

7
Lej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE
MATERIALES CERÁMICOS

TESIS PROFESIONAL QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:

KARINA PINEDA BELTRÁN

Director de tesis: Dr. Arturo Barba Pingarrón
Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería, UNAM



275596

Ciudad Universitaria, 1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAS IN ACCION
DISCONTINUO A.

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la vida y la fuerza
necesaria para llegar hasta aquí.

A mis padres por todo el amor y el apoyo
que me han brindado durante todos estos años,
pues sin ellos no sería lo que soy.

A mi hermana por los buenos y malos momentos
que pasamos juntas, aunque ya no los podamos compartir.

A mi hermano por su sonrisa, su ternura
e infinita cantidad de travesuras.

A Toñita, Zenón y Ato por su paciencia,
sus consejos, su cariño, pero sobre todo
por ser una familia para mí.

Pero en especial a Omar por todo su amor,
Su paciencia, su ayuda y su apoyo incondicional.
Gracias a él por compartir su vida conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Arturo Barba Pingarrón, por sus consejos, su inapreciable guía para la elaboración de este trabajo, pero también por la senda que ha marcado en mi vida.

Al Dr. Luis Barba Pingarrón y al Sr. Jorge Trevi del Instituto de Investigaciones Antropológicas, por la asesoría técnica de los procesos de elaboración y prueba de las cerámicas, así como el apoyo brindado para la realización de los experimentos.

Al Dr. Alfonso Huanosta y al Dr. José Guzmán del Instituto de Investigación en Materiales, por el apoyo y asesoría proporcionadas en las pruebas de microscopía electrónica.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por las facilidades y el apoyo brindado durante la elaboración de este trabajo.

Al Ing. Jesús Roviroza y al Ing. Adolfo Altamirano, por su ayuda y asesoría en diferentes etapas del trabajo realizado.

A Eduardo, David y Angel, por su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Omar Jiménez Arévalo por sus consejos, su ayuda y su importante colaboración sin la cual no hubiese sido posible llevar a buen termino el presente trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	I
I) ANTECEDENTES	1
1. Posible origen de las cerámicas.	1
2. Las cerámicas en la vida de los mayas.	1
a) Ubicación geográfica de los mayas.	2
b) Recursos para elaborar las cerámicas.	3
c) Función de la alfarería entre los mayas.	4
d) Tecnología de elaboración de las cerámicas mayas.	5
II) CERÁMICAS (<i>Conceptos generales y fabricación</i>)	7
1. Enlaces y estructuras.	7
2. Propiedades mecánicas.	9
3. Proceso de fabricación de los cerámicos a nivel artesanal.	14
a) Preparación de la pasta cerámica.	14
b) Amasado y aplastado.	15
c) Moldeado.	16
d) Secado.	19
e) Cocción.	20
f) Barnizado.	22
g) Decoración.	22
4. Definición y clasificación de las arcillas más empleadas en México.	23
III) EXPERIMENTACIÓN	27
1. Normas para elaboración de las probetas.	27
2. Técnicas de preparación de muestras.	32
a) Elaboración de piezas cerámicas.	32
b) Inmersión de las piezas cerámicas en ceras.	38
3. Caracterización.	41
a) Ensayos de compresión.	41
b) Ensayos de impacto.	43
c) Evaluación de la porosidad.	45
IV) ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	47
V) POSIBLES APLICACIONES	52
VI) CONCLUSIONES	54
VII) BIBLIOGRAFÍA	56
GLOSARIO	58
ANEXO I	A1
ANEXO II	A7

HIPÓTESIS:

Se pueden mejorar las propiedades mecánicas y conferir un acabado superficial alternativo a las cerámicas convencionales¹ (con recubrimiento vítreo y simples), mediante un proceso que permita introducirlas en una cera o un polímero que cubra, en alguna medida sus porosidades.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar y mejorar las propiedades mecánicas de cerámicas convencionales modificadas mediante un proceso de inmersión en diferentes tipos de ceras fundidas.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Lograr la impermeabilización de la superficie de las cerámicas.
2. Hacer posible la eliminación del recubrimiento vítreo con plomo en las cerámicas convencionales, mediante un recubrimiento alternativo a base de polímeros.
3. Sugerir las posibles aplicaciones de las cerámicas modificadas en la vida moderna.

¹ Se entiende por cerámicas convencionales a las cerámicas comúnmente comerciales en la alfarería mexicana, es decir, todas aquellas cerámicas que tienen o no un recubrimiento vítreo.

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos antiguos la humanidad ha estado en contacto directo con las cerámicas, desde el hombre de las cavernas quien vivía en cuevas y cazaba con pedernales de piedra u obsidiana, hasta el hombre moderno el cual vive en construcciones compuestas de una amplia variedad de materiales, en los que juegan un papel muy importante los materiales cerámicos tales como granito, piedra, ladrillos, etc.

Actualmente nos encontramos rodeados de materiales cerámicos muy sofisticados como lo son los empleados para recubrir transbordadores espaciales o los superconductores, sin embargo el uso de las cerámicas artesanales sigue siendo bastante frecuente en nuestras vidas cotidianas, más aún en países como el nuestro donde la cerámica artesanal forma parte de la cultura de la población.

La cultura del uso de cerámicas en México se remonta desde tiempos prehispánicos, en donde fue tal su importancia que se realizaron avances importantes que aún cuando se dejaron de utilizar en la colonia, hoy día pueden ser aprovechados en beneficio de los artesanos nacionales y las poblaciones rurales.

Este trabajo versa acerca del mejoramiento de las propiedades mecánicas de las cerámicas artesanales por medio de la utilización de técnicas basadas en descubrimientos arqueológicos en las zonas mayas del sureste del país. Los descubrimientos referidos indican la existencia de una tecnología consistente en rellenar los poros de las cerámicas con diferentes tipos de ceras, ya sean solas o combinadas.

Por la razón antes expuesta, la meta que se persiguió con la elaboración de este estudio fue no solo modificar las propiedades mecánicas de estos materiales, sino también el sugerir en base a los resultados obtenidos, las posibles aplicaciones de esta tecnología en la vida moderna de la sociedad.

Al finalizar el presente trabajo se obtuvo una tecnología que cumple con las expectativas planteadas. Ésta tecnología propone el uso de ceras naturales para dar un buen acabado superficial, conferirle características de impermeabilidad y un incremento de las propiedades mecánicas de las cerámicas artesanales, por medio de la inmersión del material en ceras fundidas hasta la saturación de éste.

Este estudio ofrece al lector una alternativa al uso del recubrimiento vítreo para artículos de cerámica empleados a temperatura ambiente (hasta 50°C), así como algunos posibles usos de esta propuesta tecnológica.

El trabajo está constituido de seis capítulos. En el *primero* se da un panorama general acerca del posible origen de las cerámicas y su probable función en la vida de los mayas, cabe mencionar que son ellos, el antecedente más inmediato de la tecnología propuesta.

En el *segundo capítulo* se hace una revisión de los conceptos generales partiendo desde los enlaces y estructuras de los materiales cerámicos, sus propiedades mecánicas hasta su proceso de fabricación, así como de la clasificación de las arcilla más empleadas en México.

En el *tercer capítulo* se explica la etapa de experimentación donde se da a conocer la forma en que fueron elaboradas las muestras y los resultados de los pruebas realizadas, su análisis e interpretación de resultados es presentado en el *cuarto capítulo*, en éste se realizan una serie de comparaciones entre los resultados obtenidos para cada tipo de probeta.

Finalmente en el *quinto capítulo*, se proponen algunas posibles aplicaciones de esta tecnología. Éstas se encuentran en varias áreas de la vida cotidiana. Al terminar, esto se concluye sobre el presente trabajo en el *sexto capítulo*.

I) ANTECEDENTES

1. Posible origen de las cerámicas.

No se sabe a ciencia cierta el origen de la cerámica pero, existen muchas teorías basadas en hallazgos arqueológicos concernientes a este respecto.

Una de estas teorías, la menos probable, refiere que el hombre durante las actividades de cacería, utilizó cortezas de arboles como mantas para dormir, pues aun no se las había ingeniado para construir albergues. Debido a las inclemencias del clima que en ocasiones padecía, recubrió dichas cortezas con arcillas² para que se hicieran impermeables. Se ha supuesto que durante alguna de estas tormentas, algún rayo cayó sobre la manta de corteza con arcilla y, la incendió siendo esto fundamental para caer en la cuenta de que con fuego, el lodo se convertía en una masa dura y resistente.

Otra de las teorías considera que durante la transición de la edad de la cacería y la edad de la agricultura, el hombre descubrió la forma de hacer canastos con hierba entretejida; de igual manera que en el caso anterior, para lograr que dichos canastos fueran impermeables, los forro con arcilla. Probablemente, al dejarlos muy cerca del fuego, la hierba exterior entretejida se fue quemando, la cual se podía retirar fácilmente conservando la forma original tejida, pero con un cierto grado de dureza.

Seguramente, este pudo haber sido el origen de las ollas de barro, pues se tienen vestigios de que dicha técnica (forrar los canastos con arcilla), se practicó en diversos países por cientos de años.

2. Las cerámicas en la vida de los mayas (técnica y tecnología).

La alfarería entre los mayas, siendo una de las más ricas de Mesoamérica, fue una de sus principales actividades, pues jugó un papel muy importante no solo en la vida cotidiana, en donde tuvo sus principales aplicaciones en la elaboración de juguetes, utensilios de cocina, herramientas de trabajo, etc., sino también en la fabricación de diferentes tipos de vasijas que

² Ver definición en el glosario, al final del presente trabajo.

utilizaban para llevar a cabo sus ritos; lo que se explicará con más detalle posteriormente.

Muchos de los vestigios de sus obras aún las podemos contemplar en las ruinas de las zonas en donde se asentaron así como, en diferentes museos nacionales y extranjeros.

La mayor parte de la alfarería Maya fue elaborada entre los años 2000 a.C. y 1525 d.C. Con las investigaciones realizadas hasta el momento, se ha logrado clasificar a esta cerámica en seis diferentes tipos, de acuerdo con las características de las arcillas con que fueron elaboradas, la temperatura de cocimiento y su ubicación geográfica, principalmente. Tales tipos son:

1. Cerámica de rocas ígneas (período posclásico).
2. Azul Maya (período no definido).
3. Pastas para mercadería (período terminal clásico).
4. Brillo policromo (período tardío clásico).
5. Vasijas con códigos de estilo (período tardío clásico).
6. Alfarería de Peten (período posclásico).

Las principales técnicas de fabricación y decoración se desarrollaron entre los periodos clásico y posclásico.

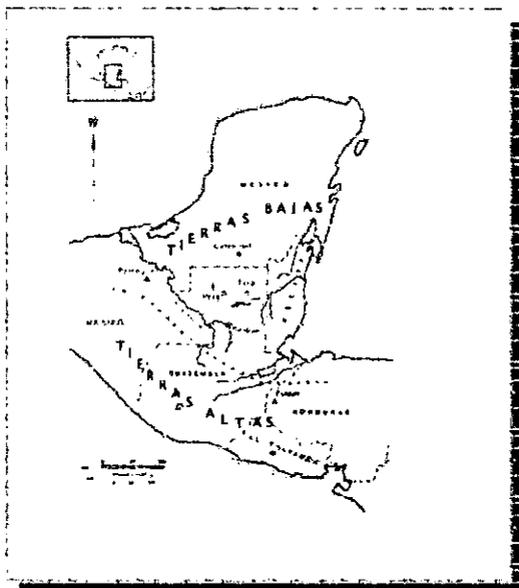


Figura 1. Zona de asentamiento de los mayas

a) Ubicación geográfica de los mayas

La civilización Maya se asentó en el sureste de Mesoamérica en los territorios correspondientes a la península de Yucatán, Quintana Roo, gran parte de Chiapas, Belice, Guatemala, el oeste de Honduras y el Salvador; dicha región se observa en la figura 1. Esta ubicación influyo de manera importante en el desarrollo de la alfarería maya.

Arqueológicamente ésta región se divide en dos grandes zonas: las tierras altas y las tierras bajas. El proceso de fabricación ciertamente es diferente entre ambas regiones.

b) Recursos para elaborar cerámicas.

Las tierras altas comprenden tres provincias: la costa del Pacífico, la provincia Volcánica y la Cordillera Central. De la zona del Pacífico a la provincia volcánica mide de 25 a 45km de ancho. La zona de la provincia volcánica a la Cordillera Central está compuesta de material ígneo metamórfico y sedimentos de roca blanda, desgastados por la excesiva erosión y el corte de los ríos Sarstun, Polochic y el Motagua que desembocan en el Caribe.

La provincia volcánica es una zona activa que tiene elevaciones promedio entre los 1000 a 3000m sobre el nivel del mar llegando hasta los 4200m. Los principales tipos de rocas en esta zona incluyen los basaltos³ y las adesitas; además, en algunas partes, el suelo está cubierto por flujo de lava; en la parte este de las tierras altas, se encuentran importantes cantidades de obsidiana⁴ que fueron económicamente importantes en la antigüedad.

A lo largo de esta área, se puede encontrar una gran variedad de barros que se utilizan en la fabricación de la alfarería local; algunos son extremadamente finos, otros son barros con colores muy definidos que contienen caolín⁵ y, minerales como montmorillonita⁶ y attapulgita. Algunos de estos barros son rojizos y cafés.

Todas estas arcillas son importantes hoy en día en la elaboración de jarras para agua, utensilios de cocina vidriados y no vidriados, así como ladrillos, tejas y otros elementos estructurales.

Algunos de los principales minerales que se utilizaban para decorar la alfarería son la hematita⁷, el cinabrio (HgS)⁸, azurita⁹ o malaquita¹⁰ azul, malaquita o piedra verde, y suaves cloratos o talcos¹¹ minerales, que actuaban como el teflón en los comales de tortillas.

En las tierras bajas, el ambiente presenta cambios no tan bruscos como en las tierras altas, por lo que los recursos utilizados para la fabricación de la alfarería son poco abundantes y diversos. Esta zona está constituida por piedra caliza que está compuesta a su vez por dolomita¹² y cal. Las elevaciones son menores a los 300m sobre el nivel del mar.

3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12. Ver definición en el glosario, al final del presente trabajo.

El sureste de Belice y las montañas Mayas están constituidas por sedimentos metamórficos, volcánicos e inclusiones de granito¹³. El río que divide las dos zonas es el Usumacinta. El barro de la zona contiene montmorillonita, attapulgita, poligosquita y muy posiblemente otras arenas y minerales¹⁴, tales como la magnetita para dar los colores blancos y rojos, por lo que los recursos de decoración de esta área son escasos.

Muchos de los materiales usados en la alfarería de las tierras bajas incluyendo la ceniza volcánica para el templado, el sulfuro rojo de mercurio y la hematita para los pigmentos, fueron traídos de las tierras bajas a las altas.

c) Función de la alfarería entre los mayas.

La alfarería maya fue muy empleada para elaborar utensilios en donde se pudiera almacenar, preparar y servir comida. Algunos de estos utensilios fueron jarras para agua; ollas para cocinar; una gran variedad de tazas de diferentes tamaños y formas; platos, algunos de ellos con tripode, para preparar y servir comidas; algunos tipos de vasos, en formas altas y cilíndricas. Durante el periodo posclásico, en los altos niveles sociales, se utilizaron mucho las vasijas para guardar entierros.

Tal como ya se mencionó, se utilizaban para preparar comidas y, algunos de los utensilios de mayor producción (y que hasta la fecha, la gran mayoría se siguen elaborando) fueron: vajillas completas de cocina, coladeras, comales, etc.

También se elaboraron un sin número de utensilios para ornamento y de uso religioso; entre estos últimos fueron muy populares los llamados incensarios, en donde no solo se quemaba incienso sino también copal. Muchos de ellos variaban en su forma y decorado de acuerdo con su uso y con la importancia de la ceremonia en donde se utilizaban; algunos eran decorados con figuras de animales y hombres, cada uno con un significado, que lo hacía más especial.

Asimismo, los mayas elaboraron figurillas, modelos y moldes para modelos, para la elaboración de armas y figuras ornamentales que se hacían con arcillas; algunos objetos como

^{13, 14.} Ver definición en el glosario, al final del presente trabajo.

las piedras para el huso, los contrapesos para las redes, las cuentas y pendientes, las hachas, las tapas para ollas o los tambores para rituales, eran elaborados con los restos de ollas rotas.

d) Tecnología de elaboración de las cerámicas.

Aunque los mayas tenían el concepto del cero, al igual que el resto de la alfarería de esa época, no utilizaron la rueda. Pero no por ello la técnica y en algunos casos la tecnología que aquellos mayas emplearon es obsoleta pues los mayas modernos y muchos de los alfareros de la zona, aún las siguen aplicando.

Una de las técnicas más empleadas para hacer vasijas consistía en colocar un plato redondo de madera en el suelo y sobre él, la arcilla; el alfarero se sentaba en el suelo, con los pies giraba muy despacio el plato mientras que con las manos, moldeaba el barro.

En ocasiones los mayas vitrificaban su alfarería, pero cuando no lo hacían, los cubrían o decoraban con un baño de esmalte compuesto de una arcilla más fina que la arcilla con la que elaboraban la pieza. Los principales colores que empleaban eran el rojo, el rojo-naranja, el negro y el beige o crema, los cuales se observan en la figura

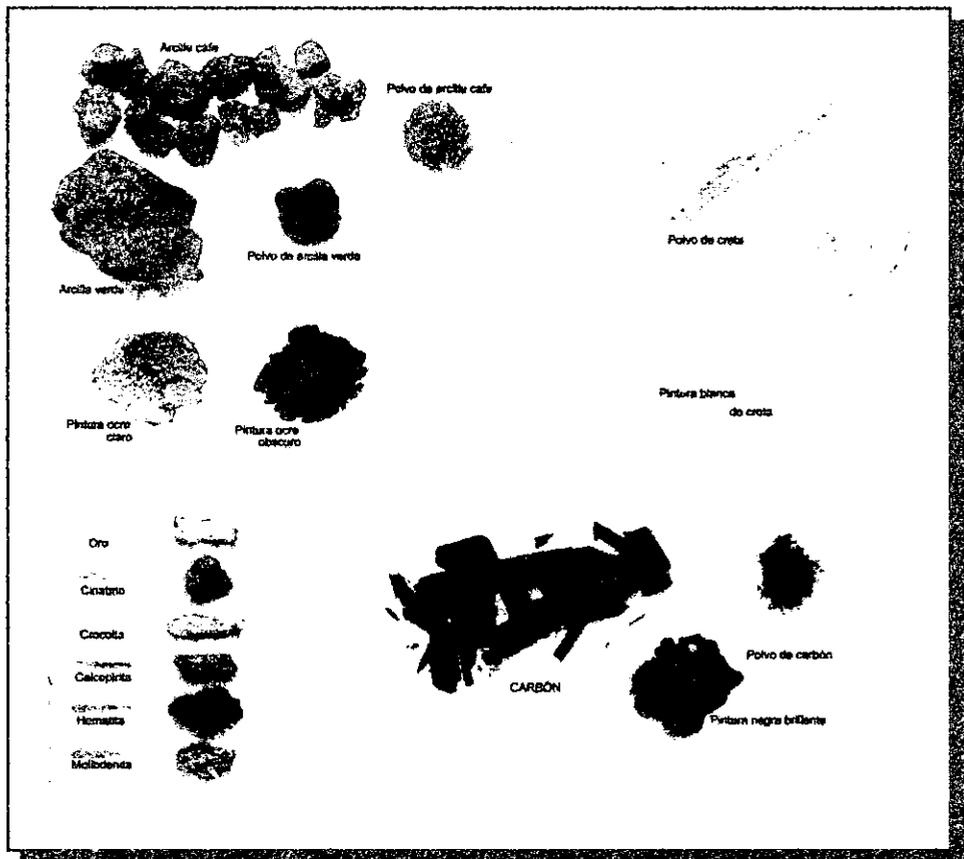


Figura 2. Materias primas utilizados por los mayas para elaborar pigmentos.

2 y en la figura 3 (ver página 6); estos eran tan buenos que muchas de las veces su calidad no tenía nada que pedirle a los recubrimientos actuales.

II) CERÁMICAS *(Conceptos generales y fabricación)*

Por la mañana el sol penetra a nuestra habitación a través de un cerámico (ventanas), al levantarnos e ir al baño nos reflejamos en un cerámico (espejo) y tenemos contacto con ellos (el excusado, el lavabo, etc.). Cuando tomamos el desayuno lo hacemos en cerámicos (vajilla); además, muchos de nuestros alimentos son elaborados en cerámicos y, por si fuera poco, la gran mayoría de nosotros vivimos en construcciones elaboradas con materiales cerámicos.

Estos son algunos de los ejemplos más claros de nuestro contacto con cerámicos; por ello son parte de nuestra vida cotidiana. Pero no solo son importantes para nosotros, ya que por sus propiedades físicas y mecánicas son muy interesantes para las diferentes ramas de desarrollo tecnológico, tales como la medicina, la ortodoncia, la electrónica, la manufactura, etc.

1. Enlaces y estructuras.

Las cerámicas son una familia muy especial ya que están formadas por elementos metálicos y no metálicos, por lo cual son más estables, químicamente hablando, que los componentes que las constituyen, es decir que los elementos metálicos y no metálicos son más estables, desde el punto de vista termodinámico, en forma combinada que libres pues poseen menor energía libre. Así por ejemplo es más común que los óxidos de materiales metálicos como FeO, ZnO y MgO, presenten menor energía libre que los correspondientes metales Fe, Zn y Mg.

Por otro lado, el que las cerámicas sean mucho más duras que las otras familias de materiales, se debe a que estos compuestos involucran coordinaciones atómicas más complejas, lo que ocasiona que haya una mayor resistencia al deslizamiento, por lo tanto, tienen una menor ductilidad, comparándolas con las otras familias.

Parte de esta familia, al igual que la de los metales, están constituidos por estructuras cristalinas, éstas contienen un pequeño número de electrones libres, lo cual se debe a que los electrones están compartidos en muchos casos en forma covalente con átomos adyacentes, o

bien, son transferidos de un átomo a otro, para producir un enlace iónico, tal como se muestra, en la figura 4:

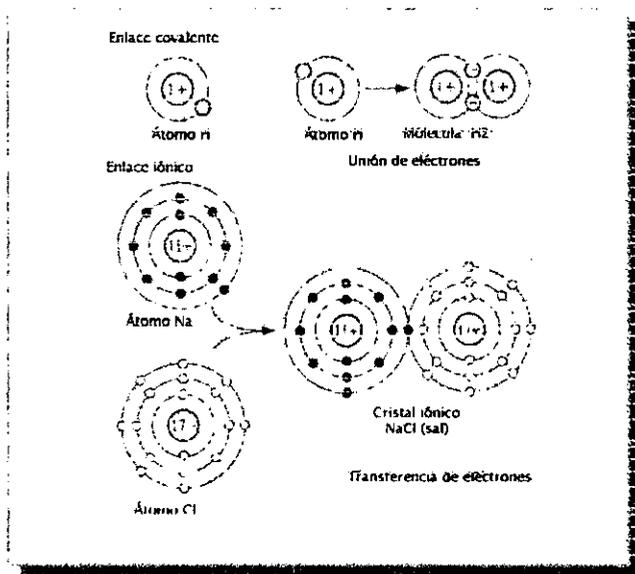


Figura 4. Enlace covalente e iónico

Estos tipos de enlace aparte de darle a los cerámicos una estabilidad relativamente alta, también les proporcionan una elevada temperatura de fusión. Como consecuencia del bajo número de electrones disponibles, estos materiales son malos conductores del calor y la electricidad; (aunque algunos de ellos, bajo ciertas condiciones, son capaces de actuar como superconductores a muy bajas temperaturas). De esta manera, tienen un especial comportamiento debido a sus propiedades térmicas, magnéticas, dieléctricas, semiconductoras o superconductoras, los cuales son muy difíciles de obtener de otras familias de materiales.

Las cerámicas también son ideales como abrasivos, debido a su alta dureza y resistencia al desgaste; asimismo, son muy apreciadas por su resistencia a las altas temperaturas y su bajo coeficiente de dilatación térmica lineal (muy cercano a cero).

Las propiedades de estos materiales pueden ser afectadas por su composición, fases presentes y su microestructura. Además, como los enlaces covalentes en los cerámicos se dan solo entre dos átomos, se puede dar lugar a propiedades direccionales o anisotrópicas; también se pueden presentar impurezas en solución sólida al igual que los metales, o bien, tener

múltiples fases en un cerámico, pudiéndose determinar los volúmenes relativos de las fases presentes por medio de diagramas de equilibrio al igual que en las aleaciones metálicas.

Sin embargo, la parte más importante desde el punto de vista de su aplicación, es su microestructura (figura 5). La cristalinidad o tamaño de grano afectará las propiedades, siendo mucho más resistentes, mecánicamente hablando, aquellos cerámicos con tamaño de grano fino, que los que poseen granos gruesos; de igual manera, la presencia de poros en los cerámicos cocidos reducirá la resistencia del material, por lo tanto, mientras mayor sea la porosidad, menor será la resistencia mecánica del material cerámico.

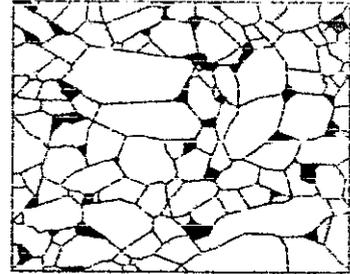


Figura 5. Microestructura de Al₂O₃ (X5000)

Generalmente, a los cerámicos no se les pueden aplicar tratamientos térmicos como el templado (con excepciones como el vidrio templado) para alterar la microestructura, por lo que es importante revisar factores como la porosidad, tamaño de grano y límites de composición con el fabricante de cerámica.

2. Propiedades mecánicas.

En los cerámicos no se usan habitualmente ensayos de tracción convencionales como en los plásticos y metales, debido a que los cerámicos no presentan esfuerzos de cedencia, ya que no existe prácticamente deformación plástica antes del esfuerzo de ruptura, además su deformación (elongación) elástica no es significativa por lo tanto, en esta familia no hay elongación ni reducción de área, lo cual les impide competir con metales y plásticos, sobre todo en el conformado de materiales a temperatura ambiente.

Uno de los ensayos que se utiliza para medir el comportamiento esfuerzo - deformación y módulo de rotura de las cerámicas frágiles, es el ensayo de flexión por tres puntos, que se comenta a continuación.

El objetivo del experimento es flexionar la barra como una viga simple hasta la fractura; para ello, se calcula el esfuerzo en las fibras exteriores al momento de la fractura y en base a esto se obtiene el máximo esfuerzo a la tensión del material, reportado normalmente como esfuerzo de flexión. Esto se muestra en la figura 6, en donde se muestra que "en el punto de aplicación de la carga, la superficie superior está sometida a un estado de compresión, mientras la superficie inferior está sometida a tracción"¹⁵.

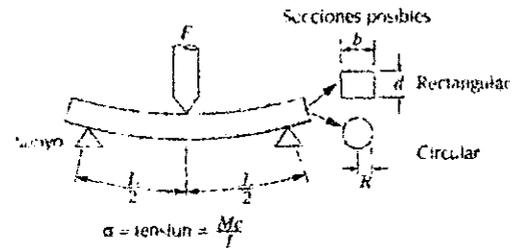


Figura 6. Sistema por flexión de tres puntos

El esfuerzo a la compresión de los cerámicos es mucho más alto al de los metales y plásticos (tal como se observa en la tabla 1); además, poseen una mayor dureza, lo cual permite su uso como herramientas para trabajo y les permite ser empleados también en componentes contra el desgaste, tales como los discos abrasivos y otras herramienta de corte.

Propiedades mecánicas	Cerámicas	Metales	Plásticos
Esfuerzo de fluencia [MPa]	No tienen fluencia	250 máx.	25 máx.
Esfuerzo de compresión [MPa]	600 máx.	400 máx.	40 máx.
Resistencia al impacto	Pobre	Pobre a excelente	Bueno
Dureza [Knoop]	Puede ser 2600	900 máx.	100 máx.
Esfuerzo de fractura	Excelente	Bueno	Pobre

Tabla 1. Comparación de propiedades mecánicas de diferentes familias de materiales¹⁶

Muchos de los materiales cerámicos que son frágiles, tienen una baja resistencia al impacto, esto es debido a sus uniones iónico - covalentes. Para poder estudiar esta propiedad, una de las pruebas de impacto utilizadas consiste en colocar una placa en una superficie rígida, la cual intenta ser penetrada por un proyectil a alta velocidad y éste lleva en su punta una filosa navaja para lograrlo.

Cuando las cerámicas se encuentran sometidas a esfuerzos de impacto por parte de un proyectil con alta velocidad, los estados de esfuerzo severos se encuentran muy cerca de la zona de impacto. Es en este momento cuando la cerámica experimenta una mayor fragmentación en la zona de contacto.

¹⁵Callister, William; Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales; Ed. Reverte; España; 1995.

¹⁶Engineering Materials (Properties and Selection); Kenneth G. Budinski, Ed. Prentice Hall; 5ª ed.; Columbus, Ohio; 1996.

Los cerámicos, a diferencia de los metales, tienen una baja densidad, un alto esfuerzo de compresión, una buena resistencia a las altas temperaturas y a los ambientes severos, y son buenos aislantes, generalmente; sin embargo, son extremadamente frágiles.

Sin embargo para que el proyectil pueda ejercer su acción penetradora es necesario que haga uso de una navaja, la cual se encuentra situada en la punta, esta se puede observar en la figura 7. En el momento en que el proyectil es disparado impacta con la navaja el material, y para que ésta pueda seguir avanzando en el interior de la cerámica, será necesario retirar los residuos producidos por el impacto (polvos), de otra manera, estos polvos se comprimirán y evitaran el paso de la navaja. Es así como los residuos de la superficie de la cerámica, juegan un papel muy importante en la resistencia a la penetración.

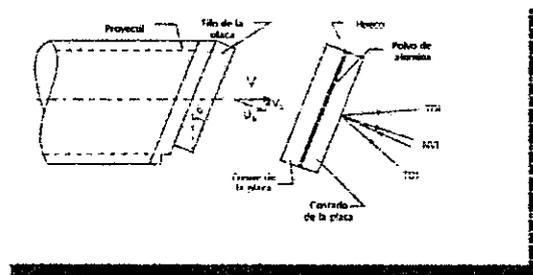


Figura 7. Placa de impacto

No obstante, esta prueba no es la única que se puede realizar para evaluar la resistencia al impacto de un cerámico, aunque es una de las más usuales.

Uno de los principales problemas que afecta a las propiedades de las cerámicas es la porosidad, pues a ella se le deben muchos de los defectos estructurales de este material.

La **porosidad** en las cerámicas es "el índice del volumen de todos los poros presentes en un material"¹⁷. Esta propiedad también establece la cantidad de gases y líquidos que son capaces de pasar a través de los poros de un cuerpo.

Existen dos tipos de porosidad, una es la *porosidad aparente* la cual se define como la relación entre el volumen del espacio de los poros y el volumen total de la pieza, ésta evalúa los poros abiertos, dichos poros no se encuentran aislados en el material por tanto, pueden ser

¹⁷Jastrzabski; Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería; 2ª ed; Ed. Interamericana; 1979; México, D.F.

penetrados por un fluido, lo cual trae como consecuencia que exista una permeabilidad¹⁸ en el cuerpo. La otra *porosidad* es la *real* la cual “representa el volumen de los poros abiertos y de los cerrados, en el volumen del cuerpo”¹⁹, estos últimos se encontrarían aislados por completo en el interior del cuerpo, por lo que el poro sería impermeable a líquidos o gases.

Debido a que las cerámicas artesanales se cocen a temperaturas menores a la de sinterización, la probabilidad de encontrar un poro cerrado es mínima, por lo cual los poros que tienen importancia para los fines de este estudio son los poros abiertos y, por ende la porosidad aparente.

La porosidad es una de las características básicas en las arcillas ya que, el volumen del espacio del poro, su tamaño y su forma, afectan a la densidad, los esfuerzos, la permeabilidad, el grado de resistencia al medio ambiente y la abrasión, la acción destructiva y el porcentaje de eflorescencia²⁰ de las sales solubles, así como la resistencia al choque térmico.

La arcilla experimenta un cambio en su porosidad a lo largo del proceso de cocción, pues cuando el agua es eliminada, los poros incrementan su tamaño, el cual puede variar en más de un 10% de su tamaño original.

De esta forma, al igual que los grandes intersticios en los metales, los poros en las cerámicas (figura 8) son concentradores de esfuerzos, así, cuando la tensión en uno de los poros llega a un valor crítico, se forma una grieta la cual se propaga fácilmente ya que en estos materiales, a diferencia de los metales

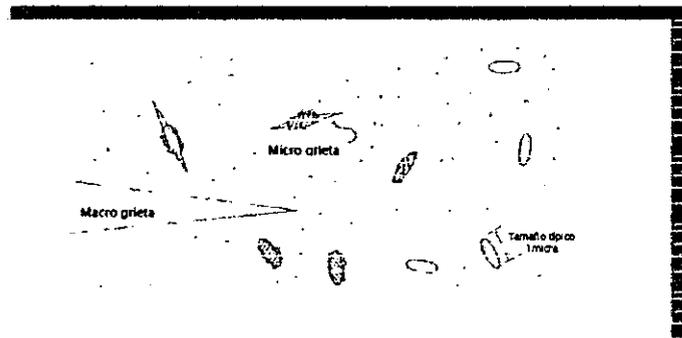


Figura 8. Fracturas en matriz de ZrO_2

dúctiles, no existen procesos que absorban la energía durante la deformación. Además, estos poros disminuyen el esfuerzo de compresión que el material puede soportar.

¹⁸La permeabilidad se evalúa en los cuerpos porosos, y es la propiedad que permite a los fluidos penetrar a través de los poros del material, bajo un gradiente de presión.

¹⁹Jastrzabski; Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería; 2ª ed; Ed. Interamericana; 1979; México, D.F.

²⁰Eflorescencia se refiere a la pulverización de los cristales al aire libre.

Sin embargo cuando las cerámicas tienen un tamaño de grano grande y uniforme tenderán a tener mayor cantidad de poros en comparación con aquellas cerámicas que tengan diferentes tamaños de granos, pues los espacios que existan entre los granos grandes serán ocupados por granos pequeños, evitando con ello la acumulación de esfuerzos.

La porosidad se puede determinar experimentalmente a través de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Sf - Wf}{Vf} \gamma_{H_2O} \times 100$$

Ecuación 1

P = Porcentaje aparente de porosidad

Sf = Peso de la pieza saturada de humedad (g)

Wf = Peso de la pieza seca (g)

Vf = Volumen de pieza sometida a cocción (cm³)

γ_{H_2O} = Peso específico del agua (cm³/g)

La aplicación de esta fórmula, se podrá observar con mayor detalle en el siguiente capítulo.

3. Proceso de fabricación de los cerámicos a nivel artesanal

En el mundo de los productores de cerámicas artesanales, muchas veces se tienden a confundir los términos cerámica, porcelana y loza, principalmente, pues se considera que estos últimos son más o menos finos que la cerámica. Esto en realidad no es así, pues se considera como *cerámica todo aquel objeto que tenga a la arcilla como materia prima principal*, por lo que comprende no solo cacharros de barro, como muchas veces se le ha considerado, sino también porcelana, loza, loza fina, ladrillos, tejas, etc.

La palabra cerámica es de origen griego, proviene del vocablo *keramike* que significa “cosa quemada”, éste a su vez se deriva del griego *keramos* que significa “arcilla”.

De esta manera, se le conoce como productos cerámicos a todos aquellos objetos elaborados con materias arcillosas y consolidados por la acción del calor.

El proceso de fabricación de las cerámicas artesanales comprende fundamentalmente los siguientes procesos:

a) Preparación de la pasta cerámica.

Para llevar a cabo la fabricación de un artículo de cerámica, se requiere ante todo la preparación de la pasta cerámica. Para ello, las materias primas utilizadas deben pulverizarse hasta tamaños regulares; si se requiere, se puede utilizar un mortero; después se colocarán en un recipiente o cubo.

A continuación se les agregará agua hasta cubrirlos, para con ello lograr que la arcilla llegue al estado plástico, a lo que comúnmente se le conoce como “papilla”.

Después de aproximadamente un día, se podrá decantar el agua y extraer la papilla obtenida, la cual se colocará entre placas de yeso con el objeto de poder absorber su humedad. La arcilla se retirará una vez obtenida la “dureza de cuero”²¹ requerida. Así se podrá almacenar en bolsas de plástico para su uso posterior.

²¹También es llamada cuero duro y su contraparte cuero blando, para más información consultar el anexo.

Las propiedades del producto cerámico a realizar dependen básicamente de los materiales que se adicionan en la elaboración de la pasta y de la adecuada eliminación de las impurezas en las etapas siguientes.

b) Amasado y aplastado.

Para poder moldear la arcilla obtenida del proceso anterior, es necesario que se dé un amasado y aplastado hasta lograr la “dureza de cuero” requerida.

Esta etapa es sumamente importante pues es necesario eliminar las burbujas de aire que se encuentran atrapadas en la pasta de arcilla; la principal finalidad de esta etapa es evitar el agrietamiento o ruptura posterior del objeto.

La forma más común de amasar y aplastar es la que se realiza de manera muy similar a la del panadero. El método del “panadero” consiste en colocar la pasta cerámica en forma de un pan alargado que se coloca sobre la mesa en posición perpendicular a la persona. Se empieza a doblar por el extremo más alejado de la arcilla hacia uno mismo, utilizando el peso del cuerpo para doblarla. Una vez doblada y enrollada, la pasta debe tener la misma forma de pan alargado pero de manera horizontal a uno, de tal manera que se gira 90° y se repite el proceso hasta que la arcilla no tenga burbujas de aire.

Para verificar que la arcilla ya no contiene aire, se procede a partir la pieza con hilo cortante y de manera diagonal; si la pasta presenta burbujas de aire en el interior se deberá continuar con el método de “panadero” hasta que dichas burbujas sean eliminadas. Si ya no las presenta, se puede proceder a la siguiente etapa o bien, se podrá guardar la pasta en bolsas de plástico para que no pierda humedad.

La pasta así almacenada puede durar algunos meses, aunque es recomendable volver a amasar la arcilla antes de emplearla.

c) Moldeado.

Una vez lograda la dureza de cuero requerida, se moldea la pieza deseada, sin olvidar que una vez conformada ésta debe tener suficiente resistencia mecánica para permanecer intacta durante el proceso de transporte, secado y cocción; para ello, se utilizan diversas técnicas. A continuación se mencionan algunas de las más comúnmente empleadas.

♦ **Torneado con rueda de alfarero.** Se emplea a nivel de fabricación artesanal. Posiblemente esta es una de las técnicas mecánicas más antiguas usadas por el hombre para trabajar la arcilla, puesto que ya los egipcios y griegos la practicaban. En aquellos tiempos, la rueda consistía en una roca plana que se hacía girar sobre otra roca con una mano, mientras que la otra daba forma a la arcilla. Actualmente, el disco de piedra se ha sustituido por uno de madera, el cual es puesto en movimiento por un pedal o un motor eléctrico. Este método es muy utilizado en la fabricación de ollas, jarras y jarrones, floreros, platos (hondos y extendidos), tazones, cántaros, botellas, etc., debido a que la alfarería torneada siempre es simétrica respecto a su eje vertical y circular en su sección horizontal (figura 9).



Figura 9. Alfarero

La consistencia de la arcilla para torneado debe ser un poco más dura que la arcilla que se utiliza para modelado a mano, esto con la finalidad de fijar y soldar evitando así que la fuerza centrífuga del torneado combe o aplaste la pieza; además el torneado requiere mucha más agua que el moldeado para llevar a cabo la conformación de la pieza deseada.

El proceso en general se puede referir de la siguiente manera:

- i. Se puede o no utilizar una batea para tornear. Si es así, la batea se coloca sobre el disco; la ventaja de su empleo es que permite que una vez terminada la pieza, el disco quede listo para su utilización inmediata.
- ii. La arcilla de tornear debe ser ligeramente golpeada hasta formar una "bola", ésta se debe azotar con fuerza en el centro de la batea.
- iii. En este momento se pone la rueda en movimiento, las manos se mojan y comienza a abrirse la arcilla en el centro con los pulgares hasta que se ensancha el agujero para

que quepa la mano. Poco a poco la arcilla se va presionando con las manos, el proceso termina cuando se le da la forma deseada a la arcilla. Este proceso en si, no solo conlleva el arte de moldear, sino también el de mantener un equilibrio tanto físico como mental, pues mientras se tornea la pieza que se debe tener ya grabada en el cerebro, se requiere una coordinación sin esfuerzo de manos y pies (esto último, si se utiliza un torno con pedal).

- iv. Las paredes de la arcilla se levantan suavemente con las puntas de los dedos. Se requiere subir varias veces la arcilla; en esta forma para lograr la conformación y el espesor de las paredes deseado, lo que puede verificarse con una aguja.
- v. Durante el proceso de torneado se debe cuidar el no presionar demasiado o hacer un movimiento brusco sobre la arcilla, pues con esto se le puede aplastar e inclusive romperla, destruyendo así el trabajo realizado.
- vi. Cada vez que se considere conveniente, debe pasarse una esponja mojada y suave en la parte exterior para eliminar las huellas de los dedos.
- vii. Una vez terminada la pieza, se debe poner a secar en la batea, para evitar un secado demasiado rápido, la pieza se envuelve en una bolsa de plástico o con un lienzo húmedo.
- viii. En el momento en que la pieza ya se ha secado, se puede desprender de la batea cortándola con un alambre sumamente fino para no dañarla.
- ix. Finalmente se le da una última pasada con la esponja húmeda (siempre que se considere necesario), así como también se inscriben en el fondo de la pieza la marca del alfarero y la fecha de elaboración.

- ♦ **Conformación hidroplástica.** Tal como ya se mencionó, una vez que la arcilla se mezcla con agua alcanza un estado de alta plasticidad y por tanto de flexibilidad, por lo cual puede ser moldeada fácilmente y sin fisuras; sin embargo, tiene una baja resistencia a la tracción.

La técnica de mayor uso en este proceso es la extrusión, "en la cual una masa espesa de cerámica es forzada a través del orificio de una matriz que tiene la geometría de la sección deseada"²²; esto es muy similar a la extrusión de metales, sin embargo

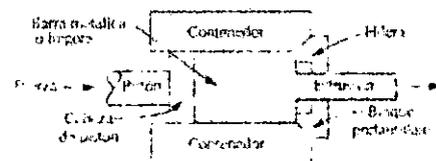


Figura 10. Proceso de extrusión

²²Callister, William; Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales; Ed. Reverte; España; 1995.

el aire es extraído de la matriz por una cámara de vacío para aumentar la densidad y a su vez evitar la formación de fisuras en el interior del material. La conformación hidrolástica se emplea en la fabricación de ladrillos, tuberías, bloques cerámicos y azulejos.

♦ **Moldeo por barbotina**²³. Una vez preparada la papilla, se vierte en un molde poroso (generalmente hecho de yeso), en este momento se puede conformar de dos formas:

ii. **Moldeo macizo**. En este proceso el agua de la suspensión de arcilla es absorbida por el molde, dejando una capa sólida en las paredes del molde. El proceso puede continuar hasta que la cavidad está completamente sólida tal como se muestra en la figura 11.

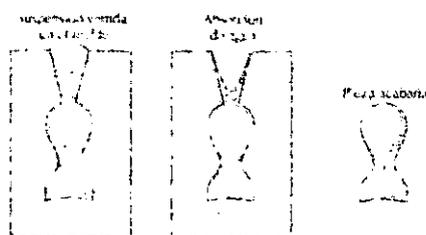


Figura 11. Moldeo macizo

ii. **Moldeo por vaciado**. De igual manera que en el proceso anterior, la suspensión de arcilla se vierte en el molde, pero el proceso termina cuando la capa de las paredes alcanza el espesor requerido. En ese momento, se invierte el molde y se vierte el exceso de suspensión; este proceso se puede observar en la figura 12.

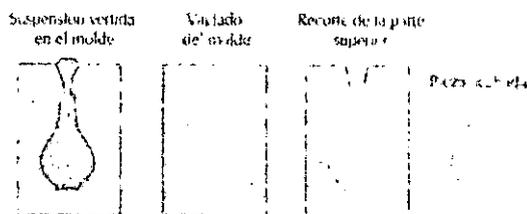


Figura 12. Moldeo por vaciado

En ambos procesos, conforme se va secando la pieza, ésta se contrae y se despegar de las paredes del molde. En este momento, la pieza conformada se puede retirar del molde.

²³Se entiende por barbotina un procedimiento de decoración de la cerámica.

d) Secado.

Esta es una etapa muy importante y es sumamente necesario llevarla a cabo antes de la cocción; en ésta se busca eliminar completamente el agua que se utilizó para conformar el artículo cerámico, con la finalidad de evitar fracturas ocasionadas por el cambio de fase agua-vapor durante la cocción.

Conforme el artículo cerámico se va secando experimenta contracción debida a la pérdida de agua.

Tal como se observa en la figura 13 de la página 19, en un inicio, las partículas de arcilla se encuentran rodeadas de una delgada película de agua; conforme el secado avanza la cantidad de agua va disminuyendo, por tanto, las partículas se van uniendo cada vez más. Este fenómeno es conocido como contracción y se le puede observar, la mayoría de las veces, a simple vista (esto depende del tamaño de la pieza cerámica).

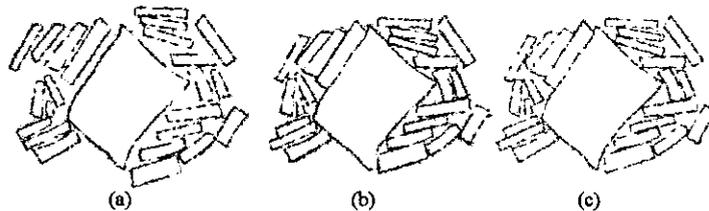


Figura 13. Etapas del secado: a) Pieza húmeda, b) Cuerpo parcialmente seco, c) Cuerpo totalmente seco

Durante el proceso de secado, el control de la velocidad de eliminación de agua puede resultar crítico si esta es muy rápida; el secado del interior de la pieza cerámica se realiza por difusión de moléculas de agua hasta la superficie. En este momento, ocurre la evaporación. Ahora bien, si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de difusión, la superficie se secará más rápidamente que el interior y por tanto encogerá, pudiendo ocasionar deformación y grietas en la pieza cerámica.

Por tanto, se debe procurar que la velocidad de evaporación superficial sea, cuando más, igual a la velocidad de difusión del agua; un adecuado manejo de la temperatura, la humedad y la velocidad del flujo de aire sobre la pieza cerámica, puede ayudar a controlar la velocidad de evaporación superficial en ella.

A continuación se presentan algunos otros factores que más comúnmente producen la contracción:

- i. El *espesor del cuerpo* es un factor muy importante, ya que en las piezas cerámicas de gran espesor es más probable que se presente la contracción no uniforme y la formación de defectos, que en piezas delgadas.
- ii. El *contenido de agua en la pieza cerámica* puede resultar un factor crítico, pues mientras mayor es este contenido, se tiene una mayor contracción; por dicha razón se debe intentar minimizarlo tanto como sea posible.
- iii. El *tamaño de la partícula de arcilla* es decisivo para producir la contracción, pues mientras más pequeño es el tamaño de la partícula, la contracción puede ser mayor; es por ello que para contrarrestar este efecto y aumentar el tamaño de la partícula, se adicionan materiales no plásticos con partículas relativamente grandes.

e) Cocción.

Este proceso se realiza después del secado, pues de otra forma, el exceso de agua en el interior de la pieza cerámica produciría fracturas e inclusive la destrucción del material, debido a que la velocidad de evaporación superficial sería mayor que la velocidad de difusión del agua.

Durante este proceso se calientan los cuerpos cerámicos crudos removiendo así los últimos rasgos de agua, eliminando las impurezas no deseadas y confiriéndoles características de dureza y resistencia a la deformación.

Muchas de las cerámicas artesanales en México suelen someterse a un proceso de cocción que varía entre los 500°C y los 700°C. En este rango de temperatura, los constituyentes orgánicos de las cerámicas se carbonizan, dando lugar a productos volátiles que causan hinchazón en el producto, ocasionando deformación y una baja calidad en la piezas cerámicas.

Debido a la carbonización que se da en la etapa anterior (la cual genera impurezas tales como el CO₂) y la expulsión de agua, la porosidad alcanza su máximo entre los 800°C y 900°C;

sin embargo para eliminar el CO₂ de la pieza cerámica es necesario exponerla a periodos prolongados de calentamiento, evitando así problemas de hinchazón.

Por otro lado, los cuerpos cerámicos a nivel industrial, son cocidos entre los 900°C y 1400°C. Sin embargo, la temperatura a que se lleve la pieza cerámica dependerá de la composición que esta contenga y de las propiedades que se le quieran conferir a este material, ya que, durante el proceso de cocción, la porosidad disminuye y por tanto, la densidad de la pieza aumenta, mejorando con ello su resistencia mecánica.

Este aumento de densidad se debe al fenómeno de vitrificación, ésta se manifiesta en el momento en que las piezas cerámicas son calentadas a elevadas temperaturas. La vitrificación consiste en la "formación gradual de un vidrio líquido que fluye hacia los poros y en parte llena su volumen. El grado de vitrificación depende de la temperatura de cocción y del tiempo, así como de la composición del cuerpo"²⁴. La temperatura de vitrificación puede bajarse gracias a la adición de materiales fundentes en la arcilla, tales como los feldespatos.

Una vez que se ha alcanzado la fase líquida durante la vitrificación, este vidrio líquido comienza a fluir alrededor de las partículas no fundidas, llenando así los poros gracias a las fuerzas de tensión superficial, por lo cual también durante este proceso la pieza se contrae.

Cuando la pieza cerámica se encuentra fría, solo queda una matriz vítrea y, tal como ya se mencionó, solo queda un cuerpo fuerte y denso, por lo que la estructura final de la cerámica está constituida de la matriz vitrificada más partículas de cuarzo que no reaccionaron y, dependiendo de la temperatura, una cierta porosidad.

Este proceso de vitrificación es importante para determinar propiedades tales como: resistencia, durabilidad y densidad en las cerámicas a temperatura ambiente; dichas propiedades son mayores conforme el grado de vitrificación aumenta.

Por ello, se puede concluir que la temperatura de cocción determina el grado de vitrificación es decir, "la vitrificación aumenta a medida que se incrementa la temperatura de cocción".

²⁴Callister, William; Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales; Ed. Reverte; España; 1995.

f) Barnizado.

El barniz es una capa parecida al vidrio que se funde a la pieza de arcilla; se utiliza para obtener una superficie lisa, decorativa e impermeable.

Se compone de alúmina, sílice, fundentes y colorantes. Dependiendo del tipo de barniz, se aplica a los objetos sin cocer o a los ya cocidos en donde, mediante un segundo proceso de cocción, se vitrifica la superficie.

Para lograr lo anterior, se emplean vidrios de bajo punto de fusión en forma de materiales finamente pulverizados y amasados con agua. Para su realización, se debe considerar lo siguiente:

- "No se deben adicionar compuestos solubles que pudieran difundirse a través de la pasta cerámica.
- La composición del barniz debe ser cuidadosamente analizada con el fin de obtener recubrimientos con características semejantes a las de la pieza cerámica; además, los coeficientes de dilatación deben ser semejantes para evitar cuarteaduras"²⁵.

Además, los barnices brindan a los objetos cerámicos impermeabilidad, facilidad para limpiarlos, mayor resistencia, baja conductividad eléctrica, pero sobre todo mayor colorido y valor estético.

g) Decoración.

Algunas de las técnicas más usuales para decorar la cerámica en forma impresa a nivel artesanal utilizan el decorado con stencil, pintura de limo, jeringa, en relieve, tallado, pulido, etc.

Sin embargo, son muy utilizados también los métodos industriales para el decorado. La principal finalidad de éstos, es producir de manera rápida y fácil trabajos idénticos al por mayor; con técnicas como calcomanías, sellos de goma, estampado con marcos, etc., no se necesita ser un gran artista para realizarlos, solo se requiere ser cuidadoso, exacto y concienzudo en el trabajo.

²⁵Iturriaga García, José R.; Tesis: Aplicación de materiales cerámicos en la industria; Universidad Iberoamericana; México; 1981.

También se utilizan pigmentos formados por óxidos metálicos y aceites como uniones. La decoración puede realizarse antes o después de la cocción; los pigmentos se aplican con pinceles, litografía, etc.

En la fabricación de cerámicas avanzadas, se realiza un control muy estricto en cada etapa, empleando procesos de síntesis y caracterización para lograr productos de alto desempeño.

4. Definición y clasificación de las arcillas más empleadas en México.

La arcilla es una roca ígnea e inorgánica²⁶, descompuesta por el calor y la presión de la acción volcánica, la cual se ha expuesto, por cientos de años, a la acción de la intemperie, convirtiéndose finalmente en una roca sedimentaria.

Esta roca, tiene su origen en las rocas feldespáticas⁹ (rocas que contienen feldespato). La acción del sol, el viento, la lluvia, el aire y el agua, rompen esas rocas en partículas cada vez más pequeñas que son transportadas por inundaciones y depositadas en lagos, campos, pantanos y lagunas.

Muchos de los depósitos de arcilla se han encontrado en las márgenes empinadas de los ríos y en las laderas de las montañas; dichos depósitos han sido descubiertos gracias a los cambios que ha sufrido la corteza terrestre con el transcurrir de los años.

La arcilla se compone esencialmente de silicato de aluminio hidratado, el cual se encuentra en un estado plástico cuando la arcilla está lo suficientemente pulverizada y humedecida, pero es muy rígido cuando está seca. También es vítreo cuando se calcina a altas temperaturas.

Algunos de los principales compuestos de las arcillas en México, se pueden observar en la siguiente tabla. De las arcillas que se muestran, las primeras cuatro provienen de la región de Oaxaca, la quinta muestra pertenece a la región de Tomatlán en Jalisco. Las muestras "fueron

²⁶Ver definición en el glosario, al final del presente trabajo.

secadas a 110°C durante cinco horas. Posteriormente se analizaron por difracción de rayos X²⁷ para encontrar la siguiente composición:

Arcillas de Oaxaca, Oaxaca						
	Montmorillonita	Feldespatos	Cuarzo	Mica	Calcita	Hematita
1	a	r	a	-	r	-
2	a	a	a	-	r	m
3	a	m	a	m	a	m
4	a	m	a	-	a	-

Arcillas de Tomatlán, Jalisco					
	Feldespatos	Caolinita	Cuarzo	Mica	Hematita
5	a	a	a	m	m

Donde:

a = abundante > 30%

r = regular o mediana > 15% y < 30%

m = menor > 5% y < 15%

Tabla 2. Composición de arcillas mexicanas²⁴.

a) Tipos de arcillas

- i. **Con alto contenido de Caolín.** Es el principal ingrediente de las arcillas usadas en la manufactura de utensilios de cerámica blanca. El caolín es la más pura de las arcillas, lo cual explica su blancura después del quemado.

Su composición química es aproximadamente: 39.5% alúmina, 46.56% sílice y 13.95% agua. El caolín se encuentra en varias partes del mundo, mostrando diferentes grados de pureza. Debido a su relativa pureza es más refractario que otras arcillas; tiene un punto de fusión de aproximadamente 1800°C. En su forma cruda, es generalmente blanco o muy pálido. Si se usa solo no es suficientemente plástico para la producción de utensilios blancos, sin embargo, en un cuerpo se le considera como un ingrediente plástico.

²⁷Datos tomados de "La espectroscopía Mössbauer y su aplicación en arqueología"; Sergio Aburto, S. Cruz, et.al.; Colecc. Antropología y técnica; Vol. 1; Ed. UNAM; México; 1981.

- ii. **Arcillas superficiales.** Estas son las arcillas que más abundan en el mundo, pues son las que se encuentran en la superficie de la tierra, o muy cercanas a ella.

En su estado natural pueden ser rojas, cafés, amarillas, verdes, azules o negras. Después de la cocción toman una tonalidad roja o café - rojizo. Mientras más elevada es la temperatura de cocción, más oscuro será el color.

Son muy plásticas, tanto que en ocasiones es necesario agregarles arena, lodo o arcillas más gruesas, para poderlas manejar. Estas arcillas endurecen a una temperatura aproximada de 700 a 900°C.

Fueron muy usadas por los primeros alfareros y aun se utilizan para hacer ollas de cocina, macetas, estufas, hornos, tabiques, azulejos y alfarería artística.

b) Principales componentes mineralógicos de la arcilla.

- i. **Sílice.** Es uno de los principales ingredientes en muchos materiales cerámicos y debido a sus funciones en el cuerpo arcilloso y en los barnices, es uno de los más importantes. Industrialmente es llamado pedernal.

Se suaviza antes de fundirse, lo cual permite moldearlo. Después de fundido y enfriado, forma un vidrio transparente que resiste al choque térmico. Tiene la cualidad de aumentar su volumen cuando se funde, por lo que ayuda a controlar la contracción. Aumenta también la porosidad y da rigidez a la arcilla húmeda, lo que le permite retener su forma al ser moldeada. Esta se encuentra generalmente en forma de roca, piedra o arena. En esta última forma, es de color blanco puro.

- ii. **Cuarzo.** Es una roca silicosa, es decir SiO_2 , que puede encontrarse en colores: negra, roja, amarilla, verde, morada, etc., en la naturaleza. Es la forma más densa de la sílice; su dureza la identifica, pues puede rayar el vidrio. Además, es muy resistente a los cambios físicos y químicos.

- iii. **Feldespatos.** Son los materiales fundentes más comunes dentro de la familia de las arcillas. Se pueden encontrar en forma de rocas cristalinas y rara vez, en forma pura; sus principales colores son: rosa, blanco, crema, verdes, etc. Se funden entre los 1100°C y 1500°C.

Existen diferentes tipos de feldespatos, por ejemplo el feldespato de ortoclasa es conocido por los alfareros como potasio o potasio de feldespato. Este se encuentra en el granito cuya composición aproximada es: 60% potasio de feldespato, 30% sílice y 10% de otros minerales.

c) Cenizas

Generalmente se obtienen de los materiales orgánicos vegetales y son muy valiosas por estar compuestas totalmente de minerales. Usualmente contienen calcio, magnesio, potasa, sílice, alúmina, ácido fosfórico y diversos colorantes, como el hierro.

En el caso de los mayas, las cenizas que se han encontrado en las pruebas realizadas a fragmentos arqueológicos, son de tipo volcánico. Este tipo de cenizas proporcionan características mecánicas muy especiales a la cerámica maya, debido a que en su estructura se ha encontrado vidrio volcánico, sobre todo en Chichén Itzá y Oxkintok.

Las principales funciones del vidrio volcánico, son por un lado proporcionar una distribución regular de grumos arcillosos, y por el otro incorporarlas a la arcilla como desgrasante. Además, para la antropología, el hecho de que la cerámica mostrara la presencia de vidrio volcánico, fue muy importante ya que les permitió determinar que su producción y manufactura fue local.

El sitio de abastecimiento de estas cenizas aun no se ha podido localizar, pues no son cenizas propias de la península de Yucatán; sobre esto se tienen dos teorías, la primera se piensa que se importaron las cenizas de algún sitio del sureste y, la segunda es que tal vez las obtenían de algún cenote o algún otro sitio especial de la región que hasta la fecha no ha sido localizado.

Los chinos también utilizaron las cenizas pero de los huesos humanos por tener un 85% de fosfato de calcio, carbonato de calcio, fosfato de magnesio y otros minerales, para darle una mayor blancura y translucidez a su porcelana, esto, sin olvidar el importante papel que tuvieron los feldespatos para ello.

III) EXPERIMENTACIÓN

En ocasiones, cuando los arqueólogos se enfrentan a la difícil tarea de buscar vestigios de nuestro pasado, son presa de la excitación ante lo nuevo y lo desconocido a que se enfrentan, pero cuando logran encontrar aquello que puede darles nuevas pistas para conocer un poco más acerca de ese pasado, tan afanosamente buscado, se dan cuenta que los fragmentos de los materiales encontrados son sumamente pequeños, lo cual dificulta la labor de estos hombres y mujeres de ciencia para caracterizar dichos materiales.

Este es uno de los principales problemas a que se enfrenta todo aquel que desea conocer las propiedades de diversos materiales que pueden ser encontrados en cualquier sitio arqueológico, pues muchas de las veces, los fragmentos encontrados son los vestigios de lo que en esos lugares acontecía y sobre todo de los tipos de técnicas y tecnologías que empleaban. Esto último es importante para la ingeniería ya que representa el desarrollo tecnológico de ese momento, además, puede permitirnos emplearlas para nuevos fines o bien reutilizarlas de acuerdo al fin con que fueron creadas.

En este caso, lo que se busca es reproducir las características de las cerámicas tipo maya, descubrir el porque de su modificación mediante la inmersión del barro en cera y determinar si con esto último se modifican y en que medida, sus propiedades mecánicas.

1. Normas para la elaboración de las probetas

Las pruebas más comúnmente empleadas para evaluar las propiedades mecánicas de la mayoría de los materiales son las destructivas, tales como la de tracción - compresión, flexión, impacto, fatiga y dureza; pero también existen para conocer otros comportamientos del material, como lo son la resistencia del material a un cierto tipo de medio ambiente y la porosidad.

En función de los alcances de este estudio, se realizaron pruebas de compresión, impacto y porosidad de las cerámicas, como medida de evaluación de las modificaciones que se consiguen cuando las cerámicas se impregnan en ceras fundidas.

a) Compresión

Esta prueba se realiza aplicando una carga axial a la probeta hasta la fractura, con la finalidad de conocer su resistencia a la compresión. Para poder llevarla a cabo se requiere que las probetas tengan ciertas características así como seguir ciertos procedimientos con el objeto de asegurar una validez en la comparación de datos, todo esto se encuentra referido en normas como las emitidas por la ASTM y las Normas Mexicanas (NOM), estas últimas publicadas por la Dirección General de Normas (DGN).

La norma ASTM: C 773 - 88 (año: 1993), se refiere al "Método de Prueba Standard para Resistencia a la *Compresión* de Materiales Cerámicos Cocidos". Esta norma se encuentra referida en el anexo, por lo que en esta parte solo se mencionarán los puntos más importantes que se tomaron en cuenta para la elaboración de las probetas y la realización de las pruebas.

Tal como se puede observar en el anexo, existen dos tipos de métodos para esta prueba, de los cuales se escogió el método A.

Es importante mencionar que con fines de comparación, no se siguió la norma tal como se especifica debido a que las muestras de piezas cerámicas encontradas en las ruinas mayas, de donde se sacan parte de las probetas, son muy pequeñas, por lo cual es prácticamente imposible realizar las probetas de las dimensiones marcadas en la norma, y por ende es necesario que aquellas probetas que se realicen posteriormente sean de iguales dimensiones.

Asimismo, se buscó que los ajustes realizados al tamaño de las probetas correspondieran a la carga aplicada. Todos estos cálculos ya fueron realizados previamente en el Instituto de Investigaciones Antropológicas (IIA), por lo que en esta parte solo referiremos los valores determinados por ellos.

Ahora bien, las cerámicas estudiadas no son cerámicas de alta resistencia, por lo cual se siguieron parte de las especificaciones del método A. Esto se determinó hace algunos años en el IIA haciendo pruebas a diversos materiales, concluyendo que debido a la baja

resistencia de estas cerámicas este método era el más adecuado, lo cual se refleja posteriormente en los resultados arrojados por las cerámicas para esta prueba.

El equipo empleado para realizar esta prueba fue una máquina INSTRON existente en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, la cual cumple con los requerimientos marcados por esta norma.

Las probetas utilizadas fueron cilindros rectos cocidos a temperaturas de 700°C y 800°C, cuyas caras eran paralelas, dicho ajuste se realizó por medio de dos platinas paralelas. De acuerdo con las especificaciones establecidas por el Instituto de Investigaciones Antropológicas (IIA), las probetas deben elaborarse bajo el siguiente criterio "la dimensión de la altura debe ser del orden del doble de la dimensión del diámetro", es decir, si una probeta tiene un centímetro de diámetro su altura será de dos centímetros. Las dimensiones usadas en este trabajo se muestran en el siguiente diagrama:

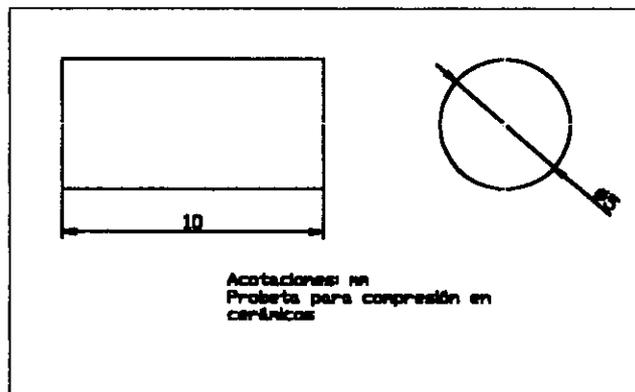


Figura 14. Probeta experimental de compresión

Antes de realizar la prueba, las probetas se limpiaron con alcohol y se retiraron las que mostraron defectos superficiales. El procedimiento de esta prueba se podrá observar con mayor detalle en la parte de caracterización.

b) Impacto

Consiste en proporcionar a la muestra de material una energía pulsada, es decir que la energía será entregada en un lapso de tiempo muy corto, pudiendo ocasionar deformación o ruptura en el material.

Cabe recordar que debido a que los cerámicos no presentan prácticamente ninguna deformación plástica antes de la ruptura, toda la energía que se utilice para realizar esta prueba de impacto servirá para ocasionar la de ruptura del material, es por ello que estos materiales presentan una baja resistencia en esta prueba y, como ya se mencionó, esto los hace poco competitivos ante plástico y metales en el conformado a temperatura ambiente.

Esta prueba se realizó en base a la norma ASTM: C 368 - 88 (año 1993), la cual indica el "Método de Prueba Standard para la Resistencia al *Impacto* de Materiales Cerámicos Cocidos".

De manera similar a la prueba de compresión, en la prueba de impacto se modificó ligeramente la norma, debido a los mismos problemas de elaboración de las probetas a partir de los fragmentos encontrados en las ruinas mayas, pues como ya se mencionó, dichos especímenes son muy pequeños.

La prueba de impacto marcada en la norma (para mayor detalle, esta norma se encuentra en el anexo al final del presente trabajo), fue establecida para probetas de forma cilíndrica tanto sólidas como huecas. El tipo de probetas que se manejó para realizar este ensayo fue una probeta cilíndrica y sólida.

El aparato utilizado para realizar este ensayo, cumple con las especificaciones indicadas en esta norma, pues este equipo fue construido en base a lo indicado por la misma expresamente, para realizar este tipo de pruebas en cerámicas arqueológicas, por el IIA.

También en este ensayo los criterios para la elaboración de las probetas, fueron proporcionados por el IIA.

Las dimensiones de las probetas para este ensayo, se muestran en el siguiente diagrama:

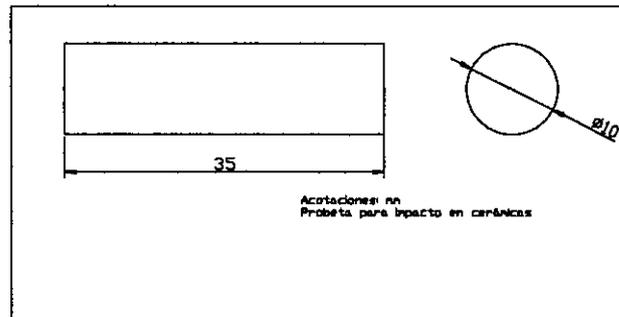


Figura 15. Probeta experimental de impacto

Finalmente se llevó a cabo la prueba en los diferentes tipos de cerámicas. Los resultados de esta prueba se pueden consultar en la parte de caracterización.

c) Porosidad

Para evaluar este fenómeno no existe, hasta el momento, una norma que establezca los límites de porosidad, de acuerdo con la utilización del cerámico a nivel artesanal.

A este respecto, solo existen diversos métodos para conocer el porcentaje de porosidad en las piezas cerámicas; uno de estos métodos fue ya referido en el capítulo anterior.

Los resultados arrojados por estas pruebas se muestran en la parte de caracterización.

2. Técnicas de preparación de muestras

Para conocer el comportamiento de las cerámicas fue necesario elaborar las probetas que se requirieron para ello; en este caso, las probetas se hicieron de barro comercial proveniente de la zona sureste del país.

El proceso que a continuación se presenta, es la técnica bajo la cual se realizaron las probetas de barro, las cuales permitirán en su momento conocer las propiedades mecánicas de este material antes y después de aplicarles el baño de inmersión en cera. Esto permitirá cumplir con el primero de los objetivos particulares.

a) Elaboración de piezas cerámicas

La técnica de elaboración de estas probetas es muy similar al método presentado en el capítulo anterior en el proceso de fabricación de los cerámicos a nivel artesanal, por lo cual en esta parte solo se mencionarán las variantes y consideraciones que se realizaron en cada etapa.

i. **Preparación de la pasta.** En este caso no fue necesario pulverizar la materia prima, pues el barro tenía un tamaño relativamente pequeño.

El barro se colocó en un recipiente de tal forma que se alcanzara a cubrir con agua toda la materia prima; cada tres o cuatro horas, aproximadamente unas cuatro veces al día, se amasaron los restos de barro que no se habían disuelto por completo, esto con la finalidad de acelerar el proceso.

Después de veinticuatro horas, aproximadamente, se encontró al barro en estado plástico (papilla) parecido, en consistencia, a un atole pero más aguado; para poder extraerlo fue necesario decantarlo es decir, retirar el exceso de agua del recipiente, utilizando para ello una esponja para evitar mover el recipiente con la arcilla, debido a que los movimientos provocan que esta se mezcle nuevamente con el agua adquiriendo mayor humedad y dificultando así la eliminación del agua de exceso.

En el momento en que ya no se pudo extraer más agua del recipiente, el barro fue colocado sobre unas placas de yeso para eliminar su exceso de humedad y, una vez que hubo alcanzado una dureza de cuero blanda, es decir cuando se puede despegar fácilmente el barro de la placa de yeso (figura 16), se le colocó en bolsas de plástico para que mantuviera su dureza de cuero, y poderlo utilizar de esta forma posterior.



Figura 16. Desprendimiento de barro de la placa de yeso

ii. **Amasado y aplastado.** La finalidad, tal como ya se dijo, fue evitar el agrietamiento o ruptura de las piezas cerámicas a causa de las burbujas de aire que se encontrasen en su interior, ya que estas no fueron eliminadas durante la etapa anterior. Asimismo, se buscó alcanzar la dureza de cuero necesaria para moldear y manejar la pieza, sin que ésta se deformase.

El método que se empleó para amasar el barro fue el del "panadero" (descrito en el capítulo anterior), el cual se muestra en la figura 17.



Figura 17. Método de panadero

Después de veinte o treinta pasadas, se revisó haciendo un corte con hilo de nylon, que ya no existieran burbujas en el interior (figura 18), repitiendo el método hasta que no existieran burbujas en el centro del material. De forma paralela se revisó la "dureza de

cuero” de la siguiente manera: se elabora un hilo grueso de pasta cerámica, el cual se enrolla en uno de los dedos de la mano, así, si el barro se resquebraja entonces había que adicionar agua y amasar hasta que lograrse mantener su forma (figura 19), pero si estaba muy blando y se deslizaba, entonces debía dejarse secar un poco más sobre las placas de yeso o bien, amasarlo en ella.



Figura 18. Verificación de la no existencia de poros internos



Figura 19. Revisión de la dureza de cuero

Una vez que se alcanzaron tanto la dureza de cuero requerida como la eliminación de las burbujas de aire en el barro, se procedió al moldeado de éste.

iii. **Moldeado.** El principal objetivo de esta etapa fue ofrecer una adecuada resistencia mecánica a la pieza para soportar el transporte, el secado y la cocción. Para ello, como ya se mencionó en el capítulo anterior, existen diferentes métodos para moldear el barro dándole al mismo tiempo las propiedades anteriormente enunciadas, a la pieza cerámica. El método utilizado para la elaboración de las probetas fue el de extrusión (ver conformación hidrolástica), el cual procedió de la siguiente forma:

- Una vez que se tuvo el barro con la dureza de cuero requerida, se colocó un poco en una mano mientras con la otra se sostuvo un popote.
- El popote se empujó a través del barro hasta que se llenara. Se utilizaron popotes de diez centímetros de longitud como máximo. Durante el llenado del popote se tuvo que

verificar que la entrada del orificio superior no se tapase, ya que de otra manera el aire que quedara atrapado no permitiría al barro llenar el popote (figura 20).



Figura 20. Llenado del cilindro

- Para sacar el barro del popote (cilindro), se utilizó una varilla de madera la cual sirvió como pistón; con ella se empujó el barro a través del popote (cilindro) extruyéndolo hasta expulsar el material por completo.
- Al mismo tiempo que se extruyó, el material se colocó sobre la placa de yeso, como se observa a continuación:



Figura 21. Extrusión del barro

- Una vez finalizada esta tarea y, teniendo todo el material requerido ya extruido se procedió a la etapa de secado.
- iv. **Secado.** Durante esta etapa se eliminó el agua de conformado para evitar fracturas por el cambio de fase agua - vapor durante la cocción, pues con ello se generarían huecos que funcionarían como concentradores de esfuerzo en el material.

El secado de las probetas se realizó a temperatura ambiente durante dos días en un lugar fresco y seco; el primer día se dejó a las probetas sobre la placa de yeso, pero el segundo día se retiraron y se colocaron sobre una base de unicel, pues se notó al dejarlas por más tiempo las probetas sufrían un secado sumamente rápido que originaba distorsión del material.

Además, para poder controlar mejor la velocidad de secado durante este tiempo, se les cubrió con un plástico y se evitó exponerlas al sol.

Finalmente para confirmar que las probetas ya se encontraban secas y listas para la cocción fueron pesadas el segundo día después de haber sido extruidas, se les colocó en el horno a una temperatura de 50°C durante una hora y se les volvió a pesar, si su peso no variaba entonces estaban ya listas para ser sometidas a la siguiente etapa, de otra forma debían dejarse secar por más tiempo antes de pasar a la cocción.

v. **Cocción.** Este proceso, como ya se mencionó, se realizó para conferir características de dureza y resistencia a la deformación y, al mismo tiempo eliminar impurezas no deseadas en el material.

Las probetas fueron sometidas a cocción durante dos horas a 700°C una parte de ellas y la otra a 800°C; se manejaron estas temperaturas debido a que el rango de temperaturas empleadas a nivel artesanal en nuestro país es de 500°C a 800°C.

Una vez que transcurrió el tiempo de cocción, las probetas se dejaron enfriar en el horno durante doce horas, aproximadamente; esto con el fin de evitar que las probetas sufrieran un choque térmico.

vi. **Manufactura de las probetas cerámicas.** Al terminarse de extruir las probetas no son cortadas al tamaño necesario debido a que, al perder humedad, las piezas cerámicas sufren una reducción en sus dimensiones, y una vez secas, no se les puede cortar debido a que presentan una alguna fragilidad, por lo cual fueron conformadas después del proceso de cocción.

Las probetas de compresión se realizaron con ayuda de un torno, un par de placas paralelas que se encontraban a un centímetro de separación y un vernier. Para ello se colocó el cilindro cerámico en el chuck del torno y con ayuda del buril se procedió a realizar el corte a una distancia ligeramente mayor del centímetro de largo que se requería.

Así, en el momento en que ya se tenían los cilindros cortados, se les daba un acabado final en las caras transversales con lijas para agua de grado 360 en adelante, cuidando en todo momento el paralelismo de dichas caras con las ayuda de las placas paralelas de metal y su longitud con el vernier (figura 22).

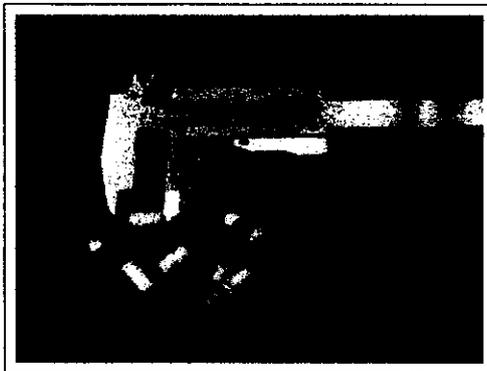


Figura 22. Probetas de compresión

Cuando ya se encontraban terminadas las probetas se les sometió a su limpieza y almacenamiento.

vii. **Limpieza y almacenamiento.** Este proceso aunque simple, es sumamente importante para el proceso posterior al que las probetas fueron sometidas que es la inmersión en cera.

Las probetas fueron sacudidas del polvo con un cepillo de pelo de camello, sometidas posteriormente a un baño en un equipo de ultrasonido marca "Elma" lleno de agua, secadas durante un día a temperatura ambiente en un lugar limpio y seco y finalmente fueron secadas en el horno a una temperatura de 50°C durante tres horas; durante todo el proceso fueron manejadas con guantes y colocadas en envases perfectamente limpios y etiquetados para su fácil identificación.

b) Inmersión de las piezas cerámicas en ceras

Como es bien sabido en el mundo, los mayas alcanzaron una sorprendente originalidad y perfección en el modelado de arcilla. En las vasijas lograron superficies suaves y lisas, algunas con un acabado mate y gran lustre otras con un hermoso brillo casi metálico, en tonalidades anaranjadas y rojas, con diferentes matices que oscilaban del terracota al gris plomo.

Para lograr muchos de estos acabados (en especial los mate), utilizaron diversos tipos de ceras, algunas de las más comunes en la zona sureste de México son las ceras de candelilla, campeche, abeja, etc., por lo cual se considera que algunas de ellas fueron utilizadas por los mayas, ya fuera solas o en diferentes proporciones y combinaciones.

Es por ello que las ceras escogidas para realizar la inmersión de las probetas fueron las tres anteriores; comercialmente solo existen variantes para la cera de abeja, de la cual se utilizaron dos tipos. Las ceras empleadas se enlistan a continuación:

- Cera de candelilla.
- Cera de campeche.
- Cera de abeja tipo 8019-W y,
- Cera de abeja tipo 8019-K.

Las dos primeras son ceras muy comunes en el mercado nacional, pero las dos últimas son dos tipos de cera de abeja cuya diferencia radica en el nivel de refinado durante su proceso, este factor también se refleja en su costo.

La cera de abeja tipo 8019-W es más pura por lo cual su costo es mucho mayor que la cera de abeja tipo 8019-K.

Debido a que la hipótesis que se ha planteado en el presente trabajo es mejorar las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos convencionales y conferirles un acabado superficial alternativo, se hará uso en primera instancia, de la cera.

Sabiendo que la cera es un polímero de bajo grado de polimerización y que a cierta temperatura su nivel de viscosidad es muy bajo, se considera que podrá penetrar a través de las porosidades del material cerámico sirviendo de esta manera no solo como relleno a las porosidades existentes sino también, le dará un acabado superficial mate así como una baja permeabilidad al producto.

A continuación se enuncia el proceso de inmersión de las probetas en cera:

- i. Debido a que en un inicio no se conocía ni el punto de ebullición de cada una de las ceras, ni el tiempo de penetración de ellas en las probetas, fue necesario determinarlo de la siguiente manera:
 - Se colocó una de las ceras en una olla especial para fundir ceras, la cual debía estar perfectamente limpia para evitar que impurezas no deseadas penetraran en las probetas alterando así sus propiedades en el momento de sumergirlas en ella.
 - La cera se calentó hasta que comenzó a sacar humo, esto último como producto de su descomposición. Se debe recordar que las ceras están compuestas de materia orgánica las cuales a determinada temperatura comienzan a degradarse, alterando con ello las propiedades iniciales del material (en este caso de la cera). Por ello, la temperatura de trabajo de cada una de las ceras se tomó 10°C por abajo de la temperatura de degradación, dando así un margen de trabajo.
 - El tiempo de penetración de las ceras en las cerámicas se determinó sumergiendo diversas muestras de material cerámico en cada una de las ceras, y sacando dos o tres muestras de las ceras fundidas en diferentes intervalos de tiempo; es decir, se colocaron en cada una de las ceras un determinado número de muestras; a los treinta minutos se sacaron dos a tres muestras de cada una de ellas, se partieron por la mitad y se les colocó azul de metileno líquido para observar hasta donde había penetrado la cera, comprobándose que la zona que no absorbía dicho líquido era la zona carente de cera (generalmente el centro). Esto se hizo para treinta minutos, cuarenta y cinco minutos, una hora y hora y media. Se consideró pues, que el tiempo de inmersión es el tiempo de penetración total de la cera en las probetas cerámicas.

- ii. Una vez determinados los dos factores anteriores (temperatura de trabajo y tiempo de inmersión), se sometieron a inmersión las probetas en cada una de las ceras, tal como se muestra en la siguiente figura:

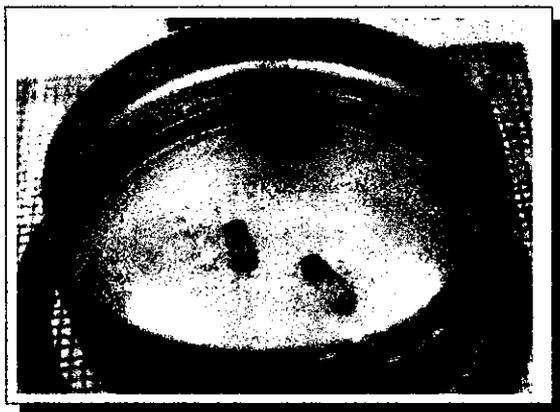


Figura 23. Inmersión de probetas en cera de abeja

- iii. Posteriormente, estas probetas fueron sometidas a las pruebas de compresión, impacto y porosidad. Esto se puede observar en la parte que a continuación se refiere.

3. Caracterización

Este apartado es uno de los más importantes, pues es donde se encuentran los resultados de las pruebas ya anteriormente descritas, las cuales se enuncian a continuación:

a) Ensayos de compresión

Como ya se mencionó este ensayo tiene como finalidad evaluar la resistencia a la compresión de los materiales (en este caso, cerámicos) cuando se les aplica una cierta carga axial.

Para realizar esta prueba se utilizó una máquina INSTRON electromecánica, la cual se puede observar en la siguiente figura. Ésta se encuentra en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

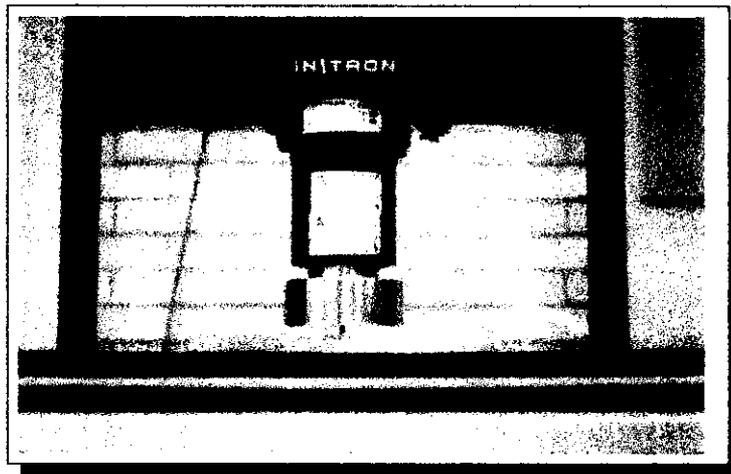


Figura 24. Máquina INSTRON realizando prueba de compresión

Las pruebas de compresión se hicieron bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura ambiente: 23°C
- Humedad: 50%
- Atmósfera: Normal
- Velocidad de desplazamiento del cabezal en la prueba: 5 ^{mm}/_{min}

Se hicieron un total de dieciséis experimentos de compresión, cada uno con veinte probetas de iguales dimensiones pero con diferentes características según lo anteriormente descrito, es decir, cocidas a dos diferentes temperaturas (700°C y 800°C) y sumergidas según el caso en las diferentes ceras o combinaciones de las mismas; es importante resaltar que en el caso de las ceras combinadas (candelilla y abeja tipo: 8019-W) se utilizaron diez probetas para realizar los ensayos.

De esta forma, se realizaron los siguientes experimentos:

Número de experimento	Temperatura de cocción de la probeta	Tipo de cera utilizado en el baño de inmersión
1	700°C	Ninguna
2		Candelilla
3		Campeche
4		Abeja tipo: 8019-W
5		Abeja tipo: 8019-K
6		75% C - 25% A8019-W
7		50% C - 50% A8019-W
8		25% C - 75% A8019W
9	800°C	Ninguna
10		Candelilla
11		Campeche
12		Abeja tipo: 8019-W
13		Abeja tipo: 8019-K
14		75% C - 25% A8019-W
15		50% C - 50% A8019-W
16		25% C - 75% A8019W

Tabla 3. Experimentos de compresión

Para este ensayo la propiedad a evaluar es la resistencia a la compresión, debido a que es la que proporciona la información necesaria para determinar cual es la carga que soporta la probeta por unidad de área.

De los resultados obtenidos en estos experimentos, se excluyeron los de aquellas probetas que presentaron un comportamiento excesivamente diferente a la moda de la muestra. En las siguientes tablas se presentan los valores obtenidos de los experimentos una vez realizada la exclusión de datos, dichos datos se encontraban tanto por abajo como por arriba del rango de incertidumbre.

Modificación de propiedades mecánicas de cerámicas artesanales

Tipo de prueba: **COMPRESIÓN**
 Temp. de cocimiento: **700°C**

Cera utilizada: **Ninguna**
 Temp. de trabajo: **-**
 Tiempo de penetración: **-**

Cera utilizada: **Candeilla**
 Temp. de trabajo: **110°-115°C**
 Tiempo de penetración: **1.5 hrs.**

Cera utilizada: **Campeche**
 Temp. de trabajo: **110°C**
 Tiempo de penetración: **1 hrs.**

Probeta No.	Resistencia (MPa)
1	19.19
2	15.59
3	20.92
4	22.56
5	21.95
6	23.39
7	19.69
8	26.47
9	22.77
10	19.28
11	24
12	19.28
13	16
14	18.67
15	20.72
16	19.49
17	19.9
18	21.54
Promedio	20.63388889

Tabla C1

Probeta No.	Resistencia (MPa)
1	32.1
2	40.82
3	45.75
4	40.2
5	32.82
6	40.62
7	41.03
8	48.82
9	36.72
10	34.67
11	39.8
12	34.67
13	38.36
14	35.49
Promedio	38.705

Tabla C2

Probeta No.	Resistencia (MPa)
1	33.23
2	26.05
3	26.87
4	29.75
5	31.59
6	30.77
7	21.95
8	29.33
9	27.29
10	37.54
11	26.47
12	26.47
Promedio	28.9425

Tabla C3

Tipo de prueba: **COMPRESIÓN**
Temp. de cocimiento: **700°C**

Cera utilizada: **A-8091W**
Temp. de trabajo: **110°C**
Tiempo de penetración: **45 min.**

Probeta No.	Resistencia (MPa)
1	32.82
2	28.93
3	32.82
4	31.59
5	24
6	24.62
7	23.39
8	25.23
9	27.08
10	30.36
11	38.56
12	23.8
13	33.03
14	34.46
15	22.77
16	32.82
17	25.44
Promedio	28.924705882

Tabla C4

Cera utilizada: **A-8019K**
Temp. de trabajo: **110°C**
Tiempo de penetración: **45 min**

Probeta No.	Resistencia (MPa)
1	25.44
2	20.92
3	20.31
4	27.69
5	20.92
6	25.03
7	24.82
8	27.49
9	33.23
10	26.67
11	39.38
12	27.9
13	34.88
14	34.05
15	30.97
16	28.51
Promedio	28.013125

Tabla C5

Modificación de propiedades mecánicas de cerámicas artesanales

Tipo de prueba: **COMPRESIÓN**
 Temp. de cocimiento: **800°C**

Cera utilizada: **Ninguna**
 Temp. de trabajo: **-**
 Tiempo de penetración: **-**

Cera utilizada: **Candelilla**
 Temp. de trabajo: **110°-115°C**
 Tiempo de penetración: **1.5 hrs**

Cera utilizada: **Campeche**
 Temp. de trabajo: **110°C**
 Tiempo de penetración: **1 hrs**

Probeta No.	Resistencia (MPA)
1	39.18
2	44.11
3	25.44
4	30.15
5	38.56
6	48.41
7	34.05
8	45.54
9	49.85
10	38.98
11	30.36
12	36.92
13	53.13
14	28.31
15	37.13
16	29.13
17	26.65
18	42.67
Promedio	37.698333

Tabla C9

Probeta No.	Resistencia (MPA)
1	84.72
2	101.7
3	57.87
4	61.95
5	56.6
6	63.17
7	59.3
8	104.6
9	55.58
10	62.56
11	99.49
12	80.64
13	101.7
14	70.15
15	61.74
16	84.11
Promedio	75.3675

Tabla C10

Probeta No.	Resistencia (MPA)
1	51.91
2	54.15
3	49.64
4	44.11
5	41.64
6	66.69
7	42.26
8	46.98
9	46.77
10	44.93
11	44.51
12	63.17
13	65
14	51.91
Promedio	50.976429

Tabla C11

Tipo de prueba: **COMPRESIÓN**
 Temp. de cocimiento: **800°C**

Cera utilizada: **A-8091W**
 Temp. de trabajo: **110°C**
 Tiempo de penetración: **45 min**

Probeta No.	Resistencia (MPa)
1	66.69
2	54.36
3	75.5
4	62.97
5	43.28
6	59.09
7	60.52
8	51.91
9	74.48
10	71.78
11	62.76
12	75.5
13	84.72
14	44.51
15	45.75
16	42.26
17	69.33
18	81.05
Promedio	62.581111

Tabla C12

Cera utilizada: **A-8019K**
 Temp. de trabajo: **110°C**
 Tiempo de penetración: **45 min**

Probeta No.	Resistencia (MPa)
1	51.91
2	58.89
3	59.09
4	64.8
5	51.3
6	70.76
7	62.56
8	63.78
9	87.16
10	50.05
11	59.5
12	57.87
13	95.16
14	56.39
Promedio	63.515714

Tabla C13

Como se puede observar en las tablas presentadas, en varios de los ensayos se excluyeron algunas probetas, ya que éstas regularmente se encontraban muy abajo o demasiado arriba del rango de incertidumbre, esto pudo haber sido ocasionado por la presencia de inclusiones o impurezas que pueden, en un momento dado, afectar la resistencia del material, yeso (de la placa de amasado), o grietas internas generadas por una rápida velocidad de secado o por la cocción.

b) Ensayos de Impacto

El objetivo de este ensayo es evaluar la tenacidad del material (resistencia al impacto); dicha característica, como ya se mencionó, presenta valores muy bajos para las cerámicas.

El equipo utilizado para realizar este ensayo fue construido en el IIA (Instituto de Investigaciones Antropológicas) acorde con los requerimientos para realizar ensayos de impacto en cerámicas arqueológicas; una imagen de dicho equipo se presenta a continuación:

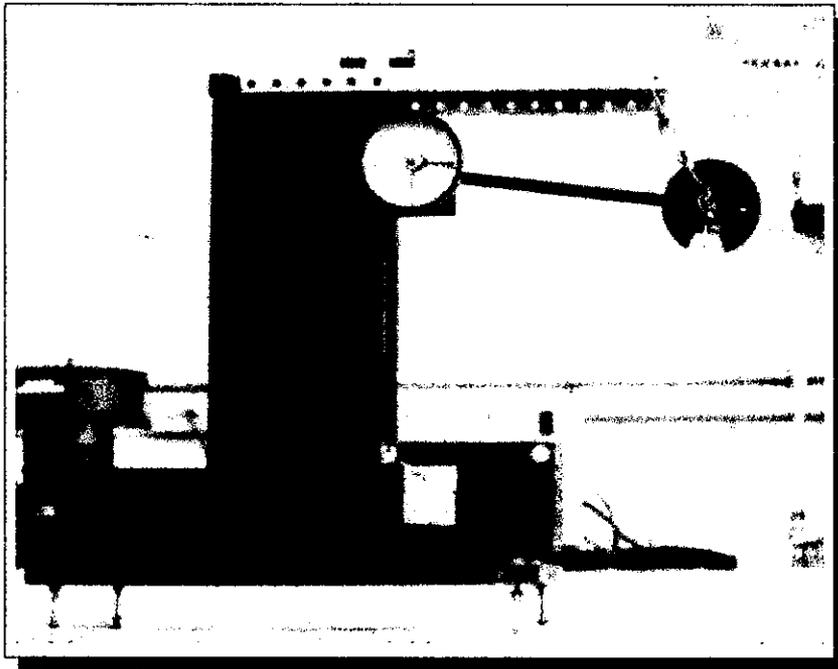


Figura 25. Máquina de Impacto

Las condiciones bajo las cuales se realizaron los experimentos para este ensayo son:

- Temperatura ambiente: 20°C
- Humedad: 50%
- Atmósfera: Normal
- Energía proporcionada por el péndulo: 0.341 [J]

A diferencia del ensayo de compresión, en este ensayo se realizaron diez experimentos, en cada uno de ellos se probaron de diez a doce probetas de iguales dimensiones y, con las características presentadas en la siguiente tabla:

Número de experimento	Temperatura de cocción de la probeta	Tipo de cera utilizado en el baño de inmersión
1	700°C	Ninguna
2		Candelilla
3		Campeche
4		Abeja tipo: 8019-W
5		Abeja tipo: 8019-K
6	800°C	Ninguna
7		Candelilla
8		Campeche
9		Abeja tipo: 8019-W
10		Abeja tipo: 8019-K

Tabla 4. Experimentos de compresión

En este ensayo la propiedad a evaluar es la resistencia al impacto, es decir que tan tenaz es la probeta ante una energía proporcionada por unidad de área.

Cabe mencionar que el criterio de exclusión que se siguió en este caso, es el mismo que en el ensayo de compresión.

En las tablas presentadas a continuación, se muestran los valores obtenidos de las pruebas realizadas una vez aplicado el criterio de exclusión ya mencionado.

Modificación de propiedades mecánicas de cerámicas artesanales

Tipo de prueba: **IMPACTO**
Temp. de cocimiento: **700°C**

Cera utilizada: **Ninguna**
Temp. de trabajo: **-**
Tiempo de penetración: **-**

Probeta No.	°	Energía (J)	*Resistencia (J/m ²)
1	4	0.00667	339.633214
2	4	0.00667	339.633214
3	5	0.0104	529.801325
4	5	0.0104	529.801325
5	3	0.00374	190.524707
6	5	0.0104	529.801325
7	3	0.00374	190.524707
8	4	0.00667	339.633214
9	4	0.00667	339.633214
10	4	0.00667	339.633214
11	5	0.0104	529.801325
Promedio			349.868399

Tabla I1

Cera utilizada: **Candeilla**
Temp. de trabajo: **110°-115°C**
Tiempo de penetración: **1.5 hrs.**

Probeta No.	°	Energía (J)	Resistencia (J/m ²)
1	4	0.00667	339.633214
2	4	0.00667	339.633214
3	4	0.00667	339.633214
4	4	0.00667	339.633214
5	4	0.00667	339.633214
6	4	0.00667	339.633214
7	6	0.01497	762.608253
8	5	0.0104	529.801325
9	4	0.00667	339.633214
10	6	0.01497	762.608253
Promedio			402.95003

Tabla I2

Cera utilizada: **Campeche**
Temp. de trabajo: **110°C**
Tiempo de penetración: **1 hrs**

Probeta No.	°	Energía (J)	Resistencia (J/m ²)
1	4	0.00667	339.6332
2	4	0.00667	339.6332
3	4	0.00667	339.6332
4	4	0.00667	339.6332
5	4	0.00667	339.6332
6	5	0.0104	529.8013
7	6	0.01497	762.6083
8	5	0.0104	529.8013
9	4	0.00667	339.6332
10	6	0.01497	762.6083
Promedio			420.238

Tabla I3

*Nota:

El calculo se realiza en base a la fórmula 2; un ejemplo de ello se presenta a continuación:

$$\text{Resistencia al impacto} = 0.00667 \text{ J} / 0.00001963 \text{ m}^2$$

$$\text{Resistencia la impacto} = 339.6332145$$

Para este experimento el área es constante (1.963X10-5), por tratarse de secciones cilíndricas de 5mm de diámetro.

Modificación de propiedades mecánicas de cerámicas artesanales

Tipo de prueba: **IMPACTO**
 Temp. de cocimiento: **800°C**

Cera utilizada: **Ninguna**
 Temp. de trabajo: **-**
 Tiempo de penetración: **-**

Probeta No.	°	Energía (J)	Resistencia (J/m ²)
1	4	0.00667	339.786042
2	4	0.00667	339.633214
3	6	0.01497	762.608253
4	4	0.00667	339.633214
5	5	0.0104	529.801325
6	4	0.00667	339.633214
7	6	0.01497	762.608253
8	4	0.00667	339.633214
9	4	0.00667	339.633214
Promedio			409.296994

Tabla 16

Cera utilizada: **Candelilla**
 Temp. de trabajo: **110°-115°C**
 Tiempo de penetración: **1.5 hrs.**

Probeta No.	°	Energía (J)	Resistencia (J/m ²)
1	6	0.01497	762.608253
2	6	0.01497	762.608253
3	5	0.0104	529.801325
4	7	0.02037	1037.6974
5	4	0.00667	339.633214
6	6	0.01497	762.608253
7	4	0.00667	339.633214
8	4	0.00667	339.633214
9	6	0.01497	762.608253
Promedio			563.683138

Tabla 17

Cera utilizada: **Campeche**
 Temp. de trabajo: **110°C**
 Tiempo de penetración: **1 hrs**

Probeta No.	°	Energía (J)	Resistencia (J/m ²)
1	6	0.01497	762.608253
2	6	0.01497	762.608253
3	5	0.0104	529.801325
4	5	0.0104	529.801325
5	4	0.00667	339.633214
6	4	0.00667	339.633214
7	6	0.01497	762.608253
8	6	0.01497	762.608253
9	4	0.00667	339.633214
10	5	0.0104	529.801325
Promedio			514.430603

Tabla 18

Cera utilizada: **A-8091W**
 Temp. de trabajo: **110°C**
 Tiempo de penetración: **45 min**

Probeta No.	°	Energía (J)	Resistencia (J/m ²)
1	8	0.0266	1355.06877
2	4	0.00667	339.633214
3	4	0.00667	339.633214
4	4	0.00667	339.633214
5	4	0.00667	339.633214
6	5	0.0104	529.801325
7	3	0.00374	190.524707
8	4	0.00667	339.633214
9	6	0.01497	762.608253
Promedio			453.616913

Tabla I9

Cera utilizada: **A-8019K**
 Temp. de trabajo: **110°C**
 Tiempo de penetración: **45 min**

Probeta No.	°	Energía (J)	Resistencia (J/m ²)
1	5	0.0104	529.801325
2	6	0.01497	762.608253
3	4	0.00667	339.633214
4	4	0.00667	339.633214
5	7	0.02037	1037.6974
6	8	0.0266	1355.06877
7	5	0.0104	529.801325
Promedio			611.780438

Tabla I10

Es necesario mencionar que la máquina de impacto solo proporciona el ángulo que representa la pérdida de energía potencial del péndulo por transferencia a la probeta; por lo cual, para conocer la energía transferida a la probeta se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Resistencia al impacto} = \frac{\text{Energía [J]}}{\text{Área [m}^2\text{]}}$$

Ecuación 2

Donde:

Resistencia al impacto = También es llamada número de Charpy.

Energía = Es la energía transmitida del péndulo a la muestra, ésta se obtiene de las tablas propias del aparato.

Área = Depende de la forma de la probeta.

c) Evaluación de la porosidad

Al ser la porosidad uno de los factores que más afecta las propiedades mecánicas de las cerámicas, se ha determinado que un efectivo método para contrarrestarla es aplicar a las probetas un baño en un tipo determinado de cera con la finalidad, de llenar las porosidades existentes en el material y con ello aumentar sus propiedades mecánicas.

Esta prueba consistió en pesar probetas del mismo tipo cuando se encontraban secas y después de haber estado sumergidas en agua durante 24 hrs. Se considera que este tiempo es significativo para tener indicios de penetración de agua en el material, pues debido a la cantidad de intersticios que poseen las cerámicas es fácil para el agua penetrar a través de ellos hasta el interior de las probeta, dejando así rastros de humedad a su paso, lo cual se ve reflejado en un incremento de peso.

Al igual que el ensayo de compresión, también en esta evaluación se realizaron dieciseis experimentos con dos probetas cada uno, esto se encuentra referido en las tablas que a continuación se expresan. En este caso también se siguió el mismo criterio para realizar la exclusión de las probetas que se encontraran fuera del rango.

Pruebas de Porosidad

Fluido utilizado: **Agua**
 Tiempo de permanencia en el fluido: **24 hrs**
 Temperatura de cocción de las muestras: **700°C**

Cera del recubrimiento	Muestra	Peso inicial	Peso final	Incremento
		g	g	%
Ninguna	1	0.8	0.9	11.11%
	2	0.2	0.23	13.04%
Candelilla	1	0.2	0.2	0.00%
	2	0.1	0.1	0.00%
Campeche	1	0.2	0.2	0.00%
	2	0.5	0.5	0.00%
Abeja 8019-W	1	0.2	0.2	0.00%
	2	0.2	0.2	0.00%
Abeja 8019-K	1	0.1	0.1	0.00%
	2	0.8	0.8	0.00%
75% c-25% a	1	0.1	0.1	0.00%
	2	0.5	0.5	0.00%
50% c-25% a	1	0.1	0.1	0.00%
	2	0.2	0.2	0.00%
25% c-75% a	1	0.1	0.1	0.00%
	2	0.3	0.3	0.00%

Fluido utilizado: **Agua**
 Tiempo de permanencia en el fluido: **24 hrs**
 Temperatura de cocción de las muestras: **800°C**

Cera del recubrimiento	Muestra	Peso inicial	Peso final	Incremento
Ninguna	1	0.5	0.57	12.28%
	2	0.8	0.9	11.11%
Candelilla	1	0.9	0.9	0.00%
	2	1	1	0.00%
Campeche	1	0.8	0.8	0.00%
	2	1	1	0.00%
Abeja 8019-W	1	0.8	0.8	0.00%
	2	0.8	0.8	0.00%
Abeja 8019-K	1	0.1	0.1	0.00%
	2	0.8	0.8	0.00%
75% c-25% a	1	1.1	1.1	0.00%
	2	1.2	1.2	0.00%
50% c-25% a	1	1	1	0.00%
	2	1.2	1.2	0.00%
25% c-75% a	1	1.2	1.2	0.00%
	2	1.1	1.1	0.00%

Como puede observarse en las tablas anteriores no existe ninguna probeta que pueda ser excluida, debido a que ninguna presenta una incertidumbre lo suficientemente significativa como para aplicar el criterio de exclusión.

IV) ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como se puede observar en los resultados presentados en el capítulo anterior, para el **ensayo de compresión** de probetas cocidas a 700°C se tiene una mejora notable en las probetas que fueron sometidas a inmersión en cera en comparación con las probetas que no tenían ningún tipo de cera, es decir aquellas que se habían sometido solo al proceso de cocción.

Se considera que esta mejora se debe en gran medida al efecto “amortiguador” que produce la cera en los poros internos de las probetas, pues aun cuando a simple vista no se logran ver poros en la superficie de éstas, sí existen y prueba de ello es la mejora notable que en este caso presentan. Al cubrir la cera las porosidades, ésta permite reducir sustancialmente el riesgo de formación y crecimiento de grietas y esto constituye la idea básica que ha permitido incrementar sustancialmente la resistencia mecánica de estos materiales.

Esta misma mejora también se presentó en las probetas cocidas a 800°C, este resultado ya se esperaba debido a que, al ser resistentes las probetas a 700°C lo son aun más, por la eliminación del agua química y el inicio de la fase de sinterización, a 800°C. Por ello, dicha resistencia se ve incrementada con la ayuda del baño de cera en el fueron inmersas.

La diferencia entre las probetas cocidas a 700°C y 800° es notable, y esta diferencia se ve aun más remarcada entre las que fueron introducidas al baño de cera, lo se puede observar en la gráfica que a continuación se presenta:

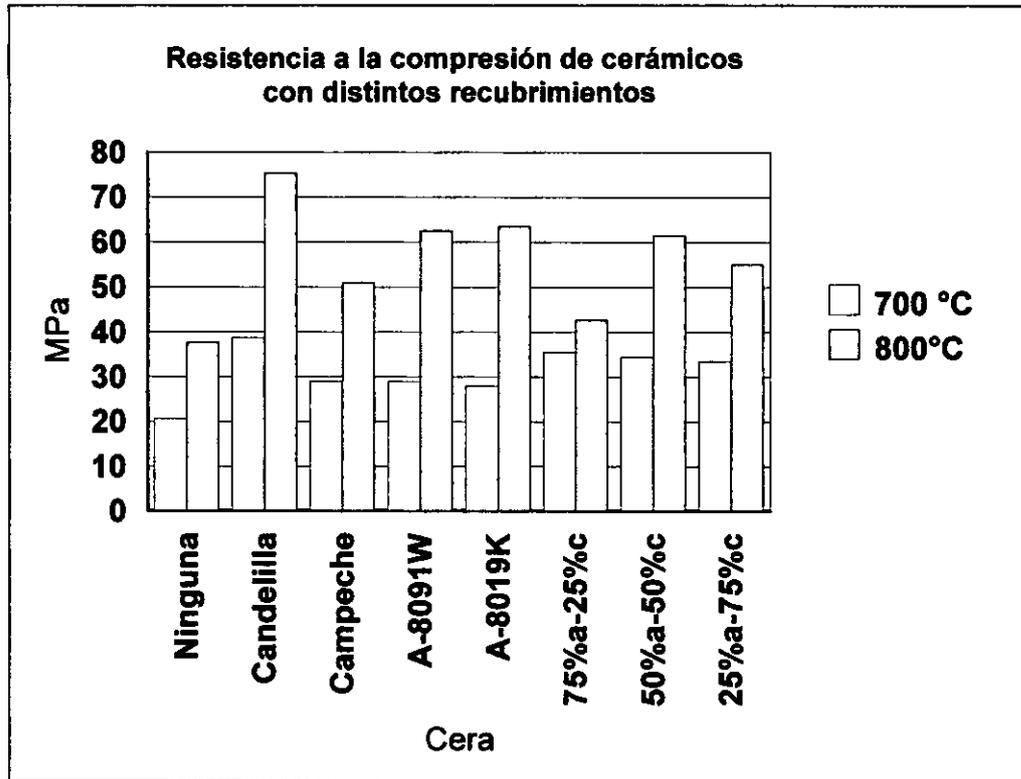


Gráfico 1. Comparación de la resistencia a la compresión entre las probetas cocidas a 700°C y 800°C

La resistencia en términos globales, se ha incrementado al doble, por un método factible de aplicar y constituye una alternativa que debe valorarse con más detalle en relación al costo y posibles aplicaciones.

La notable mejora que presentan las probetas de 800°C ante las de 700°C puede ser debida a la conjunción de dos características a) el inicio del sinterizado a esta temperatura y b) la aplicación de cera, lo cual las hace más resistentes.

En cuanto a los tipos de cera empleados se puede observar que las probetas con candelilla generan el mayor aumento de resistencia de todas las probetas tanto en las cocidas a 700°C como a 800°C. Esto puede ser debido entre otras cosas a que la cera a la temperatura de trabajo (110°C - 115°C) es muy fluida (baja viscosidad) por lo cual penetra de forma muy intensa, cubriendo los poros y reduciendo los riesgos de formación y crecimiento de grietas. Sin embargo, el problema que presentaron fue su prolongado tiempo de penetración en las cerámicas. Una alternativa a esta limitación que se propone para un trabajo posterior es el precalentar las probetas antes de la inmersión.

Ahora bien las probetas embebidas con cera de campeche son las que presentan menos resistencia a 700°C y a 800°C; además de esta baja resistencia presentaron serios problemas de alta viscosidad, lo cual dificultó tanto su manejo para la elaboración de las pruebas realizadas como su tiempo de penetración, ya que este se prolongo.

La diferencia entre las dos ceras de abeja empleadas es mínima y sus valores son muy similares, la principal diferencia radica en el costo de cada una de ellas, debido a que la cera de abeja tipo 8019W es más económica que la tipo 8019K, ya que el costo de esta última es más del doble de la primera, por lo cual se recomienda utilizar la cera de abeja tipo 8019W. Además su velocidad de penetración es muy rápida, ya que el tiempo de penetración fue de 45 min. De forma semejante se propone precalentar las probetas.

Debido a los resultados mostrados, se concluye que las probetas con candelilla son las más resistentes, no obstante, son las que tienen mayor tiempo de penetración. Ahora bien, las probetas con las ceras de abeja son las que presentan menor tiempo de penetración y una resistencia bastante aceptable. Por dichas razones se propuso realizar de manera adicional una serie de pruebas para probetas con un baño de diferentes proporciones de estas dos ceras candelilla y abeja, (de esta última, por razones económicas, se utilizó la tipo 8019W). Los resultados de estas pruebas son los correspondientes a las seis últimas barras de la gráfica anterior.

De las combinaciones realizadas de las ceras de abeja y candelilla se puede determinar que efectivamente el tiempo de penetración para la mezcla es de una hora; además, su resistencia a la compresión es bastante aceptable. De las tres combinaciones efectuadas la mejor fue la mezcla 50%candelilla y 50%abeja (50%c-50%a) ya que por un lado su resistencia a la compresión no bajó tanto como para las otras combinaciones y, por el otro alcanzó muy buena penetración. Podría esperarse que la mejor combinación hubiera sido la que contenía 75% de candelilla y 25% de abeja. Sin embargo, es muy probable que el tiempo de inmersión no haya sido suficiente para que ésta lograra penetrar completamente en la probeta y aun cuando su diferencia a la compresión es mínima con el porcentaje 50%c-50%a se considera que es preferible utilizar este último porcentaje por razones de disminución del tiempo de penetración.

En el **ensayo de impacto**, la diferencia entre las probetas que no fueron sometidas a la inmersión en ceras y las que si lo fueron, no es tan notable como en el ensayo de compresión. Sin embargo, se puede apreciar la presencia de un fenómeno de "amortiguamiento" en las probetas que fueron sumergidas en cera. Dicho fenómeno es más notable en las probetas cocidas a 800°C.

Como es de esperarse, las probetas cocidas a 700°C son menos resistentes al impacto que las cocidas a 800°C cuando no tienen cera, ya que las segundas son más resistentes que las primeras. Este comportamiento se puede apreciar en la siguiente gráfica, en las primeras dos columnas:

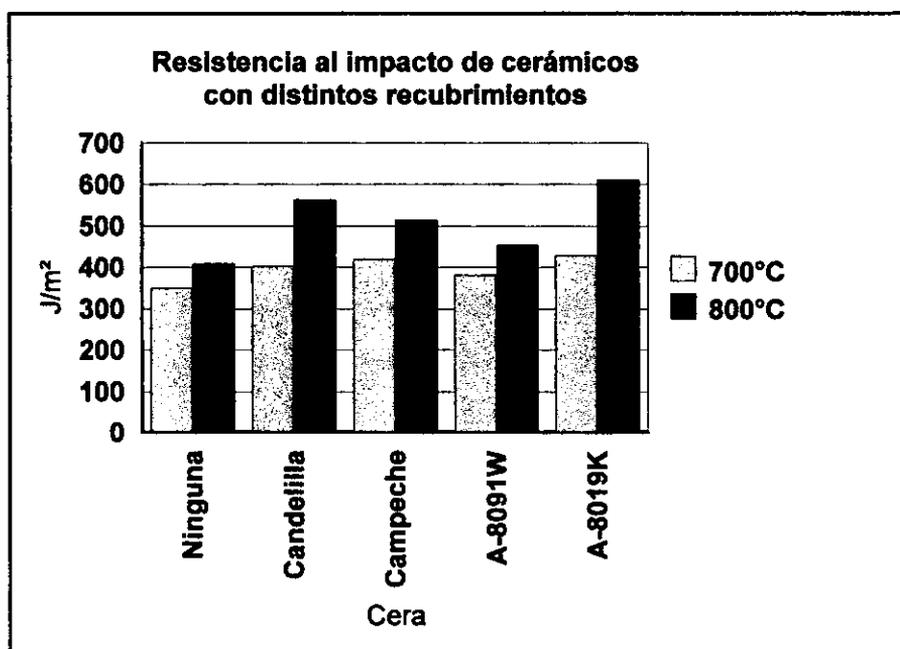


Gráfico 2. Comparación de la resistencia al impacto entre las probetas cocidas a 700°C y 800°C

Conviene recordar que el ensayo de impacto es una energía proporcionada al material en un tiempo menor a su tiempo de respuesta. Por esta razón las probetas cocidas a 700°C, y al tener menor nivel de consolidación que las cocidas a 800°C, presentan en la prueba de impacto menor resistencia pues en ellas no ha comenzado aún la etapa de sinterización.

Al igual que las cerámicas solas, aquellas a las que se les proporcionó el baño de cera presentaron un comportamiento similar, aunque la mejora de esta propiedad fue mucho más significativa en las probetas cocidas a 800°C. Esto se puede deber a que al funcionar la cera

cera como un amortiguador, encuentra un mayor soporte en la cerámica que ya ha empezado a sinterizarse (800°C) que en aquella en que la estructura del material no es tan firme (700°C).

Las probetas cocidas a 700°C e inmersas posteriormente en cera, no presentan un mejoramiento relevante de la resistencia al impacto, en contraste, las probetas cocidas a 800°C la mejora es considerable. Se puede apreciar en la gráfica que la cera de abeja tipo 8019K es la que proporcione mayor resistencia debido a su efecto amortiguador, ya que al ser menos frágil a temperatura ambiente que la candelilla puede absorber mejor la energía de impacto.

En términos generales se percibe un ligero aumento de la energía para fractura. Se considera que ante la aplicación de una carga súbita, el material cerámico con cera, no tiene tiempo de ir acomodando las deformaciones que se van produciendo y la aportación de la ductilidad que puede provenir de las ceras no es de suficiente magnitud para incrementar sustancialmente la tenacidad. En el caso de la resistencia a la compresión, la carga se aplica progresiva y crecientemente y el material con cera tiene mayor oportunidad de acomodar cargas y deformaciones.

La **porosidad** en los cerámicos es una propiedad que afecta directamente sus propiedades mecánicas, así como es un factor importante en la permeabilidad del material y por esta razón es importante saber que tanto se puede disminuir este valor con el baño de cera.

Tal como se puede apreciar en las tablas presentadas en el capítulo anterior, se confirma que las ceras proporcionaron impermeabilidad prácticamente completa al material, lo cual es un indicador de una total ocupación de los poros por parte de estas.

Respecto al acabado superficial fue muy bueno en general, presentando una tonalidad mate y oscureciendo ligeramente el color de la cerámica. La textura al tacto en general es suave, pudiendo darsele a la pieza un acabado final con abrasivos sin que este acabado se pierda o deteriore. Cabe mencionar que en el caso de la cera de campeche no se obtuvo lo anteriormente descrito, presentando a temperatura ambiente problemas de adherencia al tacto. Se considera que, en términos generales, puede constituirse en un acabado alternativo de interés para los artesanos.

V) POSIBLES APLICACIONES

A partir de los resultados encontrados las posibles aplicaciones para este desarrollo se encuentran en las áreas donde es requerido una buena impermeabilidad y una buena resistencia a la compresión en materiales cerámicos artesanales.

El aumento de la resistencia a la compresión así como su mejor resistencia al impacto, nos permiten sugerir como una primera propuesta su utilización en:

- Macetas. Muchas de las fracturas en estos objetos son ocasionadas por el exceso de humedad al que se encuentran sujetas, lo cual deteriora sus propiedades, ocasionando una fractura prematura del material. Esto se evita con el baño de cera que se sugiere en el presente trabajo.
- Contenedores de líquidos a temperatura ambiente. El hecho que se haya incrementado la impermeabilidad de estas cerámicas permite su uso en la fabricación de recipientes destinados a contener líquidos no reactivos a las condiciones atmosféricas normales.
- Jaboneras de cerámica para baños. Se recomienda su uso en este tipo de muebles para baño ya que por su buena impermeabilidad no permiten la penetración del jabón humedecido, sustituyendo con ello el recubrimiento vítreo.
- Godete. El godete es una herramienta de trabajo para los pintores, es una especie de paleta tripoide en la que ellos colocan sus pinturas. Actualmente existen en el mercado diferentes tipos de godetes de material cerámico con un buen soporte pero con recubrimiento vítreo lo cual los hace muy costosos, asimismo existen de material plástico, pero el principal problema que tienen es la inestabilidad originada en la falta de peso. Es por ello, que con esta tecnología propuesta se puede sustituir el recubrimiento vítreo por el baño de cera para estas herramientas, consiguiendo con ello un buen acabado superficial, impermeabilidad ante las pinturas y alta estabilidad por el material de elaboración (cerámica), resultando con esto más económica que su competencia con recubrimiento vítreo.

- Ollitas para contener licores nacionales. Tradicionalmente en las regiones del sureste del país se expenden diferentes tipos de licores en ollitas hechas de cerámica sin ningún recubrimiento, para dar al producto una presentación tradicional. El principal problema que esto ocasiona es que al poco tiempo se pierde el licor por trasminación y evaporación en la superficie externa de la olla. Este recubrimiento puede ser una alternativa de solución para evitar este problema, debido a su alta impermeabilidad. Para ello se sugiere se realicen estudios posteriores acerca de posibles contaminaciones de la bebidas por degradación de las ceras al contacto con el alcohol.

VI) CONCLUSIONES

De lo anteriormente desarrollado y explicado podemos concluir lo siguiente:

1. Se obtuvo una alternativa tecnológica viable para la sustitución del recubrimiento vidriado de las cerámicas para recipientes contenedores de líquidos a temperatura ambiente (hasta 50°C). Se propone utilizar esta tecnología como alternativa a dicho recubrimiento, debido a que los barnices con que se realiza son dañinos para el ser humano por la cantidad de plomo que contienen. Pues como se sabe el plomo es un metal pesado que al ser ingerido por el hombre, su cuerpo no es capaz de eliminarlo, esto puede traer como consecuencia diversas enfermedades tales como el cáncer. Por dicha razón los artesanos mexicanos no pueden exportar, ni siquiera piezas de barro ornamental.
2. Se encontró que el baño de cera además de proporcionar un buen acabado, tal como se planteó en la hipótesis permitió mejorar las propiedades mecánicas del material estudiado (cerámica artesanal) de una manera significativa, al obtenerse del orden de un 100% de incremento de la resistencia a la compresión, una impermeabilización completa y una mejora de la resistencia al impacto .
3. El mejor comportamiento en cuanto a modificación de propiedades obtenido por estas probetas fue proporcionado por la combinación 50% Candelilla - 50% Abeja tipo 8019W, ya que permite una rápida penetración en el material, una mejora considerable de las propiedades mecánicas así como también un buen acabado superficial y alta impermeabilidad.
4. En general, el acabado superficial obtenido permite que la pieza cerámica sea protegida convenientemente ante la humedad, presentando una tonalidad mate muy atractiva, sin ocasionar deformaciones en la superficie suavizándola al tacto.
5. Para posteriores trabajos, se sugiere realizar un estudio más detallado de la resistencia al desgaste de las cerámicas (con y sin ceras), así como de la viscosidad de las ceras y su relación con la temperatura de trabajo y su relación con los tiempos de absorción. Asimismo, la realización de un estudio mediante técnicas de microscopía electrónica de la penetración de las ceras y las superficies de fractura.

6. Cabe mencionar que la inmersión de las cerámicas en las ceras, se hizo con las probetas a temperatura ambiente (20°C a 23°C) al momento de sumergirlas. Es aconsejable realizar un estudio precalentando las cerámicas a la temperatura de trabajo de las ceras, lo que se espera pueda ayudar a disminuir el tiempo de penetración, haciendo más productivo el proceso.
7. También con dicho baño de cera, se encontró en pruebas preliminares, una posible mejora de la resistencia al desgaste de las cerámicas estudiadas. En la siguiente figura se pueden observar las diferentes probetas con sus respectivas ceras, antes y después de la cocción, así como su huella de desbaste en lija.. Es por supuesto necesario, ampliar y profundizar estos estudios en un futuro trabajo para poder emitir juicios más completos.

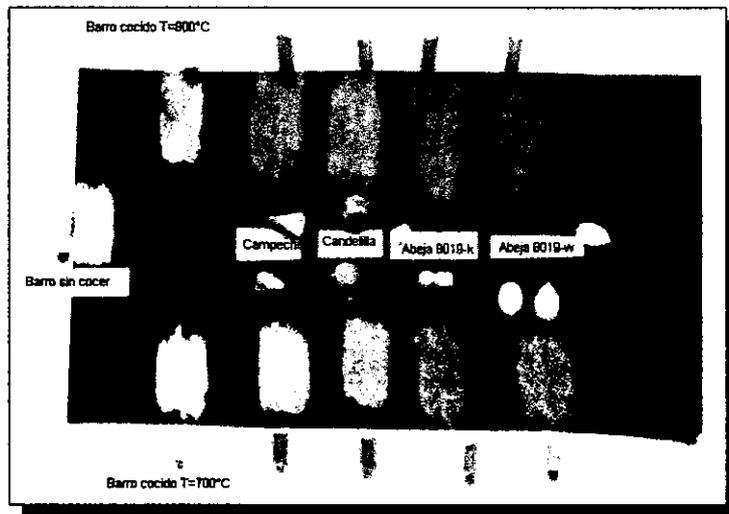


Figura 25. Comparación de la resistencia al desgaste entre todas las muestras

BIBLIOGRAFÍA

1. BARIAND, P., ***“Enciclopedia de los minerales”***, Ed. Vidorama, España, 1979.
2. BUDINSKI, Kenneth G. , ***“Engineering Materials”***, 5ª ed, Ed. Prentice - Hall, New Jersey; EUA, 1996.
1. CALLISTER, W., ***“Ciencia e Ingeniería de los Materiales”***, Ed. Reverté, España, 1995
2. COSTALES, Federico F. y Olson, Delmar W. , ***“Cerámica (para escuelas y pequeñas industrias)”***, Ed. CECSA, México, 1960.
3. INSTITUTO GEOGRÁFICO DE AGOSTINI, ***“Diccionario Atlas de Mineralogía”***, Ed. Teide, 2ª ed., España, 1978.
4. ITURRIAGA G., Jose R., ***“Aplicación de materiales cerámicos en la industria”***, Tesina de Licenciatura, U. Iberoamericana, México, 1992.
5. JASTRZEBSKI, Z.D., ***“Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería”***, 2ª ed., Ed. Interamericana, México, 1979
6. KINGERY; W. D., ***“Maya Pottery Techniques and Technology”*** en Ancient technology to modern science, Vol. 1, Colección: Ceramics and civilization; Ed. The American Ceramic Society Inc, Columbus, Ohio, E.U.A., 1984.
7. LENSE, Esther, ***“Culture contact and ceramic evolution examples from Mesoamerica”*** en The changing roles of ceramics society: 26,000 B.P. to the present, Vol. 5, Colección: Ceramics and civilization, Ed. The American Ceramic Society Inc, Columbus, Ohio, E.U.A., 1984.
8. LYNGGARD, Finn, ***“Tratado de cerámica”***, Ed. Omega, Barcelona, España, 1983.
9. McCOLM and Phil B. Sc. D, ***“Ceramic science for material technologists”***, Ed. Leonard Hill, New York, USA, 1990.
10. MONTTANA A., Crespi R. Y Liborio G. ***“Guía de minerales y rocas”***, Ed. Grijalbo, España, 1980.
11. MUSIKANT, Solomon; ***“What every engineer should know about ceramics”***, Marcel Dekker, Inc. New York; E.U.A., 1990.
12. NOLASCO M. Marcos Y Vazquez M. Alfonso, ***“Diseño y Fabricación de una máquina para pruebas de impacto (En materiales cerámicos arqueológicos)”***, Tesis de licenciatura, FI-UNAM, México, 1993.

13. NORTON, F. H. , ***“Cerámica Fina”***, Ed. Omega, Barcelona, España; 1975.
14. PADOA, Leone, ***“La cocción de productos químicos”***, Ed. Omega, Barcelona, España, 1990.
15. ROMAN, Pampuch, ***“Constitution an properties of ceramic materials”***, Polish Scientific Publishere, 1991.
16. SAIRAM and Clifton, R. J., ***“Pressure - Shear impact investigation of dynamic fragmentation and flow of ceramics”***, en Mechanical testing of ceramics and ceramics composites, Vol. 197, ASME, E.U.A., 1994.
17. SHACKELFORD, F., ***“Ciencia de materiales para ingenieros”***, 3a edición, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, Mexico, 1995
18. VARELA C. Y Leclair, A., ***“Enigmas cerámicos: análisis petrográfico de la cerámica pizarra de Oxkintok, Yucatán, México.”***
19. WYCKOFF, J. , ***“Geología”***, Ed. Novaro, S.A. México, 1966.

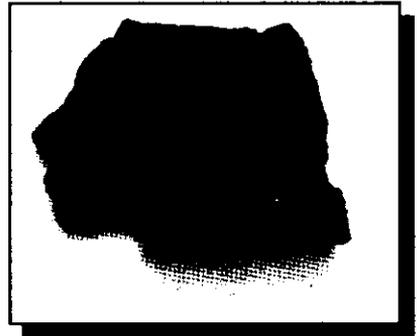
GLOSARIO

ALOFANA

Mineral amorfo; silicato hidratado de aluminio, tiene un brillo resinoso. Si se encuentra en estado puro es incoloro, si no, presenta coloración verde o parda por la presencia de impurezas.

ARCILLA

Las arcillas se derivan de los feldespatos, tales como el granito. Este grupo de minerales tienen la fórmula $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$. Según las condiciones en que se encuentren, dan lugar a los diferentes tipos de arcillas, por ejemplo: el agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, descomponen al feldespato en sílice (SiO_2), óxidos de aluminio (Al_2O_3) y carbonato de potasio (K_2CO_3), el cual se elimina por disolución.

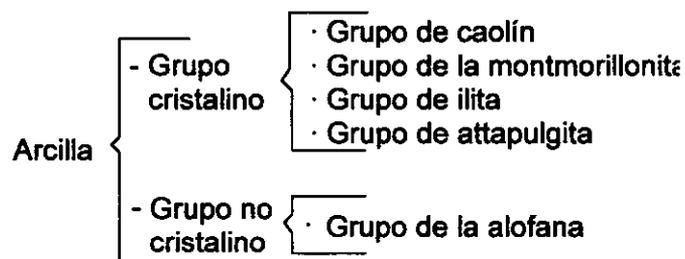


El sílice y la alúmina al combinarse con el agua forman la caolinita cuya fórmula es: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Se clasifican en arcillas limosas, que son aquellas en que se encuentran las partículas más cuarzosas, y en arcillas finas, con una granulometría más reducida.

Su tamaño de partícula oscila entre las $62\mu m$ y $4\mu m$, aunque puede ser menor. Se le considera como un agente mineral terroso que se compone de silicatos de aluminio hidratados. Presenta tres estados estructurales, principalmente, los cuales son:

- *Plástico*, cuando está suficientemente pulverizado y humedecido.
- *Rígido*, en el momento en que está seco y,
- *Vitréo*, cuando se calcina a temperaturas lo suficientemente elevadas.

Básicamente, está constituida por:



APATITA

Fluorofosfato de calcio o clorofosfato de calcio, incoloro, blanquesino o coloreado por diversos colores, esto a causa de las impurezas. Su sistema cristalino es el hexagonal. Se le puede encontrar en forma de cristales en pegmatitas, en vetas hidrotermales en los Alpes y en algunos yacimientos metalíferos en nuestro país (México).



AZURITA $\{Cu_3(OH/CO_3)_2\}$

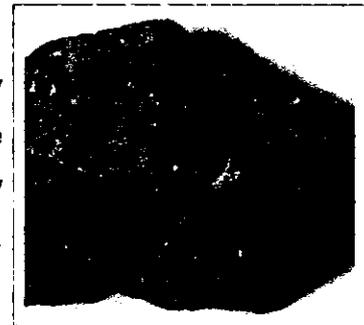
Carbonato de cobre de color azul, cuya estructura cristalina comprende un sistema monoclinico. Se encuentra en yacimientos de cobre, en donde deriva de la alteración de los sulfuros de cobre y tiende a transformarse en malaquita.

En la Edad Media era muy utilizada como colorante, pero con el tiempo comienza a enverdecer (por su transformación en malaquita). Actualmente es importante desde el punto de vista científico y coleccionista.



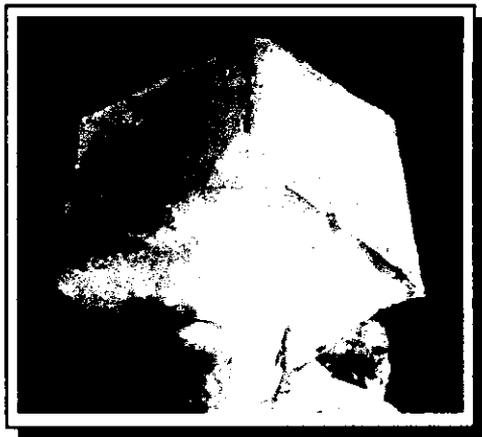
BASALTO

Roca magmática efusiva, probablemente es la más difundida y abundante sobre la corteza terrestre. Son rocas bastante oscuras de color, generalmente compuestas de granos muy finos, pero en ocasiones muy burdas; son pesados, compactas, de color rojizo, verdusco e incluso negro.



CALCITA {CaCO₃}

Carbonato de calcio cristalizado de estructura trigonal. Puede ser incoloro, blanco o coloreado, esto último por la presencia de hierro o manganeso. Las formas más comunes en que se le encuentran son la romboédrica, escalenoédrica o prismática. Bajo la acción del ácido clorhídrico emite una constante efervescencia, lo cual permite distinguirla de otros minerales blancos con los que se suele confundir,



tales como: la baritina, fluorita y cuarzo. Los cristales puros se utilizan para la construcción de prismas polarizadores para el funcionamiento de los microscopios de mineralogía. Como masa compacta, se utiliza en la industria de la construcción (cemento, cal, piedras y piedras ornamentales), en metalurgia se usa como fundente y escorificante, asimismo, las masas de rocas sueltas se utilizan como elementos para pulir y como material de carga en la industria de la goma y en la fabricación de barnices.

CAOLÍN

Roca compuesta de caolinita y otros minerales de su grupo, de color generalmente blanco o gris claro. Se emplea en la elaboración de cerámicas y porcelanas.

CAOLINITA {Al₄[(OH)₈/Si₄O₁₀]}

Silicato básico de aluminio; es de color blanco cuando está puro. Aunque generalmente su color depende de las impurezas presentes, éste varía desde el gris amarillento hasta el castaño. Presenta un sistema cristalino tipo monoclinico o triclinico. Se forma por alteración de los feldespatos, debida a las aguas termales. Es un componente muy importante de la arcilla, de ahí que sea muy empleada en la industria de las porcelanas.



CINABRIO {HgS}

Sulfuro de mercurio de color rojo bermellón, cristalizado en un sistema trigonal. Rara vez se le encuentra en masas granulares. Es el mineral más importante del mercurio, por ello, es muy empleado para la obtención de este último a nivel industrial.

Se ha utilizado mucho como pigmento mineral con el nombre de bermellón.



DOLOMITA {CaMg(CO₃)₂}

Después de la calcita, es el carbonato más común en la corteza terrestre ya que es un constituyente fundamental de las rocas sedimentarias carbonatadas formadas. Su estructura cristalina es trigonal. Comúnmente se presenta en cristales rombododecaédricos, incoloros o transparentes, de color blanco, rosa o amarillo. Se puede encontrar en bellos cristales en los yacimientos metalíferos con cobre nativo.

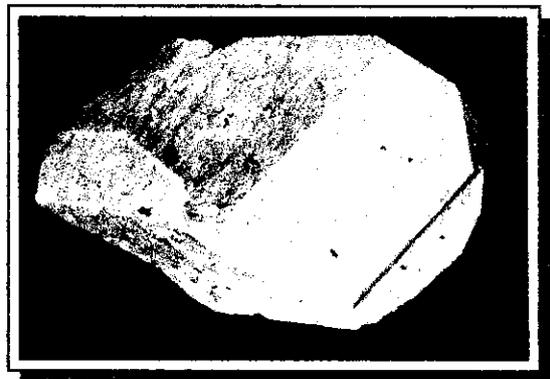


DUREZA DE CUERO

Consistencia que, de acuerdo con el criterio y experiencia del ceramista, debe tener la arcilla para su uso, es decir, la arcilla estará entre mojada y seca, lo suficientemente dura para poder ser manejada pero también suficientemente blanda como para ser trabajada.

FELDESPATOS {(K,Na)₂O•Al₂O₃•6SiO₂}

Son silicatos de aluminio con potasio, sodio, calcio y bario. Su estructura cristalina puede ser monoclinica o triclinica. Los más importantes son los potásicos, tales como la ortoclasa que se muestra en la figura. Están muy difundidos sobre todo en las rocas ígneas y metamórficas, así como en algunas areniscas.



FOSFATOS

Minerales formados por la combinación química de uno o más metales con el grupo aniónico (PO_4^{3-}). Por ejemplo, si en lugar del fósforo está presente el vanadio entonces, se tienen los vanadatos como la vanadinita. El más común de los fosfatos es el apatito.

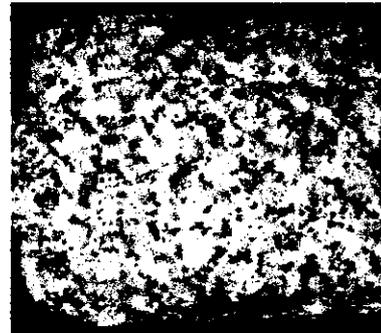


GRANITO

Roca magmática intrusiva; constituida esencialmente por cuarzo, ortoclasa, feldespato, biotita, piritita, circonio, turmalina y monacita.

Son rocas ácidas, muy claras, a menudo blancas, rosadas, rojas, su estructura granular puede ser uniforme o bien con feldespatos muy diferenciados del resto de los minerales, es este caso se le considera granito con feldespato.

El granito es una roca muy difundida, generalmente utilizada para fines ornamentales y en la industria de construcción.

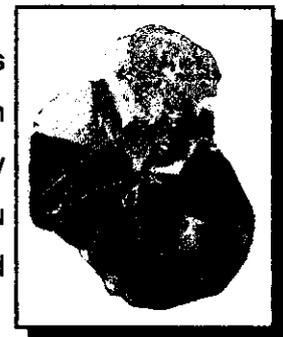


HALLOYSITA

Es un silicato hidratado de aluminio cuya estructura cristalina corresponde al sistema monoclinico. Es también un mineral incoloro, que puede encontrarse en yacimientos caoliníticos mezclado con caolinita y otros minerales; además, forma depósitos de arcilla.

HEMATITA

Su sistema cristalino es trigonal, se encuentra en cristales romboédricos simples o muy ricos en caras, se le puede encontrar en formas laminares, micáceas, escamosas, granulares, fibrosas y terrosas. Su color varía desde el negro de hierro hasta el rojo vivo; su brillo metálico se presenta en las partes bien cristalizadas; la variedad roja se denomina hematites roja.



MAGNESITA

Carbonato de magnesio de estructura trigonal, se puede encontrar en cristales tabulares de sección hexagonal. Es vítreo, de color blanco o pardo amarillento, en forma de masas compactas, terrosas o granulares, blancas o grisáceas. De este carbonato se extraen las sales de magnesio y se utiliza en la fabricación de vidrio refractario.



MALAQUITA $\{Cu_2[(OH)_2/CO_3]\}$

Carbonato básico de cobre, cuya estructura cristalina es monoclínica. Tiene un bello color verde, se presenta generalmente en masas fibrosas y en costras de finas agujas y estalactitas.

Es muy empleada como piedra decorativa en forma de lámina pulida. También, fue usada para la fabricación de colorantes inorgánicos, conocido como verde montano.



MINERAL

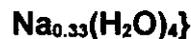
Es un objeto sólido, natural, inorgánico, cuyas características físicas y químicas son definidas y constantes. El término mineral tiene dos significados: uno científico y uno industrial.

- a. *Punto de vista científico*, en este contexto se establece que un mineral, tal como ya se mencionó, es un "cuerpo homogéneo que tiene la misma composición química en todas sus partes y con características físicas: estructura atómica, comportamiento óptico, etc., bien definidas e individualizables", esto se presenta con frecuencia en los cristales (especímenes de estructura geométrica).



- b. *Punto de vista industrial*, se considera, la mayoría de las veces, que mineral es todo aquello que se puede “extraer de una mina con una cierta utilidad, refiriéndose particularmente a los minerales metalíferos (cobre, hierro, estaño, etc.), con excepción de las piedras preciosas. El mineral no tiene necesariamente la misma composición en todos sus puntos e incluso tiene, a menudo, composición muy variada, debido a la presencia de huéspedes inútiles que constituyen la ganga. La riqueza es el contenido utilizable de mineral o de metal”.

MONTMORILLONITA $\{(Al_{1.67}Mg_{0.33})[(OH)_2/Si_4O_{10}]^{0.33-}$



Silicato hidratado de aluminio con cantidades variables de sodio y magnesio, su sistema cristalino es monoclinico y, es uno de los principales constituyentes de las arcillas.

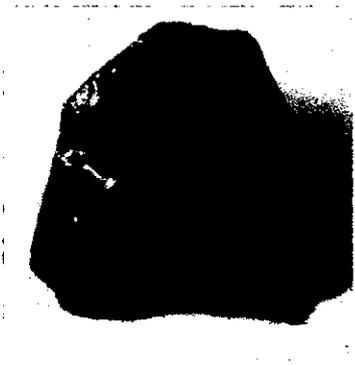
Es un mineral industrial muy empleado como absorbente para purificar y decolorar líquidos, como base para cosméticos y medicinas, así mismo es muy usado en perforaciones.



OBSIDIANA

Roca magmática efusiva generada debido a un repentino enfriamiento de lavas, generalmente ricas en sílice. Regularmente su color es negro con brillo vítreo, opaco; solo los bordes, son en ocasiones, translúcidos y muestran colores grises o verde botella.

En la prehistoria, se le utilizó para la fabricación de utensilios y en escultura, actualmente se utiliza a nivel industrial para la fabricación de la lana de roca.



ROCAS ÍGNEAS

Estas rocas se forman cuando el magma líquido del manto superior sube hasta la corteza terrestre donde se enfría y solidifica, ejemplo de ello son la lava fría y el granito. Existen dos tipos de rocas ígneas:

- i. Rocas intrusivas. Solidifican en el interior de la corteza terrestre y solo aparecen en la superficie después de que las rocas de la capa superior han sido erosionadas.
- ii. Rocas efusivas o volcánicas. Son formadas por la actividad volcánica, cuando el magma que sale a la superficie durante una erupción en forma de lava, se enfría y solidifica.



ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas desmoronadas por efecto de la erosión se dividen en pequeños trozos de rocas y minerales, éstas junto con restos de seres vivos forman el llamado sedimento, el cual es llevado hasta un nuevo lugar como laderas de ríos o el mar. Los sedimentos son depositados en un lecho en el cual son enterrados y aglutinados por la acción del agua. Después de un tiempo, las partículas se unen para formar nuevas rocas, a estas últimas se les conoce como rocas sedimentarias, tales como: las tierras arenosas, las pizarras arcillosas, las piedras calizas y la sal.

La diversidad de capas o estratos que en ocasiones podemos observar a simple vista en las laderas o restos de deltas, se deben a los sedimentos que en estos lugares se han depositado.

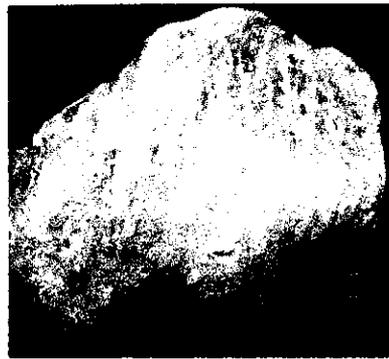
ROCAS METAMÓRFICAS

Son formadas a partir de las rocas ígneas y/o sedimentarias transformadas por el calor, la presión o por líquidos o gases que se filtran a través de ellas, por ejemplo el mármol, gneis y esquistos (por ejemplo el calcáreo del cual se obtienen mármoles muy costosos).

TALCO $\{Mg_3[(OH)_2/Si_4O_{10}]\}$

Filosilicato básico de magnesio, monoclinico. Se le puede encontrar en forma de agregados laminares compactos y escamosos; las laminillas pueden ser pseudo hexagonales y flexibles. Los colores más comunes que presentan son:

blanco, blanco verdoso, gris, gris verdusco y castaño. Es muy empleado en forma de polvo en la industria del papel, la goma, en la textil, cosméticos y como colorantes.



ANEXO I

Norma ASTM: C 773 - 88 (año 1993)

“Método de Prueba Standard para Resistencia a la
Compresión de Materiales Cerámicos Cocidos”.

1 Aplicación

- 1.1 Este método abarca dos procedimientos de prueba (A y B), para la determinación de la resistencia a la compresión de materiales cerámicos cocidos.
- 1.2 El método A es generalmente aplicable a productos cerámicos de niveles de resistencia bajos hasta los moderadamente altos, es decir, hasta 150 000 psi o 1030 MPa.
- 1.3 El método B es utilizado específicamente, para examinar cerámicas de alta resistencia, arriba de los 100 000 psi o 690 MPa.

2 Documentos de referencia

2.1 ASTM Standards:

- E4 Verificación de Máquinas de Prueba
- E6 Definiciones de Términos Relacionados con Métodos de Ensayos Mecánicos.
- E165 Práctica Recomendada para el Método de Inspección de Penetración líquida.

3 Importancia

- 3.1 La resistencia a la compresión es la determinación de la máxima resistencia de un material cerámico a este tipo de cargas. Idealmente, a los cerámicos debería dárseles más importancia en este uso. Esta prueba es una medida de la utilidad del potencial de tolerancia de carga de un cerámico.

MÉTODO A

4 Aparato

- 4.1 *Máquina de Prueba.* Puede ser usada cualquier máquina de prueba acorde a los métodos E4 y a los requerimientos de velocidad de prueba señalados en las secciones 9 y 12 de este método.

- 4.2 *Bloque de Soporte Esférico.* En las máquinas de prueba verticales, el bloque de soporte esférico debe ser suspendido de la cabeza superior de la máquina de manera que la platina superior de la máquina (superficie inferior del bloque de soporte esférico) permanezca en una posición central (superficies esféricas en contacto directo) cuando no ha sido cargada. Las superficies esféricas deberán estar bien lubricadas, y el centro de curvatura deberá descansar sobre la superficie inferior de la platina. La diagonal o diámetro de la platina será ligeramente mayor que la diagonal de 1½ in (38.1 mm) de los bloques de contacto para facilitar el centrado exacto de las muestras.
- 4.3 *Bloques de contacto.* Deberán ser de acero laminado en frío, se utilizarán entre la muestra de prueba y las platinas de la máquina. Estos bloques serán de 1½ in por 5/8 a ¾" (15.9 a 19.1 mm) de ancho, y las caras o superficies paralelas. Los bloques de contacto serán limpiados y re-alisados. Si es necesario, después de cada prueba, se debe cuidar que el grosor permanezca sobre ½" (12.7 mm). Si el bloque de contacto se raja o deforma durante la prueba, deberá ser reemplazado.
- 4.4 *Cojinetes amortiguadores (almohadillas).* Se emplearán estos dispositivos entre la muestra a examinar y los bloques de contacto para ayudar en la distribución de la carga. Para cada muestra se utilizarán almohadillas nuevas. En la siguiente tabla se muestran los materiales más apropiados para almohadillas, seleccionados de acuerdo al rango de resistencia a la compresión del material que se examina:

Rango de resistencia a la compresión [psi (MPa)]	Almohadilla
5000 a 50 000 incl (34.5 a 345)	Papel absorbente 1/64" (0.4 mm) de espesor
Entre 50 000 y 150 000 incl (345 a 1030)	Acero templado 1/32" (0.8 mm) de espesor con una dureza Rockwell de 65HB máx.

5 Especímenes de prueba

- 5.1 *Preparación.* La muestra a examinarse será en forma de cilindros rectos. Estos cilindros pueden ser formados y cocidos para el propósito de la prueba de compresión, o bien pueden ser cortados por medio de aserramiento o taladrado. Las orillas de toda muestra deberán ser pulidas para producir caras o superficies planas y paralelas. Estas superficies deberán ser perpendiculares al eje de la muestra y paralelas dentro de 15min de arco (0.044 rad).
- 5.2 *Tamaño.* El tamaño de la muestra deben no ser mayores del 80% requerido de la capacidad estimada de la máquina de prueba. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Esfuerzo máximo a la compresión [psi (MPa)]	Capacidad de la máquina [lb (kN)]					
	10 000 (44)		20 000 (89)		30 000 (134)	
	in	mm	in	mm	in	mm
10 000 (69)	1	25.4	1.43	36.3	1.75	44.4
50 000 (355)	0.45	11.5	0.64	16.3	0.78	19.8
150 000 (1034)	0.26	6.6	0.37	9.4	0.45	11.5

5.3 *Número de muestras.* El número de muestras deberá no ser menor de diez.

6 Procedimiento

6.1 *Revisión por coloración.* El teñido de la muestra realizarse de acuerdo con el método E165 antes de la prueba. Se deberá descartar cualquier pieza que exhiba rotura o defectos a simple vista.

6.2 La muestra a examinar se deberá limpiar con un solvente apropiado después de pulir, a continuación se sumergirá en un baño ultrasónico en una solución de detergente caliente. Después se enjuagará en agua caliente y, se secará a $110 \pm 2^\circ\text{C}$ ($230 \pm 4^\circ\text{F}$) por dos horas, finalmente se enfriarán a temperatura ambiente en un desecador.

6.3 Las probetas deberán centrarse cuidadosamente en la máquina entre los bloques de contacto. Se colocará una protección adecuada alrededor de la muestra para desviar los fragmentos que vuelen al fracturarla.

6.4 La carga tendrá que ser aplicada de manera continua y sin chocar con la pieza (ya que esto ocasionará que la pieza falle antes de realizar la prueba), hasta el último fracaso. La carga dependerá de la resistencia a la compresión del material a probarse, tal como se muestra en la siguiente tabla:

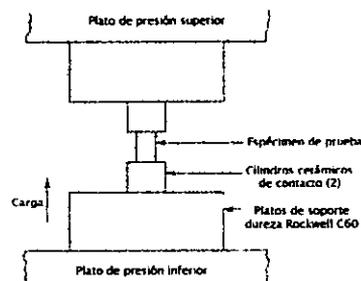


Figura 1. Aparato para pruebas de compresión

Esfuerzo a la compresión		Diámetro de la probeta		Velocidad de aplicación de la carga	
psi	MPa	in	mm	Lb _r / min	kN / min
10 000	69	1	25.4	8 000	35
50 000	345	0.64	16.3	16 000	70
150 000	1,034	0.45	11.5	24 000	105

“Método de Prueba Standard para Resistencia al
Impacto de Materiales Cerámicos Cocidos”.

1 Aplicación

- 1.1 Prueba de impacto de cerámicos sólidos y huecos.
- 1.2 Prueba de cortante en cerámicos sólidos, los especímenes pueden ser vidriados o no.

2 Significado y uso

- 2.1 La finalidad de este método es predecir la resistencia ante las cargas de impacto en el servicio.

3 Aparatos

- 3.1 El aparato para la prueba de impacto es de tipo pendular, el cual está conformado de un dispositivo con las siguientes características:
 - 3.1.1 Una almádana¹ de acero de medida específica y dureza Rockwell C55.
 - 3.1.2 Soporte para la almádana suspendido en “V”.
 - 3.1.3 Prevenir fallas por medio de un disparador fijo, asimismo deberá dar resultados reproducibles independientemente del operario.
 - 3.1.4 Cuidar de tener probetas en las quijadas de resorte frente al soporte metálico rígido.
 - 3.1.5 Micrómetro para mediciones de espesor de probetas que debe dar lecturas de 0.03 mm (0.01 in).

4 Probetas de prueba

- 4.1 Al seleccionar las probetas se cuidará que sean representativas de un lote de muestras existentes. En general, la prueba de impacto deberá ser basada sobre un mínimo de diez probetas y para la prueba de corte se usarán al menos cinco.
- 4.2 Las probetas serán seleccionadas acústicamente y por defectos físicos obvios antes de las pruebas.

¹ Mazo de hierro que proporciona una energía específica, necesaria para producir el impacto.

5 Procedimiento para realizar la prueba de impacto en cerámicas sólidas

5.1 Se monta el tubo cilíndrico mostrado en figura 2 sobre el rebote "C", se coloca de tal forma que los tres baleros colocados al final del tubo cilíndrico estén en contacto y simétricos con respecto a la porción central del espécimen parado sobre el borde del plato. El espécimen puede ser probado con uno u otro (con la cara o el revés del precursor); en general, una falla de bajo valor se obtiene cuando la cara se nivela. El paro del regresador se ajusta pues la cara esférica de la muesca "D" toca justo la superficie del espécimen cuando la muesca está colgando libremente. En este momento se aprietan las dos tuercas de mariposa en la base del regresador.

Nota 1. En esta parte de la prueba el tubo cilíndrico reemplaza el ángulo de agarre, esto se muestra en la figura 2 en posición sobre el rebotador "C".

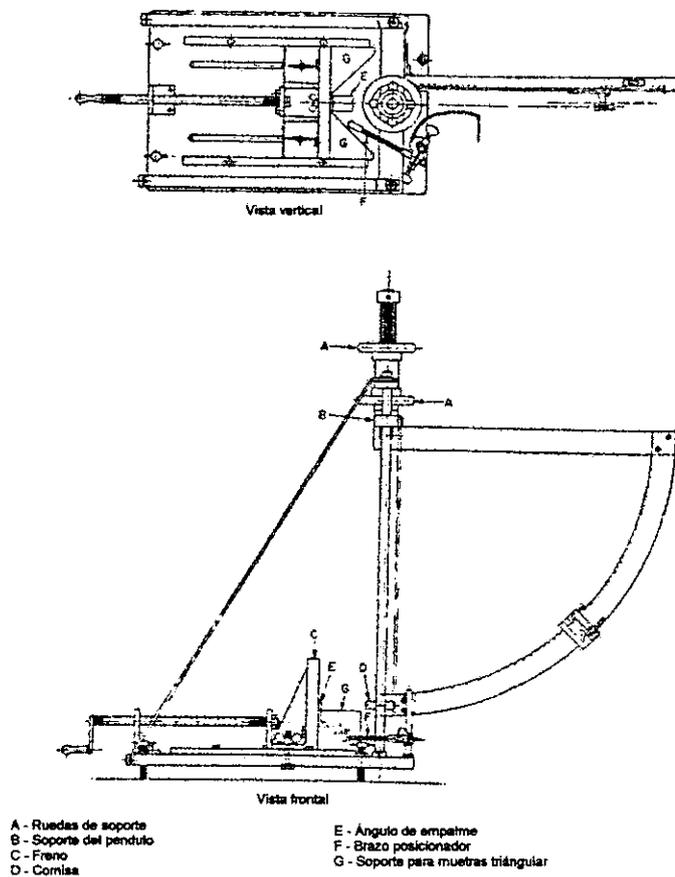


Figura 2. Aparato para pruebas de impacto

5.2 Los brazos posicionadores "F" se ajustan y comprimiéndolos por medio de su llave de chaveta hasta que la orilla de la manga y la pieza coincidan. Los sujetadores de pinzas se ajustan a una posición vertical después de ajustar el espécimen, el péndulo deberá golpear en la misma falla; esto es arriba de la mitad. Los brazos se ajustan a la superficie de la cubierta de goma, en el ángulo correcto esto indica que el vástago tendrá contacto con el arillo de la muestra; la llave de la chaveta se moverá para ajustar la posición de los brazos, sujetando el espécimen nuevamente al tubo cilíndrico. Ajustando nuevamente la barra soporte del péndulo "B" y cerrando en posición por medio de las perillas "A", la muesca deberá golpear al centro del espécimen.

5.3 Con los ajustes preliminares completos, se sujeta el espécimen a un programa de impactos con energías desde 0.027J (0.02 ft·lb_f) e incrementos de 0.014J (0.01 ft·lb_f) hasta iniciar el agrietamiento, incrementándose después en 0.027J (0.02 ft·lb_f) después de esto, hasta la falla.

ANEXO II

En este segundo anexo se podrán observar diferentes micrografías de la estructura de las cerámicas con que se trabajaron, con y sin cera. Estas fueron obtenidas en el microscopio electrónico de barrido del Instituto de Investigación en Materiales (UNAM).

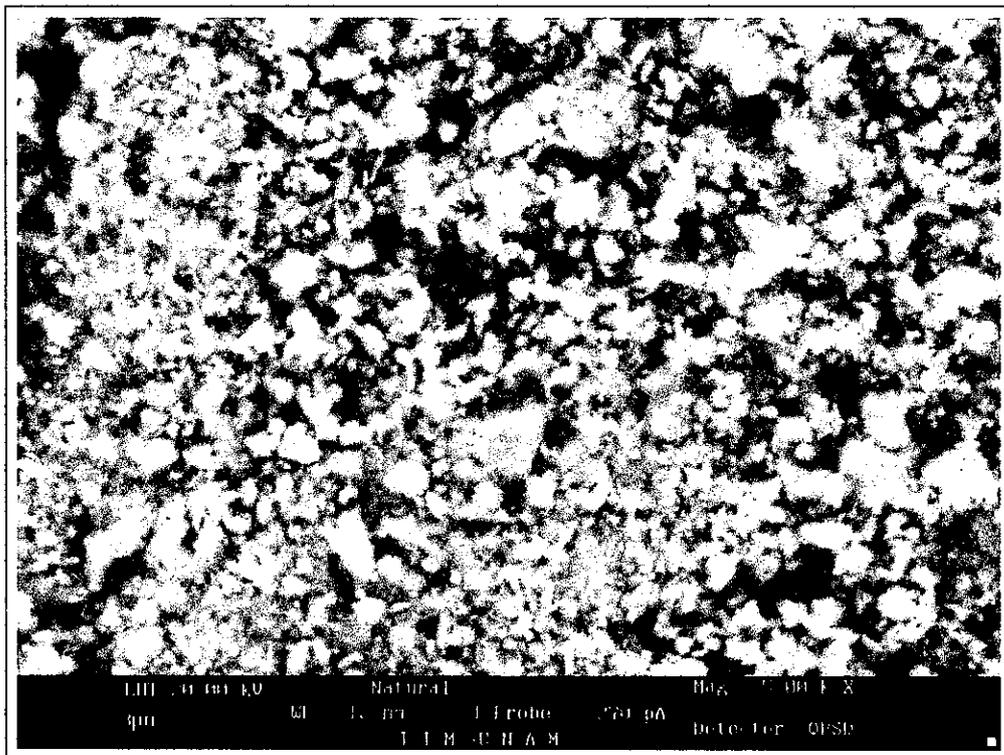


Figura 1

La microfotografía anterior muestra la estructura del barro con que se trabajo, antes de ser cocido, el número de aumentos en que se presenta es de 5000X.

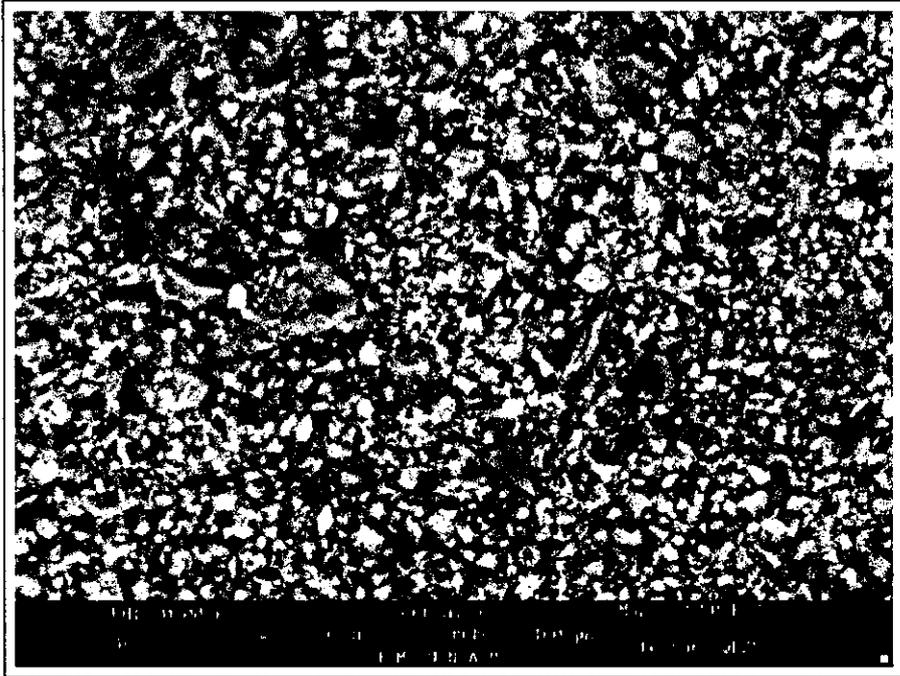


Figura 2

La figura 2, muestra la estructura del barro ya cocido a 700°C, con un aumento de 2500X. Notese la diferencia de color y la forma de los granos, debidas a la cocción, entre esta y la micrografía de la figura 1.

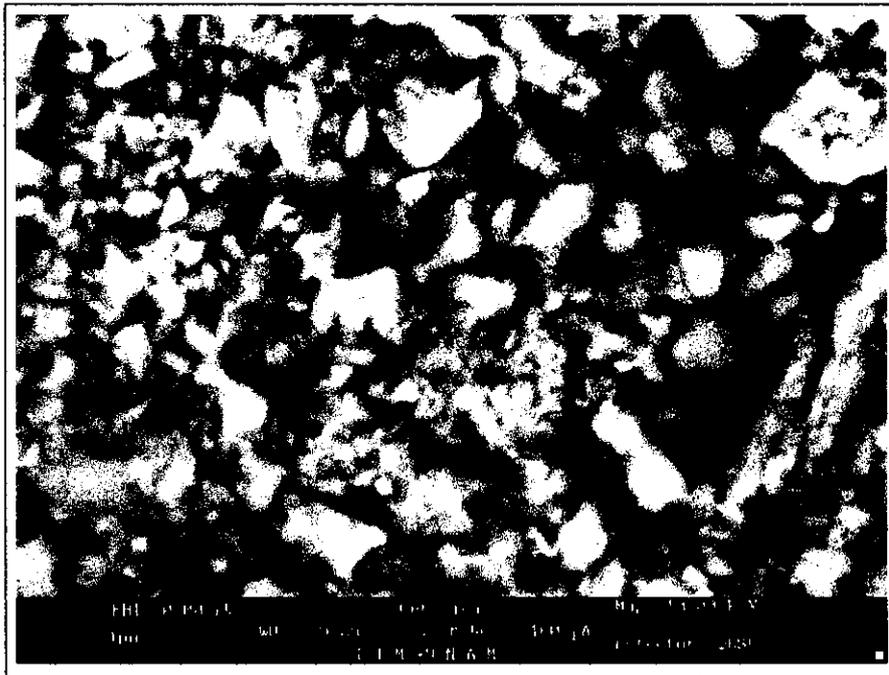


Figura 3

Misma muestra que la microfotografía anterior, pero ahora con un aumento de 1000X; en ésta se puede apreciar mejor el tamaño de grano y los poros existentes en la microestructura.

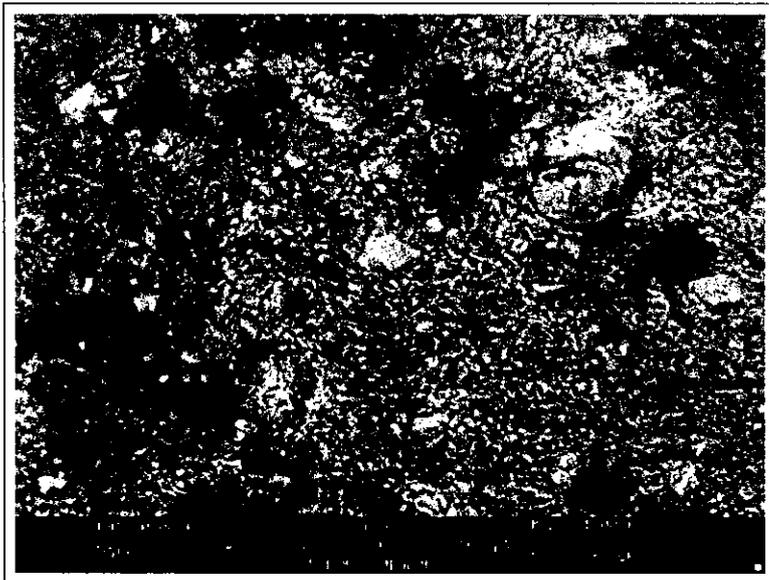


Figura 4

En esta micrografía se muestra la estructura del barro después del baño de inmersión en cera de candelilla; la imagen se maneja a 1000X. Notese en la estructura que la cera forma hojuelas (también llamadas lamelas) sobre el barro, asimismo se ve la penetración de esta en los poros. Las manchas negras que se observan son impurezas en superficie de la muestra.

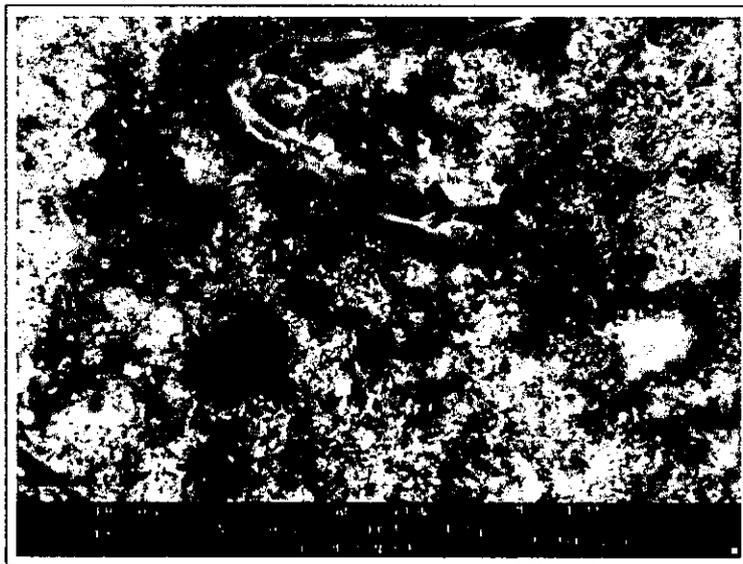


Figura 5

En la micrografía de la figura 5, se puede observar tanto la estructura del barro ya cocido a 700°C como la cera de abeja. La estructura de barro son las partes más blancas, mientras que la cera son las partes más oscuras, la cual forma lamelas en la estructura de barro; con esto se confirma que efectivamente la cera penetra a través de los poros de la estructura cerámica. La figura anterior se muestra a 1000X.

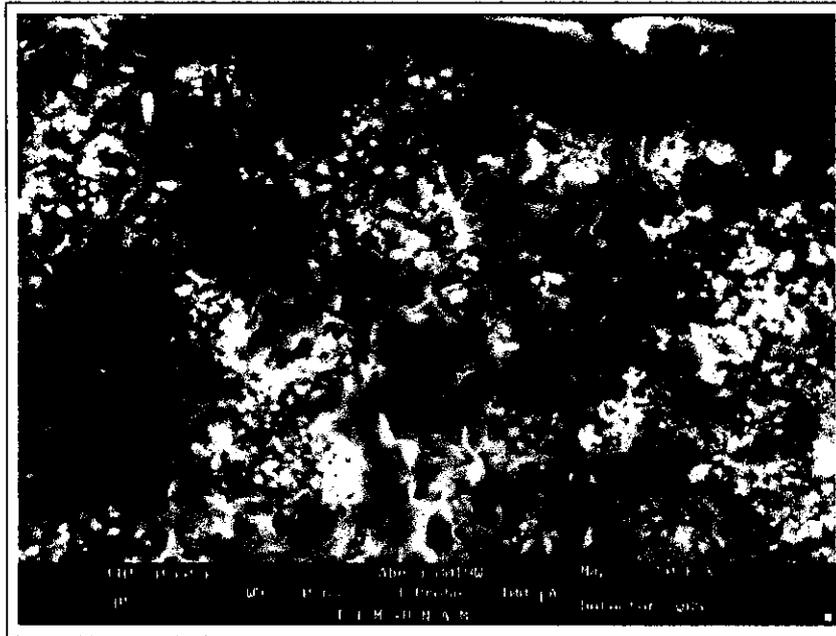


Figura 6

La figura 6, es una vista ampliada (2500X) de la micrografía anterior, aquí se puede observar con mayor claridad lo anteriormente expuesto.

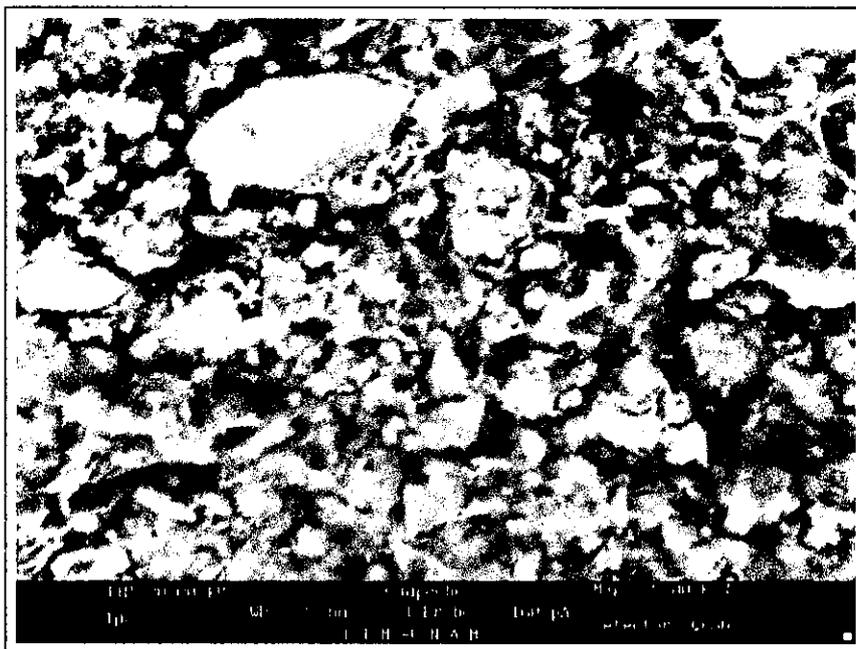


Figura 7

En la micrografía anterior se puede apreciar como la cera de campeche ha cubierto totalmente los granos de la estructura cerámica, esto es debido a la baja viscosidad de dicha cera. Además ha formado lamelas entre los intersticios que se encuentran entre los granos. La figura se muestra a 5000X.

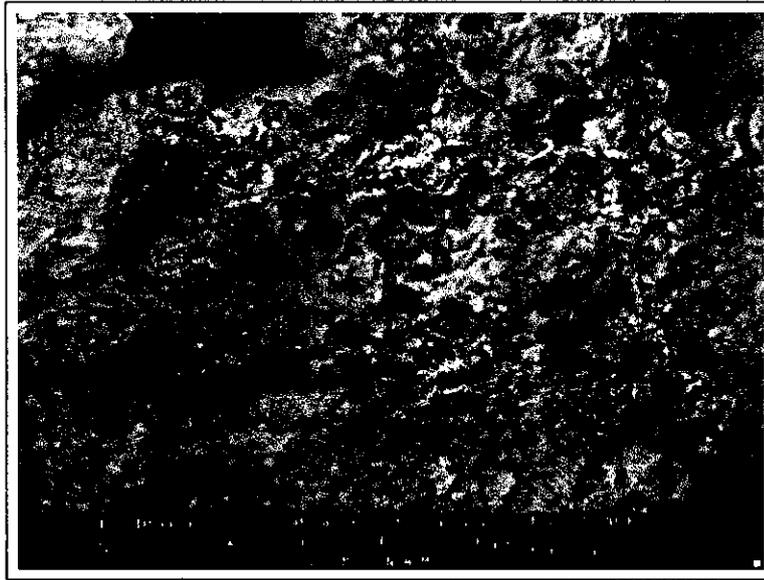


Figura 8

En la figura 8, se puede observar como la cera de mezcla de 50% candelilla - 50% abeja ha cubierto por completo los granos de la estructura, del barro cocido a 800°C, impidiendo con ello distinguirlos, esto es consecuencia de una disminución de la viscosidad de la candelilla, por lo cual ha tapado por completo los intersticios de la estructura. Los huecos observados en la micrografía son resultado de la fractura realizada a la probeta de donde se obtuvo.



Figura 9

En la figura 9, se tiene la misma combinación de ceras de la figura 8, pero en una cerámica cocida a 700°C. Y al igual que en la anterior se combinan las propiedades de ambas no solo penetrando completamente en los poros sino también cubriendo completamente la estructura, lo cual le proporciona mayor resistencia al material cerámico.

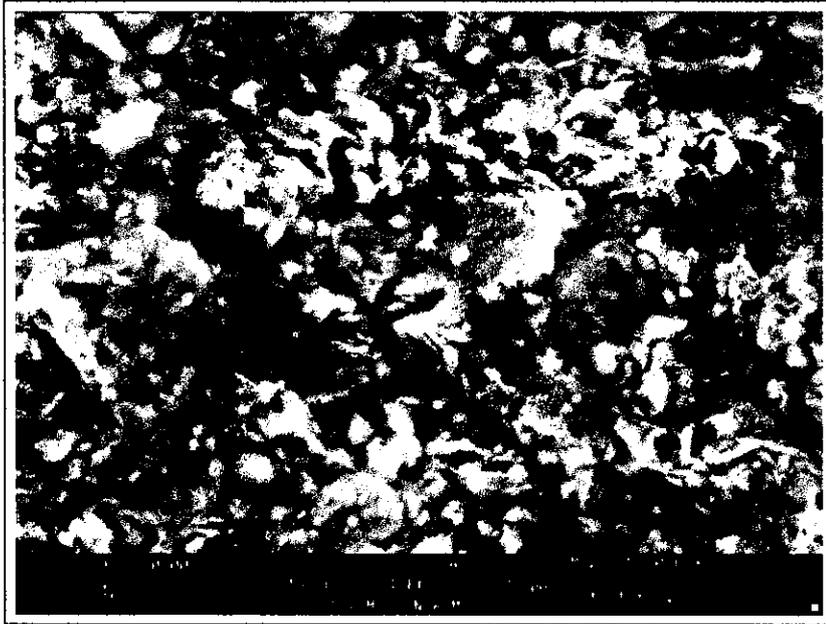


Figura 10

La figura 10 es una micrografía de la mezcla 75% Candelilla - 25% Abeja a 5000X, en la cerámica. Aquí se puede observar que si bien los granos se cubren (tal como en la figura 9), debido al porcentaje de la mezcla, la cera no logra penetrar por completo por lo tanto, existe mayor cantidad de intersticios en el material.

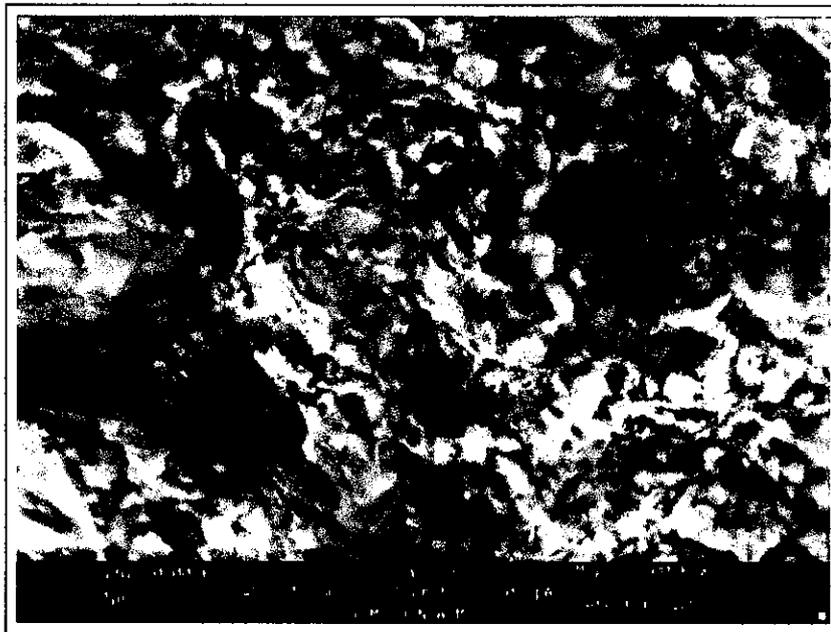


Figura 11

A diferencia de las dos anteriores, la figura 11 muestran con mayor claridad las lamelas en la estructura cerámica, esto es debido al porcentaje de la mezcla con la que se realizó el baño de inmersión de la probeta. La figura también se muestra a 5000X.