

## 163 ponencia B- versión blanco y negro

# PLAQUETAS CERÁMICAS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE FACHADAS

**Jesús Ma. Rincón y M. Romero**

Depto. de Sistemas Constructivos de la Edificación,  
Grupo/Lab de Materiales Vítreos y Cerámicos  
Instituto E. Torroja, CSIC, Madrid, España

**Palabras clave.-** Fachadas, sistemas constructivos, plaquetas, vitroceramicos, gres porcelánico,

**RESUMEN.-** *Los últimos años del pasado siglo XX han conocido un notable auge en los conocimientos a nivel de laboratorio y producción de nuevos materiales cerámicos para pavimentos y revestimientos, que han confirmado su expansión con sus usos en fachadas y especialmente en sistemas constructivos de Fachadas Ventiladas (FV). Los tipos de materiales: gres extruído, gres de monococción, gres porcelánico y materiales vitrocerámicos en varios formatos se han ido ampliando y ahora puede decirse ya que no hay límite para la producción de todo tipo de plaquetas de tipo cerámico. Por otro lado, y al mismo tiempo, las exigencias en la Edificación y la consiguiente aplicación del CTE, implicarán un mayor y mejor uso de los materiales cerámicos. Las condiciones que se exigen para este tipo de plaquetas aun no están muy definidas normativamente, pero el propio desarrollo y aplicaciones están ya perfilando las exigencias para fachadas ventiladas. El mayor reto es el del gran formato exigido por sistemas integrales de colocación. Y en este sentido desarrollando nuevos productos se están incorporando al mercad, así como otros a nivel de I+D+i los siguientes productos: Gres rústico tradicional, gres porcelánico (GP) tradicional, gres porcelánico modificado (GPM), nuevos tipos de vidrios sinterizados (“gresites vitrocerámicos de gran formato”), una amplia gama de materiales vitrocerámicos incluso materiales cerámicos laminados que se producen ya y otros que se están investigando actualmente en centros de investigación. Al mismo tiempo, surgen una serie de problemas científico- técnicos subyacentes, que aun no están resueltos, o bien que aun no se les ha prestado debida atención. Así, va a ser necesario profundizar en el conocimiento de la respuesta de estos materiales a la acción y succión del viento, resistencia a la interperie: durabilidad... y especialmente la tribología o desgaste que pueden sufrir en contacto con los anclajes y sistemas metálicos. En la mayor parte de los sistemas se procede a un mecanizado o ranurado de las piezas, cuyas consecuencias a largo plazo no ha sido aun estudiadas científicamente.*

### 1. Introducción

Las plaquetas de materiales cerámicos es bien conocido que tienen desde hace tiempo una implantación extendida y bien reconocida como pavimentos y revestimientos en edificación como en construcción de obra pública, aunque en este caso en menor extensión. Incluso **las plaquetas** cerámicas en fachadas con su complementariedad en equipamientos urbanos va a ser la cara amable de una ciudad y un nuevo concepto de urbanismo, más cálido y menos frío. Es un reto científico, tecnológico y comercial que dará lugar a plaquetas de mayor valor añadido, que es lo que necesita el sector para competir en el mercado actual tan globalizado. El consumidor y el público en general asocia su uso fundamentalmente al recubrimiento de suelos y paredes de interiores. Pero esta idea tan extendida olvida frecuentemente que los materiales cerámicos a lo largo de la Historia de la Arquitectura han sido utilizados en recubrimientos exteriores de edificios emblemáticos, templos, monumentos, etc... El ejemplo más paradigmático del uso de la cerámica en exteriores nos remonta a la antigua Mesopotamia con los ladrillos vidriados que recubría las puertas de la ciudad de Babilonia, pudiéndose hoy observar esta aplicación de la cerámica en fachadas exteriores en la monumental puerta de Ishtar, parte de la puerta original está actualmente en un museo alemán. Esta puerta recubierta de ladrillos de cerámica vidriada fué parte del templo dedicado a Bel, construido por Nabucodonosor hacia el año 575 a. C.

La novedad en Babilonia fue que se adornaban distintas estructuras urbanas con decoración externa, a diferencia de los asirios que precedentemente usaban los ladrillos vidriados en decorados de interiores. Posteriormente los musulmanes adaptarían esta tecnología a la producción de sus azulejos que se extendieron por todas sus áreas de dominación y especialmente en el Andalus, pero con un uso preferencial en interiores. En siglos posteriores (s. XVIII-XX), y las fachadas del país vecino Portugal son un buen ejemplo de ello, el recubrimiento de fachadas con azulejos ha sido un uso muy extendido de las plaquetas cerámicas en exteriores y con todo tipo de decoraciones.

En nuestro país, sólo hasta finales del XIX y mediados del XX se volvió a usar la cerámica, pero únicamente con fines decorativos en multitud de murales de los que merece la pena nombrar los innumerables realizados en la Comunidad Valenciana. Murales valencianos de los años 60- 70 en que hubo un gran desarrollo en la Arquitectura civil o religiosa, comercial e incluso industrial, realizados en todo tipo de colores y en donde los mejores artistas valencianos dejaron su “saber hacer en la cerámica”. Los últimos años del pasado siglo XX han conocido un notable auge en los conocimientos a nivel de laboratorio y producción de nuevos materiales cerámicos para pavimentos y revestimientos. De la mano de este dinámico sector industrial que ha llegado a cotas insuperables de perfección técnica y de diseño + aplicaciones con el gres de monococción vidriado, el cambio de siglo ha coincidido con una apuesta definitiva por los materiales de gres porcelánico. Las posibilidades decorativas de este tipo de material de mayor valor añadido para su uso en pavimentos y revestimientos, que se veían limitadas en sus inicios en cuanto a producción y mercado, han sido totalmente superadas en estos momentos con infinitas posibilidades de decoración en masa, en superficie y en propiedades físicas y tecnológicas que se exigen a este tipo de materiales. Los formatos se han ido ampliando y ahora puede decirse ya que no hay límite para la producción de plaquetas de grandes formatos. El Instituto Eduardo Torroja del CSIC, fiel a su tradición investigadora en Materiales de Construcción viene llevando a cabo desde hace diez años intensas investigaciones innovadoras para el sector de pavimentos y revestimientos modificando la composición de este tipo de plaquetas porcelánicas por la introducción de diferentes residuos industriales, que permitan contribuir a la reducción de residuos y sobre todo a la optimización del ciclo de cocción con menores temperaturas de procesado para la obtención de las fases cristalinas (fundamentalmente de mullita, fases feldespáticas y fase vítrea) que permiten alcanzar mejores prestaciones que las del GP.

Por otro lado, y al mismo tiempo, las exigencias en la Edificación respecto a lograr: Estructura, Seguridad y Sostenibilidad (energética y medioambiental) (Ley de la Ordenación de la Edificación, LOE) y la consiguiente aplicación del Código Técnico de la Edificación, CTE, implicarán un mayor y mejor uso de los materiales cerámicos. Además, se ha confirmado un dato que ya se sospechaba de que tanto la vivienda como el transporte en nuestro país contribuyen a una elevada tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> por encima del compromiso de Kyoto. Por esta razón se hace necesarios aislar mejor las viviendas y edificios singulares (edificios públicos, oficinas, centros comerciales...) para que optimizando el comportamiento térmico de los edificios se contribuya a una menor emisión de CO<sub>2</sub>. Esta idea se viene realizando desde hace unos años con el recubrimiento externo de edificios con muros cortina basados en paneles de vidrio, sistemas constructivos (SC) que se han extendido con el uso de plaquetas de tipo cerámico. Simultáneamente, después de varios siglos de haber perdido su terreno en fachadas y por recuperar la tradición y conquistar nuevos mercados, los nuevos retos arquitectónicos y la necesidad de extender los campos de aplicación de las plaquetas cerámicas, está dando lugar a un movimiento efervescente en todo el sector de producción de estos materiales de construcción para “conquistar” de nuevo las fachadas en SC de alto valor añadido desde el punto de vista económico y tecnológico.

La fachada de un edificio es lo primero que salta a la vista de cualquier observador, además de su volumen y formas. Es la “imagen del edificio” como la define A. Blázquez del Inst<sup>o</sup>. Torroja. Los cerramientos de edificios pueden tener una función resistente o no- resistente, pero **la fachada ventilada** que es del segundo tipo cumple además una función medioambiental, en el sentido de favorecer el equilibrio térmico del edificio. En cierto modo este tipo de fachada realizada con plaquetas cerámicas es heredera de los “Muros Cortina” realizados en vidrio, o cerramientos acristalados, aunque con otras características, prestaciones y mayores posibilidades en cuanto a diseño y decoración.

Se revisan, pues, a continuación los principales tipos de plaquetas cerámicas que se está usando ya en fachadas ventiladas con sus variantes, que serían susceptibles del mismo tipo de uso; a saber: Gres rústico o

de arcilla cocida (GR), gres porcelánico tradicional (GP), gres porcelánico modificado (GPM), materiales vitrocerámicos (VC) (en volumen o sinterizados) y plaquetas cerámicas laminadas (GPL).

## 2. Gres rústico

El gres rústico tradicional se ha usado desde la antigüedad. No se puede precisar una fecha de cuando se comenzó a utilizar como material de construcción. La modernización de la industria cerámica en Europa, en los últimos años, se corresponde con la introducción, primero, de la doble cocción tradicional y después, del proceso de monococción rápida en hornos de rodillo de productos de muy baja porosidad, con mejores prestaciones, como es el gres porcelánico. Actualmente existe en el mercado toda clase de decoraciones y colores de este material para diferentes usos. Sus características técnicas y estéticas cumplen los requisitos y exigencias de los clientes y del mercado, por lo que estos materiales siempre han acaparado gran interés por parte de la industria y la investigación.

### 2.1. Características y composición del gres tradicional

La experiencia demuestra que durante la cocción de una pasta cerámica vitrificable la porosidad decrece “hasta llegar a ser cero”, a una temperatura a la cual la vitrificación no es totalmente completa. *El producto cocido hasta este grado es el gres*. Si la cocción prosigue, es decir, se continúa en tiempo y temperatura, la vitrificación prosigue también y la porosidad aumenta de nuevo con el desarrollo de la estructura alveolar típica de la verdadera porcelana.

Las excelentes propiedades químicas y mecánicas del gres tradicional son debidas a su porosidad prácticamente cero y la sobrecocción tiene para él un efecto debilitante. El GR tradicional se obtiene a partir de arcillas, generalmente rojas, por su alto contenido en óxidos de hierro. La característica fundamental es su alto grado de sinterizado.

Puede tener cualquier color, desde el blanco hasta el negro y rompe con fractura concoidal o de piedra. Ocupa el gres una posición central entre todos los productos cerámicos.

Según su composición y proceso de fabricación los tipos de gres pueden ser:

- a) Gres ordinario o gres normal: pasta densa pero económica, color ante o azulado, resistente al ataque por todos los agentes químicos, excepto al ácido fluorhídrico y sus derivados y álcalis calientes. Se prepara con arcillas plásticas de grano fino, gran resistencia mecánica en verde. Con él se pueden modelar grandes piezas.
- b) Gres fino: materias primas más cuidadosamente seleccionadas, preparadas y mezcladas; se emplea para vajillas y piezas artísticas.
- c) Gres blanco: producto de calidad que requiere materias primas más puras y un proceso más refinado, eliminando cualquier posibilidad de contaminación.
- d) Gres resistente al choque térmico: con adiciones y tratamientos térmicos especiales, para una mayor resistencia al choque térmico.
- e) Gres eléctrico: con adiciones especiales para mejorar las propiedades eléctricas mediocres del gres normal.

La composición química de las pastas de gres está comprendida entre los límites dados por la siguiente fórmula molecular:



donde RO varía entre  $0,7 (CaO + FeO) + 0,3 K_2O$  y  $0,3 (CaO + FeO) + 0,7 K_2O$ .

Si se introducen en la composición del gres otros óxidos, por sustitución de uno o más grupos de valencia, se pueden desarrollar propiedades especiales para este material.

De acuerdo con las exigencias de reducción del consumo energético por unidad de producto fabricado y el costo de la mano de obra, la tendencia de la industria cerámica es simplificar la fabricación de productos cerámicos. Como es conocido, ésta se ha realizado clásicamente, para productos de pavimentos y revestimientos cerámicos, en un proceso de bicocción, cocción del soporte o bizcocho y posterior cocción del soporte con el vidriado. Tales exigencias han llevado a la fabricación de productos cerámicos por **monococción**, cocción simultánea de soporte y vidriado y, preferentemente, monococción de productos de baja porosidad, evitando así las reacciones de descomposición de carbonatos, que se dan en los productos porosos y su incidencia en la superficie esmaltada.

## 3. Gres porcelánico

El **gres porcelánico** tiene la gran ventaja de ser un producto biosostenible, aunque no natural pues es fruto de

una “síntesis mineral realizada a elevadas temperaturas” está producido con materias primas naturales, no tóxicas, no irritantes, no nocivas...e incluso podría ser recuperable o reciclable, como se ha demostrado en algunas investigaciones en marcha. No lleva además metales pesados peligrosos, no emite gases nocivos y no es radiactivo. Por sus características decorativas y prestaciones tecnológicas se ha revelado como un **material ideal para su uso en los nuevos sistemas constructivos** realizados con fachadas ventiladas. Presenta gran resistencia a los agentes químicos y productos de limpieza, y además, muy buena resistencia a la abrasión, con un elevado módulo de rotura, lo que facilita su uso en ambientes de intenso tráfico peatonal o en entornos industriales. A ello hay que añadir la facilidad de su limpieza, lo que le convierte en un material idóneo para la pavimentación de espacios donde la higiene es primordial.

En relación con la producción de estos materiales en la década de los 80, investigaciones de la época indicaban que existía ya una fuerte demanda en el sector de baldosas para pavimentos de gres, con base de pasta blanca, no esmaltado (gres porcelánico) superior a la que se producía en el momento. En Italia el número de productores se incrementó de 1987 a 1992 en un 40%. El material con efecto granito resultaba particularmente solicitado en revestimientos internos en sustitución de placas naturales. Las materias primas componentes de las masas del granito, son las mismas del gres porcelánico, teniendo en cuenta que para colorear las pastas se usan óxidos metálicos estabilizados, en proporciones de 0,5 a 4% como máximo.

### 3.1. Composición del GP

En cuanto a su composición, examinando los análisis químicos de dichas pastas, según Brusa (1987), existen dos tipos:

- a) Pastas en las que se usa como fundente óxidos alcalinos, en las que prevalece el  $\text{Na}_2\text{O}$  frente al  $\text{K}_2\text{O}$ .
- b) Pastas en las que la fusibilidad está determinada fundamentalmente por los óxidos alcalino-terrosos.

En este sentido, Dondi et al. (1999) apuntan que la composición química de las pastas de gres porcelánico se puede diferenciar claramente de las de baldosas de gres esmaltadas rojas o de color claro y distinguen entre:

- a) Pastas con un alto contenido en sílice, con un alto nivel de óxidos alcalinos y bajo nivel de  $\text{MgO}$ .
- b) Pastas con contenido medio de sílice, con valores intermedios de óxidos alcalinos y  $\text{MgO}$ .
- c) Pastas con bajo contenido de sílice, con un alto nivel de  $\text{MgO}$  y alúmina y un nivel relativamente bajo de óxidos alcalinos.

De ellas, las pastas más comunes, una vez cocidas, son aquellas con un nivel intermedio de sílice y que están compuestas por un 55-65% en peso de fase amorfa, 20-25% de cuarzo y 12-16% de mullita, además de pequeñas cantidades de corindón o circón.

En la actualidad, las materias primas básicas utilizadas en España para la fabricación de gres porcelánico, tanto esmaltado como no esmaltado o técnico, según Ginés Llorens (2000) presentan los siguientes intervalos de variación:

<b>Arcillas</b>	25-55%
<b>Feldespatos</b>	35-50%
<b>Arenas feldespáticas</b>	0-20%
<b>Caolines</b>	0-20%

Además de estas materias primas básicas, se suelen añadir otros compuestos en pequeñas cantidades con el objeto de modificar las características físicas o estéticas de la composición cerámica. Dentro de este grupo se encuentran las materias primas que aumentan la fusibilidad de la pasta (fundentes enérgicos 0-4%); así como los pigmentos y el silicato de circonio que colorean la pasta (colorantes 0-8%). Las condiciones que se exigen para este tipo de plaquetas aun no están muy definidas normativamente, pero el propio desarrollo y aplicaciones están ya perfilando qué condiciones se exigen a las plaquetas cerámicas para fachadas ventiladas. El mayor reto es el del gran formato exigido por sistemas integrales de colocación. Y en este sentido se están desarrollando nuevos tipos de productos: Al gres porcelánico tradicional (GPT), habrá que añadir el gres porcelánico modificado (GPM) (término ya incluido en los nuevos productos investigados en el Inst<sup>o</sup>. Torroja), nuevos tipos de vidrios sinterizados (“gresites en gran formato”), materiales vitrocerámicos que pueden cubrir una amplia gama e incluso materiales cerámicos laminados que se estudian actualmente en algunos centros de investigación. Aunque ya hay varios tipos de plaquetas en formatos y composición totalmente innovadores que en estos momentos son objeto de obtención del documento DIT, que expide el Inst<sup>o</sup>. Torroja del CSIC, van apareciendo una serie de problemas científico- técnicos subyacentes, que aun no están resueltos, o bien que aun no se les ha prestado debida atención: Las arcillas son rocas de naturaleza y origen muy variable que están constituidas por diferentes tipos de minerales entre los que destacan los minerales de la arcilla. Estos minerales son muy numerosos, destacando la caolinita, la illita, la montmorillonita y la clorita. Como se viene diciendo, en los últimos años se han hecho grandes avances

tecnológicos que han permitido reducir el consumo energético y pasar de ciclos de cocción clásicos de 14 horas en hornos actuales, a hornos multicanales con ciclos relativamente rápidos de 2,5-3 horas y más recientemente a hornos monoestrato de cocción rápida sin soporte refractario con ciclos de cocción extremadamente cortos de unos 60 minutos.

Este rápido desarrollo lleva implícito un estudio amplio y detallado de las materias primas y las pastas utilizadas en la fabricación de productos gresificados con objeto de tener composiciones con las cuales se anulen o minimicen los defectos y problemas asociados más frecuentemente a la fabricación del gres.

Uno de los métodos experimentales más generalizado para el control y formulación de pastas de gres para revestimiento y pavimento cerámico, es la determinación del diagrama o curva de gresificación de las pastas, que consiste en la representación de propiedades físicas que varían con la temperatura de cocción del producto. Estos diagramas permiten determinar el rango de cocción y el intervalo de temperaturas en el que la porosidad abierta se anula y la contracción permanece prácticamente constante, lo que coincide con los valores óptimos de la resistencia mecánica (Escardino et al., 1981).

Una serie de factores influyen en la vitrificación o gresificación de las piezas de gres y, por tanto, en los diagramas de gresificación y el rango de cocción: las características propias de las materias primas, su composición química y mineralógica, granulometría, etc., así como los procesos de fabricación (molienda, prensado y ciclo de cocción).

### 3.2. Propiedades del gres porcelánico

De todo lo expuesto anteriormente se deduce que el gres porcelánico presenta características técnicas de altísimo nivel, que hacen de él un producto único e insustituible para usos específicos.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS PLAQUETAS DE GRES PORCELÁNICO\*

Característica	Norma	Valor de la Norma	Valor de los productos obtenidos
Absorc. de agua (%)	EN 99	< 0,5	< 0,2
Resistencia a la flexión (N/mm <sup>2</sup> )	EN 100	≥ 27	> 50
Resistencia a la abrasión (mm <sup>3</sup> )	EN 102	≤ 205	< 130
Resistencia a la helada	EN 202	Sin defectos	Sin defectos
Coefficiente de dilatación lineal (°C)	EN 103	≤ 9 · 10 <sup>-6</sup>	7 · 10 <sup>-6</sup>
Resistencia al ataque químico	EN 106	Sin variación visible	Sin variación visible
Resistencia al choque térmico	EN 104	Sin alteración	Sin alteración
Dureza Mohs	EN 101	≥ 5	> 5
Resistencia al impacto	EN 122	Sin variación visible	Sin variación visible

\* Obtenido en horno de rodillo industrial

Por otra parte, utilizando tecnologías que permitan características técnicas no tan exigentes (por ejemplo con porosidad de 0,5 a 1%, y resistencia mecánica inferior a 300 kg/cm<sup>2</sup>), se podrá obtener productos de alto contenido estético, para utilizarse como revestimientos interiores. En esta línea estarían algunos de los materiales ya obtenidos de gres porcelánico modificado.

### 3.3. Relación entre microestructura y propiedades del gres porcelánico

Es precisamente su microestructura lo que le confiere propiedades mecánicas y físicas peculiares y por lo que el gres porcelánico presenta resistencias excepcionalmente altas a todo tipo de tensiones, tales como el desgaste por abrasión, choque térmico, alto tránsito peatonal y resistencia al impacto. Como consecuencia de la composición química y mineralógica de la pasta cerámica inicial, de la finura de las materias primas y de la temperatura de cocción cercana a los 1220°C, (entre 1200-1250°C) la microestructura de las plaquetas cocidas se caracteriza por la presencia de cristales fuertemente enlazados de mullita y cuarzo residual, embebidos en una matriz vítrea de porosidad muy baja. La mullita es la fase cristalina principal que se presenta a altas temperaturas, debido a la reacción del metacaolín, que se forma por deshidroxilación de los materiales caoliníticos. La obtención por cocción de plaquetas altamente sinterizadas es debida, principalmente, a la reactividad de la metacaolinita y a la acción de fusión de los feldspatos a las temperaturas aptas para que haya reacciones de los componentes que producen la fase líquida.

Según Barbieri et al. (1995) y Manfredini et al. (1996) la densa microestructura del material cocido es responsable de las propiedades físicas y físico-mecánicas de este material. Así, medidas realizadas por ellos en plaquetas industriales de gres porcelánico dan los siguientes valores para la microdureza Vickers: 4,94-6,09 GPa; módulo de Young: 68,7-73,6 GPa; resistencia a la abrasión: 1,48-1,84g/30x30. Observaban una

relación entre la disminución de la resistencia a la abrasión con respecto al incremento del módulo de Young en las plaquetas ensayadas. Dondi et al. (1999) dan una densidad aparente para el material de 2,3 a 2,4 g/cm<sup>3</sup>, que no guarda una relación clara con la composición química de las pastas. Las propiedades mecánicas dependen, en primer lugar de la porosidad, de lo compacto que sea el material, cuanto mayor sea la densidad aparente mayor será el módulo de Young y el módulo de rotura. Encuentran una correlación positiva entre la resistencia mecánica y el contenido de alúmina (y mullita) de las pastas.

### 3.4. Aplicaciones arquitectónicas del gres porcelánico convencional

Como se viene comentando y redundando en el amplio abanico de aplicaciones de este material se detallan a continuación ejemplos de estas aplicaciones que acreditan al gres porcelánico como una solución sumamente interesante en cuanto a calidad y diseño: **En usos domésticos o residenciales**, debido a sus buenas cualidades decorativas y técnicas, este material se integra en la vivienda de primer uso o segunda residencia, donde los pisos y paredes pueden expresar las maneras y estilos diferentes de vivir. Estilos clásicos o rústicos y modernos, pulidos o mate, etc. Se usan en salones, baños, cocinas, pasillos y otras zonas de la vivienda, aportando practicidad, elegancia y personalidad a los ambientes.

**Uso industrial:** Ya se ha comentado que las características y propiedades tecnológicas del gres porcelánico lo hacen especialmente apropiado para su uso en aplicaciones industriales. Superficies de alto tránsito, fachadas, revestimientos industriales en galerías, túneles, aceras, etc., son lugares especialmente indicados para su utilización, por su resistencia al desgaste, a las heladas, al ataque químico, presencia de agentes contaminantes, grasas y aceites, y por su fácil mantenimiento y limpieza. La elección del acabado dependerá del uso al que se destine el pavimento.

**Uso en edificios públicos y en grandes superficies:** En edificios públicos, en donde las áreas de tránsito están sujetas a intensas tensiones y tráfico peatonal, se necesitan soluciones especiales con buena técnica y diseño. El gres porcelánico ha demostrado ser un material sumamente funcional, resistente e higiénico en edificios públicos, tales como hospitales, estaciones de ferrocarril, aeropuertos, edificios oficiales, áreas comerciales y edificios comunes, incluso lugares públicos como restaurantes, discotecas, comercios de todo tipo y especialmente en supermercados, oficinas, teatros, etc., donde el GP permite crear escenas decorativas originales debido a su infinita modularidad y riqueza de aspectos.

En cuanto a estas aplicaciones, es interesante destacar que la búsqueda de nuevos efectos del material ha dado lugar a una serie de ellos en el producto final, tales como el pulido permitiendo el desarrollo de dos variedades de gres porcelánico: el natural y el pulido.

El porcelánico natural o sin pulir (no recibe ningún tratamiento tras su cocción) presenta un aspecto natural llegando a imitar a las piedras que encontramos en la propia naturaleza, como las pizarras, los mármoles, los adoquines, ... Si el porcelánico es **pulido** una vez finalizada la fase de cocción del producto, se pule la pieza adquiriendo un aspecto extremadamente brillante, imitando los efectos superficiales de cualquier mármol pulido. Otro tratamiento del producto final es el rectificado de las piezas, que permite la modificación de sus dimensiones y así eliminar los problemas de estabilidad dimensional, y además le confiere una geometría muy regular. El biselado de los cantos de las piezas o la eliminación de las juntas laterales de las mismas es otro tratamiento importante que se da en la actualidad. Posibilita su colocación sin juntas de separación, logrando un efecto estético final de gran calidad.

### 4. Gres porcelánico modificado (GPM)

Diversos autores han investigado sobre las materias primas, procesado, características, propiedades físico-mecánicas y aplicaciones arquitectónicas del gres porcelánico convencional. Pero hay pocas referencias conocidas en las que se obtienen otros tipos de este material como es el gres porcelánico modificado por la utilización de materias primas secundarias o residuos. El sector cerámico español busca la reducción de los costes del gres porcelánico mediante la sustitución de los actuales componentes químicos por otros que sean más fáciles de conseguir y por lo tanto más baratos. Se trabaja en la línea de encontrar un sustituto del feldespato, el más caro de los tres componentes del gres porcelánico.

Las investigaciones están dirigidas a que el feldespato pueda ser reemplazado por algún tipo de residuo industrial, preferentemente la ceniza que se obtiene de la combustión del carbón o del petróleo en las centrales térmicas, aunque tampoco se descarta la de los residuos sólidos urbanos y los derivados de la industria del granito, serrines y lodos, así como, incluso vidrios de tubos de TV y rayos catódicos.

Con la sustitución de los feldespatos en la fórmula química del gres porcelánico, que también incluye cuarzo y arcillas caoliníticas, se conseguiría un doble objetivo: Además de reducir el coste de fabricación de las piezas de gres porcelánico, también se estaría desarrollando una labor recicladora muy interesante, como es el caso de la investigación de diversos centros italianos y españoles (Hernández Crespo y Rincón, 2000, 2001). y que señalar que el feldespato significa entre el 15 y el 20% de los componentes del gres porcelánico, llegando en algunos casos a suponer hasta el 25%. En lo que respecta a los costes de producción, el feldespato puede alcanzar hasta el 35% del total.

Uno de los problemas con los que se puede encontrar la industria a la hora de asumir el material fundente obtenido de la incineración o utilización de diversos residuos es que muchas empresas no tienen plena confianza en la homogeneidad de las materias primas obtenidas de los residuos, por ello, sería conveniente, que como ocurre en Estados Unidos y Alemania, se encarguen de su recogida y de llevar a cabo su posterior proceso de vitrificación para de esta manera responsabilizarse del producto. Podría considerarse el gres porcelánico modificado más un concepto que un material con una determinada fórmula. Es decir, el objetivo es conseguir baldosas con las mismas características técnicas, de entre las que destaca poderosamente su prácticamente nula absorción de agua, situada por debajo del 0,1%, mientras que el gres tradicional no alcanza índices tan bajos. Las propiedades de este material son las mismas e incluso a veces mejoran en relación con las del convencional y las aplicaciones de este gres porcelánico modificado son en principio iguales a las del gres porcelánico convencional, detalles sobre su obtención y propiedades se dan en la lección última de este seminario (Rincón et al., 2001).

El gres porcelánico es el tipo de producto cerámico con más desarrollo en los últimos años. Su producción que se inició en 1988, es completa en variedad y crece a medida que crece la demanda. Según la Normativa el gres porcelánico está comprendido dentro del grupo BIa (Baldosas cerámicas prensadas en seco con absorción de agua  $E < 0,5\%$ ) de la Norma ISO 13006 y UNE 67-087. Se están desarrollando grandes formatos (90x120 cm), que abren nuevas posibilidades en la sustitución de las piedras naturales de fachadas, en encimeras de cocinas y baños. La investigación avanza en sus efectos decorativos potenciándose productos de carácter rústico y los mosaicos. Recibe múltiples tratamientos superficiales para conseguir innovadores efectos, como el rectificado, el pulido, el satinado, etc. Las piezas complementarias cada vez están más trabajadas, destacando el desarrollo de los relieves y la creación de cenefas y rosetones ricos y complejos.

## **5. Materiales vitrocerámicos**

### **5.1. Fundamentos**

La nucleación y cristalización pueden definirse como los procesos térmicos y cinéticos en virtud de los cuales, a partir de una fase estructuralmente desordenada, se forma una fase sólida estable con una ordenación geométrica regular.

Este proceso de ordenación, es consecuencia de una disminución de la energía libre del sistema cuando un fundido es enfriado por debajo de su temperatura *liquidus* ( $T_L$ ).

Como los vidrios o sustancias vítreas se encuentran “congelados” en estado de subenfriamiento con un contenido energético mayor que el equilibrio termodinámico [1], pueden evolucionar en condiciones favorables para formar especies cristalinas estables. Este fenómeno se conoce con el nombre de Desvitrificación, ya que constituye un fenómeno que se opone a la propia naturaleza del vidrio.

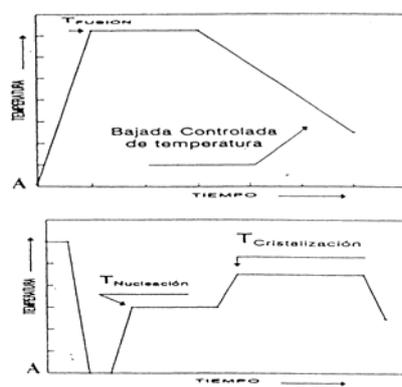
Las bases científicas sobre la cristalización de líquidos subenfriados fueron establecidas por Tamman [2], cuyas investigaciones pusieron de manifiesto la existencia de las dos etapas principales que determinan el proceso de desvitrificación: Nucleación o formación de gérmenes cristalinos y Cristalización o desarrollo de los cristales. Pero es en las décadas entre 1960 y 1980 cuando las teorías generales sobre nucleación y cristalización en vidrios quedaron establecidas, debido a la importancia que adquiere el control del proceso de desvitrificación en la producción de materiales vitrocerámicos o vitrocristalinos [3, 4]. De esta forma lo que en un principio eran procesos no deseables en la obtención de vidrios, ya que daba lugar a defectos, se ha transformado en un mecanismo indispensable para obtener materiales cerámicos con propiedades tecnológicas útiles.

### **5.2. El proceso vitrocerámico**

El proceso vitrocerámico supone la obtención inicial de un vidrio, a partir del cual, mediante tratamientos térmicos de nucleación y cristalización, se obtienen materiales vitrocristalinos con una microestructura y propiedades determinadas, que están en función de la composición química original y de las aplicaciones posteriores de dicho material [4]. Es, pues, evidente que de todo el proceso vitrocerámico el

control de la desvitrificación, es decir, el control de la nucleación y la cristalización del vidrio de partida, es el aspecto más delicado del mismo. La desvitrificación controlada de un vidrio depende, además de otros factores estructurales y composicionales, de su comportamiento termodinámico y cinético, el cual determinará los ciclos térmicos más adecuados que hay que aplicar en cada caso para llegar a obtener el material final que se desea. Los mecanismos por los que se produce la nucleación de un vidrio pueden ser de tipo homogéneo, si es a partir de los propios constituyentes del fundido, o de tipo heterogéneo, si la nucleación se desarrolla a partir de partículas con diferente composición química o sobre las interfases determinadas por las superficies que limitan al fundido.

Del estudio experimental de la variación de la viscosidad frente a la temperatura, pueden definirse una serie de intervalos delimitados por puntos de viscosidad fija y que en buena medida condicionan los procesos de desvitrificación controlada. En líneas generales, para conseguir una nucleación efectiva, la temperatura óptima de nucleación debe situarse dentro del intervalo térmico correspondiente a un valor de la viscosidad igual a  $10^{11}$ - $10^{12}$  dPa-s, es decir, temperaturas ligeramente superiores a la temperatura de transformación vítrea ( $T_g$ ), la cual representa la frontera entre el estado rígido y el plástico de un vidrio, y cuya viscosidad suele ser igual a  $10^{13,3}$  dPa-s. Asimismo, la temperatura superior de cristalización de un proceso vitrocerámico, corresponderá con el intervalo térmico donde sea posible la máxima cristalización sin deformación del material. Por lo general, esta en función de la  $T$  de *liquidus* de la fase cristalina mayoritaria.



Diferentes ciclos térmicos para el proceso de producción de materiales vitrocerámicos. a) Proceso de tipo petrúrgico; b) Proceso de tipo vitrocerámico propiamente dicho.

La desvitrificación controlada puede realizarse bien incluyendo los tratamientos térmicos adecuados dentro de un único ciclo de fusión-enfriamiento, o bien obteniendo primero el vidrio y provocando posteriormente la desvitrificación mediante los ciclos de nucleación y cristalización correspondientes.

En el primer caso se habla de Proceso Petrúrgico y consiste en obtener materiales vitrocrystalinos según ciclos térmicos similares a los procesos naturales de génesis mineral, es decir, a partir de la nucleación y cristalización de un fundido desde su temperatura *liquidus* y durante su enfriamiento hasta temperatura ambiente (cristalización primaria de un fundido). En este proceso, es necesario un riguroso control de la composición química inicial, la cual debe favorecer la obtención de fundidos en los que puedan cristalizar fases con facilidad de sustituciones isomorfas, ya que la desvitrificación va a depender de la capacidad de los constituyentes para organizarse entre sí para formar estructuras cristalinas estables. Para estimar la evolución de los procesos de desvitrificación por vía petrúrgica, existen diferentes métodos que permiten evaluar, mediante el cálculo de parámetros geoquímicos, el comportamiento de un fundido con una composición determinada. Dichos métodos están basados en adaptaciones de las secuencias teóricas de cristalización conocidas para diferentes sistemas; en relación existente entre los elementos formadores y modificadores de red o, en la adecuación de la composición inicial para conseguir desvitrificaciones monofásicas.

La vía petrúrgica es la más comúnmente aplicada en la fabricación de materiales vitrocerámicos a partir de materias primas naturales (rocas y minerales) y residuos industriales (escorias de fundición, etc.). Suelen ser fundidos silicatados con bruscos cambios de viscosidad en intervalos de temperatura muy reducidos lo que determina una fuerte tendencia a la desvitrificación, típica de vidrios aptos para su moldeo por colaje. En general, el proceso seguido es: fusión y homogeneización del fundido; colado sobre moldes pre-forma; ciclos de enfriamiento lento apropiados para conseguir la desvitrificación de las fases cristalinas mayoritarias.

En el segundo caso se habla de Proceso Vitrocerámico y consiste en provocar la desvitrificación en un vidrio previamente obtenido mediante tratamientos de nucleación y cristalización controlados (cristalización secundaria de un vidrio).

La vía vitrocerámica es el proceso seguido para obtención de la mayoría de los materiales vitrocerámicos comercializados fabricados a partir de materias primas puras o de síntesis. La representación de la formación/no formación de fases cristalinas o núcleos en la matriz cristalina en función de la temperatura y el tiempo de tratamiento, da lugar a las denominadas curvas TTT (Transformación-Temperatura-Tiempo), las cuales permiten visualizar fácilmente los intervalos de nucleación y crecimiento cristalino. Estos aditivos, crean distintas discontinuidades en la red vítrea actuando como centros de la nucleación. Para que sean realmente eficaces, deben de ser sustancias con una velocidad de nucleación elevada y fácilmente solubles en vidrio a temperaturas altas. Durante el enfriamiento, la solubilidad de estas sustancias debe de disminuir para permitir la segregación y formar gérmenes de núcleos estables. Por otro lado, el crecimiento cristalino posterior ha de estar garantizado por una tensión interfacial baja y una estrecha semejanza entre los parámetros reticulares de la fase cristalina que precipita y la fase nucleante.

### **5.3. Tipos de materiales vitrocerámicos en función de sus materias primas y aplicaciones**

Según la naturaleza de las materias primas utilizadas en la fabricación de vitrocerámicos, éstos pueden clasificarse como [8, 9]:

- a) Vitrocerámicos Técnicos.- Son generalmente blancos y se obtienen a partir de materias primas utilizadas en la fabricación de la mayoría de vidrios comerciales. Se agrupan según el componente mayoritario: Li, Mg, B, Ba, etc. Es frecuente la adición de otros óxidos con el fin de variar las propiedades del material (tabla 1).
- b) Vitrocerámicos para usos arquitectónicos o industriales del tipo de materiales petrúrgicos.- Aquellos cuya materia prima está constituida por rocas, minerales y mezclas de ambos.
- c) Vitrocerámicos de usos arquitectónicos a partir de residuos industriales.- Fabricados a partir de escorias y desechos de origen metalúrgico, o bien fabricados a partir de las cenizas de combustión de sólidos y residuos industriales.

#### **5. 3.1. Materiales Vitrocerámicos a partir de materias primas puras**

Los materiales vitrocerámicos obtenidos a partir de materias primas puras, (de síntesis o técnicos, constituyen la mayoría de los vitrocerámicos comerciales. En la tabla 1, se presentan algunos de los materiales vitrocerámicos comercializados, especificando su nombre comercial, fases cristalinas mayoritarias, propiedades y aplicaciones. Desde que en 1957 se llevara a cabo la primera patente de material vitrocerámico por Corning Glass, (Pyroceram), se han realizado numerosos trabajos de investigación sobre estos materiales por sus buenas aplicaciones tecnológicas, fundamentalmente en los años sesenta y setenta. La mayor parte de los vitrocerámicos comerciales existentes, se consiguen a partir de vidrios de silicatos con  $\text{Li}_2\text{O}$ , debido a la elevada intensidad del campo de  $\text{Li}^+$ , que favorece la cristalización . También son importantes los vitrocerámicos obtenidos a partir del sistema  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , ya que son materiales que combinan sus buenas propiedades dieléctricas con su alta resistencia mecánica y sus valores medios y bajos de coeficientes de dilatación térmica. Dichas propiedades se deben a la formación de cordierita en un amplio rango de temperaturas. Cuando es utilizado el Pt como nucleante en este sistema, tiene una gran influencia sobre la cinética de la cristalización, fundamentalmente, acelerando la transformación de las distintas fases de cordierita en tiempos más cortos de tratamiento.

#### **5. 3.2. Materiales vitrocerámicos de uso arquitectónico a partir de rocas y minerales**

Globalmente, se consideran como tales aquellos materiales obtenidos a partir de escorias, rocas y minerales. La terminología más usada para designar a estos materiales es la de “materiales petrúrgicos” (o sitals), si bien no es del todo correcta pues el adjetivo “petrúrgico” indica un tipo de procesado y no un determinado tipo de materia prima. Tradicionalmente, es en los países del Este de Europa donde la industria petrúrgica tiene sólidas bases con numerosas instalaciones para la fabricación de productos en Rusia, Bulgaria, Polonia, Alemania (sobre todo en la antigua República Democrática Alemana) y en las actuales repúblicas Checa y Eslovaca. Más recientemente, se incluirá en esta lista países como Reino Unido, Italia,

Austria, USA y Japón. La siguiente figura muestra un aspecto de la vitrina dedicada a materiales vitrocerámicos tipo petrúrgico expuesta en el Museo de la Tierra y el Hombre de Sofía en Bulgaria.

Como ejemplo de materiales vitrocerámicos a partir de sustancias puras obtenidas por vía petrúrgica, son destacables las investigaciones llevadas a cabo en el Dpto. de Materials Science del Imperial College de Londres las cuales han dado lugar a distintas patentes, [19, 20], así como las realizadas por J. Ma. Rincón en los últimos años. El material obtenido, llamado SILCERAM, es el resultado de la cristalización controlada de un vidrio formulado en el sistema  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . El intervalo de composiciones que estos autores han utilizado es:  $\text{CaO}=0\text{-}30\%$ ;  $\text{MgO}=0\text{-}30\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3=5\text{-}35\%$  y  $\text{SiO}_2=35\text{-}75\%$ . Para provocar la cristalización, se añaden como agentes nucleantes  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en cantidades del 0,5 al 10%. La adición de estos óxidos hace posible la cristalización primaria, ya que ambos actúan conjuntamente estimulando la nucleación y crecimiento de pequeños cristales de espinelas, ( $<1\ \mu\text{m}$ ), los cuales ejercen el papel de núcleos en un amplio intervalo de temperaturas que se solapa con el intervalo de cristalización de la fase mayoritaria que es un piroxeno.

Asimismo, otros factores esenciales de cuyo control depende la consecución de buenos materiales vitrocristalinos son la temperatura y el tiempo de los tratamientos térmicos realizados: cuanto mayor es la capacidad de cristalización del vidrio y menor velocidad de crecimiento de los cristales, más fina es la microestructura del producto final. En caso contrario, la microestructura se caracteriza por poseer un menor número de cristales, pero de mayor tamaño. El uso preferente de rocas de tipo ígneo (sobre otros tipos de rocas y materias primas naturales) en la producción de materiales vitrocerámicos, se debe a la relativa mayor constancia de la composición química y homogeneidad mineralógica, lo cual favorece el procesamiento posterior. A su vez, la elección de rocas basálticas viene determinada por su menor temperatura de fusión y la mayor fluidez del fundido lo que, a priori, las hace más aptas para su procesado vitrocerámico. Una roca puede tener ocho o nueve de estos minerales normativos pero, después de la fusión y de la recristalización, no suelen aparecer más que tres o cuatro fases, fundamentalmente: magnetita, un piroxeno de tipo diópsido, a veces plagioclasa (labradorita-anortita) y, más raramente, olivino. Los puntos de fusión estipulados para estos minerales varían desde los  $1118^\circ\text{C}$  de la albita hasta los  $1686^\circ\text{C}$  de la leucita. La mayoría sobrepasan los  $1500^\circ\text{C}$ . Naturalmente, la fusión de sus mezclas disminuyen las temperaturas de fusión de la roca ( $1100^\circ\text{C}$ - $1300^\circ\text{C}$ ).

El orden de aparición y desarrollo de estas fases, por debajo de los  $1300^\circ\text{C}$ , depende de los tratamientos térmicos aplicados: 1º) Si éstos son incluidos en el curso de un enfriamiento lento del fundido original desde la temperatura *liquidus*, entonces, la sucesiva aparición de fases minerales se da por mecanismos similares a los que, de manera natural, originan la formación de rocas ígneas (Proceso petrogenético = proceso petrúrgico o de cristalización primaria, [6]). 2º) Si por el contrario, una vez obtenido el vidrio se aplican tratamientos térmicos desde bajas temperaturas ( $=500^\circ\text{C}$ ), se provoca una desvitrificación o recristalización secundaria en el vidrio de partida. Ambas posibilidades deben considerarse para determinar los intervalos de aparición de cada fase, los cuales varían mucho unas a otras [24], por ejemplo: piroxenos entre  $800^\circ\text{C}$ - $1180^\circ\text{C}$ ; magnetita y/o fases de Fe/Ti entre  $700^\circ\text{C}$ - $1300^\circ\text{C}$ ; plagioclasas entre  $1050^\circ\text{C}$ - $1150^\circ\text{C}$  y olivinos entre  $900^\circ\text{C}$ - $1250^\circ\text{C}$ .

Por las buenas propiedades que pueden obtenerse, los materiales vitrocerámicos de rocas basálticas presentan multitud de aplicaciones industriales, constituyendo una valiosa alternativa a materiales y metales tradicionales [26, 27]. En pavimentos industriales y en hidrociclones, presentan una aplicación directa por sus condiciones favorables. También, los tubos de vitrocerámicos de basaltos son óptimos para la protección de tuberías de hierro por su resistencia al desgaste por abrasión en conducciones de líquidos corrosivos en las industrias químicas. Son, también, muy buenos materiales como matrices para la inmovilización y aislamiento de residuos tóxicos y radioactivos por sus bajas velocidades de lixiviación y estabilidad química a largo plazo [28, 29]. La fig. 6 presenta el aspecto de una serie de vitrocerámicos de basalto (con la superficie original de colado) obtenidos por el Grupo de Investigación de J. Rincón, así como dos vitrocerámicos comerciales (LAS de espodumena y otro, basaltic, importado en nuestro país desde los países del Este Europeo).

## 6. Materiales vitrocerámicos sinterizados

### 6.1. Sinterizados en volumen

Los materiales vitrocerámicos obtenidos por el proceso de sinterización/ cristalización debido a su versatilidad de composiciones y propiedades físicas y tecnológicas tienen una amplia gama de aplicaciones. Las aplicaciones de estos materiales en la Construcción y en Arquitectura es también una realidad especialmente en países tales como Japón, Rusia, Estados Unidos e incluso varios países asiáticos (Indonesia)

y africanos (Ghana, Unión Sudafricana, etc.), pero su uso aún no se ha implantado en nuestro país en este campo de aplicación. Aún así, de hecho, de una manera indirecta, ya existen aplicaciones de los vitrocerámicos en nuestro país con los nuevos y recientes desarrollos de vidriados de tipo vitrocerámicos como recubrimiento de pavimentos cerámicos y revestimientos de fachadas de altas prestaciones.



Los materiales vitrocerámicos en la construcción cuando se utilizan en forma masiva, es decir no como recubrimiento, se fabrican fundamentalmente por la vía del procesado por sinterización imitando el proceso tradicional de producción de los pavimentos de gres por monococción. Así pues, se exponen a continuación, en primer lugar las aplicaciones de este tipo de materiales vitrocerámicos masivos y los fundamentos de su procesado y en segundo lugar, los fundamentos y aplicaciones de vidriados de tipo vitrocerámico como recubrimiento de baldosas o plaquetas de gres convencional y de gres porcelánico. Los procesos de sinterización son bien conocidos desde hace tiempo no sólo para la producción de metalurgia de polvos sino también en la producción de muchos materiales cerámicos convencionales y avanzados. En el caso concreto de vidrios apenas hay referencias en la literatura de materiales cerámicos y vidrios, a pesar de que existen productos comerciales muy extendidos como el “gresite” o “mosaico vítreo” que tiene un amplio mercado y aplicación en la industria de la construcción como material de revestimiento y decoración tanto de exteriores, como de interiores incluso en grandes superficies y de uso muy extendido en recubrimientos de piscinas y paredes de instalaciones deportivas. Algunos autores se han preocupado por investigar los fundamentos de la sinterización de polvos de vidrio, pero más recientemente es cada vez mayor el interés que se está dedicando a conocer más a fondo este tipo de proceso. De hecho, se ha aplicado este tipo de sinterización para el reciclado de vidrios de residuos del desguace de tubos de rayos catódicos (TVs y PCs).

De hecho, hay tres posibilidades de producir vitrocerámicos por sinterización

- 1) por densificación de polvos de vidrio por sinterizado en estado viscoso y posterior tratamiento de nucleación y cristalización;
- 2) por crecimiento de “puentes o cuellos” entre las partículas vítreas, seguida de un proceso de contracción y simultánea cristalización de la matriz y
- 3) por sinterización de estado sólido o en fase líquida de polvos de materiales vitrocerámicos. Así, en vidrios de sistemas de aluminoboratos ha sido posible realizar vitrocerámicos sinterizados por el proceso 1) con tratamientos térmicos posteriores entre 700-1000°C, obteniéndose materiales con una tenacidad de 2,4 MPam<sup>1/2</sup>. Materiales vitrocerámicos de cordierita se han obtenido también a partir de vidrios de silicoaluminato de magnesio con la adición de agentes nucleantes de TiO<sub>2</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> utilizando los procesos del tipo 1) y 2). En este tipo de procesos para controlar la sinterización es fundamental realizar una determinación experimental de la contracción tanto axial como radial.

Materiales vitrocerámicos sinterizados comercializados tienen un amplio uso en Arquitectura en Japón con una alta tasa de exportación como es el caso del producto comercializado con el nombre de NEOPARIS®. El aspecto de este material es como el de un mármol artificial y está constituido fundamentalmente por las fases cristalinas: β-wollastonita y anortita embebidas en una fase vítrea residual. Las cristalizaciones crecen hasta tamaños

considerables de manera que pueden observarse a simple vista como ocurre con las mineralizaciones de muchos productos de piedra natural. Debido a la capacidad de reblandecimiento a elevadas temperaturas que posee la fase vítrea residual es hasta posible curvar este tipo de materiales previamente a su instalación de manera que se pueden realizar columnas y superficies curvas. El proceso de obtención de este tipo de material implica la realización de varias etapas que se muestran en la siguiente figura conjuntamente con un esquema del aspecto de la microestructura del material en cada etapa de tratamiento térmico. Después del sinterizado inicial a unos 850°C, se inicia la cristalización en los bordes de grano progresando luego internamente con otro tipo de textura generalmente hasta rellenar de cristalizaciones todo el material. El acabado de este material como en los de gres porcelánico puede ser realizado en forma mate o bien con un pulido final.

Recientemente, Rincón y Romero del IETcc,CSIC han demostrado que precisamente el notable incremento de producción de los materiales de gres porcelánico va a conducir a la industria española a la producción de pavimentos vitrocerámicos masivos procesados por sinterización. Una amplia gama de materiales vitrocerámicos sinterizados pueden obtenerse por el procesamiento de residuos industriales vitrificados tal y como se ha demostrado con lodos de goethita y jarosita procedentes de la hidrometalurgia del cinc [11]. Asimismo, a partir de vidrios de basalto obtenidos por la fusión de basaltos naturales se han podido obtener vitrocerámicos sinterizados en lo que la inclusión de un 5-10% de  $ZrO_2$  ha permitido obtener tenacidades de fractura superiores a las de los vitrobasaltos convencionales comercializados. Pequeñas piezas de materiales vitrocerámicos sinterizados se vienen fabricando en Bulgaria a partir de basaltos para aplicaciones en la industria textil debido a la alta resistencia a la abrasión o al desgaste de este tipo de materiales

Con vistas a la necesidad de disponer de este nuevo tipo de materiales varios fabricantes en España han desarrollado y fabricado materiales de este tipo para completar su gama de productos en el nivel alto para poder competir con otro tipo de materiales en el recubrimiento de, por ejemplo, fachadas, vestíbulos de grandes edificios, suelos de aeropuertos, etc. Así, la empresa de Castellón TORRECID inició hace unos años un trabajo de investigación, desarrollo e innovación con el objetivo de desarrollar un nuevo material cerámico con las siguientes características:

- Aspecto estético adecuado.
- Posibilidad de diseño personalizado.
- Sin limitación de formato.
- Inerte frente a los agentes químicos y atmosféricos.
- Resistente al desgaste y a las heladas.
- Elevada resistencia a la flexión

Como fruto del trabajo de investigación, desarrollo e innovación realizado en base a los objetivos planteados nació VITROCID<sup>®</sup>. Se trata de un nuevo material cerámico de construcción para recubrir fachadas, suelos y paredes fabricado únicamente a partir de vidriados. En su elaboración se parte de granos de vidriado con una composición especial y una distribución de tamaño de partícula definida y controlada. Dichos granos de vidriado se someten a un tratamiento térmico durante el cual sinterizan unos con otros y desvitrifican fases cristalinas, dando lugar a un material vitrocerámico. Como resultado se obtienen placas monocapa con una amplia gama de monocolors y efectos granito. Con VITROCID<sup>®</sup> también es posible conseguir cualquier tipo de diseño. Para ello se fabrica en placas bicapa en las que la decoración es aportada por una lámina que se aplica en sándwich entre dos capas de granos de vidriado. Dado que la lámina se decora con las técnicas habituales de serigrafía, rodillo etc., la definición y calidad del diseño es muy elevada, al igual que la variedad de posibilidades estéticas. Se puede reproducir con total fidelidad no solo piedras naturales, terrazos, papel pintado, etc., sino que también es posible fabricar placas con logotipos corporativos, imágenes publicitarias o cualquier otro motivo que sea de interés.

## **6.2. Sinterizados en capa fina: Recubrimientos VC para pavimentos de gres**

Los vidriados de tipo vitrocerámico o vitrocristalino vienen usándose desde hace siglos en productos de cerámica artística y su presencia es frecuente en murales vidriados realizados con fines decorativos. A este tipo de vidriados pertenecen los de efecto aventurina que son conocidos desde la Antigüedad. Recientemente (década 1990-2000) se han desarrollado novedosas fritas que pueden ser transformadas en vidriados vitrocerámicos en el propio ciclo de cocción de pavimentos por el proceso de monococción obteniéndose mejores prestaciones respecto a los vidriados tradicionales. En años anteriores a la década indicada en donde este tipo de vidriados ha tenido su máximo desarrollo, se mencionan vidriados próximos a éstos, tales como:

- Vidriados opales y opacificados totalmente aunque su naturaleza vitrocristalina no es muy clara.

- Vidriados mate que apenas reflejan la luz incidente debido a la presencia de cristalizaciones parciales de willemita (silicato de zinc) y otros silicatos de calcio o de magnesio. Se sabe desde hace tiempo que la presencia de sales de  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ , Criolita o incluso de ciertos fosfatos pueden dar lugar a efectos similares.
- Vidriados satinados, intermedios entre los anteriores que pueden obtenerse a partir de composiciones que desvitrifican el vidrio original y que se consiguen por saturación de fases cristalinas en el enfriamiento o bien, por mezclas de dos fritas incompatibles entre sí, como cristalizaciones de bifosfato de titanio, produciendo esmaltes y vidriados muy resistentes al ataque ácido y alcalino.

Los vidriados desarrollados más recientemente en la década anterior para pavimentos y revestimientos de altas prestaciones se encuadran respecto a su composición en los sistemas vitrocerámicos más convencionales y pertenecen a los sistemas siguientes que se recogen en la tabla 1 conjuntamente con las principales fases cristalinas que se forman en este tipo de vidriados.

Más recientemente (a finales del 2000) se ha demostrado por el Grupo/Lab de Materiales Vítreos y Cerámicos del Inst<sup>o</sup>.Torroja del CSIC la posibilidad de obtener vidriados de tipo vitrocerámico a partir de varios residuos industriales con un doble fin: reciclar productos tóxicos o que se producen en un tonelaje excesivo y al tiempo que mejorar las prestaciones de los vidriados tradicionales consiguiéndolos con un menor coste. Así, se han desarrollado vidriados en los que se forman cristalizaciones de dióxido y cristalizaciones de óxidos de hierro (hematita y magnetita) a partir de lodos de la producción de piedras naturales tales como el granito.

FRITAS DE VIDRIO Y FASES CRISTALINAS OBTENIDAS POR PROCESO DE MONOCOCCIÓN RÁPIDA DE PAVIMENTOS CERÁMICOS DE GRES

Composición del sistema	Principal fase cristalina	Microestructura
$\text{Li}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$	Espodumena Cordierita Dióxido Dióxido + anortita	Cristalitos redondeados Cristales puntuales Cristales cuadrados/redondos Cristales alargados y prismáticos
Sistemas comerciales de vitrocerámicos	Cordierita Espodumena	Cristales granulados Cristales prismáticos
$\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}/\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$	Nefelina/celsiana	Cristales en agujas
$\text{Li}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$	Leucita	“Whiskers” de 1-2 $\mu\text{m}$

Las propiedades de este tipo de vidriados para materiales de gres son generalmente superiores a las de los vidriados convencionales con bases de boratos y de óxidos de plomo como puede verse en la tabla 2 en la que se recogen las características más destacadas de los vidriados

COMPARACIÓN ENTRE ALGUNAS DE LAS PROPIEDADES DE VIDRIADOS TRADICIONALES Y DE LOS DE TIPO VITROCERÁMICO

PROPIEDAD	VIDRIADO VITROCERÁMICO	VIDRIADO CONVENCIONAL
Índice de reflexión (%)	92,6	89,1
Microdureza Vickers (GPa)	6,4	6,0
Pérdida de peso (mg) (6000 rpm)	56	113

## 7. Plaquetas cerámicas laminadas

La amplia gama de materiales para fachadas que se han expuesto hasta aquí tiene su complemento y su futuro en los materiales laminados de tipo porcelánico como el que se expuso en la feria CEVISAMA hace unos años por unos fabricantes italianos y que se muestra en la siguiente figura. En el caso de aplicaciones de fachada una propiedad fundamental es ir a placados de mayor superficie y con mayor ligereza.



*Placas de gran formato para fachadas en gres porcelánico en multicapas o laminados (expuestos en la Feria de Valencia CEVISAMA en el año 2006)*

La gráfica que se muestra a continuación recoge la diferencia de densidad entre diversos materiales y en la misma puede verse que los laminados son la tendencia de futuro para sus aplicaciones en fachadas ya que unen la ligereza a sus altas resistencias mecánicas.

*Relación entre la tenacidad de fractura de diversos materiales y su densidad (diagrama de Ashby traducido, simplificado y modificado por J.Ma. Rincón, abril 2007)*

### **CONCLUSIÓN.-**

La cerámica en fachadas con su complementariedad en equipamientos urbanos (parques, jardines y calles peatonales...) va a ser como ya han indicado otros autores, de hecho, la cara amable de una ciudad y un nuevo concepto de urbanismo, más cálido y menos frío que se está alumbrando ya en este siglo. El reto científico, tecnológico y comercial de las fachadas ventiladas de cerámica puede dar lugar a plaquetas de mayor VALOR AÑADIDO, que es lo que necesita el sector para competir en el mercado actual tan globalizado. Es, una vez más en la Historia de la Tecnología, un reto y una ambición por realizar y hacer fácil y usual "lo difícil". Una vez más, y esto ya es obvio el decirlo: la "interdisciplinaridad" mas que la multidisciplinaridad es necesaria en este campo, ya que esta es una AVENTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA PARA SER COMPARTIDA por todos los implicados en los productos cerámicos, pues hay múltiples y enriquecedoras acciones que llevar a cabo en los próximos años. Asimismo, las posibilidades de usar en fachadas materiales compuestos puede decirse que son enormes y conoceremos en los próximos años, nuevos materiales para fachadas que eran impredecibles de fabricar actualmente. Es, una vez más en la Historia de la Tecnología, un reto y una ambición por realizar y hacer fácil y usual "lo difícil", se trata de un proyecto científico y tecnológico para ser compartida por todos, pues hay múltiples y enriquecedoras investigaciones científicas y tecnológicas que realizar próximamente en el campo de este tipo de sistemas constructivos de la edificación..

### **REFERENCIAS**

1. J.BOLINCHES MOLINA, Los murales de cerámica en Valencia, SILICATOS (9) 1998, 47- 50 (Ed. Escuela de Cerámica de Manises).
2. I. BONDI, Cerámica per l'architettura, Vol .31, Faenza Editrice, 1998, pp. 50-57
3. J. MA. RINCÓN Y M. ROMERO, Productos y matrices de tipo vitrocerámico como nuevos Materiales Compuestos en usos arquitectónicos, Ibérica, Actualidad Tecnológica 411(1998) sept., 403- 405
4. J. MA. RINCÓN Y M. ROMERO, La producción de gres porcelánico actualmente en expansión como paso previo para la producción de materiales vitrocerámicos masivos, Técnica Cerámica (2001)290
5. J.MA. RINCÓN, M. ROMERO, M. JORDAN Y J. P. GUTIERREZ, Materiales Inorgánicos en la Construcción para el siglo XXI, Ed. Univ. Miguel Hdez, Elche, y IETcc, CSIC, 2001
6. J. MA. RINCÓN, Gres porcelánico modificado: hace posible la reutilización de producto y otro tipo de residuos, COVERINGS , Extra de EL MUNDO DE CASTELLON (2002) 6 mayo, 22
7. J.MA. RINCÓN, El CTE y los Materiales Cerámicos, Extra de El Mundo de Castellón para la Feria COVERINGS , 2003, 23 marzo
8. G. CIGOGNANI, El futuro del proceso cerámico en un mercado global requiere una nueva estrategia empresarial, Técnica Cerámica, 6-15, 2004 (conferencia de Qualicer 2004)
9. J.MA. RINCÓN Y M. ROMERO, Perspectivas de avances científicos y tecnológicos en plaquetas cerámicas para la construcción, Técnica Cerámica 326( 2004) 960-961
10. A. BLÁZQUEZ, La innovación en Materiales, Sistemas y Procedimientos Constructivos, XVI Curso CEMCO, IETcc, CSIC, 2004
11. ASCER, 2000. <http://www.ascer.es/es/Tecnologia/gresporcelanico2.htm>
12. BARBIERI, L.; BONFATTI, L.; FERRARI, A. N.; LEONELLI, C.; MANFREDINI, T. y SETTEMBRE

- BLUNDO, D.: Relationship between microstructure and mechanical properties in fully vitrified stoneware. *Ceramics: Charting the Future*. Edit. P. Vicenzini, Techna Srl, (1995), 99-105.
13. BIFFI, G.: Il gres porcellanato. Grupo Editoriale Faenza Editrice, (1996).
  14. BRUSA, A.: Características, prestaciones y tecnología de producción de pavimento gresificado, no esmaltado, con efecto granito (gres porcelánico). *Técnica Cerámica*, (1982), 159, 562-572.
  15. DONDI, M.; ERCOLANI, G.; MELANDRI, C.; MINGAZZINI, C. y MARSIGLI, M.: The Chemical Composition of Porcelain Stoneware Tiles and its Influence on Mechanical Properties. *Interceram*, **48** (1999), 2, 75-81.
  16. ESCARDINO, A.; AMORÓS, J. L. y ENRIQUE, J.E.: Estudio de pastas de gres para pavimentos. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, **20** (1981), 1, 17-24.
  17. ESTRADA, A.: Gres Cerámico. *Bol. Soc. Esp. Cer.* **5** (1966), 3, 365-388.
  18. GINÉS LLORENS, F.: Materias primas para la fabricación de gres porcelánico. *Técnica Cerámica*, (2000), 286, 908-913.
  19. HERNÁNDEZ-CRESPO, M. S. y RINCÓN, J. Ma.: Reciclado de residuos de la minería del granito y de incineradora de RSU en la obtención de nuevos materiales tipo gres porcelánico. *Materiales de Construcción*. **50** (2000), 260, 49-62.
  20. HERNÁNDEZ-CRESPO, M. S. y RINCÓN, J. Ma.: New Porcelainized Stoneware Materials Obtained by Recycling of MSW Incinerator Fly Ashes and Granite Sawing Residues. *Ceramics International*, aceptada para publicación, paper n° 159/2000.
  21. MANFREDINI, T.; ROMAGNOLI, M. y RINCÓN, J. Ma.: Gres porcelánico: Aplicaciones arquitectónicas, procesado y propiedades físico-mecánicas. *Materiales de Construcción*, **46** (1996), 242-243, 107-117.
  22. RINCÓN, J. Ma.; HERNÁNDEZ-CRESPO, M. S. y ROMERO, M.: Reciclado de Residuos de la Industria de Piedra Natural en la Producción de Materiales de Construcción. Curso CEMCO XV, Seminario S2.
  23. RINCÓN, J. Ma. y ROMERO, M.: *Materiales Inorgánicos en la Construcción para el siglo XXI*, Ed. Univ. Miguel Hernández e Inst. E. Torroja, Elche/Madrid, 2001.
  24. FERNÁNDEZ NAVARRO, J. M.: *El Vidrio*. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (2ª edición), (1991). Madrid.
  25. STOOKEY, S. D.: History of the development of Pyroceram. *Resarch Manag.*, (1958) 1, 155-163.
  26. Mc MILLAN, P. W.: *Glass-ceramics*. Ed. Academic Press, (2ª edición), (1979). New York, London.
  27. GARCÍA VERDUCH, A.: *Materiales obtenidos a partir de rocas y escorias fundidas*. Jornadas científicas sobre Cerámica y Vidrio. Ed. Sección de Ciencia Básica de la Soc. Esp. Ceram. Vidr. y la Universidad de Oviedo (1980), Oviedo.
  28. VICENTE-MINGARRO, I.: *Estudio de los Mecanismos de Nucleación y Cristalización en vidrios obtenidos a partir de rocas basálticas*. Tesis Doctoral. Ed. U.C.M. (1993). 256 pp.
  29. QUERALT I MITJANS, I.: *Dinámica mineral de los procesos de desvitrificación en vidrios basálticos*. Tesis Doctoral, Fac. de Geología, Universidad de Barcelona (1988).
  30. SCHOLLES, S.: *Glass-ceramics in USSR. The glass industry*, (1975), 56, 99-23.
  31. WAGSTAFF, F. E.: Crystallization and melting kinetics of cristobalite. *J. Amer. Cer. Soc.*, (1969) 52, 650-654.
  32. JACODINE, R. I.: Study of devitrification of lithium glass, *J. Amer. Cer. Soc.*, (1961) 44, 472-475.
  33. WEST, A. R. y GLASSER, F. P.: Crystallization of  $\text{Li}_2\text{O-SiO}_2$  glasses. En: *Advances in nuclei and crystal in glasses*. Ed. The glass division of The Amer. Cer. Soc., (1971) Columbus, Ohio.
  34. RINCÓN, J. M.: *Estudio de nuevos vidrios y materiales vitrocrystalinos del sistema  $\text{Li}_2\text{O-CdO-SiO}_2$  con posible utilidad en la industria nuclear*. Tesis Doctoral. Ed. U.C.M. n° 149/84 (1984). Madrid.
  35. RINCÓN, J.M.; GONZÁLEZ-OLIVER, C. J. R. y JAMES, P. F.: Phase separation in  $\text{Li}_2\text{O-SiO}_2$  glasses with additions of  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}_2$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . *J. Mat. Sci.* (1988) 23, 2512-2516.
  36. ALEIXANDRE, V.; GONZÁLEZ, J. M. y RINCÓN, J. M.: Cristalización en algunos vidrios del sistema  $\text{Li}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  observada fundamentalmente por microscopía electrónica. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* (1971) 10, 341-365.
  37. ALEIXANDRE, V.; GONZÁLEZ, J. M. y RINCÓN, J. M.: Estudio de la cristalización en algunos vidrios del sistema  $\text{Li}_2\text{O-CdO-SiO}_2$ . *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* (1975) 15, 23-243.
  38. RINCÓN, J. M. y GONZÁLEZ, J. M.: Effect of  $\text{V}_2\text{O}_5$  and  $\text{MnO}_2$  additions an the crystallizations and mechanical properties of  $\text{Li}_2\text{O-CdO-SiO}_2$  glasses. *J. Mat. Sci. Lett.* (1987) 6, 1327-1330.
  39. ROGERS, P. S.; WILLIAMSON, J.; BELL, J. F. y CAMBELL, M.: Erosion resistant glass-ceramics made by direct controlled cooling from the melt. *Proceedings of International Seminar on Energy Conservations in Industry*, 3 Application and Technology. Ed. Commission of the European Communities, (1984).
  40. PONTON, C. B.: *The mechanical properties of Glass-Ceramics in the system  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$* . Tesis Doctoral. Dept. of Materials, Royal School of Mines, Imperial College of Science and Technology, (1987) London.
  41. VICENTE-MINGARRO, I.; CALLEJAS, P. y RINCÓN, J. Ma.: Microestructura y microanálisis de fases minerales cristalizadas en vidrios obtenidos a partir de rocas basálticas canarias. *Bol. Soc. Esp. Mineral.*, (1991) 14, 95-105.
  42. BEALL, G. H. y RITTLER, H. L.: Basalt glass-ceramics. *Ceram. Bull.*, (1976) 55, 6, 579-582.