

ADAPTANDO EL MÉTODO DE ARQUÍMEDES PARA
DETERMINAR LAS DENSIDADES Y POROSIDADES DE
MUESTRAS PEQUEÑAS DE CERÁMICA

Vesselina Radeva*

“Largo es el camino de la enseñanza por medio de teorías; breve y eficaz por medio de ejemplos”

RESUMEN

Prácticamente todos los productos contienen dos fases: sólidos y poros. Muchos métodos estándar para determinar las densidades y las porosidades, especialmente para una variedad de productos de cerámica, utilizan varias adaptaciones del Método de Arquímedes. Esta presentación demuestra como puede ser extendido este método utilizando una balanza analítica y una serie de precauciones para determinar de manera exacta las propiedades físicas de muestras de tamaño menor a un gramo.

El método es a veces utilizado para carburos cementados, alambres electrónicos, asfalto, plásticos, carbones bituminosos (grasos), e incluso turba. Sus usos más comunes tienen lugar para las cerámicas. Las pruebas típicas de la ASTM incluyen:

c 20	Ladrillo refractario quemado, a través de hervir agua
c 373	Whitewares de cerámica
c 725	Apartadero de fibra mineral semi-denso
c 830	Ladrillo refractario quemado, por presión al vacío
c 914	Materiales refractarios sólidos, por inmersión en cera
c 948	Concreto fortificado con fibra de vidrio
c 1039	Electrodos de Grafito

* Departamento de Ingeniería. Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC). República Dominicana.

Todas estas pruebas, según han sido escritas, requieren especímenes relativamente grandes con masas de al menos 100 g para asegurar resultados significativos utilizando balanzas de con un grado de exactitud no mejor que 0.01 g.

PALABRAS CLAVES

Método de Arquímedes, densidad en bulto, densidad aparente, porosidad.

ABSTRACT

Practically all products contain two phases: solid and pores. Many standard methods to determine the densities and the porosities, especially for a variety of ceramics products, use several adaptations of the Method of Archimedes. This presentation demonstrates how this method can be extended using an analytical balance and a series of precautions to determine in an exact way the physical properties of samples with a mass smaller than a gram. The method sometimes is used for cemented carbides, electronic wires, bituminous coals (greasy), plastics, asphalt, and even turba. Their more common uses take place for ceramics. The typical tests of the ASTM include:

20 burned refractory brick, through boiling water,

373 whitewares of ceramics,

725 semi-dense mineral fiber lay-by,

830 burned refractory brick, by pressure,

914 solid refractory Materials, by wax immersion,

948 fortified concrete with fiber glass,

1039 graphite Electrodes.

All these tests, according to how they have been written, require relatively great specimens with at least 100 g of mass to assure significant results using scales with an exactitude level not better than 0,01 g.

KEY WORDS *Method of Archimedes, density in bulk, apparent density, porosity.*

Requisitos

Un entendimiento básico de los tipos de volúmenes, densidades y porosidades es requerido. Adicionalmente, se presume la habilidad de determinar las masas utilizando una balanza analítica.

Objetivo

El propósito de este experimento es demostrar como el Método de Arquímedes y una balanza analítica pueden ser utilizados para determinar la densidad en bulto de la masa y otras propiedades físicas relacionadas a esta de un espécimen pequeño de cerámica (de aproximadamente 1 g).

Equipos

Además de las provisiones básicas de laboratorios, tales como pinzas y hojas de papel desechable, los siguientes equipos son requeridos:

1. Balanza analítica mecánica y exacta a 0.0001 g
2. Contenedor de vidrio curvado (o un desecador tipo aspiradora)
3. Bomba aspiradora
4. Termómetro, para medir la temperatura del ambiente
5. Alambre de cobre u otro metal que no sea corrosivo, con calibre igual a 0.40 mm o menos
6. Jarra o vaso de precipitados de aproximadamente 9 cm de diámetro x 9 cm de altura (¡Un contenedor pequeño de mantequilla de maní funciona muy bien!)
Agua destilada
7. Un soporte de 3 patas

El soporte de 3 patas, el cual es utilizado para agarrar el jarrón en una posición hacia arriba y alejada de la bandeja de la balanza, puede ser construido de cualquier material que se tenga a mano, pero debe contar con los siguientes elementos: 1) una base con tamaño de aproximadamente 8 cm x 14 cm, y 2) patas con una altura de 30 mm, aproximadamente.

Procedimiento

1. Destape la balanza analítica. Luego, mida el peso seco, WD, al 0.0001 g más cercano y regístrelo.

2. Coloque el espécimen en su soporte en el jarrón y llénelo hasta llegar a aproximadamente 1 cm. de colmar su capacidad total con el agua destilada.

3. Coloque el jarrón de agua que contiene el espécimen dentro del contenedor de vidrio curvado.

4. Conecte la bomba aspiradora al contenedor de vidrio curvado (Es recomendable el colocar una trampa en la línea para evitar contaminar el aceite de la bomba aspiradora).

5. Encienda la bomba aspiradora por al menos quince (15) minutos de manera que el agua hierva, penetrando así por todos los poros abiertos del espécimen.

6. Elimine la jarra que contiene el espécimen y permita que la temperatura se aproxime al nivel de equilibrio. Registre la temperatura.

7. Coloque el soporte de tres patas sobre la bandeja de la balanza, asegurándose de que no exista contacto directo con la bandeja. Luego, destape la balanza.

8. Ponga la jarra que contiene el espécimen y su soporte en el soporte de 3 patas.

9. Cuelgue el alambre de soporte sobre el segundo gancho debajo de donde el asa de la bandeja está conectado.

10. Mida el peso suspendido y saturado total del espécimen más su soporte, WSS G, al 0.0001 g más cercano y regístrelo.

11. Utilice pinzas para desalojar el espécimen de su soporte y, o trans-

ferirlo de la jarra a otro contenedor de agua a la misma temperatura, o dejarlo que caiga hasta el fondo del jarrón.

12. Mida el peso del soporte, WSS T mientras este suspendido y regístrelo.

13. Quite la jarra y el soporte de 3 patas de la balanza y destare la balanza de nuevo.

14. Embadurne la superficie del espécimen utilizando una toalla desechable o paño para eliminar cualquier gota de agua que quede en la superficie. Inmediatamente después, mida el peso saturado, WS; y regístrelo.

15. Mida la temperatura del agua en la jarra. Si la misma ha variado mas de 0.2 °C, entonces repita los pasos 7 al 14. De lo contrario, determine la densidad del agua, d_L correspondiente a la temperatura promedio del agua durante la determinación de los diferentes pesos saturados.

16. Calcule el volumen de bulto, la densidad de bulto, el volumen aparente, la densidad aparente, la porosidad aparente, y la absorción del agua utilizando la ecuación provista.

Datos de muestras y resultados

Para los especímenes de óxido de aluminio, los cuales han sido sinterizados a 1667 °C por diez horas, las siguientes medidas fueron tomadas:

Peso seco, g 3.1127

Peso suspendido y saturado total ,g 2.7182

Peso de destare, g 0.3869

Peso saturado, g 3.5281

Las propiedades físicas que son calculadas a partir de las medidas que aparecen arriba incluyen:

Volumen en bulto, cm³ 1.197

Densidad en bulto, g/ cm³ 2.601

Volumen aparente, cm³ 0.7814
Densidad aparente, g/ cm³ 3.983
% porosidad aparente 34.71
% absorción del agua 13.35

A pesar de no ser parte del alcance de este experimento, puede ser mostrado más adelante que para una densidad teórica de óxido de aluminio igual a 3.98 g/ cm³, otras propiedades son:

% porosidad cerrada	0.00
% porosidad total	34.7
% densidad teórica aparente	100.0
% densidad teórica	65.3

Nota

Relaciones entre la Densidad y la Porosidad

El Método de Arquímedes permite que sean calculadas con solo tres medidas de peso varias propiedades físicas que relacionan la absorción, las densidades y la porosidad de un espécimen. Estas tres medidas son: peso seco, peso saturado y el peso suspendido y saturado neto.

La tabla mostrada en la siguiente página muestra seis de las propiedades comúnmente calculadas usando diferentes notaciones.

Propiedad	ASTM	Indicación
Volumen de Bulto	$V = M - S$	$V_b = \frac{W_s - W_{ss}}{d_l}$
Densidad de Bulto	$B = \frac{D}{V} = \frac{D}{M-S}$	$d_b = \frac{W_D}{V_b} = \frac{W_D \times d_l}{W_s - W_{ss}}$
Volumen Aparente (Material impermeable)	$= D - S$	$V_a = \frac{W_D - W_{ss}}{d_L}$
Densidad aparente	$T = \frac{D}{D - S}$	$d_a = \frac{W_D}{V_a} = \frac{W_D \times d_L}{W_D - W_{ss}}$
Porosidad aparente	$P = \frac{M-D}{V}$	$\% Pa = \frac{W_s - W_D}{W_s - W_{ss}} \times 100$
Absorción del agua	$A = \frac{M-D}{D}$	$\% A = \frac{W_{ws} - W_D}{W_D} \times 100$

Donde: $M = W_s$ peso saturado
 $S = W_{ss}$ peso saturado suspendido
 $D = W_D$ peso seco
 $d_L =$ densidad del líquido saturado
 $W_{ws} =$ peso saturado del líquido

Note que para las primeras cuatro relaciones ASTM las unidades no parecen ser consistentes. Esto se debe a que se asume que el líquido saturante es agua con una densidad igual a la unidad. Para otros líquidos saturantes (como por ejemplo cuando se usa el keroseno para materiales refractarios solubles en agua), las ecuaciones indicadas completas que contienen el factor de densidad del líquido deben ser utilizadas.

Para una discusión excelente sobre todas estas y otras propiedades relacionadas, vea la Referencia 7. La misma claramente explica las diferencias entre porosidades abiertas (o aparentes o ínter granulares) y porosidades cerradas (o intra granulares). También ayuda a aclarar las distinciones entre densidad de bulo, densidad aparente y densidad real.

Fuentes de error

Las causas primarias para los resultados errados incluyen una atención inadecuada a las siguientes precauciones:

1. Permita al menos el tiempo mínimo (15 minutos) para que el paso de absorción de “hervir al vacío” tenga lugar de manera que el espécimen absorba bien el agua (u otro líquido de inmersión) en todos los poros abiertos que sea posible.
2. Permita al agua y a los especímenes suficiente tiempo para aproximarse a la temperatura de equilibrio luego del paso de absorción. Usualmente esto toma al menos veinte minutos.
3. Asegúrese de destarar la balanza, luego de colocar el soporte sobre la bandeja, antes de determinar el peso saturado y suspendido total y el peso destarado del soporte.
4. No tome más tiempo del absolutamente necesario para medir el peso saturado, de lo contrario, cierta cantidad de agua de los poros abiertos pudiera migrar a la superficie y evaporarse.
5. Tome precauciones para que no caigan gotas de agua en la bandeja de la balanza. Además, asegúrese que no queden gotas de agua adheridas al anillo de alambre de soporte.
6. Si se ha atado una canasta al alambre de soporte, asegúrese de que solo un único alambre rompa la superficie del agua.
7. Verifique que no haya burbujas de aire adheridas a los especímenes o al soporte. Este es a menudo el caso cuando se utiliza una canasta de malla. Tocarla ligeramente será suficiente para liberar las burbujas a la superficie.

Variaciones

Las técnicas básicas pueden ser utilizadas para una variedad de experimentos, tales como:

1. Compare los resultados obtenidos para un pedazo pequeño de ladrillo refractario con aquellos conseguidos utilizando el método de prueba ASTM C 20 en medio ladrillo.

2. Determine el gradiente en las propiedades de densidad y porosidad entre el centro y los bordes de un artículo de cerámica quemado.

3. Analice los errores y las cifras significativas de los resultados. Por ejemplo, ¿cuál error es introducido si la densidad de inmersión se asume que es la unidad y el efecto de la temperatura del ambiente es obviado?

(Obviamente, los cálculos no requieren ser hechos de forma manual, y la data puede proveer la oportunidad de adquirir práctica para realizar programas dedicados de computadoras o programas de hojas de cálculo macro. En particular, la dependencia de la densidad del agua en la temperatura provee un excelente ejercicio para probar realizando una ecuación empírica para ser usada en estos programas)

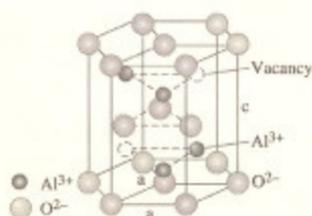
4. Para especímenes refractarios que se apagan, hidratan, o que son solubles en agua, compare los resultados obtenidos al usar otros líquidos (como el keroseno) con los resultados obtenidos utilizando el método de prueba ASTM C 914, el cual involucra recubrir el espécimen con parafina.

5. Compare los resultados con aquellos obtenidos utilizando métodos geométricos, picnométricos (para sólidos o líquidos, se pueden utilizar picnómetros de diversas formas cuyos volúmenes sean conocidos. La densidad se calculará a partir de la diferencia de peso entre el picnómetro lleno y el picnómetro vacío, por una parte, y de su volumen conocido, por la otra), hundirse-flotar u otro determinado.

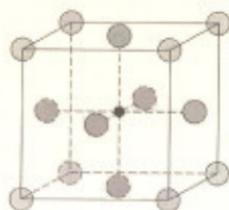
6. Si el material sólido es de fase única (o idealmente lo es), entonces determine la densidad teórica usando difracción de rayos X u otras fuentes, y calcule el por ciento de la densidad teórica y el porcentaje de la porosidad cerrada.

Breve mirada a los materiales cerámicos

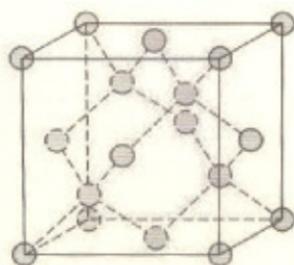
Alúmina (Al_2O_3) se utiliza para contener metales fundidos o a altas temperaturas, se requiere una elevada resistencia mecánica. También se utiliza como un sustrato, y contaminada con cromo se utiliza para fabricar láser. Se utilizan finas partículas de alúmina como soporte de catalizador.



El Nitruro de aluminio (AlN) sirve como un buen aislante eléctrico, es un buen reemplazo para el Al_2O_3 como material para sustrato de los circuitos integrados. Es más adecuado para usarse en circuitos electrónicos que operan a alta frecuencia.



El titanato de bario (BaTiO_3) es el material cerámico electrónico de más amplia utilización. Varios millones de capacitores se fabrican usando este material.

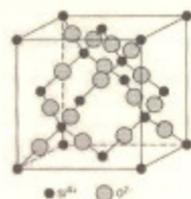


El carburo de boro (B_4C) es muy duro y al mismo tiempo bastante ligero. Además de su utilización como blindaje nuclear, se le utiliza en aplicaciones que requieren una excelente resistencia a la abrasión y como una porción de placa de blindaje a prueba de balas.



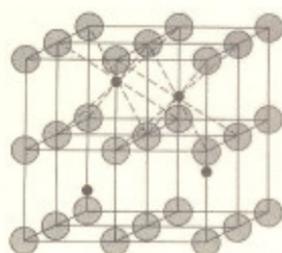
La cordierita ($2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$) es útil como material cerámico electrónico. También se utiliza para elaborar una estructura en panel.

El diamante (C) es el material más duro existente en la naturaleza. Los diamantes industriales utilizan como abrasivos para pulverizar y pulir. También es utilizado en joyería.



Titano de plomo zirconio (PZT) es el material piezoeléctrico de mayor uso. Aplicando presión o esfuerzo se genera un voltaje. Se utiliza en encendedores de gas, submarinos para la de detección de objetos bajo el agua e imagen por ultrasonido.

La sílice o sílica (SiO_2) es posiblemente el material cerámico de uso más amplio; es el ingrediente esencial de los vidrios y de muchos otros materiales vitrocerámicos. Los materiales basados en la sílice se usan en aislamientos térmicos, refractarios, abrasivos, como compuestos reforzados con fibras, cristalería para laboratorio, etc. En forma de fibras largas continuas, la sílice se utiliza para la fabricación de fibras ópticas y para comunicaciones.

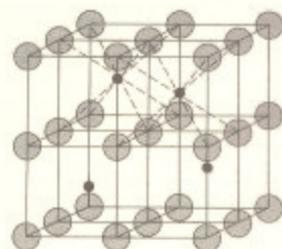


El carburo de silicio (SiC) tiene una resistencia a la oxidación a temperatura por arriba del punto de fusión del acero y por eso se usa con frecuencia como recubrimiento para los metales, los materiales compuestos carbono-carbono y otros materiales cerámicos; también se utiliza como abrasivo y como un particulado y refuerzo fibroso. Se le utiliza para la fabricación de elementos calefactores para hornos. Es buen candidato para dispositivos electrónicos a las altas temperaturas.

El nitruro de silicio (Si_3N_4) tiene propiedades parecidas a las del SiC , y los dos son posibles candidatos para componentes para motores de automóvil y para turbinas de gas.

Sialon la forma general del material es $\text{Si}_{6-z}\text{Al}_z\text{O}_z\text{N}_{8-z}$; cuando $z = 3$, la fórmula es $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$. Puede encontrar aplicación en herramientas de corte, componentes para motor y otras que incluyan simultáneamente altas temperaturas y severas condiciones de desgaste.

El bióxido de titanio (TiO_2) se utiliza para la fabricación de materiales cerámicos electrónicos como el BaTiO_3 ; su uso más extenso es en forma de pigmento blanco para la fabricación de pintu-



ras. Se utiliza en ciertos materiales vitrocerámicos. Se utilizan pequeñas partículas para fabricar lociones bronceadoras.

El boruro de titanio (TiB_2) es un buen conductor tanto de la electricidad como del calor; además, proporciona una excelente tenacidad. El TiB_2 , junto con el carburo de boro, carburo de silicio y la alúmina, tienen aplicaciones en la producción de blindajes.

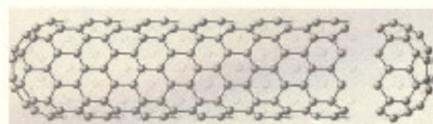
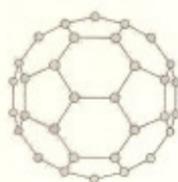
El bióxido de uranio (UO_2) es ampliamente utilizado como combustible de reactor nuclear.

La zirconia (ZrO_2) se utiliza para fabricar muchos otros materiales cerámicos como el zirconio. Se usa para la fabricación de sensores de gas oxígeno y para medir oxígeno disuelto en los aceros líquidos. Se utiliza como aditivo en muchos materiales cerámicos electrónicos, así como material refractario. La forma cúbica de los cristales individuales de zirconia se utiliza para hacer artículos de joyería.

Los cristales de almandinato de aluminio itrio (YAG, $Y_3Al_5O_{12}$) se utilizan como huéspedes para manufactura de láser Nd-YAG.

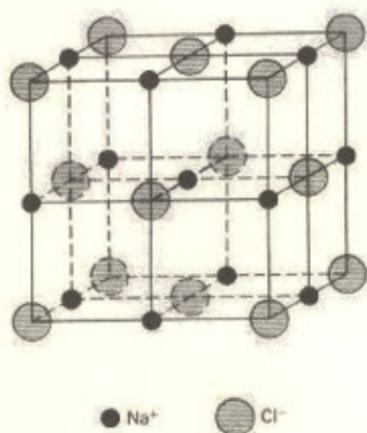
El óxido de zinc (ZnO) se utiliza como acelerador en la vulcanización del hule que se utiliza en los neumáticos. Se utiliza en las pinturas, en dispositivos de protección contra oscilaciones, en polvos medicinales cutáneos, así como en ungüentos para la piel.

Nanotubos de Carbono (C_{60}) consiste de 60 átomos de carbono equivalente, indistinguible, cada uno enlazado a otros tres carbonos formando parte de dos hexágonos y un pentágono que da lugar a una estructura cerrada. Debido a su gran superficie mejora sus propiedades y abre caminos a una amplia diversidad de nuevas aplicaciones.

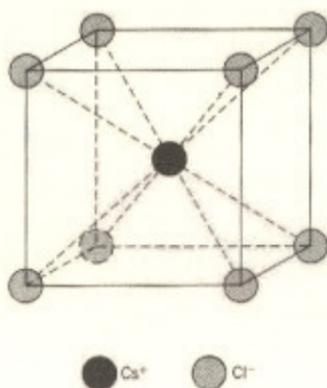


Nanotubos de Carbono (C_{60})

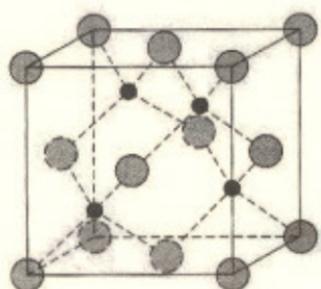
Cloruro de Sodio (NaCl)



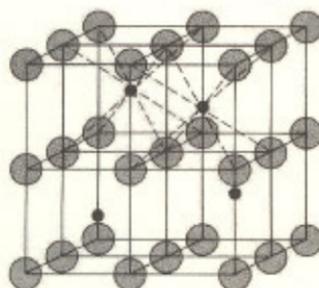
Cloruro de Cesio (CsCl)



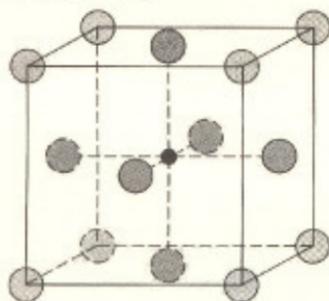
Blenda de Zinc (ZnS)



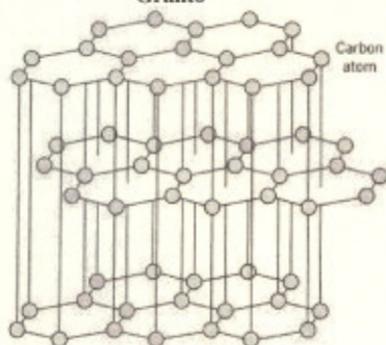
Fluorita (CaF₂)



Perovskita (CaTiO₃)



Grafito



**SUMARIO DE ALGUNAS ESTRUCTURAS
DE CERÁMICOS CRISTALINOS COMUNES**

Número Coordinación

Nombre Estructura	Tipo Estructura	Estructura del Anión	Catión	Anión	Ejemplos
Cloruro de Sodio	AX	FCC	6	6	NaCl, MgO, FeO
Cloruro de Cesio	AX	Cúbica Simple	8	8	CsCl, CsBr, CsI
Blenda de Zinc	AX	FCC	4	4	ZnS, SiC
Fluorita	AX ₂	Cúbica Simple	8	4	CaF ₂ , UO ₂ , ThO ₂ , SiO ₂ , GeO ₂
Perovskita	ABX ₂	FCC	12(A) 6(B)	6	BaTiO ₃ , SrZrO ₃ , SrSnO ₂
Spinel	AB ₂ X ₄	FCC	4(A) 6(B)	4	MgAl ₂ O ₄ , FeAl ₂ O ₄

Clasificación Funcional De Los Cerámicos

Function	Application	Examples of Ceramics
Electrical	Capacitor dielectrics	BaTiO_3 , SrTiO_3 , TiO_2
	Insulative dielectrics	$\text{BaMg}_2\text{Ti}_2\text{O}_{12}$, BaZr_2O_7 , $\text{Ti}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$
	Conductive oxides	SnTiO_3 , $\text{Sn}_2\text{F}_7\text{O}_{10}$, CuIn_2S_4 , TiO_2 , Fe_3O_4
	Superconductors	Insulated SrO_2 (HVO)
	Electronic packaging	$\text{Ti}_2\text{Mg}_2\text{O}_{10}$ (HVO) Al_2O_3 Porcelain
Magetic	Solid oxide fuel cells	ZrO_2 , La_2O_3
	Piezoelectric	$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$, $\text{Pb}(\text{Mg}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{O}_3$
	Electro-optical	Al_2O_3 , LiNbO_3
	Refracting media	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, CO_2 (Fiberson) (sapphire)
Optical	Fiber optics	Fe_2O_3
	Lighting	Nickel zinc ferrite
	Lasers	Manganese zinc ferrite
	Optical coatings	Sputter SiO_2 SiO_2 based Al_2O_3 , yttrium aluminum garnet (YAG) Al_2O_3 glasses
Automotive	Engine sections, fuel cells	ZrO_2
	Catalyst support	Cordierite
	Spark plugs	Al_2O_3
	Tires	SiO_2
	Windshield laminates	SiO_2 based glasses
Mechanical/Structural	Cutting tools	WC-Co cements SiC/AlN Al_2O_3
	Composites	SiC, Al_2O_3 , silica glass fibers
Biomedical	Abrazives	SiC, Al_2O_3 , diamond, BN, SiC,
	Implants	Hydroxyapatite
	Dentistry	Porcelain, Al_2O_3
Aerospace	Ultra-thin imaging	PIZ
	Buildings	Concrete Glass Sedimentary
Others	Defense applications	RT, SiC
	Some vehicles	SiC
	Truck*	LiO_2
Chemical	Waste processing	Systems for waste disposal Alumina and silica based refractories, erosion sensors, coating media, etc.
	Catalysis	Various oxides (Al_2O_3 , ZrO_2 , $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$)
Domestic	Art, light filtration	
	Sensors	Clay, alumina, and silica based ceramics, glass ceramics, diamond, ruby, cubic silicon and other crystals
	Paints, inks*	
	Tiles, sanitaryware, kitchenware, vitreous enamels, pottery, art, jewelry	

*Aerospace are indicated in italics

Fabricación del vidrio

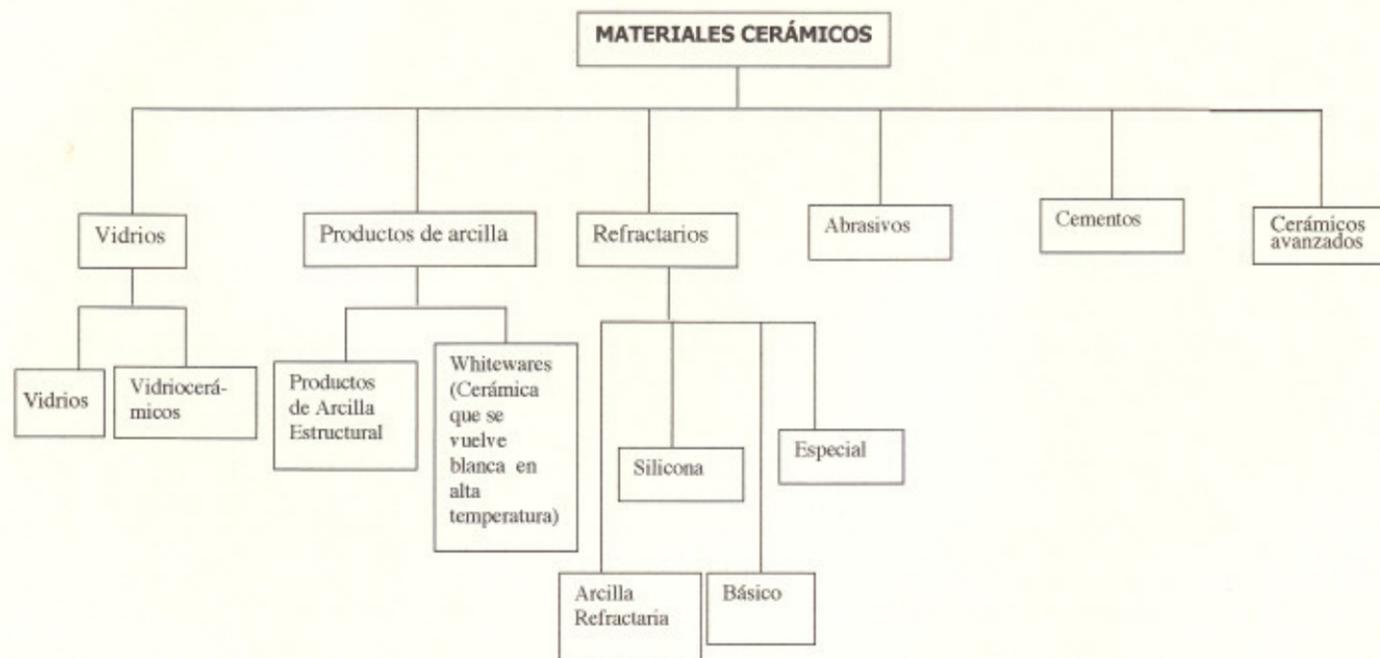
El silicato de sodio (Na_2SiO_3), también llamado vidrio, es un silicato sintético importante, sólido amorfo, incoloro y soluble en agua, que funde a 1.088°C . Se obtiene haciendo reaccionar sílice (arena) y carbonato de sodio a alta temperatura, o calentando arena con hidróxido de sodio concentrado a alta presión.

Composición De Vidrios Comunes (En Porcentaje En Peso)

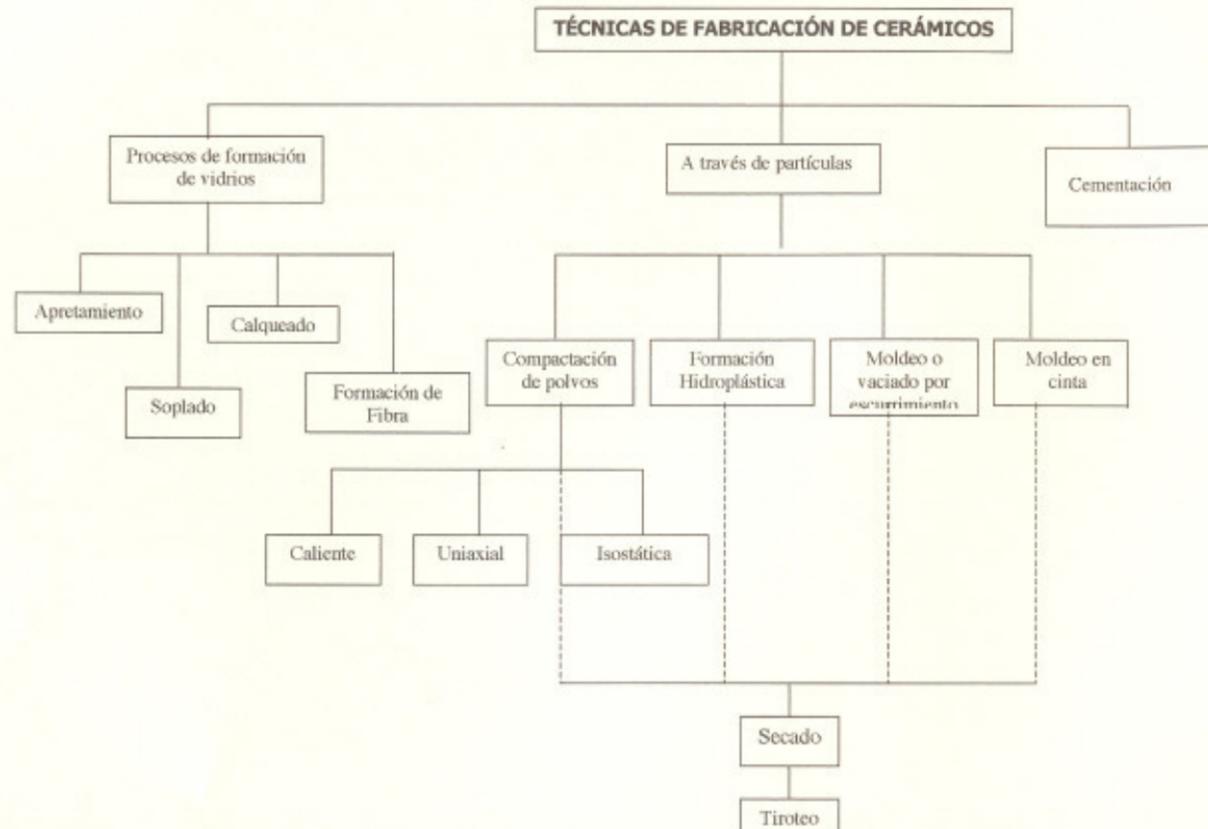
Vidrio	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	B_2O_3	MgO	PbO	Otros
Sílice fundido	99							
Vycor™	96				4			
Pyrex™	81	2		4	12			
Jarras de vidrio	74	1	5	15		4		
Vidrio para ventana	72	1	10	14		2		
Placa de vidrio/ Vidrio flotado	73	1	13	13				
Bombillas de luz	74	1	5	16		4		
Fibras	54	14	16		10	4		
Termómetro	73	6		10	10			
Vidrio de plomo	67			6			17	10% K_2O
Cristal óptico	50			1			19	13% BaO , 8% K_2O , ZnO
Vidrio óptico	70			8		10		2% BaO , 8% K_2O
Fibras de vidrio-E	55	15	20		10			
Fibras de vidrio-S	65	25				10		

- Vidrio comercial contiene 75% SiO_2 , 15% NaO , 10% CaO
- Vidrios de borosilicato contiene 15% B_2O_3 .
- Vidrios de aluminosilicato contiene 20% Al_2O_3 , 12% MgO .
- Vidrios de alto sílice contiene 3% B_2O_3 .

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES CERÁMICOS EN BASE A SU APLICACIÓN



CLASIFICACIÓN DE LOS CERÁMICOS DE ACUERDO A LAS TÉCNICAS DE FORMACIÓN Y FABRICACIÓN



En un material cerámico, los poros pueden ser interconectados o cerrados. La porosidad aparente mide los poros interconectados y determina la permeabilidad, es decir, la facilidad con que los gases y los fluidos pasan a través del componente cerámico. La porosidad aparente se determina pesando el material cerámico seco (W_d) y volviendo a pesarlo tanto después de haber estado suspendido en agua (w_s), como después de haber sido retirado de la misma (w_w). Utilizando unidades de gramos y cm^3 :

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100$$

La porosidad real incluye tanto los poros interconectados como los no interconectados o cerrados. La porosidad real, que se correlaciona más de cerca con las propiedades del material cerámico, es:

$$\text{Porosidad real} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100$$

$$B = \frac{W_d}{W_w - W_s}$$

B es la densidad en volumen y ρ es la densidad o gravedad específica del material cerámico. La densidad en volumen es el peso del material dividido entre su volumen.

Módulo de elasticidad

$$E = E_0(1 - 1.9P + 0.9P^2)$$

Donde E_0 es el modulo de elasticidad para materiales no porosos y P es la porosidad.

Esfuerzo de flexión

$$\sigma_{fs} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

F es la carga de fractura o de rotura

L distancia entre los dos puntos de apoyo

W es el ancho del espécimen

h es la altura del espécimen entre los dos puntos de apoyo

El esfuerzo de flexión expresado en término de la fracción de volumen de porosidad es:

$$\sigma_{fs} = \sigma_0 \exp(-nP)$$

En esta expresión σ_0 y n son constantes experimentales.

P es la fracción de volumen de porosidad

Referencias

1. Anderson J.C., 2000, *Ciencia de los Materiales*, LIMUSA, Mexico.
2. Askeland Donald R., Phule Pradeep P., 2004, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Thomson, EE.UU.
3. Balevsky, Angel, 1988, *Metaloznanie*, DURJAVNO IZDATELSTVO TECNICA, Bulgaria.
4. Buchkov D., 1980, *Termichna Obrabotka na Metalite*, Tekhnika, Bulgaria.
5. Callister jr. William D., 2003, *Materials Science and Engineering an Introduction*, John Wiley & Sons, Inc., EE.UU.
6. Jacobs James A., 2001, *Experiments in Materials Science Engineering & Technology*, Prentice Hall, EE.UU.
7. Kalpakjian Serope, 2001, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Prentice Hall, EE.UU.
8. Kamburov K, 1999, *Materialoznanie*, Izdadelstvo Varna, Bulgaria.
9. Mangonon Pat L., 2001, *Ciencia de Materiales: Selección y Diseño*, Prentice Hall, México.
10. Rusena Elena, 2004, *Rukovodstvo za Laboratorni Upraznenia*, Color Print, Bulgaria.
11. Schakelford James F., 2005, *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*, Pearson Prentice Hall, España.
12. Van Vlack Lawrence H., 1999, *Materiales para Ingeniería*, CECSA, México.

Recibido: 13/09/05

Aprobado: 12/04/06