, lo que indica que el proceso no es estático sino dinámico¹⁸.

En los estudios sobre los efectos de los electrolitos en las arcillas se ha mencionado la adición de álcalis a los cuerpos plásticos. Los álcalis más usados son compuestos de sodio especialmente el carbonato. Tratando así la arcilla, el sodio reemplaza en mayor o menor grado algún otro ión positivo unido a la arcilla o incluido en ella. Se han hecho extensos estudios para determinar el efecto de los diversos cationes sobre las

propiedades físicas de los cuerpos de arcilla. Las arcillas que contienen Na^+ , se atemperan a la misma consistencia con menos agua que las arcillas que contienen H^+ . Sustituyendo en un caolín H^+ por Na^+ , se reducen el agua en los poros y el agua de contracción y aumenta la resistencia en seco. La resistencia transversal de la cocción (en seco) y después de la cocción descendía en el orden Na^+ , Ca^{2+} , H^+ . Además las arcillas Na^+ se secan más lentamente que las arcillas Ca^{2+} o H^+ . Como puede verse las propiedades de las arcillas relacionadas con el cambio de base son de suma importancia para controlar las cualidades de trabajo de las arcillas para los usos cerámicos¹³.

En los minerales arcillosos predomina la carga permanente como fuente de cargas electronegativas para la adsorción de cationes. Sólo la alófana presenta predominancia de cargas dependiente del pH. La caolinita y similares no muestran intercambio isomórfico por lo que su capacidad de intercambio es muy baja. Los minerales arcillosos 2:1 y 2:2 presentan mayor intercambio isomórfico. En las illitas predomina el intercambio de Si y Al en los tetraedros de sílice. En la montmorillonita predomina el reemplazo del Al por Mg en los octaedros, en la nontronita por Fe.

En las vermiculitas y cloritas se presenta intercambio isomórfico tanto en los tetraedros como en los octaedros, lo que resulta en su mayor capacidad de intercambio catiónico. La alófana puede presentar un avanzado grado de reemplazo isomórfico de Si por Al en los tetraedros de Sílice.

Todos los cationes sorbidos en la superficie externa de los minerales arcillosos son cambiables, en cambio los sorbidos en las superficies internas de las arcillas trilaminares son cambiables cuando se expanden por acumulación de agua entre paquetes⁷.

1.3.3 FORMULACIONES

Se puede expresar la composición de una pasta de varias maneras; éstas pueden ser: a) Mezcla, viene a ser como una receta que relaciona los materiales, lo cual sirve para preparar una pasta, pero no para comparar dos de ellas entre sí, porque en una los materiales utilizados pueden ser totalmente distintos de los de la otra y dar lugar a la misma pasta; b) Minerales, este procedimiento es el de recalcular la mezcla teniendo en cuenta la proporción de mineral en las materias primas. Por ejemplo, el componente arcilla contiene cuarzo y algo de feldespato y el feldespato contiene cuarzo y algo de arcilla. Por cálculo se obtienen los tres componentes (composición triaxial): cuarzo, feldespato y arcilla. Así se pueden comparar significativamente varias pastas; c) Fórmula Equivalente o Seger, los equivalentes de óxido expresan la composición. Los tres componentes serían RO, R_2O_3 y RO_2 ; y d) Análisis Químico, expresa la composición en porcentaje los pesos de los óxidos. Esta expresión se puede convertir fácilmente en las dos anteriores¹⁶.

Cuadro no. 8. Diversas expresiones de la composición de una pasta¹⁶

a. Mezcla	Caolín	38.5%	
	Arcilla grasa	22.2%	
	Feldespato	26.2%	
	Pedernal	13.1%	
b. Minerales	Sustancia arcillosa	43.04%	
	Cuarzo	26.46%	
	Feldespato	30.50%	
c. Análisis Químico	SiO ₂	66.71%	
	Al ₂ O ₃	21.58%	
	Fe ₂ O ₃	0.47%	
	CaO	0.61%	
	MgO	0.37%	
	K ₂ O	2.93%	
	Na ₂ O	1.62%	
	Pérdida	5.54%	
d. Fórmula equivalente	RO	R ₂ O ₃	RO ₂
	0.36	1	5.24

Cálculo del contenido mineral de las arcillas¹⁷.

Pueden éstos dividirse aproximadamente entre los minerales de arcilla que proporcionan propiedades plásticas, el cuarzo que da escaso encogimiento y el feldespato que sirve de liga para unir la masa durante la cochura.

Las cantidades se pueden determinar aproximadamente por cálculos basados en los análisis químicos.

Como ejemplo analicemos una arcilla compacta cuya composición química es la siguiente:

Análisis Químico de una Arcilla Compacta.

Componente	Porcentaje de peso del óxido en la arcilla.
Sílice (SiO ₂)	68
Alúmina (Al ₂ O ₃)	22
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	1.6
Oxido de magnesio (MgO)	0.2
Oxido de calcio (CaO)	0.3
Alcalis (K,NaO)	2.5

En primer lugar, convertimos los pesos porcentajes a los pesos equivalentes de los óxidos, los que posteriormente servirán para determinar la cantidad de sustancia arcillosa y otros minerales. Debemos recordar que la sosa y el potasio se encontrarán en el feldespato (el potasio puede hallarse también en la mica) y que el feldespato contiene asimismo algo de alúmina y sílice. El resto de la alúmina se combina con el sílice para formar los minerales de arcilla, y cualquier residuo de sílice queda como cuarzo. Presúmese que el óxido de hierro está presente como tal, y las cantidades de cal y

magnesio son tan insignificantes que podemos omitirlos en los cálculos que llevamos a cabo.

Primeramente, el peso porcentaje de los óxidos se convierte al número de equivalentes (se supone que una mitad de álcali es sosa y que la otra mitad es potasa). Colócanse esas cifras a la cabeza de una tabla, y se subtrae el 0.032, equivalente del feldespato para eliminar los álcalis. Este procedimiento reduce a la vez, la alúmina y el sílice. Luego se resta el 0.185 equivalentes del mineral de arcilla que elimina la alúmina y deja 0.568 equivalentes de sílice el cual es separado con 0.568 equivalentes de cuarzo. Por fin se subtrae 0.010 equivalentes de óxido de hierro para dar razón de todos los minerales. Cuéntase automáticamente el agua en este método de cálculo, a la que no se le concede consideración especial.

Cálculo de los Minerales en la Arcilla Compacta

Oxido	Porcentaje de peso del óxido en la arcilla	Número relativos de pesos equivalentes en la arcilla*
Sílice (SiO ₂)	68.0	1.130
Alúmina (Al ₂ O ₃)	22.0	0.217
Oxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	1.6	0.010
Alcalis (K,NaO)	2.5	0.032

* Obtenido de dividir el porcentaje de peso entre el peso de fórmula.

Equivalentes de los óxidos en la arcilla	1.130 SiO ₂	0.217 Al ₂ O ₃	0.010 Fe ₂ O ₃	0.032 K,NaO
0.032 Equivalentes Feldespato(K,NaO.Al ₂ O ₃ .6SiO ₂)	0.192	0.032		0.032
Diferencia	0.938	0.185	0.010	0
0.185 Equivalentes Arcilla (Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O)	0.370	0.185		
Diferencia	0.568	0	0.010	
0.568 Equivalentes Cuarzo (SiO ₂)	0.568			
Diferencia	0		0.010	
0.010 Equivalentes Oxido Férrico (Fe ₂ O ₃)			0.010	
Diferencia			0	

Una vez determinado el número relativo de equivalentes de los varios minerales que componen la arcilla, son éstos convertidos al peso porcentaje.

Cálculo del Peso Porcentaje de los Minerales

Mineral	Número relativo de equivalentes	Peso Relativo*	Peso porcentaje
Arcilla mineral (Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O)	0.185	47.8	47.4
Feldespato (K,NaO. Al ₂ O ₃ .6SiO ₂)	0.032	17.3	17.2
Cuarzo (SiO ₂)	0.568	34.1	33.8
Hematita (Fe ₂ O ₃)	0.010	1.6	1.6
TOTAL		100.8	100.0

*Obtenido multiplicando las cifras de la columna anterior por cada peso de fórmula.

Un análisis de esta última tabla nos informa ampliamente acerca de las propiedades cerámicas de determinada arcilla. Por ejemplo, la arcilla ofrece buena practicabilidad y fuerza de secado; el feldespato y el óxido de hierro forman vidrio en la cochura, que dan fuerza a aquella; y el cuarzo actúa como una armazón para reducir a la vez el secado y encogimiento en la quema.

Otra manera práctica de expresar la composición de una arcilla es la de la fórmula Seger o equivalente, en la que los números relativos de equivalentes de los óxidos componentes se sitúan en tres columnas: (1) los óxidos básicos, (2) los óxidos neutros y (3) los óxidos ácidos. La fórmula de la arcilla compacta sería:

0.032 K,NaO

0.22 Al₂O₃ 1.13 SiO₂

0.010 Fe₂O₃

Es común igualar la suma de los óxidos neutros a la unidad y expresar las otras cantidades a éstas relativas. Insistiendo en la arcilla compacta, leeríase así la fórmula:

0.145 K,NaO

1.00 Al₂O₃ 5.15 SiO₂

0.045 Fe₂O₃

Cuando la proporción de los óxidos básicos de una arcilla o pasta es alta, la temperatura de quema en el horno debe ser baja y, en consecuencia, esta información permite por lo menos tener una idea de cuál temperatura de cochura usar.

1.3.4 PROCESOS DE FORMACIÓN:

El cuerpo se puede preparar de varias formas¹³:

- 1) **Método Plástico**: Preparación de la pasta y modelación de la misma en el torno de alfarero.
- 2) **Método de Colada**: Papilla para colada en moldes de yeso.
- 3) **Método de Extrusión**: Preparación de la pasta y extrusión en forma de tubos y barras, que se secan y tornean para darles forma.
- 4) **Método de Prensado**: Preparación de una pasta granular con 15 a 17% de humedad, que se prensa en moldes de acero (método de Prensado en Seco), con 8 a 10% de humedad (Método de Prensado en Polvo), o con 0 a 1% de humedad (Proceso en Seco).

1.3.5 SECADO

Antes de cocer el material es necesario secarlo para eliminar el agua usada en el moldeo. El agua que se separa por secado se llama agua mecánica para distinguirla del agua química (agua de constitución) que únicamente puede eliminarse por calentamiento. Los procesos de secado y cocción se distinguen por la intensidad del calentamiento¹⁸.

El producto alfarero debe secar lentamente para evitar el enconchamiento y agrietado, y completamente, para prevenir explosiones en la quema del bizcocho¹⁷.

Los efectos de secar el material arcilloso son¹⁸ :

- 1) Evaporar el agua de la pieza y eliminarla en forma de vapor (ocasionando pérdida de peso y aumento de presión).
- 2) Hacer que las partículas de arcilla y de las materias no plásticas que componen la pasta, se muevan para formar una masa compacta (contracción del artículo).
- 3) Variar la porosidad (textura) y resistencia del material.

El agua (mecánica) del sistema arcilla-agua puede ser: 1. Adsorbida; 2. De contracción; 3. De los poros y 4. Del retículo cristalino.

Las superficies sólidas, sin exceptuar la arcilla adsorben una capa de agua de una o varias moléculas de espesor y, además, recogen agua en los capilares. La cantidad de agua adsorbida es función de la presión parcial del vapor de agua. Así pues, la arcilla seca es hidróscopica y gradualmente llega al equilibrio con la atmósfera. El caolín de grano grueso presenta una adsorción bastante débil, la arcilla grasa casi el doble y la bentonita diez veces más por la absorción entre planos.

El agua de contracción es la que separa las partículas de arcilla a una distancia sustancial en la masa plástica hasta de 200 capas moleculares, pero hay otra teoría que va en contra de dicha estructura y supone la presencia de películas de agua, pero en cualquiera de los casos al desaparecer por secado, tiene lugar la contracción.

El agua de los poros es la que queda en los espacios entre partículas después de extraída el agua pelicular. Globalmente dicha agua está suelta sin ligazón con las superficies ni confinamiento en capilaridades; por esto durante el secado desaparece fácilmente.

El agua de la red cristalina se encuentra en los minerales de tres capas entre los planos del retículo. Al desaparecer esta agua por secado, el cristal recupera su dimensión original y provoca la contracción de toda la masa. La contracción de la bentonita-Na pura es enorme, pero en la cerámica fina sólo existen pequeñas proporciones de minerales de tres capas y, por lo tanto, el efecto no es grande. Esta agua reticular está firmemente retenida y es pues, la última que se expulsa en la operación de secado.

Las pastas cerámicas se contraen menos que la arcilla porque, con la incorporación de una fracción gruesa de no plástico, disminuye la frecuencia de películas de agua y la porosidad en seco es menor¹⁶.

La velocidad con que se seca una pieza depende de tres factores: 1) La temperatura del aire circundante, (2) el contenido de humedad en el aire; (3) la velocidad del aire. Para un secado rápido, el aire debe ser caliente, seco y moverse rápidamente, para un secado lento, las circunstancias deben ser contrarias^{17,18}.

Cuando se deja secar un material arcilloso en condiciones constantes de temperatura humedad y velocidad del aire, el proceso de secado se divide en dos etapas principales: (a) el período de velocidad constante y (b) el período de velocidad decreciente. En el primer caso, el peso de una pieza disminuye constantemente con el tiempo, y al cabo de 10 minutos, por ejemplo, de secado bajo estas condiciones el peso perdido es doble que al cabo de cinco minutos. En otras palabras, la pérdida de humedad es directamente proporcional al tiempo. En el segundo período, sin embargo, disminuye la rapidez con que la humedad abandona el material o lo que es lo mismo, la velocidad de secado depende directamente de la cantidad de agua que queda en la pieza y no del tiempo.

De la importancia que tienen estos dos períodos de secado en la práctica nos da una idea el considerar la evaporación y presión de vapor en el interior de una pieza. Hacia el final del período decreciente, casi toda el agua ha salido de los poros de la pieza y la evaporación no sólo sucede desde la superficie del material, sino que también lo hacen trazas de agua desde el interior. El vapor de agua tiene entonces que difundirse a través de los canales de poros para salir y sino lo hace libremente y la presión de vapor aumenta el resultado inevitable es el deterioro de la pieza en forma de agrietamiento e incluso reventón.

Factores importantes en la difusión del vapor son la densidad del material, su textura, porosidad, temperatura y humedad¹⁸.

1.3.6 COCCIÓN

El proceso de la cocción de las arcillas puede dividirse en tres diferentes períodos:

1. Deshidratación. Al calentar la arcilla se expulsa primeramente el agua absorbida (al rededor de los 200°C) que permanece en ella aun después del secado y, al elevar la temperatura (entre los 500°C y los 700°C) se le elimina el agua químicamente combinada. Poco después de esto, el primer encogimiento apreciable del cuerpo tiene que ocurrir. La proporción del aumento de la temperatura no debe ser excesivamente rápido, o sobrevendrán cuarteaduras no solamente debidas a la creación de vapor a

consecuencia de la humedad, que no puede escapar así a través de los finos poros de la arcilla, si no al mismo encogimiento originado.

2. *Oxidación.* Se descompone la materia orgánica (700°C) y las impurezas de las arcillas de baja cocción, sulfatos y carbonatos de calcio magnesio y hierro; en (600°C a 1000°C) en los gases dióxido de carbono y dióxido de azufre, los cuales pueden ser responsables de agujeros y burbujas en el vidriado si no logran escapar. El color de la pasta y vidriado es determinado por la presencia de cantidades variables de oxígeno durante la cocción, debido principalmente a los efectos que sobre la valencia de los óxidos colorantes presentes tiene la oxidación y reducción (pérdida de oxígeno). Por ejemplo, el hierro es rojo cuando está oxidado y se encuentra en el estado férrico (Fe_2O_3), y azul-negro cuando se reduce al estado ferroso (FeO). Si la arcilla vitrifica antes de completarse la oxidación, su color puede ser afectado notablemente y para piezas de gran espesor, puede aparecer un núcleo negro.

3. *Vitrificación.* La temperatura a la que una arcilla o pasta comienza su vitrificación (aproximadamente 900°C) depende de su composición y otras propiedades. Entre las 950°C y 1000°C la sílica y la alúmina se combinan hasta formar entrelazamientos de cristales en formas de agujas de gran resistencia llamadas mullitas ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) a temperaturas extremadamente altas, o en presencia de fundentes, esos cristales colaboran en agregar fuerza al cuerpo de arcilla. El material cerámico está completamente vitrificado cuando no puede ser calentado más, sin sufrir distorsión, alabeo, o desplome.

El período de vitrificación puede dividirse en tres fases¹³: 1) *Vitrificación incipiente* se forma suficiente vidrio para aglutinar los granos; 2) *Vitrificación completa*, los espacios intermedios se llenan con el material fundido, pero la masa conserva su forma; 3) *Fusión*, el cuerpo se ablanda hasta el punto de que no sostiene su propio peso. La cocción debe producir un estado comprendido entre las dos primeras fases citadas o bien la segunda de ellas.

Los factores que influyen en el margen de vitrificación de los diversos tipos de arcilla son: 1. Velocidad de formación de la masa fundida que depende de la composición, especialmente de la relación entre la alúmina y sílice y los agentes fundentes presentes. 2. Tamaño de las partículas minerales. 3. Velocidad de calentamiento.

Los efectos de la vitrificación son numerosos: 1. La pasta se contrae. 2. La contracción es variable. 3. Algunas veces la pasta puede expandirse o hincharse. 4. El material arcilloso se convierte en material cerámico (de material frágil a duro y denso). 5. El color cambia. 6. La textura (porosidad) se altera.

II. METODOLOGÍA

2.0 MATERIAL, EQUIPO Y REACTIVOS

2.1 MATERIAL

Vasos de precipitado (10, 30, 50, 100, 250, 500 y 1000 mL)

Probetas (25 y 100 ml)

Embudo de vidrio tallo largo

Frascos volumétricos (100, 200 y 1000 ml)

Pipetas volumétricas (1, 2, 3, 4, 5, 8, 10 y 15 ml)

Buretas (10 y 50 ml)

Tubos de ensayo con tapón de rosca

Vidrio de reloj

Varilla de agitación

Trípode

Triángulo refractorio

Crisol de platino con tapa

Pinza para crisol

Morteros con pistilo (de porcelana y de ágata)

Frasco lavador

Mechero Bunsen

Espátulas (metálica y hule)

Tamices (No. 40, 60, 120 y 180 mesh)

Cubetas plásticas

Frascos plásticos (30 y 500 ml)

Bolsas plásticas

Viñetas

Papel filtro Whatman No. 4

Conos pirométricos estándar Orton (018, 017, 05, 04, 2 y 4)

Recipientes de yeso

Papel indicador

2.2 EQUIPO

Balanza de triple brazo (Ohaus)

Balanza analítica (Mettler)

Balanza (Sartorius)

Horno de gas

Pirómetro (Amaco)

Desecador

Hot plate con agitador (Corning)

Estufa (Fissher)

Horno-mufla

Espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin-Elmer)

Difractómetro de rayos X (Phillip)

Molino de bolas

2.3 REACTIVOS

Silicato de Sodio

Reactivos de laboratorio BDH para espectroscopía de absorción atómica:

Soluciones estándar de:

Silicio

Nitrato de Aluminio

Nitrato de Potasio

Nitrato de Sodio

Nitrato de Calcio

Nitrato de Magnesio

Cloruro Férrico

Cloruro de Lantano 10% p/v

26.6% p/v $\text{LaCl}_3 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$

Metaborato de Litio (LiBO_2) anhidro 49.75

Acido Clorhídrico (HCl) concentrado 36.5 (reactivo para análisis Baker)

2.4 INVESTIGACIÓN DE CAMPO

2.4.1 LUGARES DE MUESTREO

De las áreas investigadas, algunas señaladas por la Misión Geológica Alemana en El Salvador (1971-1973)²¹ y otras indicadas por personas idóneas.

➤ **Muestras arcillosas**

- 1) Ahuachapán/Cerro Blanco: APP y ACB
- 2) La Libertad / Ayagualo / Carretera al Puerto La Libertad: LLACN.
- 3) Chalatenango / La Palma / Carretera Troncal del Norte, Km. 70. CHLPK70
- 4) Cabañas /Ilobasco/ Colonia El Siete. CICE7B
- 5) Cabañas / San Isidro El Dorado: CSIED
- 6) Santa Ana / Cantón Cutumay Camones: SABN
- 7) Santa Ana / Metapán / Carretera hacia Anguiatú, Km 112.5: SAMGT
- 8) Santa Ana / Metapán / San Diego: SAMSD.

➤ **Muestras Aplásticas**

- 1) Santa Ana / Metapán / Cantón Tecomapa / Carretera hacia el Cantón San Jerónimo, Km. 127.5: SAMSJK13
- 2) Santa Ana / Autopista San Salvador – Santa Ana, Km. 51.5. SASPK53
- 3) Chalatenango / San Rafael: CHSR
- 4) Cabañas / Ilobasco / Colonia El Siete: CICE7A.

2.4.1.1 TÉCNICA DE MUESTREO

Para efectuar un buen análisis químico y mineralógico de un yacimiento mineral, es necesario tener muestras representativas, para lo cual hay que seguir la metodología del muestreo que sea aplicable a la muestra en investigación, en nuestro caso, material arcilloso y no arcilloso (material aplástico).

Pasos a seguir para realizar un muestreo:

- 1) Recolección de la muestra, y
- 2) Identificación y almacenamiento

2.4.1.2 RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA

Este procedimiento se realizó en las áreas previamente establecidas y consistió primeramente en remover impurezas, materia orgánica y todo aquel material que pudiera contaminar las muestras. Una vez limpia la superficie, se procedió a escarbar hasta una profundidad aproximada de 0.5 metros, de manera que se pudiese obtener una muestra libre de impurezas. Esto se repitió en los diferentes lugares de muestreo con algunas pequeñas variantes dependiendo de la naturaleza de la muestra a investigar y de la profundidad del yacimiento. La cantidad de muestra recolectada fue 1.0 Kg para un total de 5.0 Kg por yacimiento.

2.4.1.3 IDENTIFICACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Las muestras individuales tomadas se numeraron del 1 al 5 para cada yacimiento. Una vez obtenidas las dos muestras representativas por medio del proceso de cuarteado fueron guardadas en bolsas plásticas para evitar contaminaciones.

2.5 TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Las operaciones realizadas en la preparación de la muestra dependieron de su naturaleza; así para las arcillosas: Secado, Desmenuzado, Limpiado, Cuarteado y Desfloculado – Lavado. Para las aplásticas: Lavado, Secado, Cuarteado y Molido.

2.5.1 ARCILLOSAS

En todo aquel material constituido esencialmente por minerales arcillosos y que presenta propiedades plásticas en mayor o menor grado.

Secado

Se tomaron 0.5 Kg de cada una de las muestras obtenidas por lugar de muestreo y se secaron al sol por 12 horas hasta el grado de humedad ambiente para facilitar el desmenuzado.

Desmenuzado

En esta operación, los grandes fragmentos de las muestras se despedazaron con la ayuda de un martillo de madera hasta reducirlos a un tamaño aproximado de 1 a 2 cm de diámetro.

Limpiado

Consistió en extraer del material todas las impurezas que se percibían a simple vista (impurezas groseras), tales como rocas, raíces, etc.

Cuarteado

Esta operación consiste en reducir la cantidad de muestra por medio de un cuarteado manual con la finalidad de obtener una muestra homogénea y representativa del mineral a investigar.

Esta operación fue necesaria en este caso, ya que se tomaron cinco muestras de cada lugar para obtener una muestra representativa.

Desfloculado-lavado

Este procedimiento tiene como objeto eliminar el cascajo, y consistió en mezclar 1 Kg de la muestra media con 5000 ml de agua destilada y 1 g de solución de Silicato de Sodio durante 30 minutos, hasta formar una delgada suspensión pasándose a continuación, a través de un tamiz de 60 mallas que separa el cascajo más grueso. Se dejó reposar esa suspensión hasta que se asentó el cascajo fino pasándose luego por un tamiz de 120 mallas y, posteriormente, por uno de 180 mallas; finalmente, la suspensión sin residuos se vertió en recipientes de yeso para eliminar el agua.

2.5.2 APLÁSTICAS

Se trata de todo aquel material distinto a las arcillas.

Lavado

Se mezcló 0.5 Kg de cada una de las muestras tomadas por lugar de muestreo con agua y se dejó reposar hasta que se asentaron las partículas más finas (no coloidales),

seguidamente se decantó el agua. Este procedimiento se repitió hasta obtener el agua clara; para el último lavado se utilizó agua destilada.

Esta operación se realizó para eliminar el ciervo que algunas veces acompaña a este tipo de muestra.

Secado

Las muestras lavadas se secaron en una estufa durante 4 horas a 110°C de temperatura con el objeto de eliminar la humedad y facilitar la operación de molienda.

Cuarateado

El objetivo de esta operación es seleccionar la muestra media por cada lugar de muestreo, al cual es necesaria antes de iniciar cualquier ensayo o prueba de control a las muestras recolectadas.

Molido

La muestra media libre de humedad es introducida en un molino de bolas por seis horas hasta alcanzar una fineza determinada, que no sea áspera a los dedos (el 95% de él puede pasar través de un tamiz de 325 mallas).

Esta operación es con la finalidad de reducir el tamaño de las partículas, logrando una mayor área de contacto, hasta lograr, de ser posible, un tamaño similar a los granos monomineralógicos.

Separación de minerales de hierro

Este se realizó para eliminar las interferencias de los minerales de hierro presentes, en la cocción de las muestras, y se efectuó con un imán manual.

2.6 PARTE EXPERIMENTAL

El análisis cuantitativo y cualitativo de los materiales cerámica (arcillosos y aplásticos) es de gran importancia para su descripción y caracterización, así como para la comprensión de sus propiedades. En principio se puede diferenciar entre el análisis elemental, que informa sobre la composición química por los elementos y el análisis mineralógico que informa sobre los diferentes minerales que los componen.

La composición química y mineralógica de las arcillas y sus proporciones nos determina su comportamiento en la cocción y las propiedades finales del material cerámico: su dureza, resistencia mecánica, resistencia a la rotura, acabado superficial, color y otras¹⁷.

La composición química de las arcillas nos informa de cómo los elementos estuvieron combinados con el oxígeno en su óxido normal^{17,16}

Cada uno de los óxidos tiene un efecto particular o ejerce una determinada acción en la pasta arcillosa. El mineral que introduce el óxido químico es también importante. En otras palabras, arcillas que tienen composiciones minerales diferentes pero igual composición química expresada en óxidos pueden comportarse de distinta forma¹⁸.

2.6.1 PRUEBA TÉRMICA PREVIA

Este ensayo nos permite determinar el comportamiento de las muestras examinando cuidadosamente las características que presentan éstas después de la cocción.

Durante el proceso de cocción se deberá controlar la elevación de la temperatura, ambiente gaseoso del horno y el tiro.

La necesidad de controlar el ambiente gaseoso del horno se explica por la gran influencia ejercida por él sobre la temperatura de fusión de las mezclas ferrosas contenidas en la arcilla, y por consiguiente sobre la cochura de la muestra propiamente dicha.

Hasta los 1000°C, la cochura se efectúa con una llama oxidante a fin de evitar que, a temperaturas bajas, el anhídrido carbónico sea absorbido por las piezas y además, para quemar todas las impurezas orgánicas contenidas en la muestra antes del cierre de sus porosidades, Arriba de 1000°C, se utiliza una llama neutra o ligeramente reductora, la que contribuye a la distribución uniforme del calor y a una mejor cocción de las piezas⁶

Cochura de las muestras⁶ .

- a.** Moldear las muestras tratadas (arcillosas y algunas aplásticas) a presión en moldes de yeso, en piezas de 65 x 35 x 15 mm.
- b.** Examinar las piezas una vez bien secas, detenidamente antes de la cochura con el propósito de comprobar la ausencia de deformaciones, hendiduras de aristas,

rajaduras o decoloraciones, es decir, la aparición en la superficie de las muestras de cristales de sales solubles.

- c. Las muestras reconocidas como aptas para el ensayo son numeradas e introducidas en el horno de gas. Las muestras se sitúan en el lugar del horno donde la temperatura sea más uniforme, colocándolas de canto y dejando entre ellas un espacio aproximadamente igual al ancho de las muestras, pero no mayor de 40 a 50 mm.
- d. Elevar la temperatura del horno a una velocidad de 100°C por hora, hasta 1100°C, manteniendo ésta durante 30 a 60 minutos y dejar enfriar las muestras de 12 a 16 horas en forma natural.
- e. Al descargar el horno, cada muestra será sometida a un examen minucioso observándose especialmente: 1°) el color; 2°) las torsiones; 3°) las grietas, 4°) la hinchazón y/o ampollas, 5°) las deformaciones y 6°) la vitrificación.

2.6.2 ANÁLISIS QUÍMICO

La composición química de un mineral tiene importancia fundamental, ya que de ella dependen, en gran medida, todas las demás propiedades del mismo. Sin embargo, estas propiedades no sólo dependen de la composición química sino también de la disposición geométrica de los átomos constituyentes y de la naturaleza de las fuerzas eléctricas que los unen⁵.

Procedimiento para el Análisis Químico por Espectrometría de Absorción Atómica empleando fusión con Metaborato de Litio²⁰.

1. Soluciones estándar

Las soluciones estándar debe ser preparada por dilución de las soluciones patrón, y deben contener concentraciones de HCl, LiBO₂, y la similar de las soluciones de las muestras. Un reactivo blanco debe también ser preparado.

2. Preparación de la muestra

- a. Colocar 0.1 g de la muestra en un crisol de platino y añadir aproximadamente 0.6 g de LiBO₂.
- b. Mezclar completamente la muestra y el LiBO₂ con una pequeña varilla de agitación y fundir la mezcla a 1000°C en un horno-mufla por 15 minutos.
- c. Cuando la fusión es completa, enfriar el crisol con agua destilada fría.
- d. Colocar el crisol en un beaker de 100 mL con una pequeña barra de agitación cubierta de teflón, y añadir 200 mL de agua caliente y 5 mL de HCl concentrado.
- e. Agitar por unos pocos minutos mediante un agitador magnético y vaciar el contenido en un beaker.
- f. Añadir agua caliente y ácido de nuevo y agitar hasta que la solución es completa.
- g. Transferir totalmente la solución a un frasco volumétrico de 200 mL y diluir a volumen después de enfriar.
- h. Para muestras de silicato, la solución es usada como tal para la determinación de SiO₂ y Al₂O₃. Una dilución de cinco veces es luego hecha para la determinación de CaO,

MgO, Fe₂O₃, K₂O. Na₂O. Añadir suficiente lantano a esta solución hasta obtener una concentración final de lantano del 1%. Para muestras de Carbonato, la solución es usada como tal para la determinación de SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, Fe₂O₃, K₂O. Una dilución de diez veces es luego hecha para la determinación de CaO y MgO. Esta solución es también elaborada hasta contener 1% de lantano para remover cualquier interferencia en la determinación de calcio.

3. Análisis

Determinar la concentración de los elementos de interés contra los blancos y estándares respectivos.

4. Cálculos

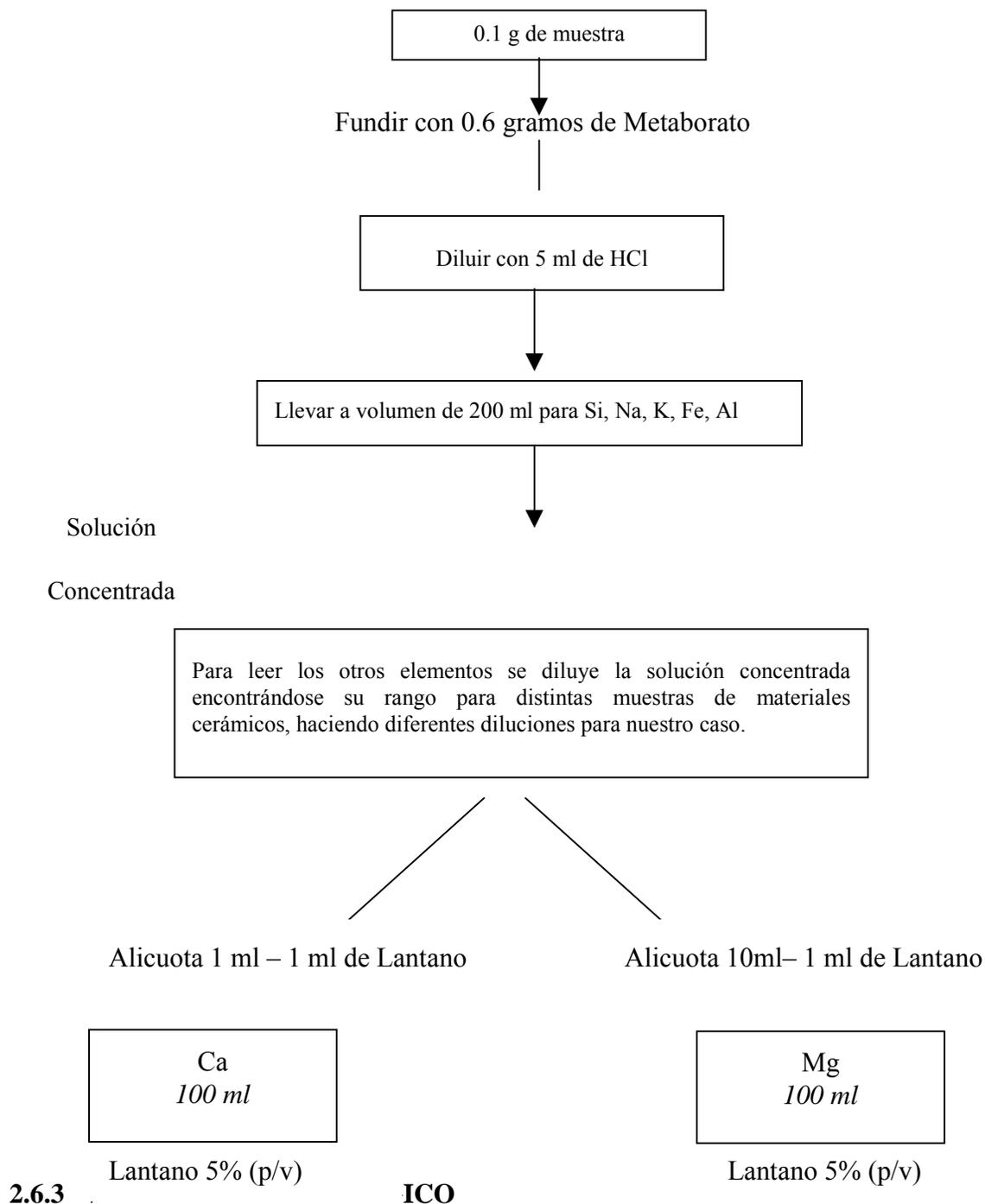
$$\text{Elementos (\% peso)} = \frac{(\mu \text{ g/mL en solución}) (\text{f.d.}) (0.02)}{\text{g de muestra}}$$

donde f.d. = factor de dilución, si es usado.

5. Pérdida por Ignición.

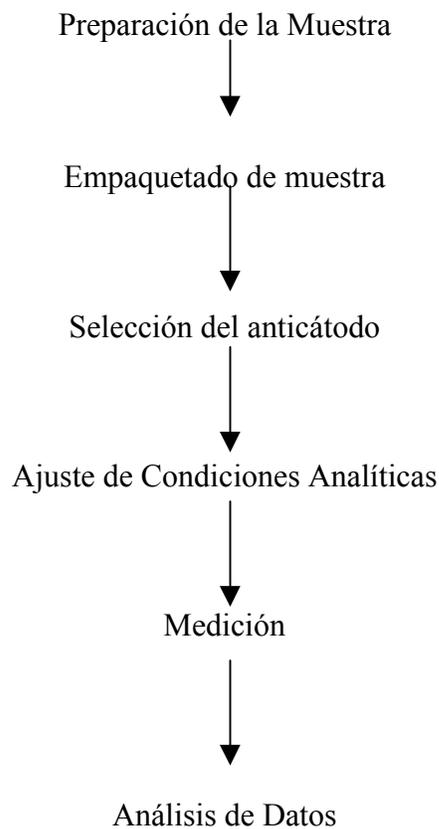
Pesar 1.000 g de la muestra libre de humedad (105 a 110°C) y calentar hasta peso constante sobre una lámpara inyectora de aire (blast lamp), o en un horno-mufla eléctrico, de 900° 100°C. Registrar la pérdida de peso como pérdida por ignición.

Fig. 8. Diagrama de Flujo del Método de Absorción Atómica de Fusión de Minerales con Metaborato de Litio²⁰



Debe hacerse resaltar que el análisis químico de una arcilla u otro material cerámico tiene por sí solo un valor muy limitado para revelar su identidad o su utilidad. Por lo general, su composición mineral, que indica la organización de los elementos componentes es un detalle que tiene que ser conocido¹⁵. Para obtener una estimación real del valor de cualquier material cerámico para determinado propósito necesitamos saber exactamente cuáles minerales están presentes y en qué proporción¹⁷.

Análisis Mineralógico por Difracción de Rayos – X (método del Polvo)²²



1. Preparación de la Muestra

- a. Secar la muestra al aire. Si la muestra es corte de un pozo, lavar el ceno de la muestra.
 - b. Triturar una muestra de unos 5 gramos en un mortero de acero inoxidable a un tamaño menor que 1 mm.
 - c. Moler una muestra en un mortero de ágata menor que 10 μm . Tocar la muestra (con los dedos). Si está áspera, moler de nuevo; de lo contrario, la muestra está exactamente preparada.
2. Empaquetado de Muestra en Soporte.
- a. Colocar un soporte de aluminio para muestra hacia abajo en una placa de vidrio.
 - b. Poner muestra en la cavidad del soporte, y hacer la superficie plana.
 - c. Poner una hoja de papel sobre el soporte
 - d. Presionarlo con el pulgar.
- Ahora la muestra está toda empaquetada.
3. Selección del Anticátodo de rayos X y filtro.
- Generalmente es empleado el anticátodo de cobre y filtro de níquel. Sin embargo, si una muestra es dominante en hierro, es recomendado el anticátodo de hierro y filtro de manganeso.
4. Ajuste de Condiciones Analíticas
- a. Carga de corriente y voltaje de un anticátodo.

Usando carga (kV y mA) de un anticátodo de rayos X tienen que ser ajustada a menos del 80 por ciento de la carga máxima permisible, la cual está indicada en cada anticátodo.

b. Condición de Goniómetro

Rendija de divergencia. Esta rendija limita la amplitud de irradiación en la superficie de la muestra. Generalmente 1° de rendija de divergencia es adaptado para un análisis cualitativo, pero $1/6^\circ$ o $^\circ$ para interés especial.

Rendija receptora. El poder de resolución está especialmente relacionada con esta rendija. Rendija amplia da picos intensos, pero decrece su poder de resolución. Generalmente 0.3 mm de abertura es usado para análisis cualitativo, pero 0.15 mm para análisis más precisos.

Rendija Dispersadora. Ajustar la rendija dispersadora la cual tiene el mismo ángulo con la rendija de divergencia.

Velocidad del explorador. 2 $^\circ$ /min o 4 $^\circ$ /min de velocidad del explorador es suficiente para identificar alteraciones minerales. La velocidad lenta es buena para análisis cuantitativo.

Rango del Explorador. En muchos casos para la identificación de alteraciones minerales, el rango del explorador de 2θ (ángulo de difracción) es de 40° a 2° .

c. Condición del Tablero Electrónico

Velocidad de Registrador. Es fácil leer un gráfico si ajustamos una velocidad del registrador de modo que 1cm en un gráfico corresponde a 1° .

Escala del rango. Ajustar una escala de rango para poder registrar la mayoría de picos de difracción. Si la relación de intensidad no es correcta, ajustar el rango para registrar todos los picos máximos en un gráfico.

Constante de Tiempo

$\omega \tau / \gamma \approx 10$ para identificación

$\omega \tau / \gamma \approx 2$ para análisis precisos.

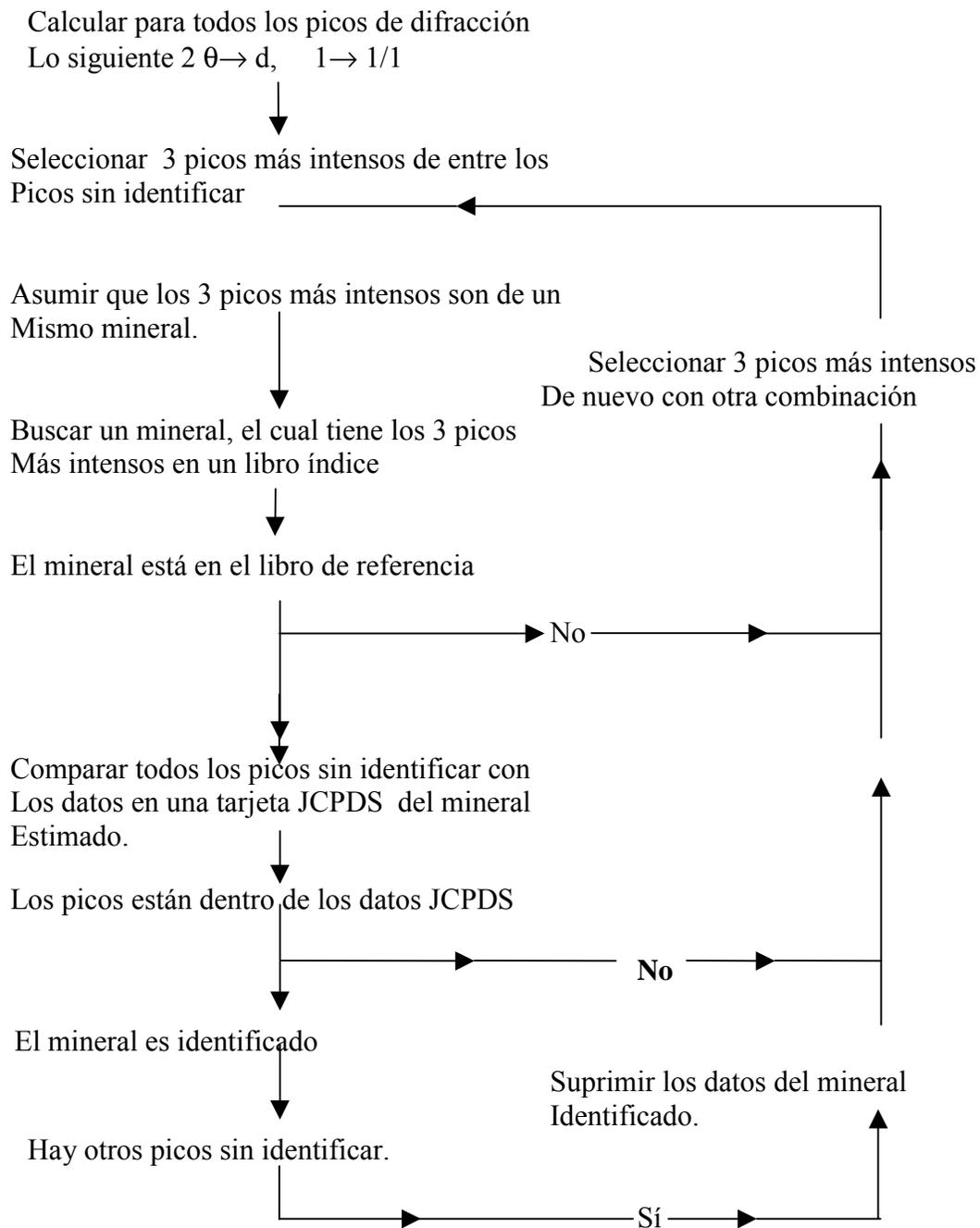
Donde:

ω : Velocidad del explorador ($^\circ/\text{min.}$)

τ : Constante de tiempo (seg)

γ : Rendija receptora (mm)

PROCEDIMIENTO DEL METODO HANAWALT (Método de Identificación)²²



III. RESULTADOS

3.0 PRUEBA TERMICA PREVIA

RESULTADOS DE LA PRUEBA TERMICA PREVIA

Muestra	Características de las muestras cocidas
APP	Blanca, muy porosa y frágil
ACB	Blanca-marillenta, muy porosa y frágil
LLACN	Gris-púrpura, levemente vitrificada y deformada
CHLPK70	Gris-púrpura, levemente vitrificada, hinchada y deformada
CICE7B	Marrón y con torsiones
SABN	Marrón oscuro, hinchada y con torsiones
CSIED	Café-grisásea, agrietada, hinchada y con torsiones
SAMGT	Café oscuro, agrietada y con torsiones
SAMSD	Marrón oscuro, hinchada y con torsiones.
SASPK53	Negra, completamente fundida y deformada.

DISCUSION:

- Todas las muestras con excepción de APP y ACB presentan coloración oscura (gris marrón o negro); esto debido posiblemente a su alto contenido de hierro.
- Las muestras LLACN, CHLPK70 Y SASPK53 presentan deformación y en grado extremo fusión, probablemente debido a un alto porcentaje de óxidos básicos.
- Las muestras CHLPK70, SABN, CSIED Y SAMSD presentan hinchazón debido a la formación intensa de gases causada por la disociación y las reacciones producidas por las impurezas que se encuentran casi siempre mezcladas con las arcillas (Fe_2O_3 , CaSO_4 , CaCO_3 , etc)
- Las muestras APP y ACB presentan porosidad, no así el resto de muestras, esto posiblemente a su bajo contenido de fundentes y alto contenido de alúmina ocasionando una pobre o ninguna vitrificación y un alto grado de refractariedad.
- Las muestras CICE7B, SABN, CSIED, SMGT y SAMSD, presentan torsiones, indicando alto grado de plasticidad y la necesidad de añadir cierta cantidad de aplástico para ser utilizada.

3.1 ANÁLISIS QUÍMICO

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

MUESTRAS ARCILLOSAS									
No.	Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Pérdida por ignición
1	<i>APP</i>	58.87	26.04	0.47	0.83	0.27	0.22	0.18	12.09
2	<i>ACB</i>	61.04	24.45	0.32	1.32	0.36	0.39	0.27	10.05
3	<i>LLACN</i>	50.67	25.97	5.21	0.82	0.96	0.63	0.42	12.20
4	<i>CHLPK70</i>	57.75	21.08	3.20	1.06	0.67	4.33	0.38	10.10
5	<i>CICE7B</i>	69.62	12.77	2.40	2.04	0.58	2.74	3.92	5.58
6	<i>CSIED</i>	43.62	21.35	8.09	0.14	1.21	2.39	1.83	19.87
7	<i>SAMGT</i>	55.48	18.65	6.90	0.15	0.95	1.94	0.36	14.76
8	<i>SAMSD</i>	71.79	14.59	1.80	0.14	0.85	1.36	0.19	8.88
MUESTRAS APLASTICAS									
1	<i>CICE7A</i>	45.96	26.64	9.25	1.24	0.45	0.21	0.21	15.34
2	<i>CHSR</i>	71.19	14.64	1.49	1.70	0.25	4.10	5.47	1.05
3	<i>SAMSJK13</i>	4.30	0.68	1.18	64.05	0.33	0.13	0.13	27.89

DISCUSION

- Todas las muestras arcillosas, exceptuando APP y ACB, tienen porcentaje total de óxidos fundentes (CaO , MgO , Na_2O , K_2O y Fe_2O_3) superior al 4%, por lo que se esperaría tengan bajo punto de cocción.
- Con alguna excepción, hay una marcada tendencia a mantenerse una relación 2:1 entre el SiO_2 y Al_2O_3 , por tanto la temperatura de cocción dependerá sobre todo del contenido de fundente.
- De las muestras aplásticas la CHSR presenta el mayor contenido de SiO_2 y la proporción de éste y los otros óxidos es muy semejante a la composición promedio del feldespato, por lo que podría utilizarse como sustituto de éste en una pasta.
- La muestra CICE7A presenta la mayor proporción de Al_2O_3 y Fe_2O_3 , aunque es muy buena fuente de alúmina, su alto contenido de hierro afectaría no sólo el color de la pieza también su temperatura de cocción.

3.0 ANALISIS MINERALOGICO

REPORTE DE ANÁLISIS MINERALOGICO

<i>MUESTRA</i>	<i>MINERALES</i>
<u>ARCILLOSAS</u>	
APP	K, Q
ACB	K, Q
LLACN	Q, H, I
CHLPK70	Q, H
CICE7B	Q, H
SABN	H, M, Pc
SAMGT	Q, H, I,
CSIED	Q, H, Ad
<u>APLASTICAS</u>	
CICE7A	Oc, Q, Mt, Pt.
CHSR	Q, Pc- Af.
SAMSJK13	Q, C
SASPK53	Oc, Q, Vi

Explicación de las abreviaturas : K= caolinita, Q= cuarzo, H= haloisita, I= illita, M= montmorrillonita, Pc= plagioclasa, Ad= andesina, Oc= oligoclasa, Mt= magnetita, Pt= pirita, Pc-Af= plagioclasa – alofana, C= calcita, Vi= vidrio.

DISCUSION

- Todas las muestras arcillosas contienen al menos uno de los minerales de los tres grupos más importantes usados en la fabricación de productos cerámicos; el de la caolinita, illita y del grupo de la montmorrillonita.
- Las muestras APP y ACB presentan alto contenido de caolinita y por lo tanto se esperaría que las piezas elaboradas sean blancas o casi blancas.
- La muestra CICE7A presenta mayor contenido de minerales de hierro; Magnetita (Fe_3O_4) y Pirita (FeS_2), por lo que su uso en una pasta se ve limitado debido a la coloración que da a los productos cocidos.
- La mayor calidad de minerales feldespáticos (plagioclasa) la contiene la muestra CHSR lo que la hace potencialmente apta para ser utilizada como fundente en una pasta.

3.3 FORMULACIONES

➤ Selección de Materias primas

Las materias primas fueron seleccionadas bajo los siguientes criterios; (a) aquellas cuyas muestras presentan las mejores características luego de la cocción, excluyendo las que resultaron con coloración oscura (heterogénea y desagradable a la vista), hinchadas, agrietadas, deformadas y/o fundidas; (b) las que sean igual o similar en contenido y calidad mineral a cada uno de los componentes de una pasta triaxial; caolinita, haloisista, cuarzo, plagioclasa, entre otros. Dejando en un segundo plano las de composición mineral que proporcionan características indeseables al producto; y (c) las materias que

solas o mezcladas contengan la proporción adecuada de óxidos para obtener el producto esperado con las características deseadas.

Las materias son: APP y ACB (técnica, química y mineralógicamente similares), y CICE7B; estos tres materiales arcillosos o plásticos y CHCR de los aplásticos.

➤ **Formulaciones Ensayadas**

a) Porcentaje de peso de los materiales.

Materias primas	Fórmula No. 1	Fórmula No. 2	Fórmula No.3
% APP	50	75	75
% CICE7B	25	--	25
% CHSR	25	25	--

Los porcentajes de los óxidos del Análisis Químico de cada uno de los componentes de la fórmula se multiplican por su porcentaje de peso en ella.

Se suman los porcentajes de cada óxido en los componentes de la fórmula para obtener el Porcentaje de Peso de los Oxidos de la Fórmula.

Se divide el porcentaje de peso de cada óxido en la formulación entre su respectivo peso de fórmula para obtener los Números Relativos de Peso Equivalentes en la Fórmula.

Para fórmula No. 1

Oxido	50% APP	25% CICE7B	25% CHSR	Porcentaje de peso de los oxidos en fórmula No. 1	Número relativo de pesos equivalentes en fórmula No. 1
SiO ₂	29.43	17.40	17.79	64.62	1.077
Al ₂ O ₃	13.02	3.19	3.66	19.87	0.195
Fe ₂ O ₃	0.23	0.60	0.37	1.20	0.007
CaO	0.41	0.51	0.42	1.34	0.024
MgO	0.13	0.14	0.06	0.33	0.008
K ₂ O	0.11	0.68	1.02	1.81	0.019
Na ₂ O	0.09	0.98	1.37	2.44	0.039

Para fórmula No.2

Oxido	75% APP	25% CHSR	Porcentaje de peso de los óxidos en fórmula No.2	Número relativo de pesos equivalentes en fórmula No. 2
SiO ₂	44.15	17.79	61.94	1.032
Al ₂ O ₃	19.53	3.66	23.19	0.227
Fe ₂ O ₃	0.35	0.37	0.72	0.004
CaO	0.62	0.42	1.04	0.019
MgO	0.20	0.06	0.26	0.006
K ₂ O	0.16	1.02	0.18	0.002
Na ₂ O	0.13	1.37	1.50	0.024

Para fórmula No. 3

Oxido	75% APP	25% CICE7B	Porcentaje de peso de los oxidos en fórmula No. 3	Número relativo de pesos equivalentes en fórmula No. 3
SiO ₂	44.15	17.40	61.55	1.026
Al ₂ O ₃	19.53	3.19	22.72	0.223
Fe ₂ O ₃	0.35	0.60	0.95	0.006
CaO	0.62	0.51	1.13	0.020
MgO	0.20	0.14	0.34	0.008
K ₂ O	0.16	0.68	1.84	0.009
Na ₂ O	0.13	0.98	1.11	0.018

Los números relativos de pesos equivalentes de los óxidos componentes de cada formulación se ordenan en tres columnas así: óxidos básicos RO, óxidos neutros R₂O₃ (exceptuando el Fe₂O₃ que se porta como RO) y óxidos ácidos RO₂.

Para fórmula No. 1:

0.039 Na₂O

0.019 K₂O

0.008 MgO 0.195 Al₂O₃ 1.077 SiO₂

0.024 CaO

0.007 Fe₂O₃

Para fórmula No. 2:

0.024 Na₂O

0.002 K₂O

0.006 MgO 0.227 Al₂O₃ 1.032 SiO₂

0.019 CaO

0.004 Fe₂O₃

Para fórmula No. 3:

0.018 Na₂O

0.009 K₂O

0.008 MgO 0.223 Al₂O₃ 1.026 SiO₂

0.020 CaO

0.006 Fe₂O₃

Igualar la suma de los óxidos neutros a la unidad y expresar la otras cantidades a éstas relativas.

Para fórmula No. 1:

0.200 Na ₂ O		
0.097 K ₂ O		
0.041 MgO	1.000 Al ₂ O ₃	5,523 SiO ₂
0.123 CaO		
0.036 Fe ₂ O ₃		

Totales de óxidos para Fórmula No. 1

RO	R ₂ O ₃	RO ₂
0.497	1.000	5.523

Para fórmula No. 2:

0.106 Na ₂ O		
0.009 K ₂ O		
0.026 MgO	1.000 Al ₂ O ₃	4.546 SiO ₂
0.084 CaO		
0.018 Fe ₂ O ₃		

Totales de óxidos para Fórmula No. 2

RO	R ₂ O ₃	RO ₂
0.243	1.000	4.546

Para fórmula No. 3:

0.081 Na ₂ O		
0.040 K ₂ O		
0.036 MgO	1.000 Al ₂ O ₃	4.601 SiO ₂
0.090 CaO		
0.027 Fe ₂ O ₃		

Totales de óxidos para Fórmula No. 3

RO	R ₂ O ₃	RO ₂
0.274	1.000	4.601

b) Porcentaje de Peso de los Oxidos

Oxido	Fórmula No.1	Fórmula No. 2	Fórmula No. 3
SiO ₂	64.62	61.94	61.55
Al ₂ O ₃	19.87	23.19	22.72
Fe ₂ O ₃	1.20	0.72	0.95
CaO	1.34	1.04	1.13
MgO	0.33	0.26	0.34
K ₂ O	1.81	0.18	0.84
Na ₂ O	2.44	1.50	1.11

c) Fórmulas Seger o Equivalente

Fórmulas	RO	R ₂ O ₃	RO ₂
No. 1	0.497	1.000	5.523
No. 2	0.243	1.000	4.546
No. 3	0.274	1.000	4.601

➤ **Preparación de las Materias Primas**

Las materias primas fueron tratadas según se describe en el Capítulo III Metodología, numeral 4.3, Tratamiento de las muestras: 4.3.1 Arcillas y 4.3.2 Aplásticos. El Aplástico seleccionado CHSR se somete a separación de partículas de hierro después de molido.

➤ **Preparación de las Pastas**

Se pesan las materias primas ya tratadas de manera que las cantidades de cada una de ellas nos permita obtener 1 Kg en seco de cada formulación a ensayar.

Agregar lentamente las cantidades de los ingredientes secos a un recipiente plástico, conteniendo unos 15,000 ml de agua, agitando constantemente la masa hasta haber desaparecido los grumos. Esto para cada uno de las tres formulaciones.

La papilla formada se vacía en platonos de yeso para eliminar el exceso de agua, hasta dejar la masa con un 18 a 25% de agua (donde presente mejor trabajabilidad).

Por último cada una de las tres pastas obtenidas se amasará concienzudamente para homogenizar la humedad restante y eliminar el aire. En esta parte pudimos darnos cuenta que la formulación No. 1 presenta mejor plasticidad.

➤ **Prueba Térmica Final**

Se moldearon las pastas, de las formulaciones a ensayar, a presión en moldes de yeso, en piezas de 12 x 6 x 3 cms. Elaborándose 15 por cada formulación e hicieron en verde a cada pieza una marca de 10 cms, se secaron y midieron. Luego, se procedió como en el Capítulo III Metodología, numeral 4.4 parte Experimental, 4.4.1 Prueba Térmica Previa, Cochura de las muestras, literales b,c,d y e, salvo con la única diferencia que de cada formulación cinco piezas se llevaron a 850°C otras cinco a 1,100°C y tanto igual a 1,200°C.

Finalmente se procedió a determinar también la concentración en cocción y absorción de agua.

Para la contracción en Secado y en Cocción se utilizaron las siguientes fórmulas:

Contracción en Secado

$$\%CS = \frac{M_V - M_S}{M_V} \times 100$$

M_V : longitud marcada a la pieza en verde

M_S : longitud en la pieza seca

Contracción en cocción

$$\%CS = \frac{M_S - M_C}{M_S} \times 100$$

M_S : longitud marcada a la pieza seca

M_C : longitud en la pieza cocida

Para determinar la Absorción de Agua la fórmula usada fue:

$$\%CS = \frac{P_H - P_S}{P_S} \times 100$$

P_H : Peso de la pieza después de la absorción.

P_S : Peso de la pieza en seco.

Las piezas utilizadas para determinar la contracción en cocción se pesaron (P_S) y luego depositadas en un recipiente con agua, sumergiéndolas completamente por 24 horas, secadas con una toalla húmeda y pesadas nuevamente (P_H) para calcular la absorción de agua.

Los resultados de la Prueba Térmica Final

Formulación No. 1

Propiedades	Secado	850°C	1100°C	1200°C	Total
%Contracción Promedio	8.0	1.5	1.0	2.7	13.2
%Contracción en cocción Promedio		5.2			
%Absorción de agua Promedio		12.0	8.5	5.0	
Color a 1200°C		Gris-anteado a beige*			
Otras a 1200°C		No grietas, no torsiones, no hinchazón, no deformaciones			

*Dependiendo de la atmósfera del horno.

Formulación No. 2

Propiedades	Secado	850°C	1100°C	1200°C	Total
% Contracción Promedio	5.0	0.5	1.0	2.0	8.5
% Contracción en cocción Promedio		3.5			
%Absorción de agua Promedio		23.5	20.0	12.5	
Color a 1200°C		Blanco			
Otras a 1200°C		No grietas, no torsiones, no hinchazón, no deformaciones			

Formulación No. 3

Propiedades	Secado	850°C	1100°C	1200°C	Total
% Contracción Promedio	8.0	2.5	1.8	2.5	14.8
% Contracción en cocción Promedio	6,8				
%Absorción de agua Promedio		18.5	11.9	5.0	
Color a 1200°C	Rosado				
Otras a 1200°C	No grietas, no torsiones, no hinchazón, no deformaciones				

3.4 ESPECIFICACIONES DE LAS MATERIAS PRIMAS Y DE LA PASTA FORMULADA PARA USO EN LA CERÁMICA FINA.

Materias primas

Como se mencionó anteriormente, las materias primas seleccionadas para la formulación de la pasta son las arcillosas APP (o ACB) y CICE7B, y la aplástica CHSR.

a) Arcillosas

Las arcillosas a utilizarse deberán cumplir en cuanto a su contenido químico y mineral, detallado anteriormente, y pasar por un tamiz de 180 mallas.

b) Aplástico

Deberá cumplir en cuanto a su composición química y mineral ya detallado y las especificaciones siguientes: molido por 6 horas en molino de bolas (o sea hasta que el 95% de él puede pasar a través de un tamiz de 325 mallas) y contener la menor cantidad posible de minerales de hierro (< 3 %).

Producto Terminado

La pasta formulada deberá cumplir en su contenido químico y mineral y las especificaciones siguientes:

Agua de plasticidad

(% límites)-----18 – 25

Contracción en secado

(% promedio)-----8

Temperatura de cocción-----1165° -1180°C

(cono 4 – 5)

Contracción en cocción

(% promedio)----- 5.2

Absorción de agua

(% promedio)----- 5.0

IV. CONCLUSIONES

- Con el presente trabajo se demostró el beneficio que podrían obtener nuestros artesanos al hacer un mayor y mejor uso de los materiales cerámicos locales, ahorrándose costos y mejorando su competitividad.
- Los conocimientos elementales de la química-cerámica pueden ayudar al artesano ceramista a mejorar la calidad de sus productos, tanto en la cerámica tradicional como fina, elaborados hasta hoy.
- La pasta formulada (No. 1) puede ser utilizada en cerámica fina para la elaboración de productos: de mesa, de cocina, artística de mesa, cocción de alimentos y baldosas.
- El uso de los materiales cerámicos reduce considerablemente la dependencia actual de materia prima importada, ahorrando divisas al país.
- Aprovechando un recurso hasta ahora muy poco conocido en su composición química y mineralógica, se genera mas ocupación y diversificación de la producción.

V. RECOMENDACIONES

- Las universidades e instituciones gubernamentales y privadas, que tengan los recursos técnico-científicos para análisis químico y mineralógico deben hacerlas accesibles para mejorar los conocimientos de nuestros artesanos ceramistas y en consecuencia a la incipiente industria cerámica.
- Las formulaciones No. 2 y 3 tienen potencial para ser moldeadas con barbotinas, por lo que se necesita una investigación mucho más profunda.
- Se debe realizar un estudio de los otros materiales investigados por la Misión Geológica Alemana en El Salvador (1973), ante la posibilidad de mejorar las presentes formulaciones y obtener más y mejores productos.
- Por ser recursos no renovables, su explotación y aprovechamiento debe ser técnicamente orientada, para evitar daños al medio ambiente.
- Para un estudio más completo, es preciso realizar a materiales y cuerpos formulados, pruebas físicas y mecánicas.
- Debe hacerse un estudio sobre los vidriados y colorantes que se adapten a los cuerpos formulados.

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), 1975
Annual Book of ASTM Standard, Part 17, Easton, M:D:, U.S.A., 1975
2. CARDEW, MICHAEL, Pioneer Pottery, 1ra. Edición, St. Martn's Press, New York,
U.S.A., 1971.
3. CARROLL, DOROTHY., Minerals: A Guide to their X-Ray Identification, 1ra.
Edición, the Geological Society of America, Inc., Boulder, Colorado, U.S.A., 1960.
4. DALE, A.J., Modern Ceramic Practice, 1ra. Edición, Maclaren and Sons Ltd.,
London, 1964
5. DANA-HURLBUT, Manual de Mineralogía, 2da. Edición, Editorial Reverte, S.A.,
1960.
6. DUDEROV, G.N., Tecnología de la Cerámica y Materiales Refractarios, 1ra.
Edición, Editorial HASA, Buenos Aires, Argentina, 1949
7. FASSBENDER, HANS W., Química de Suelos: Con Enfoque en Suelos de América
Latina, 1ra. Edición, Editorial IICA, San José, Costa Rica, 1978.

8. FLINT, E., Principios de Cristalografía, 1ra. Edición, Editorial Paz, Moscú, U.R.S.S., 1966
9. GRIM, R.E., Clay Mineralogy, 2da. Edición, Mc Graw-Mineralogical Society of America, New York, U.S.A., 1979
10. HUTCHISON, C. S., Laboratory Handbook of Petrographic Techniques, 1ra. Edición, John Wiley and Sons. Inc., New York, U.S.A., 1974.
11. KERR, P.F., Mineralogía Óptica, 3ª. Edición, Ediciones del Castillo, S.A., Madrid, España, 1965.
12. KINGERY, W.D., Introduction to Ceramics, 1ra. Edición, John Wiley and Sons, Inc., New York, U.S.A. 1960
13. KIRK, R., OTHMER, D.F., Enciclopedia de Tecnología Química, 1ra. Edición, Unión Tipográfica Editorial Hispano - Americana, Volumen 1, México, 1961.
14. MARON, S.H., PRUTTON, C.F., Fundamentos de Fisicoquímica, 1ra. Edición, Editorial Limusa, S.A., México, 1968.

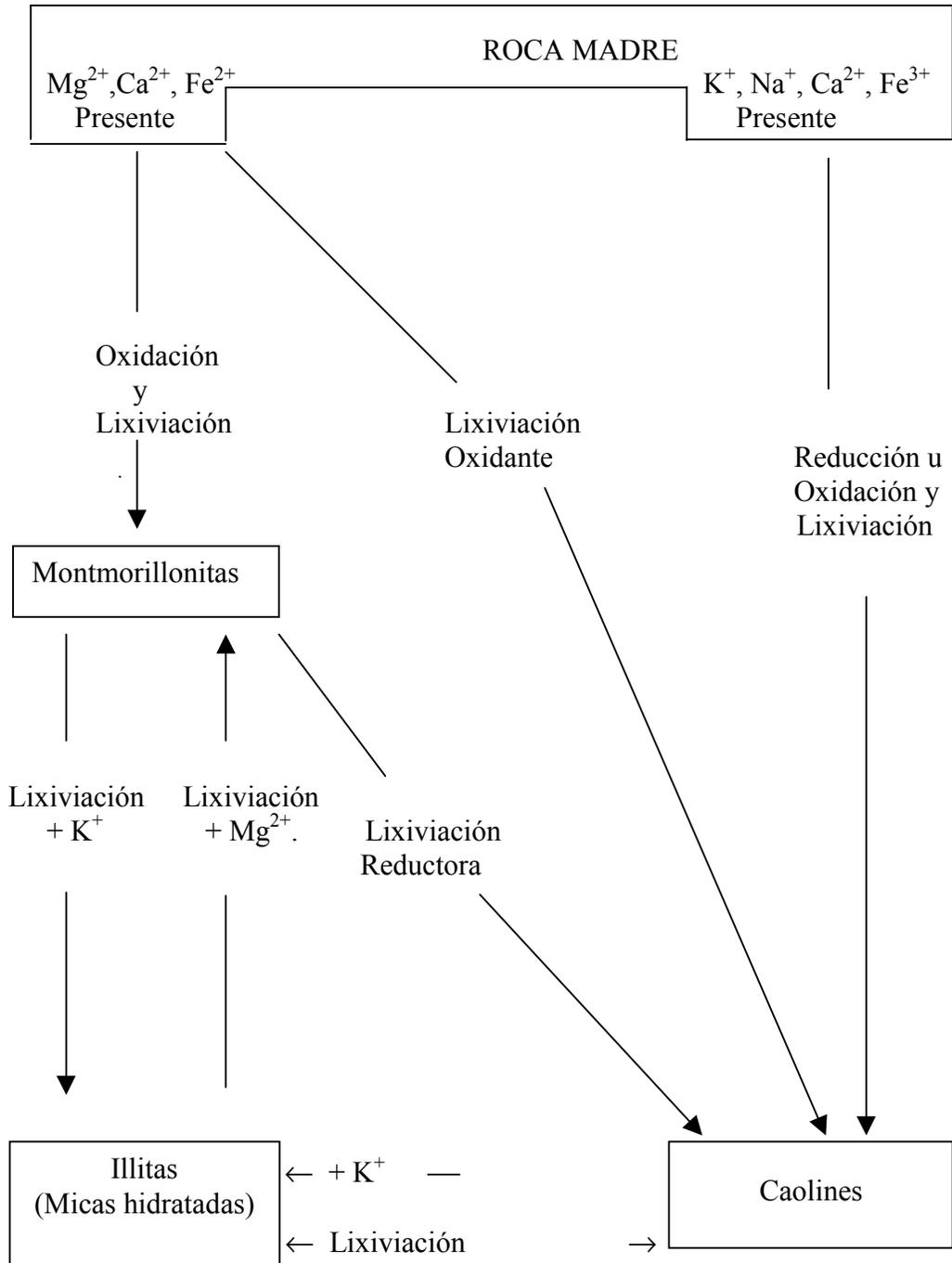
15. NELSON, GLENN C., *Ceramics: A Potter's Handbook*, Fifth Edition, CBS College Publishing, New York, U.S.A., 1984.
16. NORTON, F.H., *Cerámica Fina: Tecnología y Aplicaciones*, 1ra. Edición. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España, 1975.
17. NORTON, F.H., *Cerámica para el Artista Alfarero*, 1ra. Edición, Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1960.
18. SHAW, KENNETH, *Ciencia para Ceramistas y Esmaltadores*, 1ra. Edición, Ediciones del Castro, Burgos, Vigo, España, 1974.
19. JENKINS, R., DE VRIES, J.L., *An Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*, N.V. Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Holland.
20. PERKIN-ELMER, *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophotometry*, Marzo 1971
21. STEIN, VOLKER, *Minerales No Metálicos, Rocas y Suelos de Uso Industrial en la República de El Salvador, Materias Primas para Cerámica Fina en El Salvador*, 5ta. Parte, Servicio Geológico Federal de Alemania / Misión Geológica Alemana en El Salvador, Hannover, Alemania Occidental, 1973.

22. TAGUCHI, SACHIHIRO, Experiments on Geothermal Geology, No. 6 Texbook for the 17th International Group training course on Geothermal Energy held at Kiushu University, 1986.

23. RUDAS, C.A., GARAY, M.D., Evaluación de los Yacimientos de Puzolana en El Salvador para la Formulación de Cemento Puzolánico y Comparación de Propiedades con Cemento Portland I. El Salvador: Facultad de Ingeniería y Arquitectura, U.E.S. 1983.

ANEXOS

Arcillas formadas bajo diferentes condiciones atmosféricas¹²



Tamaños y Formas de las Partículas Minerales de Arcilla¹².

MINERAL	CONSTITUCION	TAMAÑO DE PARTICULA
Grupo Caolín Dickita	Placas hexagonales bien definidas	Generalmente~1-10 μ ,
Caolinita	Placas hexagonales, a menudo bien desarrolladas. Espesor variable. Algunas veces alargadas	Placas normalmente 0.1 -3 μ
Caolín mineral en muchas arcillas refractarias.	Placas hexagonales, a menudo pobremente desarrollado	Placas normalmente mucho menos que 1 μ
Haloisita	Formas alargadas teniendo la apariencia de barras o tubos, Dividido y en parte tubos desarrollados algunas veces observados.	Diámetros externos ~ 0.05 - 0.2 μ , Largo~ 0.1- μ .Espesor interior ~0.02 μ .
Grupo Montmorillonita Montmorillonitas	Normalmente muy pobremente definidas, ocasionalmente presenta formas hexagonales. Tendencia a formar agregados.	Placas mucho menos que 1 μ .
Nontronita	Pobremente cristalizado. Apariencia como cinta o como listón.	
Hectorita	Cintas delgadas.	Largo ~ 1 μ . Ancho ~0. 1 μ .
Grupo Mica Mica hidratada, illita.	Pobremente definida, hojuelas hexagonales delgadas.	
Allevardita	Partículas como listón	Ancho ~ 1 μ . Largo ~ 1 μ .
Otras arcillas Poligorsquita o attapulgita	Fibras	Largo ~ 0.1 - 5 μ .Ancho ~ 0.01 – 0.5 μ .
Sepiolita	Observadas forma de hojuelita y como varilla.	Largo de varillas 0.1-5 μ hojuelas – 0.1- 5 μ

Clasificación de los minerales de arcilla³.

Tipo	Grupo (X= carga para grupo formula)	Subgrupo	Especies
1:1	Caolinitas – serpentinas X ~ 0	Caolinitas Serpentinas	Caolinita,haloisita, Crisotilo,lizardita, antigorita.
	Pirofilita – talco X ~0	Pirofilitas Talcos	Pirofilita Talco.
	Smectita o montmorillonita- saponita X ~ 0.25-0.6	Smectitas dioctaédricas o Montmorillonitas Smectitas trioctaédricas o Saponitas	Montmorillonita, Beidelita, nontronita, Saponita, hectorita, sauconita.
2:1	Vermiculita X ~ 0.6-09	Vermiculitas dioctaédricas. Vermiculitas trioctaédricas	Vermiculita dioctaédrica. Vermiculita trioctaédrica.
	Mica X ~ 1	Micas dioctaédricas Micas trioctaédricas	Muscovita, paragonita Biotita , floglopita
	Mica frágil X ~ 2	Micas frágiles dioctaédricas. Micas frágiles trioctaédricas.	Margarita Clintonita.
2:1:1	Clorita X variable	Cloritas dioctaédricas (cationes 4-5 oct. por grupo fórmula) Cloritas trioctaédricas (cationes 5-6 oct. por grupo fórmula)	Pennina, clinocloro, proclorita

Composición química ideal de los minerales de arcilla y otros filosilicatos estrechamente relacionados⁹

Grupos estructurales	Fórmula Ideal
Laminar 1:1	
Grupo Caolinita: trioctaédrica	
Caolinita (diquita y nacrita)	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$
Haloisita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$
Haloisita (hidratada)	$Al_2 Si_2 O_4 (OH)_4 \cdot 2H_2O$
Grupo Serpentina : trioctaédrica	
Laminar 2:1	
Pirofilita	$Al_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$
Talco	$Mg_3 Si_4 O_{10} (OH)_2$
Grupo Mica: dioctaédrica	
Muscovita	$KAl_2 (Si_3 Al) O_{10} (OH)_2$
Glauconita	$K(Fe^{3+}_{1.33}Mg_{0.67})(Si_{3.67}Al_{0.33})O_{10} (OH)_2$
Celadonita	$K (MgFe^{3+}) Si_4 O_{10} (OH)_2$
Grupo Mica: Trioctaédrica	
Biotita (Floglopita)	$KMg_3 (Si_5 Al)O_{10} (OH)_2$
Illita	$K_{\leq 1}Al_{<2}(Fe^{3+}Mg^{2+})>O_{Si_{4-x}Al_x}O_{10} (OH)_2$
(La mayor parte dioctaédricas pero puede incluir formas trioctaédricas)	
Smectita: dioctaédrica	
Montmorillonita	$Na_{0.33} (Al_{1.67} Mg_{0.33})Si_4 O_{10} (OH)_2$
Beidelita	$Na_{0.33}Al_{2.22} (Si_3 Al)O_{10} (OH)_2$
Nontronita	$Na_{0.33}Fe_2^{3+}(Si_{3.67}Al_{0.33}) O_{10}(OH)_2$
Smectita :trioctaédrica	
Saponita	$Na_{0.33}Mg_3(Si_{3.67}Al_{0.33})O_{10} (OH)_2$
Stevensita	$Na_{0.33}Mg_{2.83}Si_4 O_{10}(OH)_2$
Vermiculita:	
Trioctaédrica	$(Mg,Ca)_{x/2}Mg_3(S_{4-x}Al_x)O_{10}(OH)_2$
Dioctaédrica	$(Al)_{x/3}Al_2 (Si_{4-x}Al_x)O_{10}(OH)_2$
Palygorskita	$(OH)_4 Mg_5 Si_8 O_{20} (OH)_2 \cdot 4H_2O$
Sepiolita	$(OH)_4 Mg_8 Si_{12} O_{30} (OH)_2 \cdot 4H_2O$
Laminar 2:1:1	
Grupo Clorita: trioctaédrica	
Clinocloro	$(Mg_5 Al)(Si_3 Al) O_{10} (OH)_8$
Chamosita	$(Fe^{2+}_5 Al) (Si_3 Al)O_{10} (OH)_8$

Clasificación de la cerámica fina¹⁶

Clases y tipo	Absorción %	Producto
Loza:		
Natural	+ 15	De mesa, artística, baldosas
Fina	10-15	De mesa, artística, de cocina, baldosas
Talco	10-20	Artística, baldosas, de horno
Semivítrea	4-9	De mesa, artística
Gres:		
Natural	0-5	Tuberías de drenaje, cocina, artística, baldosas.
Fina	0-5	Cocción de alimentos, artística de mesa
Vítrea técnica	0-0.2	Química
Jaspe	0-1	Artística
Basáltica	0-1	Artística
Porcelana (China):		
De hotel	0.1-03	De mesa, fuerte
Doméstica	0-02	De mesa
De huesos	0.3-2	De mesa, artística
De frita	0-0.5	De mesa, artística
De alta resistencia	0-1	De mesa
De bajo coeficiente de dilatación.	1-5	Para el horno, para cocción de alimentos
Porcelana		
Dura	0-0.5	De mesa, artística
Vítrea técnica	0-0.2	Química, bolas de molino y revestimientos
Triaxial eléctrica	0-0.2	Aisladores de baja frecuencia
Eléctrica de alta resistencia.	0-0.2	Aisladores de baja frecuencia
De alúmina	0-0.1	Núcleos de bujías, asientos de válvulas, de herramientas de corte, substratos, piezas resistentes a la abrasión.
Esteatita	0-0.05	Aisladores de alta frecuencia, dieléctricos de bajas pérdidas.
Ferritas	0-0.05	Constante dieléctrica K elevada.
Ferromagnética(ferritas)	0-0.05	Imanes permanentes, núcleos de transformador y memorias, antenas.
Artículos sanitarios vítreos	0.1-03	Lavabos, tazas de WC, descargas de WC, urinarios.
Dentales	0-0.1	Dentaduras.
Paria	0-0.5	Escultura
Refractaria	0-10	Tubos de pirómetro, recipientes de combustión, componentes de hornos, elementos combustibles nucleares.

Escala Temperatura –Color¹⁵

COLOR	TEMPERATURA (°C)
Rojo visible más bajo	475
Rojo visible más bajo a rojo oscuro	475-650
Rojo oscuro o rojo cereza	650-750
Rojo cereza a rojo cereza claro	750-815
Rojo cereza claro o anaranjado	750-900
Anaranjado a amarillo	900-1090
Amarillo a amarillo claro	1090-1315
Amarillo claro a blanco	1315-1540
Blanco a blanco deslumbrante	Más alto de 1540

DEFINICIONES UTILIZADAS EN CERÁMICA FINA¹⁶

Las siguientes definiciones se fundan en las propuestas por la American Ceramic Society, pero en ocasiones se apartan de dicha guía.

CERAMICA FINA: Forma de pasta cerámica de estructura fina controlada, que puede ser vidriada o no. Cuando esta rama de la cerámica comprendía principalmente el servicio de mesa y la cerámica artística, la palabra *whiteware* (cerámica blanca) había sido una expresión genérica utilizada por largo tiempo para definir dicha rama. Pero ahora el campo se ha ampliado en muchas otras formas de cerámica de grano fino y el término cerámica blanca ya es menos expresivo.

Las pastas de cerámica fina suelen dividirse en triaxiales - en las que predominan los componentes arcilla, cuarzo y feldespato- y no triaxiales- que además, contienen cantidades importantes de otros materiales.

LOZA: Artículos vidriados o no, de porosidad media a alta. Términos equivalentes son el francés *faïence* y el alemán *Steingut*. La loza puede subdividirse en:

1. **LOZA NATURAL**, que suele fabricarse de una sola arcilla sin refinar.
2. **LOZA FINA**, fabricada de arcillas refinadas y no plásticas. Pasta triaxial.
3. **LOZA DE TALCO**, que contiene considerable proporción de talco.
4. **LOZA SEMIVITREA**, término que se refiere a la clase americana cocida a porosidad media. Pasta triaxial.

GRES: Cerámica vidriada o no, fabricada en gran parte de arcillas gredosas, cocidas a porosidad baja, pero no translúcida. La palabra francesa grés y la alemana steinzeug significan lo mismo. La gres puede dividirse en:

1. GRES NATURAL, fabricada en un solo tipo de arcilla sin refinar.
2. GRES FINA, fabricada de una sola mezcla de arcilla, y no plásticos.
3. GRES TÉCNICAMENTE VITREA, cuidadosamente mezclada o cocida a porosidades bajísimas, para la industria química.
4. GRES DE JASPE, principalmente a base de compuestos de bario.
5. GRES BASÁLTICA, de materiales de alto contenido en óxido de hierro.

PORCELANA (CHINA): Es la forma translúcida, de porosidad escasa o nula, vidriada y madurada por segunda cocción a la misma temperatura o a temperatura algo inferior que el bizcocho. A veces recibe una sola cochura. Las expresiones soft paste porcelain (porcelana de pasta blanda) y porcelaine tendre tienen el mismo significado. La porcelana puede dividirse en:

1. PORCELANA DE HOTEL, pasta triaxial con un pequeño porcentaje de calcio, cocida a baja porosidad y fuerte consistencia.
2. PORCELANA DOMÉSTICA, del mismo material que la clase anterior, pero en formas más finas a fin de que sea más translúcida.
3. PORCELANA DE HUESOS (bone china) , con gran proporción de cenizas de huesos, para mayor translucidez. Se fabrica principalmente en Inglaterra.

4. PORCELANA DE FRITA, que contiene un fundente vítreo mediante el cual se logra gran translucidez. El término belleek ware se emplea en el mismo sentido. La famosa porcelana Lenox es de este tipo.
5. PORCELANA DE ALTA RESISTENCIA, material en que todo el cuarzo o parte del mismo se sustituye por alúmina.
6. PORCELANA DE COCINA, material de bajo coeficiente de dilatación térmica que suele contener minerales de cordierita o de litio. Existe la calidad que puede introducirse en el horno y la que resiste a la llama, con la que se prepara la comida sobre los quemadores.

PORCELANA: Variedad dura, translúcida, normalmente de composición triaxial, cocida a baja temperatura (bizcocho) y vidriada a la alta temperatura. En algunos casos se somete a cochura de un solo paso, como la porcelana eléctrica. El material no es poroso y es translúcido.

CERÁMICAS TÉCNICAS: En esta categoría se incluyen los materiales porosos para la industria electrónica, tales como los titanatos, ferritas, etc..., también comprende las refractarias de grano fino, los utensilios de laboratorio, la porcelana dental, los combustibles nucleares, los materiales resistentes a la abrasión, las herramientas de corte cerámicas y los materiales transmisores de infrarrojos.

GLOSARIO

Alabeo :

Forma combada, enconchada o torcida que toma una pieza debido principalmente a tres razones: la no uniformidad de la estructura, los esfuerzos realizados manejando la pieza plástica o casi seca y al secado no uniforme.

Angulo de difracción (2θ):

Cuando una serie de planos de reflexión paralelos de un sólido cristalino, se encuentra formando un ángulo, exactamente definido, con un haz de rayos X incidente, aparece de pronto un rayo difractado en ángulo de 2θ con el haz transmitido sin difractar .

Ante:

Color amarillo o amarillento.

Anticátodo (ánodo)

Emite los rayos X al chocar sobre él una corriente de electrones que vienen del cátodo a gran velocidad estando conectado el tubo, donde se producen los rayos X, a un circuito de alta tensión.

Arcillas grasas:

Arcillas formadas por granos muy finos y altamente plástica.

Barbotina :

Estado en el que la mezcla arcilla-agua deja de ser plástica para empezar a comportarse como un fluido.

Cascajo:

Son partículas libres que contienen casi todas las arcillas en su estado natural. La más común es el cuarzo (SiO_2), hallado en una gran variedad de partículas de diverso tamaño. Los feldespatos (K , NaO , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) actúan como cascajo en la arcilla plástica y, durante la quema se convierten en ligas. Hállanse frecuentemente, y en pequeñas cantidades, minúsculos copos de mica, y los minerales que contienen hierro a menudo presentes, pueden causar la decoloración de la arcilla quemada.

Cerámica:

Es el arte y ciencia de emplear y fabricar artículos sólidos, los cuales tienen como su componente esencial, y están formados en gran parte de materiales no metálicos e inorgánicos. Esta definición incluye no sólo materiales tales como alfarería, porcelana, cementos y vidrios, sino que también materiales magnéticos no metálicos, ferroeléctricos, manufacturado de cristales singulares y una variedad de otros productos.

Cieno:

Lodo blanco que forma depósitos en ríos y sobre todo en lagunas o en sitios bajos y húmedos.

Cono pirométrico:

Pequeñas pirámides triangulares truncadas de composiciones cerámicas que sirven para medir la temperatura cuando se ha seguido, determinado ciclo de tiempo y temperatura. Si estas circunstancias y la atmósfera de gas son muy semejantes a las que hubo en la graduación de los conos, éstos son verdaderamente útiles.

Cono pirométrico equivalente (E P C)

Número de cono pirométrico estándar que tiene aproximadamente el correspondiente rango de temperatura de ablandamiento que el cono de ensayo.

Copos de mica:

Pequeñas masas formadas por diminutas escamas de mica que se encuentran en muchas arcillas.

Cuerpo:

La porción estructural de un artículo de cerámica (sin el vidriado) o el material o mezcla con que se hace.

Desfloculado:

Fenómeno que sucede cuando se agrega una agente desfloculante (carbonato de sodio, silicato de sodio, etc.), al sistema arcilla-agua. La viscosidad es reducida (fluidez incrementada grandemente) y las partículas individuales de arcilla, son separadas.

Difracción:

Cuando los rayos X se dispersan por el medio ordenado de un cristal, hay interferencia (constructiva y destructiva) entre los rayos dispersos, porque las distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud de onda de la radiación. El resultado es la difracción.

Espacio interplanar o distancia reticular (d)

Es el espaciamiento que existe entre los planos atómicos que componen un cristal.

Filtro:

Se emplea a fin de obtener radiación monocromática (longitud de onda determinada).

Los filtros se eligen en correspondencia con la longitud de onda de la radiación característica. Si el ánodo es de hierro, se utiliza filtro de manganeso; si es de cobre, uno de níquel; si es de molibdeno, uno de circonio, etc.

Goniómetro:

Aparato donde va montado el elemento dispersante (cristal o cristales de muestra), y que permite la variación y la determinación precisa del ángulo (de Bragg) entre la cara del cristal de la muestra y el haz de rayos X incidente.

Intensidad (I):

Refiérese al tamaño que presentan los picos o líneas de difracción.

Libro índice:

Proporciona valores de los espaciamentos “d” para las líneas de difracción más intensas, el nombre del mineral y el número de su tarjeta JCPDS.

Limo:

Fango.

Materiales aplásticos:

Son los materiales distintos de las arcillas que no muestran plasticidad cuando se les mezcla agua.

Materiales plásticos:

Comprende las diferentes arcillas.

Método del polvo:

Método de análisis de cristales por rayos- X, ideado independientemente por Debye y Scherrer, en 1916 y Hull en 1917, que permite el uso de cristales en polvo (tritutados) y no un cristal solo, es decir, una gran cantidad de cristales pequeñísimos sobre los que incide un haz monocromático de rayos- X.

Química-cerámica:

Es aquella parte de la química relacionada con las reacciones que desarrollan las partes vidriosas y cristalinas del resultado cerámico, y con las propiedades químicas del producto.

Similipétreo:

Altamente sólido y compacto.

Tamices o cribas:

Receptáculos con fondo de alambres de bronce, de cobre o de acero inoxidable, en los que se ciernen las partículas.

Tarjetas JCPDS: (Joint Committee of Powder Diffraction Standards)

Cada tarjeta almacena información sobre una difracción patrón: tres valores “d” dados por las líneas más intensas más el valor “d” más grande registrado y las intensidades relativas correspondientes a estas líneas: composición química, nombre

químico y mineral. Todo los valores “d” de las líneas en el correcto orden como aparecen en el difractograma junto con las intensidades relativas e índices de Miller, datos físicos, análisis químico, etc.

Vidriado:

Capa cerámica madurada hasta el estado vidrioso formada en un artículo de cerámica, o el material o mezcla de la cual es hecha la capa .

Vitrificación:

La progresiva reducción en porosidad de una composición cerámica como resultado del tratamiento de calor, o el proceso implicado.