

67
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE
DIVERSOS MATERIALES CERAMICOS INDUSTRIALES,
EMPLEANDO ENSAYOS DE IMPACTO Y COMPRESION,
FRACTOGRAFIA Y MICROANALISIS.

T E S I S

Que para obtener el Titulo de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a n

JAIME ROMAN GUTIERREZ MIRANDA

VICTOR ROSASLANDA ARGUMEDO

EFRAIN NAJERA ROMERO



Director de Tesis:

M. en C. ARTURO BARBA PINGARRON

México, D. F.

1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

- INDICE -

	PÁGINA No.
CAPITULO I INTRODUCCION.....	1,2
CAPITULO II DEFINICION, CLASIFICACION Y GENERALIDADES.....	3
DE PRODUCTOS CERAMICOS.....	3
II.1 CLASIFICACION DE LA CERAMICA.....	3
II.1.1 CERAMICA ARTESANAL.....	3
II.1.2 CERAMICA SEMI-INDUSTRIAL.....	4
II.1.3 CERAMICA INDUSTRIAL.....	4
II.1.4 CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA.....	4
II.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LA CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA.....	5
II.3 FABRICACION DE OBJETOS CERAMICOS TRADICIONALES.....	5
II.3.1 MATERIAS PRIMAS.....	5
II.3.2 PROPIEDADES Y COMPONENTES.....	6
II.3.3 ELABORACION.....	6
II.3.4 HORNEADO DE LOS PRODUCTOS.....	7,8
CAPITULO III PRODUCTOS CERAMICOS.....	9
III.1 PRODUCTOS DE ARCILLA.....	9
III.2 LADRILLOS LOZETAS Y MOSAICOS.....	9
III.3 LOZA DE BARRO.....	9
III.4 PORCELANA.....	10
III.5 REFRACTARIOS.....	10
III.5.1 CLASIFICACION DE LOS REFRACTARIOS.....	10
III.5.1.1 REFRACTARIOS ACIDOS.....	10
III.5.1.2 REFRACTARIOS BASICOS.....	11
III.5.1.3 REFRACTARIOS NEUTROS.....	11
III.6 CERAMICAS ELECTRICAS Y MAGNETICAS.....	11
III.7 VIDRIOS.....	12
III.8 MATERIALES PIROCERAMICOS.....	13
CAPITULO IV ESTRUCTURA DE MATERIALES CERAMICOS.....	14

IV.1 ESTRUCTURAS DE SILICATO.....	14
IV.1.1 COMPUESTOS DE SILICATOS.....	14
IV.1.2 ESTRUCTURAS DE ANILLO Y CADENA.....	15
IV.1.3 ESTRUCTURAS LAMINARES.....	15
IV.1.4 SILICE.....	16
IV.2 IMPERFECCIONES EN LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS.....	17
IV.2.1 DEFECTOS PUNTUALES.....	17,18
IV.2.2 DEFECTOS SUPERFICIALES.....	19,20

CAPITULO V PROPIEDADES ELECTRICAS Y TERMICAS DE LOS

MATERIALES CERAMICOS.....	21-23
V.1 PROPIEDADES TERMICAS.....	24
V.1.1 INFLUENCIA DE DIVERSOS PARAMETROS.....	24,25
V.1.2 MATERIALES REFRACTARIOS Y AISLANTES.....	26-28

CAPITULO VI PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MATERIALES

CERAMICOS.....	29
VI.1 PROPIEDADES ELASTICAS DE LOS CERAMICOS.....	30
VI.2 DEFORMACIONES ELASTICAS DE MATERIALES ISOTROPICOS.....	31, 32
VI.3 DEFORMACION ELASTICA DE MATERIALES CRISTALINOS.....	33
VI.4 CONSTANTES ELASTICAS PARA CRISTALES DE SIMETRIA CUBICA..	34
VI.5 DEPENDENCIA DE LA ORIENTACION DE LAS CONSTANTES.....	35
VI.6 CONSTANTES ELASTICAS Y FUERZAS INTERATOMICAS.....	36, 37
VI.7 EFECTOS DE LA MICROESTRUCTURA EN PROPIEDADES ELASTICAS..	38
VI.8 CERAMICA DE DOS FASES SIMPLES.....	38, 39
VI.9 POROSIDAD.....	40
VI.10 ESTIMACIONES DE LA RESISTENCIA TEORICA.....	41, 42
VI.11 FRACTURA O DESPRENDIMIENTO.....	43
VI.12 RESISTENCIA A LA FRACTURA DE LOS CERAMICOS.....	44, 45
VI.13 DATOS DE LA ENERGIA SUPERFICIAL.....	46-48
VI.14 POLICRISTALES.....	49, 50

CAPITULO VII GENERALIDADES SOBRE LOS ENSAYOS DE IMPACTO.....51

VII.1 ASPECTOS DEL ENSAYO DE IMPACTO.....	52
VII.2 COMPORTAMIENTO DE MATERIALES BAJO CARGAS DE IMPACTO..	52, 53
VII.3 ALCANCE Y APLICABILIDAD DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO.....	54
VII.4 MAQUINAS DE IMPACTO.....	55
VII.4.1 ECUACIONES PARA EL CALCULO DE LA ENERGIA DEL PENDULO.....	56-58
VII.5 ASPECTOS GENERALES DE LAS MAQUINAS DE IMPACTO.....	59, 60
VII.5.1 MAQUINA DE OXFORD.....	61
VII.5.2 MAQUINA DE GUILLERY.....	62
VII.6 EL ENSAYO DE CHARPY PARA METALES Y PLASTICOS.....	62-64
VII.6.1 LA MAQUINA IZOD.....	65, 66
VII.7 CALCULO DE RELACIONES ENERGETICAS.....	67-70
 CAPITULO VIII EXPERIMENTACION.....	 71-80
 CAPITULO IX PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	 81
IX.1. ENSAYO DE IMPACTO (RESULTADOS).....	82-87
IX.2 ENSAYO DE COMPRESION (RESULTADOS).....	88, 89
 CAPITULO X FRACTOGRAFIA.....	 90-100
 COMENTARIOS DEL ENSAYO DE FRACTOGRAFIA.....	 101-102
 CAPITULO XI MICROANALISIS POR MEDIO DE RAYOS X.....	 103
 COMENTARIOS SOBRE RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO.....	 104
CONCLUSIONES SOBRE EL ENSAYO DE IMPACTO Y COMPRESION.....	105
CONCLUSIONES SOBRE FRACTOGRAFIA.....	106
CONCLUSIONES DEL MICROANALISIS.....	107
APENDICE A-1 COMPOSICION DE CADA UNA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS, OBTENIDAS DEL TALLER EXPERIMENTAL DE CERAMICA.....	108, 109
 APENDICE A-2 TABLA DE VALORES DE LA MAQUINA DE PRUEBA DE IMPACTO DE LA F. I.....	 110-112

APENDICE A-3 TABLA DE VALORES DE LA MAQUINA DE PRUEBA DE IMPACTO
DEL I. I. M.....113-11709

APENDICE A-4 PREPARACION DE BARROS CUATRO CARACTERISTICAS
EVALUADAS.....118-121

APENDICE A-5 NORMA DE PRUEBA PARA RESISTENCIA AL IMPACTO EN
CERAMICOS DESIGNACION ASTM C 368 - 77 Y NORMA DE PRUEBA ESTANDAR
PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE MATERIALES CERAMICOS
COCIDOS DESIGNACION ASTM C 773 - 79122-137

APENDICE A-6 ANALISIS HECHO POR EL I.G.SOBRE LA SILICE SSJ,
CAOLIN AH, FELDESPATO MPM, GRIS FONS, OIL MINE EPK.....138-143

BIBLIOGRAFIA.....

CAPÍTULO I

- INTRODUCCION -

La calidad de una cerámica es una condición asociada a una gran diversidad de condiciones de la materia prima y a su posterior manejo y procesamiento, lo cual lleva a una muy amplia variación en las propiedades de la cerámica producida.

En este sentido, este trabajo nació de la inquietud generada por experimentos previos en los que se encontró datos alentadores al aplicar ensayos de compresión a algunas cerámicas arqueológicas del Golfo de México como parte de un proyecto conjunto con el Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM.

Anteriormente también se ha elaborado una máquina para ensayos de impacto de cerámicos y polímeros (tesis previa) la que se pretende en este trabajo poner a funcionar y evaluar su utilidad para valorar este tipo de materiales.

A partir de esos datos, en esta tesis se han ensayado 4 diversos tipos de cerámica industrial a las que se ha sometido a ensayos de compresión e impacto y se ha complementado la caracterización de dichos cerámicos mediante el uso de fractografía y el análisis químico por microsonda.

Con toda esta labor se pretende avanzar en la búsqueda de generar una batería de pruebas mediante las cuales sea posible diferenciar, de manera confiable, distintos tipos de cerámica, y

en particular en esta tesis se busca relacionar el comportamiento mecánico con parámetros de elaboración de la cerámica, tales como composición química de las materias primas, condiciones de cocción (temperatura y atmosfera del horno etc,) que se reflejen en porosidades, huecos etc.

Asimismo el objetivo es evaluar la utilidad del uso de técnicas de microscopia electrónica como herramienta adicional a los ensayos mecánicos que permita una mas completa y confiable caracterización de dichos materiales cerámicos.

Finalmente se desea obtener datos acerca de la aplicabilidad y confiabilidad del equipo de impacto previamente construido en esta institución.

- CAPITULO II -

DEFINICION, CLASIFICACION Y GENERALIDADES DE PRODUCTOS CERAMICOS.

El vocablo cerámica proviene del griego keramos que significa arcilla; bajo este nombre se agrupan, en primera instancia todos los objetos construidos con materias arcillosas endurecidas por la acción del calor. Así también reciben el nombre de pastas cerámicas las mezclas dispuestas a entrar en la fabricación de estos objetos.

En su estado natural la arcilla es impropia para la fabricación de vajijas y demás objetos, pero basta amasarla con la cantidad de agua conveniente para transformarla en una masa plástica susceptible de adquirir y conservar las formas más diversas

Dada a la masa plástica la forma deseada, se deja secar por la acción del aire o calor y luego los objetos confeccionados se someten a la cocción, durante la cual sufren transformaciones de tipo molecular pues el agua que tiene la masa se evapora y hace que los objetos se contraigan. Otra transformación, por ejemplo, es la fusión de los esmaltes, los cuales cambian dependiendo de la composición de la masa y de la temperatura a que ha sido sometida.

II.1 CLASIFICACION DE LA CERAMICA

Una forma de clasificar la cerámica es la siguiente:

II.1.1 CERAMICA ARTESANAL : Aquí la intervención del artifice es primordial ya que desde la ejecución del modelo y en la aplicación de los acabados imprimirá su rasgo personal de originalidad, además de un coeficiente determinado de estética en cada uno de los objetos, no obstante que en algunos de los casos sean elaborados con la intervención parcial de máquinas, torno de pié o mano.

Esta cerámica es la que mas raíces tradicionales conserva y no esta por decir de mas que México es un pueblo alfarero por excelencia

II.1.2 CERAMICA SEMI-INDUSTRIAL: Consiste en la elaboración de objetos combinando la forma de producción iterativa con la artesanal lograda a base de moldes y maquinaria poco sofisticada como tornos eléctricos de forja, extrusores etc. logrando con ello mayor rapidez de manufactura y continuidad en la producción, aunado lo anterior a la intervención del artesano en cualquiera de los pasos de manufactura principalmente en la molienda, tamizado del barro y decorado de los productos. Es importante recalcar que esta forma de producción es adecuada al contexto nacional, ya que además del empleo de procesos industriales puede dar un uso extensivo de mano de obra.

II.1.3 CERAMICA INDUSTRIAL: Se basa en los dos tipos de cerámica expuestos anteriormente: La cerámica industrial es la conjugación del avance tecnológico y las formas de organización modernas, se utilizan matrices mecánicas, torno de forja automáticos, moldes, sistemas de decoración en serie, hornos de producción continua (túnel) etc. para obtener consecuentemente grandes producciones en un mínimo de tiempo con intervención reducida de la mano del hombre y sin que pierda o demerite el producto su coeficiente estético ni su utilidad.

II.1.4 CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA: Existen varios tipos de cerámica, una forma de clasificarla es por la clase de materia prima y por la temperatura de cocción a la que se someten. La llamada cerámica de alta temperatura (STONEWARE) se distingue por el alto porcentaje y equilibrio de los compuestos orgánicos de las arcillas y elementos con lo que se preparan las muestras, tales como alumina, sílice, caolines, etc, que llegan a soportar temperaturas de 1150 a 1350 grados Celsius aproximadamente sin.

fundirse.

II.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LA CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA

Para un mejor cocimiento de la cerámica de alta temperatura y así poder llegar a un buen diseño, hay que tener presente características físicas, químicas y técnicas como las aquí expuestas.

- 1) El grado de absorción de humedad es menor al 0.5%
- 2) El material soporta hasta 1350 grados celsius aprox.
- 3) Son visual y físicamente pesadas.
- 4) Se pueden decorar con un alto grado de libertad.
- 5) Son resistentes al lavado, a los golpes, a los cambios de temperatura, resistencia al lavado, permanencia de los colores y diseños ante la acción de jabones y detergentes.
- 6) El grosor mínimo de partes delgadas o piezas pequeñas (tazas, platos, saleros) es de 3mm.
- 7) El grosor máximo de partes gruesas en piezas mayores (jarras soperas etc.) es de 8mm.
- 8) Se recomienda la confección de bordes o dobleces para rigidizar las partes más débiles de la pza.
- 9) Las aristas o dobleces, presentan radios mínimos de 2mm aprox. La inclinación mínima recomendada para las salidas de las piezas es de 2 a 3 grados

II.3 FABRICACION DE OBJETOS CERAMICOS TRADICIONALES (proceso típico)

II.3.1 MATERIAS PRIMAS: Las materias primas básicas en las

cerámicas son los barros o arcillas de diferentes tipos y con un contenido de materia orgánica variable para cada uno; La arcilla es un producto mineral formado por la descomposición de restos fósiles orgánicos vegetales o animales, estos a su vez estuvieron en un líquido (agua dulce o salada) y fueron arrastrados y depositados por corrientes fluviales para posteriormente adquirir el estado de arcillas plásticas .

II.3.2 PROPIEDADES Y COMPONENTES: Las arcillas están constituidas principalmente por cristales de sílice , alúmina y agua ; por ser parte de la naturaleza contienen gran cantidad de sustancias extrañas o residuos de diferentes elementos, como los derivados de la composición de las rocas feldespáticas, cuarzo etc. Las arcillas empleadas en la confección de pastas cerámicas son excesivamente plásticas, lo cual estaría en contradicción con las cualidades de dureza necesarias para que los objetos fabricados conserven su forma al ser manipulados durante la cocción; para evitar este inconveniente se combinan con las masas arcillosas otras sustancias que ayudan a obtener las condiciones de rigidez faltantes para obtener productos adecuados, es por esto que además de la arcilla hay que tomar en cuenta el cuarzo, los feldespatos y los caolines, los cuales ayudan a prevenir cuarteaduras, deformaciones y otros defectos.

II.3.3 ELABORACION : Para hacer un análisis de las arcillas se toman como muestras briquetas de determinadas dimensiones, y se miden plasticidad, color al crudo, color al cocido, coeficiente de encogimiento al secado, coeficiente de absorción y peso al secado y al horneado, se verifica que tipo de pasta se podrá elaborar y que proporciones de las diferentes materias se deberán agregar. Como siguiente paso se muelen las sustancias, ya sea en forma manual (mazos) o por medios mecánicos (amasadora preliminar, molinos de bolas, trituradoras, desintegradoras etc). Ya triturados sus componentes se procede a mezclarlos con agua en fosas o

recipientes, pasando posteriormente al agitado para obtener una pasta líquida, el agitador puede ser una hélice cercana al fondo del recipiente que gire en un eje vertical acoplado al motor, también se pueden emplear tambores con agitadores horizontales y si se trata de arcilla de vaciado se añadirá sosa o silicato de sodio a la pasta, que funcionará como antifloculante.

De la agitadora la mezcla pasa por un tamiz que retiene arena y granos gruesos, mientras que el material en suspensión pasa a un depósito, del que será transportado y vertido para llenar los moldes de arcilla sobrante; regresará después a los depósitos para almacenarla; en otro caso se produce la arcilla para torneear, se introducirá la pasta a una prensa filtradora y en ella será separado el exceso de agua de la pasta.

En los pequeños talleres la mezcla que ha sido agitada, se pasa por un tamiz que retiene como ya se había comentado arena y granos gruesos, posteriormente, ya que ha sido filtrado, se pasa a un tanque de decantación, en el cual dura aprox 2 días en decantarse, luego se quita el exceso de agua quedando una pasta que es vertida en planchas o vasijas de yeso que se colocan en un lugar caliente, el agua es absorbida por el yeso y la arcilla al adquirir el grado de sequedad deseado se sacan de las vasijas para ser almacenado en bolsas de polietileno de 20 Kg para que 2 meses después pueda ser utilizado.

II.3.4 HORNEADO DE LOS PRODUCTOS: La combustión es una combinación de carbono con oxígeno. Los combustibles son, en su mayor parte, materias orgánicas, combinación de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. Los hornos utilizan el calor producido por la combustión en el aire atmosférico con ciertos cuerpos sólidos, líquidos y gases. Para obtener el rendimiento máximo en un horno hay que aportar al combustible la cantidad de aire necesario, si el aire fluye en exceso, se calienta inutilmente la parte no utilizada y si fluye la cantidad insuficiente, se desprenden gases cuya combustión ha sido incompleta, en ambos casos hay pérdida de

calor. La regulación de la combustión, siempre presente desde el punto de vista de la economía del combustible, adquiere una importancia especial cuando se trata de productos que requieren para su cocción una atmósfera determinada; la composición de los gases que circulan por los hornos influye en la coloración de los productos y para ciertas fabricaciones es preciso mantenerlas constantes, por lo menos durante una parte de la cocción. Esta cocción química en la atmósfera del horno se ejerce principalmente sobre el óxido de hierro que contienen las pastas y se propaga a toda la masa, en tanto que esta se mantiene porosa y después de la vitrificación dicha acción solo se ejerce en las superficies de las piezas si se trata de productos vidriados. La acción química cesa cuando el barniz se hace impermeable y este conserva el color que tenía cuando entró en fusión. Una atmósfera que contenga un exceso de aire tiende a acentuar el color de las pastas hacia el rojo, amarillo o el pardo por formarse compuestos de hierro oxidados al máximo. Según la temperatura y la composición, esta atmósfera se llama oxidante; En cambio si la atmósfera del horno contiene gases incompletamente quemados, el hierro da combinaciones al mínimo de oxidación, las cuales son de coloración que va desde el gris al casi negro según la proporción de dichos gases, esta atmósfera se llama reductora; Este fenómeno que ocurre en las cámaras de cocción de los hornos es regulable, lo cual se consigue intercalando en los tiros, registros que permiten obturarlos en parte y que puedan cerrarse mas o menos según la marcha de la cocción, estos registros son placas de material refractario que se mueven en una ranura abierta en los conductos de humo antes de llegar a la chimenea.

- CAPITULO III -

PRODUCTOS CERAMICOS

III.1 PRODUCTOS DE ARCILLA: Muchas cerámicas están basadas fundamentalmente en la arcilla, a la cual se añade un material más grueso como el cuarzo y un material fundente como el feldespato. Los feldespatos son un grupo de minerales que comprende al $(K, Na)_2 O Al_2 O_3 6Si O_2$, estos materiales se mezclan con agua y se forma un producto, el cual es secado y horneado después. Los altos contenidos de arcilla mejoran las características de conformabilidad, permitiendo la producción de cuerpos cerámicos más complicados. Los altos contenidos de feldespato reducen la temperatura de liquidus y en consecuencia la temperatura de horneado. En cierto grado, la sílice es un material de relleno.

III.2 LADRILLOS LOSETAS Y MOSAICOS : Estos son comprimidos o, extruidos para darles forma; después se secan y se hornean para producir una aglutinación de cerámico. Las temperaturas de horneado más altas, o los tamaños originales de las partículas menores, producen una mayor vitrificación, una menor porosidad y una mayor densidad. La más alta densidad mejora las propiedades mecánicas y produce las cualidades aislantes del ladrillo o la loseta.

III.3 LOZA DE BARRO : Esta formada por cuerpos de arcilla porosa horneada a temperatura relativamente baja; tiene poca vitrificación, la porosidad es muy alta e interconectada, y la citada loza es permeable, tales productos deben recubrirse con un vidrioado impermeable. A temperaturas elevadas de horneado se producen materiales que tienen mayor vitrificación y menor

porosidad, tales como la loza pétrea. Esta loza que contiene solo de 2% a 4% de porosidad, se utiliza para tubería de albañal.

III.4 PORCELANA : Requiere de temperaturas de horneado mayores para lograr una vitrificación completa y prácticamente ninguna porosidad.

III.5 REFRACTARIOS : Estos materiales deben soportar elevados esfuerzos a altas temperaturas, la mayoría de los materiales cerámicos puros de alto punto de fusión se califican como materiales refractarios, sin embargo, los refractarios de óxido puro son caros y difíciles de conformar como productos útiles. En lugar de esto, los refractarios típicos están compuestos de gruesas partículas de óxido o groy unidas por un material refractario más fino.

Este material se funde durante el horneado proporcionando la aglutinación. Los ladrillos refractarios típicos contienen aproximadamente de 20 a 25% de porosidad, mejorando el aislamiento térmico.

III.5.1 - CLASIFICACION DE LOS REFRACTARIOS -

III.5.1.1 REFRACTARIOS ACIDOS : Incluyen a la arcilla refractaria o sea los cerámicos de sílice-alúmina, la sílice pura es un buen material refractario y se usa para contener material fundido. En algunas aplicaciones, la sílice puede ser aglutinada con pequeñas cantidades de óxido de boro, el cual se funde y produce el enlace cerámico. Cuando se añade de 3 a 8% de alúmina a la sílice, el material cerámico tiene una temperatura de fusión muy baja y no es muy útil para aplicaciones como material refractario. Al incrementar el contenido de alúmina utilizando quizás arcilla de caolinita, se mejora la refractariedad de la arcilla de esta clase.

III.5.1.2 REFRACTARIOS BASICOS : Incluyen la periclasa (MgO) pura, la magnesita (rica en MgO), la dolomita (MgO mas CaO) y la olivina ($Mg_2 SiO_4$). Los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos, sin embargo en la manufactura de los aceros y en algunas otras aplicaciones para temperaturas altas, los revestimientos de refractarios básicos en hornos para altas temperaturas deben usarse para proporcionar compatibilidad con el metal.

III.5.1.3 REFRACTARIOS NEUTROS : Estos incluyen la cromita y la cromita magnesita. Estos materiales pueden ser usados para separar refractarios ácidos y básicos, puesto que estos últimos se atacan entre sí.

Otros materiales refractarios son la zirconia (ZrO_2), el zircon ($ZrO_2 SiO_2$) y una diversidad de nitruros, carburos, boruros y grafito. La mayoría de los carburos, como el TiC y el ZrC , se oxidan y sus aplicaciones a elevadas temperaturas son marcadas para condiciones reductoras. Sin embargo, el carburo de silicio es una excepción. Cuando se oxida el SiC a altas temperaturas se forma una fina capa impermeable de SiO_2 en la superficie, protegiendo al SiC de mayor oxidación, a unos $1500^\circ C$. Los nitruros y los boruros tienen también altas temperaturas de fusión y son menos susceptibles a la oxidación. Algunos óxidos y nitruros son materiales utilizados en la construcción de motores a reacción. El grafito es único en el que su resistencia aumenta cuando la temperatura se eleva.

III.6 CERAMICAS ELECTRICAS Y MAGNETICAS : Los materiales cerámicos presentan una variedad de propiedades eléctricas y magnéticas útiles. Algunas cerámicas, incluyendo al SiC , pueden servir como resistores y elementos calefactores para hornos. Otros materiales cerámicos tienen un comportamiento semi-conductor y se usan como termistores y rectificadores.

Otro grupo de cerámicos que incluyen el titanato de bario, muestran un excelente comportamiento dieléctrico, o piezoeléctrico

(*) y ferroeléctrico. En particular, las propiedades piezoeléctricas del titanato de bario lo hacen un material conveniente para capacitores y transductores.

(*) Piezoelectricidad : Es la capacidad de algunos materiales de admitir un cambio en el campo eléctrico que a su vez modifique las dimensiones del material, en tanto que un cambio en las dimensiones produce un campo eléctrico.

Muchas de las arcillas tienen excelentes características aislantes. Generalmente, los aislantes eléctricos deben tener poca porosidad, por eso las arcillas que están completamente vitrificadas, como la porcelana y el vidrio, se usan como materiales aislantes eléctricos para altos voltajes. Sin embargo, cuando se necesita una elevada resistencia eléctrica a altas temperaturas y frecuencias, como en la bujía de los automóviles, la alúmina cristalina es más eficaz como aislador.

III.7 VIDRIOS : La mayoría de los vidrios comerciales se basa en la sílice, con modificadores tales como la sosa, para romper la estructura reticular y reducir el punto de fusión. El óxido de calcio se añade para contrarrestar la mayor solubilidad del vidrio en el agua, también causada por la sosa. El vidrio más común y comercial es el vidrio (sosa-cal), que contiene aproximadamente 75% de SiO_2 , 15% de Na_2O y 10% de CaO .

Se obtienen calidades ópticas mejoradas cuando el vidrio contiene aproximadamente un 30% de PbO . Los vidrios de borosilicato, que contienen un 15% de B_2O_3 , tienen excelente estabilidad; su uso incluye vidriería para laboratorio o sea pyrex. El vidrio de aluminio silicato con 20% de Al_2O_3 y 12% de MgO , y los vidrios de alta sílice con un 3% de B_2O_3 son excelentes para resistir altas temperaturas y para protección contra el calor o el choque térmico.

III.8 MATERIALES PIROCERAMICOS : Algunas características poco usuales se obtienen cuando la desvitrificación de un vidrio puede controlarse para hacer que nucleen y crezcan muchos pequeños cristales. La primera etapa del tratamiento es la de calentar el vidrio a una temperatura baja de modo que se formen muchos núcleos dentro del vidrio. Después de que ha ocurrido la nucleación, la temperatura se eleva para promover el crecimiento de los núcleos en forma de cristales.

- CAPITULO IV -

ESTRUCTURA DE MATERIALES CERAMICOS

IV.1 ESTRUCTURAS DE SILICATO ; Estan basadas en el tetraedro de silice; el citado tetraedro SiO_4^{4-} se comporta como un grupo iónico, los iones de oxígeno situados en las esquinas del tetraedro están ligados a otros iones o grupos iónicos para satisfacer el balance de cargas, figura (1).

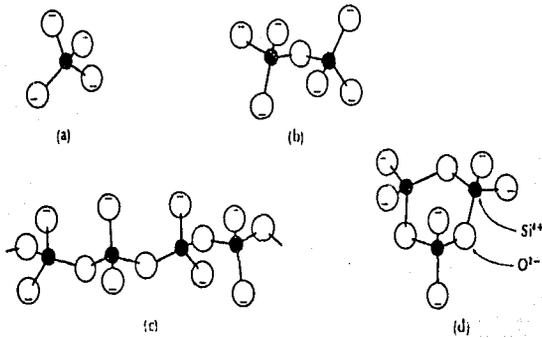


FIG (1) ordenamiento de los tetraedros de silice. a) isla de ortossilicato, b) isla de pirossilicato c) cadena d) anillo

IV.1.1 COMPUESTOS DE SILICATOS ; cuando dos iones Mg^{2+} se encuentran disponibles para combinarse con un tetraedro se produce un compuesto de Mg_2SiO_4 o forsterita. Los dos iones Mg^{2+} satisfacen los requisitos de carga y equilibran los iones de SiO_4^{4-} . Los grupos Mg_2SiO_4 producen una estructura cristalina tridimensional de modo similar los iones Fe^{2+} pueden combinarse con los tetraedros de silice para producir Fe_2SiO_4 , el Mg_2SiO_4 y el Fe_2SiO_4 , que forman una serie de soluciones conocidas como

olivinas u ortosilicatos.

Los tetraedros de silicato pueden combinarse compartiendo un vértice para producir un doble tetraedro o un ión. $Si_2O_7^{6-}$. Este grupo iónico puede combinarse entonces con otros iones para producir pirosilicato o sea compuestos de doble tetraedro.

IV.1.2 ESTRUCTURAS DE ANILLO Y CADENA : Cuando se comparten dos vértices del tetraedro se forman anillos y cadenas con la fórmula $(SiO_3)_n^{2n-}$ donde n es el número de grupos de $(SiO_3)_3^{2-}$, en el anillo o cadena. Muchos materiales cerámicos presentan esta estructura de metasilicato, la wolastonita $(CaSiO_3)$ esta constituida por anillos Si_3O_9 . La berilia $(Be_3Al_2Si_6O_{18})$ contiene grandes anillos de Si_6O_{18} y la enstatita $(MgSiO_3)$ tiene una estructura de cadena.

IV.1.3 ESTRUCTURAS LAMINARES : Cuando en las relaciones se presenta la fórmula Si_2O_5 los tetraedros se combinan para formar estructuras laminares incluyendo la arcilla, figura (2)

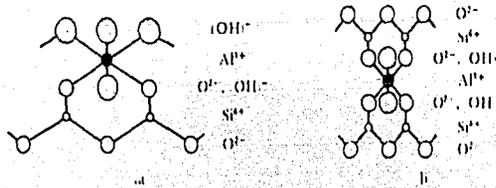


FIGURA (2) : Estructura laminar de los silicatos que conforma la base de las arcillas. a) arcilla caolinita b) arcilla montmorillonita.

La caolinita, una arcilla común esta compuesta de una lámina de silicato enlazada iónicamente a una lámina compuesta de $Al(OH)_2$ produciendo delgadas plaquetas de arcilla con la fórmula

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ la montmorillonita o sea $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_2$ contiene dos láminas de silicato emparedadas a una capa central de $\text{AlO}(\text{OH})_2$. Las plaquetas están unidas entre sí por enlaces débiles de Van Der Waals.

IV.1.4 SILICE : Finalmente, cuando se comparten los cuatro vértices del tetraedro se obtiene la sílice o SiO_2 . Este material puede presentarse en muchas formas alotrópicas. Cuando se incrementa la temperatura, la sílice cambia de cuarzo alfa a cuarzo beta, a tridimita, a cristobalita beta a líquido según indica el diagrama PRESION-TEMPERATURA : de la figura (3), que muestra las formas estables de la sílice.

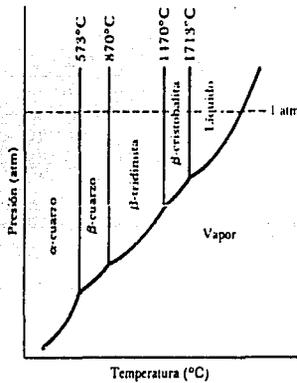


FIGURA (3) Diagrama de fases presión - temperatura para el SiO_2

Hay un cambio brusco en las dimensiones del cristal cerámico durante las transformaciones de fase, (tales variaciones se muestran en las fig siguiente). Para el cuarzo, altos esfuerzos, e incluso agrietamiento, acompañan a estos cambios volumétricos en la sílice, figura (4).

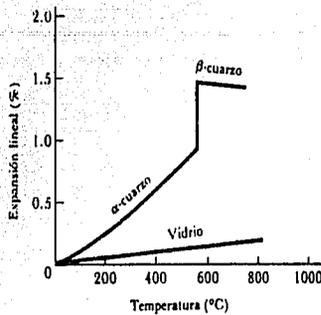


FIGURA (4) dilatación o expansión del cuarzo. Además de la expansión regular casi lineal, una gran y súbita dilatación que acompaña a la transformación de fases.

IV.2 IMPERFECCIONES EN LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Como ocurre en los metales, la estructura de los materiales cerámicos contiene una diversidad de imperfecciones.

IV.2.1 - DEFECTOS PUNTUALES -

En los materiales cerámicos se forman soluciones sólidas sustitucionales e intersticiales. Los ortosilicatos $(Mg, Fe)_2SiO_4$ presentan toda una gama de solubilidades con los iones Mg^{2+} y Fe^{2+} reemplazándose entre sí completamente, figura (5).

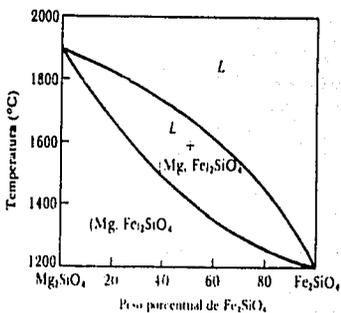


FIGURA (5) Diagrama de fases del sistema Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 que muestra una completa solubilidad en sólido.

En general, la solubilidad en sólido de una fase en otra es

limitada e incluso nula, las soluciones sólidas intersticiales son menos comunes en las cerámicas que en los metales debido a que los sitios intersticiales normales están casi llenos, por ejemplo el MgO (con estructura de cloruro de sodio) tiene la totalidad de los sitios octaédricos ocupados, y el (CaF_2) con estructura de la fluorita, tiene ocupados todos los sitios tetraédricos.

Mantener una distribución de cargas balanceadas es difícil cuando se introducen iones por solución sólida, sin embargo las deficiencias o los excesos de carga pueden compensarse de varias maneras en los materiales cerámicos, por ejemplo, si el ión Al^{3+} en el centro de una plaqueta de arcilla montmorillonita es reemplazado por un ión Mg^{2+} la carga de la arcilla tendrá una carga negativa adicional. Para igualar la carga, un ión cargado positivamente, (como puede ser el sodio y el calcio), se absorbe en la superficie de la plaqueta de arcilla, figura (6).

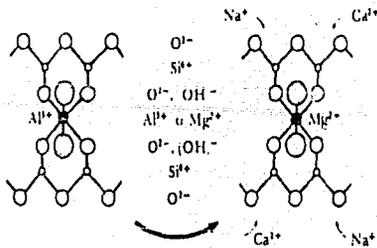


FIGURA (6) Reemplazo de un ión Al^{3+} por uno Mg^{2+} en una plaqueta de arcilla montmorillonita; se produce un desbalance de cargas que permite a cationes como el sodio o el calcio, ser atraídos por la arcilla.

Una segunda manera de compensar la carga desequilibrada es

crear vacantes ; teóricamente, el FeO contiene números iguales de iones Fe^{2+} y O^{2-} en la estructura de cloruro de sodio, sin embargo, 2 iones de Fe^{3+} pueden sustituir a tres iones Fe^{2+} , creando una vacante donde normalmente habría un ión de hierro, figura (7).

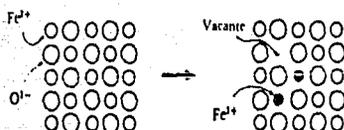
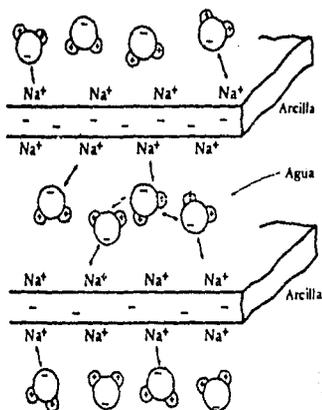


FIGURA (7) Formación de vacancias en el FeO cuando los iones con una valencia diferente son sustituidos dentro de la estructura para mantener una carga igual deben crearse vacantes.

IV.2.2 DEFECTOS SUPERFICIALES : los límites de grano y la superficie de las partículas cerámicas son defectos superficiales, por lo común las cerámicas con un grano de tamaño fino tienen propiedades mecánicas mejoradas en comparación con las cerámicas de grano grueso ; los granos finos ayudan a reducir los esfuerzos en los bordes de grano debidos a la contracción y a la expansión anisotrópica. Normalmente, se produce un tamaño de grano fino cuando se parte de materias primas cerámicas formadas por partículas muy finas. Son reactivas las superficies que presentan planos con enlaces iónicos o covalentes rotos; las moléculas gaseosas por ejemplo pueden ser absorbidas sobre la superficie para reducir la energía superficial, en los depósitos de arcilla, iones diferentes como los del Na^+ pueden ser atraídos a la superficie de las plaquetas alterando la composición de arcilla, figura (8).

FIGURA (8) La superficie de la partícula es importante en el comportamiento y uso de las arcillitas; se adsorben otros iones y moléculas, y se permite a la arcilla húmeda aglutinar materiales mas gruesos para cuerpos cerámicos.



- CAPITULO V -

PROPIEDADES ELECTRICAS Y TERMICAS DE LOS MATERIALES CERAMICOS

Un dieléctrico tiene dos funciones: (1) como aislador, (2) como capacitor.

El empleo de un aislador involucra dos factores principales:

(a) La resistencia a la descarga.

(b) La gama útil de temperatura. Por debajo de 90 °C se emplean algodón, seda y muchos plásticos. Los rellenos inorgánicos tales como la mica y los asbestos se emplean como plásticos hasta los 130 °C, la gama se puede extender con el silicio hasta 180°C. Por encima de esta gama los materiales inorgánicos tales como la mica, la porcelana y el vidrio son necesarios.

Los valores típicos del voltaje de ruptura (voltaje a través de 1 mil, 0.001pulgadas=0.00254cm) para ocasionar descarga considerable se denomina resistencia dieléctrica, como se muestra en la tabla (1)

*Resistencia dieléctrica de no metálicos, * voltios/mil*

Material	Resistencia dieléctrica de no metálicos, * voltios/mil		Material	Resistencia dieléctrica de no metálicos, * voltios/mil		Material	Resistencia dieléctrica de no metálicos, * voltios/mil	
	Alto	Baja		Alto	Baja		Alto	Baja
Micas, naturales y sintéticas	5 000	1 000	Nylon, relleno de vidrio	500	400	Siliconas (moldeadas)	400	250
Polimetilmetacrilato	1 350	350	Nylons 6 y 11	500	420	Ureas	400	300
Cloruro de polivinilo	1 400	24	Poliésteres (fundidos) tipo all	500	330	Melaminas, resistentes al choque	370	130
Acetato copolímero	1 000		TFE fluorocarburos	500	400	Fenólicos (moldeados), resistencia muy alta al choque	370	200
Polivinil formal (regular)	1 000	350	Poliuretano	480		Alquidós	350	300
Fenólicos plásticos alta presión	1 000	70	Polycarbonato, relleno	475		Vidrio policristalino	350	250
Polietileno	600	520	Nylons 6, 6, 6/10	470	385	Fenólicos, resistentes al calor	350	100
Estirenos plásticos baja presión	500	100	Epóxidos (moldeados)	468	334	Melaminas, GP	330	310
Poliestirenos modificados	400	300	Propionato de celulosa	450	300	Fenólicos (moldeados), resistencia extra alta	312	
Poliamidós	400	300	Butirato de dialilo	450	275	Berilios	300	250
Acetato de celulosa	300	250	Fenólicos (fundidos), GP	450	300	Cerámicas de alúmina	300	200
Butirato de celulosa	300	200	Melaminas, eléctricas	430	350	Cerámicas eléctricas estándar	300	55
CFE fluorocarburos	300	50	Fenólicos (moldeados) GP	425	200	Zirconio	290	60
Cauchos duro	200	100	Poliésterenos, rellenos con vidrio	425	340	Estrotila	280	145
Micas unidas con vidrio	100	270	Resinas ABS, alto impacto	415	350	Forsterita	250	
Poliésteres (fundidos) rígidos	570	150	Acetato butirato de celulosa	400	250	Fenólicos (fundidos), GP		
Epóxidos (fundidos)	500	150	Poliéster clorimado	400		Resinas ABS, impacto	250	75
Acrílicos	500	400	Melaminas, celulosa, grados eléctricos	400	350	Trasparentes	230	140
Poliésterenos, GP	500		Fenólicos (fundidos), calidades mecánicas y químicas	400	350	Cordierita	230	140
Acetal	500		Polycarbonato	400		Espuma de polietileno flexible	220	
Etilcelulosa	500		Poliésteres (fundidos), no rígidos	400	220			
			Polivinilo butiral	400				

Constante dieléctrica de no metálicos *

Material	Alto	Baja	Material	Alto	Baja	Material	Alto	Baja
Mica unida con vidrio	400	69	Alequidos, GPt	50	48	Acrílicos		32 27
Fenólicos (fundidos)	110	40	Fenólicos de caucho	50		Polivinilo formal		30
Cerámicas de alumina	96	82	Cloruro de vinilideno	50	30	Policarbonato		296
Vidrio plomo silicato	95	66	Caucho duro	495	290	Poliéster clorado		292
Zircono	92	53	Poliéster (fundido), tipo aill	48	33	Metilestireno-acrilonitrilo		281
Cloruro de polivinilo	51	23	Alequidos eléctricos e impacto	45	42	Epóxidos, resistentes		28 26
Micas, naturales y sintéticas	67	54	Folato de dialilo	45	33	Poliestireno, GP		265 245
Fenólicos (moldeados)	60	40	Nyions 6 y 11	45	35	Polimilietileno		248
Vidrio soda-cal	74	72	Epóxidos (fundidos)	44	26	CFE fluorocarburos		237 230
Melaminas	72	47	Epóxidos, GP	44	34	Poliétileno		23
Berrios	70	64	Nitruro de boro	42		Propileno-aileno		
Acetato de celulosa	70	32	ABS resinas	41	28	poliátomero		229
Cerámicas eléctricas estándar	70	54	Epóxidos, resistentes al calor	40	35	Poliisopreno		21 20
Ureas	69	64	Poliestireno modificados	40	25	TFE fluorocarburos		20
Laminados plásticos, alta presión	68	33	Poliésteres (fundidos), rígidos	40	28	Epóxido prespumado, rígido		155 119
Forsterita	65	62	Nylon, relleno de vidrio	39	34	Espuma de poliétileno, flexible		149
Estearita	65	55	Fenolal	38	37	Caucho uretano espumado en alilo, rígido		140 105
Vidrio silicato de aluminio	63		Vidrio sílice	38		Espumas de sílice, rígidas		126 123
Bulirato acetato de celulosa	62	37	Acetal	37		Poliestireno espumado en alilo, rígido		119
Cordierita	62	40	Propionato de celulosa	36	34	Acetato de celulosa prespumado, rígido		
Poliésteres (fundidos), no rígidos	61	37	Etilcelulosa	36	28	Poliestireno prespumado		112 110
Plásticos laminados baja presión	56	34	Nylon 6/6 y 6/10	36	34	rígido		
Vidrio policristalino	56		Policarbonato, relleno	350				
Vidrio borosilicato	51	40	Poliestireno, relleno de vidrio	341	274			
Siliconas (moldeadas)	51	36	Poliestireno modificados, impacto superalito	33	19			
			Bulirato polivinilo	33				

TABLA (1) resistencia dieléctrica y constante dieléctrica para diferentes materiales para la Ingeniería.

(*) valores que presentan los altos y bajos de una gama de valores típicos. Para obtener voltios/cm, multiplique por 392.7

(+) GP=calidad para uso general.

(*) valores que representan los altos y bajos de una gama de valores típicos a 10^6 ciclos.

(fuente "Materials Selector", Reinhold Publishing Corp; Nueva York 1978.)

Es evidente que a las temperaturas normales de operación solo la mica excede a los plásticos, sin embargo los plásticos pueden absorber agua, lo cual reduce el voltaje de ruptura y esto se debe tener en cuenta para su aplicación, por lo tanto, el voltaje de ruptura esta gobernado por un número complejo de factores internos y ambientales.

En un aislador los electrones de valencia estan confinados a una banda de energía llena y la subida de un electrón a un nivel de energía en el que pueda conducir (banda de conducción),

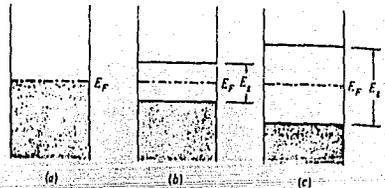
requiere de considerable energía. A continuación se definen algunos términos importantes, desde el punto de vista eléctrico.

AISLANTE : Material con una banda de valencia llena y una gran brecha de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción.

BRECHA DE ENERGIA : Es la energía necesaria para mover un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, generalmente expresada en electrovoltios.

NIVEL DE FERMI: Nivel de energía en el cual la probabilidad de ocupación de un estado de energía es de 0.5, en otras palabras, a este nivel los estados posibles de que un electrón o un hueco electrónico puedan ocupar están semi llenos, figura (9).

FIGURA (9) Modelos de banda de energía de (a) un metal, (b) un semi-conductor, (c) un aislante.



E_f es el nivel de Fermi:
(0.5 ocupado)

E_g =brecha de energía

sv=electrovolts selectrovoltaic : energía requerida para mover un electrón a través de un campo de un voltio

TABLA (2) Bandas adyacentes que están separadas por los siguientes valores

material:	brecha de energía (E_g , a 20°C) Ev.
diamante	5.30 aislante
silicio	1.06 semiconductor
germanio	0.67 semiconductor
estaño	0.08 conductor

V.1 - PROPIEDADES TERMICAS -

Los materiales cerámicos tienen coeficientes lineales de expansión bajos debido a que las fuerzas de atracción son casi tan grandes como las fuerzas de repulsión a medida que la temperatura aumenta. Los valores van desde $1.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para el diamante, hasta $6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para la alúmina. Se encuentra una gran variación en los vidrios, en la sílice fundida el coeficiente es bajo $0.05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ mientras que en el vidrio plano para ventanas el enlace es más débil y el coeficiente es de $7.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. En forma correspondiente, los puntos de fusión y ablandamiento de la sílice fundida son mayores que los del vidrio de la ventana.

V.1.1 INFLUENCIA DE DIVERSOS PARAMETROS : Hay varios materiales cerámicos que se emplean como refractarios. Esto es un término amplio que se refiere a los materiales en general que tienen buena resistencia al calor. Sin embargo, la temperatura de operación del equipo y del grado de choque térmico son importantes. Un buen refractario para una estufa de cocina podría contener considerable cantidad de asbesto, pero esta combinación se fundiría a las temperaturas para la fabricación de los aceros (1600) °C. Por esta razón, el punto de fusión o la temperatura sólidos de los materiales cerámicos es importante.

Otro factor importante para la utilización de refractarios resistentes a altas temperaturas, es el coeficiente térmico de expansión alfa (α), también denominado coeficiente lineal de expansión. Si calentamos una barra de longitud l desde T_1 hasta T_2 la longitud aumentara por Δl . Definimos α así:

- ECUACIONES

$$\alpha = \frac{\Delta l / l}{T_2 - T_1}$$

Ec.(1)

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \Delta T}$$

Ec.(2)

Por lo tanto las unidades son grados F^{-1} , C^{-1} , K^{-1} los valores numéricos de grados C y K serán los mismos con un alto coeficiente, las capas superficiales se expandirán grandemente con relación al interior no calentado. Puesto que los materiales cerámicos son frágiles, estas capas calentadas se descascararán, esto se denomina desconchamiento.

Se debe destacar que en un cristal no cúbico el coeficiente de expansión es diferente en varias direcciones tabla (3)

TABLA (3) COEFICIENTE DE EXPANSION DE ALGUNOS MATERIALES CERAMICOS

CRISTAL	coeficiente de expansión. ($^{\circ}C^{-1} \cdot 10^{-6}$)	
	normal al eje C	paralelo al eje C
Alúmina Al_2O_3	8.3	9.0
Mullita $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	4.5	5.7
ZrSiO ₄	3.7	6.2
CaCo ₃	-6.0	25.0
SiO ₂	14.0	9.0
Grafito	1.0	27.0

En algunos materiales el coeficiente de expansión para materiales policristalinos es la medida de estos valores, debido a que se presentan rajaduras por la diferencia de expansión en diversas direcciones en varios granos. por ejemplo, esto se encuentra en los titanatos de magnesio y aluminio. Hay una relación general de coeficientes en familias diferentes de materiales cerámicos.

TIPO CORINDON (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3): 8 a $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$

TIPO ZIRCONIO ($ZrSiO_4$): $4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$

MgF₂ tipo (TiO_2): 9 a $11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}$

El coeficiente para vidrios no es predecible y varia desde $0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para la Silice fundida hasta $7.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, para el GeO_2 fundido. Un paso importante para el control del coeficiente se obtuvo en una variedad de pyroceram. La fórmula básica esta relacionada con el mineral β espodumeno, $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ el cual tiene un coeficiente negativo en la dirección C, $-16.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y un coeficiente positivo en la dirección α $8.11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Al controlar la cantidad de este material en una matriz vidriosa se puede obtener un coeficiente total cercano a cero.

Otro factor para determinar la resistencia al choque termico asi como la pérdida de calor a través de los refractarios es la conductividad térmica K. Esta es esencialmente la característica que determina el calor transmitido entre las paredes finales de una unidad de volumen por segundo La ecuación para el flujo de calor es, ec (3)

$$J = K \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ Ec. (3)}$$

Si la conductividad es alta, la diferencia de temperatura entre la superficie y las capas subyacentes será pequeña; por lo tanto, la tendencia a desconcharse, se reducirá. La excelente resistencia del grafito al choque térmico se debe a su alta conductividad térmica, mientras que en la silice fundida se debe al bajo coeficiente de expansión.

V.1.2 - MATERIALES REFRACTARIOS Y AISLANTES -

Para hornos y cazos se emplean recubrimientos ya sean de ladrillos o monolíticos. Para manejar metales líquidos y escoria es esencial distinguir entre refractarios ácidos, neutros y básicos. En general, los refractarios compuestos de MgO y CaO se denominan "básicos", porque las soluciones en agua son muy débiles. Los refractarios sustentados en SiO_2 producen soluciones ácidas muy

débiles. El efecto realmente importante es que las escorias ácidas atacarán los refractarios básicos y viceversa. Las características más importantes de estos ladrillos son la resistencia a los efectos de temperatura y capacidad aislante. En la figura No.10 se muestra la relación de conductividad térmica a temperatura, para varios materiales.

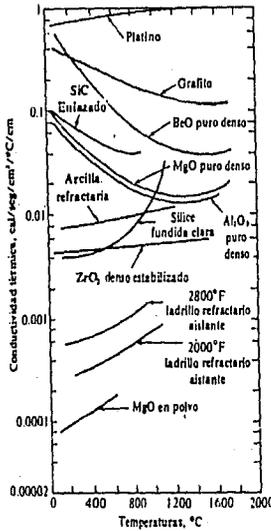


FIGURA 10.-Conductividad térmica de materiales cerámicos en una amplia gama de temperaturas.

Los ladrillos ácidos son menos costosos, pero en muchos hornos se emplean escorias de alto contenido de CaO y MgO para refinar el metal (eliminar fósforo y azufre). Estas escorias reaccionan con SiO₂ para formar materiales de bajo punto de fusión que erosionan los ladrillos. Por consiguiente cuando se emplean escorias básicas, los refractarios deben de ser básicos. En casos intermedios se utilizan ladrillos de alumina y cromita. Los recubrimientos de hornos y cazos se hacen con ladrillos o

apisonando barro refractario fuerte en su sitio y calentandolo con una llama de gas o coque.

- CAPITULO VI -

PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MATERIALES CERAMICOS

La dureza y la resistencia son importantes en algunos casos y debiéramos repasar la medida de estas propiedades en los materiales cerámicos. Dos de los métodos para probar la dureza en los metales son los ensayos Brinell y Rockwell, que sin embargo no se usan en los materiales cerámicos porque el material se fracturaría. El ensayo de Vickers es el que se utiliza. En este método se emplea un indentador de diamante en forma de pirámide cuidadosamente pulida, con cargas muy livianas (por debajo de 100 g). Por debajo de 500 la escala Vickers es más o menos la misma que la escala de Brinell, pero por encima de 500 el número Brinell correspondiente es menor. Se seleccionaron 10 minerales que iban desde el diamante (10) hasta el talco (1) para cubrir el espectro conocido de dureza. Los valores se escogían con base en una muestra de un número más alto que pudiera rayar a uno con número menor; por ejemplo el diamante (10) raya al zafiro (alúmina 9) esta escala todavía la emplean los mineralogistas y algunos ceramistas.

La resistencia a la tracción de un material cerámico generalmente es difícil de determinar debido a la sensibilidad a pequeñas discontinuidades que casi siempre se presenta en muestras de tamaño apreciable. Hace mucho tiempo Griffith, demostró que las fibras finas de vidrio tenían resistencia a la tracción muchas veces mayores que a la del material en bulto, porque era posible producir fibras relativamente libres de defectos. En materiales frágiles, como son la mayoría de los cerámicos, una microgrieta se propaga fácilmente bajo esfuerzo debido a que no se disipa energía en la deformación plástica delante de la punta como ocurre en el metal. Aún hay gran diferencia entre la resistencia de muestras

con superficies corrugadas que se han raspado para producir muescas y muestras con superficies lisas. Por lo tanto, podemos decir que la tenacidad a la fractura del material cerámico usual es baja, en casos como el pyroceram, la situación se ha mejorado al controlar el crecimiento de la microgrieta.

Una alternativa para el ensayo de tracción para materiales duros y frágiles es el ensayo de doblado el cual se emplea un pequeña vigueta de aprox. $1 \times 0.4 \times 0.4$ pulgadas. (2.54*1.02*1.02cm.), cargada en el centro y soportada por debajo cerca de los extremos, el esfuerzo de ruptura de las fibras que se encuentran mas hacia afuera se puede calcular a partir de la sencilla fórmula de la viga la cual se basa en la ausencia de deformación plástica del material en el ensayo.

Esto se denomina resistencia a la ruptura transversal y a grandes rasgos se puede comparar con la resistencia a la tracción. También debe destacarse que aunque la resistencia a la tracción no sea alta, la resistencia a la compresión puede ser excelente. Así la resistencia alta a la compresión y baja a la tracción nos llevan a materiales tales como el vidrio revenido y el concreto pretensado. Además las civilizaciones antiguas no contaban con la ventaja de muchos de los materiales modernos; sin embargo, ellos sabían como emplear los materiales cerámicos.

Puesto que las estructuras cerámicas podían fácilmente fallar en tracción, los antiguos desarrollaron el arco, el cual era arquitectónicamente agradable y desde, el punto de vista de ingeniería tenía mucho comportamiento elástico.

VI.1 - PROPIEDADES ELASTICAS DE LOS CERAMICOS -

Son básicos para determinar el comportamiento mecánico, de ellos y dependen directamente de la estructura y de los enlaces del cristal. La rigidez, la dureza y la resistencia están interrelacionadas; la alta rigidez está asociada con buenas

propiedades mecánicas. Un enfoque de mecánica del medio continuo es generalmente utilizado para describir el comportamiento elástico, así mismo mostraremos como las constantes elásticas se pueden relacionar con las fuerzas de enlace atómico del cristal simple con uniones iónicas.

La atención se enfoca a los datos a temperatura ambiente; El módulo elástico decrece cuando la temperatura aumenta y la red se expande. -Una contracción típica para cerámica es de aproximadamente 1% por cada 100 °K en el rango de 0 a 1000 °C; La situación es compleja a altas temperaturas cuando se observa un comportamiento anelástico.

VI.2 - DEFORMACIONES ELASTICAS DE MATERIALES ISOTROPICOS -

Existen pocos materiales elásticos isotrópicos en donde la deformación producida por un esfuerzo en particular sean independiente de la dirección de aplicación de la fuerza. El vidrio es una excepción importante afortunadamente; Sin embargo la mayoría de los materiales de ingeniería pueden ser vistos como isotrópico para propósitos de análisis de deformación elástica. Así mismo, aunque los cristales muestran un funcionamiento anisotrópico y diferentes fases, estos efectos están en una escala mínima para ser consideradas como importantes en componentes de ingeniería; (Este acercamiento no puede ser utilizado para materiales anisotrópicos fuertes como la madera o materiales compuestos reforzados con fibras). La respuesta elástica de materiales isotrópicos se puede describir por medio de dos constantes elásticas: El módulo de Young y el módulo de corte dado por la Ec (4).

$$\tau = G * \gamma \quad \text{Ec. (4)}$$

donde τ es el esfuerzo de corte y γ es la deformación de corte. E y G están ligadas por la relación de POISSON ν Ec (5).

$$E = 2G (1+\nu) \quad \text{Ec. (5)}$$

Consideremos un elemento cúbico pequeño de material sujeto a una serie de fuerzas externas; Estas son transmitidas a través de cada

cara del cubo y cada una puede descomponerse en sus tres componentes ortogonales de esfuerzo fig 11

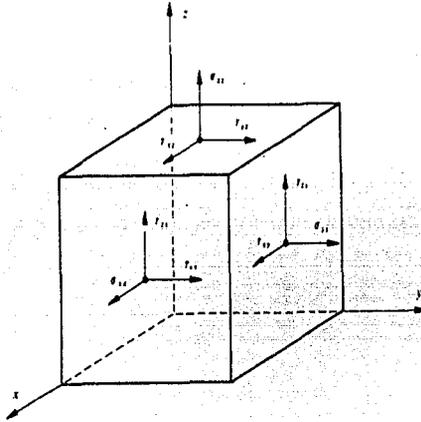


FIGURA (11) Series arbitrarias de tensiones externas sobre una celda cúbica unitaria de material.

Los esfuerzos σ_{XX} , σ_{YY} , σ_{ZZ} , son de tracción o compresión y los otros esfuerzos son cortantes.- en esta notación, el primer sufijo indica los ejes por los cuales el esfuerzo actúa, y el segundo los ejes que son normales al plano sobre el cual el esfuerzo actúa. Cuando el elemento cúbico esta en equilibrio estático, se puede demostrar que los tres pares de esfuerzos cortantes deben ser iguales así a $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ etc; así pues. seis componentes de esfuerzo se requieren para describir el estado arbitrario del elemento. La aplicación del esfuerzo tensional uniaxial (σ_{XX}), causa una deformación en la dirección de aplicación de la carga que esta acompañada por contracciones laterales en las otras dos direcciones ortogonales ec 6.

$$E\epsilon_{yy} = E\epsilon_{zz} = -\nu\sigma_{xx}$$

Ec (6)

En un estado general de esfuerzos, las deformaciones,

compresión o tracción en una dirección particular dependen de los esfuerzos de tracción o compresión en las tres direcciones ortogonales; las deformaciones de corte sin embargo, están relacionadas simplemente a los esfuerzos de corte individuales; las seis deformaciones están relacionadas con los seis esfuerzos de la siguiente manera Ecs 7

$$\epsilon_{xx} = (\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}))/E$$

$$\epsilon_{yy} = (\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}))/E$$

$$\epsilon_{zz} = (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}))/E$$

Ecs (7)

$$\nu_x = \tau_{yz}/G$$

$$\nu_y = \tau_{xz}/G$$

$$\nu_z = \tau_{xy}/G$$

Finalmente, notamos que siempre es posible escoger una nueva serie de ejes coordenados tal que los esfuerzos de corte sean 0; en este caso las tres tensiones restantes (de tensión o compresión) son llamadas tensiones principales.

VI.3 - DEFORMACION ELASTICA DE MATERIALES CRISTALINOS -

Para materiales en forma de cristales simples nos confrontamos con la complicación de que las constantes elásticas son anisotrópicas; esto significa que las deformaciones producidas por un esfuerzo particular dependen de la dirección de aplicación de esa tensión. Por lo tanto, necesitamos incluir una notación más compleja; una elasticidad S y una rigidez C están definidas por :

Ecs 8.

$$\epsilon = S \sigma$$

Ecs (8)

$$\sigma = C \epsilon$$

Si una tensión general $\sigma_{i,j}$ se aplica a un cristal la deformación resultante $\epsilon_{i,j}$ esta comprendida en un cierto número de componentes que estan linealmente relacionadas a través de la constante de la deformación; esto significa que si un elemento cúbico es cargado por una tensión normal a una cara, entonces no solo se alargará en la dirección de la tensión sino que también habrá una deformación de corte tal que los extremos del elemento no sean mas largas ortogonalmente; En general hay 81 constantes de rigidez, pero consideraciones de simetria reducen a un número de 36 constantes independientes.

Para materiales isotrópicos vemos que solo dos constantes elásticas independientes son necesarias; para materiales cristalinos, el número de constantes requerido depende de la complejidad de la estructura del cristal; por ejemplo, para una estructura cúbica son necesarias tres constantes, 5 para hexagonales, 9 para ortorrómbicas y 21 para estructuras triclinicas.

Se puede obtener una buena visión restringiendo la discusión a cristales de simetria cúbica.

VI.4 - CONSTANTES ELASTICAS PARA CRISTALES DE SIMETRIA CUBICA -

La rigidez y la elasticidad, constantes necesarias para cristales cúbicos son C_{11} , C_{12} , C_{44} , y S_{11} , S_{12} y S_{44} . La relación de Poisson es entonces S_{12}/S_{11} . La relación de la deformación de corte y la tensión aplicada paralelamente a un plano del cubo en una dirección del cubo es S_{44} ; Las deformaciones de aquellos materiales isotrópicos, son usualmente los siguientes Ecs 9, 10.

$$\epsilon_1 = S_{11} \sigma_1 + S_{12} \sigma_2 + S_{12} \sigma_3$$

$$\epsilon_2 = S_{12} \sigma_1 + S_{11} \sigma_2 + S_{12} \sigma_3$$

$$\epsilon_3 = S_{12} \sigma_1 + S_{12} \sigma_2 + S_{11} \sigma_3$$

Ecs (9)

$$c_{44} = S_{44} \sigma_4$$

$$c_{55} = S_{44} \sigma_5$$

$$c_{66} = S_{44} \sigma_6$$

$$c_{11} = (S_{11} + S_{12}) / (S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})$$

$$c_{12} = S_{12} / (S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12}) \quad \text{Ecs (10)}$$

$$c_{44} = 1 / S_{44}$$

VI.5 - DEPENDENCIA DE LA ORIENTACION DE LAS CONSTANTES -

Ambos módulos, de Young y el módulo de corte para cristales cúbicos varían con la dirección cristalográfica (h k l) Ecs 11

$$1/E_{hkl} = S_{11} - 2 \left((S_{11} - S_{12}) - 1/2 S_{44} \right) (\alpha^{*2} \beta^{*2} + \alpha^{*2} \gamma^{*2} + \beta^{*2} \gamma^{*2})$$

Ecs (11)

$$1/G_{hkl} = S_{44} + 4 \left((S_{11} - S_{12}) - 1/2 S_{44} \right) (\alpha^{*2} \beta^{*2} + \alpha^{*2} \gamma^{*2} + \beta^{*2} \gamma^{*2})$$

donde α^* , β^* y γ^* son los cosenos de los ángulos entre la dirección considerada y los ejes $\langle 100 \rangle$ del cubo. El término contenido es así 0 en las direcciones $\langle 100 \rangle$ y tiene un valor máximo de $1/3$ en las direcciones $\langle 111 \rangle$. Para ilustrar la magnitud de las variaciones en constantes elásticas con las orientaciones las tablas 4, 5 dan datos para cristal de magnesia, en la tabla 5 puede verse una muy significativa variación en el módulo elástico con la orientación del cristal, aun para cristales cúbicos de alta simetría.

TABLA (4)

	c_{11}	c_{12}	c_{44}	s_{11}	$-s_{12}$	s_{44}
Constantes elásticas para el MgO a 25°C	(ON m^{-2})			(m ⁻² TN ⁻¹)		
	289.2	88.0	154.6	4.09	0.94	6.47

Crystal orientation	Young's modulus (10^{11} m^{-2})	Shear modulus (10^{11} m^{-2})
$\langle 100 \rangle$	248.2	154.6
$\langle 110 \rangle$	316.4	121.9
$\langle 111 \rangle$	348.9	119.8

TABLA (5) Dependencia de orientación del módulo de young, y módulos afines para el MgO a 25 °C

VI.6 - CONSTANTES ELASTICAS Y FUERZAS INTERATOMICAS -

En principio, es posible calcular las constantes elásticas a partir de la relación fuerza/distancia entre átomos. Desafortunadamente, las funciones apropiadas están solo disponibles para las estructuras de cristal más simples.

El potencial entre dos átomos en una estructura del tipo mostrado en la figura (12), comprende dos componentes: uno de atracción asociado con el enlace típico iónico, covalente, etc. y un repulsivo asociado con el traslapeamiento de electrones vecinos. La energía interna del cristal U es así la suma de dos términos; el modelo atómico más simple se debe a BORN, y relaciona las constantes elásticas del cristal a la función de energía interna; la teoría ha sido desarrollada considerablemente desde entonces pero solo es exacta para los enlaces más simples. En la teoría original se asume que debe variar de acuerdo a la función de la forma. Ec 12

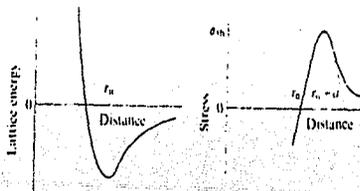


FIG (12) Variación de energía de la red y el esfuerzo con la distancia interatómica.

$$U = - Q_1/r^x + Q_2/r^y \quad \text{Ec. (12)}$$

donde Q_1 , Q_2 , x e y constantes; r distancia entre átomos.

Para cristales iónicos el exponente x (es el término atractivo) es la unidad; el exponente y y el término repulsivo es mucho mayor.

Las constantes elásticas pueden estimarse de la función para U . Un cálculo a grosso modo, ilustra el principio involucrado. La fuerza entre átomos es $(\partial U/\partial r)$ y así los esfuerzos son (ec 13)

$$\sigma = (\partial U/\partial r) / r_0^2 \quad \text{Ec. (13)}$$

esto es la fuerza dividida por el área aproximada sobre la que opera. $d\sigma = cdc$ Ec. (14)

Y así $c = r_0 \, d\sigma/dr \approx 1/r_0 (\partial^2 U/\partial r^2)$ Ec. (15)

Para una deformación de corte el término repulsivo en (12) puede ser despreciado, así, para cristales iónicos $U \propto 1/r$; La sustitución en (15) predice una proporcionalidad entre C_{44} y r_0^{-4} , esto se puede observar experimentalmente fig (13) donde la pendiente del logaritmo es -4.

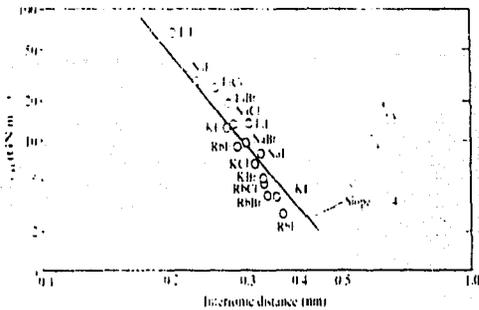


FIG (13). Variación de C_{44} con la distancia interatómica para diversos compuestos.

Tratamientos más sofisticados muestran generalmente un buen acuerdo entre teoría y experimentos para cristales iónicos. Para óxidos la teoría es menos exacta y solo tratamientos aproximados están disponibles.

VI.7 - EFECTOS DE LA MICROESTRUCTURA EN PROPIEDADES ELASTICAS -

Hasta ahora hemos considerado las propiedades elásticas de un material isotrópico y de un solo cristal; pero la mayoría de los cerámicos las microestructuras son mas complejas, comprendiendo diferentes fases, cada una de las cuales es anisotrópica y tiene porosidad; en principio, debería ser posible calcular las constantes efectivas E y G para el material a partir de las constantes de las fases constituyentes alternativamente, Las constantes elásticas pueden ser medidas por experimentos directos; de la misma manera, las constantes elásticas promedio para la cerámica son conocidas y pueden ser utilizadas para cálculos de ingeniería.

Si bien las propiedades elásticas de las fases para una cerámica en particular estan ya definidas; las propiedades elásticas de los compuestos dependen de la geometría de la que usualmente es altamente irregular; en la práctica, sin, embargo el cálculo de las constantes elásticas a partir de datos básicos no es posible y tan solo en casos simples el cálculo se puede hacer ; una revisión detallada de los antecedentes teóricos necesarios para la materia son dados por (HASHIN, 1968), en este caso, debemos considerar las propiedades elásticas de materiales de dos fases simples, cerámicos que contengan poros y policristales.

VI.8 - CERAMICA DE DOS FASES SIMPLES -

Supongamos por el momento que las propiedades elásticas de cada fase son isotrópicas.

Las propiedades elásticas de los materiales de dos fases deben caer entre las de sus componentes; Consideremos un material que comprenda dos fases con el módulo de YOUNG E_1 y las fracciones en volumen V_1 ; Si el material es considerado como con una construcción de tipo sandwich como se muestra en la figura (14) entonces un esfuerzo puede ser aplicado normal o

paralelamente en la placa de los componentes; Cuando el esfuerzo se aplica paralelamente a las placas. La deformación en cada placa es constante ;el módulo de YOUNG para el compuesto E_{11} esta dado por la fórmula aproximada. Ec 16

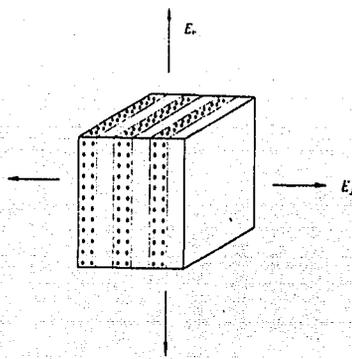


FIG (14) Material de estructura tipo sandwich, indicando orientaciones paralelas y perpendiculares a las placas.

$$E_{11} = E_1 V_1 + E_2 V_2 \quad \text{Ec. (16)}$$

Cuando el esfuerzo se aplica normalmente a las placas, el esfuerzo es constante, y el módulo de YOUNG correspondiente es ec 17

$$E_y = \frac{E_1 E_2}{E_2 V_1 + E_1 V_2} \quad \text{Ec. (17)}$$

El módulo de YOUNG de materiales de interés práctico cae en estos límites

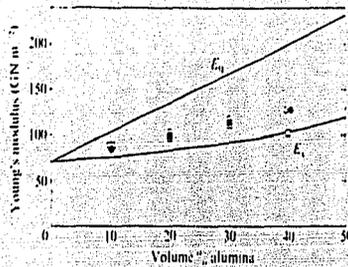


FIG (15). MÓdulo de Young como función de volumen porcentual de alumina y del tamaño de la partícula (punto claro), 180 μm (punto obscuro), 45 μm (cuadro), 10 μm para curvas teóricas afines a (12), (13)

La fig 15 Muestra algunos datos de BINNS (1962) de un vidrio que contiene partículas de alúmina; el módulo de YOUNG para dos fases son respectivamente 70 y 400 GN m^{-2} el módulo de YOUNG calculado para el modelo paralelo da los más altos valores y los datos experimentales para partículas da alumina de tres tamaños entre los límites; La dificultad se encuentra en obtener una densidad completa de los compactos para las partículas de alumina mas finas (aprox 10 μm) y estos datos para los compactos son menores (especialmente un 40% de alúmina en volumen). Una aproximación a las constantes elásticas de sistemas de dos fases es tomar el promedio de los dos límites.

VI.9 - POROSIDAD -

Una cerámica porosa representa el caso limite de un material de dos fases en el cual una fase tiene rigidez; el módulo de YOUNG decrece en tanto que la porosidad se incrementa pero el grado de disminución es menor a medida que se incrementa la porosidad, WACHTMAN (1969) resume las propuestas de varios autores sobre ecuaciones para relacionar la constante elástica con el nivel de la porosidad. Muchas ecuaciones son de la forma: E_c (18).

$$E = E_0(1 - f_1 p + f_2 p^2)$$

Ec. (18)

Donde E_0 es el módulo para material denso, f_1 y f_2 son constantes y p es la fracción de porosidad; las constantes dependen de la forma de los poros; Mc Kenzie (1950) considero teóricamente la situación para hoyos esféricos.

Para una medida típica de la relación de POISSON DE 0.3 las CONSTANTES f_1 y f_2 en la ec (18) son 1.9 y 0.9 considerando que estan separados en una matriz continua; datos de Coble y Kingery (1956) estan dados en figura (16) y las medidas experimentales concuerdan con las predicciones teóricas de Mc KENZIE.

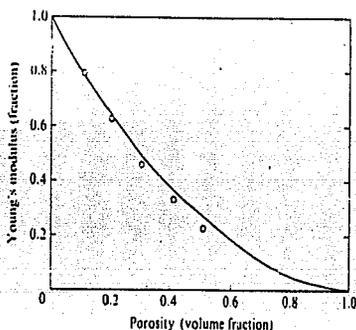


FIG (16) Datos de Coble y Kingery, mostrando una variación en el módulo de Young con el % de porosidad en alúmina, comparada con la estimación teórica de ec. (18).

El significado físico de (18) esta asociada con una porosidad menor donde el término p^2 es menor, esto es que cada poro tiene un efecto equivalente a gruesamente dos veces su volumen; el efecto se disminuye a porosidades mayores porque el efecto por poro se reduce en la medida en que estan menos espaciados.

VI.10 - ESTIMACIONES DE LA RESISTENCIA TEORICA -

A pesar de que las constantes elásticas pueden ser calculadas teóricamente a partir de la relación fuerza/distancia para casos

simples, estimaciones de una resistencia teórica son poco satisfactorias; las relaciones son mejores si ocurren cerca del espaciamento atómico, donde esfuerzo y deformación están linealmente relacionados GUILMAN (1963) y KELLY (1973) discuten varias maneras de calcular la resistencia a la tracción teórica σ_t .

A continuación discutiremos los principios de un método basado en relaciones fuerza/distancia, Zwicky (1923), utilizó la relación de Bhorn para calcular la resistencia teórica a la tracción de un cloruro de sodio. En la máxima tensión que Zwicky llama punto de inestabilidad $(\partial\sigma/\partial r)=0$, la condición crítica es

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = 0 \quad \text{Ec.(19)}$$

Zwicky encontró que la resistencia teórica a la tracción era 26Nm^{-2} y la máxima deformación en tracción era 0.14. Cálculos detallados han sido efectuados para cristales enlazados covalentemente como los diamantes. Consideraciones similares aplicadas al cálculo de la resistencia al corte teórica de materiales y más detalles se encuentran en Kelly (1973); la resistencia de corte teórica es aprox 0.1 G. Kelly (1967) da mayor atención a los valores relativos de σ_t y τ_t para ciertos metales de fases cúbicas centradas en las caras. Ellos estiman que la relación σ_t/τ_t es de 0.94 para cloruro de sodio, para diamantes de 1.16 y aprox 30 para el cobre, la plata y el oro. Kelly produjo un criterio para hacer una clasificación de materiales basándose en la ductilidad y la fragilidad.

Concluyó que cuando σ_t / τ_t es mayor (>10) el material es consistentemente dúctil, y solo falla después de extensa deformación plástica. Cuando σ_t y τ_t son casi iguales el material es quebradizo a bajas temperaturas.

VI.11 - FRACTURA O DESPRENDIMIENTO -

La resistencia teórica de los materiales ya sea en tensión o en corte es muy alta, mas estas resistencias son rara vez observadas en la práctica excepto en ciertos materiales como fibras o whiskers ("barbitas")

Las resistencias mas comunes de los cerámicos son del orden de 1 o 2 ordenes de magnitud menores que los valores teóricos ;como se muestra en la tabla (6).

σ/σ_0	θ	Microstructure
≥ 2	0	All grains separated by liquid phase
$\sqrt{3}/2$	0-60	Penetration of all three-grain junctions
$1/2\sqrt{3}$	60-120	Partial penetration between adjacent grains
≤ 1	≥ 120	Partial penetration of three-grain junctions Isolated liquid-phase regions at four-grain junctions

TABLA (6) Microestructura semejante, obtenida de una cerámica de dos fases, para varias razones de energía límite.

La región de deformación elástica termina con la presencia de grietas o de flujo plástico; la fractura ocurre por la propagación de grietas. El mecanismo mas importante de desprendimiento plástico es a través del movimiento de dislocaciones, otros mecanismos basados en la difusión de los defectos de puntos son sin embargo importantes, a altas temperaturas figura 17

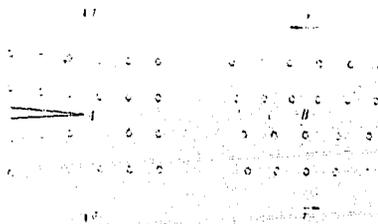


FIG (17) Comparación de la propagación de la grieta (de A) bajo un esfuerzo de tracción con la presencia de una dislocación (en B), bajo un esfuerzo compartido, líneas sólidas indican los enlaces bajo un esfuerzo o tensión, las líneas punteadas los enlaces bajo ruptura.

Existe un numero considerable de similitudes, diferencias y vinculos entre la propagación de la grieta y el movimiento de dislocaciones; los efectos de un esfuerzo de tracción sobre una grieta y de un esfuerzo de corte sobre una dislocación estan ilustrados en la fig (17); tanto el frente de la grieta como la dislocación pueden ser representadas por líneas que separan las áreas que se han fracturado o deslizado respecto a otras que no lo han hecho; tanto la propagación de la grieta como el movimiento de las líneas de dislocación involucra el rompimiento sucesivo de uniones atómicas a lo largo de las líneas o planos.

En la fractura, los enlaces atómicos se rompen durante el crecimiento de la grieta, en el movimiento de dislocaciones, los enlaces son re-unidos inmediatamente después del paso de la dislocación, mientras el paso del frente de grietas puede llevar a una falla catastrófica, el movimiento de una dislocación es extremadamente pequeño; una densidad de dislocaciones típica puede ser hasta de 10^{14} m^{-2} . Las tensiones necesarias para mover las dislocaciones son obviamente muy importantes; se debe enfatizar sin embargo, que los dos mecanismos no son frecuentemente independientes; el movimiento de dislocaciones puede generar grietas y fisuras; el flujo plástico puede ocurrir cerca de las caras de fractura a medida que la fractura procede.

VI.12 - RESISTENCIA A LA FRACTURA DE LOS CERAMICOS -

Podemos ahora reunir los argumentos analizados previamente y explicar en una forma cuantitativa la resistencia de las cerámicas en términos de parámetros fundamentales como el tamaño de las pequeñas microgrietas, la energía superficial efectiva y los esfuerzos de fluencia del material. Todas las cerámicas practicas son quebradizas excepto a altas temperaturas, pero una importante distinción en su comportamiento puede hacerse entre la fractura

originada en las micro-grietas del material y las fracturas generadas a partir de fallas originadas por el flujo plástico. Aunque cuando el flujo plástico es posible, la cantidad es muy pequeña y podemos mostrar que las imperfecciones generadas por la deformación plástica pueden frecuentemente crecer a un tamaño tal que la ecuación de Griffith se satisface a tensiones cercanas al límite elástico.

La Fig (18) indica algunas de las mas importantes cualidades de textura que son controladas por las condiciones de fabricación y que afecta tanto al límite elástico como la tensión de fractura del material. Los factores externos de mayor significado incluyen la temperatura y el ambiente. La forma general de dependencia de la temperatura con la resistencia de la cerámica indicada se puede ver en la figura (19) y esto podría aclarar como en la región de la resistencia mecánica relativamente independiente de la temperatura, a bajas temperaturas esta controlada por la propagación de grietas a partir de imperfecciones inherentes, mientras que la parte de la curva dependiente de la temperatura, a altas temperaturas, es controlada por fisuras producidas por el limitado flujo plástico.

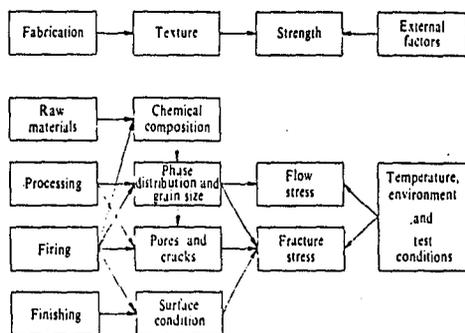


FIG (18). La fabricación y los factores que afectan la resistencia de las cerámicas.

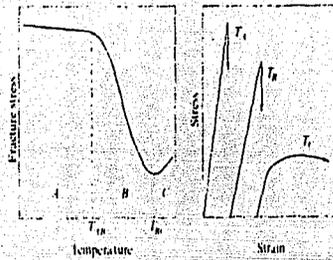


FIG (10). curva idealizada de la dependencia de la T y la resistencia a la fractura, y curvas de tensión/deformación para tres diferentes temperaturas

La resistencia puede ser entendida en términos de ec. (20). Discutiremos aquí los valores típicos de la energía superficial en los cerámicos, el origen de las grietas y entonces se presentarán datos de la resistencia para una selección de cerámicos de ingeniería.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi c}} = K \sqrt{c} \quad \text{Ec.(20)}$$

VI.13 - DATOS DE LA ENERGIA SUPERFICIAL -

Monocristales: La energía asociada con la superficie de un material proviene de las diferencias entre las fuerzas que actúan entre los átomos de la superficie del material y las de la masa de átomos del material. Se requiere energía para crear nuevas superficies y estas pueden ser suministrada en diferentes maneras, por ejemplo fuerzas mecánicas, soluciones químicas o vaporización a altas temperaturas. En cada caso la energía es absorbida a través de la ruptura de los enlaces entre los átomos. Inicialmente nosotros dimos atención a la energía superficial de las cerámicas en monocristales desde el punto de vista teórico y experimental. Estamos interesados en la energía libre de la superficie, definida como un cambio de la energía libre reversible durante la formación de un área unitaria de la superficie bajo

condiciones definidas, incluyendo temperatura, presión, y orientación; hay varios caminos de estimar los valores de la energía superficial partiendo de datos termodinámicos, y métodos que han sido discutidos por BRUCE (1965) y NURSE (1968), Bruce por ejemplo, usa un método simple que involucra la energía de sublimación y su relación es Ec 21

$$\gamma_0 = \gamma_0^* - \Gamma T \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde γ_0^* es la energía superficial a 0 °K, Γ es una constante y T es la temperatura absoluta. Los valores de Bruce de un número de cerámicas comunes están incluidos en la tabla (7). La energía libre superficial es un mínimo para un plano cristalográfico particular, como se indica, ambos en el mínimo y los valores promedio para las temperaturas de 20 °C y 1500 °C están tabulados. Los valores de la energía libre superficial están entre 0.5-3 Jm⁻² y variaciones entre ambas temperaturas y la orientación del cristal. El punto importante, es que estos valores están relacionados con los procesos reversibles ideales que raramente son observados bajo condiciones prácticas.

Material plane	Minimum energy surface plane	Minimum surface free energy (γ ₀ [*])	Average surface free energy (γ ₀)	γ ₀		γ ₀	
				20 °C	1500 °C	20 °C	1500 °C
MgO	{100}	1680 - 0.3087	2600 - 0.4767	1590	1150	2460	1756
BeO	{0001}	2140 - 0.3217	2400 - 0.3597	2050	1570	2290	1760
β-SiC	{110}	2030 - 0.3707	3000 - 0.5467	1920	1370	2840	2030
SiO ₂	{110}	616 - 0.1287	925 - 0.1937	580	390	870	580
TiO ₂	{110}	426 - 0.0897	800 - 0.1677	400	270	750	500
Al ₂ O ₃	{101̄3}	1120 - 0.2167	1200 - 0.2327	1060	740	1130	790
Cr ₂ O ₃	{101̄3}	857 - 0.1867	925 - 0.2007	800	530	870	570

TABLA (7) Valores de la energía libre superficial (mJm⁻²) calculados a partir de los datos de energía de sublimación.

Desviaciones en ambas direcciones a partir del comportamiento ideal son observadas. En muchos casos otros mecanismos de absorción de energía operan y los valores experimentales medidos son mas grandes que los valores calculados.

En otro extremo los valores bajos pueden ser registrados cuando, por ejemplo, monocristales son probados bajo condiciones químicas agresivas, incluyendo agua para los oxidos de forma que los enlaces atómicos son rotos por fuerzas químicas. Otra serie de mediciones experimentales de la energía superficial de monocristales fué hecha por Guilman (1960) usando una muestra en cantiliver; Los valores se refieren a la energía superficial y la necesaria para iniciar fractura por clivaje, que puede o no corresponder a los datos termodinámicos.

Guilman obtuvo una selección de monocristales que exhiben planos de clivaje definidos y cuya geometria del especimen es tal que la grieta de clivaje se propaga a lo largo del centro del cantiliver; Los cristales incluyen LiF, MgO, CaF₂, CaCO₃, Si y Zn. Cuando la muestra es agrietada a menos de 196 °C bajo cero e inmediatamente probada a esa temperatura, los valores promedio de energía superficial de aprox 1.2 Jm⁻² y son cercanos a los datos termodinámicos; Sin embargo otras piezas que fueron agrietadas y probados a 25 °C tienen valores significativamente mas altos alrededor de 3 Jm⁻². Esto se atribuye a la contribución de la energía superficial dada por deformación plástica junto a la punta de la grieta, que se puede revelar por la técnica de ataque de dislocaciones.

Las conclusiones importantes de este trabajo son que en experimentos cuidadosamente hechos donde la fractura es producida en forma casi ideal y reversible, los datos experimentales tienen bastante concordancia con las expectativas de la teoria termodinámica. Como sea es vital suprimir contribuciones de la

deformación plástica, de otra manera los valores serán mucho mas altos de γ_i .

Mediciones similares fueron obtenidos por Wiederhorn (1969) en alúmina, un material que no exhibe un bien definido plano de clivaje.

Mediciones exitosas solo fueron posibles en ciertos planos del cristal de MgO y valores de 7.3 y 6.6 Jm^{-2} se obtuvieron para los planos (1010) y (1012). Los datos no pudieron obtenerse para los planos (0001) por su carencia de neutralidad eléctrica. Estos valores son considerablemente mas altos que las estimaciones termodinámicas dadas para la energía superficial expuestas en la tabla (7). Las diferencias pueden ser atribuidas a los efectos no conservativos durante la fractura, tales como la generación de calor o la deformación plástica cerca de la punta de la grieta, aún cuando no ha sido posible obtener evidencia positiva experimental.

Mediciones adicionales fueron hechas por Wiederhorn y compañía (1973) en función de la temperatura. Cuidadosos estudios de microscopía electrónica de transmisión en la región cerca de las puntas de las grietas muestran evidencia del proceso de deformación plástica a temperaturas menores de 400 °C. Aunque alguna evidencia fue obtenida a temperaturas mas altas pero solo en una pequeña proporción de las muestras examinadas. Para algunos cristales no ha sido posible entender con precisión el proceso de absorción de energía durante la fractura por clivaje.

VI.14 POLICRISTALES: Existe amplia información disponible acerca de valores experimentales de γ_i para un amplio rango de cerámicas policristalinas. Los datos de un número específico de materiales muestran valores de 10 a 50 Jm^{-2} . Esto es un orden de magnitud mas grande que los valores de los monocristales. El proceso de fractura de un policristal necesariamente debe ser mas complicado que el de un cristal solo; El efecto mas obvio es que la superficie de la fractura de un policristal es mas rugosa que la

de un cristal simple; Esto significa que la energía superficial efectiva de un policristal es mas alta porque los valores de energía de la fractura son expresados por unidad de area planar proyectada. La superficie rugosa esta asociada con los cambios necesarios en la orientación de la grieta cuando pasa de grano a grano o de un límite de grano a otro.

Una segunda razón para los relativamente altos valores de γ_i en los policristales es que la presencia de deformación plástica adyacente a las caras de las grietas es mucho mas común que en los monocristales; esto esta asociado con la mayor complejidad con el proceso de fractura. Otros factores incluyen agrietamientos adicionales que pueden estar en relación con la grieta principal y otros efectos menores no fácilmente cuantificables, incluida la generación de energía como calor, luz o sonido como formas de propagación de la grieta.

EVANS (1970) trabajó con policristales de oxido de Hg de grano grande creados cuidadosamente cuidando que los factores varios contribuyeran con la energía superficial efectiva experimental valuada de acuerdo con la ecuación 22

$$\gamma_i = \eta\gamma_o + \gamma_p + \gamma_u \quad \text{ec.22}$$

donde η representa un factor debido a la superficie no planar
 γ_p la contribución de la deformación plástica y
 γ_u un factor no cuantificable.

EVANS; fundamenta que el valor de la energía superficial puede ser calculado por la deformación plástica cerca de la cara de la grieta con una menor contribución debida a la rugosidad de la superficie.

- CAPITULO VII -

- GENERALIDADES SOBRE LOS ENSAYOS DE IMPACTO -

INTRODUCCION: A menudo muchas máquinas y partes de ellas están sometidas a cargas dinámicas; Para estimar el comportamiento en condiciones de adecuada seguridad de estructuras, máquinas y sus partes, es necesario involucrar en el análisis para determinar la reacción general de la estructura o máquina y considerar las propiedades de los materiales bajo dichas cargas. El comportamiento, de los materiales bajo cargas dinámicas puede diferir, y en mucho cuando se tienen cargas estáticas o lentamente aplicadas.

Un tipo importante de carga dinámica es la que se aplica súbitamente como es el caso del impacto de una masa en movimiento. Cuando se cambia la velocidad de un cuerpo al golpear, ocurre una transferencia de energía; se realiza trabajo sobre las partes que reciben el golpe. La mecánica del impacto involucra la cuestión de los esfuerzos inducidos y además una consideración de la transferencia de energía y la absorción de la energía. La energía de un golpe puede absorberse de varias maneras a través de la deformación elástica de los miembros y las partes de un sistema, a través de las deformaciones plásticas de las partes, a través de la acción friccional entre partes y a través de los efectos de la inercia de las partes en movimiento. El efecto de una carga de impacto que produzca deformación, depende de la cantidad de energía utilizada en causar la deformación.

Para el diseño de estructuras y máquinas que deban recibir cargas de impacto el objetivo es proveer márgenes para la absorción de tanta energía como sea posible, a través de la acción elástica y luego confiar en alguna clase de contención para disiparla. En la mayoría de los ensayos para determinar características de absorción energética de los materiales bajo cargas de impacto, el objetivo es utilizar la energía del golpe para causar la ruptura de la probeta.

VII.1 - ASPECTOS DEL ENSAYE DE IMPACTO -

En algunos ensayos se hacen mediciones limitadas de la deformación o la deflexión bajo la carga de impacto, pero en los ensayos de impacto más comúnmente usados como son los de barra ranurada, solamente se determina la energía para producir la ruptura. En estos ensayos un objetivo consiste en obtener una medida relativa de la tendencia a presentar la fractura con la disminución de la temperatura, especialmente cuando resulta afectada por la presencia de constituyentes menores o pequeñas variaciones de composición o estructura de un metal particular u otro material.

Se está descubriendo que la falla de algunos de los materiales a algunas condiciones puede explicarse solo en términos del comportamiento de su microestructura. La comprensión del comportamiento de los metales en forma de barras ranuradas bajo la carga del impacto, requiere tener conocimiento del mecanismo de la fractura influida por una estructura policristalina.

VII.2 - COMPORTAMIENTO DE MATERIALES BAJO CARGAS DE IMPACTO -

La capacidad de un material en relación con el trabajo requerido para causar la fractura sobre este se llama tenacidad, la tenacidad depende fundamentalmente de la resistencia y la

ductilidad, y parece ser independiente del tipo de carga que se le aplique.

No todos los materiales responden de la misma manera a las variaciones de velocidad para la aplicación de la carga; algunos materiales presentan lo que se les llama sensibilidad a la velocidad en un grado mucho más alto que otros,

Existen ejemplos de materiales que tienen un comportamiento radicalmente diferente bajo cargas a altas y bajas velocidades de impacto. Uno de ellos es el vidrio ordinario, el cual es perforado con un agujero bien hecho por una bala con alta velocidad, pero con una carga de baja velocidad se estrella. Un caso contrario al vidrio es el lacre, el cual en forma de barra se rompe como si fuera quebradiza con un golpe rápido, pero en forma lenta se cuelga plásticamente bajo su propio peso si se le apoya como una viga. La tenacidad al ser determinada por la carga de impacto no es necesariamente mayor que la determinada por la carga estática, la tenacidad por impacto es menor que la tenacidad estática.

En el caso de un material dado, la tenacidad no varía mucho sobre un rango considerable de velocidad de acometida pero arriba de alguna velocidad crítica, la energía requerida para fracturar el material parece disminuir rápidamente según el aumento de velocidad. Esta velocidad crítica se ha descubierto que está asociada al ritmo de propagación de la deformación plástica y es afectada por la longitud de la pieza sometida a la carga de impacto.

Además del efecto de la velocidad, la forma de una pieza puede mostrar un marcado efecto sobre su capacidad para resistir las cargas de impacto. A temperaturas normales una barra simple de material dúctil no se fracturará bajo una carga de impacto en flexión. Para poder fracturarla de un solo golpe, las probetas de un material dúctil se ranuran.

El uso de una ranura causa altas concentraciones de esfuerzos localizados, (tiende a reducir artificialmente la ductilidad),

causa que la mayor parte de la energía de ruptura sea absorbida en una región localizada de la pieza, y tiende a inducir un tipo de fractura frágil.

La tendencia de un material dúctil a comportarse como un material quebradizo al romperse en forma de una probeta ranurada es lo que se conoce como Sensibilidad a la ranura. (entalla)

VII.3 - ALCANCE Y APLICABILIDAD DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO -

El ensayo de impacto ideal sería uno en el cual toda la energía de un golpe se transmitiera a la probeta, pero en la realidad esto nunca ocurre ya que siempre se pierde alguna energía debido a la fricción, por deformación de los apoyos y la masa que golpea, y por vibración de varias partes de la máquina de ensayo.

En algunos ensayos, es imposible obtener una medida realmente exacta de la energía absorbida por la probeta. Los valores particulares obtenidos de un ensayo de impacto dependen mucho de la forma de la probeta usada.

Estos hechos requieren una estrecha atención a la normalización de los detalles de cualquier tipo de ensayo si han de obtenerse resultados concordantes.

Cada tipo de ensayo de impacto posee su propio campo de uso especializado, y su aplicabilidad depende en gran parte de la satisfactoria correlación con el desempeño bajo condiciones de servicio.

Existen varias formas de aplicar cargas de impacto, por ejemplo, flexión, tensión, compresión, torsión. La carga flexionante es la más común, las cargas de compresión y torsión se usan en casos especiales. El impacto puede lograrse mediante el uso de una pesa que cae, un péndulo oscilante, o un volante. Existen ensayos para fracturar la pieza de un solo golpe; otros emplean golpes repetidos.

Los ensayos de impacto más comúnmente usados para los aceros

son los de Charpy e Izod los cuales emplean el uso del péndulo. En el ensayo de Charpy, la probeta es apoyada como una simple viga, y en el de Izod se le apoya como en voladizo. En estos ensayos, una gran parte de la energía absorbida se acumula en una región inmediatamente adjunta a la ranura, y con frecuencia se induce un tipo de fractura frágil.

Los resultados parecen ser muy sensibles a las variaciones de la estructura del acero según resulta afectado por el tratamiento térmico, por ciertos cambios menores de composición que tienden a causar la fragilidad, tales como las variaciones en el contenido de azufre o fósforo, y por varios elementos aleantes.

Estos ensayos, al realizarse sobre probetas a bajas temperaturas, han resultado útiles al indicar si se mantiene o no una resistencia adecuada a esas temperaturas.

El ensayo de impacto de tensión ofrece la oportunidad de estudio del comportamiento de los materiales dúctiles bajo carga de impacto sin las complicaciones introducidas mediante el uso de la ranura, aunque las probetas ranuradas en tensión también han sido usadas en algunos ensayos.

VII.4 - MAQUINAS DE IMPACTO, ASPECTOS GENERALES -

El efecto de un golpe depende en general, tanto de la masa de las partes que reciben el golpe como de la energía y masa del cuerpo golpeante

Los objetos que requieren normalización son la base, el yunque, los apoyos para las probetas, la masa percutiente etc.

Los aspectos y componentes principales de una máquina de pruebas de impacto son:

- 1) Una masa móvil cuya energía cinética es suficiente para causar la ruptura de la probeta colocada en su camino.
- 2) Un yunque y un apoyo sobre el cual se coloca la probeta para recibir el impacto.
- 3) Un medio para medir la energía residual de la masa móvil después de que la probeta ha sido rota. La energía cinética es determinada y controlada por la masa del péndulo y la altura de la caída libre, medidas con respecto al centro de masa por la ec 23 .

$$E_c = w h$$

ec.23

donde w = peso de la masa o péndulo.

h = altura vertical que la masa recorre al caer.

El péndulo debe suspenderse de tal manera que caiga en un plano vertical sin posibilidad de desviación, y los rodamientos deben ser tales que la fricción sea mínima.

Además debe ser suficientemente fuerte para que las vibraciones excesivas no causen variaciones serias en los resultados.

El mecanismo de liberación del péndulo no debe influir en el libre movimiento del rodamiento sin causar efecto de atoramiento, aceleración o vibración.

El yunque debe ser suficientemente pesado en relación con la energía del impacto para que no se pierda una cantidad indebida de energía por la deformación o vibración.

El dispositivo para apoyar la probeta debe ser tal que la probeta quede sujeta en posición antes del instante del impacto.

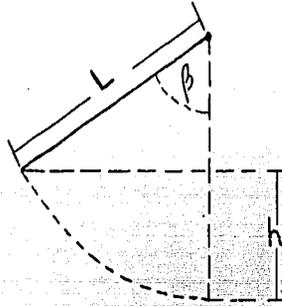
La línea de acción de la fuerza reactiva entre la probeta y el péndulo debe pasar por el centro de percusión al instante del impacto; se considera que el centro de percusión quede tan cerca como sea posible del percutor.

El percutor del péndulo debe coincidir con la línea vertical a través del centro de rotación cuando el péndulo cuelga libremente. Para indicar el balanceo del péndulo de las máquinas de tipo Charpy e Izod después que la probeta ha sido rota, un brazo fijado al péndulo mueve un señalador de fricción sobre un arco graduado en grados o pies-libras.

El indicador de fricción cuyo eje de rotación coincide con el péndulo, es simplemente un brazo que puede girar sobre un rodamiento de perno con una presión tal que impida que el indicador cambie de posición bajo su propio peso. La presión de empuje debe ajustarse a un mínimo que impida que el péndulo se pare o caiga.

Al principio de cada ensayo este indicador se ajusta para establecer contacto con el péndulo e indicar la lectura apropiada cuando el péndulo pende verticalmente.

VII.4.1 - ECUACIONES PARA EL CALCULO DE LA ENERGIA DEL PENDULO
(FIG A)



De la figura (A) tenemos:

$$L-h = L \cos \beta \text{ -----(VII-1)}$$

La energia potencial del péndulo es:

$$E_p = h W_p g \text{ -----(VII-2)}$$

Combinando las ecuaciones (VII-1), (VII-2) se tiene

$$h = \frac{E_p}{W_p g} \quad \frac{L-E_p}{W_p g} = L \cos \beta \text{ -----(VII-3)}$$

La máxima energia del péndulo es la energia potencial al inicio

$$\text{del ensayo y es } E_m = h_m W_p g \text{ -----(VII-4)}$$

La energia potencial generada por el péndulo es \$E_p\$, y relacionando la ecuación para la absorción de energia de la probeta es \$E_m - E_s = E_p\$ -----(VII-5)

Combinando las ecuaciones (VII-3, 4, 5) resulta lo siguiente.

$$E_p = W_p g L (1 - \cos \beta).$$

$$E_m - E_s = W_p g L (1 - \cos \beta).$$

$$E_m - E_s = \frac{E_m L (1 - \cos \beta)}{hm}$$

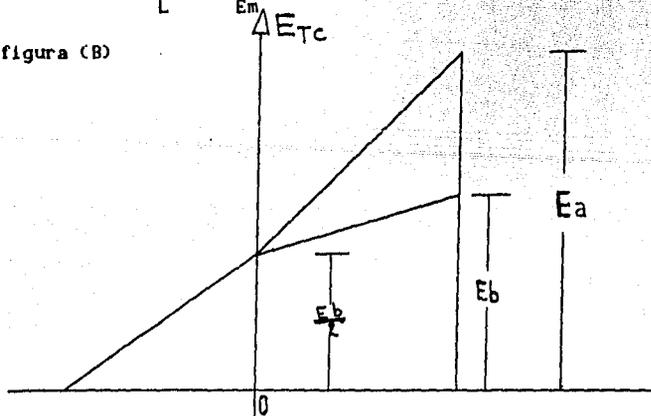
$$\frac{E_m - E_s}{E_m} = \frac{L (1 - \cos \beta)}{hm}$$

$$\frac{1 - E_s}{E_s} = \left(\frac{L}{hm} \right) (1 - \cos \beta) \quad \text{----- (VII-6)}$$

despejando.

$$\beta = \cos^{-1} \left[1 - \left(\frac{hm}{L} \right) \frac{(1 - E_s)}{E_m} \right] \quad \text{----- (VII-7)}$$

figura (B)



De la figura (B) la energía total corregida esta dada por.

$$E_{tc} = m \beta + b \quad \text{----- (VII-8)}$$

para el punto inicial, la energía potencial del péndulo es :

$$\frac{E_b}{2} = m(0) + b \text{ -----(VII-9)}$$

$$b = \frac{E_b}{2} \text{ -----(VII-10)}$$

La energía corregida E_a , en el primer giro del péndulo ocurre en el ángulo máximo del péndulo β_{\max} , sustituyendo en la ecuación

$$(VII-8) \quad E_a = m \beta_{\max} + \frac{E_b}{2} \text{ -----(VII-11)}$$

combinando las ecuaciones (VII-8) y (VII-11)

$$E_{tc} = \frac{(E_a - E_b)}{2} \left(\frac{\beta}{\beta_{\max}} \right) + \frac{E_b}{2} \text{ -----(VII-12)}$$

- NOMENCLATURA -

b = intercepción de la energía corregida.

E_a = energía corregida incluyendo la fricción del péndulo mas la fricción de la carátula.

E_b = energía corregida únicamente por la fricción del péndulo.

E_m = energía máxima del péndulo (al iniciar el ensayo).

E_p = energía potencial desde la posición de apoyo del péndulo.

E_s = energía de fractura de la probeta.

E_{tc} = energía total corregida ganada por la energía de fractura.

g = aceleración de la gravedad m/s^2 .

h = diferencia de longitud del péndulo, desde el centro de gravedad, o posición hasta el giro máximo del péndulo después de haber fracturado la probeta.

h_m = altura máxima del centro de gravedad del péndulo.

m = pendiente de la capacidad de energía corregida.

L = distancia desde el punto de apoyo al centro de gravedad del péndulo.

β = ángulo que forma el péndulo desde la posición inicial hasta el final del giro.

MAQUINA DE OXFORD

VII.5.1 - En la máquina de Oxford el yunque va montado sobre un péndulo que puede balancearse independientemente del péndulo de golpeo y así medir la energía transmitida al yunque. Las relaciones energéticas se obtienen de los movimientos de ambos péndulos. En los martillos de caída recta, los aspectos principales son la masa móvil de energía cinética conocida, mas no necesariamente de tal magnitud que cause la ruptura con un solo impacto, y un yunque. La mayoría de los martillos de caída lenta no poseen un dispositivo para medir la energía cinética residual de la masa-martillo o ariete después de que ha roto la probeta .

En un ensayo de impacto durante la caída, en el cual la altura de la caída se aumenta gradualmente, se obtiene una medida aproximada de la mínima carga energética requerida para causar la ruptura.

En algunas máquinas la variación de la velocidad del martillo antes y después del impacto pueda obtenerse de los datos autográficos de desplazamiento de tiempo, con los cuales las relaciones energéticas pueden calcularse, sin embargo, las mediciones de esta índole son muy difíciles de realizar con exactitud.

En las máquinas de impacto repetido debe preverse de algún modo el evitar que las probetas en flexión resulten desplazadas sin restringir, empotrar o sujetar los extremos .

En los martillos de caída recta es necesario que los ejes del martillo y de las guías estén verticales y alineadas y que los apoyos y el yunque estén ubicados de tal modo que el impacto pueda aplicarse perpendicularmente a la probeta. La fricción en las guías debe minimizarse manteniéndolas libres de grasa o herrumbre,

(Se les puede lubricar con grafito pulverizado.) Los requerimientos generales para máquinas de volante son similares a los de las pendulares aunque los detalles mecánicos son por supuesto diferentes.

VII.5.2 - La máquina GUILLERY lleva un yunque fijo y la energía del impacto se determina por el cambio de velocidad de rotación del volante antes y después del impacto. En la máquina MANN-HASKELL el yunque está sobre un péndulo, el desplazamiento del cual se determina para obtener la energía de ruptura.

En ambas máquinas el impacto es asestado mediante el uso de un brazo percutiente retráctil el cual va atrás del volante hasta que la rueda adquiere su velocidad. Por medio de un dispositivo de disparo el martillo es soltado y luego es forzado a su posición proyectante por la acción centrífuga para el propósito en cuestión.

La discusión detallada de los procedimientos para los ensayos de impacto está limitada a los ensayos de CHARPY e IZOD para metales y el ensayo HATT-TURNER de la madera .

Estos pueden considerarse muy representativos de la mayoría de las labores de ensayos de impacto .

VII.6 - EL ENSAYO DE CHARPY PARA METALES Y PLASTICOS -

La máquina de tipo Charpy es adquirible en una variedad de tamaños; Un tamaño usual es aquel que posee una capacidad de aproximadamente 220 pie-libra para metales y 4 pie-libra para plásticos. Un diseño común de máquina se muestra en las figuras 20 y 21 la siguiente descripción abreviada del ensayo se basa en los requerimientos de la ASTM/E 23.

El péndulo consiste en una barra relativamente ligera aunque

rígida o sección I en el extremo de la cual hay un pesado disco. El péndulo esta suspendido de una flecha corta que gira en rodamientos de balines y se balancea hasta la mitad de la distancia entre dos postes verticales cerca de cuya base estan los soportes o yunques. El percutor esta ligeramente redondeado como se muestra en la figura 22a y debe alinearse de modo tal que establezca contacto con la probeta contra su peralte total en el instante del impacto.

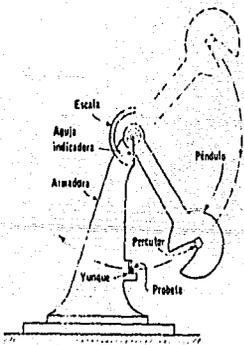


FIG 20 Diagrama de la máquina de Impacto de Charpy

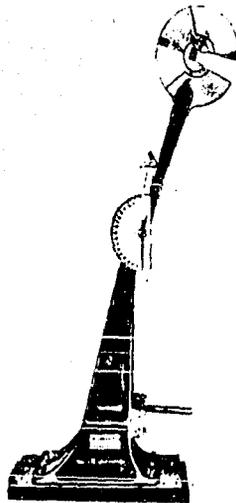


FIG 21 Máquina de Impacto de Charpy

La probeta standard para ensayos de flexión es una pieza de 10*10*55mm ranurada como se muestra en la figura 22.a (ASTM 23) otros tamaños se usan en casos especiales. En muchas especificaciones comerciales se requieren una ranura en forma de ojo de cerradura o de U como se muestra en la figura 22.b y c.

La probeta se carga como una viga simple, se coloca horizontalmente entre los dos yunques como se muestra en la figura 22.d, de modo que el percutor golpee el lado opuesto de la ranura a la mitad del claro, ver fig 22.

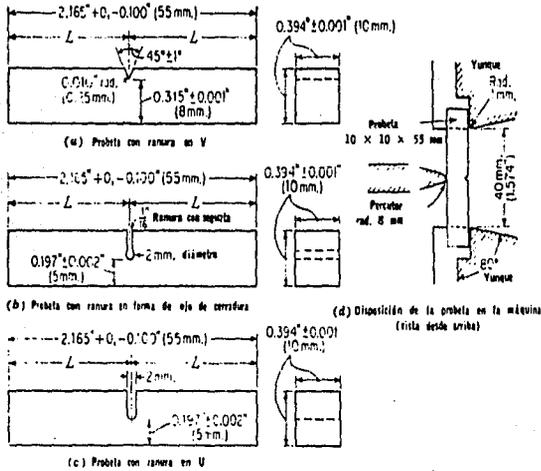


FIGURA 22 probetas de Charpy

El péndulo es elevado hasta su posición mas alta y sostenido por un tope ajustado para dar una altura de caída constante para todos los ensayos, luego se le suelta y permite caer y fracturar la probeta.

En su movimiento ascendente el péndulo lleva el indicador de fricción sobre una escala semi-circular graduada en grados o pie-libras .

La energía requerida para fracturar la probeta es una función del ángulo de elevación como se demostrará mas adelante. El peso del péndulo, la posición del centro de gravedad y la altura de la caída contados desde el centro de gravedad se determinan todos experimentalmente.

La máquina debe construirse de tal modo que el espacio entre

los yunques no disminuyen en su ancho en la dirección del movimiento del péndulo. En una máquina normal el ancho debe aumentar como se muestra en la figura 22.d para impedir el arrastre entre la probeta y los yunques.

Para los ensayos de impacto de tensión una probeta se sujeta al borde posterior del péndulo. Cuando el péndulo cae, un martillo con forma de bloque fijado al extremo proyectante de la probeta golpea dos yunques extendidos, fracturándose la probeta al pasar el péndulo entre los dos yunques. Las probetas de tensión pueden ser sencillas o llevar una ranura circunferencial.

Un tipo de probeta sencillo tiene un diámetro de 6 mm, una probeta ranurada correspondiente tiene un diámetro de 10 mm, excepto en el arranque de la ranura que tiene 1 mm de ancho y 2 mm de profundidad proporcionando un diámetro neto de 6 mm como para el primer tipo. El ensayo de tensión no ha sido normalizado y no se usa mucho en la práctica comercial.

VII.6.1 - LA MAQUINA IZOD

La máquina Izod de ensaye al impacto comunmente se hace con una capacidad de 120, 150, 300 pie-libra aunque otras capacidades esten disponibles. El péndulo consiste en un martillo montado en el extremo de un miembro relativamente ligero, el extremo superior del cual esta montado en chumaceras de balas en un poste atornillado a un zoclo de hierro fundido, una ilustración se muestra en la figura 23, el péndulo golpea la probeta la cual se sujeta para fungir como un voladizo vertical de 10 mm * 10 mm de sección y 75 mm de largo que lleva una ranura normal de 45 grad y 2 mm de profundidad, fig 23.

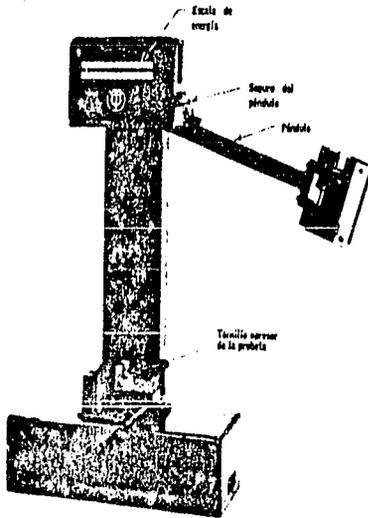


FIGURA 23 Máquina IZOD de ensayo a impacto. (Cortesía de Timius ing Machine Co.)

El montaje de la probeta y la posición relativa del percutor se muestran en la figura 24 la elevación angular del péndulo después de la ruptura de la probeta o la energía para fracturar la probeta se indica en una escala graduada por un indicador de fricción. Algunos experimentadores prefieren la máquina de IZOD a la de Charpy pues en la primera la pieza de ensayo no es forzada en la región de la ranura por la presión del tornillo opresor.

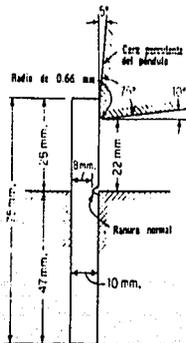


FIGURA 24 Probeta de viga en voladizo y su montaje para el ensayo de Izod

VII.7 - CALCULO DE RELACIONES ENERGETICAS -

La resistencia al impacto o energía absorbida al romper la probeta es igual a la diferencia entre la energía del péndulo antes y después del impacto; la diferencia de energía es una función de la disminución de la velocidad de rotación y puede computarse con el peso y la altura de la caída del péndulo antes del impacto y la altura de elevación después para obtener resultados exactos (dentro de los límites del ensayo) puede resultar necesaria una corrección por la pérdida al arrastre de aire, por la energía absorbida por la fricción en el rodamiento de la máquina y por el brazo indicador y la energía usada al mover la pieza de ensayo rota.

Sin considerar las pérdidas la energía usada al fracturar una probeta puede computarse como sigue fig 25.

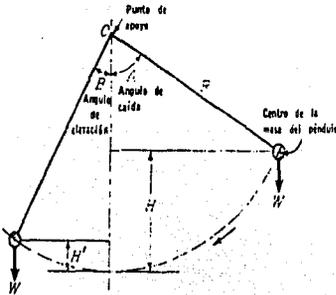


FIGURA 25 Relaciones espaciales para una máquina pendular.

ENERGIA INICIAL = $WH = WR (1-\cos\alpha)$ (1)

ENERGIA DESPUES DE LA RUPTURA = $WH' = WR (1-\cos\alpha')$ (2)

ENERGIA PARA FRACTURAR LA PROBETA = $W (H-H')$ = $WR (\cos B - \cos A)$..(3)

-NOMENCLATURA-

W = PESO DEL PENDULO.

H = ALTURA DE LA CAIDA DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PENDULO.

H' = ALTURA DE ELEVACION DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PENDULO.

A = ANGULO DE CAIDA.

B = ANGULO DE ELEVACION.

R = DISTANCIA DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PENDULO AL EJE DE ROTACION (O).

La ecuación No.3 se hace aplicable a ángulos mayores de 90 grad advirtiendo que $\cos (90+\theta) = -\sin \theta$.

Los resultados usualmente se dan en pié-libra o kilográmetros sin referencia al volumen de metal (material) involucrado. Las correcciones de las pérdidas de energía debidas a la fricción de apoyo del indicador y del péndulo y al arrastre de aire sobre el segundo pueden hacerse como sigue.

1) Sin colocar una probeta sobre el yunque y con el indicador colocado en cero, libérese el péndulo de la manera normal regístrese la lectura del indicador resultante como ángulo B1 .

2) Sin reajustar el indicador, libérese nuevamente el péndulo de manera normal. Como usualmente para mover al indicador hacia adelante se requiere una pequeña cantidad de energía, este segundo balanceo debe subir mas el indicador porque el péndulo no es retardado por el señalador excepto en el mero extremo del balanceo. Repitase este proceso hasta que el indicador no sea movido por el péndulo y regístrese la lectura final del indicador como ángulo B2.

3) Con el indicador en el ángulo B2 libérese nuevamente el péndulo de la manera normal y permítasele 10 balanceos (5 hacia adelante, y 5 hacia atrás) regrese entonces el indicador justamente lo suficiente, de modo que en el undécimo balanceo el péndulo no se mueva hacia adelante mas de un grado. No se toque el

péndulo durante esos 11 balanceos. Regístrese la lectura final del indicador como ángulo B3. La energía requerida para mover el indicador y la pérdida por concepto del arrastre del aire y la fricción articular del péndulo puede asumirse que esta uniformemente distribuida sobre sus rangos de acción; las computaciones para una determinación típica se ofrecen a continuación.

Sea B1 = 160.1 grad , B2 = 160.2 grad , B3 = 156.6 grad

La energía requerida para mover el indicador a través del ángulo de 160.2 grad es representado por un ángulo B2 - B1 = 0.1 grad. El ángulo promedio de elevación entre las lecturas B2 y B3 es $\frac{(B2+B3)}{2}$ de ahí que un balanceo promedial completo hacia arriba y

abajo sea aproximadamente

$$\frac{(B2 + B3) \cdot 2}{2} = \frac{(160.2 + 156.6) \cdot 2}{2} = 316.8^{\circ}$$

La energía perdida por el arrastre del aire y la fricción pendular durante un balanceo promedio hacia adelante esta representado por un ángulo.

$$\frac{(B2-B3)}{10} = \frac{(160.2-156.6)}{10} = 0.36^{\circ}$$

La energía perdida de esta manera durante un balanceo ya sea ascendente o descendente de 160.2 grad está representada por un ángulo.

$$\frac{(160.2 \cdot 0.36)}{316.8} = 0.2^{\circ}$$

El ángulo de caída efectivo (A en la Ec. (3)) es de $160.2^{\circ} + 0.2^{\circ} = 160.4^{\circ}$

La energía total perdida en el arrastre del aire y la fricción articular del péndulo y la del indicador durante un balanceo ascendente de 160.2 grad está representada por un ángulo de $0.2^{\circ} + 0.1^{\circ} = 0.3^{\circ}$

El ángulo de ascenso corregido despues de la ruptura de la probeta (B en la Ec. (3)) es :

$$\frac{\text{ang. observado} + 0.3 \times \text{angulo observado}}{160.2}$$

La pequeña cantidad de energía perdida al impartir movimiento a la probeta rota usualmente no se toma en cuenta en el ensayo comercial. Sin embargo, asumiendo que la probeta rota deje el yunque a la velocidad del péndulo oscilante, su magnitud puede calcularse con la fórmula; DONDE

$$e = w r (1 - \cos B).$$

e = energía usada para mover la probeta rota .

w = peso de la probeta .

r = distancia de la probeta desde el eje de rotación del péndulo.

B = ángulo de elevación del péndulo después de la ruptura de la probeta.

Para las máquinas que dan la lectura directa en pie-libras puede seguirse un procedimiento correspondiente para determinar las correcciones anteriores .

- CAPITULO VIII -

-EXPERIMENTACION-

Ensayo de Impacto

1.- Origen de las muestras: Las muestras a examinar se obtuvieron del Taller Experimental de Cerámica, el cual es un taller que maneja únicamente cerámica de alta temperatura.

1.1- Cantidad de muestras: 4 muestras de distinta composición son las que se sometieron a prueba de impacto; cerámica de alta temperatura, cerámica de alta temperatura resistente al choque térmico (refractario), porcelana, stoneware chino. De cada muestra se tuvieron lotes de 10 especímenes para cada una, tendiéndose un total de 40, siendo sometidas todas a prueba de impacto.

1.2 PREPARACION DE MUESTRAS PARA ENSAYO DE IMPACTO

Las muestras sometidas a ensayo de impacto tuvieron la siguiente preparación. Tomando en cuenta que los especímenes deberían tener medidas específicas, se inició un proceso de desgaste para poder ajustar las dimensiones de las muestras a las medidas recomendadas por la norma (1 cm. de espesor * 1 cm. de altura * 5cm. de largo); este proceso se hizo de la siguiente manera: se lijaron (lija No. 300 de carburo de silicio) en forma plana ya que las caras deben ser lo más paralelas cada una de ellas, hasta llegar a las medidas sugeridas.

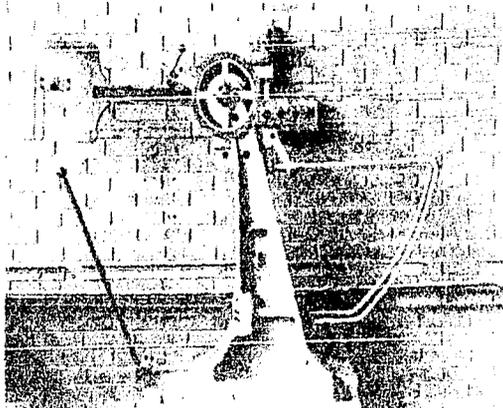
2.- Condiciones de realización del ensayo: Condiciones ambientales y de operación normales en la Máquina de prueba de impacto perteneciente al Instituto de Investigaciones en Materiales, cuyas características se mencionan a continuación.

1) máquina modelo No. 80368

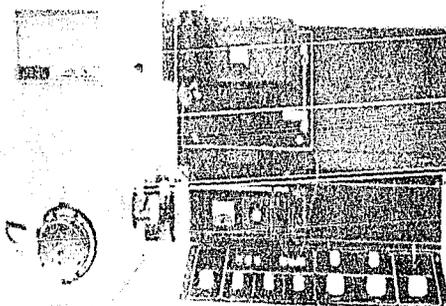
2) capacidad..... 30 Kgf-M

- 3) energía de impacto..... 30.02 Kgf-M
- 4) peso del martillo del péndulo..... 26.06 KG
- 5) medida del punto fijo del martillo de flecha al centro de gravedad..... 0.6350 M
- 6) medida del punto de impacto al punto fijo del martillo de flecha..... 0.750 M
- 7) medida del punto fijo del martillo de flecha al centro de impacto..... 0.750 M
- 8) ángulo de giro hacia arriba del martillo del péndulo..144.3 DEG
- 9) ángulo de elevación del martillo del péndulo al punto de impacto..... 144.5 DEG
- 10) velocidad del martillo del péndulo al punto de impacto..5.166 m/seg.
- 11) lugar de prueba Instituto de Investigaciones en Materiales
- 12) A continuación se presenta una fotografía de esta máquina de prueba de impacto.

fotografía
VIII-1



3.-EXAMEN DE FRACTOGRAFIA: El estudio de estas muestras se realizó con un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSTM T-20 serie ISTM TVS , con una resolución de 100 Amstrongs (1000 nanómetros), propiedad del I.I.M. cuya imagen se muestra en la siguiente fotografía VIII-2



fotografía VIII-2

3.1 Las muestras fueron preparadas de la forma convencional para poder ser sometidas al estudio fractográfico, tal como se describe a continuación.

3.2 PREPARACION DE MUESTRAS:

a) Corte de la muestra: De las muestras que han sido fracturadas durante la prueba de impacto se tomará la zona fracturada y se cortará de manera que tanto la zona fracturada como la zona a cortar queden paralelas , esto es con la intención que en el porta muestras quede el area mas plana en exposición FIGURA VIII-1

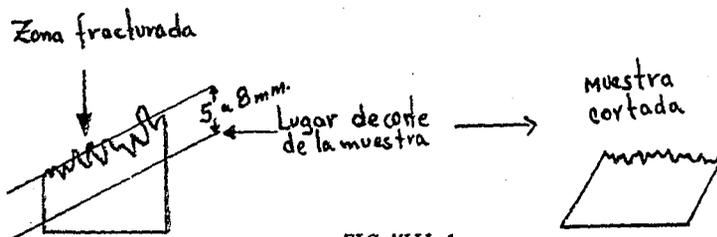


FIG VIII-1

b) Una vez cortada la muestra como se indicó se procederá a unir (pegar) esta muestra con el porta muestras como se señala a continuación.

c) Colocando el portamuestras, estos materiales unidos deberán funcionar como un conductor, y deberán tener unas medidas que se recomiendan para su instalación, en función de las características del microscopio y deberán ser las siguientes ver fig VIII-2

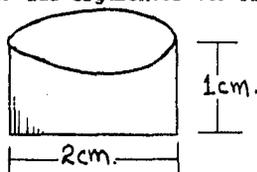


FIG VIII-2

de otra manera si fuesen mayor o menor estas dimensiones, el porta muestras quedaria holgado, o simplemente no habria lugar en el otro caso.

d) La unión entre el porta muestras y la muestra a analizar se hizo con pinturade plata, obteniéndose buena adherencia entre ambas superficies, quedando de la siguiente manera fig VIII-3

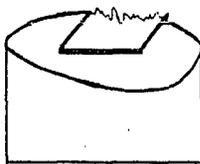


FIG VIII-3

e) En el inciso c se hace notar en la figura que el porta muestras debe ser de un material conductor Fig 2 , esto es debido a que el haz de electrones que incide sobre la superficie fracturada debiera salir de esta zona. De otra manera, la zona a estudiar se saturará

de electrones obteniéndose una imagen brillante la cual no nos mostraría nada de lo que queremos observar en la pantalla del microscopio.

f) Tomando en cuenta en inciso 5 y sabiendo que los tipos de cerámica a estudiar no son conductoras se presentará el problema anterior (saturación de electrones en la superficie fracturada, que es la zona de estudio); Por lo tanto se procedió a buscar la manera de que estos electrones que llegan a la zona de estudio, en el momento que lleguen y se acumulen, sean conducidos por una línea de tierra por la cual se fuguen, esta línea de tierra esta conectada a un segundo porta muestras que va a un cilindro (camara) del microscopio.

Este conductor que haremos entre la línea en la que esta aterrizado el microscopio y la zona de estudio (zona fracturada), se hará través de la muestra hasta hacer contacto con el porta muestras (que como ya habíamos comentado es conductor).

Esto se hará por medio de una capa de pintura de plata la cual se pintará a un costado de la muestra de cerámica y el porta muestras como se indica en la fig VIII-4

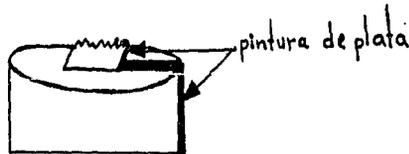


FIG VIII-4

Sin embargo, esto no es suficiente ya que en la zona de estudio (fractura) sigue habiendo un aislamiento entre los electrones que se depositan en la superficie y el conductor hecho de pintura de plata que esta a un costado de la muestra; Ahora bien no podemos pintar la superficie a estudiar con pintura de plata para que ahora si haya un conductor que lleve estos electrones a tierra por un lado, pero por otro, la capa que colocáramos, sería tan gruesa que la parte que veríamos en la pantalla del microscopio sería la

capa de pintura de plata, por lo tanto se recurrió a lo siguiente.

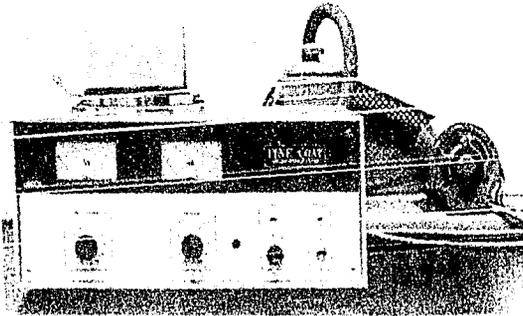
g) Se recurrió a una capa conductora extremadamente delgada que transportara los electrones que inciden en la superficie de la fractura hacia tierra, y nos permitiera ver con claridad las zonas a estudiar en la pantalla.

h) Para lograr esto se recurrió a un Evaporador de Iones, como el que se muestra a continuación, el cual se utilizó de la siguiente manera.

La muestra a estudiar se introdujo en este evaporador colocado de la siguiente forma ver fotografía VIII-3

Evaporador de Iones M C A - JEOL

Modelo J F C - 1100



fotografía VIII-3

Se colocó en el ánodo una placa de forma circular hecha de Au. en el centro.

Los parametros utilizados fueron

- * 1.15 Kv. C.D.
- * Alto vacio.
- * Tiempo de dorado 6 min 20 seg de exposición.

Luego de tapar las muestras y de empezar a hacer vacio la bomba dentro de la campana se espero a que se lograra el alto vacio. Después de cierto tiempo de haberse logrado, se procedió a incrementar el voltaje en C.D. gradualmente en forma lenta hasta llegar a 1.15 Kv, (este voltaje puede variar, ya que dependiendo del color que aparece dentro, de la campana (violeta claro) nos indica que se estan ionizando las muestras colocadas dentro de la campana).

En este proceso los iones viajan libremente (por el alto vacio) dentro de la campana y se depositaran en la zona fracturada, que es la zona a estudiar; Formada esta capa que es del orden de angstroms y que es lo suficientemente delgada y conductora para poder llevar los electrones del haz a tierra, podremos ahora si observar la zona de estudio (zona fracturada).

Posteriormente, comenzamos primeramente a bajar el voltaje, e introducir aire a la campana para poder sacar nuestras muestras las cuales ya podran ser observadas en el microscopio electrónico para su estudio.

3.3 Fotomicrografias : estas fueron tomas en el Microscopio Electrónico de Barrido cuyo formato de la camara es para diez exposiciones.

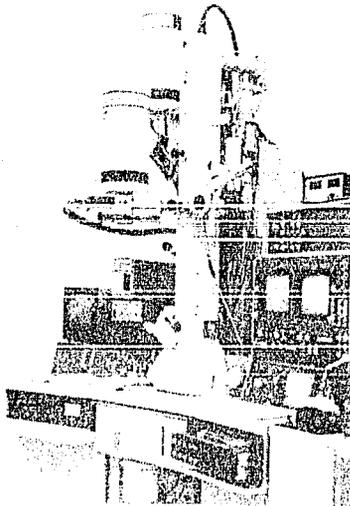
El material usado para estas es T MAX 100 - (TMX 120), y reveladas con revelador T MAX de la forma tradicional, tomándose un total de 70 microfotografias, y eligiendose para su estudio 16 de ellas.

NOTA : Este revelado fué hecho en el laboratorio fotografico del I. I. M.

-MICROANALISIS-

4.-Para llevar a cabo este estudio se tomaron muestras de las zonas fracturadas las cuales se pulió una de sus caras de la forma tradicional con lija de carburo de silicio No. 400, y se procedió a preparar las muestra de la forma antes descrita. Número de muestras preparadas, 1 de cada lote

5.-Equipo utilizado:Microsonda JEOL 1200 EX, cuya resolución del detector es de 152 electron Volts con las cuales se hizo un análisis por barrido para obtener la composición de cada una de las muestras tanto por elementos, y por oxidos, y que a continuación se muestra, fotografía VIII-4



fotografía VIII-4

Material usado: Pelicula polaroid 52 instantánea 4x5 in, cuyo revelado es automático (instantáneo).

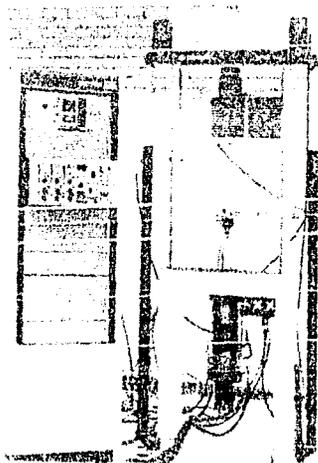
ESTE TEXTO NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

-ENSAVE DE COMPRESION-

El origen de las muestras es el mismo, que los de impacto, y la cantidad de especímenes que se examinaron fué de 4 cilindros de cada una de las muestras.

Condiciones de realización del ensayo de compresión, tanto ambientales como de operación normales.

Equipo utilizado: Máquina de prueba de compresión Mca. INSTRON modelo 1331, capacidad 10 ton, con graficador, y que se muestra en la siguiente fotografía, VIII-5



fotografía VIII-5

Preparacion de muestras: Se hizo de manera similar a las del ensayo de microanálisis, solo que en esta preparación se procuró que las muestras cuyas dimensiones del cilindro son

diámetro = 1.5 cm.

altura = 3 cm.

se pulieron las muestras en la parte de las caras hasta obtener una lectura del indicador que las muestre paralelas y perpendiculares al eje dentro de 0.05 in. (0.013 mm.); la norma establece que las caras del cilindro deben estar lo mas planas posibles, esto se hizo por medio de un desgaste por lija No. 300 , limpiando posteriormente las muestras con un solvente apropiado, después de haber pulido, siguiendo con baño ultrasonico hecha de

una solución de detergente caliente, después enjuagando las muestras con agua caliente y secar por dos horas en un desecador.

Cantidad de muestras analizadas: Un total de especimenes 16 rotos, y obteniendo un total de 14 curvas.

Lugar de prueba Facultad de Ingenieria, Departamento de Ingenieria Mecanica.

- CAPITULO IX -

- PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS -

IX.1 Ensayo de Impacto.

A continuación se exponen los resultados obtenidos al aplicar la prueba de impacto a las cerámicas de tipo industrial.

Inicialmente la tabla No. 1 muestra los datos obtenidos al someter las diferentes cerámicas a prueba de impacto (tabla adjunta).

ENERGIA DE IMPACTO (CHAPPY) PARA DIVERSOS CERAMICOS DE USO INDUSTRIAL

NO. DE MUESTRA	DIMENSIONES SECCION			ENERGIA DE FRACTURA (JOULES)	DESIGNACION	NO. DE GRADOS	ESPECIMENES
	L1 (cm)	L2 (cm)	TRANSVER-SAL (CM 2)				
1	1.06	1.07	1.1342	2.3545	CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA	143.1	10
2	1.07	1.06	1.1342	1.177	(STONE WARE)	143.9	
3	1.1	1.08	1.188	0.7848	CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA RESIS-	144.1	10
4	1.15	1.02	1.173	3.3844	TENTE AL CHOQUE TERMICO (REFRACTARIO)	142.5	
5	1.2	1.1	1.32	1.86345	PORCELANA	143.4	10
6	1.1	1.1	1.21	1.86345	PORCELANA	143.4	
7	1.07	1.08	1.155	1.667	CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA	143.5	10
8	1.07	1.08	1.155	2.8449	CHINO	142.8	
9	0.8	1.1	0.88	2.2593	BALDOSIN	80	8
10	0.6	1	0.6	0.66276	VIDRIO	12.3	6
11	0.5	0.5	0.25	0.1059	LADRILLO REFRACTARIO "A"	16	6
12	1	1	1	0.1963	LADRILLO DE CONSTRUCCION	21.8	6
13	1	1	1	0.185	LADRILLO REFRACTARIO "B"	21.2	6
14	1	1	1	0.1462	CONTACTORES ELECTRICOS A BASE DE ALUMINA	142.7	10

NOTA: DE LA MUESTRA No. 1 A LA 8 ESTUVIERON EXPUESTAS A TEMPERATURAS EN EL HORNO DE ENTRE 1280 A 1300 GRADOS CENTIGRAOS, DURANTE UN INTERVALO DE TIEMPO DE 19 A 23 HORAS, QUE ES EL TIEMPO DE COCCION, CON UNA PRESION DE ENTRADA DEL COMBUSTIBLE (GAS) DE 0.05 kg/cm²

-RESULTADOS-

- MUESTRAS ADQUIRIDAS DEL TALLER EXPERIMENTAL DE CERAMICA -

Cerámica de alta temperatura (stone ware), muestras 1, 2 .

muestra No. 1	*	muestra No. 2.
L1=1.06cm. =0.0106m.	*	L1=1.07cm. =0.0107m.
L2=1.07cm. =0.0107m.	*	L2=1.06cm. =0.0106m.
143.1 grad	*	143.9 grad.
2.354 J	*	1.177 J

seccion = 1.1342 cm^2 Muestra No.1 (sin muesca).

No. de Charpy = $2.354 \text{ J} / 1.1342 \text{ cm}^2 = 2.0754 \text{ J/cm}^2$

No. Charpy = 2.0754 J/cm^2

sección = 1.1342 cm^2 Muestra No.2 (sin muesca).

No. de Charpy = $1.177 \text{ J} / 1.1342 \text{ cm}^2 = 1.0377 \text{ J/cm}^2$

No. Charpy = 1.0377 J/cm^2

Cerámica de alta temperatura con choque térmico (refractario)

muestras 3, 4 .

Muestra No.3	*	muestra No.4 .
L1=1.1cm. =0.011m.	*	L1=1.15cm. =0.0115m.

L2=1.08cm. =0.0108m.

144.1 grad

0.7848 J

*

*

*

L2=1.02cm. =0.102m.

142.5 grad .

3.9844 J

sección = 1.188[cm²]

Muestra No. 3 (sin muesca)

No. de Charpy = 0.7848 J/1.188 cm² = 0.660 J/cm²

No. de Charpy = 0.660 J/cm²

sección = 1.173 [cm²]

Muestra No. 4 (sin muesca)

No. de Charpy = 3.3834 J /1.173 cm² = 2.884 J/cm²

No. de Charpy = 2.884 J/cm²

PORCELANA

L1=1.2cm. =0.012m.

143.4 grad-----

sección = 1.32 [cm²]

Muestra No.5 (sin muesca).

L2=1.1cm. =0.011m.

-----1.8634 J

No. de Charpy = 1.8634 J/1.3/2 cm² = 1.4116 J/cm²

No. de Charpy = 1.4116 J/cm²

PORCELANA

L1=1.1cm. =0.011m.

Muestra No. 6 (sin muesca).

L2=1.1cm. =0.011m.

143.4 grad-----1.8634 J
sección = 1.21 [cm²]

No. de Charpy = 1.8634 J/1.21 cm² = 1.54 J/cm²
No. de Charpy = 1.54 J/cm²

STONE WARE CHINO

Muestra No.7 (sin muesca).

L1=1.07cm. =0.0107m.

L2=1.08cm. =0.0108m.

143.5 grad-----1.667 J
sección = 1.1556 [cm²]

No. de Charpy = 1.667 J/1.1556 cm² = 1.4425 J/cm²
No. de Charpy = 1.4425 J/cm²

STONE WARE CHINO

Muestra No.8 (sin muesca).

L1=1.07cm. =0.0107m.

L2=1.08cm. =0.0108m.

142.8 grad-----2.8449 J
sección = 1.1556[cm²]

No. de Charpy = 2.8449 J/1.1556 cm² = 2.4964 J/cm²
No. de Charpy = 2.4964 J/cm²

NOTA: A las cerámicas anteriores, el ensayo se realizó con la Máquina de prueba de Impacto del Instituto de Investigaciones en Materiales.

- MATERIALES DE LOS CUALES SE DESCONOCE SU COMPOSICION -

BALDOSIN	No. de muestras (8)	
L1=0.8 cm.	L2=1.1 cm.	L3=4.4 cm.
80 grad	2.2593 J	
sección = .88 cm ²		
No. de Charpy = 2.2593/0.88	No. de Charpy = 2.5673 J/cm ²	

VIDRIO	No. de muestras (6).	
L1=0.6cm.	L2=1cm.	L3=5cm.
12.3 grad	0.06276 J	
sección = 0.6 cm ²		
No. de charpy = 0.06276/0.6	No. de Charpy = 0.1046 J/cm ²	

LADRILLO REFRACTARIO "A"	No. de muestras (6)	
L1=0.5cm.	L2=0.5cm.	L3=6.5cm.
16 grad	0.1059 J	
sección = 0.25 cm ²		
No. de Charpy = 0.1059/0.25	No. de Charpy = 0.4236 J/cm ²	

LADRILLO DE CONSTRUCCION	No. de muestras (10)	
L1=1cm.	L2=1cm.	L3=5cm.
21.85 grad	0.1963 J	
sección = 1 cm ²		
No. de Charpy = 0.1963/1	No. de Charpy = 0.1963 J/cm ²	

LADRILLO REFRACTARIO "B"	No. de muestras (10).	
L1=1cm.	L2=1cm.	L3=5cm.
21.2 grad	0.185 J	
sección = 1 cm ²		
No. de Charpy = 0.185/1	No. de Charpy = 0.1849 J/cm ²	

CONTACTORES SQUARE	No. de muestras (8)	
L1=1cm.	L2=1cm.	L3=5.5cm.
143.65 grad.	1.4342 J	
sección = 1cm. * 1cm. [cm ²]	sección = 1 cm ²	
No. de Charpy = 1.4342 J/cm ²	No. de Charpy = 1.4342 J/cm ²	

NOTA: a los materiales anteriores, el ensayo se realizó con la Máquina de prueba de Impacto de la Facultad de Ingeniería. En el apéndice A-2 se muestra una fotografía de esta máquina así como su tabla de valores.

- DISCUSION -

1) Las pruebas de impacto hechas con la máquina de impacto del I.I.M. es capaz de detectar diferencias de tenacidad, de un lote de 10 especímenes sometidos al ensayo, el valor promedio fue muy parecido a los valores individuales, esto fue para la porcelana, en cambio para las otras cerámicas los valores fueron poco parecidos. Esto puede asociarse a la susceptibilidad de la cerámica a pequeñas discontinuidades en su interior.

2) La prueba de impacto hecha con la máquina de impacto de la Facultad de ingeniería es capaz de detectar diferencias de tenacidad, de lotes de 10 muestras, los valores fueron parecidos entre estos materiales, a excepción del baldosín el cual tuvo una tenacidad similar a las cerámicas de alta temperatura.

3) La composición de las cuatro muestras examinadas, es distinta cada una de ellas, por lo que dependiendo de la misma fue su tenacidad. siendo la cerámica de alta temperatura resistente al choque térmico y la cerámica de alta temperatura "china" el de mayor valor, y la porcelana la de menor tenacidad.

La temperatura de cocción no fue en este caso factor de influencia en la tenacidad, con esto me refiero a que las cuatro muestras estuvieron expuestas tanto a la misma temperatura como tiempo de cocción.

4) Los 4 tipos de cerámica presentan valores distintos esto es debido básicamente a la composición de cada una de ellas, y esta asociada con la reacción del material distribución de porosidad etc.

- IX.2 ENSAYO DE COMPRESION (RESULTADOS) -

A continuación se presentan las gráficas de cada una de las cuatro muestras adquiridas del T. E. C. Así como las curvas de cada de ellas.

NOTA :

Cálculo en base a que cada cuadro tiene un valor aproximado de 1/2 tonelada

Valor de la carga de ruptura para cada tipo de material

Presentación de tabla de resultados a continuación

gráfica No.	carga de ruptura	material
1	10 ton.	
2	9.9 ton.	cerámica de alta
3	6.6 ton.	temperatura
4	10.5 ton.	

gráfica No.	carga de ruptura	material
1	5.4 ton.	cerámica de alta
2	6.8 ton.	temperatura resistente
3	4.6 ton.	al choque térmico (REFRACTARIO)

gráfica No.	carga de ruptura	material
1	3.4 ton.	
2	2.1 ton.	Porcelana
3	2.6 ton.	

gráfica No.	carga de ruptura	material
1	5.7 ton.	cerámica de alta
2	7.9 ton.	temperatura china
3	4.9 ton.	stone ware "china"
4	9.1 ton.	

1) La prueba de compresión hecha con la máquina INSTRON modelo 1331, cuya capacidad es de 10 ton, nos muestra diferencias en cada una de las muestras examinadas teniendo a la cerámica de alta temperatura, y la cerámica de alta temperatura "china la mayor variación en sus valores, y la porcelana, la que menor variación tuvo

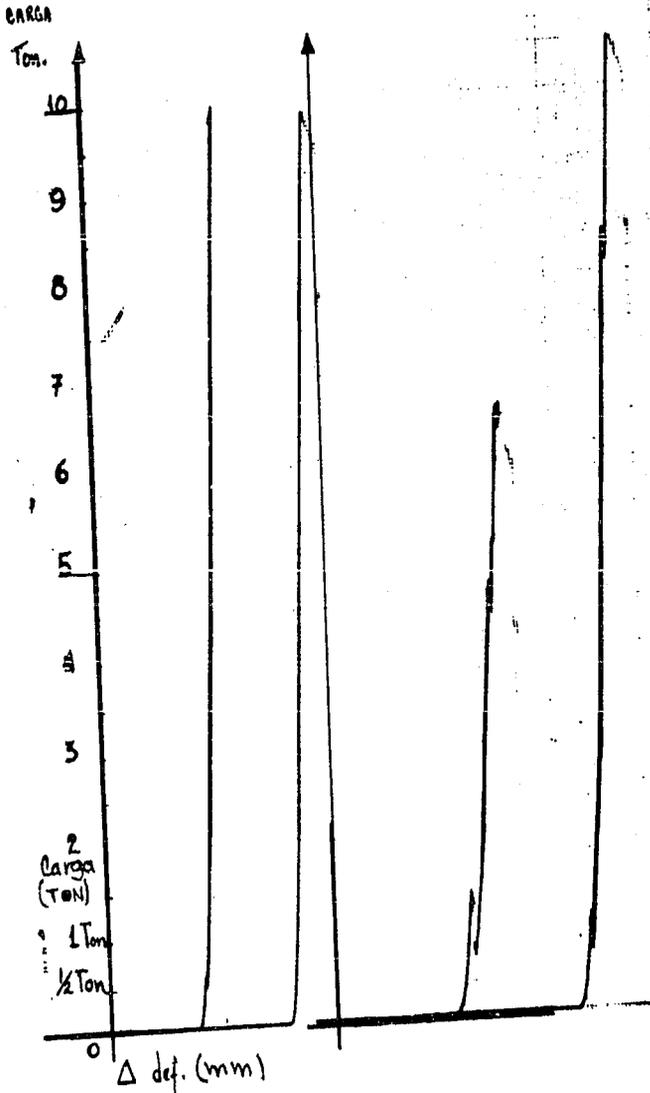
2) Sensibilidad de la prueba de compresión, presenta diferencias entre los distintos tipos de cerámica.

3) El ensayo de compresión surgieron valores individuales muy semejantes a su promedio de cada lote de muestras, y nos referimos a (cerámica de alta temperatura, cerámica de alta temperatura resistente al choque térmico, y porcelana). solo la cerámica denominada cerámica de alta temperatura china presentó valores entre (4.9 - 9.1 ton.).

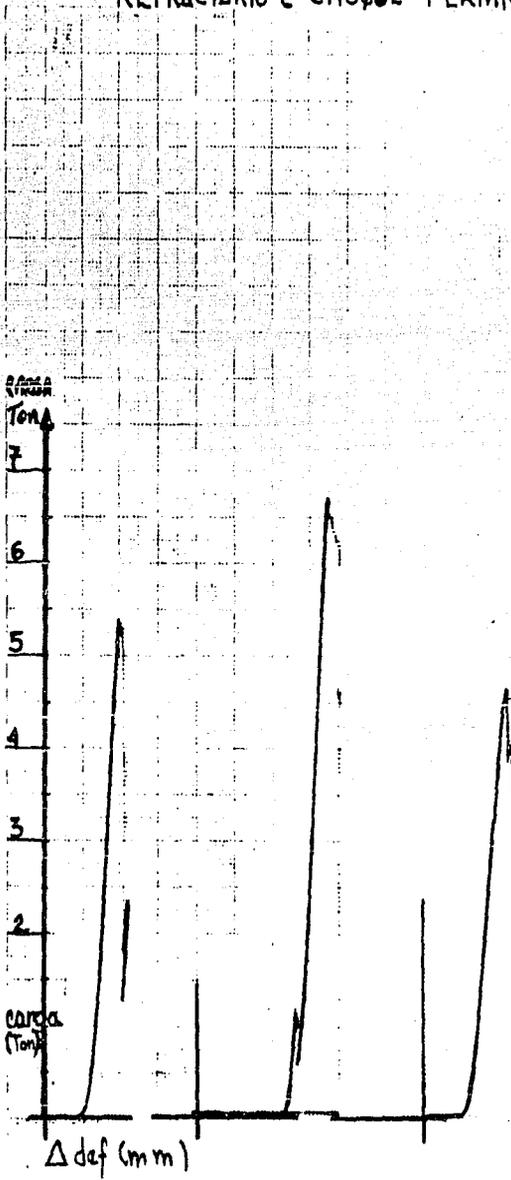
4) Relación de la carga de ruptura con la temperatura de cocción, tanto la temperatura de cocción como el tiempo es el mismo para todas las muestras por lo que la carga de ruptura a la que fallan depende primordialmente de su composición.

3) A continuación se muestran las gráficas obtenidas de cada una de las muestras.

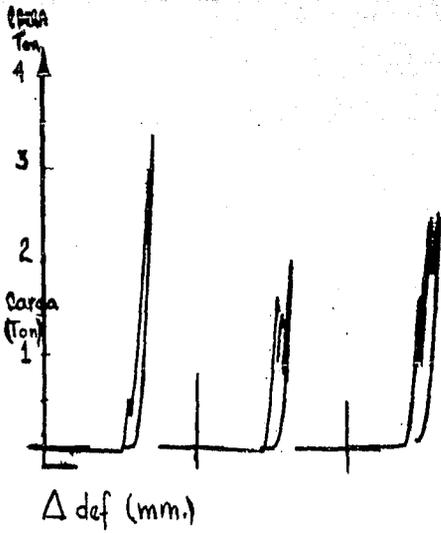
STONE WARE ALTA TEMPERATURA.



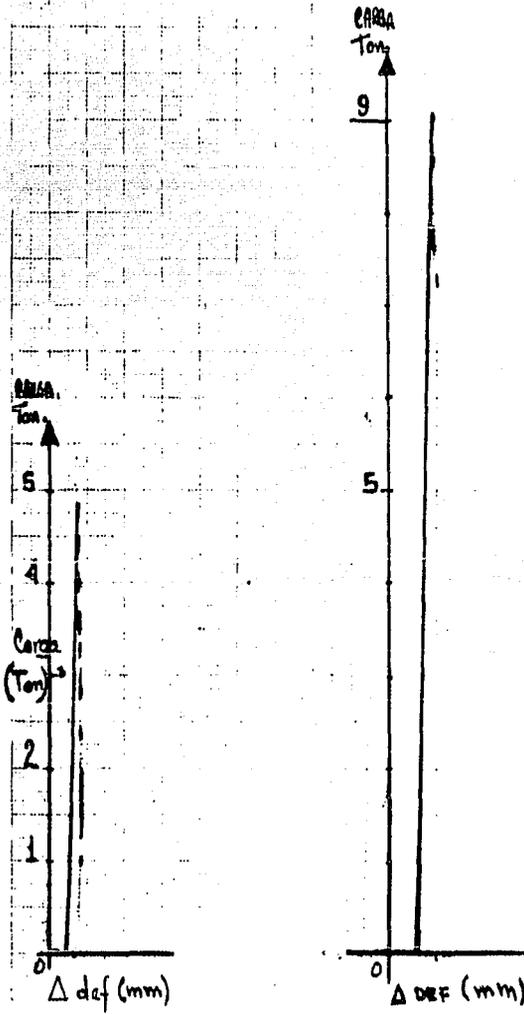
REFRACTARIO e' CHOQUE TERMICO



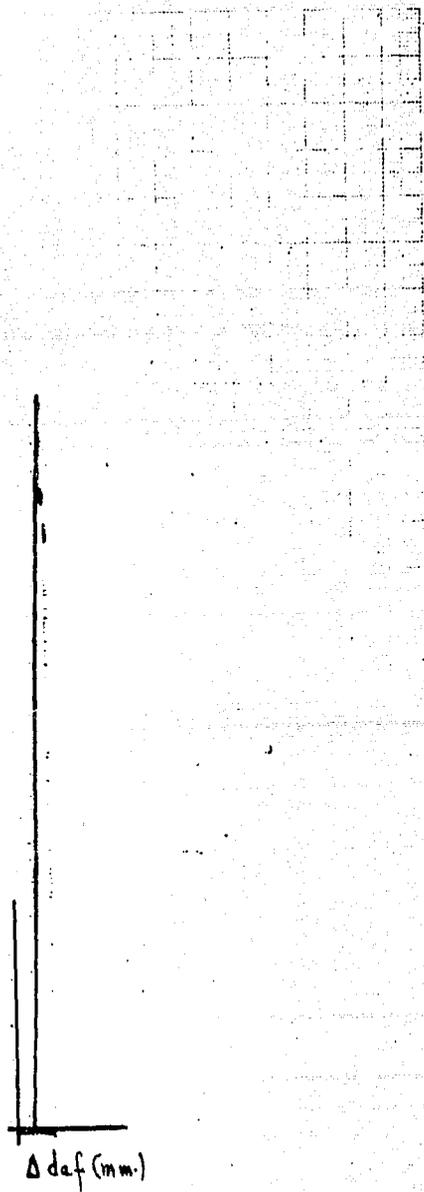
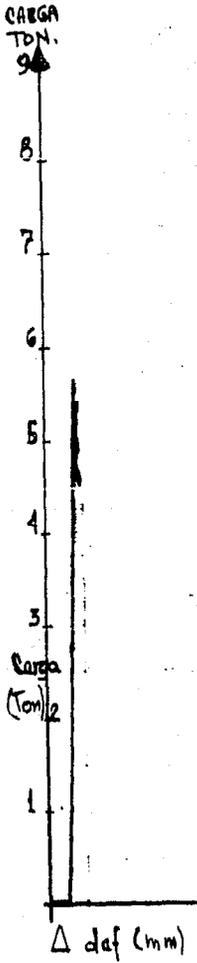
PORCELANA.



STONE WARE CHINO



STONE WARE CHIND



- CAPITULO X -

- FRACTOGRAFIA -

En el siguiente grupo de fotomicrografias se presentan algunos de los aspectos mas relevantes encontrados, al observar la morfologia de la fractura originada por el ensayo de impacto previamente aplicado.

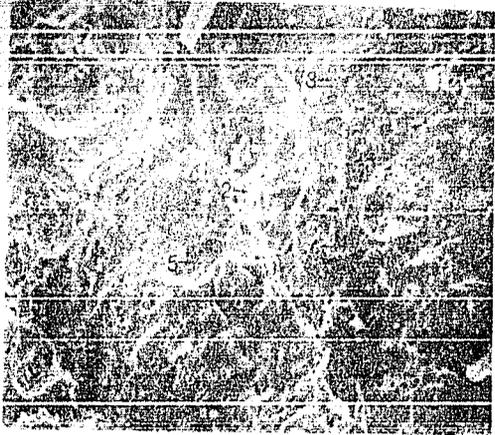
Por cada una se comenta los puntos mas destacables, principalmente en torno al tipo de fractura, la presencia de poros, su efecto, huecos, canales, junto a aspectos particulares de algunas fracturas y comentarios finales para cada caso.

1

A 350 X

3.17 cm

100 μ m

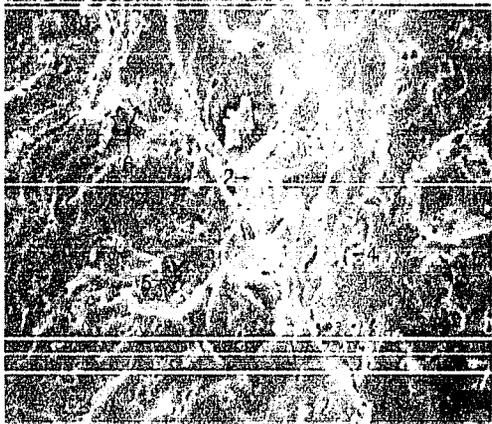


2

A 500 X

2.26 cm

50 μ m



3

A 750 X

3.73 cm

50 μ m



FOTOMICROGRAFIAS 1, 2, 3.

MUESTRA: CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA.

TIPO DE FRACTURA: La superficie observada muestra fractura frágil en su mayor parte, (no hubo deformación), ver fotomicrografía 1, 2, 3, indicadas con las flechas numeradas con (1), zonas de tonalidad gris oscuro, en las fotomicrografías 2, 3 marcadas con flechas numeradas con (2) (zonas claras), parecería que existe una fractura de tipo dúctil, sin embargo se muestra material cerámico el cual tenía encima otras partículas, las cuales durante el impacto se desprenden y dejan esta superficie al descubierto la cual da la apariencia de ser fractura dúctil por su forma que es alargada.

POROSIDAD: Se observan poros de forma cuasi-esférica, estos fueron causados, por gas atrapado, véase fotomicrografía 1 flecha No.(3) mientras que los alargados se debieron a la contracción volumétrica del material cerámico al sinterizarse durante la cocción, ver fotomicrografías 1, 2, 3, flechas marcadas con No.(4)

Las dimensiones de los poros cuasi esféricos y alargados van desde 1.12 μm -13.76 μm aproximadamente.

DISTRIBUCIÓN DE LOS POROS: Es de forma homogénea, ver fotomicrografías 1, 2, 3.

HUECOS: En la región indicada por la flecha No.(5) fotomicrografías 1, 2, 3 se observó un hueco de forma casi elíptica de 63 μm de largo por 25 μm de ancho aproximadamente, dejado por el desprendimiento de material cerámico de distinta composición al de la matriz (material predominante) a causa de baja coherencia entre ambos

cerámicos. Esto también pudo deberse a la no reacción de ambos materiales durante su cocimiento debido a su fundente.

Aparición de material cerámico de distinta constitución al de la matriz, señalado en las fotomicrografías 2,3 (flechas numeradas con (6)), cuyas dimensiones van desde $4.02 \mu\text{m}$ - $6.7 \mu\text{m}$ aprox.

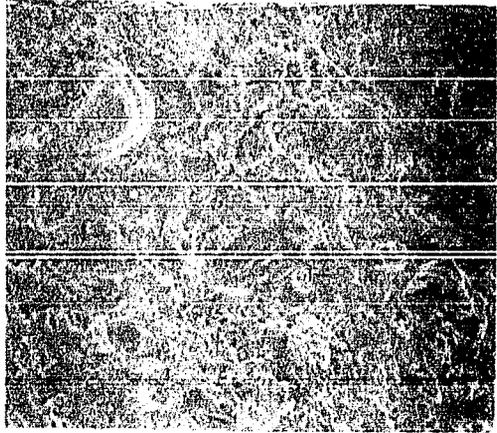
COMENTARIOS:Fractura de tipo frágil debido a la gran cantidad de poros existentes en este material cerámico. En la fotomicrografía 3 se tiene una vista mas grande del hueco donde se desprendió el material cerámico, cuyas dimensiones ya se han indicado, observar la flecha marcada con 5.

4

A 200 X

3.12 cm

100 μ m

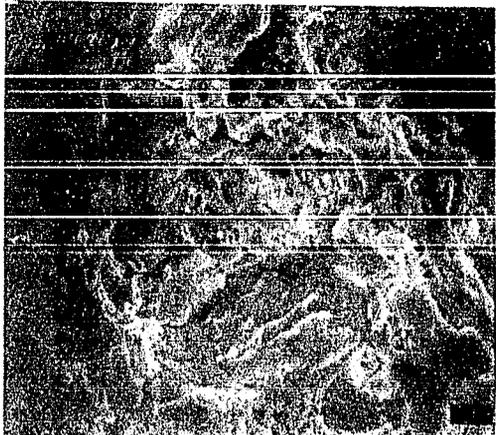


5

A 750 X

3.73 cm

50 μ m



FOTOMICROGRAFIAS: 4, 5.

MUESTRA: CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA RESISTENTE AL CHOQUE TERMICO
(REFRACTARIO).

TIPO DE FRACTURA: Es de tipo frágil, obsérvese zonas gris oscuras
fotomicrografías 4,5, flechas numeradas con (1), no se observa
deformación, por lo tanto es predominantemente frágil.

POROSIDAD: Se observan poros de forma casi-esférica nótese mas
claramente en la fotomicrografía 5 flechas numeradas con (2),
también encontramos poros de forma alargada, fotomicrografía
No.(5) flechas No.(3) estos poros tienen dimensiones entre $1.34 \mu\text{m}$
- $26.8 \mu\text{m}$ aprox (medidas tomadas en la fotomicrografía 5). Nótese
el alto porcentaje de porosidad tanto de forma alargada como de
forma casi esférica, los primeros se deben a la contracción
volumetrica del material, y los segundos , al gas atrapado en la
pasta cerámica durante su moldeo (burbujas), fotomicrografías 4,5.

DISTRIBUCION DE LOS POROS: Como se puede observar en las
fotomicrografías 4,5 es de forma homogénea en ambas, vista con
mayor detalle foto 5.

Fotomicrografía No.5 se observa la presencia de material distinto
al de la matriz, indicado con flechas No.4 , esto se debió a la no
reacción del material durante su coccion

COMENTARIOS: La fotomicrografía 5 es una amplificación mayor que la
4 en donde se observan mas claramente las zonas de tonalidad gris
oscuro, en donde se puede ver un significativo porcentaje de
fractura decohesiva. Fotomicrografía 5 flecha 4 nótese los

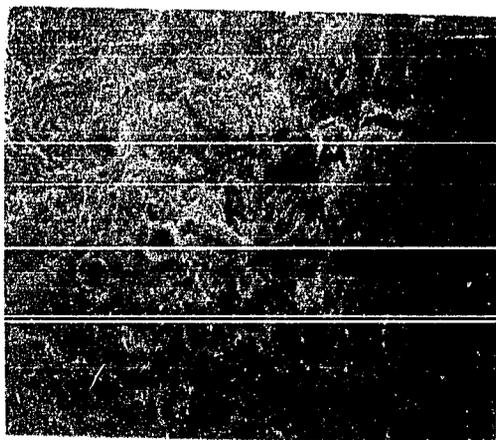
materiales cerámicos distintos al material predominante que no reaccionó durante su cocimiento, cuyas dimensiones son $1.34 \mu\text{m}$ - $2.68 \mu\text{m}$. aprox. Por el gran contenido de poros que se muestra se puede concluir que es la causa de la fractura, esto se puede observar en ambas exposiciones.

6

A 350 X

3.17 cm

100 μ m

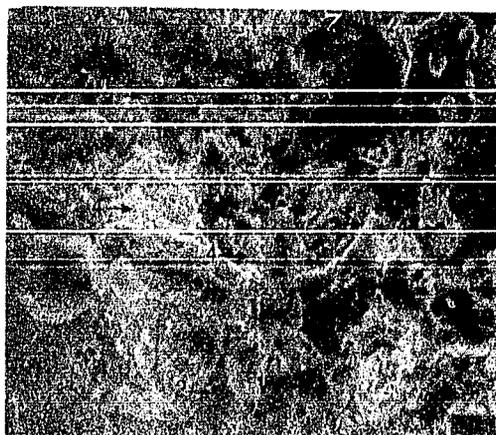


7

A 750 X

3.73 cm

100 μ m



FOTOMICROGRAFIAS: 6, 7.

MUESTRA: CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA RESISTENTE AL CHOQUE TERMICO (REFRACTARIO).

Otra vista de este cerámico de tipo refractario en el cual también se presenta fractura de tipo frágil, y fractura decohesiva, no se percibe deformación alguna en ambas fotomicrografías, zonas marcadas por las flechas marcadas con el No. 1 en las fotomicrografías 6,7, y la fotomicrografía 7 que es una ampliación mas grande que la anterior, son mas visibles estas zonas.

POROSIDAD: En ambas fotomicrografías 6,7 se observan poros, en su mayoría de forma alargada, y muy pocos de forma esférica, habiendo una distribución de estos de tipo heterogéneo, los de forma casi esférica estan indicados por las flecha No.2, y los alargados con las flechas No.3 en la fotomicrografía 7; Estas porosidades tienen dimensiones de 1.34 μm a 20.77 μm aprox, estas medidas fueron tomadas de la fotomicrografía 7.

Otra vista de los poros existentes estan en las flechas 3,4 fotomicrografía 7 los cuales presentan un apilamiento de material cerámico (talco y grog) cuya tonalidad se puede ver mas clara.

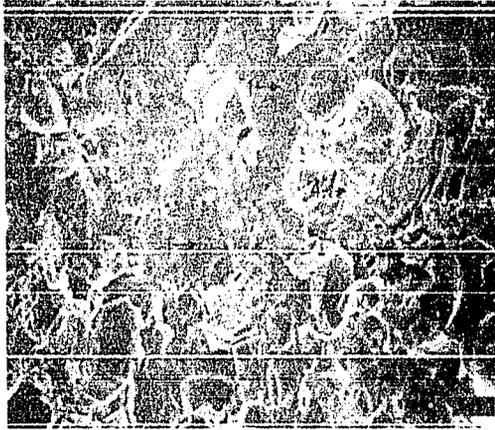
COMENTARIOS: En las fotomicrografías 6,7 se observa gran porosidad del material por lo cual podemos decir que esta fué una de la causas principales de la fractura.

8

A 350 X

3.12 cm

100 μ m

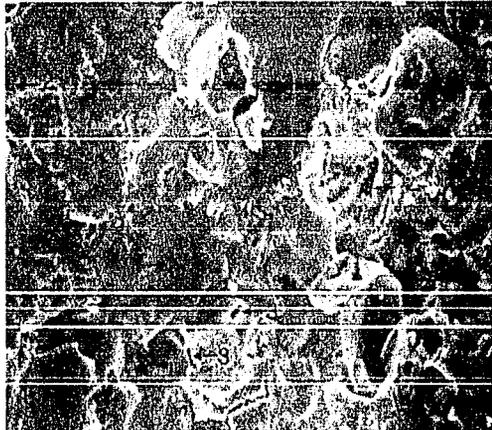


9

A 500 X

2.45 cm

100 μ m

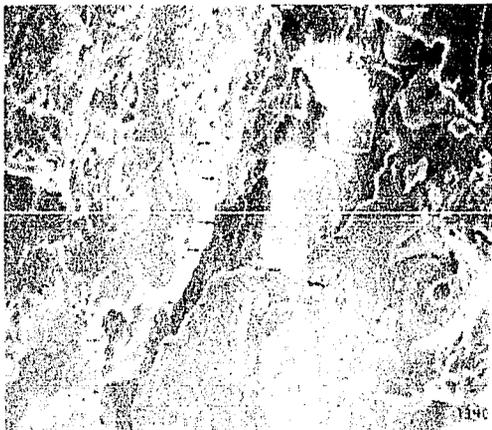


10

A 750 X

3.19 cm

100 μ m



FOTOMICROGRAFIAS 8,9,10.

MUESTRA: PORCELANA

TIPO DE FRACTURA. Se observa en la superficie una fractura de tipo totalmente frágil, zonas gris oscuro marcadas con flechas enumeradas con (1) en las fotomicrografías 8,9.

POROSIDAD: Tanto en la foto 8, como en la 9 se observa mediana porosidad, esto se puede percibir mejor en la foto 9 que es una ampliación mas grande, y ver mas claramente, casi no hay de forma esférica en su mayor parte son de forma alargada, midiendo entre $2.27 \mu\text{m}$ - $11.23 \mu\text{m}$, (medidas tomadas de la fotomicrografia 9).

poros cuasi esféricos indicados con flechas enumeradas con (2)

poros alargados indicados con flechas enumeradas con (3)

La distribución de los poros como se puede observar en las fotomicrografías 8,9 es de tipo heterogénea.

No se perciben en las fotomicrografías 8,9 algun tipo de hueco debido a desprendimiento de material, o a la no reacción de algunos granos de cerámica y que puedan verse en estas.

Presencia de material cerámico que no reaccionó durante su cocimiento quedando estos adheridos al material que si reaccionó, estas impurezas son de forma cuasi esférica, ver flecha No.4 fotomicrografia 9, que es una ampliación en la que se puede ver con mayor claridad, y cuyas dimensiones van desde $1.12 \mu\text{m}$ - $8.98 \mu\text{m}$.

Fotomicrografia 10 se observan las características mencionadas en las fotomicrografías 8,9 ;Pero en la vista central de la figura se observa una grieta secundaria diseminada a lo largo de la exposición, cuya dimensión es de 315.16 μm aprox, nótese lo inusualmente profundo de esta, la cual presenta un tipo de fractura frágil; Esta pudo haber sido causada por la resequedad del material, durante su almacenamiento, donde posteriormente de haber sido trabajado o moldeado, y cocido, haya sufrido esta resquebrajadura durante su cocción y no en la prueba de impacto, obsérvese fotomicrografia 10 indicada con una sucesión de flechas.

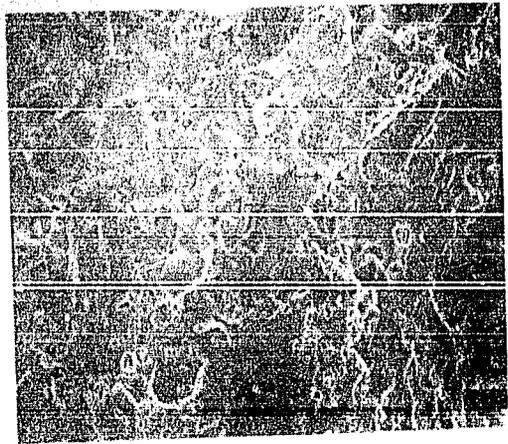
Comentarios:En este material cerámico se puede ver la poca porosidad existente, esto es debido a la proporción equitativa de sus componentes.

11

A 350 X

3.14 cm

100 μm

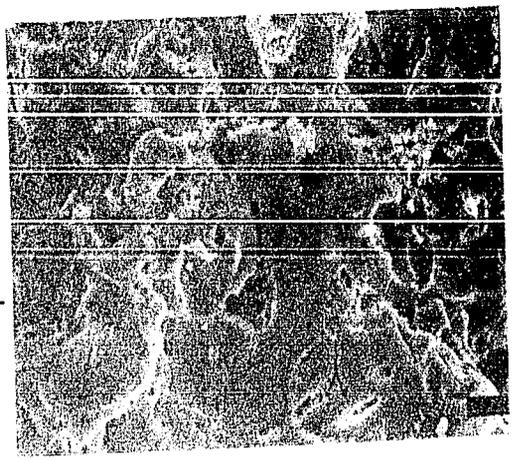


12

A 750 X

3.73 cm

50 μm



FOTOMICROGRAFIAS 11,12

MUESTRA: STONE WARE CHINO

Tipo de fractura: Como se puede observar es de tipo frágil, no presenta deformación aparente en ambas exposiciones, observar flechas enumeradas con 1 zonas gris oscuro, fotomicrografías 11 y 12, las cuales como se observan son de forma redondeada, lo cual refleja su crecimiento durante el proceso de sinterizado.

Porosidad: Se puede observar gran porosidad en la superficie de ambas vistas los cuales se pueden percibir de forma casi esférica y de forma alargada, esto es más claro en la fotomicrografía 12, en la que se puede observar con más detalle, y las dimensiones de estos van desde $0.40 \mu\text{m} - 26.13 \mu\text{m}$ aprox,

poros casi esféricos indicados con flechas enumeradas con (2).

poros alargados indicados en la fotomicrografía 12 con flechas No. 3.

Huecos: se perciben pocos huecos en ambas exposiciones por lo tanto podemos decir que el material fusionó, o reaccionó correctamente durante su cocimiento.

Se observa material distinto al de la matriz que no logró reaccionar durante su cocción, véase fotomicrografías 11,12 marcadas con la flecha No.4 en la cual se puede apreciar más claramente.

Comentarios: Se puede observar que este material está mejor

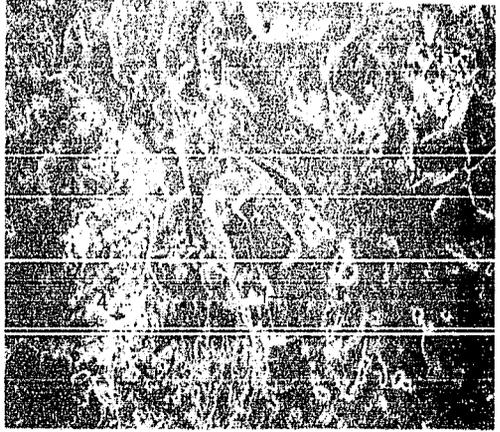
reaccionado que los anteriores a pesar también de su gran porosidad , que también es causa de fractura, y que presenta una distribución de tipo homogéneo.

13

A 500 X

4.45 cm

100 μm

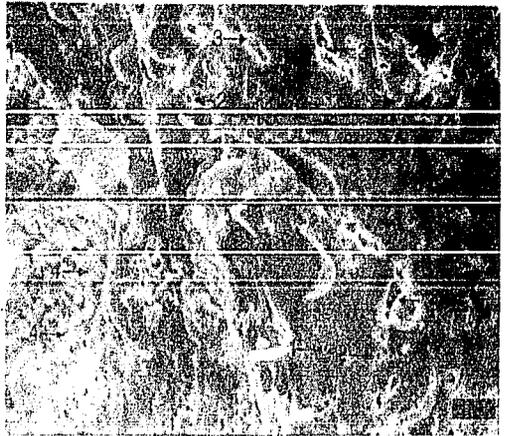


14

A 750 X

3.73 cm

50 μm



FOTOMICROGRAFIAS 13 14

MUESTRA STONE WARE CHINO

Fractura Frágil, con un elevado porcentaje de fractura decohesiva en la cual aparece una buena cantidad de granos completos, no se observa deformación alguna en estas exposiciones ver flechas enumeradas con (1), zonas gris oscuro. en las fotomicrografías 13,14, en esta última se aprecia con más claridad.

Porosidad: Se observan poros tanto de tipo casi esférico como de tipo alargado diseminados en toda esta área teniendo las siguientes dimensiones aprox $1.07 \mu\text{m}$ - $21.44 \mu\text{m}$ aprox.

Medidas tomadas de la fotomicrografía 14.

flechas enumeradas con (2) poros casi esféricos.

flechas enumeradas con (3) poros de forma alargado.

Distribución de Porosidad: De tipo heterogénea.

Se exhiben partículas del mismo material que no reaccionó completamente y que está depositado en la superficie donde sucedió la fractura, observar flechas enumeradas con (4) en las fotomicrografías 13,14 .

Huecos : No se percibe ningún tipo de hueco en esta exposición, por lo que podemos concluir que fue uno de los mejores materiales que reaccionaron durante su cocción, esto se debió al excelente equilibrio de sus componentes.

- COMENTARIOS DEL ENSAYO DE FRACTOGRAFIA -

1) En general para las muestras estudiadas el tipo de fractura se puede clasificar como frágil, no parece existir deformación pronunciada.

2) Existe un elevado porcentaje de fractura decohesiva, y aparecen una buena cantidad de granos "completos" es decir no hubo ruptura del grano. Esto significa que al ocurrir la fractura del material los granos perdieron su cohesión. Esto se distingue en que los granos quedan muy redondeados, reflejando mas bien el crecimiento que experimentaron en el proceso de sinterizado. La fractura "bordea" la superficie.

3) Existe una distribución de tipo homogénea debida a presencia de gases en el proceso de sinterizado, aunque también podría ser debido a cambios de oxidación fuertes en alguno o algunos de los reactantes cuando ocurre el sinterizado.

Los poros también podrían deberse a diferencias en la dependencia de la temperatura de fusión del fundente.

La Porosidad también pudo haberse originado como respuesta a los esfuerzos mecánicos generados entre granos, por posibles cambios de volumen de la, o de las fases en su proceso de formación

4) La presencia de esta cantidad de poros favorece fuertemente la fractura, simplemente porque ayuda a disminuir el area total de cohesión de la cerámica.

Los poros no se generaron en el proceso de fractura.

5) Se tiene la impresión que una buena cantidad de esos que parecen poros en realidad son verdaderos "canales". Es decir creo que esta cerámica posee una verdadera estructura de canales.

(ver cerámica de alta temperatura chino)

6) La sensibilidad de la prueba de impacto, presentó diferencias entre los distintos tipos de cerámica.

En ensayo de impacto surgieron valores de los lotes de las muestras, que tanto en forma individual, como al sacar el promedio nos arrojan valores muy similares en cada una de las cerámicas de distinta composición.

7) El uso del Microscopio Electrónico de Barrido fue una herramienta muy importante para estudiar fractura de materiales cerámicos, de otra manera hubiera sido muy difícil conocer en forma mas completa la morfología y topografía del material fracturado, y al asociar estos datos con las condiciones de fabricación derivar algunos resultados y recomendaciones.

8) Por los resultados encontrados se puede concluir de la fractura de estos materiales cerámicos estudiados y su relación con su composición depende en gran parte del equilibrio de sus componentes, y las condiciones de fabricación y que esto determinará en alguna forma la tenacidad del material.

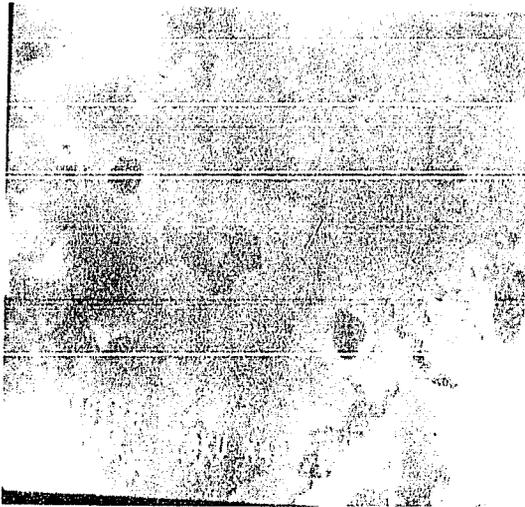
9) Se comprueba que en general la presencia de defectos (tales como huecos, poros, canales etc,) que determinan la fragilidad, que en general presentan los 4 tipos de materiales estudiados.

- CAPITULO XI -

- RESULTADOS DEL MICROANALISIS POR MEDIO DE RAYOS X -

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo VIII, INCISOS 4, 5 DE Experimentación se realizó análisis químico, tanto por elementos como por óxidos presentes (por medio de la microsonda) de algunas zonas (a nivel puntual) de las muestras fracturadas a fin de intentar detectar la posible influencia de algún componente en el proceso de fractura de las piezas.

Así pues se presenta en las hojas siguientes datos sobre la experimentación, la tabla de resultados del microanálisis y el espectro obtenido y fotografías de las zonas analizadas para estas 4 muestras representativas.



- CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA -

STONE WARE



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVÁNAMA DE
MÉXICO

EG&G Ortec System 5000
Spectrum Plotting Program
Printplot V02.05

Sample ID: Muestra # 1

Energy Range: 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi-Lines

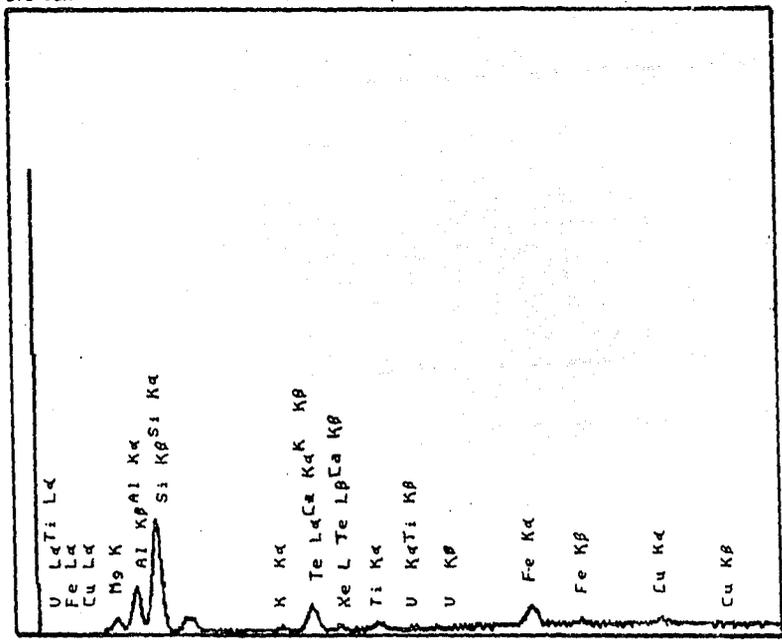
Preset: Off

Real Time: 232.00 Sec. Live Time: 16.35 Sec.

26% Deadtime 3631 Counts/second

Acquisition date: 16-Jan-90 Acquisition time: 09:08:23

Cfs 16K



0-0.000 keV Cursor = 56.0 3.850 eV = 170 5.000 keV



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

EG&G Ortec System 5000
Standardless ZAF Analysis
AUTOZAP vers. 3.16

Sample ID: Muestra # 1

Acquisition Date: 16-Jan-90 10:01:29
Analysis Date : 16-Jan-90 10:01:44

----- Acquisition Parameters -----

Accelerating Voltage: 70.00 kV Beam Current: 54000.0000 nAmps
Elapsed Real Time : 235.44 Seconds Dead Time : 0 %
Elapsed Live Time : 172.80 Seconds Count Rate : 16 CPS
Preset OFF
Energy Range : 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi Res

----- System Geometry -----

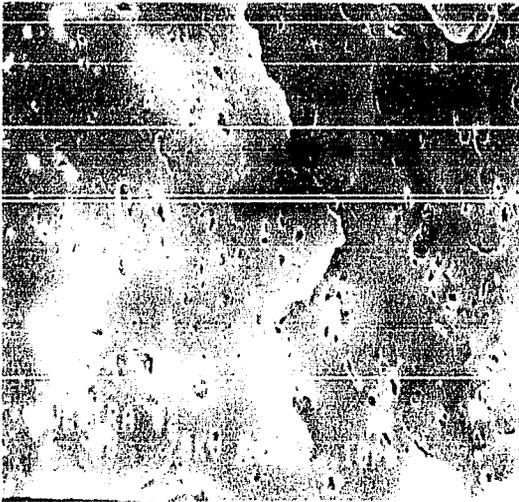
Specimen Tilt X-axis: 10.0 Degrees
 Y-axis: 0.0 Degrees
Elevation Angle : 0.0 Degrees
Azimuth Angle : 270.0 Degrees
Incidence Angle : 90.0 Degrees
Takeoff Angle : 18.9 Degrees
Off Normal Incidence: -8.9 Degrees
Insertion Depth : 32.0 mm
Working Distance : 15.0 mm

----- Detector Parameters -----

Be Thickness : 3.000 Microns
Al Thickness : 0.000 Microns
C Thickness : 0.000 Microns
Hydrocarbon Thickness : 0.000 Microns
Hydrocarbon Compound :
Au Layer Thickness : 0.020 Microns
Si Dead Layer Thickness: 0.130 Microns
Crystal Tilt Angle : 0.0 Degrees
Detector Resolution : 152.0 eV

----- Analytical Results -----

Element	Line	Weight %	Atomic %	Compound	Compound Weight %	Net Intensity
Mg	K	6.66	5.63	MgO	11.03	28.91
O	-	48.85	62.84			-----
Al	K	13.23	10.10	Al2O3	25.00	92.34
Si	K	27.68	20.29	SiO2	59.22	216.58
K	K	0.29	0.15	K2O	0.34	8.76
Ca	K	0.84	0.43	CaO	1.18	23.40
Ti	K	0.15	0.06	TiO2	0.25	9.55
V	K	0.00	0.00	V2O5	0.00	0.00
Fe	K	0.49	0.18	Fe2O3	0.70	26.80
Cu	K	0.13	0.04	CuO	0.16	6.80
Te	L	1.69	0.27	TeO2	2.11	23.52
Xe	L	0.00	0.00			0.00



- CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA RESISTENTE AL CHOQUE TERMICO -

(REFRACTARIO)

Ca	K	3.674	7.6	9.8	0.3	1.7	0.7210	1.0072	0.2370*	1.0043
Ti	K	4.511	10.8	9.8	0.0	1.0	0.9528	0.7276	0.3667*	1.0080
Fe	K	6.404	39.3	18.3	0.0	20.9	0.9812	0.9424	0.6998*	1.0028
Cu	K	8.048	24.3	20.5	0.0	3.8	0.9898	0.9255	0.8151	1.0000



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVÉÑMA DE
MEXICO

* Elements with excessive absorption correction.
(Minimize by lowering acc. voltage to 13.5)
Spatial Resolution from 51.01 to 53.92 microns
based on a computed sample density of 2.50 g/cc.

⑦

EG&G Ortec System 5000
Spectrum Plotting Program
Printplot V02.06

Sample ID: Muestra # 2

Energy Range: 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi Res

Preset: Off

Real Time: 575.62 Sec.

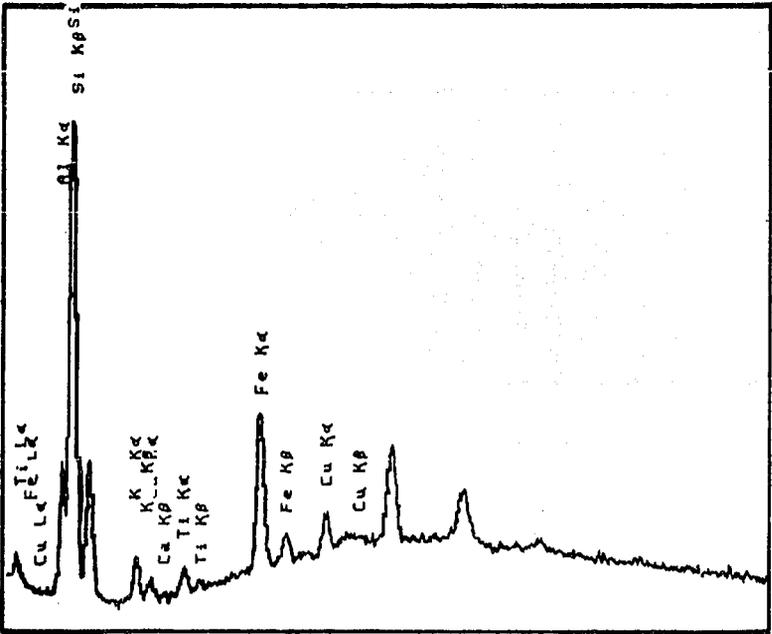
Live Time: 462.95 Sec.

18% Deadtime 2386 Counts/Second

Acquisition date: 16-Jan-90

Acquisition time: 10:59:31

Cfs 4K



<-0.000 keV

Cursor = 586 (5.860 eV) = 0

19.200 keV >



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

Sample ID: MBestra # 2

EG&G Ortec System 5000
Standardless ZAF Analysis
AUTOZAP vers. 3.16

Acquisition Date: 16-Jan-90 10:59:31
Analysis Date : 16-Jan-90 11:12:04

----- Acquisition Parameters -----

Accelerating Voltage: 70.00 kV Beam Current: 53000.0000 nAmps
Elapsed Real Time : 575.62 Seconds Dead Time : 18 %
Elapsed Live Time : 462.95 Seconds Count Rate : 2386 CPS
Preset OFF
Energy Range : 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi Res

----- System Geometry -----

Specimen Tilt X-axis: 10.0 Degrees
 Y-axis: 0.0 Degrees
Elevation Angle : 0.0 Degrees
Azimuth Angle : 270.0 Degrees
Incidence Angle : 80.0 Degrees
Takeoff Angle : 18.9 Degrees
Off Normal Incidence: -8.9 Degrees
Insertion Depth : 32.0 mm
Working Distance : 15.0 mm

----- Detector Parameters -----

Be Thickness : 3.000 Microns
Al Thickness : 0.000 Microns
C Thickness : 0.000 Microns
Hydrocarbon Thickness : 0.000 Microns
Hydrocarbon Compound :
Au Layer Thickness : 0.020 Microns
Si Dead Layer Thickness: 0.130 Microns
Crystal Tilt Angle : 0.0 Degrees
Detector Resolution : 152.0 eV

----- Analytical Results -----

Element	Line	Weight %	Atomic %	Compound	Compound Weight %	Net Intensity
Al	K	11.24	8.49	Al2O3	21.25	28.17
O	-	50.94	64.87			-----
Si	K	35.18	25.52	SiO2	75.26	97.35
K	K	1.08	0.56	K2O	1.31	8.32
Ca	K	0.00	0.00	CaO	0.00	0.00
Ti	K	0.00	0.00	TiO2	0.00	0.00
Fe	K	1.35	0.49	Fe2O3	1.93	19.73
Cu	K	0.20	0.07	CuO	0.25	2.80

----- Analytical Summary -----

Element Symbol	Line	keV	Peak Intensity (cps)				Detector Eff.	ZAF Corrections		
			Gross	Bkg	Clap	Net		--Z--	--A--	--F--
Al	K	1.487	31.3	3.1	0.0	28.2	0.8139	0.9610	0.2213	1.0231
Si	K	1.740	100.7	3.3	0.0	97.3	0.8736	0.9918	0.2	
K	K	3.313	17.1	8.7	0.0	8.3	0.9013	0.9627		

La	K	3.072	7.3	11.0	0.2	0.0	0.9219	1.0022	0.2162*	1.0019
Ti	K	4.511	14.5	18.6	0.0	0.0	0.9528	0.9230	0.3501*	1.0022
Fe	K	6.404	33.7	29.9	0.0	3.8	0.9812	0.9376	0.6857*	1.0000
Cu	K	8.048	27.5	32.0	0.0	0.0	0.9698	0.9207	0.8548	1.0000



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

* Elements with excessive absorption correction.
(Minimize by lowering acc. voltage to 14.0)
Spatial Resolution from 55.89 to 58.38 microns
based on a computed sample density of 2.31 g/cc.

9

EG&G Ortec System 5000
Spectrum Plotting Program
Printplot V02.06

Sample ID: Muestra # 3

Energy Range: 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi Res

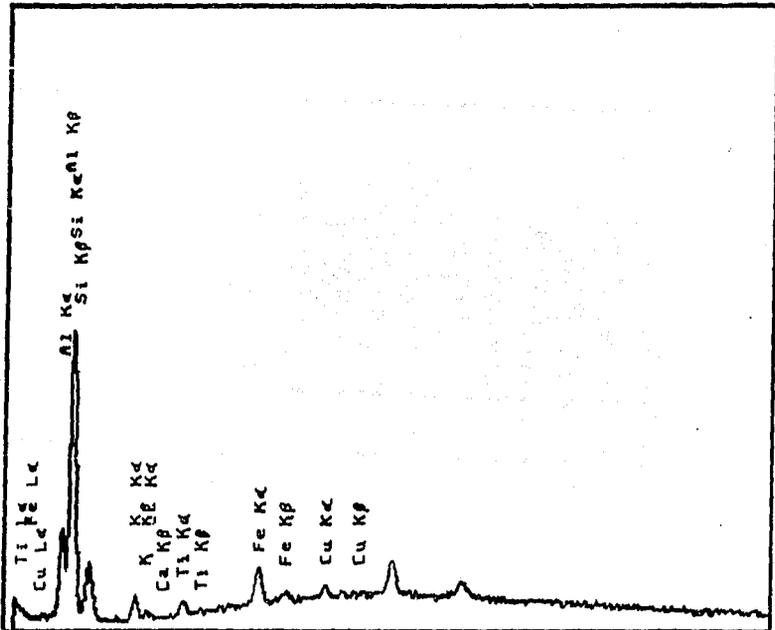
Preset: Off

Real Time: 839.11 Sec. Live Time: 657.16 Sec.

20% Deadtime 2563 Counts/Second

Acquisition date: 16-Jan-90 Acquisition time: 11:50:28

Cfs 16K



<-0.000 keV Cursor = 586 (5.860 keV) = 681 19.200 keV >



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVÉÑMA DE
MÉXICO

EG&G Ortec System 5000
Standardless ZAF Analysis
AUTOZAP vers. 3.16

Sample ID: Muestra # 3

Acquisition Date: 16-Jan-90 11:50:28

Analysis Date : 16-Jan-90 12:35:21

----- Acquisition Parameters -----

Accelerating Voltage: 70.00 kV Beam Current: 53000.0000 nAmA
Elapsed Real Time : 839.11 Seconds Dead Time : 20 %
Elapsed Live Time : 657.16 Seconds Count Rate : 2563 CPS
Preset OFF
Energy Range : 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi Res

----- System Geometry -----

Specimen Tilt X-axis: 10.0 Degrees
 Y-axis: 0.0 Degrees
Elevation Angle : 0.0 Degrees
Azimuth Angle : 270.0 Degrees
Incidence Angle : 80.0 Degrees
Takeoff Angle : 18.9 Degrees
Off Normal Incidence: -8.9 Degrees
Insertion Depth : 32.0 mm
Working Distance : 15.0 mm

----- Detector Parameters -----

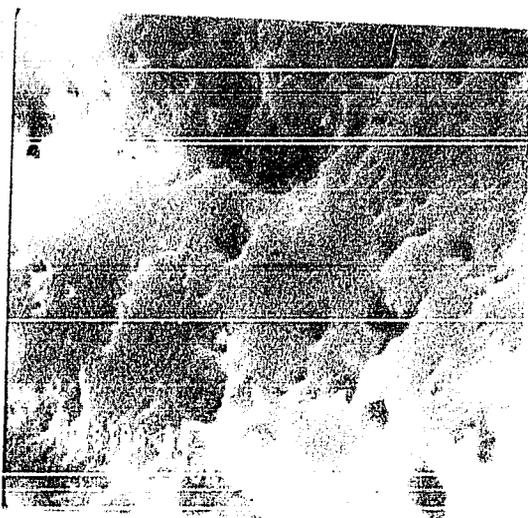
Be Thickness : 3.000 Microns
Al Thickness : 0.000 Microns
C Thickness : 0.000 Microns
Hydrocarbon Thickness: 0.000 Microns
Hydrocarbon Compound :
Au Layer Thickness : 0.020 Microns
Si Dead Layer Thickness: 0.130 Microns
Crystal Tilt Angle : 0.0 Degrees
Detector Resolution : 152.0 eV

----- Analytical Results -----

Element	Line	Weight %	Atomic %	Compound	Compound Weight %	Net Intensity
Al	K	11.61	8.69	Al2O3	21.94	46.77
O	-	51.57	65.05			-----
Si	K	36.01	25.88	SiO2	77.04	154.53
K	K	0.02	0.32	K2O	0.75	7.13
Ca	K	0.00	0.00	CaO	0.00	0.00
Ti	K	0.00	0.00	TiO2	0.00	0.00
Fe	K	0.01	0.07	FeO	0.27	4.20
Cu	K	0.00	0.00	CuO	0.00	0.00

----- Analytical Summary -----

Element	Symbol	Line keV	Gross	Intensity (cps)	Detector	ZAF	Corrections			
			Cross	Emp	Clap	Net	Eff.	--Z--	--A--	--F--
Al	K	1.497	22.4	8.3	0.0	46.8	0.613	0.9601	0.2354*	1.0240
Si	K	1.740	174.5	5.4	0.0	174.5	0.8736	0.9909	0.2216*	1.0002



- CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA CHINO -

STONE WARE "CHINO"

11	K	4.511	6.6	5.0	0.0	5.6	0.7328	0.7147	0.6620*	1.0113
Fe	K	6.404	53.0	8.5	0.0	44.4	0.5812	0.9290	0.9783	1.0198
Cu	K	8.048	62.2	9.6	0.0	52.6	0.9898	0.9120	1.0251	1.0000

* Elements with excessive absorption correction.
 (Minimize by lowering acc. voltage to 13.5)
 Spatial Resolution from 125.46 to 131.07 microns
 based on a computed sample density of 1.03 g/cc.

13



UNIVERSIDAD NACIONAL
 AVENIDA DE
 MEXICO

EG&G Ortec System 5000
 Spectrum Plotting Program
 Printplot V02.06

Sample ID: Muestra # 4

Energy Range: 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi Res

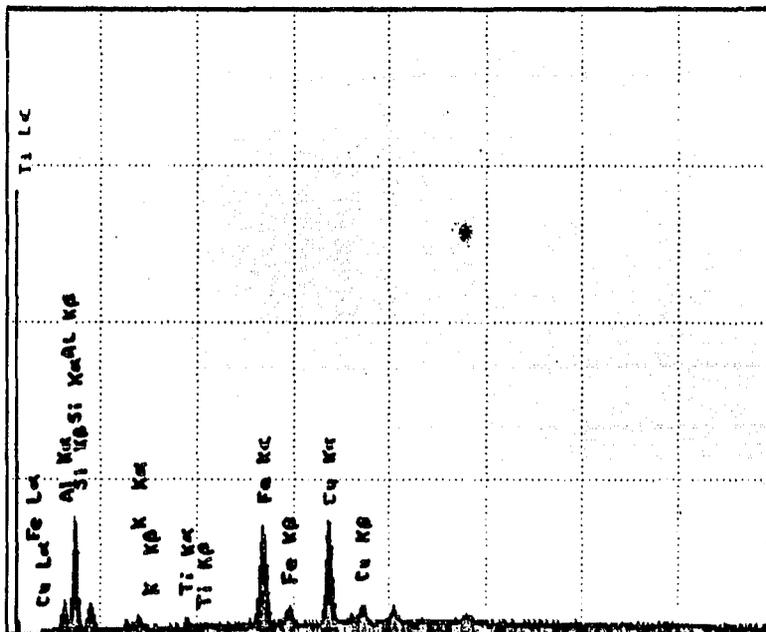
Preset: Off

Real Time: 350.18 Sec. Live Time: 306.48 Sec.

13% Deadtime 1652 Counts/Second

Acquisition date: 16-Jan-90 Acquisition time: 17:41:41

Cfs BK



<-0.000 keV Cursor = 0 (-0.000 keV) = 0 15.200 keV



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

EG&G Ortec System 5000
Standardless ZAF Analysis
AUTOZAP vers. 3.16

Sample ID: muestra # 4

Acquisition Date: 16-Jan-90 17:41:41
Analysis Date : 16-Jan-90 17:56:53

----- Acquisition Parameters -----

Accelerating Voltage: 20.00 kv Beam Current: 52000.0000 nAmps
Elapsed Real Time : 350.13 Seconds Dead Time : 13 %
Elapsed Live Time : 306.48 Seconds Count Rate : 1652 CPS
Preset OFF
Energy Range : 0 - 20 keV 10 eV/ch Hi Res

----- System Geometry -----

Specimen tilt X-axis: 10.0 Degrees
Y-axis: 0.0 Degrees
Elevation Angle : 0.0 Degrees
Azimuth Angle : 270.0 Degrees
Incidence Angle : 60.0 Degrees
Takeoff Angle : 18.9 Degrees
Off Normal Incidence: -8.9 Degrees
Insertion Depth : 32.0 mm
Working Distance : 15.0 mm

----- Detector Parameters -----

Be Thickness : 3.000 Microns
Al Thickness : 0.000 Microns
C Thickness : 0.000 Microns
Hydrocarbon Thickness: 0.000 Microns
Hydrocarbon Compound :
Au Layer Thickness : 0.020 Microns
Si Dead Layer Thickness: 0.150 Microns
Crystal Tilt Angle : 0.0 Degrees
Detector Resolution : 152.0 eV

----- Analytical Results -----

Element	Line	Weight %	Atomic %	Compound	Compound Weight %	Net Intensity
Al	K	11.09	6.66	Al2O3	20.78	18.07
O	-	48.72	64.13			---
Si	K	31.16	23.51	SiO2	66.54	62.82
K	K	1.43	0.78	K2O	1.73	19.04
Ti	K	0.98	0.18	TiO2	0.67	3.59
Fe	K	3.33	1.27	Fe2O3	4.76	44.39
Cu	K	1.61	1.47	CuO	5.52	52.65

----- Analytical Summary -----

Element	Symbol	Line	keV	Peak Intensity (cps)				Detector Eff.	ZAF Corrections		
				Gross	Eq	Qep	Net		--Z--	-A--	-F--
Al		K	1.487	16.0	0.7	0.0	18.1	0.3139	0.9658	0.1615*	1.0162
Si		K	1.740	63.7	0.9	0.0	62.8	0.8736	0.9967	0.1743*	1.0007
K		K	3.315	13.4	2.3	0.0	10.0	0.9013	0.9675	0.3781*	1.0037

- COMENTARIOS SOBRE RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO -

1) La semejanza de resultados entre el estudio hecho por el Instituto de Geología y el I.I.M. muestran que es muy similar en el aspecto que en el I.G. los compuestos que predominan en la composición (silice, caolin, feldespato, barro bola "fons", barro bola "oil mine", y barro bola importado "EPK",) y estos también predominan, de igual manera en el microanálisis hecho en el I.I.M., aunque en diferente proporción.

2) Se detecta la presencia de elementos pesados (Cu, Fe), que no afectan el comportamiento de la fractura ya que su componente en peso es mínima.

3) El análisis químico (microanálisis) es una herramienta útil en cuanto que permite complementar la información proveniente de otros ensayos.

NOTA: En las fotomicrografías 8, 9, 10 correspondiente a porcelana se comenta la poca porosidad existente, esto es por la proporción equitativa de sus componentes, esto no influye en la presentación de niveles mayores de resistencia a la compresión e impacto, ya que en el primero presenta valores de carga de ruptura menor a las demás muestras. (3.4, 2.6, 2.1 Ton.), y en el segundo fue el espécimen que menor tenacidad tuvo (1.54 J/cm²).

4) A continuación se presentan fotografías y espectros hechos en el I.I.M. en los cuales se muestra, en las primeras la cara de una superficie que ha sido preparada y en lo segundo composiciones de las 4 muestras analizadas.

- CONCLUSIONES SOBRE EL ENSAYO DE IMPACTO Y COMPRESION -

1) Se cumplió con el objetivo de detectar diferencias de tenacidad, tanto en la máquina de impacto de la F. I. como la del I. I. M. y esto dependió básicamente de la composición de cada una de las muestras.

2) La temperatura, tiempo y atmósfera, no fueron factores de influencia, los lotes de muestras estuvieron expuestas a la mismas condiciones, esto fue tanto para los especímenes de prueba de impacto, como de compresión.

3) En el ensayo de compresión se obtuvieron diferencias notables en las muestras examinadas, teniendo la cerámica de alta temperatura el valor mas alto (10.5 Ton.), y la porcelana, el valor mas bajo con (2.1 Ton.), nuevamente esto depende de la composición de cada una

4) En las gráficas obtenidas del ensayo de compresion se observó una discontinuidad en la línea, esto se debió a que las superficies no fueron lo suficientemente planas, por lo cual al aplicar la carga se rompe la parte no plana y posteriormente el cilindro muestra.

- CONCLUSIONES SOBRE FRACTOGRAFIA -

- 1) El tipo y modo de fractura encontrado en las muestras es en un alto porcentaje de tipo frágil, y decohesivo
- 2) La distribución de porosidad es homogénea en la mayoría de los casos, lo cual propicia fuertemente la fractura en las muestras.
- 3) Se tiene la impresión que en algunas de las muestras observadas se tiene una estructura de canal encontrándose esta en la cerámica de alta temperatura "china".
- 4) Los resultados obtenidos, y su relación con su composición, depende del buen equilibrio de sus componentes y condiciones de fabricación.

-CONCLUSIONES DEL MICROANALISIS -

1) De los resultados proporcionados por el Instituto de Geología, y los estudios hechos por el Instituto de Investigaciones en Materiales muestran similitud en los datos que nos fueron proporcionados, y los obtenidos por análisis químico, entanto que la diferencia es solo la proporción.

2) En algunas fotomicrografías de las ya expuestas se observaron zonas claras, y se supuso la existencia de elementos pesados en las muestras, y que por análisis químico se comprobó su existencia, aunque estos no influyeron en el comportamiento mecánico de estos cerámicos por ser mínimos.

APENDICE

A-1 COMPOSICION DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS, OBTENIDAS DEL TALLER
EXPERIMENTAL DE CERAMICA.

CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA (STONE WARE)

55 % BARRO BOLA (FONS)
15 % BARRO BOLA (OIL MINE)
10 % FELDESPATO
10 % CAOLIN
10 % SILICE

100 %

CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA RESISTENTE AL CHOQUE TERMICO
(REFRACTARIO)

25 % BARRO BOLA (OIL MINE)
34 % BARRO BOLA IMPORTADO (E P K)
35 % TALCO
2 % GROS
4 % BENTONITA

100 %

PORCELANA

25 % BARRO BOLA (OIL MINE)

25 % CAOLIN

25 % FELDESPATO

25 % SILICE

100 %

CERAMICA DE ALTA TEMPERATURA "CHINO" (STONE WARE CHINO)

55 % BARRO BOLA (FONS)

15 % BARRO BOLA (OIL MINE)

10 % FELDESPATO

10 % CAOLIN

10 % SILICE

100 % + 3.5 % FeO₂

APENDICE

A-2 TABLA DE VALORES DE LA MAQUINA DE PRUEBA DE IMPACTO DE LA
F. I.

GRADOS	JOULES	GRADOS	JOULES	GRADOS	JOULES
1	0.0004164	34	0.4674	67	1.6657
2	0.00166	35	0.4944	68	1.7098
3	0.00374	36	0.5221	69	1.7542
4	0.00666	37	0.5505	70	1.7989
5	0.01040	38	0.5795	71	1.8439
6	0.01497	39	0.6092	72	1.8891
7	0.02037	40	0.6396	73	1.9346
8	0.0266	41	0.6706	74	1.9804
9	0.0366	42	0.7022	75	2.0264
10	0.04153	43	0.7344	76	2.0726
11	0.0502	44	0.7673	77	2.1190
12	0.0597	45	0.8007	78	2.1656
13	0.0700	46	0.8348	79	2.2123
14	0.08121	47	0.8694	80	2.2592
15	0.0931	48	0.9046	81	2.3063
16	0.1059	49	0.9403	82	2.3535
17	0.1194	50	0.9766	83	2.4008
18	0.1338	51	1.0134	84	2.4482
19	0.1489	52	1.0508	85	2.500
20	0.1648	53	1.0886		
21	0.1815	54	1.1270		
22	0.1990	55	1.1658		
23	0.2173	56	1.2051		
24	0.2363	57	1.2449		
25	0.2561	58	1.2852		
26	0.2767	59	1.3259		
27	0.2979	60	1.3670		
28	0.3200	61	1.4085		

29 = 0.3427
30 = 0.3662
31 = 0.3905
32 = 0.4154
33 = 0.4410

62 = 1.4504
63 = 1.4928
64 = 1.5355
65 = 1.5785
66 = 1.6220

GRADOS JOULES
1.5 = 0.00093
2.5 = 0.0026
3.5 = 0.0050
4.5 = 0.0084
5.5 = 0.0125
6.5 = 0.0175
7.5 = 0.0233
8.5 = 0.0300
9.5 = 0.0374
10.5 = 0.0457
11.5 = 0.0548
12.5 = 0.0648
13.5 = 0.0755
14.5 = 0.0870
15.5 = 0.0994
16.5 = 0.1125
17.5 = 0.1265
18.5 = 0.1412
19.5 = 0.1568
20.5 = 0.1731
21.5 = 0.1902
22.5 = 0.2081
23.5 = 0.2267
24.5 = 0.2461
25.5 = 0.2663
26.5 = 0.2872
27.5 = 0.3089

GRADOS JOULES
34.5 = 0.4808
35.5 = 0.5082
36.5 = 0.5362
37.5 = 0.5649
38.5 = 0.5943
39.5 = 0.6243
40.5 = 0.6550
41.5 = 0.6863
42.5 = 0.7182
43.5 = 0.750
44.5 = 0.7840
45.5 = 0.8177
46.5 = 0.8520
47.5 = 0.8869
48.5 = 0.9224
49.5 = 0.9584
50.5 = 0.9949
51.5 = 1.0320
52.5 = 1.0696
53.5 = 1.1077
54.5 = 1.1463
55.5 = 1.1854
56.5 = 1.2250
57.5 = 1.2650
58.5 = 1.3055
59.5 = 1.3464
60.5 = 1.3877

GRADOS JOULES
67.5 = 1.6877
68.5 = 1.7320
69.5 = 1.7765
70.5 = 1.8214
71.5 = 1.8665
72.5 = 1.9119
73.5 = 1.9575
74.5 = 2.0034
75.5 = 2.0495
76.5 = 2.0958
77.5 = 2.1422
78.5 = 2.1889
79.5 = 2.2358
80.5 = 2.2828
81.5 = 2.3299
82.5 = 2.3771
83.5 = 2.4245
84.5 = 2.4720

28.5 = 0.3313

29.5 = 0.3544

30.5 = 0.3783

31.5 = 0.4028

32.5 = 0.4281

33.5 = 0.4541

61.5 = 1.4120

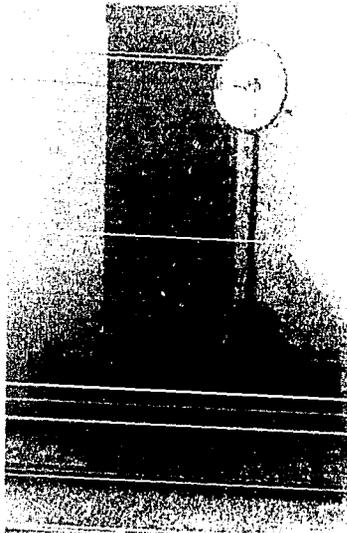
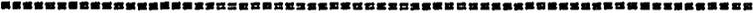
62.5 = 1.4716

63.5 = 1.5141

64.5 = 1.5570

65.5 = 1.6002

66.5 = 1.6438



Máquina de prueba de Impacto (F. I)

APENDICE

A-3 TABLA DE VALORES DE LA MAQUINA DE PRUEBA DE IMPACTO DEI I.I.M.

-ABSORCION DE ENERGIA (KG f-M)-

GRAD	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
0	30.02	30.02	30.02	30.02	30.02
1	30.02	30.02	30.02	30.01	30.01
2	30.01	30.01	30.01	30.00	30.00
3	30.00	29.99	29.99	29.99	29.98
4	29.98	29.98	29.97	29.97	29.96
5	29.96	29.95	29.95	29.94	29.94
6	29.93	29.92	29.92	29.91	29.90
7	29.90	29.89	29.88	29.87	29.87
8	29.86	29.85	29.84	29.83	29.83
9	29.82	29.81	29.80	29.79	29.78
10	29.77	29.76	29.75	29.74	29.73
11	29.72	29.71	29.69	29.68	29.67
12	29.66	29.65	29.63	29.62	29.61
13	29.60	29.58	29.57	29.56	29.54
14	29.53	29.51	29.50	29.49	29.47
15	29.46	29.44	29.43	29.41	29.39
16	29.38	29.36	29.35	29.33	29.31
17	29.30	29.28	29.26	29.25	29.23
18	29.21	29.19	29.17	29.16	29.14
19	29.12	29.10	29.08	29.06	29.04
20	29.02	29.00	28.98	28.96	28.94
21	28.92	28.90	28.88	28.86	28.84
22	28.82	28.79	28.77	28.75	28.73
23	28.70	28.68	28.66	28.64	28.61
24	28.59	28.57	28.54	28.52	28.49
25	28.47	28.45	28.42	28.40	28.37
26	28.35	28.32	28.29	28.27	28.24

27 ***** 28.22 ***** 28.19 ***** 28.16 ***** 28.14 ***** 28.11
 28 ***** 28.08 ***** 28.06 ***** 28.03 ***** 28.00 ***** 27.97
 29 ***** 27.95 ***** 27.92 ***** 27.89 ***** 27.86 ***** 27.83
 30 ***** 27.80 ***** 27.77 ***** 27.75 ***** 27.72 ***** 27.69

 31 ***** 27.66 ***** 27.63 ***** 27.60 ***** 27.57 ***** 27.54
 32 ***** 27.51 ***** 27.47 ***** 27.44 ***** 27.41 ***** 27.38
 33 ***** 27.35 ***** 27.32 ***** 27.29 ***** 27.26 ***** 27.22
 34 ***** 27.19 ***** 27.16 ***** 27.13 ***** 27.09 ***** 27.06
 35 ***** 27.03 ***** 26.99 ***** 26.96 ***** 26.93 ***** 26.89
 36 ***** 26.86 ***** 26.83 ***** 26.79 ***** 26.76 ***** 26.72
 37 ***** 26.69 ***** 26.65 ***** 26.62 ***** 26.58 ***** 26.55
 38 ***** 26.51 ***** 26.48 ***** 26.44 ***** 26.40 ***** 26.37
 39 ***** 26.33 ***** 26.30 ***** 26.26 ***** 26.22 ***** 26.19
 40 ***** 26.15 ***** 26.11 ***** 26.07 ***** 26.04 ***** 26.00
 41 ***** 25.96 ***** 25.92 ***** 25.89 ***** 25.85 ***** 25.81
 42 ***** 25.77 ***** 25.73 ***** 25.69 ***** 25.65 ***** 25.61
 43 ***** 25.57 ***** 25.54 ***** 25.50 ***** 25.46 ***** 25.42
 44 ***** 25.38 ***** 25.34 ***** 25.30 ***** 25.25 ***** 25.21
 45 ***** 25.17 ***** 25.13 ***** 25.09 ***** 25.05 ***** 25.01
 46 ***** 24.97 ***** 24.93 ***** 24.88 ***** 24.84 ***** 24.80
 47 ***** 24.76 ***** 24.72 ***** 24.67 ***** 24.63 ***** 24.59
 48 ***** 24.54 ***** 24.50 ***** 24.46 ***** 24.42 ***** 24.37
 49 ***** 24.33 ***** 24.28 ***** 24.24 ***** 24.20 ***** 24.15
 50 ***** 24.11 ***** 24.06 ***** 24.02 ***** 23.98 ***** 23.93
 51 ***** 23.89 ***** 23.84 ***** 23.80 ***** 23.75 ***** 23.71
 52 ***** 23.66 ***** 23.61 ***** 23.57 ***** 23.52 ***** 23.48
 53 ***** 23.43 ***** 23.38 ***** 23.34 ***** 23.29 ***** 23.25
 54 ***** 23.20 ***** 23.15 ***** 23.11 ***** 23.06 ***** 23.01
 55 ***** 22.96 ***** 22.92 ***** 22.87 ***** 22.82 ***** 22.77
 56 ***** 22.73 ***** 22.68 ***** 22.63 ***** 22.58 ***** 22.53
 57 ***** 22.48 ***** 22.44 ***** 22.39 ***** 22.34 ***** 22.29
 58 ***** 22.24 ***** 22.19 ***** 22.14 ***** 22.09 ***** 22.04
 59 ***** 22.00 ***** 21.95 ***** 21.90 ***** 21.85 ***** 21.80
 60 ***** 21.75 ***** 21.70 ***** 21.65 ***** 21.60 ***** 21.55

61	*****	21.49	*****	21.44	*****	21.39	*****	21.34	*****	21.29
62	*****	21.24	*****	21.19	*****	21.14	*****	21.09	*****	21.04
63	*****	20.98	*****	20.93	*****	20.88	*****	20.83	*****	20.78
64	*****	20.73	*****	20.67	*****	20.62	*****	20.57	*****	20.52
65	*****	20.47	*****	20.41	*****	20.36	*****	20.31	*****	20.26
66	*****	20.20	*****	20.15	*****	20.10	*****	20.04	*****	19.99
67	*****	19.94	*****	19.88	*****	19.83	*****	19.78	*****	19.72
68	*****	19.67	*****	19.62	*****	19.56	*****	19.51	*****	19.46
69	*****	19.40	*****	19.35	*****	19.29	*****	19.24	*****	19.19
70	*****	19.13	*****	19.08	*****	19.02	*****	18.97	*****	18.91
71	*****	18.86	*****	18.80	*****	18.75	*****	18.70	*****	18.64
72	*****	18.59	*****	18.53	*****	18.48	*****	18.42	*****	18.37
73	*****	18.31	*****	18.26	*****	18.20	*****	18.14	*****	18.09
74	*****	18.03	*****	17.98	*****	17.92	*****	17.87	*****	17.81
75	*****	17.76	*****	17.70	*****	17.64	*****	17.59	*****	17.53
76	*****	17.48	*****	17.42	*****	17.36	*****	17.31	*****	17.25
77	*****	17.19	*****	17.14	*****	17.08	*****	17.03	*****	16.97
78	*****	16.91	*****	16.86	*****	16.80	*****	16.74	*****	16.69
79	*****	16.63	*****	16.57	*****	16.52	*****	16.46	*****	16.40
80	*****	16.35	*****	16.29	*****	16.23	*****	16.17	*****	16.12
81	*****	16.06	*****	16.00	*****	15.95	*****	15.89	*****	15.83
82	*****	15.78	*****	15.72	*****	15.66	*****	15.60	*****	15.55
83	*****	15.49	*****	15.43	*****	15.37	*****	15.32	*****	15.26
84	*****	15.20	*****	15.14	*****	15.09	*****	15.03	*****	14.97
85	*****	14.91	*****	14.86	*****	14.80	*****	14.74	*****	14.68
86	*****	14.63	*****	14.57	*****	14.51	*****	14.45	*****	14.40
87	*****	14.34	*****	14.28	*****	14.22	*****	14.17	*****	14.11
88	*****	14.05	*****	13.99	*****	13.93	*****	13.88	*****	13.82
89	*****	13.76	*****	13.70	*****	13.65	*****	13.59	*****	13.53
90	*****	13.47	*****	13.41	*****	13.36	*****	13.30	*****	13.24
91	*****	13.18	*****	13.13	*****	13.07	*****	13.01	*****	12.95
92	*****	12.89	*****	12.84	*****	12.78	*****	12.72	*****	12.66
93	*****	12.61	*****	12.55	*****	12.49	*****	12.43	*****	12.38
94	*****	12.32	*****	12.26	*****	12.20	*****	12.14	*****	12.09
95	*****	12.03	*****	11.97	*****	11.91	*****	11.86	*****	11.80

96 ***** 11.74 ***** 11.68 ***** 11.63 ***** 11.57 ***** 11.51
 97 ***** 11.46 ***** 11.40 ***** 11.34 ***** 11.28 ***** 11.23
 98 ***** 11,17 ***** 11.11 ***** 11.05 ***** 11.00 ***** 10.94
 99 ***** 10.88 ***** 10.83 ***** 10.77 ***** 10.71 ***** 10.66
 100 ***** 10.60 ***** 10.54 ***** 10.48 ***** 10.43 ***** 10.37
 101 ***** 10.31 ***** 10.26 ***** 10.20 ***** 10.14 ***** 10.09
 102 ***** 10.03 ***** 9.98 ***** 9.92 ***** 9.86 ***** 9.81
 103 ***** 9.75 ***** 9.69 ***** 9.64 ***** 9.58 ***** 9.52
 104 ***** 9.47 ***** 9.41 ***** 9.36 ***** 9.30 ***** 9.24
 105 ***** 9.19 ***** 9.13 ***** 9.08 ***** 9.02 ***** 8.97
 106 ***** 8.91 ***** 8.86 ***** 8.80 ***** 8.74 ***** 8.69
 107 ***** 8.63 ***** 8.58 ***** 8.52 ***** 8.47 ***** 8.41
 108 ***** 8.36 ***** 8.30 ***** 8.25 ***** 8.19 ***** 8.14
 109 ***** 8.08 ***** 8.03 ***** 7.98 ***** 7.92 ***** 7.87
 110 ***** 7.81 ***** 7.76 ***** 7.70 ***** 7.65 ***** 7.60
 111 ***** 7.54 ***** 7.49 ***** 7.43 ***** 7.38 ***** 7.33
 112 ***** 7.27 ***** 7.22 ***** 7.17 ***** 7.11 ***** 7.06
 113 ***** 7.01 ***** 6.95 ***** 6.90 ***** 6.85 ***** 6.79
 114 ***** 6.74 ***** 6.69 ***** 6.64 ***** 6.58 ***** 6.53
 115 ***** 6.48 ***** 6.43 ***** 6.37 ***** 6.32 ***** 6.27
 116 ***** 6.22 ***** 6.17 ***** 6.11 ***** 6.06 ***** 6.01
 117 ***** 5.96 ***** 5.91 ***** 5.86 ***** 5.81 ***** 5.75
 118 ***** 5.70 ***** 5.65 ***** 5.60 ***** 5.55 ***** 5.50
 119 ***** 5.45 ***** 5.40 ***** 5.35 ***** 5.30 ***** 5.25
 120 ***** 5.20 ***** 5.15 ***** 5.10 ***** 5.05 ***** 5.00
 121 ***** 4.95 ***** 4.90 ***** 4.85 ***** 4.80 ***** 4.75
 122 ***** 4.70 ***** 4.65 ***** 4.61 ***** 4.56 ***** 4.51
 123 ***** 4.46 ***** 4.41 ***** 4.36 ***** 4.31 ***** 4.27
 124 ***** 4.22 ***** 4.17 ***** 4.12 ***** 4.08 ***** 4.03
 125 ***** 3.98 ***** 3.93 ***** 3.89 ***** 3.84 ***** 3.79
 126 ***** 3.75 ***** 3.70 ***** 3.65 ***** 3.61 ***** 3.56
 127 ***** 3.51 ***** 3.47 ***** 3.42 ***** 3.38 ***** 3.33
 128 ***** 3.28 ***** 3.24 ***** 3.19 ***** 3.15 ***** 3.10
 129 ***** 3.06 ***** 3.01 ***** 2.97 ***** 2.92 ***** 2.88
 130 ***** 2.84 ***** 2.79 ***** 2.75 ***** 2.70 ***** 2.66

131	*****	2.62	*****	2.57	*****	2.53	*****	2.49	*****	2.44
132	*****	2.40	*****	2.36	*****	2.31	*****	2.27	*****	2.23
133	*****	2.19	*****	2.14	*****	2.10	*****	2.06	*****	2.02
134	*****	1.98	*****	1.94	*****	1.89	*****	1.85	*****	1.81
135	*****	1.77	*****	1.73	*****	1.69	*****	1.65	*****	1.61
136	*****	1.57	*****	1.53	*****	1.49	*****	1.45	*****	1.41
137	*****	1.37	*****	1.33	*****	1.29	*****	1.25	*****	1.21
138	*****	1.17	*****	1.14	*****	1.10	*****	1.06	*****	1.02
139	*****	0.98	*****	0.95	*****	0.91	*****	0.87	*****	0.83
140	*****	0.80	*****	0.76	*****	0.72	*****	0.68	*****	0.65
141	*****	0.61	*****	0.58	*****	0.54	*****	0.50	*****	0.47
142	*****	0.43	*****	0.40	*****	0.36	*****	0.33	*****	0.29
143	*****	0.26	*****	0.22	*****	0.19	*****	0.15	*****	0.12
144	*****	0.08	*****	0.05	*****	0.02	*****	0.00	*****	0.00

APENDICE

A-4 - PREPARACION DE BARROS

CUATRO CARACTERISTICAS BASICAS EVALUADAS.

PLASTICIDAD

ESCALA DE CALIDAD

Se consideraron cuatro grados de calidad: A, B, C, y D.

A.- El barro bien amasado a una consistencia para modelar se siente untuosa al tacto y pasa la prueba de "cola de cochino" sin trozarse.

B.- El barro bien amasado a una consistencia para modelar se siente untuosa al tacto pero no pasa la prueba de "cola de cochino" sin trozarse.

C.- El barro bien amasado a una consistencia para modelar tiene plasticidad, pero se siente reseca al tacto y por supuesto no pasa la prueba de "cola de cochino".

D.- El barro no tiene plasticidad, no puede formarse con los dedos, se desmorona.

CRITERIO DE SELECCION:

Las calificaciones A y B se consideran satisfactorias, mientras que C y D son calificaciones rechazadas.

-RESISTENCIA-

Debido a la falta de instrumentos para medir la resistencia del barro (después de cocido) se utilizó un método comparativo con el barro FONS preparado y utilizado en el Taller Experimental de Cerámica para cono 9 y con pasta blanca MC 40 de Promacesa para cono 05. La prueba consistió en romper con las manos barras de barro o pasta de 15 * 4 * 1 cm.

ESCALA DE CALIDAD PARA CONO 9

Se consideraron cuatro grados: A, B, C, y D.

A.- Sujutando los extremos de las barras con los puños cerrados y apoyándose sobre la pierna se rompe la barra con esfuerzo.

B.- sujetando los extremos de las barras con los puños cerrados y apoyándose sobre la pierna se rompe la muestra con notable menor esfuerzo que para el caso anterior.

C.- sujetando los extremos de las barras con los puños cerrados y apoyándose sobre la pierna se rompe la muestra con facilidad.

D.- La muestra puede romperse con presión de los pulgares.

ESCALA DE CALIDAD PARA CONO 05.

A.- resistencia similar a los patrones hechos con pasta blanca MC 40 de Promacasa.

E.- Resistencia similar o menor a la de la muestra antes de quemar.

B, C, y D Grados intermedios que lograron detectarse durante las pruebas.

CRITERIO DE SELECCION

Para cono 9 la calidad D es rechazable y para el cono 05 las calidades A, B, y C son aceptables.

-ABSORCION DE AGUA-

El grado de absorción de agua es una medida de la maduración de la pasta de arcilla cocida. A medida que la pasta de barro cocido se acerca a la vitrificación su absorción se acerca a cero.

ENSAYO DE ABSORCION DE AGUA DE LA ARCILLA COCIDA

- 1.- Pesar cuidadosamente las piezas cocidas con aproximación del centígramo.
- 2.- Sumergir en agua las muestras por 24 horas.
- 3.- Secar la superficie de las barras con una toalla y pesarlas de nuevo.
- 4.- Calcular la absorción utilizando la forma siguiente:

$$\text{porcentaje de absorción} = \frac{(\text{peso saturado} - \text{peso seco}) * 100}{\text{peso seco}}$$

NOTA: Dada la sensibilidad de la balanza utilizada la precisión de las experiencias fué de +/- 0.9%

CRITERIO DE SELECCION

Para cono 9 la tolerancia máxima es de 1.99 %. Las muestras que aparecen con VIT estan rechazadas por una excesiva vitrificación con una incipiente deformación por fusión.

Para cono 05 se tomó como referencia el resultado obtenido por cuadruplicado de la pasta MC 40 de PROMACESA que arrojó un promedio 15.35 %. El límite máximo seleccionada fué de 16 % .

-CONTRACCION-

ENSAYO DE CONTRACCION AL SECADO

La cantidad de contracción es una característica muy importante en cualquier arcilla. En este ensayo se determina la contracción lineal.

- 1.- De una masa de arcilla bien amasada de una consistencia promedio para modelar, hacer una barreta de 15 cm de largo * 4 cm de ancho * 1 cm. de grueso.
- 2.- En la cara de cada barreta hacer dos rayas agudas a una distancia de exactamente 10 cm.
- 3.- Dejar secar las barretas, volteandolas frecuentemente para

evitar que se curveen.

4.- Medir la distancia entre las rayas.

5.- determinar la contracción al secado por el siguiente cálculo:

$$\text{porcentaje de } \begin{matrix} \text{contracción lineal} \end{matrix} = \frac{\text{longitud en plástico} - \text{longitud en seco}}{\text{longitud en plástico}} \times 100$$

ENSAYO DE CONTRACCION A LA COCCION

1.- Cocer las barretas hechas en el ensayo anterior.

2.- Medir la longitud entre las rayas de las barretas cocidas.

3.- Calcular la contracción a la cocción por la siguiente fórmula:

$$\text{porcentaje de } \begin{matrix} \text{contracción lineal} \end{matrix} = \frac{\text{longitud en seco} - \text{longitud cocida}}{\text{longitud en seco}} \times 100$$

La contracción total puede calcularse como sigue:

$$\text{porcentaje de } \begin{matrix} \text{contracción lineal total} \end{matrix} = \frac{\text{long en plástico} - \text{long cocida}}{\text{longitud en plástico}} \times 100$$

CRITERIOS DE SELECCION

Para cono 9 tomando como referencia el barro FONS usado en el Taller Experimental de Cerámica, que tiene una contracción total de 15 %, se decidió tomar como contracción total aceptable un máximo de 16 % .

Para cono 05 : Se tomo como referencia la contracción total de la pasta blanca MC 40 de PROMACESA la cual después de una determinación por duplicado arrojó un valor promedio de 4.4 % .El valor máximo aceptable se fijo en 5.0 % .

APENDICE

A-5- NORMA DE PRUEBA PARA RESISTENCIA DE IMPACTO EN CERAMICOS DESIGNACION ASTM C 368 - 77

1. OBJETIVO:

1.1 Este método cubre las siguientes pruebas.

1.1.1 Pruebas de impacto en el centro de cerámicos planos y de piezas cóncavas y en el borde de piezas cóncavas.

1.1.2 Pruebas de impacto en el borde de piezas lisas, las piezas pueden ser vidriadas o no.

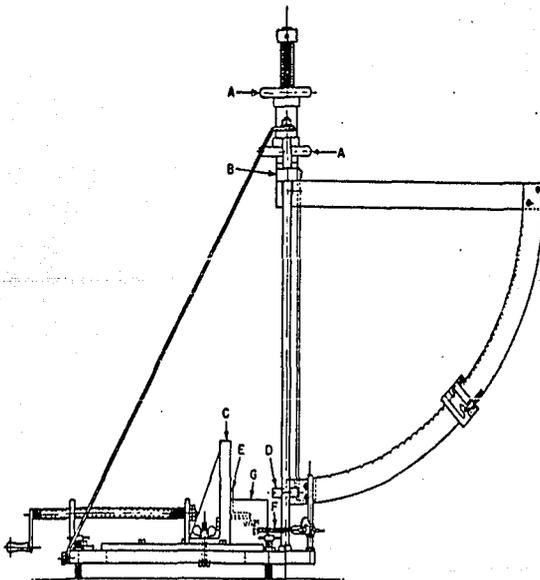
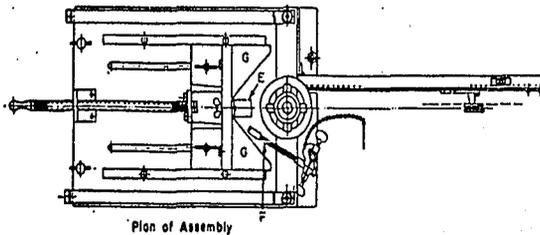
NOTA (1) La prueba de impacto en el centro de la muestra es empleada para determinar (1) la magnitud del golpe que producirá una fractura inicial, y (2) la cantidad de energía necesaria para producir falla completa. En el primer caso la fractura inicial muestra sobre el lado opuesto de la pieza donde que está siendo golpeada y parece ser una función del cuadrado del grosor y del resquebrajamiento inherente del cuerpo o de la combinación del cuerpo vidriado: este es relativamente independiente del tamaño o diseño de la muestra; el segundo es mas dependiente sobre el diseño y a menudo es sujeto a una amplia variación de un lote dado de piezas.

NOTA (2) La prueba de impacto en el borde de la pieza cóncava es similar a una prueba de astillamiento ó fragmentación; y el tipo de falla que es obtenida es usada para evaluar el efecto de la forma del objeto.

NOTA (3) En adición a la pieza inherente del objeto la prueba de impacto resulta ser afectada grandemente por el contorno del borde y para una extensión mas pequeña por el espesor del borde la inclinación de la hoja y la colocación del vidrio.

2. APARATOS

2.1 Pruebas de impacto tipo péndulo.- El aparato para prueba de impacto (FIGS 1, 2) deberá consistir de un dispositivo que tenga las siguientes características:



- Fig 1 Aparato de Pruebas de Impacto. -

2.1.1 Un mazo de acero de tamaño específico y de una dureza Rockwell C 55.

2.1.2 Soporte del mazo por suspensión en V.

2.1.3 Provisto por medio de liberación de una altura fija así como para dar resultados reproducibles independientes del operador.

2.1.4 Provisto para el sostenimiento de la muestra de prueba colocada mediante un tornillo de ajuste en contra de un soporte de metal rígido.

2.2 Micrómetro - para medición de espesor de las muestras de prueba, un micrómetro calibrador que puede ser leído desde 0.001 in. (0.03 mm.) deberá ser usado.

3. MUESTRAS DE PRUEBA

3.1 Las muestras deberán ser seleccionadas de tal manera de que sean representativas de un lote que ha sido muestreado. En general, las pruebas de impacto deberán ser basadas en un mínimo de 10 muestras, y para prueba de Castillamiento, fragmentación o prueba de cortante) por lo menos de 5 muestras.

Las muestras deberán ser inspeccionadas por seguridad y obviamente por defectos físicos anteriores a la prueba.

4. PROCEDIMIENTO POR PRUEBA DE IMPACTO DE UNA PIEZA PLANA

4.1 El montaje del tubo cilíndrico mostrado en la fig 2 (NOTA 4) sobre el tope de retención C, fig 1 y colocado a una altura tal que los rodamientos montados en el extremo del tubo cilíndrico están en contacto y simétricas a la porción central de la muestra, las cuales deberán estar colocadas en la orilla de la base del plato. La muestra deberá ser probada con ambos, la cara y la parte posterior hacia el martillo, en general un valor mas bajo de falla es obtenido cuando la cara es golpeada.

El tope de retención para que la superficie esférica del mazo, D solo toque la superficie de la muestra cuando el brazo este

colgando libre (verticalmente) asido a las dos mariposas en la base del tope de retención.

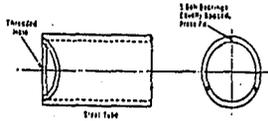


Fig 2

NOTA 4 - En esta parte de la prueba el tubo cilíndrico reemplaza a el tornillo de ajuste. Es mostrado en posición sobre el tope de retención C en la FIG 1.

4.2 Ajustar los brazos de posición F sujetos en una posición retraída por medio de sus seguros de tal manera que los extremos de enfrente del mango y la abrazadera coincidan. Ajustar las abrazaderas sobre los postes verticales para así sostener la muestra a la misma altura a la que el péndulo lo golpeará esto es de la mitad de arriba. Ajustar los brazos de tal manera que la superficie cubierta de caucho en los ángulos derechos de su varilla contactarán con el borde de la muestra; remover la llave del seguro para permitir que los brazos de posición abracen la muestra en contra del tubo cilíndrico. Ajustar la barra del soporte del péndulo B y cerrarla en posición por medio de los rodamientos (ruedas manuales) A, de tal manera que el mazo golpee el centro de la muestra.

4.3 Con los ajustes preliminares completados, sujetar la muestra a una serie de golpes de impacto a 0.02 ft*lb (0.027 J) e aumentando incrementos de 0.01 ft*lb (0.014 J) hasta fractura inicial, y en incrementos de 0.02 ft*lb de ahí hasta la fractura.

NOTA 5 - Las pruebas deberán ser realizadas rápidamente mediante la sujeción de la porción del elemento del mecanismo liberador

que descansa debajo del segmento cuadrante de abajo con la punta del pulgar de la mano derecha y moviéndolo hacia atrás hacia la ranura correcta para el siguiente impacto inmediatamente después de que el mazo ha sido liberado.

Capturar el péndulo al rebote con la mano izquierda, volverá a colocar el extremo del mazo dentro de las mordazas de la abrazadera liberadora controlado por el pulgar de la mano derecha, y repetir la secuencia de arriba hasta que ocurra la falla de la muestra.

5 PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE IMPACTO DE PIEZAS CONCAVAS EN EL CENTRO

5.1 Siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 4, excepto remover el tubo cilíndrico, Fig 2 y los dos triángulos de hierro G, Formando la V para permitir que el borde de la muestra este en contacto con la superficie del tope de retención. Golpear la muestra en el centro de la parte posterior y permitir que los brazos de posición hagan contacto con la muestra en la base en lugar que en el borde.

6 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DE IMPACTO DE PIEZAS CONCAVAS EN LOS BORDES

6.1 Colocar la muestra de prueba en el aparato de tal manera que descansa en la V formadas por los dos prismas triangulares asegurados hacia el tope de retención y estan sujetos por medio de la abrazadera de angulo E, descansando ligeramente sobre el borde y mediante los dos brazos de posición ajustados de tal manera que sus líneas esten ejerciendo presión radialmente y también que no esten ejerciendo una presión descendente apreciable sobre el borde. Con tazas, el manejo debe ser alejado del contacto con el aparato.

6.2 Ajustar la altura de la barra del soporte del péndulo de tal manera que el contacto entre el borde de la muestra y el extremo

del mazo este en el centro de la superficie esférica del mazo.

6.3 Con los ajustes preliminares completados, sujeta la muestra de una serie inicial de impactos a 0.02 ft*lb (0.027 J) e ir aumentando en incrementos de 0.01 ft*lb (0.014 J). Un rompimiento recto o un rompimiento de arco simétrico comunmente resultará ordinariamente de esta prueba si es ejecutada propiamente.

7. PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE (ASTILLAMIENTO FRAGMENTACION O CORTE)

7.1 Colocar la muestra de prueba en el aparato como se describe en 6.1 Excepto el uso del extremo cilindrico de el mazo como la superficie golpeante y mover los mangos de los brazos de posición hacia adelante en sus abrazaderas de tal manera que los codos de atrás de cada mango en su abrazadera coincidan. Después ajustar el tope de retención ensamblarlo de tal manera que el extremo de la muestra apenas toque la superficie golpeante del mazo, apretando las dos mariposas en la parte de atrás.

7.2 Ajustar la barra de soporte del péndulo y cerrarla en posición mediante los rodamientos de tal manera que el centro de la superficie del mazo haga contacto con el extremo de la muestra.

7.2.1 Golpear repetidamente el extremo o lado plano de la muestra con el extremo cilindrico del martillo con golpes incrementando la fuerza hasta que la falla ocurra comenzando con un golpe inicial de 0.01 ft*lb (0.136 J) e incrementando la fuerza de cada golpe subsecuentemente a un incremento de 0.02 ft*lb (0.027 J).

7.2.2 Muestras de prueba de lado plano como se describió en 7.2.1 excepto que el golpe inicial debiera ser 0.02 ft*lb (0.027 J) con un incremento de 0.01 ft*lb (0.014 J).

8 CALCULO

8.1 Cálculo del factor fuerza para piezas planas probadas por impacto es como sigue.

$$S = \frac{12 I}{t^2}$$

donde:

S = Factor de fuerza psi.

I = Promedio de impacto para producir la fractura inicial, en ft*lb.

t = promedio de espesor de las muestras en el punto de impacto. in.

9. REPORTE

9.1 El reporte deberá incluir lo siguiente:

9.1.1 Designación del material aprobado, incluyendo información sobre el tipo, forma y si es vidriado o no.

9.1.2 Metodo de selección de probetas (muestras).

9.1.3 Identificación del tipo de aparato usado.

9.1.4 Hoja de datos que muestren:

9.1.4.1 Forma y dimensiones esenciales de una probeta (muestra de prueba) representativa.

9.1.4.2 serie de pruebas empleadas, que son energía de impacto inicial e incrementos subsecuentes.

9.1.4.3 promedios de energía de impacto y energía de impacto individual para producir la fractura inicial.

9.1.4.4 espesor de la probeta (muestra) en el punto de impacto y un promedio de eso.

9.1.4.5 Para piezas planas el factor de esfuerzo calculado desde el promedio de energía de impacto y espesor de la muestra (secc 8) .

9.1.4.6 Energía de impacto individual y promedio de energías de impacto para producir la falla y descripción del tipo de las mismas.

9.1.4.7 Valores de falla de (fragmentación o cortante) y tipo de fragmento de cada localización de cada muestra y promedio de los valores de falla.

9.1.4.8 Espesor de borde representativo.

9.2 El reporte también deberá incluir una breve exposición de las

diferencias observadas, y si hay cantidades de muestras con características inusuales.

9.2.2 Opinión de un experto para ver si la muestra ha fallado en sus respectivas pruebas.

10 PRECISION Y EXACTITUD

10.1 Una exposición no justificable puede ser hecha también sobre la precisión y exactitud de este método ya que las pruebas resultan meramente condiciones si hay conformación para un criterio de aceptación especificado en este método.

METODO DE PRUEBA STANDAR PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE MATERIALES CERAMICOS COCIDOS; ASTM DESIGNACION C 773

- 79

1 SISTEMA

1.1 ESTE METODO ABARCA DOS PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA (A y B) para la determinación de la resistencia a la compresion de materiales cerámicos cocidos.

1.2 El método A es generalmente aplicable a productos cerámicos de niveles de resistencia bajos hasta los moderadamente altos, hasta (150000 psi o 1030 Mpa.).

1.3 El método B fue específicamente planeado para probar cerámicas de alta resistencia (100000 psi o 690 Mpa.).

2 DOCUMENTOS APLICABLES.

2.1 ASTM Standars:

E 4 Verificación de carga de máquinas de prueba (o de examinación).

E 8 Definiciones de términos relacionados con métodos de ensayos mecánicos.

E 165 Practica recomendada para el método de inspección de líquidos penetrantes.

3 IMPORTANCIA:

3.1 La resistencia a la compresión es la medición de la resistencia máxima de un material cerámico. Idealmente, a los cerámicos debería darseles mas importancia en este uso. Esta prueba es una medición de la utilidad del potencial de tolerancia

(o soporte) de carga de un cerámico.

METODO (A).

4 APARATO

4.1 Máquina de prueba o examen; Cualquier máquina de prueba acorde a los metodos E 4 y a los requerimientos de velocidad de prueba preescritos en las secciones 6 y 9 de este método, puede ser usadas.

4.2 Bloque de soporte esférico (spherical bearing block) 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 placa superior de la máquina (superficie inferior del bloque de soporte esférico) permanezca en una posición central (superficies esféricas en contacto total) cuando no este cargada. Las superficies esféricas deberán estar bien lubricadas, y el centro de curvatura deberá descansar sobre la superficie inferior de la placa. La diagonal o diametro de la placa será solo ligeramente mayor que la diagonal de $1 \frac{1}{2}$ in. (38.1 mm.) de los bloques de contacto para facilitar el centrado exacto de los especímenes o muestras.

4.3 BLOQUES DE CONTACTO.

Bloques de contacto (o contactantes) de acero rolado en frio deberá ser usados entre la muestra a prueba y las placas de la máquina. Estos bloques serán de $1 \frac{1}{2}$ in. (38.1mm²) $\frac{5}{8}$ a $\frac{3}{4}$ in. (15.9 a 19.1 mm.) de ancho y las caras o superficies contactantes deberan ser planas y paralelas. Los bloques de contacto serán alisados si es necesario, después de cada prueba de resistencia, y pueden ser reusados solamente, mientras el grosor permanezca sobre $\frac{1}{2}$ in. (12.7 mm.). Si el bloque de contacto se rompe durante la prueba, deberá ser reemplazado.

4.4 ALMOHADILLAS:

Se emplearán almohadillas entre la muestra a examinar y los

bloques de contacto para ayudar en la distribución de la carga. Se deberán utilizar almohadillas nuevas para cada muestra o especímen. Materiales apropiados para almohadillas, seleccionados de acuerdo al rango de resistencia a la compresión del material que se está probando, son mostrados en la siguiente tabla.

Rango de resistencia a la compresión (psi , Mpa,)	almohadilla
5000 a 50000 incl (34.5 a 345)	papel secante absorbente 1/64 in. (0.4 mm.) grosor

sobre 50000 a 150000 incl (345 a 1030)	acero templado, 1/32 in. (0.8mm) gros. Dureza Rockwell 65 HB máx.

5 Las muestras o especímenes a prueba.

5.1 Preparación.- La muestra a examinarse será en forma de cilindros rectos estos cilindros pueden ser formados o cocidos para el propósito de la prueba de compresión o bien pueden ser cortados de cerámica cocida por medio de aserramiento o taladreo. Las orillas de toda muestra deberán ser pulidas para producir caras o superficies planas y paralelas dentro de 15 min de arco (0.044 rad).

5.2 Tamaño.-El tamaño de la muestra deberá ser no mas grande que requiera mas del 80% de la capacidad estimada de la máquina de prueba. En la tabla No.1 se muestran ejemplos de las limitaciones de las muestras en cuanto al tamaño.

TABLE 1 Maximum Specimen Diameter in Inches (Millimetres) to Utilize 80 % of Rated Capacity of Testing Machine

NOTE—The ratio of length to diameter of the test specimens may vary between 1.9 and 2.1. Diameters shall be measured to the nearest 0.001 in. (0.03 mm).

Maximum Compressive Strength, psi (MPa)	Testing Machine Capacity, lbf (kN)		
	10 000 (44)	20 000 (89)	30 000 (134)
	in. (mm)	in. (mm)	in. (mm)
10 000(69)	1.0(25.4)	1.43(36.3)	1.75(44.4)
50 000(345)	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)

Tabla No.1 ASTM C 773-7

5.3 Numero de muestras .- El número de muestras deberá no ser menos de 10.

6 PROCEDIMIENTO.

6.1 Chequeo en seco (chechar por coloración) la muestra de acuerdo con los métodos E 165 antes de la prueba. Descarte cualquier pieza que exhiba grietas o defectos a simple vista. 6.2 Limpie la muestra a examinar con un solvente apropiado después de pulir y sumerja en un baño ultrasónico formado por una solución de detergente caliente, después enjuague la muestra en agua caliente, seque a 110 \pm 2 grad C (230 \pm 4 grad F) por 2 horas y enfríe hasta temperatura ambiente en un desecador.

6.3 centre cuidadosamente la muestra en la máquina entre los bloques de contacto . Coloque una protección adecuada alrededor de la muestra para desviar los fragmentos que vuelen al romper la muestra, aplique la carga en forma continua y sin impacto o choque.

6.4 La razón o medida de carga a ser usada dependerá de la resistencia a la compresión del material que esta siendo probado como se muestra en la tabla 2 .

TABLE 2 Typical Loading Rates to Cause Failure in
min

Note—The loading rate of 16 000 lb/min (70 kN/min) shall be used for the first three tests of an unknown material to determine the general strength classification group. Some specimens crack before ultimate failure; the load at which the first audible crack occurs shall be noted, but only the load on the specimen at ultimate failure shall be used for calculation of compressive strength.

Compressive Strength, psi (MPa)	Specimen Diameter, in. (mm)	Loading Rate, lb/min (kN/min)
10 000(69)	1.00(25.4)	8 000(35)
50 000(345)	0.64(16.3)	16 000(70)
150 000(1034)	0.45(11.5)	24 000(105)

Tabla 2 ASTM C 773-79

METODO (B).

7 Aparato:

7.1 Máquina de prueba - Cualquier máquina de cabeza fija acorde a los Métodos E 4 y a los requerimientos de velocidad de prueba preescritos en 9.3 puede ser usada.

7.2 Platos de carga - Platos de carga de acero endurecido 60 HRC se emplearán entre los cilindros de contacto y las platos de la máquina. Estos platos serán aproximadamente de 2.5 in. (65.3 mm.) de diámetro por 1 in. (25.4 mm.) de grosor. Las superficies contactantes deberán ser planas y paralelas con 0.001 in. (0.025 mm.) de lectura total en el indicador (total indicator reading). Los platos de carga serán re-alisados lo necesario para retener su tolerancia y para retirar cualquier daño en la superficie que resultará de la prueba de materiales de alta resistencia.

7.3 Cilindros de contacto: Cilindros de contacto de cerámica del mismo material al de la muestra que se examinará deben ser usados entre los platos de carga y la muestra para ayudar en la distribución de la carga para minimizar efectos nocivos o perjudiciales. estos cilindros de contacto deberán ser de $\frac{1}{2}$ in. (12.7 mm.) de altura y $\frac{5}{8}$ in. (15.9 mm.) de diámetro. Las superficies contactantes serán planas y paralelas entre 0.0005 in.

(0.013 mm.) en la lectura del indicador se deberán usar 2

cilindros de contacto nuevos para cada muestra para prevenir una falla prematura de un cilindro de contacto dañado y por ello se obtenga una lectura errónea.

Al usar bloques de contacto hechos del mismo material , o similar al de la muestra que se examina se obtendrá menos deformación y menos resistencia a la fricción.

NOTA 1.-

Cilindros de contacto cerámicos de similar composición a aquella de la muestra que se examina pueden ser usados siempre y cuando los cilindros de contacto tengan un módulo elástico similar y una resistencia a la tensión igual o más alta a la muestra que se examina.

8.- MUESTRAS

8.1 Muestras que se examinan.- Pula las muestras hasta obtener cilindros. Pula las orillas de todas las muestras con una lija de 100 o una rueda de diamante mas fina, hasta obtener una lectura del indicador que las muestre paralelas y perpendiculares al eje, dentro de 0.005 in. (0.013 mm.).

8.2 Limpie las muestras con un solvente apropiado después de haber pulido y siga con inmersión en un baño ultrasónico hecho de una solución de detergente caliente, después enjuague las muestras en agua caliente, seque a $110 \pm 2 \text{ grad}^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 4 \text{ grad}^{\circ}\text{F}$) por 2 horas y enfríe hasta temperatura ambiente con un desecador.

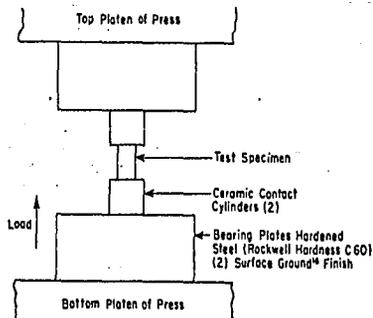
NOTA No.2 En caso de que estén limpiando muestras sensibles al agua como el MgO se deberá emplear un sustituto del agua.

8.3-Tamaño.- Las muestras serán de 0.250 ± 0.001 in. (6.35 ± 0.025 mm.) de diámetro y de 0.500 ± 0.002 in. (12.7 ± 0.05 mm.) de largo . 8.4 Número de muestras.- No será menos de 10.

-PROCEDIMIENTO-

9.1 DYE-CHECK (Checar por coloración) las muestras y los cilindros de contacto de acuerdo con la práctica recomendada E165 antes de efectuar la prueba . Descarte cualquier pieza que exhiba roturas o defectos a simple vista.

9.2 Centre la muestra cuidadosamente en la máquina entre los platos (fig 1) o de soporte para evitar una distribución del peso irregular . Coloque una protección adecuada alrededor de la muestra para desviar los fragmentos que vuelen al fracturarse la muestra.



9.3 Aplique la carga en forma continua y sin impacto choque a razón de $10000 \text{ lbf}/\text{min}$ ($45 \text{ kN}/\text{min}$) dentro de un 20% . Use solo la carga sobre la muestra hasta la fractura final para calculo de la

resistencia a la compresión.

10 CALCULO (METODO A , B).

10.1.- Calcule la resistencia a la compresión de cada muestra como sigue.

$$C=P/A$$

donde:

C= resistencia a la compresión de la muestra, psi o MPa .

P= carga total sobre la muestra en la fractura, lbf o N .

A= area calculada de la superficie de soporte de la muestra, (pulgadas cuadradas o milímetros cuadrados).

11 REPORTE .

11.1.-Reporte el método empleado e incluya lo siguiente.

11.2.-Tipo de máquina de prueba (hidráulica o tornillo).

11.3.-Material y tamaño de bloques de contacto o de los materiales de almohadilla.

11.4.-Descripción del material que se está examinando (nota 3).

11.5.-Razón o velocidad de carga.

11.6.-Número de muestras examinadas.

11.7.-Dimensiones y carga de fracaso de cada muestra.

11.8.-Resistencia a la compresión promedio de las muestras examinadas y la desviación standar.

NOTA : Es deseable incluir detalles del origen de la muestra y su tratamiento subsecuente.

Tabla No.1 Diámetro máximo de la muestra en pulgadas (mm.) para utilizar el 80% de capacidad estimada de la máquina de prueba. nota: al razón o cociente de longitud al diámetro de las muestras a examinar puede variar entre 1.9 y 2.1 .

Los diámetros serán medidos lo más apropiado a 0.001 in. (0.03 mm)

máxima resistencia a la compresión	capacidad de la máquina de prueba		
psi , MPa.	lbf , (kN).		
	10000(44)	20000(89)	30000 (134).
	in.(mm.)	in.(mm.)	in.(mm.) .

10000 (69)	1.0 (25.4)	1.43 (36.3)	1.75 (44.4).
50000 (345)	0.45 (11.5)	0.64 (16.3)	0.78 (19.8).
150000 (1034)	0.26 (6.6)	0.37 (9.4)	0.45 (11.5).

TABLA No. 2 Proporciones de cargas típicas para provocar el fracaso en 1 min.

NOTA: La proporción de carga de 16000 lbf/min (70 kN/min.) se usará para las tres primeras pruebas de un material desconocido para determinar la clasificación general de resistencia del grupo. Algunas muestras se rompen antes de la carga final o última; el peso o carga en el cual la primera rotura audible ocurra deberá ser notado, pero solo el peso o carga sobre la muestra a la fractura final se usará para cálculo de la resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión psi, MPa	diámetro de la muestra in. mm.	Proporción de carga lbf/min. kN/min.
10000 (69)	1.00 25.4)	8000 (35)
50000 (345)	0.64 (16.3)	16000 (70)
150000 (1034)	0.45 (11.5)	24000 (105)



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

APENDICE A-6: ANALISIS HECHO POR EL INSTITUTO DE
GEOLOGIA SOBRE LA SILICE S S J, CAOLIN AH, FELDESPATO
MPM, GRIS FONS, OIL MINE, E P K.

INSTITUTO DE GEOLOGIA

APARTADO POSTAL 70-296 Cd. UNIVERSITARA

MEXICO 20 D. F.

MATERIAL	SILICE S S J
Megascópico	cuarzo blanco, pulvurulento fino
Mineralogía	cuarzo
COMPOSICION QUIMICA	%
SiO ₂	98.14
Al ₂ O ₃	1.44
Fe ₂ O ₃	0.06
CaO	0
HgO	0
Na ₂ O	0.45
K ₂ O	0.05
TiO ₂	0
MnO	0
SO ₃	0
CO ₂	0
H ₂ O ⁻	0.08
perdida a 900 °C	0.018
color	blanco
color al quemado (1050 °C)	blanco
clasificación	cuarzo



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

INSTITUTO DE GEOLOGIA

APARTADO POSTAL 70-296 Cd. UNIVERSITARIA

MEXICO 20 D. F.

MATERIAL	CAOLIN AH
Megascópico	caolin silicoso blanco pulverulento fino áspero.
Mineralogía	caolinita, cuarzo, Alunita
COMPOSICION QUIMICA	%
SiO ₂	56.45
AL ₂ O ₃	29.18
Fe ₂ O ₃	0.26
CaO	0
MgO	0
Na ₂ O	0.50
K ₂ O	0.75
TiO ₂	0.50
MnO	0
SO ₃	1.97
CO ₂	0
H ₂ O ⁻	1.29
pérdida a 900 °C	9.40
color	blanco
color al quemado (1050 °C)	blanco
clasificación	caolin silicoso



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

INSTITUTO DE GEOLOGIA

APARTADO POSTAL 70-296 Cd. UNIVERSITARIA

MEXICO 20 D. F.

MATERIAL	FELDESPATO
Megascópico	feldespato, blanco grisáceo , pulverulento fino, áspero.
Mineralogía	feldespato, cuarzo.
COMPOSICION QUIMICA	%
SiO ₂	64.72
Al ₂ O ₃	22.16
Fe ₂ O ₃	0.36
CaO	0
MgO	0
Na ₂ O	7.05
K ₂ O	6.20
TiO ₂	0
MnO	0
SO ₃	0
CO ₂	0
H ₂ O ⁻	0.07
pérdida a 900 °C	0.22
color	gris
color al quemado (1050 °C)	marrón claro
clasificación	feldespato



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

INSTITUTO DE GEOLOGIA

APARTADO POSTAL 70-296 Cd. UNIVERSITARIA

MEXICO 20 D. F.

MATERIAL	GRIS FONS (BARRO BOLA)
Megascópico	arcilla plástica pulverulenta fina.
Mineralogía	cuarzo, plagioclasa, hidromica
COMPOSICION QUIMICA	%
SiO ₂	62.69
Al ₂ O ₃	22.42
Fe ₂ O ₃	1.86
CaO	0
MgO	0
Na ₂ O	0.75
K ₂ O	2.05
TiO ₂	0.80
MnO	0
SO ₃	0
CO ₂	0
H ₂ O ⁻	2.71
pérdida a 900 °C	7.57
color	grisáceo
color al quemado (1050 °C)	marrón claro
clasificación	esquistó micáceo intemperizado



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

INSTITUTO DE GEOLOGIA

APARTADO POSTAL 70-296 Cd. UNIVERSITARIA

MEXICO 20 D. F.

MATERIAL	E. P. K. (BARRO BOLA IMPORTADO)
Microscópico	
Mineralogía	
COMPOSICION QUIMICA	%
SiO ₂	45.91
Al ₂ O ₃	38.71
Fe ₂ O ₃	0.42
CaO	0.09
MgO	0.12
Na ₂ O	0.04
K ₂ O	0.22
TiO ₂	0.34
MnO	0
SO ₃	0
CO ₂	0
H ₂ O ⁻	0
pérdida a 900 °C	14.18
color	
color al quemado (1050 °C)	
clasificación	



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

INSTITUTO DE GEOLOGIA

APARTADO POSTAL 70-296 Cd. UNIVERSITARIA

MEXICO 20 D. F.

MATERIAL	OIL MINE (BARRO BOLA, OM)
Megascópico	
Mineralogía	
COMPOSICION QUIMICA	%
SiO ₂	52.1
Al ₂ O ₃	31.2
Fe ₂ O ₃	0.8
CaO	0.4
MgO	0.3
Na ₂ O	0.3
K ₂ O	1.0
TiO ₂	0
MnO	0
SO ₃	0
CO ₂	0
H ₂ O ⁻	0
pérdida a 900 °C	12.4
color	
color al quemado (1050 °C)	
clasificación	

BIBLIOGRAFIA

- 1) Ciencia e Ingeniería de los materiales.
Donal R. Askeland. Ed. Iberoamericana 1985.

- 2) Ensaye e Inspección de los materiales en ingeniería.
Hammer E. Davis , George E. Troxell, Clement W. Ed. Continental

- 3) Mechanical Behaviour of Ceramics.
R. W. Davidge. Cambridge Solid State Science Series 1979

- 4) Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones
Richard A. Flinn, Paul K. Trojan. Ed. Mc-Graw Hill 1979.

- 5) Manual del Ingeniero Mecánico tomo I
Theodore Baumeister, Eugene Avallone, Theodore Baumeister III
Ed. Mc-Graw Hill 1984

- 6) "Materials Selector" Reinhold Publishing Corp. Nueva York
1973

- 7) Metals Handbook FRACTOGRAFIA Vol 12
American Society for Metals (A S M) 9^a Edición 1978.