

La cascarilla cerámica como material escultórico

Lucido Petrillo



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial - SenseObraDerivada 3.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 3.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0. Spain License.**

Estudio de doctorado
del EESS, Programa de
Doctorado:
“La realitat Assetjada:
Posicionaments
Creatius”
Línea de investigación:
“Art, natura i entorn”



Grup de Recerca BRAC:
“Barcelona, Recerca, Art
i Creació, 2009 SGR 1,
de l’Agència de gestió
d’Ajuts Universitaris de
Recerca de la
Generalitat de Catalunya



Beca Predoctoral de
formació de personal
investigador FI de la
Generalitat de Catalunya



Agència
de Gestió d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca

Facultad de Bellas Artes, Universidad de Barcelona



La cascarilla cerámica como material escultórico

Tesis doctoral presentada por

Lucido Petrillo

Dirigida por los doctores

Miquel Àngel Planas Rosselló y Joan Antoni Valle Martí

Barcelona, 2012

I. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN. LA CASCARILLA CERÁMICA Y LA FUNDICIÓN

ÍNDICE

I.0. Contexto de la investigación. La cascarilla cerámica y la fundición	27
I.1. Antecedentes históricos de la cascarilla cerámica	27
I.1.1. Los inicios de la sílice coloidal	27
I.1.2. Antecedentes de la cáscara cerámica en la industria aeroespacial	28
I.1.3. La difusión de la cáscara cerámica en los centros de arte en el estado español	30
I.2. Procedimiento de realización de los molde de cascarilla cerámica	33
I.2.1. El molde de cascarilla cerámica para fundición	33
I.2.2. Aplicación de la cascarilla cerámica	35
I.2.3. Espesor del molde	35
I.2.4. Secado del molde de cáscara cerámica de fundición	36
I.2.5. Descerado y cocción del molde de cáscara cerámica para fundición	37
I.2.5.1. Descerado	38
I.2.5.2. Quemado	39
I.2.5.3. Cocción	39
I.2.5.4. Recocción después de la restauración	39
I.2.5.5. Curva de descerado y cocción	39
I.2.6. Aportaciones del molde de cascarilla cerámica al proceso de fundición	40
I.3. Materiales utilizados en el molde de cascarilla cerámica	43
I.3.1. Los Aglutinantes	43
I.3.1.1. Los coloides	43
I.3.1.2. Productos derivados del dióxido de silicio	44
I.3.1.3. Otros aglutinantes de sílice coloidal	45
I.3.1.4. Silicato de etilo	45
I.3.2. Los refractarios	45
I.3.2.1. Minerales refractarios utilizados habitualmente en la cascarilla cerámica	47
I.3.2.1.1. Los refractarios silícicos	47
I.3.2.1.1.1. Sílice	47
I.3.2.1.1.2. Circón	49
I.3.2.1.1.3. Talco	49
I.3.2.1.2. Los refractarios aluminosos	50
I.3.2.1.2.1. Alúmina	50
I.3.2.1.3. Los refractarios silicoaluminosos	51
I.3.2.1.3.1. Silicatos de aluminio	51
I.3.2.1.3.2. Moloquita	51
I.3.2.1.4. Otros refractarios	53
I.3.2.1.4.1. Grafito	53
I.4. El refuerzo del molde de fundición	55
I.4.1. Utilización de la fibra de vidrio en la cascarilla cerámica	55

I.4.2. Materiales de fibra de vidrio para el refuerzo	55
I.4.2.1. Productos comercializados	56
I.4.2.1.1. Mat	56
I.4.2.1.2. Roving	56
I.4.2.1.3. Tejido	56
I.4.2.1.4. Hilos cortados	57
I.4.2.1.5. Molida o polvo	57
I.4.2.2. Otros casos de refuerzo con fibra	57
I.4.3. Refuerzos con estructura metálica	58
I.4.3.1. Tela o Malla metálica	58
I.4.3.2. Varilla	58
I.4.3.3. Alambre	58
I.5. Conclusiones del primer capítulo	61

I.0. CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN. LA CASCARILLA CERÁMICA Y LA FUNDICIÓN

El propósito de este capítulo es situar al lector en el contexto en el que se ha desarrollado esta investigación. En este capítulo se ha pretendido elaborar un texto que introduzca de forma resumida aquellos conocimientos más relevantes relacionados con la cascarilla cerámica, y que permita contextualizar la investigación.

En primer lugar, es presentada la cascarilla cerámica en su contexto evolutivo histórico industrial y pedagógico dentro del ámbito universitario, a continuación son tratados sus materiales constitutivos y en tercer lugar son expuestos los procedimientos de aplicación de la cascarilla cerámica como molde para la fundición.

Este último apartado ha resultado especialmente relevante dado que los trabajos de fundición a la cera perdida realizados en la "Fonería" fueron el origen de los interrogantes que dieron vida a este proyecto y, al mismo tiempo, se ha de considerar que los materiales utilizados y la infraestructura fundamental proceden de este contexto.

I.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA CASCARILLA CERÁMICA

Se ha considerado conveniente situar los antecedentes históricos de los materiales más relevantes para nuestra investigación, en relación a la cascarilla cerámica. Sobresale especialmente la sílice coloidal, pieza determinante en su conformación, y motivo de una evolución notable en los procesos de fundición.

En líneas generales, se han podido establecer tres etapas en esta revolución histórica de los nuevos materiales que nos ocupan:

La primera de ellas toma como referencia el origen de los sol-geles, donde se incluye la sílice coloidal. Ésta, con más de un siglo de existencia, tiene actualmente un papel primordial en la realización de determinados tipos de moldes de fundición y en muchos otros recursos industriales.

La segunda etapa se sitúa alrededor de los años 60, cuando la industria espacial dió un nuevo empujón al estudio de materiales, y desarrolló el uso de la sílice coloidal para el revestimiento de cohetes espaciales.

La tercera etapa se enmarca en los años 80, cuando aparecen las aplicaciones como moldes de fundición de estos materiales, cuyos elementos constituyentes han ido modificándose a lo largo del tiempo, especialmente en esta última década.

Se ha recogido información de distintas fuentes, artículos y libros que se reseña en la bibliografía para que puedan ser consultados. Ello ha permitido explicar brevemente en los siguientes apartados el origen y la evolución de la cáscara cerámica.

I.1.1. LOS INICIOS DE LA SÍLICE COLOIDAL

Esta primera etapa de la sílice coloidal viene documentada en el libro Sol-gel: The Physics and Chemistry of Sol-gel Processing del que se ha traducido y extraído las citas y las referencias que se incluyen en este apartado.

En esta obra Jeffery y Scherer [JyS]⁹ explican el origen del uso de los solenoide-gel¹⁰, y también los descubrimientos más relevantes:

⁹ W. Scherer, G y C. Jeffery, B. (1990). Sol-gel: The Physics and Chemistry of Sol-gel Processing. San Diego Edición Academic Press, Inc. (pp. 11-13).

- Ebelman¹¹ preparó el primer alcalóxido de metal al utilizar SiCl₄ y alcohol y descubrió que el compuesto gelatinaba al ser expuesto a la atmósfera.
- En 1930 Geffcken descubrió la aplicación de los alcalóxidos en la preparación de películas de óxido, proceso que desarrolló la empresa alemana de vidrios Schott.
- Thomas Graham¹² mostró que los solventes orgánicos pueden modificar el agua en el gel de sílice (dióxido de silicio fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico). La teoría establecía que los geles de sílice tenían una estructura en red con un esqueleto polimérico de ácido silícico con una fase líquida continua.
- En 1932 Kistler¹³ inventó el proceso de secado supercrítico, el cual evita la interfase líquido-vapor, de manera que no haya presión capilar. Su uso se hizo popular entre ceramistas para la preparación de polvos homogéneos. Se utilizó también en la industria nuclear para elaborar esferas de óxido radioactivo que evitaran la generación de polvos peligrosos al ser constituidas mediante un proceso de gelificación.
- A finales de los sesenta, debido al interés de la industria de la cerámica, se desarrolló la hidrólisis controlada (reacción ácido-base de la sal de sílice con agua) y la condensación de alcaloides para la preparación de vidrios multicompuestos.

I.1.2. ANTECEDENTES DE LA CÁSCARA CERÁMICA EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL

La Dra. Carmen Marcos en su tesis¹⁴ dice lo siguiente:

La cascarilla cerámica nace en EE.UU. en la década de los cuarenta como desarrollo de la técnica para posibilitar la fundición de ciertas aleaciones especialmente complejas. La fundición dental aporta las primeras experiencias, que la industria aeronáutica aplica en un principio sobre las mismas aleaciones. [...] Con ello puede decirse que se dio el primer paso en la aplicación del procedimiento de la cera perdida a la producción industrial. Asumida en la industria norteamericana, se somete a diversas investigaciones con el fin de mejorarla y adaptarla a diversas necesidades. Desde EE.UU. llega a Europa tras la guerra, adaptándose y desarrollándose con autonomía y facilidad. Dadas las ventajas que ofrece, su desarrollo ha sido grande y llega a plantearse como imprescindible en algunos casos.

Rincón y Romero¹⁵ concretan el uso de las placas cerámicas en la industria aeroespacial:

Las plaquetas cerámicas del STS fueron desarrolladas por los laboratorios de investigación de NASA, fabricadas por las compañías Lockheed e instaladas por Rockwell International. La idea de usar materiales cerámicos refractarios en estructuras aerodinámicas no era nueva. En los primeros misiles balísticos intercontinentales ya se comenzaron a usar este

¹⁰ Los solenoides de suspensión en gel coloidal son óxidos de silicio que se gelifican para formar un sólido. Dicho proceso permite generar material cerámico a una temperatura cercana a la temperatura ambiente.

¹¹ Jacques Joseph Ebelman (1814) fue director de la fábrica de porcelana de Sevres y sintetizó piedras preciosas.

¹² Thomas Graham químico británico, fue el primero en distinguir la diferencia entre coloides y cristaloides. Acuñó el término coloide en 1862.

¹³ Samuel Stephens Kistler ingeniero químico, destacó por la invención de los aerogeles en 1931. El aerogel es un coloide cuya fase inicial es gaseosa en lugar de líquida y forma una sustancia sólida con una gran porosidad (90% a un 99,8% de aire) mil veces menos densa que el vidrio y apenas unas tres veces más densa que el aire.

¹⁴ Marcos Martínez C. (2001). *Fundición a la cera perdida: técnica de la cascarilla cerámica* Tesis de doctorado Ed. Universidad Politécnica de Valencia. (p. 206).

¹⁵ Rincón, J. M. y Romero M. *Una historia real de i+ d +i: revestimientos cerámicos y vítreos para vehículos transbordadores espaciales*. Madrid- 28033. Grupo y Lab. de Materiales Vitro- Cerámicos, Inst. E. Torroja de CC. Construcción, CSIC, c/ Serrano Galvache s/n.

tipo de materiales. En el morro [...] del avión X-20 se instalaron ya hace años plaquetas de material refractario de ZrO₂ [óxido de circonio] sinterizado.

Los primeros materiales fueron de fibras refractarias aglomeradas inorgánicamente e impregnadas de un refrigerante orgánico no carbonizable. En 1962 la cápsula Apolo fue construida con un SPT a base de materiales compuestos de fibras de sílice, formando un esqueleto continuo e impregnado todo con metacrilato como fase refrigerante no carbonizable. Estos materiales [...] presentan dos problemas importantes: No se pueden reutilizar y son bastante pesados [...] Por tanto, en 1965 se comenzaron a desarrollar plaquetas a base de fibras de sílice [...]

En 1968 se optimizó este tipo de plaqueta y se le agregó un agente de alta emisión térmica para facilitar la radiación de calor. [...] Así pues, se añadió CSi [carburo de silicio] como agente de ajuste de los valores de emitancia. [...] Por desarrollos sucesivos se llegó al final a las plaquetas denominadas LI- 900 de baja densidad (0,144 g/cm³) y a las LI- 2200 de mayor densidad (0,342 g/cm³).

En 1973 se comenzó la producción en gran escala por la Lockheed Missiles. [...]

Las condiciones que debían reunir los materiales del Sistema de Protección Térmica (SPT) del TE eran:

1º) Actuar como protección térmica: soportando la temperatura límite de entrada en la atmósfera, ser resistentes a la entrada de gases calientes y poder ser terminados con una superficie suave (para evitar calentamientos locales y transición del aire arrastrado de flujo laminar a turbulento).

2º) Poseer una baja masa, pero que soporte la carga, sea resistente al aleteo, compatible con las tensiones y el doblado de la estructura primaria que es de aluminio, y ser resistente a la retención de agua.

3º) Permitir un tiempo corto de montaje/desmantelamiento para con una fácil inspección, fácil extracción e instalación y fácil mantenimiento, permitiendo a la nave espacial volver cuanto antes a otra misión. Y por último,

4º) Que posea bajos costes en largos ciclos de vida útil, es decir, que sea fácil de fabricar, durable y reutilizable.

[...] Inicialmente en los años 60 se seleccionaron materiales de Mullita (3Al₂O₃.2SiO₂) ó de Sílice (SiO₂) para los materiales de Aislamiento Superficial Reutilizable (ASR). En el programa iniciado por la NASA en 1970 se seleccionaron para su evaluación los siguientes productos: mullita, silicatos aluminicos, circona, CSi recubierto de carbono y fibras de sílice. En 1971 ya se había reducido la lista a tres materiales como posibles candidatos: Sílice, Mullita A y Mullita B. [...]

[En las plaquetas] de menor densidad se logra la unión fibra a fibra con sílice coloidal y en las de más densidad por sinterización directa fibra a fibra. La mayor parte de las plaquetas son de baja densidad, pero cuando se requiere mayor resistencia estructural se usan plaquetas de mayor densidad en algunas zonas¹⁶.

[...] Para reparar las plaquetas averiadas se pueden seguir dos procedimientos: Si es el recubrimiento el que ha sufrido daño se "densifica" la superficie con una mezcla de barbotina de sílice y sílice coloidal. Las negras se pintan con una mezcla de B₄Si [siliciuro de boro] y de sílice coloidal.

Dado que las plaquetas que hasta ahora se han venido utilizando resisten hasta los 1260°C durante unas 100 misiones espaciales y hasta unos 1425°C en periodos cortos de exposición ya que tienen una excesiva contracción a esta temperatura, la empresa Lockheed realizó investigaciones que mejoraran todas las propiedades que se exigen a este tipo de plaquetas cerámicas; a saber: capacidad térmica, resistencia al choque térmico, conductividad térmica y estabilidad morfológica de las plaquetas cerámicas.

[...]Se trata de un material compuesto de dos fibras cerámicas sin aditivos, con sólo CSi [carburo de silicio] para mejorar sus propiedades ópticas a elevada temperatura.

¹⁶ Rick, G. (1981). When the Space Shuttle Finally Flies, *National Geographic*, March 1981 NO 3, (pp. 316-347)

La industria Patentanwalt Kirschner & Grosse¹⁷ patentó en 1987 un sistema de cerámica para perfeccionar las plaquetas de protección térmica (TPS) de los trasbordadores aeroespaciales, con empleo del compuesto de materiales cerámicos, sobre todo alúmina, boro y sílice recubierto de tela de carburo de silicio. Con esta invención se logró que las plaquetas consiguieran resistir temperaturas de hasta 1760°C, que se alcanzan durante el despegue y el aterrizaje de naves espaciales.

El uso de compuestos cerámicos ha sido objeto de investigación en los últimos 54 años para su aplicación en vehículos aeroespaciales, además de para materiales de construcción y para materiales de alta temperatura¹⁸.

I.1.3. LA DIFUSIÓN DE LA CÁSCARA CERÁMICA EN LOS CENTROS DE ARTE EN EL ESTADO ESPAÑOL

La tesis de la Dra. Carmen Marco ha sido una importante referencia sobre estos materiales, y ha contribuido a completar la parte histórica de la cáscara cerámica, explicando quién fue el artífice y divulgador de esta técnica y cómo popularizó este proceso en las universidades españolas¹⁹.

En España se empezó a emplear en los años 80 en las Facultades de Bellas Artes que todavía están perfeccionando esta técnica de fundición artística.

Esta técnica fue introducida en el ámbito universitario por Mr. David Reid²⁰ y, divulgada en España por el Dr. y catedrático Juan Carlos Albaladejo.

Mr. David Reid se puede considerar como la primera persona que ha enseñado la técnica [de la cascarilla cerámica]. Después de su experiencia como químico metalúrgico, investigando diferentes tipos de molde, viaja por Europa y despierta su interés por la escultura.

En 1975 funda su primera fundición artística [...]. Su vocación docente se evidencia en el centenar de cursos impartidos en escuelas de arte de todo el mundo, ayudando a muchas de ellas a adaptarse a la cascarilla cerámica. Actualmente ofrece consejo vía internet sobre cualquier duda o problema relacionado con la técnica de la cascarilla cerámica aplicada a la fundición en bronce.

Desde 1990 fue [...] investigador de técnicas de fundición innovadoras que incluyen la Técnica de afianzado al vacío y soporte de grandes y delgadas cáscaras cerámicas, técnicas de fundición al vacío empleando poliestireno expandido [...].

El currículum de Mr. David Reid se presenta indisolublemente ligado con la técnica de la cascarilla cerámica. Otros asuntos que confirman esta relación directa son su patente [de

¹⁷ Riccitiello S. R., Smith, M., Goldstein Howard E., Zimmerman Norman B. (1987). Titular: Patentanwalt Kirschner & Grosse "Ceramic/ceramic Shell Tile Thermal Protection System and Method Thereof". European patent application 19.11.1987 Bulletin 87/47 Publicación número: 0 245 644 A2

¹⁸ Agregamos algunas patentes de los EE.UU de interés: Patente n. 3,428,519, inventor C.M. Zvanut, Título: Uniformly Coating Fibers with Boron Carbide (Revestimiento uniforme de fibras con carburo de boro); N.: 3,602,260. Inventor: C.C. Johns. Título: Ablative Heat Shield. (Escudo térmico ablativo); N.:3,702,261 Inventor: F. Feakes. Título: Vacuum Coating of Plastic or Metal Substrates. (Recubrimiento al vacío de sustratos de plástico o de metal); N.: 4,148,962 Inventor: D.B. Leiser. Título: Refractory Composite Prepared from Aluminoborosilicate and Silica Fibers (Compuestos refractarios preparados a partir de fibras de aluminoborosilicato y sílice); N.: 4,226,914 Inventor: Terver Título: Powder Composition of SiC and Si, Plasma Sprayed into a Substrate (Composición en pólvora de carburo de silicio y Si, plasma rociado en un sustrato); N.: 4,287,259 Inventor: Riley Título: Uniformly Coating Fibers with Boron Carbide. (Revestimiento uniforme de fibras con carburo de boro).

¹⁹ Marcos Martínez, C. Op. cit. Tesis doctoral. (p. 224)

²⁰ Reid, D. "The Reid Technique and Research": <http://home.c2i.net/metaphor/>

1990], denominada “Técnica Reid” [...] El método está basado en un sistema de cera perdida a la cascarilla cerámica que ha sido disminuido en tamaño y simplificado para permitir la fundición de metales de alta precisión que tengan un punto de fusión de hasta 1200°C. [...].

Mr. David Reid identifica la Técnica Reid con una variante adaptada de la técnica de la cascarilla en la cual el crisol de fusión de metal, elaborado también en cascarilla, es adherido a la pieza de cascarilla preparada para fundir y metida en un horno, del cual se extrae cuando se considera que el metal está fundido, y simplemente se voltea, para llenar así el molde.

Además Mr. David Reid consiguió adaptar su técnica fundiendo pequeñas piezas de bronce, plata u oro, usando un horno microondas doméstico sin modificar como fuente de energía²¹. Este proceso es muy sencillo y rápido, dependiendo del metal que se emplee; por ejemplo 330g de plata de ley se funden en 17 minutos en un microondas de 850 W.

En marzo de 1991, [...] el Doctor D. Juan Carlos Albaladejo González, viaja a la St. Martin's School de Londres para conocer la nueva técnica de fundición conocida como Ceramic Shell Casting. Allí conoce la técnica de manos de [...] Mr. David Reid [...]. Juan Carlos Albaladejo toma el relevo en la difusión de la técnica de la cascarilla impartiendo el primer curso de cascarilla cerámica bajo su responsabilidad y dirección, en la misma Facultad de Bellas Artes de Tenerife, donde habitualmente ejerce su docencia.

Dr. Juan Carlos Albaladejo además desarrolló un método de fundición artística denominado Crisol Fusible en el 1995²². Esta técnica es importante por el hecho que desarrolla un proceso de colada que se realiza automáticamente sin ninguna manipulación del crisol. El molde de cascarilla engloba en la parte superior el crisol, hecho con el mismo material cerámico. La unión entre ambos está separada por un tapón de cobre, que sirve de separador y protector para que el metal no se vierta antes de estar completamente fundido, pues el bronce funde antes que el cobre. El objetivo del catedrático Albaladejo es simplificar el proceso de fundición trabajando en forma segura²³. Otros investigadores han continuado estudiando propuestas derivadas del crisol fusible²⁴.

El método se ha introducido en los talleres de fundición de las Universidades de Bellas Artes de España, primeramente en la facultad de Bellas Artes de La Laguna, su sede Universitaria, y posteriormente en el resto de universidades, y algunos otros centros de arte, donde existen talleres de fundición: Valencia, Sevilla, Barcelona, Cuenca, Granada, etc, y otras escuelas de arte, como molde refractario que se usa para realizar escultura en bronce. Esta información se puede ampliar consultando la tesis doctoral del Dr. José Antonio Aguilar Galea²⁵, profesor titular de la BBAA Universidad de Sevilla y la de la Dra. Carmen Marcos Martínez²⁶.

²¹ Melting metals in a Domestic Microwave (Fundición de metal con horno de microondas doméstico): <http://home.c2i.net/metaphor/mvpage.html>

²² Albaladejo, J.C. (2003). Fundición a la cera perdida, Técnica del crisol fusible. Santa Cruz de Tenerife. Ed. Departamento de Pintura y Escultura. Universidad de La Laguna.

²³ Taller de Fundición. Universidad de la Laguna: <http://cursodefundicion.blogspot.com>, Proceso de realización de la técnica del crisol fusible: <http://www.youtube.com/watch?v=ud2hPNnnRIQ>

²⁴ Con respecto al crisol fusible, el grupo de investigadores sobre fundición de la Facultad de Bellas Artes de Sevilla, lleva algunos años realizando investigaciones y propuestas en torno a la técnica de crisol fusible, añadiendo diversos grados de complejidad técnica al procedimiento. Véanse las ponencias presentadas al respecto en el primer y segundo congreso sobre fundición artística realizados en la UPV. VV.AA.: La fundición artística en la universidad española: la investigación, año 2006. Valencia Ed. Grupo de Investigación Nuevos Procedimientos Escultóricos, 2007 y Marcos, C. (coord): Libro de Actas del II Congreso Nacional de investigadores en fundición artística, Facultad de Bellas Artes de Valencia, UPV. 2009.

²⁵ Aguilar, J.A. (2000). La enseñanza de la fundición artística en las Facultades de Bellas Artes españolas. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.

²⁶ Marcos Martínez, C. Op. cit. Tesis doctoral.

La introducción de esta técnica en las distintas universidades ha desarrollado su aplicación y ha generado un foro de debate y de investigación en torno a la cascarilla cerámica. Fiel reflejo de esta realidad han sido los dos congresos sobre fundición artística realizados en la Facultad de Bellas Artes de Valencia cuya coordinadora ha sido la mencionada Dra. Carmen Marcos.

La técnica de la cáscara cerámica tiene un gran interés, y muchos investigadores hasta hoy están estudiando aún la optimización de su proceso de elaboración buscando métodos más ventajosos para la fundición.

La cascarilla cerámica ha tenido una gran evolución desde los años treinta hasta ahora, y se ha convertido en un material para la realización, entre otros, de moldes en fundición, quedando clasificado básicamente como un material de transición.

I.2. PROCEDIMIENTO DE REALIZACIÓN DE LOS MOLDES DE CASCARILLA CERÁMICA

Todos los materiales que se han ido nombrando (sílice coloidal, mullita, silicatos de aluminio, circonio, etc.) se han combinado entre ellos en distintos ámbitos científicos e industriales, generando gran interés.

En las últimas décadas han ido viendo la luz nuevos materiales con características refractarias que les otorgan capacidad térmica, resistencia al choque térmico, conductividad térmica y estabilidad morfológica. Esto ha abierto la posibilidad de mejorar otros campos, como la fabricación de moldes refractarios en la fundición del acero, concretamente para elementos de precisión, como por ejemplo las armas, dado que los productos obtenidos presentaban la valiosa cualidad de ajustarse con gran exactitud a los modelos que reproducen.

Las virtudes de los moldes refractarios, entre las que destaca la excelente calidad superficial de los resultados, la ha convertido en una técnica que se adecua perfectamente a las exigencias de la fundición artística, irrumpiendo en este contexto en los años 70.

El molde cerámico que es realizado en la fundición puede estar formado por sílice coloidal y una caolinita molturada (Molochite -200) que se aplica sobre un modelo perdido. Este es recubierto completamente con la papilla obtenida, y a continuación es rebozado con un refractario granulado, la Moloquita 50-80 dd: Este procedimiento es aplicado hasta conseguir el espesor deseado para el molde de cascarilla cerámica.

Como se ha mencionado inicialmente, la investigación se ha centrado en los productos que se emplean en la "Fonería". Sin embargo, también se ha mencionado y experimentado con otros materiales que son empleados en la realización de moldes. Por otro lado, se ha elaborado un listado con otros materiales considerando su posible utilidad en esta investigación.

Con todo ello se ha pretendido presentar los distintos materiales que son utilizados en la fundición de la cáscara cerámica, y especialmente aquellos que tengan un protagonismo relevante en esta tesis.

I.2.1. EL MOLDE DE CASCARILLA CERÁMICA PARA FUNDICIÓN

En el procedimiento tradicional de la cera perdida se requiere la ejecución de una serie de pasos. En primer lugar se elabora un modelo de cera implementado con un sistema de cilindros de cera que actuarán como futuros conductos, a continuación este modelo de cera se recubre con un material refractario (chamota o arena y yeso) configurando lo que denominamos como molde.

El paso siguiente consiste en realizar la cocción de este molde, en la que en primer lugar se licua la cera (cera perdida), luego se deshidrata la pasta refractaria del molde y finalmente se queman las ceras líquidas que impregnaban la pasta del molde. El resultado es un molde hueco, con un vacío interior, llamado cámara, que tiene la misma forma, pero en negativo, que el modelo original de cera.

El procedimiento continúa con el proceso de rellenado del molde con metal fundido (procedimientos de fusión de metal y de colada, o vertido, del mismo). Una vez que el metal se solidifica, en el interior del molde, este último se destruye para sacar el modelo metálico.

Este tipo de molde refractario ha evolucionado a lo largo del tiempo y ofrece distintas variantes. El sistema de fundición a la cera perdida ha evolucionado, y a día de hoy también se está utilizando otro tipo de material de moldeo en el que se sustituye la chamota y el yeso por otros productos que permiten conseguir un molde más liviano, y en opinión de algunos expertos de mejor calidad en alguno de sus aspectos. Esta nueva técnica se llama **cáscara o cascarilla cerámica**, en España, **closca ceràmica**, en Cataluña, **Ceramic Shell Casting**, en EEUU, **moule carapace**, en Francia, **conchiglia ceramica o guscio ceramico**, en Italia.

La cascarilla cerámica se conforma aplicando sobre el modelo de cera estratos de rebozado. Para ello se aplica en primer lugar y antes de aplicar las capas que constituyen el molde, un tensoactivo (goma laca o jabón). Esto se hace de esta manera para conseguir que el revestimiento cubra homogéneamente el modelo de cera²⁷.

A continuación se recubre el modelo utilizando una especie de barbotina o papilla y un rebozado granulado. La papilla o barbotina²⁸ se elabora con un aglutinante y un refractario.

- El aglutinante sirve como ligante para las partículas del refractario. Los productos que se emplean como aglutinante pueden ser: sílice coloidal, silicato de etilo y con menor frecuencia silicato de sodio.
- Los refractarios utilizados en la preparación de la papilla tienen una textura que recuerda a la harina (son llamados coloquialmente harina). Para obtener estos refractarios molturados se emplean diversos tipos de silicatos de aluminio (con sus variantes de Moloquita y alúmina) y también otros materiales como la arena de sílice y el circón.

La aplicación de esta capa de contacto aporta una gran calidad de registro y fidelidad en las reproducciones obtenidas²⁹.

El rebozado con grano, se realiza también con un refractario, pero de granulometría mayor. Para hacer este rebozado con grano se emplean distintas granulometrías de Moloquita o circón.

En el procedimiento de la cascarilla cerámica, la papilla se aplica sobre un modelo perdido (generalmente cera) aplicando un baño, mediante inmersión, vertido o impregnando toda la superficie del modelo con un pincel o esponja.

Generalmente, después de cada aplicación de papilla, se espolvorea, encima de la papilla aún húmeda, el refractario granulado que puede ser del mismo componente del refractario que conforma la papilla.

De esta manera el proceso de aplicación se realiza por capas, una primera capa de contacto registra la textura y forma del modelo y las siguientes engrosan y refuerzan el molde. La papilla de la primera capa sirve para reproducir fielmente la forma y la textura del modelo (alta moldeabilidad), y el rebozado posterior sirve para dar grosor y consistencia al molde. Este procedimiento de aplicación sucesiva de capas se continúa hasta conseguir el espesor deseado.

Una vez acabada la aplicación de la papilla sobre el modelo de cera, el molde se cuece. En el entorno más inmediato, el del horno de descere de la "Foneria" de F. BBAA de la Universidad de Barcelona, la cocción se realiza alcanzando una temperatura próxima a los 700°C, lo que permite convertir la cascarilla en material cerámico al "sinterizar" el material.

Este tipo de molde, como los otros utilizados para la cera perdida, es una modalidad de molde perdido. La cascarilla se destruye una vez que el metal líquido vertido en su interior se ha solidificado y acabada su función, con el fin de poder extraer la pieza de bronce u otro metal, se destruye y se retira la cáscara, o sea, se descascarilla la pieza.

²⁷ En el III capítulo se presentan de manera más detallada los distintos tensoactivos y sus procedimientos de aplicación sobre distintos materiales.

²⁸ Se denomina papilla al producto obtenido como resultado de la mezcla de un producto industrial que contiene sílice coloidal (en este caso, en suspensión acuosa) con un producto refractario de molturación muy fina. De la combinación de estos productos se obtiene un producto blanco fluido de consistencia parecida a la de una papilla líquida, al yogur líquido o a la cola blanca. Otros autores se refieren a este combinado con el nombre de barbotina, dada su aparente similitud con los combinados batidos, compuestos principalmente de agua y arcilla, y utilizados en la cerámica.

²⁹ El artista Ivan Theimer recubre directamente escorpiones y serpientes con el procedimiento de la cascarilla cerámica, lo que le permite obtener mayor fidelidad en los detalles de sus bronceos.

I.2.2. APLICACIÓN DE LA CASCARILLA CERÁMICA

Algunas fundiciones aplican en la tercera capa de papilla únicamente sílice coloidal, siguiendo dos procedimientos distintos:

- Se pincela la sílice coloidal sobre el modelo hasta que empieza a gotear (no puede absorber más).
- Se sumerge el modelo en la sílice coloidal líquida 20-30 segundos y se deja secar 1-2 minutos antes de la siguiente aplicación de papilla.

Este proceso refuerza los tres primeros estratos de papilla y rebozado: la sílice penetra en las tres capas creando un cuerpo único, fortaleciéndose la estructura.

Algunos fundidores recomiendan aplicar la sílice coloidal en cada aplicación de la capa (papilla y rebozado).

En otra variante para la realización del molde, la última capa carece de rebozado, pues este no añade resistencia y puede contaminar el metal fundido durante el vertido.

I.2.3. ESPESOR DEL MOLDE

El espesor del molde depende del tamaño de la pieza y del tipo de metal fundido que tiene que soportar. El espesor de cada capa varía también dependiendo de la composición cerámica (aglutinante-refractario) y del tamaño del grano del refractario.

Hay moldes de fundición donde las dos primeras capas de mezclas cerámicas se alternan con un rebozado de grano fino, para obtener un registro más fiel del patrón. El resto de capas de papilla se combina con un refractario de grano más grueso para dar volumen a la pared del molde.

Hay distintas líneas para la conformación del molde:

John Vandermeer valora como adecuado un espesor del molde de 5 a 12,7 mm. Por ejemplo una resistencia suficiente para cocción y descerado se consigue con 6-7 capas³⁰.

Para Ronald D. Young y Robert A. Fennell el grosor depende de la dimensión del patrón. Establecen 6 capas (3-4 mm) para moldes pequeños, 8 capas para medianos y 12 (1-1,5 cm) para grandes, para resistir el vertido del metal fundido³¹.

Según añadimos capas aumenta el tamaño de grano de fino a grueso, para aumentar el grosor del molde.

Dr. Juan Carlos Albaladejo, en su técnica de crisol fusible³², presenta el ejemplo de una pieza de 10 kg incluido el bebedero y la mazarota, en la que aplica un total de 6 capas, alternadas con el rebozado, en dos fases de cocción (tres capas en cada). En la tercera y quinta se aplica barbotina de grano grueso, y en el resto de grano fino.

El Dr. Joan Valle Martí del Departamento de Escultura de BBAA, propone a los alumnos el uso de una tabla de referencia para el recubrimiento del patrón, según la cual, dependiendo del tamaño del modelo de cera, se orienta al alumno sobre el número de capas de rebozado recomendadas, considerando un caso genérico. En esta tabla se incluyen las capas de rebozado, y también las de refuerzo con fibra de vidrio, sobre las que se habla en el apartado

³⁰ Vandermeer John, titular: Buntrock Industries 1176 Jamestown Road Williamsburg, Virginia 23185, US "Molde de fundición de precisión y método de fabricación" oficina Española de patentes y marcas. Número de publicación: 2247197. 10.11.2000 US 247935 P

³¹ Ronald D. Young, Robert A. Fennell. (2000). USA. Methods for Modern Sculptors. Ed First Printing, January ,

³² Albaladejo, J. C. (2003) Fundición a la cera perdida, Técnica de crisol Fusible. Santa Cruz de Tenerife. Ed. Departamento de pintura y escultura. Universidad de la Laguna.

siguiente. En la “Fonería” se utiliza para el rebozado un único grosor del grano, el de 50-80dd y éste se alterna con los rebozados de fibra de vidrio³³.

I.2.4. SECADO DEL MOLDE DE CÁSCARA CERÁMICA DE FUNDICIÓN

Durante el proceso de recubrimiento por capas del modelo de cera, o del patrón en general, la etapa del secado es fundamental. Cada capa del molde necesita consolidarse y ello se consigue inicialmente, mediante el secado. El secado tiene como objetivo eliminar el agua aportada por la sílice coloidal.

El tiempo de secado de la cáscara cerámica elaborada con la sílice coloidal depende de la temperatura, la humedad ambiental, y la velocidad de la corriente de aire alrededor de la cáscara cerámica, pero también de las dimensiones y la configuración de la cáscara cerámica y de la técnica de secado utilizada.

John Vandermeer de la industria Buntrock explica que el secado depende también de la complejidad del patrón (modelo): en las cavidades profundas es mayor el tiempo de secado de las capas de papilla. En determinadas fundiciones, para alcanzar un secado eficiente, se inyecta aire a presión con tubos flexibles en las cavidades de las piezas que se quieren fundir.

En general la cáscara cruda (sin cocer) es más resistente cuanto más profundo es el secado.

El tiempo de secado puede variar dependiendo del tipo y del porcentaje de aglutinante (sílice coloidal) y del grano utilizado de maloquita.

Para realizar el molde, cada capa de rebozado completo necesita un buen secado antes de añadir la capa siguiente.

El secado permite:

- Dar consistencia a cada estrato. Una capa excesivamente húmeda puede desmoronarse al aplicar la siguiente capa.
- Obtener una estructura más firme. Durante la aplicación de capas se debe manipular bastante el patrón, generalmente de cera, con sus coladas, con riesgo de rotura. Una capa bien seca aporta rigidez al conjunto del patrón y molde.

Una manera fácil de acelerar el proceso de secado, considerando los recursos de los talleres de la facultad, consiste simplemente en elevar la temperatura de la habitación hasta los 23-25 grados, valor que no debe sobrepasarse para evitar la dilatación de la cera (con alto coeficiente de expansión térmica), que podría llegar a romper la pared.

Los procesos de secado que se emplean habitualmente son:

- Secado al aire libre. Es un secado gradual que se debe a la temperatura del lugar y que varía según la humedad ambiente. Se puede demorar, dependiendo del caso, aproximadamente un día completo para la primera capa y 4-6 horas para las siguientes.
- Secado forzado. Se somete la pieza a una corriente de aire (fría, templada o ambiente). Cuanto mas potente es la corriente, más se acelera el secado, de esta manera cada capa se puede aplicar a los 15-20 minutos, dependiendo del tipo de sílice coloidal. Se emplean ventiladores en un secadero utilizando el aire de la dependencia. Un secador de pelo se puede utilizar en algún caso.

Sobre el procedimiento de secado, en la “Fonería” de Barcelona se observaron las ventajas que ofrecía un secado intenso y rápido. Como consecuencia de las primeras investigaciones realizadas con respecto a la aplicación de refuerzos estratificados de fibra y las observaciones

³³ Valle, J. (coord), López, P. y Marcos, C. (2009). Evolución e introducción del sistema de cáscara cerámica exprés con refuerzo generalizado de fibra de vidrio en los talleres de fundición de las facultades de Bellas Artes de Barcelona, Cuenca y Valencia. En Marcos, C. (coord): Libro de Actas del II Congreso Nacional de Investigadores en Fundición Artística, Facultad de Bellas Artes de Valencia, UPV.

con respecto al secado rápido³⁴, los profesores de fundición de Barcelona y de Valencia realizaron una nueva experiencia que dio origen a lo que ellos denominaron “Cascaquilla Cerámica Express o CCE³⁵”. El procedimiento se basaba en el uso de los materiales propuestos en Barcelona: un tipo de sílice coloidal (PW 50), un refuerzo estratificado de fibra de vidrio y un secado intenso y rápido que se podía reducir hasta los 10 minutos por capa. Las Universidades de Barcelona, Valencia y Cuenca han experimentado, en los últimos años, este sistema y han realizado diferentes talleres para la sistematización de su uso. En estos talleres experimentales, han utilizado como aglutinantes tanto sílice coloidal PW 50 como el tradicional Hispasil 1731. Este proceso ha variado en cada Universidad, adaptándose a las distintas necesidades, procedimientos técnicos y posibilidades logísticas³⁶.

El secado que se aplica en la “Fonería” de BBAA de Barcelona, consiste en un procedimiento rápido de las capas cerámicas por exposición directa al aire a temperatura ambiente, generado con ventiladores potentes que deshidratan la sílice coloidal de la cascaquilla cerámica rápidamente.

Capas	Papilla	Rebozado	Tiempo de aplicación
1 capas:	Papilla de grafito	Grano fino	15 minutos
2 capas:	Papilla blanca	Grano fino	10 minutos
3 capas:	Papilla blanca	Grano grueso	30 minutos
4 capas:	Papilla blanca	Fibra de vidrio	45 minutos
5 capas:	Papilla blanca	Fibra de vidrio	10 minutos
6 capas:	Papilla blanca	Grano grueso	Tres horas hasta la hornada

Tabla I.1. Ejemplo de tiempos de secado de la cascaquilla cerámica empleados en un caso concreto en la “Fonería” de BBAA de Barcelona, donde se pueden observar tiempos de secado muy reducidos. Método Cascaquilla Cerámica Express (CCE) con sílice coloidal PW 50, fibra de vidrio y secado rápido.

Existen otros sistemas para agilizar el proceso de secado, como el proyectado direccional y localizado de corrientes de aire mencionado anteriormente, expuesto por John Vandermeer de la industria Buntrock u otros como el de Henry M. Roelofs y William J. Lafferty³⁷ que desarrollaron un proceso de secado rápido mediante el uso de óxido hidratado como desecante.

En las cascaquillas cerámicas en las que se usa silicato de sodio como aglutinante el proceso de secado es distinto al de la sílice coloidal y más laborioso. La Universidad de Ingeniería de Río Cuarto en Argentina ha investigado sobre la permeabilidad y el secado del molde hecho con silicato de sodio³⁸: para gelificar rápidamente este aglutinante emplean una cámara de gas con atmósfera rica en CO₂, reproduciendo el sistema de curado que se aplica en la fundición a la arena con silicato de sodio.

I.2.5. DESCERADO Y COCCIÓN DEL MOLDE DE CÁSCARA CERÁMICA PARA FUNDICIÓN

Una vez recubierto el patrón, el molde se somete a una cocción en tres etapas:

³⁴ Presentadas por el Dr. Valle en el primer congreso de fundición de Valencia. VALLE, J.: op. cit.

³⁵ Valle, J. (coord); López, P. y Marcos, C. Op. cit. (pp.281-288).

³⁶ Ibídem

³⁷ M. Roelofs, H., y J. Lafferty, W. (1971). Titular: Nalco Chemical Company, Chicago. “Shell Moldes” United States Patent: 4 Enero del 1971. N.º 3,713,473

³⁸ Olviedo O, Cotella N, Varela P y Kohl R. (1996). Permeabilidad y secado de molde para microfundición, aglomerados con silicato de sodio. Revista de Información tecnológica Ed. José O. Valderrama. Centro de información Tecnológica La Serena-Chile Vol.7 nº4

1. Descerado (hasta unos 200°C). Como descerado entendemos la evacuación de la cera líquida.
2. Quemado de los restos orgánicos (hasta los 600°C o 700°C). En esta etapa se produce la carbonización y desintegración del material licuado que ha impregnado el molde y que formaba parte del patrón³⁹.
3. Cocción del molde (en este caso se cuece en torno a los 700°C, llegando a superar en ocasiones los 1000°C). La cocción somete el molde a una alta temperatura para fortalecer su estructura, de manera que soporte la presión del metal fundido en su interior.

I.2.5.1. DESCERADO

Para descerar se puede emplear un método de descerado rápido, aplicando lo que se conoce como el choque térmico. El procedimiento se realiza introduciendo el molde de cascarilla cerámica con patrón de cera incluido en un horno caliente (en torno a 700°C), de esta manera el primer impacto del calor funde rápidamente la capa superficial de la cera, la que está en contacto con la pared del molde, dejando un espacio entre la capa interior de cera y la capa de cascarilla cerámica. A medida que el resto de cera se calienta, se produce una dilatación y este aumento de volumen dispone del espacio liberado, sin empujar con ello la pared del molde todavía crudo. Otro método para descerar un molde con un patrón de cera, por choque térmico, consiste en aplicar directamente sobre la pieza de cascarilla cerámica rellena de cera, una llama con un quemador o soplete.

Para conseguir un descerado gradual, se puede disponer el molde boca abajo, apoyándolo sobre el bebedero en un horno programado para alcanzar en una primera etapa una temperatura de 150-250°C. La cera se va calentando progresivamente hasta fundirse y fluye por los conductos de colada y por el bebedero hasta que cae al recipiente de recuperación del horno. El tiempo de descerado varía en función del horno, en nuestras experiencias oscila entre 45 minutos y una hora, dependiendo del tamaño del patrón.

El descerado a presión es otro recurso utilizado industrialmente, y que también se aplica en las fundiciones de los centros docentes. Para ello se utiliza una olla a presión de grandes dimensiones, un autoclave⁴⁰ y con ella, la temperatura y la presión del vapor provocan la salida de la cera sin afectar al molde.

También se puede usar un microondas en ausencia de elementos metálicos (proceso de Mr. David Reid mejorado por Dr. Juan Carlos Albaladejo). El Dr. Juan Carlos Albaladejo ha investigado el método del microondas para descere de la cascarilla cerámica⁴¹ y continúa, en la actualidad, estas investigaciones con microondas aplicándolas a la fundición.



Figura I.1. Descerado mediante soplete de gas

³⁹ Ambos procesos se producen en el interior del molde cerámico, originando una cámara vacía, que responde al volumen y a la textura del patrón en negativo.

⁴⁰ Aparato que sirve para esterilizar objetos y sustancias situados en su interior, por medio de vapor y altas temperaturas.

⁴¹ Albaladejo, J.C. (2007). El descere con microondas en la cascarilla cerámica. "La fundición artística en la universidad española: La investigación, año 2006". Valencia Ed. Grupo de Investigación Nuevos Procedimientos Escultóricos, (pp.105-148).

Un método alternativo de descerado que resuelve el problema de la dilatación térmica de la cera es el descrito por Francisco Lucidi en su libro "Fonderia artistica a cera persa"⁴², en él aconseja ponerlo en un congelador antes de descerar el molde. De esta manera la cera reduce su volumen, creando un margen de contracción de ésta, dando la posibilidad durante el descerado de salir afuera sin afectar al molde.

I.2.5.2. QUEMADO

Después de eliminar la cera del interior del molde, se procede a quemar los restos de aceites, carbonillas y restos orgánicos con los que la cera ha impregnado el molde. Para ello se aumenta la temperatura progresivamente hasta que estos restos se consumen, lo que se puede apreciar al dejar de desprenderse humos y olores.

En el caso en el que el patrón esté constituido de otros materiales distintos a la cera (distinto polímeros, madera y derivados, etc.), éstos se derriten y/o queman más lentamente; el tiempo en este caso se aumenta hasta que desaparecen los humos y los olores, en las propias experiencias unas tres horas.

Paralelamente al quemado se elimina la humedad atrapada en el interior del molde.

I.2.5.3. COCCIÓN

Tras el quemado de los restos orgánicos de la cera, u otros materiales, se alcanza la etapa de cocción. En torno a los 700°C la cascarilla cerámica adquiere una consistencia suficiente como para soportar la presión del metal fundido. Esta cocción es adecuada para lograr una resistencia y solidez aptas para contener la presión del metal fundido y para facilitar el descascarillado posterior.

En algunos procedimientos para la fundición del bronce, el molde se llega a cocer por encima de los 1000°C grados; para fundiciones de metales férricos pueden alcanzarse incluso temperaturas más elevadas.

I.2.5.4. RECOCCIÓN DESPUÉS DE LA RESTAURACIÓN

Tras la cocción, en algunos procedimientos es necesario restaurar los moldes aplicando capas de papilla y rebozados de fibra de vidrio, acompañados en ocasiones de grano, proceso que coloquialmente se conoce como el paso por la UVI. Esta restauración requiere una segunda cocción realizada directamente con un quemador, o bien mediante una recocción en horno.

I.2.5.5. CURVA DE DESCERADO Y COCCIÓN

En general el proceso de cocción de la cascarilla cerámica se realiza como se ha mencionado en tres etapas, y así se reflejará en las curvas de cocción.

Con el procedimiento de choque térmico el horno se calienta a temperatura máxima y la pieza se introduce cuando el horno ha alcanzado esta temperatura, por tanto la curva de descerado y cocción se mantiene en una meseta plana, en torno a los 700°C.

En las fundiciones donde el proceso de descerado se realiza en un autoclave o en una cámara independiente del horno de cocción, la curva de descerado tendrá forma de meseta, iniciando el proceso a temperatura ambiente y alcanzando la temperatura de ebullición del agua (dentro del autoclave se alcanzará los 100°C, y si se opera en una cámara sin presión, la temperatura puede oscilar en torno a los 80°C). Esta temperatura se mantiene durante un buen rato hasta que se descera totalmente la cascarilla cerámica y luego se puede iniciar el proceso de enfriamiento, hasta alcanzar de nuevo la temperatura ambiente.

En estos casos, el quemado y la cocción se realizan posteriormente en el horno de cocción. Dado que generalmente se cuecen cascarillas limpias, sin presencia de otros materiales, la

⁴² Lucidi, F. (1994). Fonderia artistica a cera persa. Milan. Ed Ulrico Hoepli, 4ª edición, (p.85)

cocción puede tener un ritmo vivo y realizarse en pocas horas. Esta curva tiene un ascenso rápido, una meseta relativamente corta y un descenso natural. Para este tipo de cocciones, los hornos de fibra cerámica, mucho más ágiles que los de refractario, funcionan especialmente bien.

En las fundiciones donde el proceso de descerado, quemado y cocción del molde se realiza todo en un solo horno, la curva presenta diferencias importantes. En estos casos, el descerado gradual mantiene un ascenso suave y se mantiene en una meseta prolongada en torno a unos 200 grados, de manera que todo el horno pueda alcanzar una temperatura suficiente de descerado en todas sus zonas, especialmente en la zona baja, que es en donde se sitúan las piezas. Acabada la etapa de descerado, se inicia la del quemado y cocción en un solo proceso de ascenso continuado hasta alcanzar la meseta de mantenimiento de cocción, en torno a los 700°C, esta meseta tampoco es necesario que se prolongue en el tiempo. Alcanzada la meseta de cocción, se puede iniciar un descenso lento de temperatura hasta el enfriamiento del horno.

En la “Foneria” de la facultad de BBAA de Barcelona el descerado y quemado completo del material que forma el modelo y la cocción del molde de cascarilla cerámica se producen en un único proceso, con un horno eléctrico programable. Una de las curvas empleadas, por el técnico Rubén Campo, es una rampa de calentamiento de seis días, llegando a un máximo de 750°C. Es un proceso lento, pues:

- Los materiales combustibles del patrón requieren permanecer más tiempo en el horno para poder eliminar los residuos adheridos a la pared interna del molde cerámico. En caso contrario, estas impurezas afectan la colada y a la forma final de la pieza.
- En la “Foneria” se suele utilizar un molde mixto, es decir un molde de cascarilla cerámica con un núcleo realizado con escayola y arena (pasta utilizada en el método tradicional o italiano), éste requiere un tiempo prolongado de deshumidificación.

La curva de cocción de 6 días comprende el descerado, quemado del modelo y la cocción del molde:

1. Se eleva la temperatura lentamente a 350°C para descerar.
2. Se mantiene a 350°C durante tres días.
3. Se sube lentamente hasta alcanzar los 750°C.
4. Se mantiene durante dos días aproximadamente a 750°C.
5. Se baja la temperatura lentamente, se enfría durante uno o dos días, hasta alcanzar la temperatura ambiente.

I.2.6. APORTACIONES DEL MOLDE DE CASCARILLA CERÁMICA AL PROCESO DE FUNDICIÓN.

Como se ha visto, la cascarilla cerámica es un molde desechable o perdido, que se destruye para recuperar de su interior la pieza fundida. Es una técnica empleada para reproducir un objeto en distintos metales.

Las características que lo convierten en un material ideal para su uso como molde de fundición, y que se destacan en este apartado por su especial trascendencia dentro de este proyecto, son:

- La cáscara cerámica tiene una alta calidad de registro de la superficie del modelo.
- Es de porosidad elevada, por lo tanto es permeable a los gases. La cascarilla cerámica permite evacuar los gases que se producen durante la colada y también la salida del aire atrapado en el interior del molde. La porosidad de la cáscara cerámica se debe en gran parte a la introducción del árido⁴³.

⁴³ La porosidad es una de las consecuencias del proceso de rebozado con grano. Los intersticios que permanecen en el interior de la cáscara cerámica permiten una evacuación de los gases. A la porosidad de la cascarilla, la Dra Carmen Marcos dedica un capítulo importante de su tesis. Op cit.

- Es un material refractario que soporta perfectamente la introducción del metal fundido en su interior.
- Es resistente al choque térmico⁴⁴, tiene una conductividad térmica suficiente y es estable morfológicamente.
- Es un molde liviano y fácil de manejar.
- Se convierte en un material resistente durante el descerado.
- El molde se puede conservar indefinidamente hasta que se realice la colada.
- Una característica notable es que se puede restaurar con facilidad; es un material compatible consigo mismo tanto antes como después de su cocción.

⁴⁴ Esfuerzo que se desarrolla en un material de manera repentina al sufrir un cambio brusco de temperatura.

I.3. MATERIALES UTILIZADOS EN EL MOLDE DE CASCARILLA CERÁMICA

I.3.1. LOS AGLUTINANTES

Los materiales encargados de dar cohesión a los productos refractarios utilizados en la papilla de la cascarilla cerámica tienen como componente fundamental el dióxido de silicio (sílice) y son coloides.

I.3.1.1. LOS COLOIDES

“El nombre coloide proviene del griego kolos que significa que puede pegarse”⁴⁵. Este nombre hace referencia a la tendencia que tienen algunos coloides a formar coágulos de forma espontánea.

En los coloides podemos distinguir: el material disperso, o sea, el conjunto de las partículas de la sustancia disuelta (soluto), y el medio dispersante que está constituido por las moléculas, en este caso, del líquido solvente (dispersante).

En los coloides, las partículas de los solutos son más grandes que las moléculas del medio dispersante. Para clasificar una sustancia como coloidal, las dimensiones de las partículas del soluto han de estar comprendidas entre 10 y 100 nm (un nanómetro es un 1×10^{-9} m, es decir, 0'000000009 metros) mientras que el tamaño de las moléculas en solución oscila entre 0.1 y 10 nm.

Una dispersión coloidal, en general, se denomina también sol; cuando el medio es agua, el sistema se denomina hidrosol y cuando es alcohol, alcosol.

“Los soles de sílice coloidal pueden prepararse a partir de silicatos de sodio por medio de un intercambio de iones, diálisis y otros medios a sílice activada”⁴⁶.

Un sol, cuando evapora el medio dispersante, pasa a ser un gel, es decir gelifica (se podría entender la gelificación como un proceso de coagulación) convirtiéndose en una masa gelatinosa, incluso sólida, con cierta fuerza mecánica y cierta elasticidad. El hidrosol se transforma en hidrogel, y alcosol en alcogel.

El periodo de tiempo entre la fase de líquido a sólido se denomina envejecimiento. En esta fase el gel se encoge expulsando el solvente, y de esta manera se obtiene una red gelatinosa que va aumentando de viscosidad gradualmente. Esta viscosidad va en aumento hasta que se convierte en un material rígido y poroso, si además, el gel se trata térmicamente, se elimina totalmente el agua dando lugar a una estructura definitiva, obteniendo un material policristalino o amorfo.

Los coloides, cuya parte dispersante está formada por agua, pueden tener dos tipos de afinidad con el medio de dispersión según la atracción con el mismo:

- Los liófilos (hidrófilos) tienen una atracción considerable entre la fase dispersa y el material constituyente del medio líquido; son estables. Con la evaporación del medio líquido, estos coloides se mantienen como sistemas moleculares dispersados, es decir el proceso es reversible pudiéndose separar, secar y regenerar, el soluto del medio, incluso volver a mezclar este soluto con el medio acuoso.
- Los liófilos (hidrófobos) con un grado de atracción débil, son inestables y para ellos, el proceso de gelificación es irreversible: una vez que el medio acuoso está separado del soluto, éstos no pueden volver a mezclarse.

⁴⁵ <http://www.textoscientificos.com/quimica/coloide>

⁴⁶ Basso, A., S. y Conci, F. S. (2007). Producción conjunta de silicato de sodio y derivados. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba (p. 14)

I.3.1.2. PRODUCTOS DERIVADOS DEL DIÓXIDO DE SILICIO

El óxido de silicio y los silicatos son extraordinariamente abundantes en la naturaleza, hasta tal punto que sus combinaciones representan alrededor del 90% de la corteza terrestre. El silicio, por sí solo, constituye un 28% de la corteza. En la naturaleza no existe en estado libre, sino que se encuentra en forma de dióxido de silicio y de silicatos complejos. Los minerales que contienen silicio constituyen cerca del 40% de todos los minerales comunes, incluyendo más del 90% de los minerales que forman rocas volcánicas.

La sílice coloidal⁴⁷ contiene dióxido de silicio y se clasifica como un hidrosol liófilo, dado que es un coloide con base de agua y una vez deshidratado, su estado es irreversible.

“Si en un sol constituido por sílice y agua (hidrosol) se elimina parcialmente el agua se forma un gel constituido por una masa gelatinosa de SiO_2 fuertemente embebido de agua; si se elimina completamente el agua aparece un sólido pulverulento cuyas partículas son de tamaño coloidal que suele designarse gel de sílice”⁴⁸.

La sílice coloidal es una suspensión de partículas amorfas de sílice muy fina, uniforme y discontinua⁴⁹. Estas partículas están suspendidas en un medio ligeramente alcalino, habitualmente agua, con una pequeña parte de estabilizante alcalino (como amoníaco o sosa) o un ácido desionizado.

Estas partículas de sílice tienen una carga superficial negativa, lo que produce una repulsión entre las partículas del dispersante y las del soluto, se supone que esto evita que las partículas del soluto se depositen con el tiempo, dando lugar a una suspensión estable.

La sílice coloidal se suele fabricar disociando la molécula de silicato de sodio, de modo que las partículas de sílice quedan dispersas en el medio acuoso. Parte del sodio queda en el producto resultante como residuo y, una vez evaporada el agua, este sodio juega un papel crucial en el proceso de consolidación definitiva de este material mediante la aplicación de calor (lo que podemos considerar como un proceso de ceramización)⁵⁰.

La sílice coloidal se utiliza en la cascarilla cerámica para unir las partículas de material refractario finamente molturado, constituyendo con él, lo que coloquialmente se denomina como papilla. La sílice coloidal actúa como aglutinante en la papilla. El aglutinante tiene un papel crucial en la realización de la cáscara cerámica: durante el secado de la papilla, la sílice coloidal une y compacta las partículas de la maloquita molturada, enlaza las distintas partículas de la harina refractaria contenida en la papilla, formando una red, de gel, que sostiene el refractario cerámico. Una vez seca la papilla, y tras un proceso de cocción, alcanza su estado definitivo cerámico.

En la “Fonería” habitualmente se utiliza en la actualidad un tipo de sílice coloidal (PW 50) cuyo grueso de partícula es de 50nm. Anteriormente, como en el resto de las fundiciones de las otras facultades españolas de Bellas Artes, se ha utilizado el Hispasil 1731 cuyo grueso de partícula es de 7nm. Sobre estos productos se hablará con mayor amplitud al principio del capítulo II. También se hablará en este capítulo de un silicato de sodio, utilizado para la fundición a la arena y también para la fundición a la cáscara cerámica⁵¹.

⁴⁷ La sílice coloidal es el aglutinante de uso más extendido en la técnica de la cascarilla cerámica.

⁴⁸ Valenzuela Calahorra, C. (1995). Química general, Introducción a la química teórica. Ed. Universidad Salamanca (p. 336).

⁴⁹ Su diámetro (el de las partículas de sílice) promedio es de 50 nm, que corresponde a una superficie específica comparativamente pequeña de 50 m²/g. Las partículas más pequeñas tienen las correspondientes superficies específicas mayores; el grado de menor diámetro medio, 5 nm, tiene una superficie específica de 380 m²/g”. Alfonso R, G. (2003) Remington Farmacia, Ed. Medica Panamericana S.A 20ª edición (p. 342)

⁵⁰ “Definimos el sílice coloidal como una ‘cerámica líquida’, dadas sus características, si bien la denominación común del sílice coloidal es de ‘vidrio líquido’”. Op cit. Marcos Martínez, C. (p. 273).

⁵¹ La Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería (Argentina) Investiga sobre el silicato de sodio como aglutinante para la conformación de molde en cascarilla cerámica.

I.3.1.3. OTROS AGLUTINANTES DE SÍLICE COLOIDAL

Existen múltiples productos comercializados de sílice coloidal que no utilizamos en la “Fonería”, pero que añadimos por si pudiera ser de interés para otros investigadores:

- Sílice Megasol de Wesbond, Inc. Wilmington, DE.
- Sílice MegaPrime de Buntrock Industries, Inc. Williamsburg, VA.
- Sílice Nyacol 830 de EKA Chemical Co
- Sílice Nalcoag 1130 y Nalcoag 1030 de Nalco Chemical Co.
- Sílice Ludox SM 30 y Ludox HS-30 de W.R. Grace & Co.
- Sílice Prime de Química Massó. Almacén: Vilafranca del Penedès
- Sílice Coat de Química Massó. Almacén: Vilafranca del Penedès

Estos productos tienen distintos grosores de partícula, y distinto porcentaje de dispersión en la sustancia acuosa.

I.3.1.4. SILICATO DE ETILO

Este producto es alcosol, es decir un coloide cuyo medio de suspensión es alcohol etílico. El silicato de etilo se emplea también como aglutinante en los procedimientos de fundición a la cascarilla cerámica.

Tanto el silicato de etilo como otros múltiples productos comercializados de sílice coloidal no se utilizan sistemáticamente en la “Fonería”⁵²,

En fundición se utiliza como aglutinante a la hora de preparar la papilla de la cascarilla cerámica. En esta investigación, este producto no ha sido utilizado dado que por razones de seguridad presenta dificultades en su manipulación y necesita una infraestructura adecuada, no disponible en las instalaciones de “Fonería”. Presenta alguna dificultad para mantener la consistencia del empaste a causa de la rápida evaporación del alcohol.

Riesgos y medidas de prevención

Riesgos: El alcohol, al evaporarse, puede formar una mezcla explosiva. Además, los vapores de alcohol etílico que emanan son tóxicos. Puede causar irritación temporal en la piel. Es aconsejable guardar el producto a una temperatura de 16-17°C en el armario de inflamables.

Este producto presenta riesgos durante su manipulación y necesita de una infraestructura para su uso, cabinas de extracción y lugares bien ventilados.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Para manejar este material, es aconsejable el uso de guantes, ropa de trabajo con manga larga, gafas protectoras y protección facial. Es necesario utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados, con cabina de extracción (ventilación local y general) y, si fuera necesario, mascarilla con el filtro indicado.

I.3.2. LOS REFRACTARIOS

Los materiales refractarios son aquellos con resistencia pirosfópica, es decir, aquellos materiales que soportan altas temperaturas sin modificar sus propiedades físico-químicas, es decir, sin fundirse o reblandecerse, sin cambiar de estado ni descomponerse.

Los materiales refractarios utilizados en la fundición tienen su ámbito de aplicación general en la fabricación de hornos, crisoles y en la elaboración de moldes. En algunos casos estos

⁵² Se aportan, por si pudiera ser de interés para otras investigaciones: Silbond 40 (contiene 40% de sílice) Química Massó; Massosil 375 (21% de sílice) Química Massó; Massosil 375 E (21% de sílice) Química Massó; AAZ18 (18% de sílice) Química Massó.

materiales de fundición sufren transformaciones físico-químicas por debajo de los 1500°C que determina la norma UNE 150 R836-68⁵³, aun así se les denomina refractarios.

En los refractarios, dependiendo de su uso, se valoran las siguientes propiedades: la resistencia a la compresión, la temperatura de reblandecimiento, la dilatación lineal en caliente, la resistencia a los cambios bruscos de temperatura, la resistencia a la acción de las escorias y el gas y la conductividad térmica. Dependiendo de ellas, los materiales se pueden utilizar para una función o para otra.

Los refractarios se clasifican de distinta manera según su composición química, sus propiedades, entre ellas las ácido-base, su porosidad, su proceso de fabricación, las características físicas del producto acabado y su empleo. Capello⁵⁴, como otros autores, clasifica los materiales refractarios en tres categorías atendiendo a su composición química o su respuesta química ante de los factores usuales de los hornos, y distingue entre refractarios ácidos, básicos y neutros, dada la tendencia a reaccionar de los dos primeros y la estabilidad de los terceros⁵⁵.

Existen diferentes tipos de sustancias químicas con un grado alto de refractariedad, algunas de ellas tienen tendencia a oxidarse (los carburos, los nitruros, los silicuros, los sulfuros, los boruros) por lo que son de escasa utilidad. Otras sustancias, los elementos simples, si se utilizan como refractarios, el carbono es el más refractario.

Pero los más utilizados, sin duda alguna, son algunos óxidos, un gran número de ellos, a pesar de tener un punto de fusión alto, que puede alcanzar los 1725°C, se descomponen y son caros, por lo que su uso es restringido, mientras que otros como el óxido de manganeso, el de cromo, el de torio (que funde a 3000°C), el de aluminio o el de sílice, sí son aprovechables como materiales refractarios. Entre los óxidos más útiles hay que destacar en primer lugar a la sílice y los refractarios silicoaluminosos, sin dejar de mencionar otros como la silimanita, la magnesita, la dolomita y la cromita, en fundición también el grafito y el carburundo. La mayor parte de los refractarios son materiales cerámicos fabricados con óxidos de elevado punto de fusión: SiO₂, Al₂O₃, Mg O y Cr₂O

Los materiales base, generalmente utilizados para la fabricación de los refractarios son de origen natural, es decir, minerales.

Atendiendo a su origen se establece otra clasificación de los refractarios: los materiales como los granitos y las areniscas, las cuarcitas, la piedra pómez, la grava, etc son refractarios de origen natural. El más relevante de estos refractarios naturales es la arena de sílice que es el más común y ampliamente utilizado. Se emplean en estado bruto sin tratamiento, tras un proceso de purificación. Por otro lado, los refractarios artificiales requieren proceso de elaboración minucioso, lo que permite conseguir un producto refractario de calidad adecuada⁵⁶.

⁵³ La norma UNE (Unificación de Normativas Españolas) 150 R836-68 define a los materiales refractarios como aquellos productos naturales o artificiales que resisten una temperatura de 1500°C o superior sin modificar sus propiedades físico-químicas.

⁵⁴ Capello, E. (1966). Barcelona. Tecnología de la Fundición, Ed: Gustavo Gili,

⁵⁵ Entre los refractarios ácidos predomina la sílice Si O₂, reacciona con los refractarios, cenizas, escorias, o fundentes básicos, por eso no se pueden mezclar y no son atacados por los ácidos. Entre los refractarios básicos predomina el óxido de calcio CaO o de magnesio MgO, reacciona con los materiales ácidos y no se puede mezclar con estos. Y entre los refractarios neutros predomina la alúmina (sesquióxido de aluminio Al₂O₃), la silimita, el carborundo, la cromita, o el grafito. Según sus propiedades ácido-base, los refractarios de sílice, silico aluminosos, de carburo de silicio, de circonita y de silicato de circonio, que se emplean en la fundición, son "refractarios ácidos" que no son atacados por compuestos ácidos.

⁵⁶ Para elaborar refractarios artificiales se sigue un proceso de tratamiento similar al siguiente: tras la extracción del mineral se realiza un lavado, que consiste en eliminar los materiales solubles que podrían actuar como fundentes disminuyendo las propiedades del refractario fabricado. A continuación se somete a una cocción para eliminar los carbonatos en forma de CO₂ y el H₂O de los hidratos presentes en la materia prima. Es fundamental eliminar estas sustancias que podrían provocar la rotura del refractario durante su uso. El siguiente paso de la concentración de este material es la trituración y el cribado consiguiendo distinto tipo de granulometría de chamota. En el procesado industrial, los minerales pierden

Dentro de los refractarios observamos productos comerciales y utilizaciones distintas de los mismos, entre estos productos cabe destacar el ladrillo. El ladrillo refractario en tanto que elemento modular para la construcción de hornos y moldes, es desde la revolución industrial un elemento fundamental. Con los distintos materiales refractarios, mezclando ácidos, con básicos y con neutros, se sintetizan una gran variedad de ladrillos refractarios aunque también es cierto que algunos de ellos se fabrican con el producto procedente de la cantera más próxima.

Por lo que a esta investigación respecta, una mención especial merecen las chamotas. A partir de los ladrillos se pueden obtener productos triturados, que reciben el nombre de chamotas, aunque también son conocidos como picadizos. Las chamotas se obtienen mediante fractura y es por ello que su textura es rugosa, lo que como se podrá observar favorece el agarre de los ligantes. La trituración puede ser basta, fina o molienda, consiguiendo distinto tipo de granulometría de chamota. Los granos al ser seleccionados mediante un cribado sucesivo se comercializan en distintos tamaños. Mediante un proceso de trituración y tamizado selectivo y riguroso se consigue uno de los materiales más importantes utilizados en este trabajo y sobre el que se tratará más adelante, la Moloquita.

Otros materiales refractarios como los cementos, los morteros o por ejemplo las fibras cerámicas tienen una utilidad fundamental en la elaboración de hornos en general y por supuesto en la fundición, no obstante no van a recibir un tratamiento más amplio dado que su aplicación en este proyecto no se ha considerado.

I.3.2.1. MATERIALES REFRACTARIOS UTILIZADOS HABITUALMENTE EN LA CASCARILLA CERÁMICA.

Los refractarios más utilizados en fundición a la cascarilla cerámica se pueden agrupar en dos tipologías: los refractarios silíceos, y los silicicoaluminosos⁵⁷. Todos ellos se utilizan en la preparación de la papilla o en los rebozados con grano. Existen también otros refractarios utilizados con menor intensidad o frecuencia, como son los aluminosos, el grafito o el talco, y a todos ellos se les dedicarán los siguientes apartados.

I.3.2.1.1. LOS REFRACTARIOS SILÍCEOS

En este grupo se incluyen la sílice y los silicatos, ambos compuestos de silicio y oxígeno.

I.3.2.1.1.1. Sílice

La sílice (óxido de silicio, SiO_2) es un componente básico, y muy abundante en la tierra y se puede encontrar como cuarzos, areniscas, granitos, mármoles y muchos otros minerales. Las materias primas para la fabricación de los refractarios de sílice son la piedra arenisca y la cuarcita, que casi en su totalidad son de sílice (SiO_2).

- a. La sílice existe en forma cristalina (cuarzo, cristobalita y tridimita) y en forma amorfa (vidrio). Ambos estados son consecuencia de procesos de solidificación de ritmo distinto, lento para la sílice cristalina, y rápido para la sílice amorfa.

sus características físico-mecánicas originales. Se suelen emplear para dar más resistencia a materiales cerámicos, para la producción de ladrillos para hornos (resistentes al calor) o como material abrasivo.

⁵⁷ Marcos Martínez, C. Op. cit. Tesis doctoral. (p. 252) "hace una recopilación de los diferentes tipos de refractarios que se emplean habitualmente para la realización de la cascarilla cerámica, explicando su potencialidad para emplearlos en fundición "Los refractarios más ampliamente utilizados en cascarilla cerámica son de tipo silíceo, como el propio sílice, el circón y varios silicatos aluminicos compuestos de mullita y sílice libre. Estos tres tipos, a los que se añade la alúmina, combinados de diferentes formas, asumen la totalidad de las aplicaciones. La alúmina, de uso especial para fundición de superaleaciones, se considera normalmente demasiado cara para colar aleaciones normales. La sílice, el circón, los silicatos de aluminio y la alúmina se emplean tanto en las barbotinas refractarias como en versión granulada para aplicación de estucos. A este grupo de protagonistas podemos añadir un par de refractarios que cumplen funciones secundarias, pero no por ello desechables: el grafito y el talco. A continuación desarrollamos las características de cada uno de ellos."

- b. La sílice libre cristalina: es el dióxido de silicio cristalizado (SiO₂). La disposición espacial de las moléculas de sílice (cuarzo) es la de una estructura cristalina, su temperatura de fusión, en tanto que sólido cristalino, está bien definida. Sin embargo, la estructura de la sílice amorfa (vidrio obtenido por la fusión del cuarzo) es la de un sólido amorfo y su temperatura de fusión se produce en un intervalo de temperatura, es decir, se ablanda progresivamente aumentando su tendencia a deformarse hasta fundirse⁵⁸.
- c. La sílice no existe libre en la naturaleza, como dióxido se encuentra con estructura cristalina en varias formas de cuarzo: cuarzo, amatista, cristal de roca, arena y con estructura amorfa en forma de ópalo.

Por lo que afecta a los procesos de fundición, la arena de sílice cristalina se utiliza en las operaciones de moldeo en fundición a la arena. Sin embargo, la sílice utilizada en cascarilla cerámica se elabora fundiendo cuarzo y solidificándolo rápidamente hasta lograr un vidrio que se moltura. El resultado es una arena de vidrio que difiere considerablemente de la arena de cuarzo, especialmente porque la sílice amorfa tiene una coeficiente de dilatación bajo, mientras que la sílice cristalina lo tiene elevado⁵⁹. Por otro lado, la menor toxicidad de la sílice amorfa con respecto a la sílice cristalina es un factor determinante en su uso.

Riesgos de la sílice cristalina y medidas de prevención

El cuarzo es la forma más común de la sílice cristalina, también se puede encontrar en forma de cristobalita y de tridimita, estas dos últimas más dañinas. Por el contrario, la sílice amorfa está considerada como de baja toxicidad.

Se debe tener en cuenta que una exposición prolongada o intensa al polvo con sílice cristalina respirable puede causar silicosis (fibrosis nodular pulmonar por acumulación de partículas) Y cáncer de pulmón (según la IARC⁶⁰, aunque no para todos los tipos ni todas las condiciones de trabajo)⁶¹.

La sílice en sus formas cristalinas, causa un tipo de fibrosis pulmonar conocida por "silicosis", con formación de nódulos en el tejido pulmonar alrededor de los vasos sanguíneos, en la zona de los bronquiolos respiratorios. Los síntomas de la silicosis no son específicos de ella, por lo que puede no ser detectada durante algún tiempo. Puede producirse durante cortos períodos de exposición, irritaciones en las vías respiratorias, tales como bronquitis, laringitis, etc. Sin embargo, la silicosis continúa desarrollándose aún después de haber cesado la exposición. En su forma más aguda (por exposición a muy altas concentraciones, en perforación de túneles o galerías, en chorreado de arena, etc.) la silicosis tarda en desarrollarse unos años. La silicosis crónica suele tardar diez años o más en desarrollarse. Los síntomas son: fatiga respiratoria y tos. Téngase en cuenta que no hay un tratamiento efectivo total de la silicosis, por lo que es necesario extremar la prevención técnica y médica.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es necesario utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados, con cabina de extracción (ventilación local y general) y mascarilla con el filtro indicado.

Riesgos de la sílice amorfa y medidas de prevención

La sílice amorfa de por sí está considerada como de baja toxicidad, no obstante siempre en su composición puede encontrarse un porcentaje de sílice cristalina, que es la que entraña el riesgo de silicosis.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es necesario utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados, con cabina de extracción (ventilación local y general) y mascarilla, con el filtro indicado.

⁵⁸ La transparencia del vidrio es debida en gran parte a su estructura amorfa, mientras que la opacidad de la sílice a su estructura cristalina.

⁵⁹ Marcos Martínez, C. Op. cit. Tesis doctoral. (p. 253)

⁶⁰ Agencia Internacional de Investigación contra el Cáncer: <http://www.iarc.fr/>

⁶¹ Ficha técnica de seguridad "Arena de sílice" Empresa Sibelco Minerales, S.A, Bilbao

I.3.2.1.1.2. Circón

El circón es un silicato de circonio⁶² ($Zr SiO_4$) muy abundante en estado natural y que conviene diferenciar del óxido de circonio ($Zr O_2$) denominado circonia.

El circón se encuentra en la naturaleza en forma de arena, se comercializa en distintas granulometrías. La harina de circón se produce por molturación de la arena de circón con lo que se altera el tipo de superficie del grano. La arena tiene una superficie de canto rodado, mientras que la harina tiene una textura rugosa obtenida por la fractura generada durante la molturación.

Funde a alta temperatura (2100-2300°C), es muy refractario, tiene un coeficiente de dilatación térmica bajo y elevada conductividad térmica. Su densidad aparente es de 2,7 gr/c.c, y su color es rosáceo pálido.

Para la cascarilla cerámica, se usa mezclado con la sílice coloidal para formar la papilla del estuco tal y como se realiza con la harina de Moloquita. Es mucho más denso que la Moloquita, por lo que las papillas tienden a precipitar rápidamente si no se remueven permanentemente. Se aplica en la primera capa de contacto sobre el modelo de cera, pues por un lado permite reproducir fielmente su textura con un acabado de superficie lisa y detallada, y por otro, al ser duro, resiste la dilatación térmica de la cera y la presión del metal fundido. Como rebozado para la cáscara cerámica en la fundición del bronce se puede emplear en las primeras capas, el grosor de estas capas es más fino que el de las capas de Moloquita. Para las siguientes capas se suele aplicar otro tipo de refractario más débil, lo que reduce costes y facilita el desmoldeado.

Dada su alta refractariedad se utiliza para fundir acero con el sistema de cascarilla cerámica, aunque también por su resistencia a ser mojado por el metal.

Riesgos del circón y medidas de prevención

Riesgos: la experimentación con animales sí que ha dado resultados patológicos a la exposición al polvo de circón. Existe cierta posibilidad de riesgo en consecuencia para el ser humano. Se debe tener en cuenta que una exposición prolongada o intensa al polvo puede provocar enfermedades pulmonares. Las arenas de circón contienen una pequeña cantidad de cuarzo libre (hasta 0,5%), por lo que se deben tomar precauciones contra la inhalación de los polvos. La sílice cristalina es una causa reconocida de fibrosis pulmonar (silicosis). Se ha clasificado también como carcinógeno humano (Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer)⁶³.

Radiación: Al igual que muchos minerales, las arenas de circón contienen pequeñas cantidades de elementos radiactivos de las series de uranio y torio. El principal peligro radiactivo de este producto es la exposición interna a partículas alfa mediante la inhalación del material en polvo. Las arenas comercializadas cumplen las normativas sobre el contenido en materiales radioactivos, siendo éstos menores a lo establecido.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es necesario utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados, con cabina de extracción (ventilación local y general) y mascarilla, con el filtro indicado. Con respecto al riesgo por radiación es conveniente consultar la ficha de seguridad del producto comercializado.

I.3.2.1.1.3. Talco

El talco es silicato hidratado de magnesio ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) puede contener en torno a un 30 % MgO , un 63 % SiO_2 y el resto de H_2O . El talco tiene un peso específico de 2,7 a 2,8 y un dureza 1 de la escala de Mohs, es por tanto un mineral muy blando que puede rayarse con la

⁶² El circonio es un metal duro y plateado que se extrae de minerales como el mencionado circón o del óxido de circonio ($Zr O_2$), denominado circonia y como mineral baddeleyita. La circonia, se utiliza en la fabricación de crisoles, ladrillos y abrasivos por su elevada resistencia y sus propiedades a temperaturas elevadas.

⁶³ Ficha técnica de seguridad de materiales ILUKA.
http://www.iluka.com/_uploads/documents/Datasheets/Iluka%20Zircon%20MSDS%20Oct%2003%20us_Spanish.pdf

uña. Se puede triturar obteniendo un polvo finísimo. Es suave y untuoso al tacto, lustroso, de color blanco o gris verdoso. Su estructura es laminar y no fibrosa., aunque se puede encontrar talco fibroso con el riesgo implícito.

Este material es un pésimo conductor del calor; difícil de fundir y insoluble.

El talco se presenta en masas laminares blancas, en rocas como la esteatita, generalmente asociado a otras como la tremolita, la serpentina u otras.

El talco mineral con contenido en calcita se utiliza en la cerámica para hacer azulejos de pasta blanca, en porcentajes altos. Evita el agrietamiento de los azulejos debido a la expansión térmica.

Se utiliza tradicionalmente en fundición a la arena como desmoldeante y también en fundición a la cáscara cerámica para conseguir núcleos de menor resistencia que los realizados exclusivamente con Moloquita. Se aplica en los núcleos y en las capas de contacto con el objetivo de facilitar la contracción del bronce cuando se enfría, los estucados de talco son menos resistentes. La proporción empleada en la primera capa de contacto suele ser 50% de Moloquita, 25% de talco y 25% de grafito.

Riesgos del talco y medidas de prevención

Riesgos: La exposición al talco puro ha sido la menos estudiada. Hay criterios diferentes. El talco lleva asociadas impurezas, dependiendo de su procedencia; en determinadas ocasiones cuando el talco procede de Nueva York o Madoc de Canadá puede contener estructuras fibrosas que lo hacen comparable al asbesto (talcosis), pero no se puede generalizar esta clasificación a todos los talcos. Algunos autores consideran que el talco puro no desencadenaría neumoconiosis porque es un polvo inerte.

El talco cosmético tiene un grano de 0,3 –0,5 micras, pequeña la fracción respirable que puede llegar a los niveles profundos de los pulmones.

Atención.- Si el talco se expone a temperaturas superiores a 1000°C, como es el caso cuando se funde bronce dentro de la cascarilla cerámica realizada con talco, se forma cristobalita, que es altamente fibrógena, con un alto riesgo de neumoconiosis.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es necesario utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados, con cabina de extracción (ventilación local y general) y mascarilla, con el filtro indicado. La prevención con el uso de sistemas de aspiración y mascarillas es imprescindible, especialmente después de la cocción y durante el descascarillado.

I.3.2.1.2. LOS REFRACTARIOS ALUMINOSOS

En este grupo destaca la alúmina, un óxido de aluminio que tiene un uso poco frecuente en el ámbito de la cascarilla cerámica.

I.3.2.1.2.3. Alúmina

La alúmina (Al_2O_3) se produce industrialmente por el método Bayer a partir de la bauxita. La alúmina recibe un tratamiento de calcinación que supera los 1000°C, y entonces se vuelve estable. Es la más refractaria de los materiales mencionados y la menos reactiva hacia los metales. Su punto de fusión se sitúa en 2.050°C⁶⁴. Al ser un material caro, no se suele utilizar para la formación de la cascarilla cerámica, se usa en fundición de superaleaciones.

La alúmina se puede emplear para fortalecer los moldes de cáscara cerámica. Para desarrollar materiales refractarios aislantes, la alúmina casi pura se mezcla generalmente con la sílice para obtener fibras refractarias y flexibles de alta pureza.

⁶⁴ Tiene un punto de fusión de 2050 °C. Es más densa que la Moloquita pero no tanto como la circonita, que tiene un coeficiente de 3,90, frente a los 2,70 de la Moloquita y a los 4,2/4,6 de la circonita, la chamota es el refractario con un coeficiente más bajo 2,5/2,0, mientras que la sílice se acerca con un 2,21

Riesgos de la alúmina y medidas de prevención

Riesgos: Se debe tener en cuenta que una exposición prolongada o intensa al polvo puede provocar enfermedades pulmonares. Los compuestos de aluminio en polvo pueden generar neumoconiosis, fibrosis pulmonar difusa, y evolucionar negativamente.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es conveniente utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados y mascarilla, con el filtro indicado.

I.3.2.1.3. LOS REFRACTARIOS SILICOALUMINOSOS

Las arcillas son compuestos sedimentarios que contienen diversos componentes entre los que hay que considerar los óxidos refractarios, y no fundentes, como la alúmina y la sílice, y los óxidos fundentes como el óxido de hierro. La composición de las arcillas determina su respuesta ante el fuego, por esta razón se pueden clasificar en grupos distintos:

- arcillas que se funden a altas temperaturas (arcillas para ladrillos),
- arcillas que se vuelven impermeables o vitrifican como el gres,
- caolines y refractarios de alta temperatura que funden a partir de 1700°C, y soportan hasta 1600°C sin deformarse.

En este caso nos interesan los caolines, que son silicatos de aluminio hidratados ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Son arcillas blancas poco plásticas, compuestas de caolinita, que es un silicato de aluminio hidratado, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ó $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, está constituida por cristales en forma de escamas y partículas mucho finas. El contenido en alúmina se eleva. Es el principal componente del caolín y restos de roca erosionada. Tienen una partícula muy reducida debido a una erosión acentuada por un transporte sedimentario prolongado. Gran parte de las impurezas de esta arcilla blanca se pueden separar con tratamientos actualmente industriales. Los caolines funden a más de 1800°C.

I.3.2.1.3.1. Silicatos de aluminio

El aspecto más interesante de los materiales silicoaluminosos es su capacidad de incrementar la refractariedad; el contenido de alúmina incrementa esta propiedad. La mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) contiene un 72% de alúmina y no se encuentra en estado natural. La mullita se puede obtener industrialmente a partir de minerales como la cianita y se utiliza como un material refractario en la cerámica y en otras actividades industriales donde se requiera esa propiedad especial. También se puede sintetizar mezclando alúmina y sílice en un horno. Existen otros minerales silicoaluminosos como la silimanita, también utilizado como material refractario. Si el silicato aluminoso es hidratado, se puede considerar una arcilla como el caolín.

En fundición, el silicato de aluminio se emplea, combinado con otros minerales como por ejemplo la arena de cuarzo, en la realización de moldes. Este combinado consigue dos cualidades interesantes: la plasticidad para el moldeo y disgregabilidad para el desmoldeo.

Un porcentaje de sílice mayor al 28% se traduce en cristal de sílice libre combinado.

Riesgos de silicatos de alúmina y medidas de prevención

Riesgos: Se debe tener en cuenta que una exposición prolongada o intensa al polvo puede provocar enfermedades pulmonares.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es conveniente utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados y mascarilla, con el filtro indicado, si fuera necesario.

I.3.2.1.3.2. Moloquita

El término Moloquita, es el nombre comercial del producto estrella de la fábrica ECCI Internacional⁶⁵, que se define a sí misma como el primer productor de caolines (silicatos de aluminio hidratados) del mundo y un gran suministrador de caolines calcinados.

⁶⁵ http://www.ecci.co.uk/ceramics/cer_ma.htm http://www.ecci.co.uk/ceramics/cer_mp.htm

La Moloquita es un silicato aluminoso producido industrialmente por calcinación de caolín.

Los datos que suministra la empresa, con respecto a su composición son: SiO₂ 54,5 %; Al₂O₃ 42,0 %; Fe₂O₃ 1,1 %; TiO₂ 0,07 %; CaO 0,06 %; MgO 0,31 %; K₂O 2,0 %; Na₂O 0,1 %.

Este producto industrial se obtiene mediante un depurado proceso. La industria inglesa extrae el caolín de unas canteras de Cornualles erosionando con grandes chorros de agua las laderas y transportando la disolución hasta grandes tanques. A la arcilla blanca natural diluida se le retiran determinadas impurezas como el cuarzo y se la traslada, filtra y prensa para obtener caolín plástico con un 30% de humedad. Este caolín sufre tratamientos sucesivos hasta obtener unos bloques extruidos que convenientemente apilados en vagonetas, pasa a iniciar el proceso de secado y cocción.

En este proceso es fundamental la cocción de los bloques de caolín que dura sesenta horas. La calcinación controlada elimina el agua, el dióxido de carbono y otros gases volátiles, y se consigue la forma más pura del caolín. Durante veinticuatro horas de este proceso, se mantiene el horno a 1525°C, y en esta operación las arcillas se transforman obteniéndose un material refractario muy estable constituido por mullita (55%) y sílice amorfo (45%), sin presencia apreciable de sílices cristalinas como el cuarzo o la cristobalita⁶⁶.

A todo el proceso de cocción de estos ladrillos le sigue un proceso de molturación⁶⁷ de los mismos, y un proceso sistemático de cribado que permite una selección sistemática de distintos tipos de producto seleccionado en función del tamaño del grano. El grano obtenido en este proceso es anguloso y rugoso⁶⁸.

De la ficha técnica de la Moloquita⁶⁹ extraemos las siguientes propiedades: deformación inicial: 1750-1770°C; densidad relativa: 2,7, dureza (escala Mohs): 7-8, coeficiente de expansión térmica: (1/°C) 4,4 x 10⁻⁶. Su uniforme y bajo grado de dilatación le da una resistencia excelente al choque térmico; soluble en el ácido fluorhídrico. A lo que añadiremos una densidad uniforme del producto, la baja porosidad, la superficie rugosa y un color blanco mate.

A la Moloquita también se la conoce como caolín calcinado, arcilla calcinada, chamota o metalcaolín.

Su granulometría comercial es de:

Moloquita	Tipo	mm
Granos	8-16 dd.	1,0-2,0 mm
	16-30 dd.	0,5-1,0 mm
	50-80 dd.	0,18-0,3 mm
	30-80 dd.	0,18-0,5 mm
Harinas	-200 dd.	0-0,075 mm

Tabla I.2. Distinta granulometría de la Moloquita

Este material se utiliza en pastas blancas, porcelanas y en esmaltes. Según el industrial, sirve también para fabricar soportes refractarios de cocción, soportes eléctricos, ladrillos refractarios

⁶⁶ La ausencia de sílice cristalina se convierte en una ventaja industrial muy apreciable desde el punto de vista de la salubridad laboral. La sílice cristalina y la cristobalita son los agentes causantes de la silicosis.

⁶⁷ Después de la calcinación, los bloques enfriados entran en una planta de trituración que produce una gama estándar de diferentes grados. Algunos de ellos se introducen en uno o dos molinos recubiertos de caucho que contienen bolas de alúmina de alta densidad para producir los grados 120, 200 y 325. Los grados estándar también pueden ser enviados a una planta de cribado donde el cribado llega a granulometrías de por ejemplo 30-80. Se disponen de instalaciones de eliminación de polvo.

⁶⁸ La rugosidad de este tipo de grano es muy valiosa para el procedimiento de Cascarilla Cerámica, dado que permite un agarre muy eficaz del ligante utilizado. La textura superficial angulosa y áspera de sus partículas le da excelentes propiedades de ajuste para todos los sistemas de ligados más difundidos.

⁶⁹ Hoja técnica de la molochite. Sociedad Imerys Minerals Ltd Par Moor Road Par Cornwall PL24 2SQ Gran Bretaña, revisión 25 del 01/12/2010

aislantes, refractarios para la fabricación de vidrio o piezas sanitarias y en fundición. La Moloquita es empleada para la conformación de la cascarilla cerámica, es uno de los materiales más utilizados en las fundiciones de las Facultades de Bellas Artes (incluida la "Fonería" donde se desarrolla este proyecto) y escuelas de Arte donde se desarrolla el módulo de fundición y se utiliza en un gran número de fundiciones profesionales artísticas y también en las industriales.

La Moloquita es el refractario más utilizado en esta investigación.

Riesgos de la Moloquita y medidas de prevención

Riesgos: Se debe tener en cuenta que una exposición prolongada al polvo puede provocar enfermedades pulmonares. No se observan riesgos relevantes.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es conveniente utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados y mascarilla, con el filtro indicado, si fuera necesario.

I.3.2.1.4. OTROS REFRACTARIOS

I.3.2.1.4.1. Grafito

El grafito es un mineral, conocido también como plumbagina, que corresponde al elemento carbono puro, cristalizado en el sistema hexagonal, con fácil exfoliación, aunque a veces se presenta en masas compactas, de color negro o gris opaco metálico; tan blando como el talco.

En fundición se utiliza para hacer crisoles y determinado tipo de ladrillos, dado que es un refractario con buena transmisión térmica.

Aplicado en la cascarilla cerámica, la función fundamental del grafito es la de actuar como un desoxidante, impidiendo que el metal consiga absorber el oxígeno y penetre por los poros de la cascarilla cerámica, con la consiguiente dificultad al retirarla. También reduce la resistencia de la primera capa.

Se puede emplear al 50% con la Moloquita o en la proporción indicada anteriormente con el talco. Actúa también reduciendo la tendencia a decantar y solidificar de la harina de la papilla.

El riesgo que comporta el grafito es la potencial adulteración con compuestos de plomo, si esto se produce la cascarilla cerámica se deforma, la acción del compuesto de plomo baja el punto de fusión del caparazón, deformando la cascarilla cerámica.

Riesgos del grafito y medidas de prevención

Riesgos: El grafito como otros carbones se ha demostrado ser un agente causante de neumoconiosis.

Medidas de prevención: Conviene utilizar mascarilla en ambiente escasamente ventilados.

I.4. EL REFUERZO DEL MOLDE DE FUNDICIÓN

En el proceso de aplicación de la cascarilla cerámica, la dilatación progresiva que se produce en la cera durante los cambios térmicos, puede llegar a romper el molde, provocando grietas o fisuras. Por esta razón, se aplican al molde materiales de refuerzo que puedan evitar estas fisuras. El refuerzo sirve para dar resistencia y cohesión ante la rotura de la cascarilla cerámica.

Para conseguir esta cohesión, se puede reforzar la cascarilla cerámica introduciendo distintas capas de fibras entre las capas de rebozado granulado: fibras cerámicas, fibra de vidrio, fibra de carbono, fibras orgánicas. En general, sirven todas aquellas que soporten la tensión sufrida por la cascarilla cerámica durante el desecado. También se puede reforzar utilizando otros materiales como el acero (en malla metálica o en varillas) de la que se tratará a continuación

I.4.1. UTILIZACIÓN DE LA FIBRA DE VIDRIO EN LA CASCARILLA CERÁMICA

La fibra de vidrio se ha venido utilizando desde el inicio de la introducción del procedimiento de la cascarilla cerámica en los centros educativos por Mr David Reid, en el procedimiento de restauración denominado coloquialmente como UVI. En este procedimiento, la fibra de vidrio ya había manifestado su compatibilidad con la cascarilla cerámica.

La Dra. Carmen Marcos de la Universidad de Valencia, en su tesis, menciona diferentes materiales y procedimientos para reforzar la cascarilla cerámica, entre los cuales cita también la fibra de vidrio, para su aplicación exterior en los procesos de reparación.

Según esta autora, el procedimiento más habitual aprendido de Mr David Reid, consiste en mojar la superficie con sílice coloidal para humedecer la superficie dañada. Posteriormente se deshace la fibra, se mezcla con la papilla espesa, se aplica sobre la zona a reforzar, se aplica sobre esta fibra más papilla y se reboza con el mismo grano usado en la última capa⁷⁰.

La "Foneria" empezó a investigar la fibra de vidrio como refuerzo durante el curso 2002/2003, como consecuencia de las aportaciones realizadas por alumnos Erasmus trasladados a Inglaterra en torno a 1995. Estos alumnos habían trabajado en una fundición donde se aplicaba dicha técnica de refuerzo.

Actualmente la facultad de BBAA de la UB, para reforzar el molde de cascarilla cerámica, emplea fibra de vidrio cortado de 6 mm de longitud, que se incorpora en medio de las capas de papilla como rebozado. Ésta reemplaza el rebozado de Moloquita 50-80dd, generalmente, para piezas medianas, sólo en la 2ª y 4ª capa, recubriendo toda la superficie del modelo. Se puede consultar el trabajo del Dr. Valle al respecto⁷¹.

En otras fundiciones de las facultades de Bellas Artes de España, a raíz de la difusión de estas prácticas de la "Foneria", se esta incorporando y modificando este sistema de refuerzo con fibra de vidrio.

I.4.2. MATERIALES DE FIBRA DE VIDRIO PARA EL REFUERZO

El término fibra de vidrio proviene de la expresión inglesa "fiber glass". La fibra de vidrio está compuesta fundamentalmente de sílice, que se asocia a la cal, alúmina y magnesita, que

⁷⁰ Marcos Martínez, C. Op. cit. Tesis doctoral. (Cáp. II.6.7. Refuerzo de la cascarilla cerámica. (p. 317)

⁷¹ Valle Martí J. (2007). Modificaciones adoptadas con carácter preventivo en las instalaciones del Taller de Fundición y en el proceso de la Cascarilla Cerámica. En VV.AA.: La fundición artística en la universidad española: la investigación, año 2006. Valencia Ed. Grupo de Investigación Nuevos Procedimientos Escultóricos. (pp. 105-148)

corresponde a la misma composición que el vidrio. La fusión de estos materiales da como resultado un producto en forma de filamentos que se obtiene mediante una hilera. Los hilos o cilindros tienen un diámetro comprendido entre 7 y 30 μm aproximadamente.

Las principales propiedades de la fibra de vidrio aportadas a la escultura son:

- Resistencia mecánica.
- Excelente aislante térmico.
- Incombustibilidad; no emite humo ni gases tóxicos con el calor.
- Compatibilidad con los materiales orgánicos; se asocia a distintas resinas sintéticas, y también al yeso y al cemento.
- Inerte ante muchas sustancias incluyendo los ácidos.
- Gran maleabilidad y buena flexibilidad.
- Altamente resistente a la tracción.

Por dichas características, tiene diferentes aplicaciones industriales y artísticas. El uso artístico más habitual es la combinación con resina epox, que genera piezas tenaces y flexibles.

Existen varios tipos de fibra que se clasifican según el tipo de vidrio: A (alcalino), resistente a ácidos, B (Boro) durable y con buenas propiedades eléctricas, C (resistente a la corrosión), D (dieléctrico), S (con resistencia estructural) y E (eléctrica), la más empleada en distintas aplicaciones. La fibra E tiene un alta durabilidad y se emplea en fundición por su bajo coste comparado con los otros tipos. Su punto de fusión es 840°C , se presenta en distintas configuraciones, siendo todas ellas útiles en fundición.

I.4.2.1. PRODUCTOS COMERCIALIZADOS

I.4.2.1.1. Mat

Se compone de óxido de silicio, aluminio, calcio y boro.

Se encuentra en forma de:

- Velo o de superficie. Los gramajes oscilan entre 25 y 80 gr/m^2 . Se pueden deformar para su aplicación.
- Hilos cortados que se constituyen por aglomerado con ligante químico. Tienen una longitud determinada. Se presenta en rollos bobinados y varía en gramaje entre 100 y 900 gr/m^2 y en ancho entre 0,092 y 0,240 m; generalmente en longitudes de 3 a 12 mm.
- Hilos continuos; similares a los hilos cortados, constituidos por varias capas de hilos.

I.4.2.1.2. Roving

Son hilos de fibra continua que han recibido un recubrimiento (ensimaje⁷²) plástico. El roving se presenta en carretes ó bobinas.

I.4.2.1.3. Tejido

Son superficies constituidas por mechas de roving directo en trama y urdimbre, tratados principalmente con recubrimiento plástico. Lo podemos encontrar en diversas configuraciones dependiendo del tramado:

- Fielros, son estructuras textiles que no poseen una orientación de referencia. Pueden ser de fibra continua, hilvanados o de fibras cortadas, por el general entre 40 y 50 mm.
- Sistema mallado (tejido, ensamblado, trenzado). Se pueden encontrar con una densidad baja, media o alta. Las fibras se cruzan perpendicularmente; se denomina trama o urdimbre.

⁷² Los filamentos de fibra son revestidos con una fina película, constituida en general por una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. Este recubrimiento sirve para protegerlo de la abrasión y el ataque de agua, etc. Miravete. A. 2007. Barcelona. Materiales compuestos I Ed Reverté (p. 22).

I.4.2.1.4. Hilos cortados

Son hilos de fibra de vidrio cortados, generalmente a una longitud de 3 a 12 mm. Se utilizan para reforzar la escayola, el cemento, el papel, y para el procedimiento de moldeo de cascarilla cerámica. Esta configuración es la que se utilizará en los ensayos de esta investigación.

I.4.2.1.5. Molida o polvo:

Se fabrica a partir de fibra de vidrio tipo E, mediante un proceso de triturado, por el cual las fibras son reducidas hasta longitudes comprendidas entre 0,1 y 0,02 mm con un diámetro de 7,5 a 9 micras. Se puede encontrar en polvo y flocular.

Riesgos y medidas de prevención

Riesgos: La fibra de vidrio de diámetro menor a 3 micras es respirable, alcanzando la tráquea y los bronquios. La fibra de vidrio de 5 micras o más se detiene en la fosa nasal o la faringe⁷³. Los productos comerciales son no respirables.

Medidas de prevención: Aplicar las normas generales de prevención del centro de trabajo. Es conveniente utilizar este producto en lugares perfectamente ventilados y mascarilla, con el filtro indicado, si fuera necesario. Para manejar la fibra de vidrio es aconsejable el uso guantes y ropa de manga larga, pues puede causar irritación temporal en la piel, mascarilla para no inhalar partículas de fibra que se encuentren suspendidas en el aire durante el uso y gafas protectoras para la protección ocular.

I.4.2.2. OTROS CASOS DE REFUERZO CON FIBRA

Existen otras formas de mejorar la resistencia de la cáscara cerámica con otro tipo de materiales más caros. Estos refuerzos proporcionan al molde mayor resistencia a la deformación ante la presión y la alta temperatura de un metal líquido a 1500-1750°C. Es posible que también aumenten la resistencia de la cascarilla cerámica como material escultórico y por ello se añade a continuación, considerando otros posibles desarrollos posteriores a este proyecto.

El inventor John Vandermeer⁷⁴ ha desarrollado otros métodos para mejorar la resistencia y para formar más rápidamente un molde de cáscara cerámica. Para ello añade a la papilla cerámica (sílice coloidal y refractario en polvo) distintos tipos de fibras cortadas: refractarias, de vidrio E y de polietileno. El conjunto forma una pasta refractaria que facilita la realización del revestimiento proporcionando un mayor grosor y más resistencia al molde cerámico. Cada capa de pasta refractaria se acompaña con un rebozado de refractario de grano grueso.

Rajeev Naik y John Corrigan⁷⁵, introducen fibra de carbono entre las capas de papilla para proporcionar más resistencia al molde de cáscara cerámica. Parten del estudio de fundición en alta temperatura, donde un molde de cáscara cerámica tradicional (papilla más rebozado) o con malla cerámica no soporta el vertido de metal fundido a 1500°C, deformándose y debilitándose.

La introducción de la fibra de carbono incrementa la resistencia a tales temperaturas. La aplican de dos maneras: en capas intermedias distanciadas entre ellas en forma espiral o sólo en las partes más débiles, también entre capas. La resistencia de la fibra de carbono varía según su diámetro y la cantidad de filamentos.

⁷³ Hoja técnica y de seguridad fibra de vidrio tipo E. CAMELYAF. (glass fiber)

⁷⁴ Vandermeer, John, Titular: Buntrock Industries 1176 Jamestown Road Williamsburg, Virginia 23185, US "Molde de fundición de precisión y método de fabricación" oficina Española de patentes y marcas. Número de publicación: 2247197. 10.11.2000 US 247935 P

⁷⁵ Naik Rajeev V., Corrigan John, Titular: Hoeger, Stellrecht & Partner Uhlandstrasse 14c 70182 Stuttgart (DE) "Reinforced Ceramic Shell Mold and Method of Making Same" European patent application. Fecha de publicación 24.03.1999 Bulletin 1999/12

Asish Ghosh et al⁷⁶ usan otros materiales para proporcionar mayor resistencia al molde para soportar la presión y el calor del metal fundido a 1400°C -1750°C.

Trabajan con fibras Nextel, fabricadas por 3M Company⁷⁷, constituidas por diferentes minerales: óxido de aluminio, dióxido de silicio, óxido de hierro y óxido bórico. Según los porcentajes, se obtienen distintas variedades con distintas características físicas y mecánicas. Establecen el diámetro adecuado en 0,25-1 mm, para lo que hay que trenzar 25 fibras, a mano o con maquinaria textil. Comprueban que una disposición descentrada proporciona mayor resistencia, tanto cerca del patrón como de la pared externa, sin causar asperezas (como mucho a un 10% del grueso).

I.4.3. REFUERZOS CON ESTRUCTURA METÁLICA

En fundición, cuando se trabaja con moldes de cascarilla cerámica de grandes dimensiones o con una superficie plana extensa, se le puede reforzar los puntos singulares o de riesgo usando una malla de acero inoxidable, varilla de acero en los laterales, o bien alambre que envuelva el molde. Dicho refuerzo se suele aplicar en las últimas capas, de manera que quede bien pegado a su superficie, sin alterar la capacidad de registro del molde. Una vez reforzada la cascarilla cerámica, a continuación se añaden los estratos restantes de papilla cerámica que recubren el refuerzo metálico.

Los materiales de refuerzo utilizados, suelen ser maleables y flexibles para poder adaptarlos al molde sin dificultad.

I.4.3.1. Tela o malla metálica

La malla está formada por un entramado de alambres⁷⁸. En el mercado se puede encontrar distintas tipos de tela metálica: entramados con retículas cuadradas, rectangulares, romboidales, alargadas y hexagonales; mallas con alambre de distinto diámetro o de distintos materiales (aluminio, latón y acero, acero galvanizado o acero inoxidable). Las telas del mercado forman generalmente un tejido liso, pero podemos encontrarlas también onduladas.

La tela metálica tiene una cierta flexibilidad, se le puede dar forma, es resistente y duradera.

I.4.3.2. Varilla

Existe en el mercado una larga gama de variedades de varillas de diferente diámetro, material (acero, bronce, cobre, latón) y forma (lisa o corrugada). La varilla corrugada es la más empleada en los moldes de cascarilla cerámica al tener, este tipo de varilla rugosa, un mayor agarre.

I.4.3.3. Alambre

Se denomina alambre a los tipos de hilo metálico dúctiles que se obtienen por estiramiento de distintos materiales, principalmente hierro, cobre, latón, plata y aluminio. Se encuentra en distintos diámetros.

En fundición a la cascarilla cerámica se puede emplear el refuerzo de alambre de acero o de acero inoxidable.

Riesgos de los materiales metálicos de refuerzo y medidas de prevención

Riesgos: Lesiones diversas por punción, corte, abrasión. Sobre esfuerzos.

⁷⁶ Ghosh Asish, Klug Frederick, Mnoghan Philip, Svec Paul y Giddings Robert, Titular: Szary, Anne Catherine et al London Patent Operation General Electric International, Inc 15 John Adam Stret London WC2N 6LU (GB) "Ceramic Shell Mold Provided with Reinforcement, and Related Processed". European Patent Specification. 19.10. 2005 Bulletin 2005/42. N° EP 1098724 B1

⁷⁷ <http://www.3m.com/market/industrial/ceramics/pdfs/CeramicFabric.pdf>

⁷⁸ Los tejidos entramados constan de urdimbre (los paralelos a la longitud del tejido) y de trama (paralelos a la altura).

Medidas de prevención: Para manejar la varilla o la tela metálica es aconsejable el uso guantes y ropa de manga larga. Es necesario utilizar gafas de protección. Cuando se trasladan o manipulan bobinas o fardos de materiales pesados es necesario adoptar las recomendaciones generales.

I.5. CONCLUSIONES DEL PRIMER CAPÍTULO

Para las investigaciones de los siguientes capítulos se puede extraer la siguiente lista de características de la cascarilla cerámica:

- Es el resultado de la mezcla de un producto industrial que contiene sílice coloidal (en suspensión acuosa) con un producto refractario de molturación muy fina (Moloquita - 200, nombre comercial del producto, que deriva del caolín).
- Es de color blanco.
- Es un material refractario con alta resistencia térmica, y alta resistencia al choque térmico.
- Una de sus características más importantes es que no reduce su volumen durante el secado o la cocción.
- No es conductor de electricidad.
- Su constitución es irreversible: la sílice coloidal una vez gelificada no puede recuperar su estado líquido.
- Se puede acelerar el secado de la cascarilla cerámica tras su proceso de aplicación.
- Se puede recocer múltiples veces o calentar sólo una parte determinada de la misma.
- Es compatible consigo misma, es decir, se puede aplicar este material sobre una pieza seca o cocida adhiriéndose perfectamente.
- La papilla tiene una alta calidad de reproducción.
- El comportamiento de este material se modifica con sus componentes y con la temperatura.

Estas características son aspectos fundamentales para la presente investigación, y han dado origen a la realización de piezas escultóricas de cascarilla cerámica.

