

## Nanotubos de carbono en materiales cerámicos: ¿curiosidad académica o materiales útiles?

Aldo R. Boccaccini, Department of Materials, Imperial College London, Prince Consort Rd., London SW7 2BP, UK

Maria Cannio, Department of Materials and Environmental Engineering, University of Modena and Reggio Emilia, 41100 Modena, Italia

### Resumen

Por sus excelentes propiedades mecánicas los nanotubos de carbono (CNT) pueden ser considerados elementos de refuerzo ideales para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos. Además la inclusión de CNT puede aportar una segunda función en el material compuesto, por ejemplo impartir conductividad eléctrica y térmica o mejorar la resistencia al desgaste por rozamiento, a la abrasión y al impacto. En el presente trabajo se presenta un resumen del estado del arte en el área de materiales cerámicos compuestos reforzados por CNT con una discusión de las técnicas de fabricación propuestas y las propiedades alcanzadas. El estudio de la literatura ha revelado que en muy pocos casos se ha demostrado una mejora considerable de las propiedades mecánicas, especialmente la tenacidad a la fractura. Se discuten críticamente por lo tanto las áreas en las cuales mayor trabajo de investigación es requerido para alcanzar resultados más promisorios y así optimizar el uso de CNT en la tecnología de materiales cerámicos compuestos.

### Abstract

Carbon nanotubes (CNTs) are currently considered as one of the most promising reinforcing elements for structural composites due to their remarkable physical and mechanical properties. The novel electrical, thermal and optical properties of this new form of carbon can lead to composites with multifunctional applications and improved thermal properties as well as higher wear, abrasion and impact resistance. This paper reviews current trends in research and development on the use of CNTs in ceramic matrix composites with a discussion on the processing techniques developed to optimise CNT dispersion quality, interfaces and density and on the properties achieved. The literature analysis has revealed that only in a few cases a considerable improvement of the mechanical properties, in particular fracture toughness, has been demonstrated with addition of CNTs. We discuss critically the areas where more intensive research efforts are required in order to achieve more promising results and to optimise in this manner the application of CNTs in ceramic composites technology. The potential applications of the resulting CNT/ceramic composites and the scope for future development are highlighted.

### Introducción

Las excepcionales propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y ópticas de los nanotubos de carbono (CNT) los convierten en un grupo de materiales muy atractivo para la fabricación de nuevos materiales avanzados.

Estudios experimentales y teóricos han mostrado que los CNT tienen alto módulo de elasticidad de Young (~ 1500 GPa), muy alta resistencia mecánica a la tracción (100 GPa), además de elevada conductividades eléctrica y térmica [1-3].

Los CNT pueden reemplazar otras fibras, por ejemplo las fibras de carbono o carburo de silicio, como refuerzo en matrices poliméricas y cerámicas [4, 5], de modo que una nueva generación de materiales nano-compuestos exhibiendo una combinación de mejores propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas es posible.

Contrariamente al caso de los materiales compuestos con matriz metálica o polimérica, la obtención de valores elevados de la resistencia mecánica y del módulo de elasticidad no es el único objetivo en materiales compuestos de matriz frágil (cerámica o vítrea). En estos materiales compuestos la fase de refuerzo tiene el principal objetivo de incrementar la tenacidad a la fractura y de reducir la alta sensibilidad de la matriz frágil a la presencia de microgrietas en la microestructura. Es bien sabido que la fragilidad de los materiales cerámicos y vidrios impide el uso extendido de estos materiales en numerosas aplicaciones estructurales y a altas temperaturas o en condiciones de choque térmico. Además, con la continua disminución del costo de CNT, como resultado de la creciente posibilidad de fabricarlos en forma económica por diversas tecnologías en forma reproducible y eficiente, los esfuerzos para incorporar CNT en matrices de todo tipo tienden a incrementarse.

Por lo tanto existe considerable interés en el estudio de CNT como elementos de refuerzo en matrices cerámicas (y en vidrios) con el objetivo de incrementar la tenacidad a la fractura del material compuesto resultante.

La figura 1 muestra el incremento en la cantidad de publicaciones en los últimos 5 años encontradas en el banco de datos Web of Science® con las palabras clave: "carbon nanotube" y "ceramic composite". A pesar del creciente interés en estos materiales, como se discutirá en esta nota, los mecanismos por los cuales los CNT pueden contribuir al incremento de la tenacidad a la fractura no han sido todavía elucidados con certeza, y existe controversia en la literatura sobre el efecto "real" de los CNT en matrices frágiles [6]. Debe considerarse además que la incorporación de CNT en matrices inorgánicas (materiales cerámicos, vidrios, vitro-cerámicos), no ha sido estudiada tan exhaustivamente como en el caso de matrices poliméricas.

Número de Publicaciones

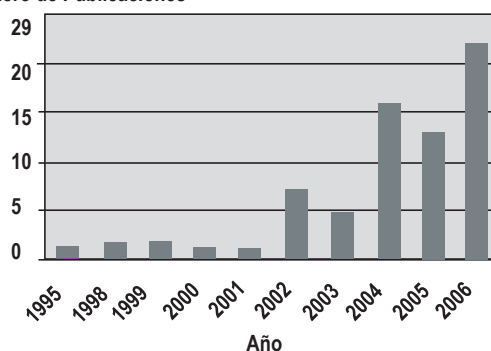


figura 1

Incremento en el número de publicaciones por año desde 1995. Datos obtenidos utilizando el banco de datos Web of Science® usando como palabras clave: "carbon nanotube" y "ceramic composite"

Hasta ahora, los esfuerzos para fabricar estos nuevos materiales compuestos han encontrado tres dificultades principales, a saber: i) lograr la dispersión uniforme de los CNT (que tienen tendencia a aglomerarse debido a las fuerzas de Van der Waals entre ellos); ii) lograr la apropiada interface entre los CNT y la matriz cerámica; iii) obtener la densificación completa de la matriz cerámica sin dañar los CNT.

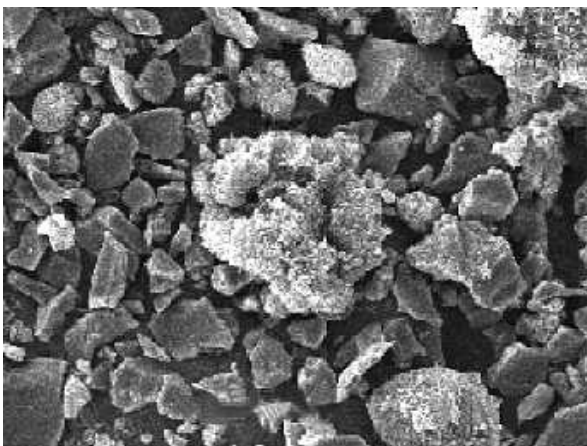
En este trabajo se presenta un conciso "estado del arte" del campo de los materiales cerámicos compuestos reforzados por CNT, considerando tanto nanotubos multi-pared como de pared simple. No se incluyen aquellos trabajos en los que la inclusión de los CNT ha sido considerada solamente por sus propiedades funcionales y no como refuerzo mecánico, por ejemplo materiales compuestos de óxido de silicio y CNT para aplicaciones ópticas [7] o combinaciones de TiO<sub>2</sub> y CNT para aplicaciones en fotocatalisis [8].

**Técnicas de Fabricación**

La fabricación de materiales cerámicos compuestos reforzados por CNT incluye la preparación de las mezclas de CNT y el material de la matriz seguido por la densificación a altas temperaturas (sinterizado de la matriz). La dispersión homogénea de los CNT en la matriz es uno de los requisitos más importantes para obtener materiales compuestos con buenas propiedades mecánicas. Esto se debe a que si la dispersión es homogénea y se evita la aglomeración de CNT existirá una mayor área superficial de contacto entre los CNT y la matriz, de modo que los CNT podrán soportar parte de las cargas externas y absorber energía de fractura. Debe también considerarse que CNT homogéneamente dispersos pueden inhibir el crecimiento de granos durante el sinterizado de la matriz cerámica, lo que también repercutirá positivamente en las propiedades mecánicas del compuesto.

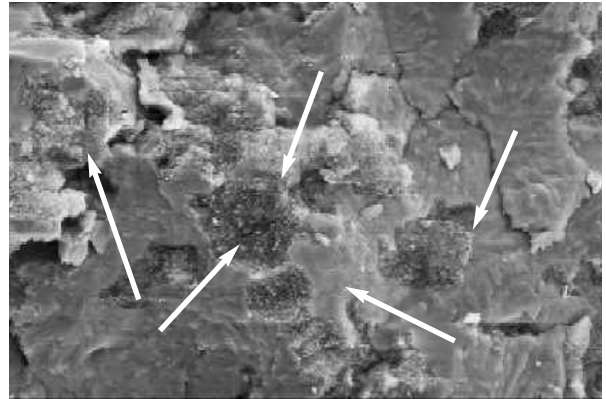
**a) Dispersión de CNT en matrices cerámicas**

Numerosos métodos se están investigando para lograr la dispersión uniforme de CNT en las matrices cerámicas, incluyendo técnicas tradicionales de mezclado de polvos, por ejemplo utilizando molinos de bolas, dispersión por ultrasonido, o bien métodos químicos avanzados que se basan en la modificación superficial o recubrimiento de los CNT, por ejemplo utilizando surfactantes o tensioactivos. En general la técnica de mezclado de polvos en seco no permite la dispersión adecuada de los CNT en la matriz cerámica [9]. La figura 2a muestra por ejemplo la pobre dispersión lograda por el simple mezclado de partículas de vidrio y CNT para fabricar materiales compuestos CNT/vidrio borosilicato. La baja calidad de la disper-



20kV x500 50µm 0001 07 10 SEI

figura 2a



Mag: 2.00KX 10µm EHT:20.00 KV Señal A: SE2 Día:2- 5-2003 WD: 11mm Foto N.:204 Hora: 11:35:58

figura 2b

Imágenes de microscopio electrónico de barrido mostrando la mezcla de partículas de vidrio borosilicato y nanotubos de carbono obtenida por simple tecnología de polvos: (a) estructura antes del sinterizado, (b) estructura después del prensado en caliente. [9] Se observa un alto grado de aglomeración de los CNT

sión lleva a que en la microestructura del material sinterizado ocurren zonas libres de CNT, como se observa en la Figura 2b, que conducen a un material de bajas propiedades mecánicas. Utilizando técnicas de mezclado en fase líquida, sin embargo, se han logrado progresos importantes en obtener dispersiones de los CNT con alto grado de homogeneidad. La dispersión se realiza por lo general en etanol u otro solvente orgánico, aunque también los CNT se pueden dispersar en agua. Una alternativa propuesta para el caso de materiales de matriz vítrea fabricados a partir de partículas de polvo de tamaño micrométrico, es lograr el recubrimiento uniforme de las partículas de vidrio con CNT, como muestra la Figura 3. Durante la densificación por flujo viscoso, se espera que estas partículas sinteticen formando un material vítreo compuesto con distribución uniforme de CNT.

Como métodos alternativos a la tecnología de polvos, se estudian con mayor frecuencia los procesos sol-gel [10, 11] y dispersiones coloidales de nanopartículas [12-14]. En este último caso la adición de una pequeña cantidad de polietilenoimina (PEI) promueve una excelente dispersión después del tratamiento con ultrasonido y también mueve el punto isoeléctrico hacia valores de pH más elevados [12]. Esto es debido a que dispersantes catiónicos, incluido PEI, tienden a incrementar el valor de pH mientras que dispersantes aniónicos (por ejemplo ácido poliacrílico, PAA) tienden a disminuir el pH. El propósito de aplicar un recubrimiento superficial a los CNT es para suprimir las fuerzas de van der Waals que tienden a aglomerarlos. Por ejemplo, la aplicación de un recubrimiento de SiO<sub>2</sub> por un proceso sol-gel, fue importante para mejorar la dispersión de los CNT en matrices vítreas (vidrio borosilicato) [15]. Para mate-

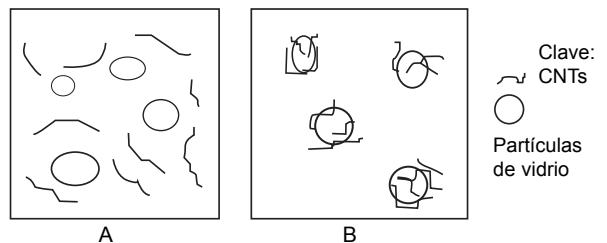
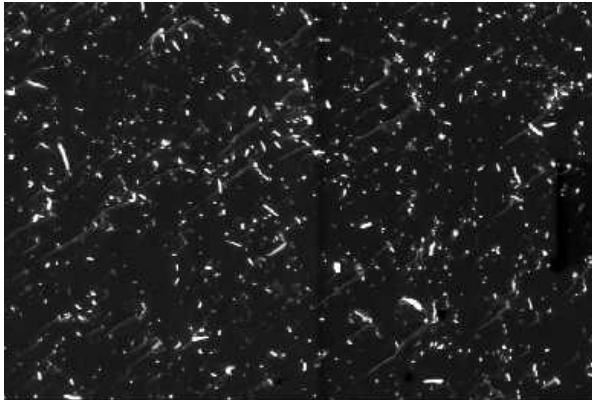


figura 3

Esquema de la dispersión de partículas de vidrio y CNT utilizada para la deposición electroforética; se ha diseñado la suspensión de modo tal que los CNT recubren en forma uniforme las partículas de vidrio.



Mag:14.10KX  $2\mu\text{m}$  EHT:5.00 kV Señal A: InLens Día:- 30-8-2006  
WD: 6mm Foto N.: 6509 Hora: 19:44:25

figura 4

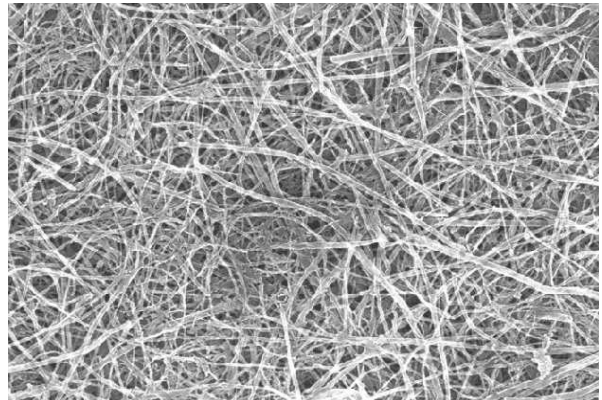
Imagen de un material compuesto de matriz de  $\text{SiO}_2$  conteniendo CNT homogéneamente dispersados en la matriz, obtenido por el método coloidal. [16]

riales compuestos de matriz de  $\text{SiO}_2$ , dispersantes tales como bromuro de hexadeciltrimetil amonio (C16TMAB), ácido poliacrílico (PAA) y dodecil sulfato sódico (SDS) han sido estudiados con resultados satisfactorios [12, 13]. La figura 4 es una micrografía de microscopio electrónico de barrido (MEB) que muestra la adecuada dispersión de CNT en una matriz de óxido de silicio, fabricada por mezcla coloidal de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  y CNT con el agregado de polietilenimina (PEI) [16]. Materiales de matriz de alúmina reforzados con 0.1% (en peso) de CNT han sido fabricados también por el método de suspensiones coloidales utilizando etanol como solvente [17, 18].

Un método alternativo que está siendo investigado en forma creciente se basa en la deposición electroforética (EPD) de películas porosas y ordenadas de CNT, que luego pueden ser infiltradas con nanopartículas cerámicas para formar el material compuesto [19]. Alternativamente se pueden obtener dispersiones homogéneas de CNT y nanopartículas cerámicas, las que al aplicar un campo eléctrico en la celda de EPD migran hacia el mismo electrodo depositándose para formar el material compuesto. La figura 5a muestra una película de CNT depositada por EPD [20] que puede ser infiltrada por nanopartículas para formar el material compuesto, y la Figura 5b muestra CNT recubiertos con partículas de  $\text{TiO}_2$  que pueden depositarse simultáneamente por EPD para formar el material compuesto CNT/ $\text{TiO}_2$ . Con esta técnica se pueden fabricar también recubrimientos compuestos de CNT con matriz de hidroxiapatita para aplicaciones biomédicas ya que estos recubrimientos mejoran la adhesión de tejido óseo [21]. La técnica de EPD resulta de ese modo un método muy versátil para manipular CNT en suspensión y así lograr la deposición de CNT en estructuras ordenadas y homogéneas.

#### b) Densificación

En varios trabajos se ha encontrado que los CNT resultan dañados cuando se emplean las altas temperaturas necesarias para densificar matrices cerámicas cristalinas, (1500 - 1600° C), por ejemplo cuando se utiliza el prensado en caliente (HP) o el prensado en caliente isostático (HIP) [22, 23]. Los defectos introducidos en la estructura de los CNT por las altas temperaturas pueden conducir a la inutilización de los CNT como elemento de refuerzo. Por lo tanto para obtener el máximo beneficio del uso de CNT, se debe evitar el daño de los mismos como así también se debe optimizar la interacción entre los CNT y la matriz cerámica, es decir se deben controlar las propiedades de la interfase. Para matrices vítreas o vitrocerámicas, la técnica de prensado en caliente es suficiente para



Mag: 44.87KX  $1\mu\text{m}$  EHT:20.00 KV Señal A: InLens Día:5-1-2006  
WD: 15mm Foto N°: 8388 Hora: 16:01:03

figura 5a

Imagen de un depósito de CNT obtenido a partir de la técnica de deposición electroforética [20], (b) imagen de microscopio electrónico de transmisión que muestra un CNT recubierto por nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ .

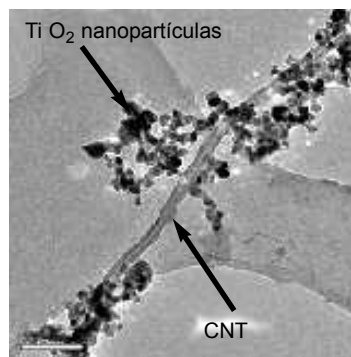


figura 5b

densificar los materiales compuestos aprovechando el flujo viscoso del vidrio [9]. Recientemente, se ha incrementado el interés en utilizar la técnica de sinterizado por plasma (*spark plasma sintering*) para densificar materiales cerámicos cristalinos conteniendo CNT. Este método ha conducido a materiales compuestos con buenas propiedades mecánicas ya que no se dañan los CNT [22-24]. La principal ventaja de la técnica de SPS es que

permite que las matrices cerámicas sean sinterizadas a relativamente bajas temperaturas (en comparación con métodos tradicionales) y utilizando tiempos más cortos. Esta reducción del tiempo de proceso hace que la técnica de SPS sea también más económica lográndose un aumento de la productividad. Por otro lado, la técnica de prensado en caliente isostático se ha utilizado para densificar materiales compuestos  $\text{Si}_3\text{N}_4$ /CNT [25]. Otro método de fabricación propuesto consiste en utilizar partículas metálicas nanométricas (por ejemplo hierro, cobalto, níquel o niobio) para la nucleación y el crecimiento de los CNT in-situ [26-28]. El contenido de CNT en estos materiales compuestos es relativamente elevado (hasta 12.5 % en peso). Otra importante ventaja del método de crecimiento de CNT in-situ es la posibilidad de obtener dispersiones de CNT muy uniformes. Una desventaja importante, sin embargo, es que estos materiales pueden contener también otras formas de carbón como impurezas, como por ejemplo láminas o partículas de grafito, que son perjudiciales para las propiedades mecánicas.

#### Propiedades Mecánicas

En esta sección se discuten las propiedades y características microestructurales de algunos sistemas compuestos típicos de matriz cerámica conteniendo nanotubos de carbono. Siegel et al [24] fabricaron materiales de óxido de aluminio conteniendo CNT y confirmaron la estabilidad de los nanotubos durante prensado en caliente. No se encontraron nuevas fases producidas por interacción entre alúmina y CNT. Las densidades relativas de los com-

puestos fueron superiores a 97%. Los resultados de dureza Vickers mostraron sin embargo una disminución de esta propiedad con el aumento de la concentración de CNT: 18 GPa para cerámicos con 0% de CNT y 13 GPa para las muestras cerámicas con 20 vol % de CNT. Los valores de tenacidad a la fractura para los materiales conteniendo 10 vol % de CNT mostraron un aumento del 24% con respecto a los compuestos de alúmina sin reforzar. El estudio anterior se refiere a CNT de multi-pared. Zhan et al [22] describieron por primera vez la preparación de compuestos de alúmina conteniendo CNT de pared simple (15 vol %) utilizando la técnica de SPS. Encontraron que solamente los compuestos fabricados a temperaturas entre 1150 y 1200°C por 3 minutos alcanzaron densidades relativas superiores a 98%. Los valores de micro-dureza Vickers de estos compuestos no son superiores con respecto a los valores obtenidos con probetas de alúmina pura. Sin embargo, la tenacidad a la fractura de estos materiales compuestos (determinada mediante el método de la longitud de la grieta de indentación) mejoró considerablemente. Los valores obtenidos en los materiales con 5 y 10 vol % de CNT fueron 2 a 3 veces mayores que los correspondientes a alúmina pura [22] sugiriendo que estas mejoras se deben a las extraordinarias propiedades y a la casi perfecta estructura de los CNT de pared simple y al hecho de que el uso de SPS permitió temperaturas más bajas de sinterizado y tratamientos breves dando como resultado CNT no dañados en el material compuesto. Además la resistencia al desgaste por rozamiento mejoró considerablemente en estos materiales en primer lugar debido a la propiedad de lubricación que ofrecen los CNT [24]. El sistema alúmina/CNT con nanotubos de pared simple ha sido estudiado también por Wang et al [6], quienes midieron la tenacidad a la fractura mediante el método de muesca única en V (single edge V-notched beam). Los resultados sin embargo no evidenciaron una mejora de la tenacidad a la fractura de los materiales compuestos con respecto a las muestras de alúmina pura o a compuestos de alúmina con 10 vol % de partículas de grafito. Las pruebas de indentación Vickers realizadas en los materiales compuestos demostraron una escasa formación de grietas indicando que este método no es conveniente para medir la tenacidad a la fractura en este tipo de compuestos. Basándose en estos resultados, Wang et al [6] criticaron los valores medidos por Zhan et al. [22], argumentando que los compuestos de CNT-alúmina no son duros ni altamente tenaces pero si resistentes al daño por cargas de contacto o indentación. Esta resistencia de contacto está relacionada con la presencia de CNT o grafito en el compuesto, que le confieren capacidad local de deformación. Otro material cerámico compuesto de matriz alúmina conteniendo CNT fue preparado por Sun et al. [17] mediante procesamiento coloidal y SPS. Este material mostró sólo mejoras marginales en los valores de dureza (~4%) comparado con compuestos de alúmina pura. La tenacidad de fractura del compuesto, también medida mediante el método de indentaciones Vickers, mostró un aumento del 31%. Otros materiales compuestos fabricados con matrices de 3Y-TZP no mostraron ninguna mejora en la dureza ni en la tenacidad de fractura con la inclusión de CNT, aún habiendo alcanzado densidades mayores del 99% [29]. La tenacidad a la fractura no mostró ningún cambio significativo para compuestos con concentraciones de CNT de hasta 0.5% y disminuyó un 15% para el compuesto con 1% de CNT. Esta disminución de las propiedades mecánicas puede atribuirse a falta de refuerzo en la microestructura como consecuencia de la unión débil entre los CNT y la matriz cerámica.

Con respecto a materiales compuestos con matrices que no son óxidos metálicos, pueden mencionarse trabajos con SiC y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

En 1998, Ma et al. [30] desarrollaron materiales de SiC reforzados por CNT logrando densidades relativas entre 95 y 98% correspondientes a temperaturas de consolidación de 2000°C y 2200°C, respectivamente. Estos materiales fueron caracterizados mediante ensayos de resistencia mecánica y tenacidad de fractura a temperatura ambiente que demostraron un aumento de ~10% en los valores de resistencia mecánica y tenacidad de fractura con respecto a muestras de SiC monolítico. Se observó la deflexión de grietas en la interfase y la separación de CNT de la matriz, revelando la posi-

ble existencia de mecanismos que mejoran la tenacidad de fractura similares a los obtenidos en materiales compuestos convencionales reforzados por fibras. El compuesto de CNT-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> preparado por Balazsi et al [25] mediante HIP agregando Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostró una mejora de 15-37% en los valores de resistencia mecánica y módulo elástico comparado con materiales equivalentes pero conteniendo partículas o fibras de grafito en lugar de CNT. Sin embargo, el material sin adiciones mostró las mejores propiedades mecánicas, atribuidas a su alta densificación.

Otros materiales compuestos con matriz de SiCN han sido fabricados a partir de precursores polímeros (PDC) [31]. Estos materiales presentan densidades del ~99% y no se encontraron indicios de reacciones en la interfase. El módulo de Young y la micro-dureza del compuesto se incrementaron con el aumento de la concentración de CNT, mostrando estas propiedades aumentos del 150% para el compuesto con 6.4 vol % de CNT.

Los ejemplos presentados y el análisis de la literatura permiten confirmar que los resultados más positivos sobre la mejora de las propiedades mecánicas han sido los reportados por Zhan et al. [22] sobre CNT/alúmina (CNT de pared simple en concentración de 10 vol %). Sin embargo muchos otros estudios no han demostrado una mejora substancial de las propiedades mecánicas, en particular la tenacidad a la fractura, o incluso la inclusión de CNT ha contribuido negativamente a las propiedades mecánicas del compuesto. Las razones principales para explicar estos resultados negativos pueden estar relacionadas con una peor densificación de los materiales compuestos en relación a los materiales puros, la posible aglomeración de CNT que conduce a defectos en la microestructura y la falta de una interfase con la resistencia adecuada para inducir mecanismos que absorban energía durante la fractura, por ejemplo deflexión de grieta, separación de CNT en la interfase, etc.

## Aplicaciones

A pesar de que las propiedades mecánicas no han sido todavía optimizadas en la mayoría de los sistemas cerámicos conteniendo CNT, existen numerosas aplicaciones propuestas para estos materiales que incluyen componentes para tecnología aeroespacial, implantes quirúrgicos y recubrimientos biomédicos, además de piezas y componentes de maquinarias, dispositivos electrónicos y sistemas de defensa (por ejemplo escudos resistentes al impacto balístico), dada las mejoras potenciales en las propiedades mecánicas, resistencia al impacto, a la abrasión y al desgaste por rozamiento. En el caso de matrices cerámicas de alta dureza, estos materiales pueden utilizarse además como herramientas de corte. La combinación de altas propiedades mecánicas a altas temperaturas y la buena resistencia al rozamiento hace que estos materiales sean candidatos también para aplicaciones en componentes que deben trabajar a muy altas temperaturas, por ejemplo en turbinas de gas y aviones. Además estos materiales, que por la presencia de los CNT presentan una alta conductividad térmica, pueden también utilizarse en circuitos integrados para aplicaciones de disipación térmica. Otras aplicaciones propuestas son en áreas donde es necesaria alta resistencia a la corrosión química combinada con resistencia a alta temperaturas y donde otras propiedades funcionales son requeridas, por ejemplo conductividad eléctrica.

## Desarrollos Futuros

Como se discutió anteriormente, los materiales cerámicos compuestos reforzados por CNT pueden prepararse mediante muy diversos métodos, los cuales han evidenciado diverso grado de éxito en el aspecto más crítico de la fabricación de estos materiales, que es lograr una distribución uniforme de los CNT en la matriz cerámica. En este sentido las técnicas de fabricación basadas en el crecimiento in situ de los CNT parecen tener una ventaja relativa, ciertamente sobre la técnica clásica de mezclado de polvos. Sin embargo, métodos basados en la técnica de sol-gel y dispersiones coloidales han conducido también a excelentes resultados en

relación a la calidad de la dispersión de los CNT en la matriz cerámica. La aplicación de un campo eléctrico para ordenar las capas de CNT, por ejemplo la deposición electroforética, para luego ser infiltradas por nanoparticulas cerámicas continuará ganando en aceptación. En relación a la densificación de estos materiales, la técnica SPS permite consolidación de los materiales a relativamente más bajas temperaturas y por tiempos de proceso más cortos que la técnica de prensado en caliente. Esto hace que disminuya la posible degradación de los CNT. Es posible también que técnicas de consolidación basadas en generación de calor por microondas ganen interés y se continúen desarrollando dado que permiten consolidar los materiales a relativamente bajas temperaturas además de requerir considerablemente menor energía que la técnica de SPS [32]. Mayores esfuerzos de investigación tanto en los aspectos de dispersión de CNT en matrices cerámicas como en el desarrollo de técnicas de densificación más eficientes son necesarios.

Con respecto a las propiedades mecánicas, en particular la tenacidad a la fractura, como se indicó, es necesario obtener una resistencia mecánica óptima en la interface CNT/matriz, lo que permite activar el mecanismo de "pull-out" de los CNT contribuyendo al aumento de la energía de fractura incrementando así la tenacidad del compuesto. A pesar de que algunos autores han indicado la existencia de tal mecanismo, además del mecanismo de puentado de grieta ("crack bridging") o deflexión de grieta en la interface CNT/matriz, todavía no se ha establecido en forma cuantitativa la contribución de estos mecanismos al valor final de la tenacidad a la fractura. En realidad, la medición de la tenacidad en estos materiales compuestos es compleja y el uso de técnicas de indentación ha demostrado conducir a valores erróneos [6] por lo tanto otro campo de investigación interesante es el relacionado a la medición de la tenacidad a la fractura con precisión suficiente como para poder utilizar los resultados en la verificación de modelos teóricos.

Referencias

1. Iijima, S., *Helical microtubules of graphitic carbon*. *Nature*, 1991. 354: p. 56-58.
2. Dresselhaus, M.S., G. Dresselhaus, and P.C. Eklund, *Science of fullerenes and carbon nanotubes*. 1996, CA: Academic Press: San Diego.
3. Ajayan, P.M. and T.W. Ebbesen, *Nanometre-sized tubes of carbon*. *Rep. Prog. Phys.*, 1999. 60: p. 1025-1062.
4. Peigney, A., *Tougher ceramics with nanotubes*. *Nature Materials*, 2002. 2: p. 15-16.
5. Thostenson, E.T., Z. Ren, and T.W. Chou, *Advanced in the science and technology of carbon nanotubes and their composite: a review*. *Composites Science and Technology*, 2001. 61(1899-1912).
6. Wang, X., N.P. Padture, and H. Tanaka, *Contact-damage-resistant ceramic/single-wall carbon nanotubes and ceramic/graphite composites*. *Nature Materials*, 2004. 3: 539-544.
7. DiMaio, J., S. Rhyne, Z. Yang, K. Fu, R. Czerw, J. Xu, S. Webster, Y.P. Sun, D.L. Carroll, and J. Ballato, *Transparent silica glasses containing single walled carbon nanotubes*. *Information Sciences*, 2003. 149: p. 69-73.
8. Jitianu A, Cacciaguerra T, Benoit S, Delpeux S, Béguin F, Bonnamy S., *Synthesis and characterization of carbon nanotubes-TiO<sub>2</sub> nanocomposites*, *Carbon* 2004;42, 1147-51.
9. Boccaccini, A.R., D.R. Acevedo, G. Brusatin, and P. Colombo, *Borosilicate glass matrix composites containing multi-wall carbon nanotubes*. *J. Europ. Ceram. Soc.*, 2005, 25: p. 1515-1523.
10. Seeger, T., T. Köhler, T. Frauenheim, N. Grober, M. Rühle, M. Terrones, and G. Seifert, *Nanotube composites: novel SiO<sub>2</sub> coated carbon nanotubes*. *Chem. Commun.*, 2002, 1: 34-35.
11. Xiang, C. S., Shi, X. M., Pan, Y. B., and Guo, J. K., *Fabrication and dielectric properties of CNTs/SiO<sub>2</sub> composites*. *Key Engineering Materials*, 2005. 280-283: 123-126.
12. J. Ning, J. Zhang, Y. Pan, and J. Guo, *Surfactants assisted processing of carbon nanotube-reinforced SiO<sub>2</sub> matrix composites*, *Ceramics International*, 30 [1], 63-67 (2004).
13. J. Ning, J. Zhang, Y. Pan, and J. Guo, *Fabrication and thermal property of carbon nanotube/SiO<sub>2</sub> composites*, *Journal of Materials Science Letters*, 22 [14], 1019-1021 (2003).
14. Hwang, G.L. & Hwang, K.C. 2001, *Carbon Nanotube Reinforced Ceramics*, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 11, pp. 1722-1725.

15. Boccaccini, A. R., Thomas B. J. C., Brusatin, G., Colombo, P., *Mechanical and electrical properties of hot-pressed borosilicate glass matrix composites containing multi-wall carbon nanotubes*. *J. Mater. Sci.* 2007; 42: 2030-2036.
16. Arvanitelis, C., Doni Jayaseelan, D, Cho, J., and Boccaccini, A. R., *Carbon Nanotube (CNT)-SiO<sub>2</sub> Composites by Colloidal Processing*, *Adv. Appl. Ceram.* (2007) in press.
17. Sun, J., Gao, L., Li, W. *Colloidal processing of carbon nanotube/alumina composites*. *Chem. Mater.* 2002; 14: 5169-5172.
18. Poyato, R., Vasiliev A.L., Padture, N.P., Tanaka, H. and Nishimura, T. *Aqueous colloidal processing of single-wall carbon nanotubes and their composites with ceramics*, *Nanotechnology* 2006; 17: 1770-1777.
19. Chicatun, F., Cho, J., Schaab, S., Brusatin, G., Colombo, P., Roether, J.A., Boccaccini, A. R., *Carbon nanotube deposits and CNT/SiO<sub>2</sub> composite coatings by electrophoretic deposition*, *Adv. Appl. Cerám.* 2007: 106;186-194.
20. Thomas, B. J. C., Shaffer, M. S. P., Boccaccini, A. R., *Multi-walled carbon nanotube coatings using electrophoretic deposition (EPD)*, *J. Am. Ceram. Soc.* 2005; 88: 980-982.
21. Singh, I, Kaya, C., Shaffer, M. S. P., Thomas, B. C. and Boccaccini, A. R., *Bioactive ceramic coatings containing carbon nanotubes on metallic substrates by electrophoretic deposition*, *J Mater Sci*, 2006; 41:8144-8151.
22. Zhan, G D, Kuntz, J D, Wan, J, Mukherjee, A K, *Single-wall carbon nanotubes as attractive toughening agents in alumina-based nanocomposites*, *Nat. Mater.*, 2003, 2 (1), 38-42.
23. Grobert, N, Seeger, T, Seifert, G, et al., *Processing, characterisation and theory of carbon nanotubes containing SiOx-based nanocomposites*, *J. Ceram. Proc. Res.*, 2003; 4 (1), 1-5.
24. Siegel, R W, Chang, S K, Ash, B J, Stone, J, Ajayan, P M, Doremus, R W, Schadler, L S, *Mechanical behavior of polymer and ceramic matrix nanocomposites*, *Scripta Mater.*, 2001;44 (8-9), 2061-2064.
25. Balazsi, Cs., Konya, Z., Weber, F, Biro, L. P. and Arato, P., *Preparation and characterization of carbon nanotube reinforced silicon nitride composites*. *Materials Science and Engineering* 2003; C23: 1133 - 1137.
26. Peigney, A., Laurent, Ch., Flahaut, E. and Rousset, A., *Carbon nanotubes in novel ceramic matrix nanocomposites*, *Ceramics international*, 26 (2000) 677-683.
27. Peigney, A., Flahaut, E., Laurent, Ch., Chastel, F. and Rousset, A., *Aligned carbon nanotubes in ceramic-matrix nanocomposites prepared by high-temperature extrusion*. *Chemical Physical Letters* 2002; 352; 20 - 25.
28. Flahaut, E., Peigney, A., Laurent, Ch., Marliere, Ch., Chastel, F. and Rousset, A., *Carbon nanotube-metal-oxide nanocomposites: Microstructure, electrical conductivity and mechanical properties*. *Acta Mater.* 2000; 48; 3803 - 3812.
29. Sun, J., Gao, Lin., Iwasa, M., Nakayama, T., Niihara, K. *Failure investigation of carbon nanotube/ 3Y-TZP nanocomposites*. *Ceramics International* 2005; 31; 1131-1134.
30. Ma, R. Z., Wu, J., Wei, B. Q., Liang, J. and Wu, D. H., *Processing and properties of carbon nanotubes-nano-SiC ceramic*, *Journal of Materials Science*, 1998, 33; 5243-5246.
31. An, L., Xu, W., Rajagopalan, S., Wang, C., Wang, H., Fan, Y., Zhang, L., Jiang, D., Kapat, J., Chow, L., Guo, B., Liang, J. and Vaidyanathan, R. *Carbon-nanotube-reinforced polymer-derived ceramic composites*. *Adv. Mater.* 2004; 16 (22); 2036 - 2040.
32. Wang, Y., Iqbal, Z. and Mitra, S., *Rapid, low temperature microwave synthesis of novel carbon nanotube - silicon carbide composite*, *Carbon*, 2006; 44; 2804-2808.



PORCELANA INDUSTRIAL • REFRACTARIOS  
 GUIA HILOS • AISLADORES • RELLENO PARA TORRES  
 PORCELANAS PARA ADORNOS  
 FABRICACION DE PIEZAS ESPECIALES  
 SOBRE MUESTRAS, PLANOS

LAVAGCER S.R.L.  
 Tte. Gral. RICCHIERI 1330 • (1661) BELLA VISTA  
 Pcia. Buenos Aires - Tel.: 4666-1614 y 6853



## Tecnología de Procesos Cerámicos

### Desarrollo de productos cerámicos complejos. Revisión del proceso de fabricación de artículos moldeados por colado. Sanitarios, vajilla, refractarios.

Ing. Rodolfo Ferraris. Extracto del Curso dictado el pasado mes de agosto, en ATAC, Asociación Técnica Argentina de Cerámica. Un curso similar se dió en la Univ.Nac. de Cuyo en dic. p/pdo. Un segundo módulo, práctico, se dará en abril próximo en dicha Universidad.

Determinadas piezas de formas muy complejas sólo pueden ser moldeadas por colado.

Nos vamos a concentrar en este tipo de productos dejando de lado los que se producen en forma seriada y que en la industria de los revestimientos serían los prensados, pisos y revestimientos, platos torneados o prensados en vajillas, ladrillos normalizados, prensados en refractarios, etc.

Estas mismas industrias que acabamos de citar tienen productos que se forman o moldean por colado:

- En la industria sanitaria, prácticamente todos.
- En revestimientos, listones o listelos.
- En vajilla, fuentes, teteras, etc.
- En refractarios, piezas especiales para hornos.

La elección de un sistema de moldeo depende de dos factores iniciales el **producto** y el **cuerpo cerámico**. Formas complejas solo pueden ser moldeadas por colado.

Este es posiblemente uno de los más antiguos sistemas y de los que menos ha evolucionado con el tiempo.

Se basa en el poder absorbente del yeso, por efecto de la capilaridad, sobre una suspensión acuosa que llamamos barbotina.

Esta barbotina puede componerse de arcilla solamente o de una mezcla de arcillas, caolines, cuarzo, feldespato, chamote de alguna arcilla, o molido de piezas quemadas con un contenido de agua de 27 a 35%.

Necesitamos pues un molde de yeso y una barbotina.

Para la ejecución del molde necesitamos realizar un **modelo** que es una réplica del producto realizada en yeso y para esto se requiere conocer el **retiro** de húmedo a seco y de seco a salida de horno del cuerpo cerámico a utilizar. Comencemos pues por la barbotina.

#### Barbotinas

Las características principales de esta pasta son:

- **Suspensión acuosa con mínima cantidad de agua y elevada fluidez.** Para lograrlo sería necesario agregar agua hasta niveles del 50% , pero esto produciría una rápida saturación del yeso y una elevada retracción de la pieza salida del molde con un secado imposible de controlar. Por esta razones se emplean los llamados **reactivos**.

Las partículas arcillosas coloidales inmersas en una fase acuosa se cargan con iones electronegativos, hecho comprobado experimentalmente y, por efecto del potencial así adquirido, atraen cargas de signo opuesto. Tales cargas son generalmente iones de calcio y magnesio, cationes siempre presentes en el agua por disociación de sales solubles.

El entorno de iones alcalino- terrosos que circunda a las partículas confiere al sistema un carácter gelatinoso viscoso.

Sustituyendo los iones de calcio y magnesio por iones de sodio, la masa fluidifica transformándose en una barbotina fácilmente colable. El diferente estado Floculado - Defloculado que el sistema agua - arcilla asume , depende del equilibrio de dos fuerzas antagónicas a las que están sujetas las partículas arcillosas coloidales. La fuerza de atracción molecular y la fuerza de repulsión electrostática.

Cuando la atmósfera está compuesta por iones alcalinotérreos, predomina la fuerza de atracción molecular (medio ácido), las partículas se aglomeran y floculan sedimentando en una masa gelatinosa viscosa.

Cuando la masa se compone de cationes de sodio prevalece la fuerza de repulsión electrostática permitiendo a la misma formar una solución defloculada estable.

Los reactivos más comunes son carbonato de sodio y silicato de sodio en proporción de 2 a 4% y los tanatos orgánicos. Entre los floculantes: calcio y magnesio.

También el carácter graso o magro de una pasta representa un factor a tener en cuenta, ya que habiendo en la suspensión una masa rica en fracción arcillosa coloidal la absorción se inicia rápidamente formándose una película de arcilla muy fina que frena y aun bloquea la absorción de agua.

#### Materias primas

Las empresas, proveen una amplia información de los productos por ellos distribuidos, de no contarse con ella, tenemos el apoyo del INTEMIN para completar la información necesaria:

- **Análisis químico**, determinación de álcalis por espectroscopio de emisión de llama.

- **Composición mineralógica** por difracción de rayos X. Esta técnica permite obtener las distancias interatómicas de los minerales, éstas son distintas para cada uno de ellos y permiten identificar cada especie mineral. También permiten conocer las variaciones de dichas distancias lo que tiene relación directa con las propiedades físicas observables.

- **Distribución de tamaño de partícula**

- **Módulo de rotura en crudo** es una medida de la tensión que puede soportar una pieza seca.

- **Concentración de colado.** Consiste en la máxima densidad obtenible a una viscosidad determinada. Curva de defloculación.

- Capacidad de intercambio catiónico. La sustitución de un tipo de catión por otro en los minerales es conocida como intercambio catiónico. Es la cantidad de cationes que puede adsorber e intercambiar con el medio líquido en que se encuentra. La medición de esta característica es muy importante para asegurar la constancia de las propiedades reológicas, floculación-defloculación, en las barbotinas.

- **Velocidad de colado** es una medida de la velocidad de toma de espesor.

- **Porcentaje de absorción** sobre material cocido.

- **Porcentaje de contracción**, disminución lineal por acción del calor.

- **Color.**

- **DTA análisis térmico diferencial.** Cuando un material es sometido a un programa de calentamiento determinado, sufre transformaciones en su estructura cristalina, pérdida de agua estructural y de absorción. Cada una de estas reacciones se caracteriza por un intercambio positivo o negativo de calor con el medio ambiente, esta característica es utilizada para identificar la mineralogía de la muestra ya que estos procesos son como una huella digital del material.

- **Plasticidad** es una medida de la trabajabilidad de la arcilla o caolín.

#### Ejecución de una barbotina

Una vez elegidos los componentes pasamos a las características de la suspensión: se elabora la mezcla comenzando por una correcta medición del agua de acuerdo con la densidad final.

La arcilla se mezcla a razón de 60% de sólidos, es decir densidad 1,56 con carbonato y suficiente silicato para asegurar una mezcla eficiente en el agitador. Se tamiza, se verifica su densidad y se almacena hasta el día siguiente, en el cual se agrega el cuarzo y el feldespato llevando la densidad a 1,80-1,85 siempre con cantidades mínimas de silicato.

Luego de una maduración mínima de 2-3 días se realizan las verificaciones de:

- Densidad - Viscosidad - Tixotropía - Espesor.

Se procede a efectuar las curvas de defloculación. Las variables son densidad y grado de defloculación.

Cómo se realizan las curvas: fijando la densidad en, por ejemplo, 1,80 y el carbonato de sodio en 1% del material arcilloso seco, se varía el silicato que actúa más rápidamente sobre el lubricante.

Se define así el estado de defloculación llegándose a la fluidez adecuada. Si se produjeran variaciones las causas podrían ser:

- Materias primas, agua incluida - Pesada - Molienda de cuarzo y feldespato - Dispersión de la arcilla - Proporción de defloculante - Residuos - Contaminación de los mismos.

En el ensayo de colada, se verifican: vertido, aspecto, tacto, plasticidad, resistencia mecánica y contracción de húmedo a seco.

## Tixotropía: variación de viscosidad a través del tiempo

Cuando la tixotropía es alta:

La toma de espesor es rápida; el desagote lento incompleto. Moldeados blandos, con humedad elevada. Secado lento.

Cuando la tixotropía es baja:

Poco espesor. Desagote fácil pero con lágrimas. Moldeados duros, poca humedad. Secado rápido.

Existen moldes de prueba para estos ensayos de fábrica.

Para la viscosidad y la tixotropía existen aparatos como el de Brookfield, más apropiado para laboratorio y en planta el ensayo diario se hace con Copa Ford.

Un procedimiento aconsejable es ensayar los materiales a la recepción en forma individual integrándolos por ejemplo a fórmulas conocidas para ver las variaciones que se produjeran y compararlos con partidas anteriores.

Otro factor a tener en cuenta es el clima; formulaciones que dan resultado en un lugar deben, a veces, ser modificadas y adaptadas. Finalmente y no menos importante, el producto con sus requerimientos nos irá condicionando. No sólo nos referimos a las condiciones del producto terminado como porosidad, dureza, etc., sino también a las necesarias para el moldeo, secado, transporte, esmaltado y quema.

## Yesos moldes

Habíamos quedado en la ejecución del modelo, ahora que sabemos las características de las barbotinas podemos hacerlo, siempre respetando la contracción húmedo seco, seco-quemado. Luego retomaremos el tema modelos, en la revisión de las etapas del desarrollo de un nuevo producto.

El yeso cerámico se usa desde hace muchos años en la industria cerámica por su capacidad de fijar y transmitir detalles, estabilidad dimensional, absorción de agua y tal vez la más importante hoy: bajo costo.

## Yesos de producción

La materia prima se llama sulfato de calcio y al ser calentada a 120-130° C da lugar a dos semi hidratos, Alfa y Beta.

El semi hidrato Alfa se forma por encima de los 115° C, en una atmósfera lo suficientemente húmeda como para que exista una fina capa de agua sobre las partículas. Esto se hace en cilindros metálicos de 8 a 15 t.

El semi hidrato beta se forma cuando se calienta rápidamente el yeso en una atmósfera secadora encima de los 100° C.

La piedra proveniente del yacimiento. En la Argentina hay muchos pero los de mejor calidad se encuentran en El Sosneado, Mendoza. Se tritura, se pasa por imán, se muele y se carga en el calcinador.

El yeso calcinado absorbe fácilmente agua; la cantidad requerida para la saturación es 18,6% del peso seco, sin embargo debe agregarse una cantidad mayor para poder realizar la mezcla y que sea

moldeable.

Cuando el yeso ha fraguado el agua se evapora dejando poros, luego cuanto más agua se agregue a la mezcla, mayor porosidad se obtiene y más absorbente será el yeso.

El yeso alfa requiere menos agua para una misma consistencia y da un fraguado más denso. **Los yesos cerámicos serán entonces una variación de las proporciones entre variedades alfa y beta según el uso.**

## Preparación

Para mantener una constante en las características de los moldes hay una serie de detalles a tener en cuenta:

- Verificar la humedad del yeso embolsado y guardarlo en lugar seco suavemente calefaccionado.

- La temperatura del agua afecta la reacción tendiendo a acelerar el inicio del fraguado, pero a su vez reduce la expansión.

- La humectación se hace espolvoreando el yeso sobre el agua medida con exactitud. Se deja empapar las partículas por espacio de 2 a 5 minutos, tiempo suficiente para que no se produzcan masas difíciles de disolver.

- La mezcla se efectúa mucho mejor mecánicamente, empleando, por ejemplo, un recipiente de inoxidable, con un agitador con hélice o turbina, con un diámetro de un tercio del diámetro del recipiente y cuya velocidad será de 250 a 400 rpm.

- Secado. La resistencia del yeso seco es mucho mayor que la del yeso húmedo, por eso el secado es esencial, pero hay una limitación en cuanto a la temperatura que puede llegar a los 110 grados cuando aún tenemos 20% de agua pero no superior a los 45 grados al finalizar el secado. El quemado se produce a los 70 grados y el molde queda inutilizado.

El molde cumple tres funciones:

1. Recipiente. 2. Deshidratante. 3. Floculante.

Esto es debido a la ligera solubilidad del sulfato de calcio en el agua, por eso forma espesor de pasta un molde saturado completamente. Por eso también no necesariamente tiene que ser más poroso un molde de colado que uno de torneado. Ya que estamos en el tema de la humedad, digamos que tampoco es útil emplear un molde completamente seco, a los moldes nuevos se les incorpora de un 5 a un 15% de agua.

Con todos estos elementos reunidos estamos en condiciones de advertir que la formación de espesor depende de la porosidad así como de la barbotina. Mejorando la porosidad aumentamos la velocidad de formación, pero también podemos ayudar a este proceso con una barbotina donde la fracción fina haya sido reducida.

El carbonato y el silicato de sodio reaccionan con el sulfato de calcio produciendo sulfato de sodio y silicato de calcio, las eflorescencias que aparecen en la superficie del molde cuando el yeso seca y bloquean los poros del mismo.

## Moldeo. Sistemas de Moldeo

Por muchos años fue simplemente volcar barbotina en moldes, darle tiempo de formación de espesor, vaciar el excedente, si lo tenía, y luego de un tiempo de consistencia, desmoldar.

Mejoras posteriores fueron: distribución de barbotina por bombeo y una red de canales para recolección del vaciado.

También sobre la base de los ensayos de secado comentados se pudo lograr usar los moldes más de una vez por día.

Por la década del 60 aparecen las **cadena**s, circuitos que el molde recorre, pasando por estaciones, donde era llenado, luego ingresaba a un secadero, posteriormente vaciado, luego otro secado y finalmente se desmoldaba la pieza, para después de un secado con el molde vacío, volver a la estación de llenado. La puesta a punto de estos sistemas demoró mucho por problemas como los sensores de nivel de la época, pero principalmente por el comportamiento de los moldes que variaba a través del tiempo. Estos equipos

reemplazaban la atención de los moldeadores por la de los técnicos. En la década del 70 se conoce el sistema Shanks que consiste en colocar los moldes simples, es decir de dos partes, montados sobre carritos, los que a su vez se desplazan sobre una mesa con guías para las ruedas, permitiendo una apertura y cierre sumamente fácil. El llenado y el vaciado se efectúan por una tubería colocada debajo de la mesa y simultáneamente para todos los moldes. Con este sistema la productividad, en este tipo de piezas aumentó el 100%. Durante la década se vieron mejoras de la idea original que superaron aún más la productividad y se confirmó que era un sistema confiable aún en uso hoy en día.

En los 80 los técnicos se aproximan a la resolución de una antigua idea: el reemplazo del yeso por un material de mayor duración. La empresa Dorst comenzó a utilizar moldes de un material plástico sinterizado para producir los poros en los moldes, por supuesto sin su efecto absorbente. Se llama colado de alta presión y podía producir 7 a 10 piezas por hora. Constaba de una prensa hidráulica y el bombeo de la barbotina a una presión de 25Kg/cm<sup>2</sup>. En el 86 aparece el colado de media presión de Netzsch que mantiene los moldes de yeso pero habiendo logrado un mayor rendimiento, duración y terminación de superficies y juntas. Se trata del sistema Shanks como base con moldes en batería de 15 unidades utilizando una presión de 3,5 atm con lo cual la fuerza de cierre se reduce a 20 t.

Hace años que se conocen los efectos de la aplicación de una presión durante el proceso de colado, trabajos como los de Koseni, Carman y otros demostraron que es una manera de acortar los ciclos de trabajo, pero al llegar al punto de saturación del molde se debía suspender la tarea hasta la recuperación del mismo. Actualmente con los moldes de recuperación inmediata se pueden hacer tantas coladas como permita la duración del ciclo, por ello vuelve a ser importante la aplicación de la presión en el colado.

La incorporación de la resina microporosa para los moldes se está realizando en muchas fábricas de producción masiva ya que estos moldes duran varios miles de coladas contra las 80 ó 100 de los moldes de yeso, su costo es aún algo elevado pero está bajando rápidamente en la medida que se incorporan nuevos productores.

Para la fabricación de estos moldes se requiere la participación de un taller especializado como el nuestro. Se está trabajando en la capilaridad del molde con el fin de reducir al mínimo la presión de trabajo de modo de abaratar el costo del banco de moldeo que no es otra cosa que una prensa hidráulica.

Trabajos realizados en Italia se extienden en analizar el efecto de la presión sobre la barbotina según su estado de defloculación y de ellos surge que lo favorece un estado de mínima defloculación para no afectar la permeabilidad de la capa superficial.

Luego se estudió la influencia de la temperatura concluyéndose que favorecía la formación de espesor pero sin sobrepasar los 35 a 37° C, por encima de los cuales se producen grietas.

Con respecto a la presión se consideró que hasta 3,5 Kg los incrementos de espesor eran notables y por encima de esa presión se necesitan grandes incrementos para lograr un apreciable crecimiento del espesor. Se trabaja con tiempos de 20 min. para espesores de 8,5 mm.

Tanto en el caso de moldes de yeso como de resina se ayuda a la formación de espesor y luego al secado con una bomba de vacío actuando a través de la pared del molde.

En piezas formadas con este proceso, la humedad que le queda a la pieza a la salida del molde baja a 15%; esto facilita el secado y además le da una consistencia mucho mayor.

Entre colada y colada se efectúa el secado o mejor dicho la expulsión de agua del molde con el uso de una presión a través de las paredes del molde hasta que el mismo queda con una humedad residual del 15%.

## Desarrollo integral del producto

**Optimizar todas las variables desde la idea hasta el producto saliendo del horno**

### Etapas

Interpretación de Objetivos.

Entender con claridad qué se pretende de este nuevo producto o serie de ellos:

- Ocupar un segmento de mercado vacante - Competir con otro existente - Oportunidad de exportación.

### Desde el punto de vista del diseño:

- Iniciar una nueva tendencia - Incorporarse a una tendencia - Desarrollar una tecnología - Introducir una tecnología.

Es indispensable, si la decisión involucra a distintas áreas, lograr un consenso, para no repetir etapas del desarrollo.

Por supuesto, hasta aquí estamos hablando de productos para el público, cuando se trata de productos técnicos dirigidos a otras industrias es indispensable definir exactamente qué se espera del mismo.

### Diseño

Definición del concepto, la idea, la forma, los detalles distintivos que reunirán el o los artículos que compondrán la línea.

Incorporar los detalles que aconseja la experiencia.

- Ergonomía - Funcionalidad, primaria y secundaria - Normas, nacionales e internacionales - Costumbres, valoración (se refiere a interpretar las prioridades del público al que estará dirigida.)

Necesitamos también en ese momento conocer la categoría del producto, si es de consumo masivo, de alta producción o algo exclusivo para pequeñas series productivas.

Con esta información hacemos los primeros dibujos y el primer diseño en 3D.

### Definición de la tecnología de fabricación

Materias primas de las pastas cerámicas: reunir toda la información disponible de los materiales en uso en la planta para definir si son los más adecuados para esa tarea. En caso de ser necesario aconsejar los cambios que se crean convenientes.

Revisar el proceso de fabricación de pastas disponible en la planta. Ver si requiere cambios o resulta aconsejable fabricar por separado la nueva fórmula.

Establecer la fórmula, conseguir muestras de los materiales, hacer muestras para ensayo, establecer los ensayos para los materiales por separado y para la fórmula.

Hacer el primer costo comparativo de los distintos materiales y formulaciones.

Moldes. Definir qué tipo de moldes: yesos comunes, yesos especiales, de alta recuperación, resina microporosa.

Equipos de moldeo: manuales, en batería, prensa...

Es importante conocer los hábitos de trabajo en la planta (si se trata de una planta establecida hace tiempo, con personal acostumbrado a trabajar de determinada manera.)

- Secado - Transporte - Quema - Clasificación.

### Prototipos

Después de elaborado el primer diseño, se realizan los dibujos en 3D con los programas desarrollados al efecto. Qué significa esto: que se incorpora al programa de diseño toda nuestra experiencia de modo que el dibujo en 3D resulta un diseño practicable con:

- Espesores - Volúmenes - Compensaciones.

Cerámicamente previsible

Estos programas generan además un 3D presentable, es decir que usaremos en una reunión con los responsables para producir las primeras opiniones y hacer cambios si fuera necesario.

Son pequeñas películas con movimiento y fidelidad suficientes, como si estuviéramos viendo una filmación del artículo.

Con otro programa disponible de diseño, más un tercero de meca-



nizado, podemos ordenar a una máquina prototipadora la realización de un modelo a escala 1:1 para observación. Estos prototipos se pueden realizar en yeso, madera o espuma de poliuretano. Estas máquinas son algunas totalmente mecánicas (las llamadas routers) y otras más avanzadas que utilizan la técnica de estereolitografía.

**Modelo**

Recién ahora elaboramos un modelo en yeso, contemplando la contracción ya definida del material.

**Primer molde**

Normalmente el modelista realiza el primer molde en yeso. Este puede ser para ensayo manual o adaptado a algún tipo de máquina definida para este artículo.

**Ensayo de colado**

Se fabrican las primeras piezas para observación, control dimensional, y ver deformaciones y correcciones al molde definitivo.

**Matriz piloto**

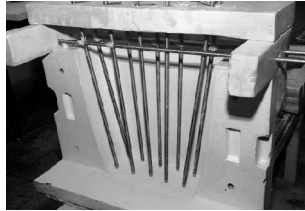
Se trata de una matriz en yeso especial con la que se fabrican una cantidad reducida de moldes (carga de trabajo para un operario.)

**Ensayo productivo**

Para terminar de definir el molde, el procedimiento de moldeo, el banco de trabajo, fabricar suficientes piezas para prevenir inconvenientes en otras áreas: secado, transporte, esmaltado, quemado, clasificación. Se realiza el estudio de tiempos para determinar la productividad.

**Matriz definitiva**

Con el molde definitivo se realiza la matriz en resina epoxi y resina poliuretánica flexible.



*Realización de moldes para colado a presión.*



*Preparación de la matricería para llenado con yeso especial para colado a presión.*



*Molde original: preparación para matricular.*



*Taller de matricería. Elaboración de matriz de inodoro.*



*Llenado de una matriz para moldes de alta recuperación.*



*Ensayo modelo de tanques (mochilas.)*

*PRIMA SH - Ing. Rodolfo Ferraris  
Calle 162 Nro 853, Bernal. Pcia. de Buenos Aires. Argentina  
raferraris@gmail.com*

**FUSION Com. & Ind.**  
**Proveedor de Materiales Refractarios**

*Más de 40 años ofreciendo calidad, servicio y libre elección de los productos.*

- Carburo de silicio
- Electrofundidos
- Sílice
- Aislantes
- Circonio
- Básicos
- Sílico aluminosos
- Fibra cerámica, etc.

Plantas llave en mano para la industria del vidrio. Fumistería y Demoliciones. Compras. Importación y exportación.  
Camino Gral. Belgrano 5170 (e\ Matanza y Chascomús) - (1874) V. Domínico. Pcia. de Bs. As., Arg. Tel./Fax: 4230-5048 fusioncei@hotmail.com

*H. M. Córdoba*