

# 84

Directores del capítulo  
*Joel Bender y Jonathan P. Hellerstein*

## Sumario

Vidrio, cerámica y materiales afines <i>Jonathan P. Hellerstein, Joel Bender, John G. Hadley y Charles M. Hohman</i> . . . . .	84.2
Fibras ópticas <i>George R. Osborne</i> . . . . .	84.11
Piedras preciosas sintéticas <i>Basil Dolphin</i> . . . . .	84.27

## ● VIDRIO, CERAMICA Y MATERIALES AFINES

*Jonathan P. Hellerstein, Joel Bender,  
John G. Hadley y Charles M. Hohman*

Este capítulo abarca los siguientes sectores productivos:

- Vidrio
- Fibras de vidrio sintéticas
- Alfarería
- Baldosa cerámica
- Productos cerámicos industriales
- Tejas y ladrillos
- Refractarios
- Piedras preciosas sintéticas
- Fibras ópticas.

Es interesante señalar que muchos de estos sectores no sólo tienen raíces en la antigüedad, sino que también comparten varios procesos generales de fabricación. Por ejemplo, todos se basan fundamentalmente en el uso de materias primas que se encuentran en estado natural en polvo o en forma de finas partículas, las cuales se transforman por el calor en los productos deseados. Por lo tanto, a pesar de la variedad de procesos y productos comprendidos en este grupo, estos tratamientos comunes autorizan a adoptar una perspectiva general común de los riesgos potenciales para la salud asociados con tales industrias. Puesto que los distintos sectores de fabricación se componen tanto de segmentos pequeños y fragmentados (por ejemplo, las fábricas de ladrillos) como de grandes plantas de fabricación técnicamente muy avanzadas y con miles de obreros, cada sector se describe por separado.

### Riesgos y procesos comunes

En la fabricación de productos en estos sectores industriales se encuentran riesgos para la salud y medidas de seguridad comunes. Los riesgos y las medidas de control se tratan en otras secciones de la *Enciclopedia*. Los riesgos de procesos específicos se examinan en apartados individuales de este capítulo.

### Tratamiento de las partidas de materias primas:

En la mayoría de los procesos industriales de fabricación las materias primas sólidas y secas se reciben a granel o en sacos. Las materias primas a granel se descargan desde vagones tolva o camiones en silos, tolvas o mezcladores por gravedad, conducciones neumáticas, transportadores sinfín, cangilones o cualquier otro método de transporte mecánico. Los pallets de materias primas en sacos (de 20 a 50 Kg) o en grandes sacos a granel (de 0,5 a 1,0 toneladas) se descargan desde remolques o vagones de tren mediante carretillas elevadoras industriales motorizadas, grúas o polipastos. Los materiales, en sacos o a granel, se retiran de los pallets manualmente o con la ayuda de elevadores motorizados. En general, las materias primas ensacadas se cargan en estaciones de descarga de sacos, o directamente en tolvas de almacenamiento o tolvas pesadoras.

Los riesgos potenciales para la seguridad y la salud asociados a los procesos de descarga, manipulación y transporte de materias primas sólidas incluyen:

- *Exposición a ruidos* que oscilan de 85 a 100 decibelios dBA. Vibradores neumáticos, compresores, servoválvulas, motores de agitadores, ventiladores y colectores de polvo son algunas de las principales fuentes de ruido.
- *Exposición respiratoria a partículas en suspensión en el aire* debido al transporte y a la mezcla de materias primas sólidas granulares.

La exposición depende de la composición de las materias primas, pero normalmente incluye sílice (SiO<sub>2</sub>), arcilla, calizas, polvos alcalinos, óxidos metálicos, metales pesados y partículas nocivas

- *Riesgos ergonómicos* asociados al levantamiento manual o a la manipulación de sacos de materias primas, a vibradores o a actividades de líneas de transmisión o mantenimiento del sistema.
- *Riesgos físicos* debidos al manejo y a la circulación de vagonetas o carretillas motorizadas, al trabajo a alturas elevadas, a la entrada en espacios reducidos y al contacto con fuentes de energía eléctrica, neumática o mecánica, como puntos de corte, piezas giratorias, engranajes, ejes, correas y poleas.

### Operaciones de cocción o de fusión

La fabricación de productos en estos sectores industriales implica operaciones de secado, fusión o cocción en estufas u hornos. En estos procesos el calor se genera por combustión de propano, gas natural (metano) o fuelóleo, fusión por arco eléctrico, microondas, secado dieléctrico, calentamiento con resistencias eléctricas o varias de estas técnicas. Los riesgos potenciales que presentan los procesos de cocción o fusión incluyen:

- *Exposiciones a productos de la combustión* tales como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno(NO<sub>x</sub>) y anhídrido sulfuroso.
- *Humos y partículas* en suspensión en el aire procedentes de materias primas (por ejemplo sílice, metales, polvos alcalinos) o de subproductos (como fluorhídrico, cristobalita y vapores de metales pesados).
- *Fuego o explosión* asociado a los sistemas de combustión utilizados como fuente de calor o para accionar las carretillas elevadoras; riesgos potenciales de fuego o explosión debidos a los tanques de almacenamiento de combustibles inflamables, circuitos de distribución por tuberías y vaporizadores. Los circuitos de retroceso o de reserva de combustible que suelen usarse en caso de cortes de gas natural pueden presentar problemas similares de fuego o explosión.
- *Exposición a radiación infrarroja* procedente del material fundido, que aumenta el riesgo de cataratas o quemaduras en la piel.
- *Exposición a energía radiante y temperaturas muy elevadas*. El ambiente de trabajo alrededor de los hornos o estufas es extremadamente caluroso. Pueden presentarse importantes problemas relacionados con las temperaturas muy elevadas cuando los trabajos de reparaciones de emergencia o de mantenimiento rutinario se realizan sobre los lugares de cocción o de fusión o cerca de ellos. El contacto directo de la piel con superficies calientes o materiales fundidos da lugar a quemaduras graves (véase la Figura 84.1).
- *Riesgos de la energía eléctrica*. El contacto directo con la energía eléctrica de alta tensión usada para encender resistencias que complementan la cocción con combustibles presenta el riesgo de electrocución y posibles problemas para la salud por exposición a campos electromagnéticos (EMF). Los campos magnéticos y eléctricos intensos pueden interferir con marcapasos u otros dispositivos médicos implantados.
- *Exposición a ruidos* superiores a 85 a 90 dBA emitidos por los ventiladores de combustión, tolvas de amasado o mezcladores, procesos de alimentación y equipos transportadores.

### Manejo del material en la producción, fabricación, embalaje y almacenamiento

El manejo del material y los procesos de fabricación y embalaje son muy diversos en este sector industrial, como lo son el tamaño, la forma y el peso de los productos. La elevada densidad de los materiales en este sector o sus formas voluminosas exponen a riesgos frecuentes. El levantamiento manual y la manipulación

Figura 84.1 • Técnico de control de calidad tomando muestras de vidrio del horno y usando equipo de protección personal contra el calor y gafas antirrayos I.R.



Libbey-Owens-Ford

Owens Corning

Figura 84.2 • Utilización del elevador de vacío para la manipulación de paquetes de 20 a 35 kilos de vidrio textil.



#### **Reacondicionamientos y actividades de reconstrucción**

Durante los reacondicionamientos periódicos o reparaciones en frío de estufas u hornos se presentan numerosos riesgos potenciales para la salud y la seguridad. Las actividades de la construcción llevan asociadas una amplia diversidad de riesgos: riesgos ergonómicos con la manipulación del material (por ejemplo, ladrillos refractarios); riesgo de inhalación de partículas en suspensión de sílice, amianto, fibras cerámicas refractarias o materias que contienen metales pesados durante demoliciones; o subproductos del corte y soldadura; golpes de calor; trabajo a alturas elevadas; peligro de resbalar, tropezar o caer; riesgos de

del material en la producción, fabricación, embalaje y almacenamiento en esta industria explica muchas lesiones incapacitantes (véase el apartado "Perfil de lesiones y enfermedades", más adelante). El esfuerzo para disminuir las lesiones se centra en la limitaciones de las operaciones manuales de levantamiento y manipulación de material. Por ejemplo, para eliminar la manipulación del material en determinadas partes de este sector industrial comienzan a utilizarse diseños de embalajes innovadores, automatismos para el apilado y paletizado del producto acabado y vehículos de transporte para el almacenamiento guiados automáticamente. El uso de transportadores, la ayuda de los montacargas de control a distancia (por ejemplo, los montacargas de vacío) y de plataformas de tijeras para la manipulación y paletizado de los productos son prácticas generalizadas en la actualidad (véase la Figura 84.2).

El uso de automatismos para eliminar el movimiento manual del material desempeña un papel importante en la prevención de las lesiones ergonómicas. Los automatismos han reducido los esfuerzos ergonómicos y las graves lesiones con desgarro que históricamente se han asociado a la manipulación del material (por ejemplo, vidrio plano) por el personal de producción (véase la Figura 84.3). Sin embargo, la mayor utilización de robots y la automatización de procesos introduce los riesgos propios de la maquinaria móvil y la energía eléctrica, lo cual transforma los tipos de peligros o los desplaza a otros operarios (de los trabajadores de producción a los de mantenimiento). El diseño adecuado de controles electrónicos y un ordenamiento lógico, la revisión de las máquinas, la práctica de la interrupción completa de la electricidad y la instauración de procedimientos seguros de uso y mantenimiento son métodos fundamentales para limitar las lesiones de los operarios de mantenimiento y producción.

Figura 84.3 • Los robots utilizados en la manipulación de luna pulida reducen los riesgos de heridas y ergonómicos.



Libbey-Owens-Ford

Figura 84.4 • Ingreso a espacios reducidos durante la reconstrucción del horno en una planta de fibra de vidrio. Una llovizna o vaho acuoso reduce las partículas en suspensión en el aire durante la demolición del horno.



Owens Corning

entrada en espacios reducidos (véase la Figura 84.4); y contacto con fuentes de energía peligrosas

## Vidrio

### Visión general

El vidrio se formó naturalmente a partir de elementos comunes presentes en la corteza terrestre mucho antes de que nadie pensara siquiera en experimentar con su composición, darle forma o apelar a las innumerables aplicaciones que tiene en la actualidad. La obsidiana, por ejemplo, es una combinación natural de óxidos fundidos por el intenso calor volcánico y vitrificados (convertidos en vidrio) por enfriamiento rápido en contacto con el aire. Su color negro y opaco se debe al contenido relativamente elevado de óxido de hierro. Su resistencia química y su dureza se comparan favorablemente con las de muchos vidrios comerciales.

La tecnología del vidrio ha evolucionado a lo largo de 6.000 años y algunos principios modernos son de origen muy remoto. La fabricación de los primeros vidrios sintéticos se pierde en la antigüedad y en la leyenda. La *loza* la inventaron los egipcios, que moldeaban figurillas de arena ( $\text{SiO}_2$ ), el más conocido de los óxidos vitrificables. Se recubría con natrón, el residuo formado por las inundaciones del Nilo, compuesto principalmente por carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), sal común ( $\text{NaCl}$ ) y óxido de cobre (II) ( $\text{CuO}$ ) que, calentado por debajo de  $1.000^\circ\text{C}$ , forma una película vitrificada por difusión de los fundentes  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  y la subsiguiente reacción en estado sólido con la arena. El óxido de cobre daba a la pieza un atractivo color azul.

De acuerdo con la definición de Morey, "El vidrio es una sustancia inorgánica que se halla en un estado asimilable al líquido, del que es prolongación, pero que, como resultado de

un cambio reversible experimentado durante el enfriamiento, alcanza un grado tan alto de viscosidad que puede considerarse sólido a todos los efectos." ASTM define al vidrio como "producto inorgánico de fusión enfriado hasta un estado rígido no cristalino". Tanto los materiales orgánicos como los inorgánicos pueden formar vidrios si su estructura es no cristalina, es decir, si no está ordenada de manera predominante.

Un avance trascendental en la tecnología del vidrio fue el uso de la caña de soplar (véase la Figura 84.5), usado por primera vez en el año 100 a. C aproximadamente. Desde entonces se produjo una rápida evolución en la técnica de fabricación.

El primer vidrio era coloreado debido a la presencia de diversas impurezas, como los óxidos de hierro y cromo. El primer vidrio incoloro se produjo hace unos 1.500 años.

En esa época la fabricación de vidrio se desarrolló en Roma y desde allí se extendió a muchos otros países europeos. Numerosas vidrierías se establecieron en Venecia, donde la técnica conoció un importante desarrollo. En el siglo XIII, muchas de las factorías de vidrio se trasladaron de Venecia a la cercana isla de Murano, que siguen siendo centrandos en Italia la producción manual de vidrio.

En el siglo XVI se hacía vidrio en toda Europa. En la actualidad, el cristal de Bohemia de la República Checa es bien conocido por su belleza, y de las fábricas de vidrio del Reino Unido e Irlanda salen vajillas de vidrio de plomo de gran calidad. Suecia es otro centro de producción de artículos de vidrio artísticos.

En América del Norte, el primer establecimiento fabril construido fue precisamente una fábrica de vidrio. Los colonos ingleses comenzaron a producir vidrio a comienzos del siglo XVII en Jamestown, Virginia.

Hoy en día el vidrio se fabrica en todo el mundo. Muchos productos de vidrio se producen en líneas totalmente automatizadas. Aunque el vidrio es uno de los materiales más antiguos, sus propiedades son únicas y todavía no han llegado a conocerse en su totalidad.

La actual industria del vidrio abarca varios e importantes segmentos del mercado, tales como vidrio plano, vajilla doméstica y envases, vidrio óptico o de materiales de vidrio para uso científico. Los mercados del vidrio óptico y científico suelen estar muy regulados y en la mayoría de los países se hallan dominados por uno o dos proveedores. Estos mercados mueven un volumen mucho menor que los de consumo. Todos ellos se han desarrollado durante años gracias a innovaciones en la tecnología específica del vidrio o a avances en la fabricación. La

Figura 84.5 • La caña de soplar vidrio.



Urban Glass

industria del envase, por ejemplo, se vio impulsada por la evolución de las líneas de embotellado rápido implantadas a comienzos del siglo XX. La industria del vidrio plano experimentó un auténtico salto hacia adelante gracias al desarrollo del proceso de vidrio flotado en los primeros años del decenio de 1960. Ambos segmentos mueven en la muchos miles de millones de dólares en todo el mundo.

El vidrio doméstico se divide en cuatro categorías generales:

1. vajilla (servicios de mesa, tazas y jarras);
2. cristalería;
3. recipientes para horno, y
4. recipientes para cocinar.

Aunque es difícil elaborar una estimación mundial, el mercado de la vajilla es del orden de mil millones de dólares solamente en los Estados Unidos. En sus distintas categorías, el vidrio compite con muchos otros materiales, como metales, plásticos y cerámicas.

### Métodos de fabricación

El vidrio es un producto inorgánico de fusión enfriado hasta que alcanza un estado sólido no cristalino. Las características del vidrio son dureza, fragilidad y fractura concoidea. Se fabrica vidrio coloreado, translúcido u opaco variando los materiales disueltos amorfos o cristalinos que lo forman.

Cuando el vidrio se enfría desde el estado de fusión, la viscosidad incrementa gradualmente sin cristalizar en un amplio intervalo de temperaturas hasta que adopta su característica dureza y su forma frágil. El enfriamiento se controla para evitar la cristalización o deformación elástica.

Aunque cualquier compuesto que presente estas propiedades físicas es teóricamente un vidrio, la mayoría de los vidrios comerciales se dividen en tres tipos principales y presentan una amplia diversidad de composiciones químicas.

1. *Vidrios de sílice-cal-sosa*: son los más importantes en términos de cantidad producida y variedad de uso, pues comprenden casi todos los vidrios planos, envases, vajilla económica producida en masa y bombillas eléctricas.
2. *Vidrios de sílice-potasa-plomo*: contienen una proporción variable, pero normalmente alta, de óxido de plomo. En el material óptico se valora su elevado índice de refracción; la cristalería decorativa y doméstica soplada a boca, su facilidad de corte y de pulido; en las aplicaciones eléctricas y electrónicas, su elevada resistividad eléctrica y la protección frente a las radiaciones.
3. *Vidrios de borosilicato*: su baja dilatación térmica los hace resistentes al choque térmico y por ello son ideales para hornos domésticos, material de vidrio de laboratorio y producción de fibra de vidrio para reforzar plásticos.

Una mezcla vitrificable comercial se compone de diversos ingredientes. Sin embargo, la mayor parte la conforman de 4 a 6 ingredientes, escogidos entre caliza, arena, dolomita, carbonato sódico, bórax, ácido bórico, feldespatos y compuestos de bario y plomo. El resto de la mezcla se compone de aditivos elegidos entre un grupo de 15 a 20 materiales comúnmente denominados ingredientes menores. Estos últimos se añaden durante el proceso de preparación del vidrio para aportar alguna función o cualidad específica, como el color, por ejemplo.

La Figura 84.6 ilustra los principios básicos de la fabricación del vidrio. Las materias primas se pesan, se mezclan, se les incorpora vidrio roto (chatarra de vidrio) y se llevan al horno de fusión. Todavía se emplean pequeños crisoles de hasta 2 toneladas de capacidad en la fusión de vidrio para la cristalería de vidrio soplada a boca y de vidrios especiales producidos a

pequeña escala. Varios crisoles se calientan juntos en una misma cámara de combustión.

En la fabricación más moderna, la fusión tiene lugar en grandes hornos regenerativos, recuperativos o eléctricos de material refractario alimentados con petróleo, gas natural o electricidad. A finales del decenio de 1960 y en el de 1970 se comercializó y llegó a utilizarse de manera extensiva la sobrealimentación eléctrica y la fusión eléctrica con enfriamiento en su punto máximo. El objetivo de esta última es el control de la emisión, mientras que la sobrealimentación eléctrica se utilizaba generalmente para mejorar la calidad del vidrio y aumentar el rendimiento.

Los factores económicos que más afectan al uso de la electricidad en hornos de fusión de vidrio están relacionados con el coste del petróleo, la disponibilidad de otros combustibles, los costes de la energía eléctrica, los costes del capital para instalaciones, etc. Sin embargo, en muchos casos la principal razón para el uso de la fusión o sobrealimentación eléctrica es el control del medio ambiente. Muchos lugares en todo el mundo ya tienen o esperan tener pronto normas ambientales que restrinjan estrictamente el vertido de diversos óxidos o agregados de partículas. Por ello los fabricantes se enfrentan en muchos lugares a la necesidad de reducir los rendimientos de la fusión del vidrio, de instalar depuradoras o precipitadores de partículas para tratar los gases de escape de la combustión, o de modificar los procesos de fusión e incorporar la fusión o la sobrealimentación eléctricas. En algunos casos, la alternativa a estas modificaciones puede ser el cierre de plantas.

La parte más caliente del horno (superestructura) alcanza una temperatura comprendida entre 1.600 y 2.800 °C. El enfriamiento controlado la reduce hasta 1.000 o 1.200 °C en el punto en el cual el vidrio sale del horno. Además, todos los tipos de vidrio se someten a un enfriamiento ulterior controlado (recocido) en un horno especial o túnel de recocido. Las operaciones que siguen dependen del tipo de fabricación.

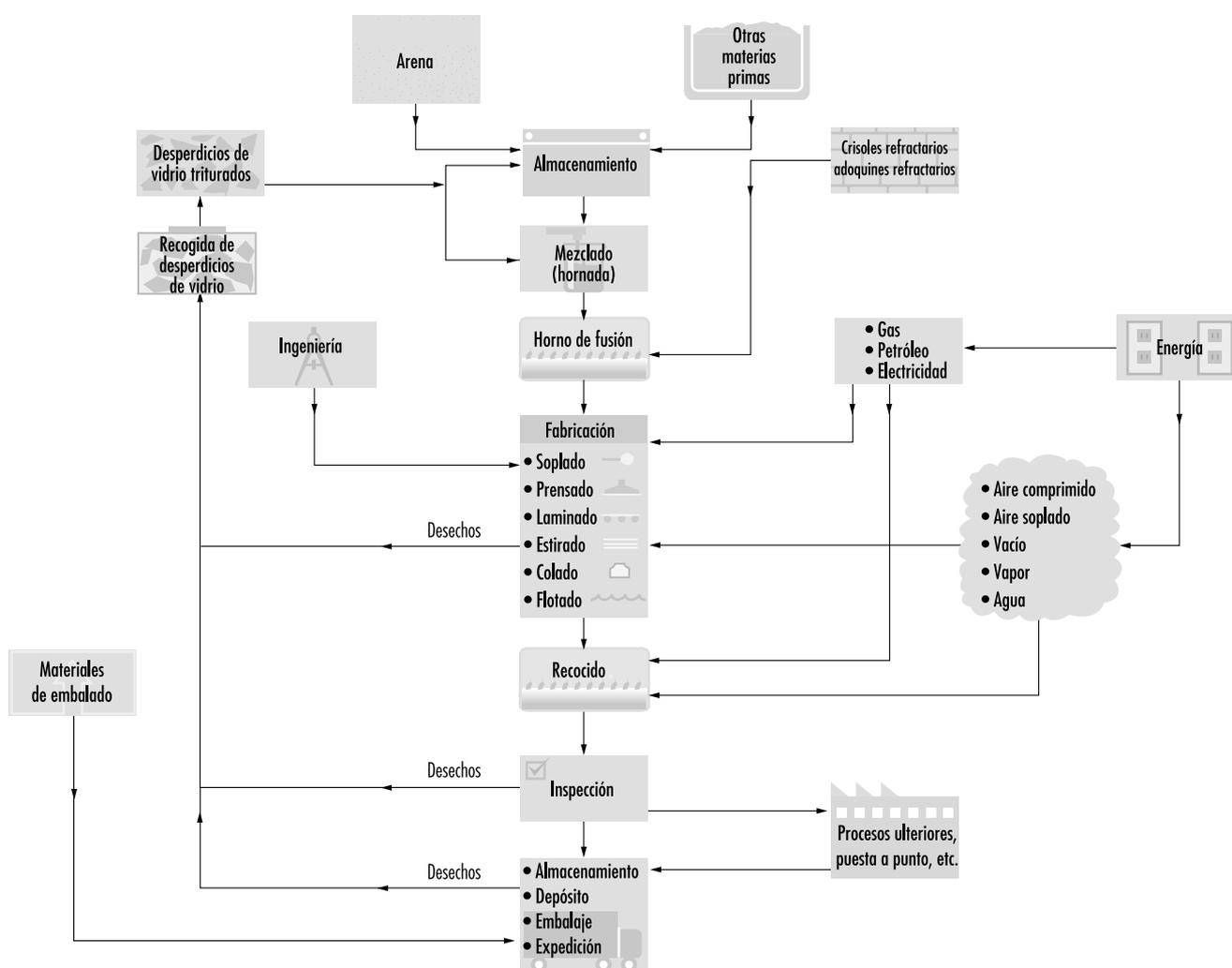
Además del tradicional vidrio soplado a boca, el soplado automático se usa en máquinas para la producción de botellas y bombillas. Las formas sencillas, tales como aisladores, baldosas, moldes para lentes, etc., se prensan en lugar de soplarse. Algunos procesos de fabricación utilizan una combinación de soplado mecánico y prensado. Los vidrios armado e impreso se laminan. El vidrio plano se extrae del horno en vertical al tiempo que se somete a un proceso de pulido al fuego. Debido a los efectos combinados de la extracción y la gravedad, es inevitable alguna leve deformación.

La luna pulida pasa a través de rodillos enfriados por agua a un horno de recocido. No se deforma, pero después de la fabricación requiere un desbaste y pulido para eliminar daños superficiales. Este proceso ha sido reemplazado de manera generalizada por el del vidrio flotado introducido en años recientes (véase la Figura 84.7). El vidrio obtenido por flotación combina las ventajas del vidrio plano y la luna pulida. El vidrio flotado tiene una superficie pulida al fuego y está exento de deformaciones.

En el proceso por flotación, una banda continua de vidrio sale del horno de fusión flotando sobre un baño de estaño fundido y se amolda a la superficie perfecta del metal líquido. Sobre el estaño, la temperatura se reduce hasta que el vidrio está suficientemente duro para entrar en los rodillos del túnel de recocido sin que la cara inferior se raye. Una atmósfera inerte evita la oxidación del estaño fundido. El vidrio recocido no requiere ningún tratamiento más y pasa a la fase de corte y embalado automáticos (véase la Figura 84.8).

La tendencia en la moderna arquitectura residencial y comercial a la multiplicación de las superficies acristaladas y la necesidad de reducir el consumo de energía, ha puesto mayor énfasis

Figura 84.6 • Procesos y materiales que intervienen en la fabricación de vidrio.



en mejorar el rendimiento energético de las ventanas. Un fino revestimiento depositado en la superficie del vidrio confiere a éste propiedades de baja emisividad o control de la radiación solar. La comercialización de estos productos revestidos exige una tecnología económica de depósito en grandes superficies. Por ello hay cada vez más líneas de fabricación de vidrio flotado equipadas con avanzados métodos de revestimiento.

En los procesos comunes de depósito en fase vapor (CVD), una mezcla compleja de gases se pone en contacto con el sustrato, donde reacciona pirolíticamente para formar un revestimiento en la superficie del vidrio. En general, el equipo de revestimiento consiste en estructuras controladas térmicamente que están suspendidas transversalmente sobre la banda de vidrio. Se monta en el tanque de estaño, en el horno de recocido o en una abertura de éste. Su función es repartir uniformemente los gases precursores a lo ancho de la banda de temperatura controlada y extraer de forma segura los subproductos de los gases de escape procedentes de la zona de depósito. Para formar un revestimiento de capas múltiples se usan varios equipos de montados en serie a lo largo de la banda de vidrio.

Para el tratamiento de los subproductos de los gases de escape generados en un proceso a tan gran escala suele bastar con las

técnicas de depuración en húmedo con un filtro-prensa convencional; si no reaccionan fácilmente o no se empapan en las soluciones acuosas, la incineración es la principal alternativa.

Algunos vidrios ópticos se endurecen químicamente por inmersión durante varias horas y a temperaturas elevadas en baños de sales fundidas que normalmente contienen nitratos de litio y potasio.

*Vidrios de seguridad:* hay dos tipos principales:

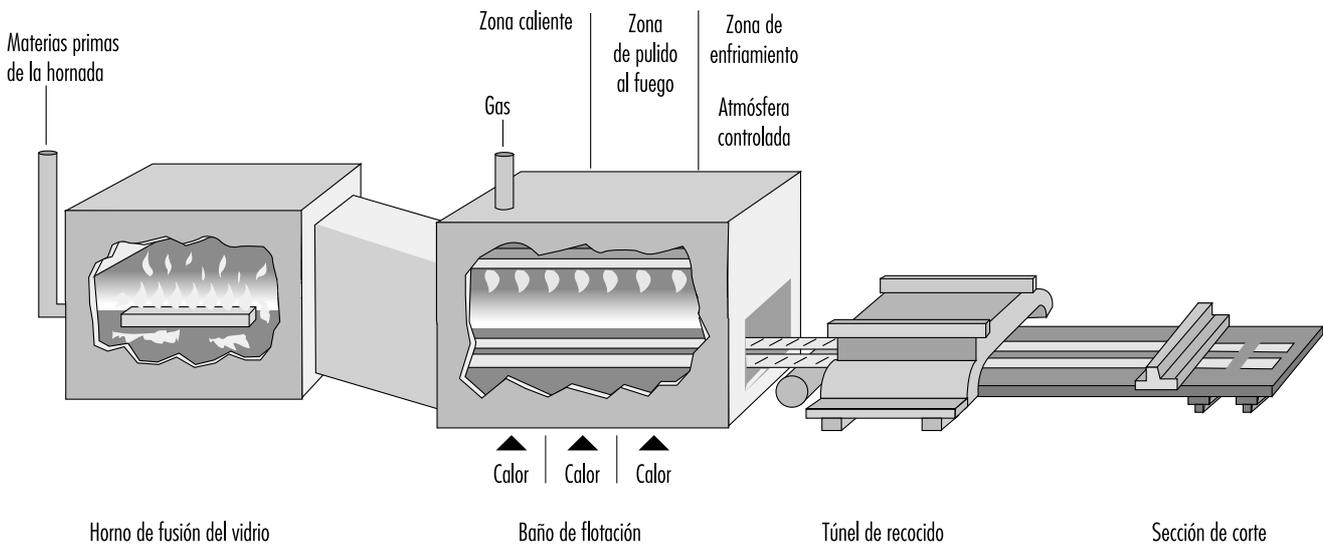
1. *Vidrio templado* obtenido en hornos especiales mediante pretenso por calentamiento seguido de enfriamiento brusco de las piezas de vidrio plano cortadas a la forma y el tamaño deseados.
2. *Vidrio laminar*, que se forma montando una película de plástico (generalmente polivinil butiral) entre dos hojas delgadas de vidrio plano.

## Fibras de vidrio sintéticas

### Visión general

Las fibras de vidrio sintéticas se producen a partir de una amplia diversidad de materiales. Son silicatos amorfos obtenidos de

Figura 84.7 • Proceso continuo de flotación.



Fuente: Adaptado de Tooley 1974.

vidrios, rocas naturales, escorias de fundición y otros minerales. Hay fibras continuas o discontinuas. En general, las continuas son fibras de vidrio estiradas a través de un molde de pequeños orificios y empleadas como refuerzo de otros materiales —plástico, por ejemplo— para formar compuestos de propiedades determinadas. Las fibras discontinuas (generalmente conocidas como lanas) se usan en múltiples aplicaciones, de las cuales la más corriente es el aislamiento acústico y térmico. A los efectos de este análisis, las fibras de vidrio sintéticas se dividen en fibras de vidrio continuas, que incluyen las lanas aislantes hechas de vidrio, roca natural o escoria; y fibras cerámicas refractarias, que generalmente son silicoaluminatos.

La posibilidad de estirar en fibras finas el vidrio pastoso ya era conocida por los vidrieros primitivos y es, en realidad, más

antigua que la técnica del soplado del vidrio. Muchas de las vasijas del primitivo Egipto se hicieron enrollando fibras de vidrio basto en un mandril de arcilla adecuadamente modelado; luego se calentaba el conjunto hasta que las fibras de vidrio aflúan unas hacia otras y, después de enfriar, se quitaba el núcleo de arcilla. Incluso antes de la llegada del soplado del vidrio en el siglo I, ya se empleaba la técnica de la fibra de vidrio. Los vidrieros venecianos de los siglos XVI y XVII la usaban para decorar la cristalería. En este caso, se enrollaban manojos de fibras blancas opacas sobre la superficie de una vasija lisa y transparente de vidrio soplado (por ejemplo, una copa) y a continuación se fundían en ella por calentamiento.

A pesar de la larga historia de los usos decorativos o artísticos de las fibras de vidrio, su utilización generalizada no resurgió hasta el siglo XX. La producción comercial de fibras de vidrio comenzó en Estados Unidos en el decenio de 1930, y unos años antes en Europa. Las lanas de roca y de escoria habían empezado a elaborarse varios años antes.

La fabricación y el uso de fibras de vidrio sintéticas mueve miles de millones de dólares, ya que estos útiles materiales han llegado a ser un componente importante de la sociedad moderna. Su empleo como aislantes ha reducido drásticamente el consumo de energía para la calefacción y refrigeración de edificios, y este ahorro de energía se ha traducido en importantes disminuciones de la contaminación global asociada con su producción. El número de aplicaciones de los filamentos de vidrio continuos como armazón de una gran cantidad de productos, desde artículos deportivos hasta chips de ordenadores para aplicaciones aeroespaciales, se ha estimado en más de 30.000. El desarrollo y la comercialización generalizada de fibras cerámicas refractarias se produjo en el decenio de 1970; estos materiales continúan cumpliendo una función importante en la protección de trabajadores y equipos en diversos procesos de fabricación a temperaturas elevadas.

### Procesos de fabricación

#### Filamentos de vidrio continuos

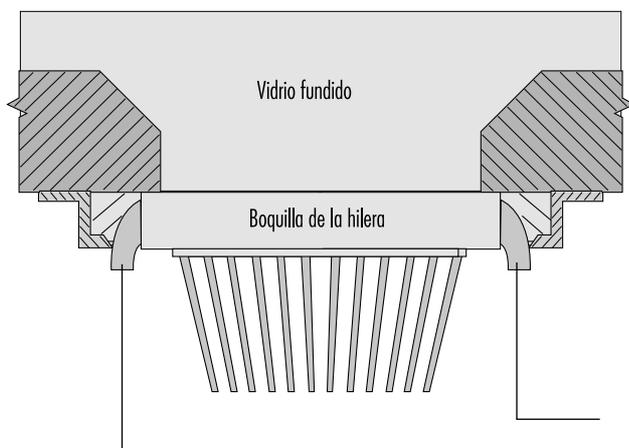
Los filamentos de vidrio se forman estirando el vidrio fundido a través de hileras de metales preciosos para obtener hilos de

Figura 84.8 • Cinta de vidrio flotado saliendo del túnel de recocido.



LibbeyOwensFord

Figura 84.9 • Esquema de la boquilla de fusión directa.



Fuente: Adaptado de Tooley 1974.

diámetro prácticamente uniforme. Debido a los requisitos físicos de las fibras usadas como armazón, sus diámetros son relativamente grandes comparados con los de la lana aislante. Casi todos los filamentos de vidrio continuos tienen diámetros que oscilan entre 5 y 15 m o más. Estos diámetros grandes, junto con la estrecha gama de diámetros producidos durante la fabricación, eliminan cualquier riesgo potencial de lesión respiratoria crónica, pues las fibras son excesivamente grandes para ser inhaladas hacia las vías respiratorias bajas.

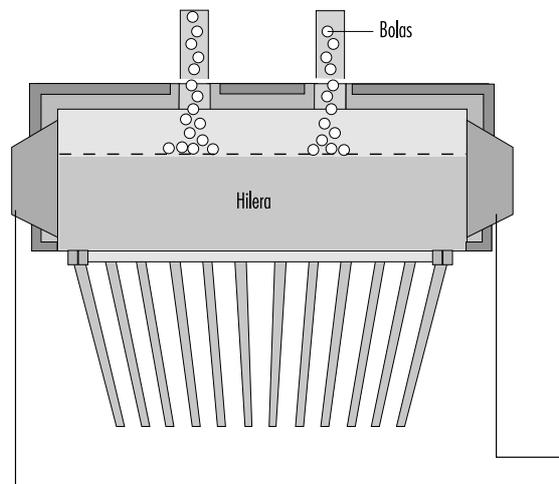
Las fibras de vidrio continuas se obtienen a partir de las gotas de vidrio fundido que salen de la boquilla de una hilera de finos orificios; estas gotas quedan expuestas al rápido estiramiento causado por la acción de la gravedad. El equilibrio dinámico entre las fuerzas de tensión superficial y el adelgazamiento mecánico hace que la gota adopte la forma de menisco pendiente de la boquilla de la hilera, que se adelgaza hasta el diámetro de la fibra estirada. Para que el estiramiento sea satisfactorio, el vidrio debe mantenerse en un margen estrecho de viscosidades (por ejemplo, entre 500 y 1.000 poises). A viscosidades menores es demasiado fluido y cae desde las boquillas en forma de gotas; en este caso domina la tensión superficial. Por el contrario, a viscosidades mayores la tensión en la fibra durante el adelgazamiento es excesiva. Asimismo, el caudal del vidrio a través de la boquilla puede llegar a ser insuficiente para mantener el menisco.

La función de la hilera es alimentar una placa que contiene varios centenares de orificios a temperatura uniforme y acondicionar el vidrio a esta temperatura de modo que las fibras estiradas sean de diámetro uniforme. La Figura 84.9 muestra un diagrama esquemático de las principales características de una hilera de fusión directa conectada a un canal de distribución desde el cual recibe el suministro de vidrio fundido a una temperatura muy próxima a la de paso por las boquillas; por lo tanto, en este caso la función básica de la hilera es también la única.

Las hileras de bolas exigen una segunda operación, que consiste en fundir las bolas o canicas de vidrio antes de acondicionar éste a la temperatura correcta de estirado en fibras. La Figura 84.10 ilustra una hilera de bolas típica. La línea discontinua del interior de la hilera es una placa perforada que retiene las bolas de vidrio no fundidas.

El diseño de las hileras es en gran medida empírico. Por razones de resistencia al ataque del vidrio fundido y de

Figura 84.10 • Esquema de una hilera de bolas.



Fuente: Adaptado de Tooley 1974.

estabilidad a las temperaturas necesarias para el estirado de fibras se fabrican de aleaciones de platino; se utilizan aleaciones del 10 % y del 20 % de platino-rodio, esta última más resistente a la deformación a temperaturas elevadas.

Figura 84.11 • Filamentos de vidrio textil en el momento de ser extraídos de la hilera. Los filamentos se reúnen en manojos y se enrollan en fardos para el procesado.



Owens Corning

Antes de reunir las y consolidarlas en uno o varios cordones, las fibras individuales que se extraen de la boquilla se revisten con un apresto apropiado. Estos aprestos para fibras son básicamente de dos tipos:

1. aprestos de almidón oleaginoso, generalmente aplicados a fibras que se emplearán para tejer telas finas u operaciones similares, y
2. agentes de agarre con aprestos fijadores en el caso de fibras destinadas al refuerzo directo de plásticos y caucho.

Una vez formada la fibra, con un aplicador se procede a dar una capa protectora de apresto orgánico y los filamentos continuos se unen en un hilo multifilamento (véase la Figura 84.11) antes de ser arrollados en una bobina. Los aplicadores funcionan dejando que el haz de fibras se abra en forma de abanico y, cuando alcanza una anchura de 25 a 40 mm en su trayectoria hacia la terminal colectora situada bajo el aplicador, pasan sobre una superficie móvil cubierta con una película de apresto para fibras.

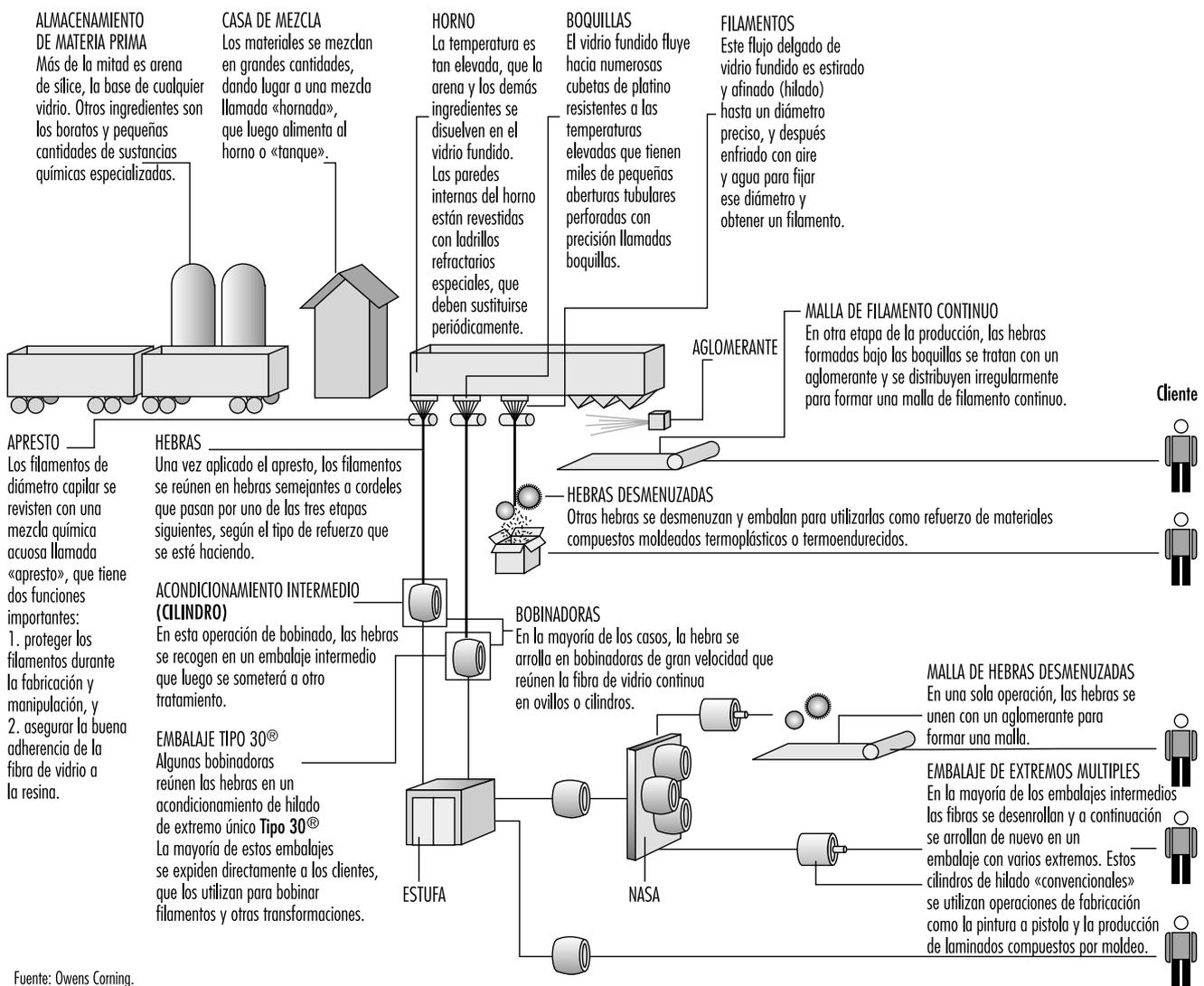
Hay básicamente dos tipos de aplicadores:

1. aplicadores de rodillo, hechos de caucho, cerámica o grafito, en los que la fibra se desliza sobre la superficie del rodillo recubierta con una película de apresto, y
2. aplicadores de cinta; uno de los extremos de ésta pasa sobre un rodillo motriz que la sumerge en el apresto mientras que el otro pasa sobre una barra fija de acero duro al cromo, posición en la cual las fibras se ponen en contacto con la cinta y toman el apresto.

El revestimiento protector y la técnica de unión de las fibras varían en función del tipo de fibra textil o de refuerzo que se esté fabricando. El objetivo básico es recubrir las fibras con apresto, reunir las en un hilo y arrollarlas sobre un tubo desmontable en el tambor de bobinado con la mínima tensión necesaria.

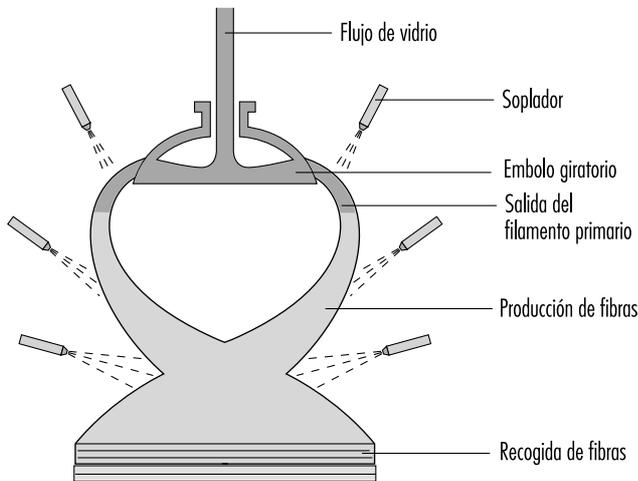
La Figura 84.12 ilustra el proceso de fabricación de vidrio continuo.

Figura 84.12 • Fabricación de filamento continuo de vidrio.



Fuente: Owens Corning.

Figura 84.13 • Proceso de rotación para la fabricación de fibras de lana de vidrio.



#### Fabricación de lana aislante

En contraste con los filamentos continuos, las fibras de lana aislante y las de cerámica refractaria se fabrican con técnicas que consumen mucha energía y que consisten en el vertido del material fundido sobre discos giratorios o sobre series de ruedas rotativas. Con estos métodos se obtienen fibras de un intervalo de diámetros mucho más amplio que el de los filamentos continuos. Por tanto, todas las lanas aislantes y fibras cerámicas refractarias contienen una proporción de fibras con diámetros inferiores a 3,0  $\mu$ m que podrían llegar a inhalarse si se fracturan en longitudes relativamente cortas (menos de 200 a 250  $\mu$ m). Hay mucha información sobre la exposición en el lugar de trabajo a fibras artificiales de vidrio aspirables.

En la fabricación de la *lana de vidrio* se han utilizado varios métodos, tales como el proceso de estirado por soplado y el de soplado por la llama; pero el más difundido es el método giratorio desarrollado a mediados del decenio de 1950. En los últimos años, los procesos giratorios han sustituido ampliamente a los procesos de soplado directo en la producción comercial de aislantes de fibra de vidrio. Todos estos procesos giratorios se valen de un tambor hueco o rotor montado en el eje de giro en vertical. En la pared vertical del rotor se practican miles de orificios uniformemente distribuidos alrededor de la circunferencia. Se deja caer vidrio fundido, en régimen controlado, en el centro del rotor, desde donde un distribuidor adecuado lo lleva al interior de la pared vertical perforada. Desde esta posición, la fuerza centrífuga empuja al vidrio radialmente hacia el exterior en forma de filamentos de vidrio individuales que salen por las perforaciones. Para estirar aún más los filamentos, se lanza un fluido de soplado por una o varias boquillas dispuestas en torno al rotor y concéntricas con él. El resultado final es la producción de fibras con un diámetro medio de 6 a 7  $\mu$ m. El fluido de soplado actúa hacia abajo y por tanto, además de proporcionar el estirado final, también desvía las fibras hacia una superficie de recogida situada debajo del rotor. De camino hacia esta superficie de recogida, las fibras se pulverizan con una sustancia adhesiva apropiada antes de distribuirse uniformemente sobre ella (véase la Figura 84.13).

En el proceso giratorio, las fibras de lana de vidrio se obtienen dejando fluir el vidrio fundido a través de una serie de pequeños

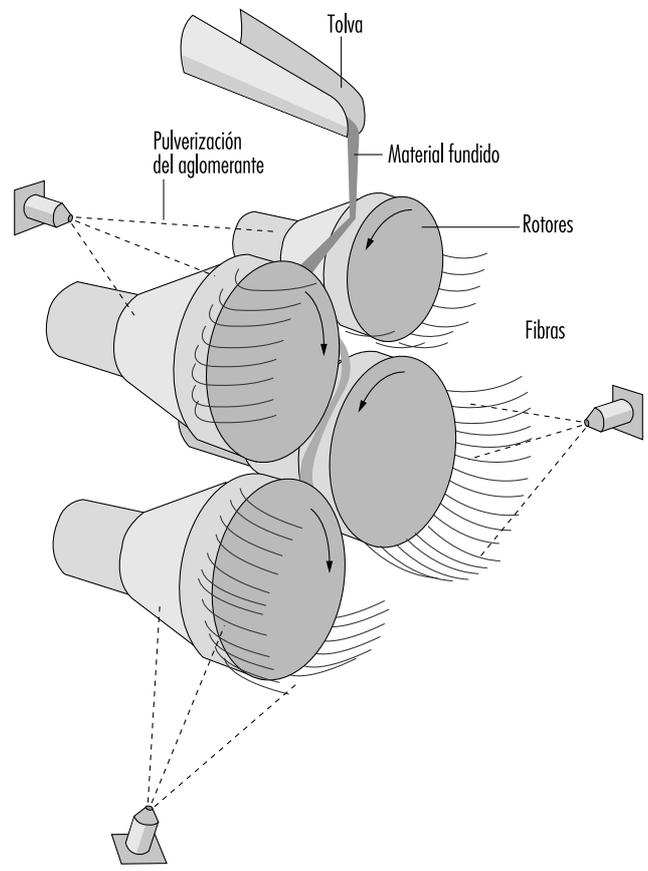
orificios abiertos en un rotor giratorio y estirando después los filamentos primarios por soplado de aire o vapor.

Por el contrario, la *lana mineral* no se puede producir mediante el proceso giratorio, e históricamente se ha obtenido con ayuda de una serie de mandriles de hilado horizontales. La técnica de fabricación de lana mineral utiliza un juego de rotores (mandriles) montados en cascada que giran muy rápidamente (véase la Figura 84.14). Una corriente de piedra fundida alimenta continuamente uno de los rotores superiores, desde el cual pasa a los demás. El material fundido se distribuye uniformemente sobre la superficie externa de los rotores, desde donde es expulsado en forma de gotitas por la fuerza centrífuga. Las gotitas se adhieren a la superficie del rotor y adoptan la forma de cuellos alargados que, sometidos a un nuevo estirado acompañado de enfriamiento, se convierten en fibras. Naturalmente, el estirado implica una disminución del diámetro, lo cual a su vez acelera el enfriamiento. Por tanto, hay un límite inferior para el diámetro de las fibras producidas de esta manera y, en consecuencia, no cabe esperar una distribución normal de los diámetros de las fibras en torno al valor medio.

#### Fibras cerámicas refractarias

Las fibras cerámicas se producen principalmente por soplado e hilado, con métodos similares a los descritos para las lanas aislantes. En el proceso de estirado por soplado, la alúmina, la sílice y demás materias primas se funden en un horno eléctrico, y el material fundido es arrastrado y soplado con vapor a presión u otro gas caliente. Las fibras obtenidas se recogen en una rejilla-filtro-pantalla.

Figura 84.14 • Producción de lana mineral (piedra y escoria).



## Fibras ópticas

Las fibras ópticas son hilos de vidrio finos como un cabello diseñados para transmitir los rayos de luz a lo largo de su eje. *Diodos de emisión de luz (DEL)* o *diodos láser* convierten las señales eléctricas en las señales ópticas que se transmiten a través de un núcleo cilíndrico interior del cable de la fibra óptica. Las bajas propiedades refringentes del revestimiento externo permiten propagarse a las señales luminosas por reflexión a lo largo del núcleo cilíndrico interior. Las fibras ópticas están diseñadas y fabricadas para propagar a lo largo del núcleo uno o varios haces luminosos transmitidos simultáneamente (véase la Figura 84.15.)

La fibra unimodal se usa principalmente para aplicaciones de telefonía y televisión por cable y en el tendido de redes troncales. La fibra multimodal se usa comúnmente para las comunicaciones de datos y en redes de edificios y otras instalaciones.

## Fabricación de fibra óptica

Para la fabricación de fibras ópticas se requieren materiales y procedimientos que satisfagan ciertos criterios básicos de diseño: a) un núcleo de índice de refracción elevado envuelto en un revestimiento de bajo índice de refracción; b) baja atenuación (pérdida de intensidad) de la señal, y c) baja dispersión o apertura del haz luminoso.

Los materiales básicos que se utilizan comúnmente para fabricar fibras ópticas son vidrio de sílice de gran pureza con otros materiales vítreos (vidrios de fluoruros de metales pesados y vidrios de calcogenuros). También se utilizan materiales policristalinos, monocristalinos, guías de ondas huecas y materiales de plástico. Las materias primas deben ser relativamente puras, con muy bajas concentraciones de metales de transición y grupos hidroxilo (menos de una parte por mil millones). Los métodos de producción deben proteger el vidrio que se está formando del ambiente externo.

Las fibras ópticas se fabrican a partir de una preparación no convencional en fase vapor de un compuesto preformado de vidrio que luego se estira en fibras. Los compuestos de sílice volátil se convierten en  $\text{SiO}_2$  por hidrólisis a la llama, deposición química de vapor (CVD) u oxidación a gran temperatura. Luego se añaden al vidrio otras impurezas para cambiar sus propiedades. Las variaciones en el proceso de deposición de vapor parten del mismo material, pero difieren en el método utilizado para convertir este material en sílice.

Para la fabricación de fibras ópticas con base de sílice se utiliza uno de los siguientes métodos de deposición en fase vapor: a) *deposición de vapor químico modificado (MCVD)*; b) *deposición de vapor químico de plasma (PCVD)*; c) *deposición de vapor exterior (OVD)*, y d) *deposición de vapor en fase axial (VAD)* (véase la Figura 84.16). Debido a sus elevadas presiones de vapor, los tetracloruros de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ) o germanio ( $\text{GeCl}_4$ ) y otros haluros líquidos volátiles se transforman en gas cuando se calientan ligeramente. El haluro gaseoso se envía a la zona de reacción y se convierte en partículas de vidrio (véase también el capítulo *Microelectrónica y semiconductores*.)

*Técnicas basadas en MCVD y PCVD.* Un tubo de sílice fundida de gran calidad se conecta a un torno de trabajo de vidrio provisto de un soplete de hidrógeno/oxígeno que lo atraviesa longitudinalmente. A un extremo del tubo de vidrio se conecta una fuente de alimentación de haluro y en el extremo opuesto un depurador para eliminar el exceso del mismo. La superficie del tubo de vidrio se

limpia primero mediante pulido al fuego recorriéndola con el soplete. Se añaden diversos reactivos en estado de vapor, que dependen del producto que se esté fabricando. Cuando los haluros pasan a través de la sección del tubo que se está calentado, reaccionan químicamente. Los haluros convierten en sílice las partículas de "hollín" que descienden del soplete y que se depositan sobre la pared interior del tubo de vidrio. Las partículas depositadas se sinterizan en la capa de vidrio. El proceso PCVD es similar al MCVD, con la diferencia de que los haluros se aportan mediante burbujeo y el soplete se sustituye por un haz de microondas para transformar los haluros en vidrio.

*Técnicas OVD y VAD.* En la primera etapa del proceso de fabricación de la fibra, los vidrios del *núcleo* y del *revestimiento* se depositan en forma de vapor en torno a una varilla receptora giratoria para obtener una preforma de "hollín". Los materiales del núcleo se depositan primero, seguidos por los de revestimiento. La totalidad del compuesto preformado debe ser sumamente puro, puesto que tanto el núcleo como el revestimiento son vapores depositados. La geometría de la fibra se determina durante la fase de deposición de la fabricación. Una vez retirada la varilla, el compuesto preformado se coloca en un horno, donde se funde y transforma en vidrio sólido y transparente y se cierra el hueco central. Se pasa gas a través del compuesto preformado para eliminar la humedad residual que afecta negativamente a la atenuación de la fibra (pérdida de señal óptica cuando transmite la luz a lo largo del eje de la fibra). A continuación, los compuestos preformados se lavan con ácido fluorhídrico para asegurar la pureza del vidrio y eliminar los agentes contaminantes.

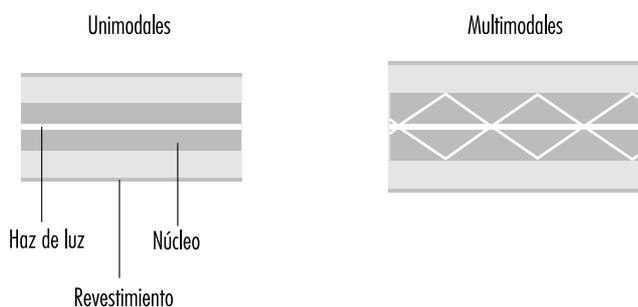
El compuesto preformado de vidrio se coloca en una hilera delgada para formar un hilo continuo de fibra de vidrio. Primeramente se carga el preformado en la parte superior del horno de estirado. Seguidamente, se calienta la punta del compuesto preformado y comienza a fluir un trozo de vidrio fundido que se extruye (estira) y pasa a través de un monitor de calibre incorporado para asegurar que la fibra mantiene un diámetro exacto especificado (generalmente expresado en micras). El diámetro del revestimiento de la fibra debe responder exactamente a las especificaciones para minimizar la atenuación de la señal en las conexiones. El diámetro del revestimiento externo se utiliza como una guía para alinear los núcleos de la fibra durante su uso. Los núcleos deben estar alineados para que la luz se transmita eficazmente.

Se aplica acrilato u otro revestimiento que se endurece con luz ultravioleta. El objetivo de los revestimientos es proteger la fibra óptica del ambiente durante su uso. La fibra óptica se ensaya para asegurar su conformidad con las normas de fabricación en cuanto a resistencia, atenuación y geometría. Por último, se corta a longitudes predeterminadas y se bobina en carretes de acuerdo con las indicaciones del cliente.

La fabricación de la fibra óptica va acompañada de ciertos riesgos potenciales: a) exposición al ácido fluorhídrico (cuando se limpian los compuestos preformados de vidrio); b) energía radiante y golpes de calor asociados al ambiente de trabajo cerca de tornos y procesos de deposición de vapor; c) contacto directo con superficies calientes o material fundido (compuestos preformados de vidrio); d) exposición al revestimiento de acrilato (sensibilizador de la piel); e) incisiones y laceraciones de la piel durante la manipulación de la fibra, y f) diversos de riesgos físicos ya descritos.

**George R. Osborne**

Figura 84.15 • Fibras ópticas uni y multimodales.



Como el hilado de las fibras de piedra y escoria, el de fibra cerámica produce una elevada proporción de fibras largas y sedosas. En este método, se deja caer una corriente de material fundido sobre discos giratorios rápidos y es expulsada tangencialmente para formar fibras.

## Alfarería

### Visión general

La alfarería es uno de los oficios más antiguos de la humanidad. A lo largo de los siglos se han desarrollado diferentes estilos y técnicas en distintas partes del mundo. Floreciente en Europa durante el siglo XVIII, estuvo fuertemente influenciada por la importación de una excelente porcelana muy decorada procedente del Lejano Oriente, donde Japón había aprendido de China el arte de la cerámica unos 400 años antes. Con la Revolución Industrial y el cambio de las condiciones generales de vida en Europa occidental, la producción creció rápidamente. En la actualidad, casi todos los países fabrican algún tipo de vajilla para uso doméstico, y la cerámica es una exportación importante para algunos de ellos. Estos productos se manufacturan en muchas partes del mundo a escala industrial. Aunque los principios básicos de fabricación no han cambiado, sí ha progresado considerable la forma en que esta fabricación se lleva a cabo. Las innovaciones han afectado de manera especial a la formación o moldeo de la pieza, a la cocción y a la decoración. La generalización del uso de microprocesadores y robots se ha materializado en la fuerte automatización de la producción. Pese a ello, todavía quedan en todos los lugares del mundo muchas alfarerías artesanales que trabajan a pequeña escala.

### Métodos de formación

La técnica de alfarería más primitiva es la fabricación manual. Consiste en arrollar tiras de arcilla que se apilan unas sobre otras y se unen presionando con las manos. La pasta se reblandece trabajándola con agua y a continuación, una vez soldados los cordones de arcilla, se modela el objeto con las manos.

El torno de alfarero se ha convertido en instrumento de creación alfarera. La técnica consiste en depositar una pella de arcilla en el centro de un plato circular giratorio para modelarla con las manos mojadas. El agua impide que el barro se pegue a las manos y, al mismo tiempo, lo mantiene húmedo y maleable. Las asas, pitorros y otras protuberancias de la arcilla torneada se colocan antes de cocer el objeto.

El *colado* se utiliza ahora con frecuencia para formar objetos de gran calidad y siempre que las paredes de la vasija deban ser muy finas. En un molde de escayola se vierte una mezcla de arcilla y agua llamada barbotina; el molde absorbe el agua de la pasta, que forma una capa delgada en su cara interna. Cuando el depósito de arcilla es lo suficientemente grueso como para

formar las paredes del recipiente se vacía el resto de la barbotina, manteniendo la pieza húmeda en el interior del molde hasta que se seque y contraiga lo suficiente para poder extraerla del mismo. El molde se construye de forma que sea desmontable.

Una vez completamente seca, la pieza se pule y prepara para la cocción. Se coloca en una caja de tierra refractaria llamada *gaceta*, que la protege de las llamaradas y de los gases que se emiten durante el proceso, de la misma forma que un horno casero protege la hogaza de pan. Las gacetas se apilan unas sobre otras en un *horno*. El horno es una gran estructura de ladrillo refractario y rodeada de conductos por los que penetra el fuego sin que las llamas entren nunca en contacto con la vajilla. El humo podría manchar las piezas si no estuvieran protegidas de esta forma.

La mayoría de las piezas se cuecen al menos dos veces. La primera cocción es la de *bizcochar*, y la pieza así obtenida es la *bizcochada* o *bizcocho*. Después de la cocción, la pieza bizcochada se esmalta. El esmalte es un recubrimiento vítreo y brillante que hace la pieza más resistente y atractiva. Los esmaltes contienen sílice, un fundente para bajar la temperatura de fusión (como plomo, bario, etc.) y óxidos metálicos que actúan como colorantes. Este preparado se aplica al objeto y, cuando está completamente seco, se coloca de nuevo en el horno y se cuece a una temperatura lo suficientemente elevada para que se funda y cubra por entero la superficie de la pieza.

### Tipos de cerámica

- *Gres*: es una cerámica hecha con arcilla blanca o roja. Se esmalta sobre el soporte crudo antes de entrar en el horno o mediante el procedimiento de "salado" durante la cocción, que produce un material denso y duro.
- *Porcelana*: es un material cerámico blanco, vitrificado y translúcido. El soporte y el esmalte se llevan a maduración final en una única cocción conjunta para ambos (monococción), que tiene lugar a temperatura muy elevada.

Figura 84.16 • Diagrama de flujo de la fabricación de fibra óptica.

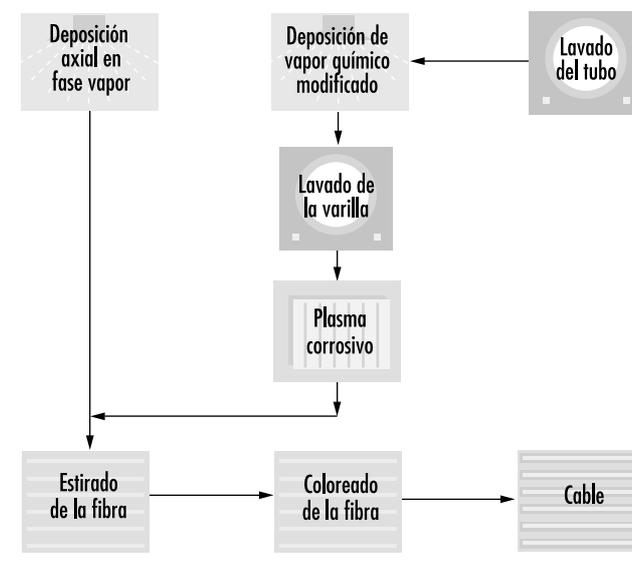


Tabla 84.1 • Componentes típicos del cuerpo (%).

Pasta	Base plástica			Fundente		Material de relleno (carga)		
	Arcilla plástica	Caolín	Arcilla de gres	Piedra	Feldespató	Cuarzo	Huesos calcinados	Otros
Barro cocido	25	25		15		35		
Gres	30–40		25–35		20–25			20–30 (chamota)
Porcelana	20–25	20–25			15–25	25–30		
Loza		40–50			20–30	15–25		
Porcelana de huesos		20–25		25–30			45–50	

- *Porcelana de China*: es un material cerámico muy similar al anterior. El soporte y el esmalte se cuecen a la vez a temperaturas extremadamente altas.
- *Porcelana de huesos*: es una variedad de porcelana fabricada con una pasta formada que incorpora huesos calcinados en una proporción de aproximadamente el 40 %.
- *Loza*: tiene una masa blanco o casi blanca. Se produce por bicocción, como la porcelana de China, pero la masa resultante es porosa. El esmalte es similar al de la porcelana, pero obtenido con materiales más baratos.
- *Mayólica*: es una loza delicadamente esmaltada que se utiliza con fines decorativos u ornamentales. Por lo general, no se intenta obtener una pasta blanca y los esmaltes suelen colorearse.

### Procesos de fabricación

Las propiedades físicas de la cerámica dependen de la composición del soporte o pasta y de las condiciones de cocción. La pasta para cualquier uso particular se selecciona principalmente por sus propiedades físicas, aunque para la vajilla se prefieren casi siempre las pastas blancas.

Los productos industriales (por ejemplo, refractarios, aisladores eléctricos, matrices para catalizadores, etc.) presentan propiedades muy diversas de acuerdo con su destino.

*Materias primas.* Los ingredientes básicos de una pasta cerámica se recogen en la Tabla 84.1, que también indica las proporciones de distintas pastas tipo.

La nefelina-sienita se usa a veces como fundente, y la alúmina puede reemplazar parcial o totalmente al cuarzo en algunas pastas de tipo porcelana. La cristobalita (arena calcinada) se usa como carga en algunas pastas cerámicas, en particular en las usadas para revestimientos murales.

La composición de la pasta viene determinada en parte por las propiedades requeridas del producto final y en parte por el método de producción. Una base plástica es esencial para objetos moldeados en húmedo, pero para los procesos de formación no plástica, como el prensado en polvo (seco), la base plástica no es esencial, aunque la arcilla continúa siendo el principal ingrediente en la mayor parte de los productos cerámicos, incluso en aquellos que se preparan por prensado en polvo.

La Tabla 84.1 no recoge cerámicas industriales, pues su composición varía desde todo arcilla plástica (ball clay) o refractaria, sin incorporación de fundentes o cargas; hasta casi todo alúmina con una mínima cantidad de arcilla y sin fundentes.

Durante la cocción, los fundentes se derriten y forman una masa vítrea que aglutina el resto de los ingredientes; la temperatura de vitrificación desciende a medida que aumenta la cantidad de fundentes. Los materiales de relleno (áridos) influyen en la resistencia mecánica de la fracción arcillosa antes y durante la cocción; en la elaboración de vajilla se utiliza tradicionalmente cuarzo (en forma de arena o sílex calcinado), excepto en la preparación de porcelana de huesos, donde se

emplean huesos calcinados. El uso de alúmina o de otras cargas no silíceas, empleadas en la elaboración de cerámicas industriales, está empezando a extenderse a la de otros productos, incluidos los domésticos.

*Procesos.* Las operaciones básicas de la producción de cerámica son:

- preparación de la pasta;
- conformación;
- bizcochado;
- aplicación de esmalte;
- cocción de vidriado, y
- decoración.

Los procesos preparatorios de calcinación, trituración y pulverización de los áridos (sílex, piedra, etc.) se completan a veces en una planta independiente, pero las operaciones siguientes suelen hacerse todas en una misma factoría. En la sala de pastas los ingredientes se mezclan con agua; se obtiene así la arcilla plástica por filtrado y amasado, y se mezcla con más agua hasta obtener una barbotina de consistencia cremosa. El polvo para el prensado se prepara por secado y molturación.

Las clasificaciones tradicionales de los métodos de conformación se recogen en la Tabla 84.2. En el colado, la suspensión acuosa de pasta (barbotina) se vierte en un molde absorbente, de donde se retira después de un secado parcial. En la actualidad es muy raro el torneado a mano en la fabricación industrial; en la elaboración de vajilla es casi universal el prensado mecánico de un exceso de pasta sobre un molde de yeso o en su interior; el exceso de arcilla se elimina con un nivel que desciende sobre el molde, del que se separa la pasta una vez seca. El moldeado por prensado o extrusión está básicamente restringido a la cerámica industrial. Los materiales prensados en polvo se producen por compactación de polvo de pasta presecado en prensas manuales o mecánicas.

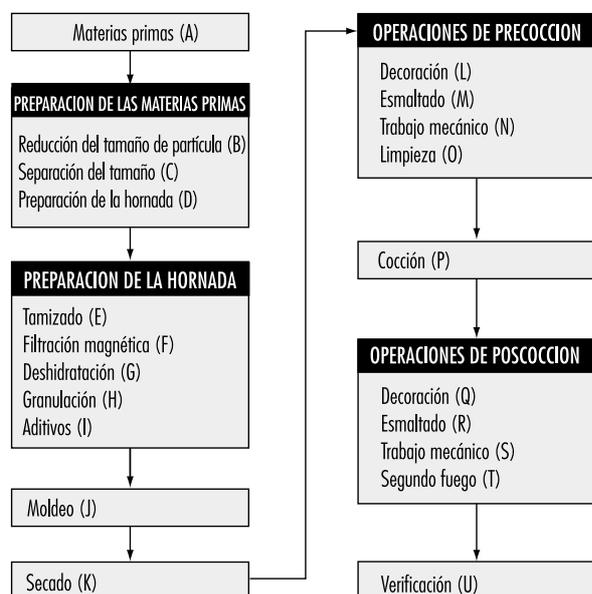
El material conformado se seca y acaba por desbarbado, desbaste, limpieza con esponja húmeda, etc.; se deja así listo para el bizcochado.

Después del bizcochado, se aplica el esmalte por inmersión o por aspersión; la inmersión se hace a mano o mecánicamente. El producto esmaltado se cuece de nuevo. A veces, en particular en

Tabla 84.2 • Procesos de fabricación.

Productos	Procesos habituales
Planchas	Moldeado de arcilla plástica; colado
Material sanitario	Colado
Baldosas	Prensado en polvo (pavimentos o revestimientos gresificados), troquelado (pavimentos)
Artículos industriales	Prensado en polvo, Troquelado

Figura 84.17 • Diagrama de flujo por tipo de producto cerámico.



TIPO DE MATERIAL CERAMICO	SECUENCIA DE OPERACIONES MULTIPLES DE PRODUCCION SEGUN EL TIPO DE MATERIAL CERAMICO
Cementos	A-D/P/L/C/I/U
Ladrillos para la construcción	A-D/J/K/P/U
Cañerías esmaltadas para la constr.	A-D/J/K/P/R/T/U
Sanitarios	A/D/E/F/O/M/P/U
Porcelana de huesos (colada)	A-D-F/J/K/O/P/R/T/Q/T/U
Porcelana de huesos (Haggard)	A/D-G/J/K/O/P/R/T/Q/T/U
Porcelana	A-D-F/J/K/N/M/P/Q/T/U
Refractarios arcillosos (extrusionados)	A-D/J/K/P/U
Refractarios, M <sub>2</sub> O	A-D/J/K/P/U
Azulejos	A/I/D-F/H/E/J/M/K/P/U
Esmalte	A/I/D-F/M
Materias primas (arcillas lavadas)	A/C-F/K/C/U

Fuente: Haber y Smith 1987.

la fabricación de loza sanitaria, el esmaltado se aplica sobre la pieza simplemente seca, que a continuación se somete a una única cocción (monococción).

La decoración se aplica sobre o bajo el esmalte, a mano, impresa mecánicamente o con ayuda de calcomanías; la decoración sobre esmalte exige una tercera cocción, y a veces son necesarias cocciones separadas para diferentes colores.

En las etapas finales se clasifican los productos y se empaquetan para su expedición. La Figura 84.17 recoge las fases por las que pasan los productos cerámicos durante su fabricación.

## Baldosas cerámicas

### Visión general

Hace algún tiempo, el término *cerámica* denotaba únicamente el arte o la técnica de producción de artículos de alfarería. El origen etimológico está en el griego *keramos*, que significa "alfarero" o "alfarería". Sin embargo, la palabra griega está relacionada con

una raíz sánscrita más antigua que significa "quemar"; en el sentido en que la usaban los propios griegos su significado primordial era simplemente "material quemado" o "tierra quemada". El concepto fundamental contenido en el término era el de un producto obtenido gracias a la acción del fuego sobre materiales terrosos.

En el contexto de este artículo, la cerámica tradicional se refiere a los productos normalmente usados como material para la construcción o en el interior de casas e industrias. Aunque la cerámica tradicional tiende a asociarse con técnicas elementales, lo cierto es que en este sector son comunes las tecnologías de fabricación avanzadas. La dura competencia entre fabricantes ha obligado a perfeccionar las técnicas para aumentar el rendimiento y reducir los costes mediante el uso de herramientas y máquinas complejas combinadas con el control del proceso asistido por ordenador.

Los productos cerámicos más antiguos se hacían con materiales arcillosos. Los primitivos alfareros consideraron que la naturaleza plástica de la arcilla era muy apropiada para darle forma. Debido a su tendencia a la contracción, las pastas arcillosas se modificaron con la incorporación de arena gruesa y piedra, que reducen la contracción y el fisurado. En las modernas pastas arcillosas, los aportes comunes no arcillosos son harinas de arena y minerales alcalinos que se añaden como fundentes, mientras que en las formulaciones cerámicas tradicionales es la arcilla la que actúa como plastificante y aglutinante de los demás componentes.

### Evolución de la industria

La producción de baldosas cerámicas secas y cocidas tiene orígenes muy antiguos que se remontan a los pueblos del Oriente Próximo. La industria de baldosas se desarrolló mucho en Europa, y hacia principios del siglo XX la fabricación de pavimentos y revestimientos alcanzó la escala industrial. Después de la segunda guerra mundial, este campo experimentó un nuevo avance. Europa (en particular Italia y España), América Latina y Extremo Oriente son en la actualidad las principales zonas de producción industrial de baldosas.

El sector de los pavimentos y revestimientos industriales ha experimentado un fuerte desarrollo desde mediados del decenio de 1980 con la introducción de nuevas tecnologías y automatismos y la integración de la producción en serie en los procesos industriales que aumentaron la productividad y la eficiencia, al tiempo que se redujeron el consumo de energía y los costes. En la actualidad, la fabricación de baldosas es continua en ambos métodos de producción, seco y húmedo, y muchas plantas están casi totalmente automatizadas. Entre las principales innovaciones del sector durante el último decenio se cuentan la molturación en húmedo, el atomizado, el prensado en seco a alta presión, el secadero de rodillos y las tecnologías de cocción rápida.

Se calcula que el valor de la oferta del mercado de baldosas cerámicas de EE.UU. (producción nacional más importaciones) se incrementó anualmente en un 9,2 % entre 1992 y 1994. Las ventas estimadas de 1994 fueron de 1.300 millones de dólares. Al mismo tiempo, el volumen de ventas aumentó anualmente en un 11,9 % hasta alcanzar los 120,6 millones de metros cuadrados. Esto equivale a una tasa de crecimiento del mercado entre 1982 y 1992 del 7,6 % en dólares, y del 6,9 % en volumen de ventas.

### Clasificación de las baldosas cerámicas

#### Pasta roja y pasta blanca

En el mercado hay muchos tipos de baldosas cerámicas, que se diferencian por el acabado de la superficie, el color de la pasta

(roja o blanca), la tecnología de fabricación, las materias primas y el uso al que se destinan. La diferencia entre baldosas "rojas" y "blancas" estriba en la cantidad de minerales de hierro que contiene el soporte; estos minerales reaccionan con los restantes componentes dando una coloración mayor o menor y modificando el comportamiento del soporte durante la cocción.

Una clasificación completa y exhaustiva es muy difícil debido a la extrema heterogeneidad de estos productos, de su procesamiento y de las subsiguientes características. En este capítulo consideraremos las Normas europeas (EN) y ASTM.

Las Normas EN clasifican las baldosas cerámicas exclusivamente en función de la absorción de agua (que se relaciona directamente con la porosidad) y el método de moldeo (extrusionado o prensado). Los métodos de moldeo se dividen en:

- *Grupo A* (pavimentos extruidos). Este grupo incluye los extruidos en dos piezas separables (split tiles) y los extruidos individualmente.
- *Grupo B* (pavimentos y revestimientos prensados en seco).

La Norma europea EN 87, aprobada en Noviembre de 1981, especifica que "los pavimentos y revestimientos cerámicos son materiales para la construcción que generalmente se designan para su uso como recubrimiento de suelos y paredes tanto de interiores como de exteriores, sin importar su forma o tamaño".

La especificación para baldosas cerámicas (ANSI A 137.1) del Instituto Nacional Americano de Normalización (ANSI) contiene las siguientes definiciones:

- *Mosaico*: formado por extrusión o prensado de 6,4 a 9,5 mm de grosor, y de menos de 39 cm<sup>2</sup> de superficie facial. Su composición de arcillas puede ser porcelánica o natural, y sencilla o con mezcla abrasiva en su totalidad.
- *Azulejo decorativo*: baldosa esmaltada, delgada y generalmente no vítrea apta para revestimientos decorativos interiores cuando no se requiere resistencia a la rotura.
- *Pavimentos*: baldosa esmaltada o no esmaltada de composición porcelánica o natural formada por prensado de áridos y de superficie superior a 39 cm<sup>2</sup>.
- *Baldosa porcelánica*: mosaico o pavimento, generalmente fabricado por prensado, de composición densa, impermeable, de grano fino y cara lisa nitidamente formada.
- *Baldosa de gres (Quarry tile)*: baldosa esmaltada o no, moldeada por extrusión a partir de arcilla natural o pizarra, y de superficie facial mayor o igual a 39 cm<sup>2</sup>.
- *Azulejo*: baldosa esmaltada con soporte apto para interiores, generalmente no vitrificado y que no debe soportar impactos excesivos, ni grandes cambios térmicos (heladas y deshielos bruscos).
- *Tipos particulares de baldosas*: comprenden baldosas no esmaltadas (mosaico cerámico, gres, pavimento) y esmaltadas (azulejo, mosaico, gres y pavimento) (ANSI 1988).

Las baldosas se fabrican mediante procesos cerámicos normalizados. Los pavimentos y revestimientos cerámicos se preparan a partir de una mezcla de arcillas plásticas (ball clays), arena, fundentes, colorantes y otras materias primas minerales, que se someten a una serie de operaciones tales como molienda, tamizado, mezclado y humidificado. Se moldean por prensado, extrusión, colado u otros procesos, normalmente a temperatura ambiente; a continuación se secan y por último se cuecen a temperatura elevada. Hay baldosas esmaltadas, no esmaltadas o engobadas. Los esmaltes son recubrimientos vidriados e impermeables, mientras que los engobes son mates, basados en arcillas y probablemente porosos. Se producen tanto por monococción como por bicocción.

Los soportes cerámicos tradicionales se moldean usando técnicas muy diversas. El proceso específico vendrá determinado

por numerosos factores, entre ellos las características del material, el tamaño y el perfil de la pieza, las especificaciones de la misma, el rendimiento de la producción y las prácticas admitidas en la zona.

Los soportes cerámicos son mezclas heterogéneas de una o más arcillas y una o más sustancias pulverulentas no arcillosas (áridos). Antes de alcanzar su aspecto final, estos polvos pasan por una secuencia de operaciones en cadena y por fases de cocción y post-cocción (véase la Figura 84.17).

Para los soportes más tradicionales, las técnicas de formación se clasifican en moldeo en plástico blando, moldeo en plástico duro, prensado y colado.

La presión aplicada sirve para reordenar y redistribuir las materias primas en una configuración más compacta. El comportamiento reológico de las pastas arcillosas resulta de la interacción de la arcilla con el agua, que comunica plasticidad al conjunto. En las pastas no arcillosas este mismo comportamiento debe alcanzarse por aportación de plastificantes.

## Cerámicas industriales

### *Visión general*

La cerámica difiere de otros materiales técnicos (metales, plásticos, productos de la madera, textiles) en una serie de propiedades individuales. La diferencia más característica para un diseñador o usuario potencial de artículos cerámicos quizás sea la forma y el tamaño únicos de cada pieza cerámica. Después de la cocción, la cerámica no permite trabajar o modificar su forma fácilmente si no es con un costoso esmerilado, por lo que debe usarse tal cual es. Excepto alguna baldosa sencilla, varillas y formas tubulares de pequeño tamaño, los materiales cerámicos no se pueden comercializar al centímetro ni ser cortados para encajar en el lugar de colocación.

Todas las propiedades de la cerámica, incluidas la forma y el tamaño, deben determinarse por adelantado desde las primeras etapas del proceso cerámico. La integridad estructural de cada pieza debe preservarse a lo largo de la gran variedad de tensiones térmicas y mecánicas a que se somete durante el proceso, hasta que finalmente es colocada y entra en servicio. Las piezas cerámicas rotas una vez colocadas como consecuencia de diversas causas (fractura frágil al impacto, choque térmico, ruptura dieléctrica, abrasión o corrosión de la escoria fundida) no son fáciles de reparar, y normalmente hay que reemplazarlas.

Se ha avanzado mucho en el conocimiento de los fundamentos y en el control tecnológico de las propiedades de los materiales cerámicos y de su utilización en muchas aplicaciones nuevas, muy técnicas y exigentes. La industria en general, y los sectores de la cerámica técnica y electrónica en particular, han ideado técnicas de producción y control para la fabricación a gran escala de piezas de forma compleja controlando cuidadosamente las propiedades eléctricas, magnéticas y/o mecánicas, y manteniendo tolerancias dimensionales lo suficientemente buenas como para permitir un ensamblado relativamente fácil con otros componentes.

Ahora se fabrican en grandes cantidades numerosos artículos cerámicos normalizados. Muchos productores cerámicos disponen habitualmente de existencias de ladrillos refractarios, crisoles, mufas, tubos de hornos, aislantes, tubos de protección de termopares, dieléctricos de condensadores, juntas estancas y tableros de fibras, con variedad de composiciones y tamaños. Por lo general, lo más rápido y barato es usar artículos en existencia siempre que sea posible; en caso contrario, la mayoría de los fabricantes están preparados para producir artículos por encargo. Cuanto más estrictos sean los requerimientos para una característica determinada de la cerámica, o más restrictivos

sean los requerimientos para una combinación específica de propiedades, tamaños y formas, tanto más limitados serán los parámetros aceptables de composición, microestructura y configuración. En consecuencia, el coste de fabricación será mayor. Casi todos los fabricantes de cerámica tienen una plantilla de ingenieros y diseñadores con experiencia que están bien cualificados para trabajar con clientes potenciales en los detalles del diseño de la pieza cerámica.

### Mercados

El principal mercado para los productos cerámicos de tecnología avanzada ha sido y seguirá siendo el de la electrónica, pero los pujantes programas de investigación y desarrollo en todo el mundo buscan continuamente nuevas aplicaciones y la identificación de métodos para la mejora de las propiedades cerámicas a fin de poder acceder a esos nuevos mercados.

En Japón, Estados Unidos y Europa Occidental se fabrican productos cerámicos avanzados cuyas materias primas se comercializan internacionalmente, en especial como polvos, aunque también es importante el volumen de producción interna.

Las principales aplicaciones de las cerámicas industriales son:

- **Oxidos:** la alúmina es el óxido que más se utiliza hoy en bujías, substratos y aplicaciones abrasivas; la zirconia ( $ZrO_2$ ) en sensores de oxígeno, como componente en cerámica piezoeléctrica de titanio-plomo-zirconio (PZT), en aplicaciones abrasivas y recubrimientos de barreras térmicas; los titanatos en condensadores de titanato de bario y piezoeléctricos PZT; y las ferritas en imanes permanentes, cabezales de grabación magnéticos, dispositivos de memoria, sensores de temperatura y piezas de motores eléctricos.
- **Carburos y nitruros:** los carburos (principalmente los de sílice y boro) se usan en aplicaciones abrasivas, mientras que los nitruros (principalmente sílice y Sialon) se utilizan en aplicaciones abrasivas y herramientas de corte. El nitruro de aluminio, por su gran conductividad térmica, es el principal rival de la alúmina en el mercado de substratos electrónicos.
- **Mezcla de óxidos:** el trabajo de investigación y desarrollo en el campo de la cerámica se centra en una serie de nuevas aplicaciones de los materiales cerámicos, todas ellas con un enorme potencial. Tres aplicaciones destacadas son: a) superconductores cerámicos; b) materiales cerámicos para células electroquímicas de óxidos sólidos, y c) compuestos cerámicos para máquinas térmicas.

Los superconductores cerámicos se basan en una serie de sistemas de mezcla de óxidos que incluyen itrio, bario, cobre y estroncio ( $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ ,  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ ,  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ ) estabilizados con óxido de plomo. Las células electroquímicas de óxidos sólidos se basan en conductores iónicos en los cuales el óxido de zirconio estabilizado de gran pureza es normalmente el material elegido. Los componentes cerámicos de las máquinas térmicas que se investigan son compuestos de carburo de silicio, Sialon y zirconio, o como productos cerámicos de fase simple, o compuestos cerámica-cerámica o metal-aglomerante (MMC).

### Procesos de fabricación

#### Desarrollo de la tecnología de fabricación

**Innovaciones del tratamiento.** La actividad de investigación y desarrollo está introduciendo nuevas tecnologías de producción de materiales cerámicos. En 1989 se estimó que los materiales cerámicos derivados de estas innovaciones alcanzaron un valor de mercado de dos millones de dólares, la mayor parte del cual era CVD (86 % del total del valor de mercado). Otros segmentos de este mercado en crecimiento incluyen infiltración de vapores químicos (CVI), sol-gel y pirólisis de polímeros. Las fibras cerámicas

continuas, los composites, las membranas y los polvos hiperactivos y de gran pureza son algunos de los productos que están fabricándose de manera satisfactoria con estos métodos.

Los métodos usados para convertir estas materias primas en productos acabados comprenden tratamientos especiales del polvo cerámico (por ejemplo, molienda y atomizado) antes de la configuración en crudo y de la coadura final en condiciones controladas. En la formación se usan técnicas de troquelado, prensado isostático, colado, vaciado, extrusión, inyección en molde, prensado en caliente, prensado isostático en caliente (HIP), CVD, etcétera.

**Aditivos químicos de ayuda a procesos cerámicos:** cada paso de un proceso industrial requiere un control cuidadoso para que las propiedades del producto final se obtengan con la máxima eficiencia de producción y se usan productos químicos que tienen un efecto clave en la optimización del tratamiento de los polvos y el moldeado en crudo. Estos productos químicos se usan como mejoradores de la molidura, floculantes y fijadores, lubricantes para facilitar el desprendimiento de la pieza durante el prensado y minimizar el desgaste del troquel, y plastificantes para contribuir al extrusionado y moldeado por inyección. En la Tabla 84.3 se recogen estos productos químicos. Aunque estos materiales juegan un importante papel económico en la producción, se queman durante la cocción y no tienen efecto alguno sobre el producto acabado. El quemado debe controlarse con precisión para evitar la presencia de carbón residual en los productos acabados, por lo que la investigación y el

Tabla 84.3 • Selección de aditivos químicos empleados para optimizar el tratamiento del polvo y el moldeado en crudo de los productos cerámicos.

Material	Aplicación o función
Alcohol polivinílico	Ligante para materiales cerámicos avanzados
Polietilenglicol	Ligante para materiales cerámicos avanzados
Poliacrilato sódico	Defloculante para colado de barbotinas
Poliámidas terciarias	Ligante para prensado en seco
Almidón mezclado con aluminosilicato coloidal seco	Ligante para moldeado al vacío
Alúmina catiónica más floculante orgánico	Ligante para moldeado al vacío
Almidón de maíz catiónico pre-gelificado	Floculante para sílice coloidal y ligante para alúmina
Carboximetilcelulosa sódica de gran pureza	Ligante
Silicato aluminico de magnesio inorgánico coloidal	Inductor de suspensiones
Carboximetilcelulosa sódica de viscosidad media añadida a Veegum	Inductor de suspensiones, estabilizante de viscosidad
Poli-electrolito amónico	Agente dispersante para atomizados
Poli-electrolito sódico	Agente floculante para dar cuerpo a pulverizadores secantes
Celulosa microcristalina y carboximetilcelulosa sódica	Agente espesador
Polisilazano	Auxiliar del proceso, ligante y precursor para material cerámico avanzado

desarrollo de los procesos buscan continuamente métodos que minimicen los efectos de estos materiales.

Además del desarrollo de las tecnologías para la fabricación de cerámica y productos cerámicos en busca de nuevas aplicaciones, no debería pasarse por alto la influencia de la industria cerámica avanzada sobre la tradicional. Se espera que muchos materiales y procesos de alta tecnología encuentren aplicación en la industria cerámica tradicional cuando esta última se esfuerce por reducir los costos de fabricación, mejorar la calidad y conceder más importancia a la atención al usuario final.

#### Materias primas

Hay ciertos materiales clave directamente usados por la industria cerámica o que representan el punto de partida para la producción de materiales de valor añadido:

- sílice;
- arcilla;
- alúmina;
- magnesita;
- bióxido de titanio;
- óxido de hierro, y
- zircón (silicato de zirconio natural)/zirconia (óxido de zirconio).

La exposición se centrará en las propiedades de la sílice, la alúmina y el zircón/zirconia.

*Sílice:* además de su uso en refractarios y cerámica blanca, también es el punto de partida en la fabricación de silicio, carburo de silicio y tetracloruro de silicio. A su vez, el silicio es el punto de partida para la obtención de nitruro de silicio y el tetracloruro de silicio es el precursor para una amplia gama de compuestos organosilíceos, que en condiciones controladas se pirolizan a carburo de silicio de gran calidad y nitruro de silicio.

A pesar de su tendencia a oxidarse, el nitruro de silicio y sus derivados de Sialon, así como también el carburo de silicio, tienen la capacidad potencial de cumplir muchos de los objetivos de propiedades fijados por el mercado de la maquinaria térmica. Una característica del silicio y de los materiales cerámicos derivados del mismo es que se encuentran fácilmente en la corteza terrestre, por lo que ofrecen potencialmente facilidad de suministro en todo el mundo. En la práctica, sin embargo, se requiere un importante consumo energético para la producción de silicio y carburo de silicio. En consecuencia, la fabricación de estos materiales está limitada a los países con energía eléctrica barata y fácilmente asequible.

*Alúmina:* se encuentra en toda la corteza terrestre como componente de los aluminosilicatos. Por motivos económicos, la alúmina se extrae de la bauxita mediante el proceso Bayer. La bauxita está extendida por todo el cinturón ecuatorial en distintos estados de pureza, y se clasifica en dos tipos: refractaria y metalúrgica.

La bauxita de calidad refractaria la suministran China y Guayana en forma de calcinado a alta temperatura de los yacimientos de los minerales diásporo ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) en China y gibb-sita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) en Guyana. Durante la calcinación se forma una compleja unión de fases de corindón ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), mullita, vidrio de sílice y, en menor cantidad, alumino-titanatos. El consumo mundial de bauxita de calidad refractaria supera las 700.000 toneladas por año.

La bauxita de calidad metalúrgica se extrae en Australia, Jamaica y África Occidental y tiene proporciones variables de alúmina en función de las impurezas principales que presente, tales como sílice y óxido de hierro. La alúmina de los minerales metalúrgicos se extrae de su mena por disolución en hidróxido sódico, que rinde una solución de aluminato sódico, la cual se separa del óxido de hierro y la sílice, que se rechazan como

estériles en forma de barro rojo. Del aluminato sódico se precipita esencialmente hidróxido de aluminio puro que se calcina a diversas calidades de alúmina.

Las alúminas de gran pureza utilizadas en la industria cerámica y obtenidas mediante los procesos Bayer se clasifican en alúmina laminada, alúmina fundida o alúmina calcinada.

La alúmina laminada se obtiene por calcinación a elevada temperatura ( $\sim 2.000^\circ\text{C}$  o  $3.630^\circ\text{F}$ ) a partir de alúmina calcinada a baja temperatura en grandes hornos rotatorios que utilizan petróleo como combustible. La alúmina fundida se obtiene por fusión eléctrica de la alúmina calcinada. Las alúminas laminada y fundida se venden a la industria refractaria molidas y clasificadas según el tamaño del granos para ser utilizadas en una amplia variedad de productos de gran calidad, como los refractarios de vaciado continuo (por ejemplo, compuertas de corredera ranuradas de un solo canto), o los refractarios monolíticos para aplicación en altos hornos y en la industria petroquímica.

Los alúmina calcinada en polvo constituye la principal materia prima empleada en la industria cerámica avanzada, tanto para aplicaciones electrónicas como de ingeniería. Los polvos se producen en una amplia variedad de calidades de acuerdo con especificaciones exactas de composición química, tamaño de partícula y tipo de cristal, para adaptarse a una gran diversidad de aplicaciones del producto acabado.

Hay un comercio internacional de alúminas de gran calidad bien asentado. Muchos de los fabricantes de productos cerámicos tienen en sus plantas instalaciones de molturación y atomizado. Es evidente que el crecimiento del suministro a instalaciones de atomizado está limitado, así como que hay una necesidad constante de alúminas adecuadas a las características de la planta del cliente a fin de que el uso de éstas pueda optimizarse a un precio aceptable. La alúmina es un importante material cerámico que se obtiene con un elevado grado de pureza. La posición dominante de la alúmina como materia prima cerámica se debe a que posee atractivas propiedades a un coste relativamente bajo. Esta eficacia del coste es atribuible a la naturaleza de mercancía indiferenciada que adquiere el movimiento comercial a consecuencia de la gran demanda de alúmina por parte de la industria del aluminio.

*Zircón y zirconia.* La principal fuente de zirconia es el mineral zircón ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ ), que se encuentra en arenas de playa, principalmente en Australia, Sudáfrica y Estados Unidos. El zircón extraído de estas arenas contiene un  $\sim 2\%$  de óxido de hafnio y trazas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,5%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,1%) y  $\text{TiO}_2$  (0,1%). Además, todos los zircons contienen trazas de uranio y torio. El zircón se somete a molturación fina para obtener una gama de productos molidos de tamaño de partícula calibrado. Estos productos se utilizan en piezas de fundición, fundiciones, productos refractarios y fabricación de esmaltes opacos para cerámica blanca.

El zircón es también la fuente principal de zirconia. Se puede clorar en presencia de carbón para obtener tetracloruros de zirconio y silicio, que después se separan por destilación. El tetracloruro de zirconio así obtenido puede usarse para preparar zirconio directamente o como fuente de otros derivados del zirconio. Sinterizado con óxidos alcalinos o alcalinotérreos también se emplea para la descomposición del zircón. La sílice livivia con agua a partir de los productos descomposición y se obtiene así hidróxido de zirconio que se purifica por disolución ácida y reprecipitación. A continuación se extrae la zirconia por calcinación del hidróxido. El zircón también se convierte en zirconia y sílice en un plasma a  $1.800^\circ\text{C}$  ( $3.270^\circ\text{F}$ ) con enfriamiento rápido para impedir la reasociación. La sílice libre se separa por disolución en hidróxido sódico. La zirconia fundida se obtiene en hornos de arco eléctrico a partir de la baddeleyita o de depósitos de zircón/carbono. En este último proceso la

sílice componente del zircón se reduce por tratamiento térmico con carbono a monóxido de silicio, que se volatiliza antes de la fusión de la zirconia residual.

### Resumen

El sector de la cerámica industrial está muy diversificado y son numerosos los procesos que se llevan a cabo en las propias fábricas. Muchas de las operaciones finales de fabricación se realizan en ambientes semejantes a los de una fundición. Los equipos de manipulación de material en estas plantas transportan materias primas finas potencialmente problemáticas a consecuencia del polvo. Los materiales se someten a temperaturas elevadas y se funden o fusionan en las formas necesarias para las piezas finales. Por consiguiente, en el sector de la cerámica industrial se presentan muchos de los problemas de seguridad propios de toda industria que trabaja a temperaturas elevadas.

## Ladrillos y baldosas

### Visión general

Los ladrillos y las baldosas de arcilla se han utilizado como material de construcción desde los tiempos más remotos en muchas partes del mundo. Cuando se hacen y se cuecen de manera apropiada son más perdurables que algunas piedras, resistentes a las condiciones climatológicas y a los grandes cambios de temperatura y humedad. El ladrillo es un rectángulo de tamaño normalizado que varía ligeramente de una región a otra, pero que básicamente resulta adecuado para ser manipulado con una mano por un albañil; las tejas son placas delgadas, planas o curvas; las baldosas también se emplean como pavimento.

La industria del ladrillo está muy fragmentada, pues hay muchos proveedores pequeños distribuidos por todo el mundo. En la fabricación de estos productos suelen intervenir proveedores y mercados locales para ahorrar los costes de transporte del producto acabado. Así, en 1994 había 218 plantas de fabricación de ladrillos en Estados Unidos, y en 1992 el número de fabricantes de productos de material arcilloso para la construcción en el Reino Unido era de 182. En general, los fabricantes de ladrillos se sitúan cerca de los depósitos de arcilla para acortar el transporte de la materia prima.

En Estados Unidos, los ladrillos se utilizan básicamente en la construcción de viviendas como material de soporte de carga o de fachada. Puesto que la industria del ladrillo está tan estrechamente vinculada con la de la construcción, la actividad productora depende mucho del sector de construcción de viviendas, y casi totalmente de la actividad industrial que combina la construcción residencial y no residencial.

### Procedimientos de fabricación

#### Materiales y procesamiento

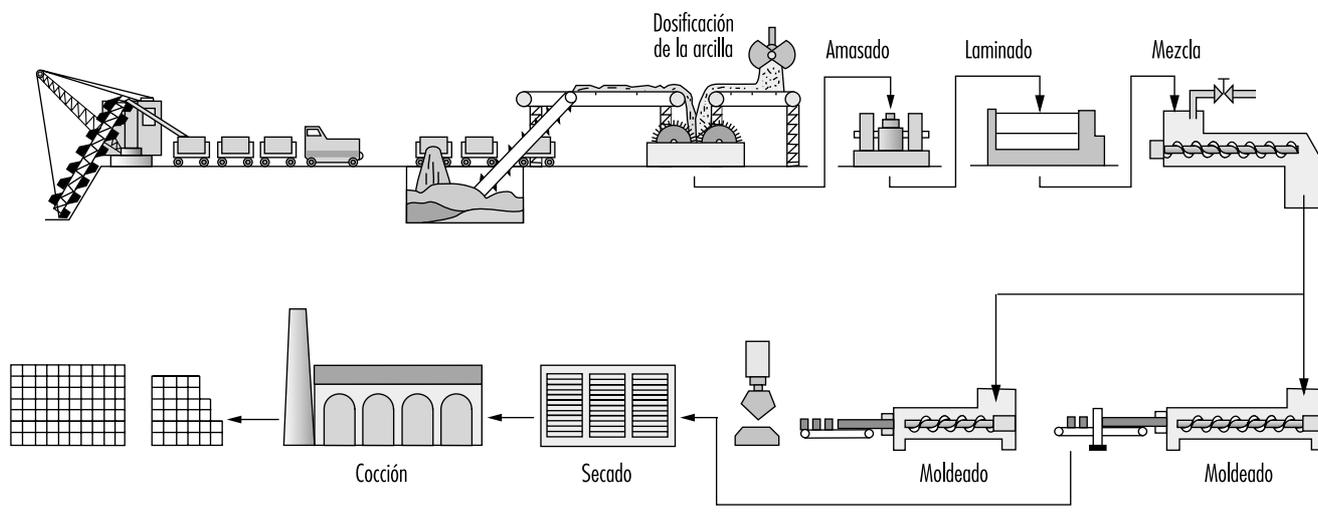
El material básico es la arcilla de diversas clases con mezclas de margas, esquistos y arena, de acuerdo con las materias primas y necesidades locales, para obtener las propiedades requeridas de textura, plasticidad, regularidad y contracción, y color.

En la actualidad, la extracción de arcilla suele estar totalmente mecanizada; en general, la fabricación se lleva a cabo junto al lugar de extracción, pero en las empresas grandes la arcilla a veces se transporta con cintas o teleféricos. El tratamiento ulterior de la arcilla varía de acuerdo con su constitución y el producto acabado, pero en general comprende trituración, molturación, tamizado y mezclado. La Figura 84.18 ilustra la cadena de operaciones típica de la fabricación de ladrillos.

La arcilla destinada a la producción de ladrillos cortados con alambre se desmenuza con rodillos y a continuación se le incorpora agua en una mezcladora, se amasa de nuevo y se carga en una amasadora y extrusionadora horizontal. A continuación, la arcilla plástica extruida se corta a la medida con un cortador de alambres. Se obtiene material plástico semiseco y rígido por laminación, tamizado y prensado mecánico. Algunos ladrillos siguen moldeándose a mano.

Cuando se utiliza un material plástico, los ladrillos hay que secarlos al sol y al aire o, con mayor frecuencia, en hornos regulados, antes de cocerlos; los de material plástico semiseco o rígido se cuecen de inmediato. La cocción tiene lugar en hornos circulares, a menudo alimentados a mano, o de túnel, alimentados mecánicamente. Los combustibles empleados varían en función de la disponibilidad local. A algunos ladrillos decorativos se les aplica un barniz de acabado.

Figura 84.18 • La fabricación de ladrillos y baldosas.



## Refractarios

### Visión general

Tradicionalmente se ha considerado que los refractarios son materiales no metálicos que resisten la degradación ocasionada por gases, líquidos o sólidos corrosivos a temperaturas elevadas. Estos materiales deben soportar el choque térmico causado por calentamiento o enfriamiento rápidos, fallos atribuibles a tensiones térmicas, fatiga mecánica por contacto con otros materiales y ataques químicos activados por la elevada temperatura de trabajo. Se utilizan para la fabricación de la mayoría de los productos cerámicos y se necesitan específicamente en estufas, secaderos, hornos y piezas de maquinaria que deben soportar temperaturas elevadas.

Los refractarios han sido casi exclusivamente de base mineral hasta bien avanzado el siglo XX, pero los técnicos expertos en mineralogía empezaron a interesarse por ellos. Los metalúrgicos han experimentando desde la Edad Media con prácticas de escorificación con ácidos y bases y catalogaron las ventajas de ambos tratamientos. De la misma manera, los artesanos de refractarios han experimentado con arena refractaria, con otros minerales de sílice prácticamente pura y con magnesita, un mineral formado predominantemente por  $MgCO_3$  y que rinde  $MgO$  por calcinación. Cuando en 1856 se inició la producción de acero en convertidores Bessemer, en los que se combinaba el trabajo a temperaturas de más de  $1.600\text{ }^\circ\text{C}$  con la formación de escorias ácidas corrosivas, los refractarios «ácidos» de sílice distaban mucho de estar preparados. Cuando en 1857 Siemens inauguró un horno de crisol a temperaturas aún más elevadas y la fabricación de acero adoptó la formación de escorias básicas, pronto se introdujeron revestimientos «básicos» de magnesita. Los refractarios básicos de dolomita ( $MgO-CaO$ ) se desarrollaron durante la I Guerra Mundial, cuando los aliados dejaron de recibir magnesita desde la Europa continental. Más tarde, con el desarrollo de otros recursos minerales en todo el mundo, la magnesita volvió a reafirmarse como materia prima.

Por otra parte, en 1863 se inició en el Reino Unido la fabricación de ladrillos aglomerados al carbono que con el tiempo se utilizaron en los hornos de fundición cuando las temperaturas de fabricación se hicieron aún más elevadas. También pasaron rápidamente a las cubas Hall-Héroult de producción de aluminio (1886).

Durante alrededor de 5.000 se había obtenido cal en hornos primero de arcilla y más adelante de ladrillos refractarios. La fabricación de cemento portland exigió por vez primera un refractario innovador cuando en 1877 se introdujeron los hornos

Tabla 84.4 • Utilización de refractarios por industria en Estados Unidos.

Industria	Porcentaje de las ventas totales en EE.UU.
Hierro y acero	51,6
Metales no ferrosos	7,5
Cemento	4,9
Vidrio	5,1
Materiales cerámicos	9,7
Productos químicos y petróleo	2,1
Servicios públicos	0,9
Exportaciones	7,4
Resto y no especificadas	10,8

### Propiedades de los materiales refractarios

Las propiedades que caracterizan a los materiales refractarios de calidad dependen de la naturaleza de la aplicación. El aspecto más importante de los materiales se denomina "refractoriedad". Este término se refiere al punto en el cual la muestra empieza a reblandecerse (o fundirse). Normalmente, los refractarios no tienen un punto de fusión específico; la transición de fase tiene lugar dentro de un intervalo de temperaturas en un fenómeno llamado reblandecimiento. Esta característica suele cuantificarse con el cono pirométrico equivalente (PCE), que es una medida del contenido de calor expresado por la inclinación del cono durante el ciclo térmico.

Una propiedad relacionada con la anterior, y a menudo más útil, es la temperatura de rotura bajo carga. Los refractarios suelen ceder bajo carga a una temperatura muy inferior a la que les correspondería según su PCE. Para determinar esta variable, se somete el refractario a una carga conocida y se calienta hasta que se pandea o se deforma en general y se anota la temperatura correspondiente. Este valor es de gran importancia, pues sirve para predecir las propiedades mecánicas del refractario durante su uso. La capacidad del refractario para soportar cargas es directamente proporcional a la viscosidad del vidrioado presente.

Otro factor esencial para entender el rendimiento de un refractario es su estabilidad dimensional porque, a lo largo de su uso industrial, los materiales refractarios se someten a ciclos de calentamiento y enfriamiento que originan la dilatación y contracción, respectivamente, de las piezas. Los cambios dimensionales importantes reducen la estabilidad y pueden conducir a la rotura de la estructura refractaria.

Un fenómeno afín muy observado con materiales refractarios es el desconchado, término con el que se designa la fractura, fragmentación o exfoliación del refractario, que provoca la exposición de la masa interna del material. Normalmente, el desconchado es consecuencia del gradiente de temperatura en el interior del material, la compresión estructural por sobrecarga y la variación del coeficiente de dilatación térmica en el interior del ladrillo. En la fabricación de refractarios se adoptan medidas muy variadas para evitar el desconchado, porque reduce su efectividad.

Los refractarios tienen una amplia diversidad de aplicaciones industriales, que van desde su uso intensivo en la siderurgia del hierro y del acero hasta el más moderado en la industria del cemento y en las empresas de abastecimiento público. Los refractarios se usan básicamente en todos los sectores en los que se emplean temperaturas elevadas para calentar, secar o incinerar materiales. La Tabla 84.4 muestra el desglose actual por sectores del uso de refractarios en Estados Unidos.

Como se ve en dicha tabla, la siderurgia consume más del 50 % de los refractarios producidos en EE.UU. Por ello, son las necesidades de este sector las que han impulsado en buena medida el avance que han experimentado los materiales refractarios.

rotativos. Los primeros revestimientos resistentes se hicieron con ladrillos aglomerados de cemento blanco. Más adelante volvieron a fabricarse en esta industria refractarios comerciales más duraderos.

Los hornos recuperativos y regenerativos introducidos en el decenio de 1950 en el naciente sector del acero se introdujeron también a finales del siglo XX en las industrias de la metalurgia no férrea y el vidrio y obligaron también en estos sectores a reemplazar los ladrillos de arcilla refractaria. A partir de 1909 se

utilizaron revestimientos de magnesita en los convertidores de cobre y unos 10 años más tarde en los primeros tanques de vidrio modernos. En 1853 se probaron por vez primera los hornos de arco eléctrico para la fabricación de acero que no llegaron a generalizarse hasta 1990. En 1927 una planta de aproximadamente 100 toneladas instalada en Estados Unidos empleaba un revestimiento de magnesita.

Antes de 1950 se instalaron hornos de arco trifásicos y sólo entonces surgió una demanda importante de refractarios más perfeccionados. En el decenio de 1940 se introdujo en los hornos Bessemer y en los de solera abierta el soplado de oxígeno. A finales de 1950 el horno de oxígeno básico (BOF) se impuso en la fabricación de acero. El soplado de oxígeno, por su importancia económica, obligó por vez primera a la industria de refractarios a introducir en sus productos materiales sintéticos a gran escala.

### **Refractarios modernos**

La producción de cerámica ha pasado de artesanía a ciencia aplicada. La American Ceramic Society se fundó en 1899 y la British Ceramic Society en 1901. Los diagramas de fase comenzaron a publicarse en el decenio de 1920. Las técnicas de petrografía estaban muy desarrolladas, y comenzaban a entenderse los mecanismos detallados de la degradación y el desgaste refractario. Casi todos los productores de refractarios de Estados Unidos se habían reorganizado y consolidado y estaban en condiciones de investigar por sí mismos. Las herramientas de síntesis refractaria y los instrumentos de investigación se multiplicaban.

Los carbonos sintéticos industriales no eran, por supuesto algo nuevo, pues en el decenio de 1860 se obtuvo coque comercialmente, primero a partir de la hulla y luego del petróleo. El grafito sintético y el carburo de silicio aparecieron casi simultáneamente a comienzos del siglo XX, siguiendo a la invención de Acheson del horno eléctrico de resistencia propia en 1896. Estos productos, de propiedades muy diferentes a las de los óxidos, estimularon rápidamente sus propios usos y mercados.

Se dispone de alúmina sintética,  $Al_2O_3$ , desde que el método Bayer comenzó a fomentar la producción de aluminio en 1888. La magnesia sintética (MgO) se obtuvo por primera vez a partir de agua marina en el Reino Unido en 1937, y en Estados Unidos en 1942, estimulada por la necesidad de magnesio en tiempos de guerra. La demanda militar también había espoleado la obtención de zirconia. La cal ha sido un artículo importante a lo largo de los siglos. Muchísimas otras sustancias químicas también fueron consideradas como componentes refractarios, o como aditivos menores y agentes aglomerantes. El único componente químico importante de los óxidos refractarios que ha resistido en general la sustitución por sustancias sintéticas es la sílice ( $SiO_2$ ). Las rocas de sílice de gran pureza y las arenas abundan y se emplean en esta industria, así como en la formulación del vidrio.

La incorporación de materiales sintéticos a la fabricación de refractarios ha sido sumamente útil, pero no ha desplazado por completo a las materias primas minerales, ya que son más caros y hay que justificar su mayor costo. Algunos complican mucho el procesamiento de refractarios y obligan a buscar nuevas técnicas para superar estas dificultades. Con frecuencia se han obtenido resultados óptimos mediante la combinación de sustancias sintéticas y materias primas minerales, junto con aportaciones creativas a su procesamiento.

Las mezclas de arcilla con carbón se han empleado para revestir crisoles y cucharas de colada desde los comienzos de la producción de hierro colado; y en el decenio de 1860 en Francia se fabricaron ladrillos de sílice con carbono. A partir de 1960 tanto las técnicas como las composiciones han cambiado

espectacularmente. El uso de refractarios al carbono iniciado con el  $MgO+C$  se ha multiplicado, impulsado tal vez por el Horno de Oxígeno Básico (BOF); pero en la actualidad no hay casi ningún tipo de refractario de óxido avanzado que no se pueda obtener con o sin la incorporación de carbono o de un precursor de carbono para mejorar el rendimiento en determinadas aplicaciones.

Desde comienzos del decenio de 1900 se vienen obteniendo agregados o granulados refractarios fundidos al arco eléctrico, a los que sucedieron en los de 1920 y 1930 los ladrillos refractarios fundidos en molde de diversas composiciones, en particular de mullita, alúmina, magnesio-alúmina-sílice y alúmina-zirconia-sílice. La mayoría de las veces estos productos se obtenían íntegramente a partir de materias primas minerales.

De hecho, todos los refractarios basados íntegramente en minerales siguen constituyendo una parte importante de la producción. Por lo general, son más baratos, suelen comportarse admirablemente y todavía hay muchas aplicaciones de menor demanda o que exigen valores máximos de refractoriedad y resistencia a la corrosión.

### **Sector de los de materiales refractarios**

Los refractarios se utilizan en muchas industrias para recubrir calderas y hornos de todo tipo, pero el mayor porcentaje se emplea en la elaboración de metales. En la industria del acero, un alto horno típico o un horno de solera abierta utilizan muchos tipos diferentes de refractarios, unos de sílice, otros de cromo o magnesita o de las dos cosas y otros de arcilla refractaria.

Cantidades mucho menores se utilizan también en aplicaciones como la obtención de gas, coque y subproductos; centrales eléctricas; plantas químicas; hornos de cocina y estufas; cemento y cal; cerámica; vidrio; esmaltes y barnices; locomotoras y barcos; reactores nucleares; refinerías de petróleo; eliminación de desechos (incineradoras).

### **Procesos de fabricación**

El tipo de refractario utilizado en toda aplicación específica depende de los requisitos críticos del proceso. Así, los procesos que exigen resistencia a la corrosión por gases o líquidos exigen porosidad baja y elevada resistencia física y a la abrasión. Cuando la condición limitante es la baja conductividad térmica, hay que recurrir a refractarios totalmente distintos. En realidad, suelen emplearse combinaciones de varios. No hay ninguna línea de demarcación clara entre materiales refractarios y no refractarios, aunque se ha mencionado la capacidad para soportar temperaturas superiores a 1.100 °C sin reblandecerse como requisito práctico de los materiales refractarios industriales.

Los objetivos técnicos de fabricación de un refractario determinado se encarnan en las propiedades y rendimientos que exigen la aplicación a la que se destina. Los instrumentos de fabricación se eligen entre materias primas y entre métodos y parámetros de procesamiento. Los medios para su fabricación comprenden las materias primas y los parámetros y métodos de fabricación. Los requisitos de fabricación están vinculados con las características de la composición de fase y la microestructura —lo que en conjunto se llama carácter del material—, se desarrollan por medio del tratamiento y son responsables de las propiedades y el comportamiento del producto.

### **Materias primas**

En el pasado, las materias primas refractarias se seleccionaban a partir de diversos depósitos y se utilizaban como minerales extraídos. La extracción selectiva permitía obtener materiales de las propiedades deseadas, y sólo en casos de materias primas costosas, como la magnesita, se requerían procesos de enrique-

cimiento del mineral. En la actualidad, sin embargo, las materias primas naturales de gran pureza tienen una demanda creciente, al igual que los granulados refractarios sintéticos obtenidos a partir de combinaciones de materias primas beneficiadas de gran pureza. El material producido a partir de la cocción de minerales extraídos en bruto o de mezclas sintéticas se denomina granulado, escoria, escoria común o chamota.

En general, los refractarios se clasifican en cuatro tipos: aluminosilicatos, sílices (o ácidos), básicos y varios.

Los materiales generalmente utilizados en los cuatro tipos de refractarios incluyen:

1. *Refractarios de aluminosilicato*: arcillas refractarias compuestas principalmente de caolinita [CAS 1318-74-7] ( $Al_2O_3 \times 2SiO_2 \times 2H_2O$ ) con pequeñas cantidades de otros minerales arcillosos, cuarcita, óxido de hierro, dióxido de titanio e impurezas alcalinas. Las arcillas se usan en bruto o después de calcinación. Las arcillas en bruto se granulan o molturan finamente para incorporarlas a una mezcla refractaria. Con algunos caolines de gran pureza se forma una suspensión acuosa para lavarlos por flotación, y luego se clasifican y secan para obtener un material consistente y de gran calidad. Las arcillas clasificadas también pueden ser mezcladas y extruidas o nodulizadas y luego calcinadas para obtener chamota caolinítica, o triturar groseramente y cocer directamente la caolinita en bruto. Con la calcinación o cocción la caolinita se descompone en mullita y vidrio silíceo que incorpora las impurezas minerales asociadas con el depósito de arcilla (por ejemplo cuarcita, óxido de hierro, dióxido de titanio y álcalis), consolidándose a elevadas temperaturas en una chamota densa, dura y muy granulada.
2. *Refractarios de sílice o ácidos*: emplean principalmente sílice en forma de cuarcita (arena refractaria) (92 % a 98 %) triturada y molturada, y cal como aglomerante (CaO). Los ladrillos de sílice suelen cocerse dos veces, pues se expanden con el calor (contracción de los ladrillos de arcilla refractaria) y, por tanto, es preferible que hayan completado su expansión antes de colocarlos en las paredes o recubrimientos.
3. *Refractarios básicos*: usan dolomita, magnesita (MgO), óxido de cobre, hierro o aluminio.
4. *Refractarios varios*: de la gran variedad de materiales que se emplean en la actualidad, los más comunes son los carburos, como carburo de silicio, grafito, alúmina, berilio, torio, óxido de uranio, amianto y óxido de zirconio.

En la industria se han producido varias revoluciones, de las que forman parte los nuevos métodos mecanizados de manipulación de grandes cantidades de sólidos, la mayor capacidad y la automatización del equipo de procesamiento y las técnicas de adquisición y análisis rápidos de los datos necesarios para controlar los procesos internos. Estos avances han transformado la práctica de fabricación de refractarios.

La Figura 84.19 ilustra la fabricación de las diferentes clases de refractarios. Adopta el estilo de "árbol de decisiones", con las ramas divergentes provistas de números de identificación. Hay varios caminos, que muestran, cada uno de ellos, un tipo particular de producto refractario.

Estos diagramas de flujo genéricos representan miles de procesos específicos y diferenciados, por ejemplo, por las materias primas, la forma de preparación y la clasificación por tamaño y determinación de las partidas (es decir, cantidad pesada) de cada una, la secuencia y forma de mezclado, etc. Se permiten exclusiones; así, algunos refractarios sin conformar se mezclan en seco y no se mojan hasta la instalación.

Los refractarios y sus productos se presentan a veces prefabricados (moldeados) o se forman e instalan "in situ", aunque en general se suministran en las siguientes formas:

*Ladrillo*: las dimensiones estándar de un ladrillo refractario son 23 cm de longitud por 11,4 cm de anchura y 6,4 cm de espesor (ladrillo recto). Se fabrican por extrusión o prensado en seco en prensas mecánicas o hidráulicas. Las piezas formadas se cuecen antes de usarlas o aglomerarse y endurecerse con alquitrán, resina u otros compuestos químicos.

*Moldeado por colado*: mediante el arco eléctrico se funden mezclas refractarias que se moldean por colado en distintas formas (por ejemplo, bloques para tanques de vidrio que alcanzan dimensiones de hasta 0,33 x 0,66 x 1,33 m). Después del moldeado y el recocido, los bloques se rectifican cuidadosamente con una muela para asegurar un encaje preciso.

*Refractarios colados y moldeados a mano*: las formas grandes, como quemadores y bloques de cuba, o complicadas, como las piezas de los alimentadores de vidrio, gacetas y similares, se producen por colado de una barbotina de cemento hidráulico o por moldeado a mano. Debido a que estas técnicas son muy laboriosas, se reservan para aquellos artículos que no pueden elaborarse de otro modo.

*Refractarios aislantes*: los refractarios aislantes en forma de ladrillo son mucho más ligeros que los ladrillos convencionales de la misma composición debido a su porosidad.

*Moldeables y mezclas aplicables a pistola*: están compuestos de granulados refractarios a los que se añade un fijador hidráulico que al mezclarlo con agua reacciona y aglutina toda la masa. Estas mezclas están diseñadas para ser aplicadas con una pistola dotada de una boquilla a través de la cual se pulverizan con aire a presión. La mezcla se diluye en agua antes de aplicarla con la pistola o en la propia boquilla.

*Refractarios plásticos y mezclas apisonadas*: los refractarios plásticos son mezclas de granulados refractarios y arcillas plásticas o plastificantes con agua. Hay mezclas para apisonar con y sin arcilla y suelen utilizarse con un encofrado. La proporción de agua usada con estos productos varía, pero se procura que sea mínima.

### Riesgos profesionales y precauciones

La Tabla 84.5 brinda información sobre muchos de los riesgos potenciales que se presentan en este sector industrial.

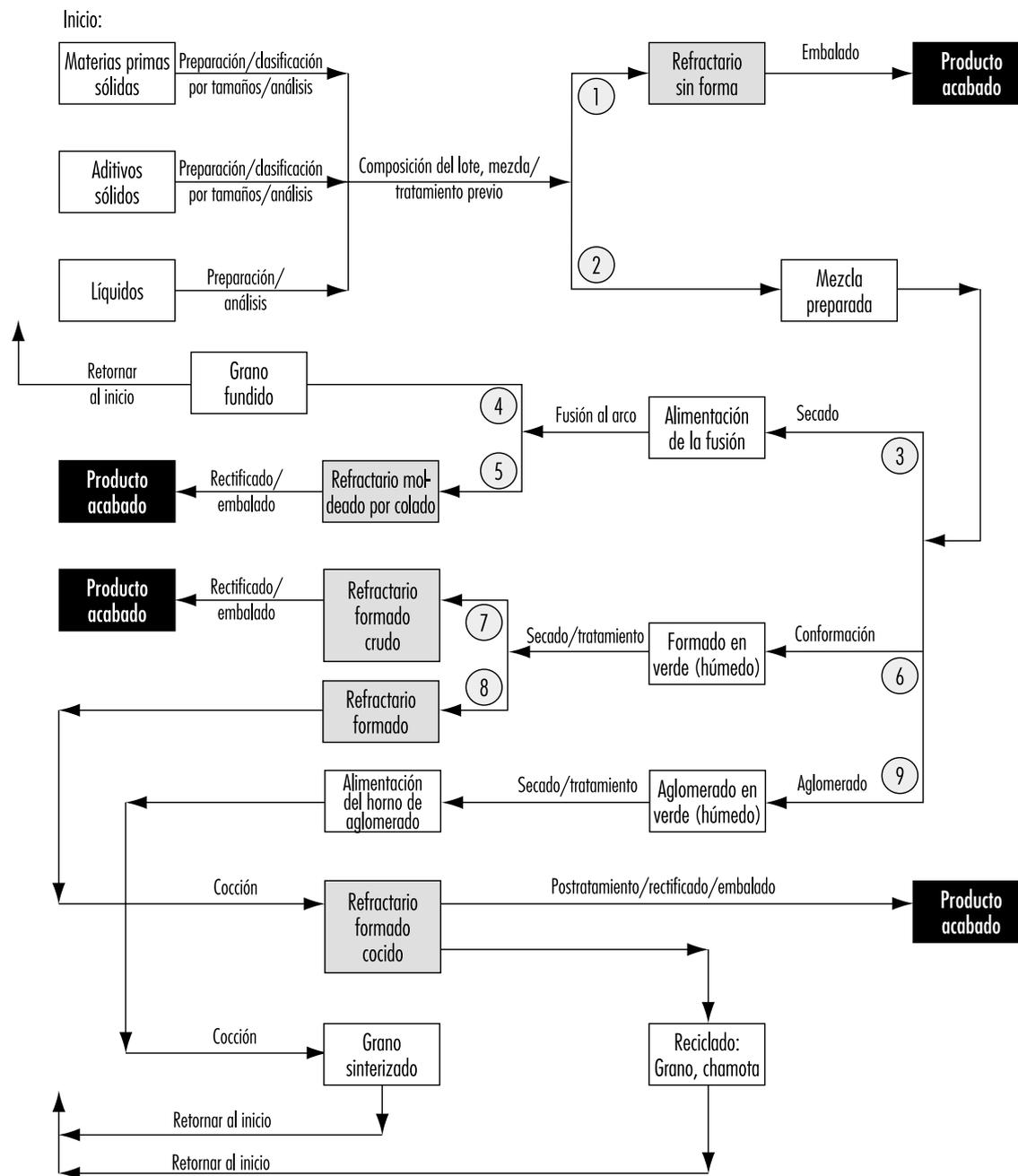
### Normas de seguridad, problemas de salud y enfermedades

Este apartado presenta una perspectiva general de los problemas de seguridad y salud de este sector industrial, documentados o potenciales. No se ha localizado información internacional sobre lesiones y enfermedades en este sector industrial ni en la bibliografía ni en Internet (en 1997). Se ha utilizado información compilada por el Departamento de Trabajo de Estados Unidos, la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) y la Oficina de Estadísticas Laborales (BLS) para identificar riesgos comunes en el lugar de trabajo y describir las características de las lesiones y enfermedades. Esta información debería ser representativa de la situación en todo el mundo.

### Riesgos detectados durante las inspecciones

Las inspecciones reglamentarias de empresas fabricantes de productos de piedra, arcilla, vidrio y hormigón (Código 32 de la Clasificación industrial (SIC), equivalente al Código 36 ISIC) revelan algunos de los riesgos comunes en este sector. Las citas sobre cumplimiento de los reglamentos emitidas por la OSHA indican que las preocupaciones comunes en materia de salud y seguridad pueden agruparse de la manera siguiente:

Figura 84.19 • Diagrama de flujo general de la fabricación de refractarios.



Fuente: Carniglia y Barria 1992.

- *comunicación de riesgos* físicos y sanitarios debidos a las sustancias químicas utilizadas en el lugar de trabajo;
- *control de fuentes de energía peligrosas*: procedimientos de bloqueo e identificación mediante carteles situados en torno a la maquinaria o equipo donde una inesperada puesta en marcha o liberación de energía acumulada pudiera causar lesiones. Son peligrosas las energías eléctrica, mecánica, hidráulica, neumática, química, térmica radiante y otras fuentes;
- *seguridad eléctrica*, que abarca el equipo o el diseño de sistemas eléctricos, métodos de cableado y prácticas y formación en materia de seguridad en el trabajo;
- *exigencia de autorización para entrar en espacios restringidos*: identificación, evaluación y protocolos de acceso seguros;
- *equipo protector individual*: valoración, selección y uso de protectores para ojos, cara, manos, pies y cabeza;
- *máquinas, equipo y herramientas de protección* para proteger a los operadores y trabajadores cercanos de los riesgos en el punto de operación, puntos de pinzamiento, piezas giratorias, astillas o chispas: estas medidas afectan a la maquinaria fija y móvil, a las herramientas mecánicas portátiles y al ajuste de protectores y apoyos en máquinas con muelas abrasivas (amoladoras) (véase la Figura 84.20);

Tabla 84.5 • Riesgos para la salud y la seguridad que pueden presentarse durante la fabricación de materiales de vidrio, cerámica y afines.

Riesgos	Usos o fuentes de exposición a los riesgos	Efectos potenciales (riesgos físicos o efectos sobre la salud)	Precauciones o estrategias de control
Generadores de tensión ergonómicos; riesgos biomecánicos	Esfuerzo excesivo debido a prácticas de manipulación de material, mala postura, tareas de frecuencia o duración elevadas que exigen levantar, empujar o arrastrar	Distensiones, esguinces y tirones en la musculatura que afectan a la espalda y a las extremidades superiores e inferiores. El cansancio físico y mental excesivo puede hacer cometer errores que conducen a incidentes secundarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluación de las exigencias físicas de tareas que pueden requerir demasiado esfuerzo</li> <li>Diseño y estructura del puesto de trabajo</li> <li>Uso de dispositivos de manipulación de materiales, como montacargas o vehículos motorizados</li> <li>Automatización o semiautomatización de los procesos</li> <li>Formación sobre técnicas y prácticas adecuadas</li> </ul>
Riesgos físicos	Quedar atrapado por o golpearse contra instalaciones fijas o móviles Resbalones, tropiezos y caídas sobre superficies de circulación y de trabajo, mangueras y otros accesorios, herramientas o materiales	Abrasiones, cortes, contusiones, laceraciones, incisiones, fracturas, amputaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>Procedimientos de trabajo seguros</li> <li>Buenas prácticas de mantenimiento</li> <li>Diseño y disposición de equipos</li> <li>Diseño y estructura del puesto de trabajo</li> <li>Equipo de manipulación de material</li> <li>Superficies antideslizantes</li> </ul>
Calor radiante, ambientes de trabajo a temperatura elevada	Procesos de calentamiento o fusión durante el mantenimiento o las actividades de respuesta de una emergencia	Tensión fisiológica, golpe de calor o quemaduras por calor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protección, pantallas, tabiques, superficies reflectantes, aislamiento</li> <li>Cubierta de los equipos refrigerada por agua</li> <li>Cámaras o salas de control con aire acondicionado</li> <li>Ropa y guantes que protejan del calor y prendas interiores refrigeradas por agua</li> <li>Aclimatización a los entornos de trabajo muy calurosos, ingestión de agua y electrolitos, regímenes de descanso controlados</li> </ul>
Inhalación de partículas de material en suspensión en el aire procedentes de las materias primas, incluidos la sílice cristalina, arcilla, cal, óxido de hierro y polvos nocivos	Manipulación de las materias primas y producción Exposiciones durante las actividades de mantenimiento de rutina, en trabajos de demolición y en actividades de construcción o reconstrucciones Las exposiciones pueden producirse como consecuencia de equipos no ventilados o de filtraciones o sellados deficientes en puntos de transmisión, tolvas, cintas transportadoras, montacargas, pantallas, tamicos, máquinas mezcladoras, molinos o trituradores, recipientes de almacenamiento, válvulas, tuberías, hornos de secado o curado, operaciones de moldeado, etc. Las materias primas son sumamente abrasivas y deterioran los componentes de los sistemas de transporte y almacenamiento en los procesos de fabricación. El fallo en el mantenimiento de las instalaciones de filtrado, depuradores o colectores de polvo y en el uso de aire comprimido para actividades de limpieza aumenta el riesgo de exposición excesiva. Las operaciones de calentamiento intenso pueden conducir a exposiciones a las formas más peligrosas de sílice (cristobalita o tridimita)	Van desde la irritación (partículas nocivas) hasta las quemaduras químicas (cal calcinada u otras materias primas alcalinas) o los efectos crónicos, como insuficiencia o enfermedades pulmonares, silicosis o tuberculosis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aspiración de los gases de escape de los procesos y locales con instalaciones de filtración, depuradores u otros colectores de polvo</li> <li>Buen diseño y mantenimiento de la manipulación de materiales, del proceso de fabricación y de la maquinaria de traslado y descarga</li> <li>Manipulación del material, prácticas de trabajo y reducción y eliminación de residuos adecuados</li> <li>Aislamiento de los operarios en salas o cabinas de control presurizadas y automatización del traslado del material para reducir al mínimo el tiempo de permanencia en las zonas de polvo</li> <li>Protección respiratoria, ropa, guantes y otros equipos de protección individual (EPI)</li> <li>Detección y reparación activa de escapes, mantenimiento predictivo y preventivo de la maquinaria, incluidos los colectores de polvo y las válvulas</li> <li>Prácticas de limpieza sistemáticas mediante aspiración o en húmedo</li> <li>Prohibición de la limpieza con aire comprimido</li> <li>Exámenes y reconocimientos médicos periódicos, vigilancia e intervención rápida basada en la exposición</li> </ul>

Continúa en la página siguiente.

Tabla 84.5 • Riesgos para la salud y la seguridad que pueden presentarse durante la fabricación de materiales de vidrio, cerámica y afines.

Continuación.

Riesgos	Usos o fuentes de exposición a los riesgos	Efectos potenciales (riesgos físicos o efectos sobre la salud)	Precauciones o estrategias de control
Laceraciones, abrasiones o cuerpos extraños; contacto con fragmentos u objetos de vidrio o cerámica cortantes	<p>Los trozos de vidrio, cerámica u otros fragmentos proyectados por el aire pueden provocar heridas incisas y lesiones oculares grandes. Se presenta un riesgo especial cuando el vidrio templado "explota" durante la fabricación.</p> <p>El contacto directo con filamentos de vidrio u otros, especialmente durante la elaboración en caliente o el arrollamiento en las operaciones de producción y revestimiento de filamento continuo</p> <p>Operaciones de estirado en la fabricación de fibra óptica</p>	<p>Heridas incisas, laceraciones o abrasión de la piel o de los tejidos blandos (tendones, ligamentos, nervios, músculos), y cuerpos extraños en los ojos</p> <p>Riesgo de infección secundaria grave y de exposición dérmica a materiales corrosivos o tóxicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de guantes protectores resistentes a los cortes</li> <li>• Guantes de alambre trenzado, malla metálica u otro material adecuado para la manipulación de vidrio plano</li> <li>• La mecanización y la automatización reducen los riesgos en la producción y manipulación de vidrio plano. El riesgo se transmite a los operarios de mantenimiento</li> <li>• Establecer prácticas de trabajo para una manipulación segura</li> <li>• Primeros auxilios para prevenir infecciones</li> </ul>
Laceraciones por herramientas manuales	Cuchillas para desbarbar, uñeras, cuchillas para escoria de vidrio y otras herramientas manuales cortantes se usan con frecuencia en las zonas de producción, embalaje y almacenamiento o durante las operaciones de mantenimiento	Cortes en las manos o dedos de las manos y en las extremidades inferiores (piernas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuchillas de hoja retráctil</li> <li>• Sustitución de otras herramientas (cizallas o tijeras)</li> <li>• Vainas o fundas</li> <li>• Rutina de sustitución y afilado de cuchillas</li> <li>• Primeros auxilios para prevenir infecciones</li> </ul>
Partículas de metales pesados o vapores (plomo, cadmio, cromo, arsénico, cobre, níquel, cobalto, manganeso o estaño)	<p>Como materias primas o impurezas en esmaltes, fórmulas de productos, pigmentos, agentes colorantes, películas o revestimientos</p> <p>Actividades de mantenimiento y construcción que incluyen soldadura, corte, soldadura autógena y aplicación/eliminación de revestimientos protectores</p> <p>Esmerilado, corte, soldadura autógena, perforación o perfilado de piezas metálicas fabricadas, partes estructurales o maquinaria (por ejemplo, bloques refractarios o aleaciones a temperatura elevada) que forman parte de procesos de fabricación</p>	Toxicidad de metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controles técnicos, entre ellos aspiración en locales y aislamiento de máquinas y procesos</li> <li>• Herramientas eléctricas móviles con ventilación HEPA</li> <li>• Uso de cabinas ventiladas para actividades de aplicación de pinturas o revestimientos con aerosol</li> <li>• Prácticas de trabajo apropiadas para reducir las partículas en suspensión en el aire, incluyendo métodos de humidificación</li> <li>• Prácticas de limpieza, aspiración HEPA, limpieza con agua, limpieza por chorro de agua</li> <li>• Higiene personal, lavado por separado de la ropa de trabajo contaminada</li> <li>• Protección respiratoria y ropa protectora</li> <li>• Reconocimiento médico y control biológico</li> </ul>
Formaldehído por inhalación o contacto directo	<p>Componentes de aglomerantes y aprestos en la industria de la fibra de vidrio</p> <p>Exposiciones potenciales durante el mezclado de aglomerantes o aprestos y durante la producción</p>	<p>Irritación sensorial y de las vías respiratorias</p> <p>Probable agente cancerígeno humano</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspiración de vapores y ventilación general</li> <li>• Difusión y mezcla automatizadas</li> <li>• Mantenimiento de hornos de curado, pantallas o filtros, y dinámica de la combustión</li> <li>• Detección activa de escapes y programa de control de los hornos de curado</li> <li>• Máscara con protección visual, guantes y ropa protectora frente al contacto directo con sustancias químicas</li> <li>• Protección respiratoria cuando sea necesaria</li> </ul>
Bases (hidróxido sodico) y ácidos (clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico)	<p>Tratamiento de las aguas de proceso de caldera y residuales y control del pH</p> <p>Procesos de limpieza o de grabado (corrosión) al ácido con ácido fluorhídrico</p>	<p>Corrosivo para la piel o los ojos</p> <p>Irritante de las vías respiratorias y de las mucosas</p> <p>El ácido fluorhídrico provoca graves quemaduras en las espinillas, que pueden tardar horas en detectarse</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento del proceso</li> <li>• Prácticas de manipulación seguras</li> <li>• Uso de EPI: protección respiratoria, guantes de goma, máscara con protección visual, delantal de goma, ropa protectora, baño ocular/ducha de seguridad</li> <li>• Aspiración de los humos para controlar los vapores o aerosoles ácidos</li> </ul>

Continúa en la página siguiente.

Tabla 84.5 • Riesgos para la salud y la seguridad que pueden presentarse durante la fabricación de materiales de vidrio, cerámica y afines.

Continuación.

Riesgos	Usos o fuentes de exposición a los riesgos	Efectos potenciales (riesgos físicos o efectos sobre la salud)	Precauciones o estrategias de control
Epóxidos, acrilatos y uretanos (pueden contener disolventes como xileno, tolueno, etc.)	Ingredientes de las resinas, aprestos, aglomerantes y revestimientos utilizados en la producción Productos de mantenimiento	Sensibilizadores potenciales de la piel o de las vías respiratorias Algunos epóxidos contienen epiclorhidrina sin reaccionar, un posible agente cancerígeno Algunos uretanos contienen diisocianato tolueno sin reaccionar, un posible agente cancerígeno Las aminas usadas en algunos métodos de fraguado son irritantes o corrosivas Riesgo de deflagración	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prácticas de manipulación seguras</li> <li>Evitar las aplicaciones con aerosol (aplicar con rodillo o pincel)</li> <li>Ventilación</li> <li>Exámenes médicos de los usuarios para evitar la exposición a trabajadores sensibilizados</li> <li>Uso de EPP: guantes impermeables, mangas largas</li> <li>Cremas protectoras</li> <li>Almacenamiento adecuado</li> </ul>
Estireno	Resinas de poliéster que contienen estireno, ingrediente de los aprestos	Irritante para ojos, piel, vías respiratorias; efectos sobre el sistema nervioso central (SNC) y órganos sensibles Posible agente cancerígeno Riesgo de deflagración	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prácticas de manipulación seguras</li> <li>Evitar aplicaciones con aerosol (aplicación con rodillo o pincel)</li> <li>Ventilación</li> <li>Uso de EPP: guantes resistentes a productos químicos, mangas largas, cremas protectoras</li> <li>Respiradores en algunos casos</li> </ul>
Silanos	Activadores de la adhesión añadidos a los aprestos, aglomerantes o revestimientos. Pueden hidrolizarse con liberación de etanol, metanol, butanol u otros alcoholes	Irritante para los ojos, la piel y las vías respiratorias; efectos potenciales sobre el SNC. Las salpicaduras en los ojos pueden causar lesiones permanentes Riesgo de deflagración	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prácticas de manipulación seguras</li> <li>EPP: guantes y protección visual</li> <li>Ventilación</li> </ul>
Látex	Zonas de mezcla de aprestos o aglomerantes, revestimientos y algunos productos de mantenimiento	Irritante para la piel y los ojos. Algunos pueden contener formaldehído u otros biocidas y/o disolventes	<ul style="list-style-type: none"> <li>EPP: guantes, protección visual</li> <li>Respiradores en algunos casos</li> </ul>
Catalizadores y aceleradores	Sustancias agregadas a resinas o aglomerantes para inducir el fraguado durante la producción o a ciertos productos de mantenimiento	Irritantes o corrosivos para la piel o los ojos. Algunos son muy reactivos y sensibles a la temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prácticas de manipulación seguras</li> <li>EPP, guantes, protección visual</li> <li>Almacenamiento adecuado (temperatura y aislamiento)</li> </ul>
Disolventes hidrocarbonados o clorados	Talleres de mantenimiento y operaciones de limpieza de piezas	Varios: irritación, dermatitis química, efectos sobre el SNC. Los disolventes no clorados pueden ser inflamables Los clorados pueden descomponerse si se queman o se calientan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sustitución por agentes de limpieza menos peligrosos (detergentes de base acuosa)</li> <li>Cambio de métodos de limpieza: limpieza con agua a presión, baños de eliminación de recubrimientos, etc.</li> <li>Ventilación de las instalaciones de lavado de piezas</li> <li>Uso de EPP: guantes, protección visual/facial, respiradores cuando sea necesario</li> </ul>
Propano, gas natural, gasolina, gasóleo	Combustibles para procesos de producción con calor Combustibles para carretillas industriales motorizadas	Riesgo de incendio y explosión Exposición a monóxido de carbono u otros productos de la combustión incompleta	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño adecuado e inspecciones de las operaciones de almacenamiento y distribución y controles de los procesos de combustión</li> <li>Revisiones del análisis de los procesos peligrosos y ensayos de integridad periódicos</li> <li>Prácticas seguras de descarga, llenado y manipulación</li> <li>Métodos de trabajo en zonas calientes</li> <li>Ensayos sistemáticos y procesos del control de la combustión y salida de los gases de combustión</li> </ul>

Continúa en la página siguiente.

Tabla 84.5 • Riesgos para la salud y la seguridad que pueden presentarse durante la fabricación de materiales de vidrio, cerámica y afines.

Continuación.

Riesgos	Usos o fuentes de exposición a los riesgos	Efectos potenciales (riesgos físicos o efectos sobre la salud)	Precauciones o estrategias de control
Inhalación de bioaerosoles	Aerosoles que contienen bacterias, mohos u hongos procedentes del tratamiento con aerosoles o el agua de refrigeración o humidificación, torres de refrigeración, sistemas de ventilación, limpieza con agua	Enfermedades transmitidas con el agua, con síntomas sistémicos inespecíficos parecidos a los de la gripe, cansancio Riesgo de dermatitis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño del proceso y reducción de neblinas</li> <li>• Tratamiento con funguicidas y bactericidas del agua de fabricación y refrigeración</li> <li>• Limpieza y desinfección sistemáticas</li> <li>• Eliminación o reducción de nutrientes en el sistema de distribución de agua</li> <li>• Protección respiratoria</li> <li>• Ropa de protección personal</li> </ul>
Fibra de vidrio, fibra de lana mineral, fibras cerámicas refractarias	En los procesos de producción: elaboración de la fibra, curado por calor, corte o cubicación, arrollamiento, embalaje y construcción Utilización de materiales de fibra de vidrio en hornos, conductos y maquinaria de proceso	Las fibras no inhalables pueden provocar irritación mecánica de la piel o los ojos Las inhalables pueden provocar irritación de los ojos, la piel y las vías respiratorias. Las fibras duraderas han provocado fibrosis y tumores en estudios realizados con animales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventilación general y aspiración local en la maquinaria de fabricación</li> <li>• Métodos de corte</li> <li>• Prácticas de limpieza adecuadas (con aire aspirado en lugar de comprimido)</li> <li>• Ropa de protección personal (mangas largas) y lavado frecuente</li> <li>• Higiene personal</li> <li>• Respiradores cuando es necesario</li> <li>• Prácticas de demolición y eliminación con humidificación para la extracción posterior</li> </ul>

- *protección respiratoria*: selección, uso, mantenimiento, entrenamiento, autorización médica y ensayo de ajuste de los respiradores;

Figura 84.20 • Los dispositivos de protección de la maquinaria evitan que los operarios sufran accidentes por contacto con ejes giratorios, correas y cadenas de transmisión.



Owens Corning

- *exposición profesional al ruido*: control de exposiciones mediante protección técnica, administrativa o auditiva y puesta en práctica de programas de conservación auditiva;
- *prevención de incendios y preparación y respuesta de emergencia*: extintores, salidas de emergencia, planos y almacenamiento o uso de materiales inflamables y combustibles;
- *superficies de circulación y de trabajo*: orificios y aberturas en suelos y tabiques de protección; mantenimiento de instalaciones; y pasillos y zonas de paso para que no presenten riesgo de resbalones, tropiezos o caídas (véase la Figura 84.21);
- *vehículos industriales motorizados*: diseño, mantenimiento, uso y otras exigencias de seguridad para carretillas elevadoras, carretillas de plataforma, tractores, carretillas manuales motorizadas u otros vehículos industriales especializados propulsados por motores eléctricos o de combustión interna;
- *escaleras, escalinatas y andamios fijos y móviles*: diseño, inspección o mantenimiento y uso seguro;
- *protección de caídas*: uso de equipo que impida o detenga las caídas cuando se trabaja a cierta altura;
- *corte y soldadura*: procedimientos y uso seguro de equipos de corte o soldadura por oxígeno/acetileno, gas o arco;
- *equipo de manipulación de materiales*: grúas elevadas y de pórtico, montacargas, cadenas y eslingas, y
- *control de exposición a sustancias tóxicas o peligrosas*: contaminantes en suspensión en el aire o sustancias químicas específicamente reguladas (por ejemplo, sílice, plomo, asbesto, formaldehído, cadmio o arsénico).

### Perfil de las lesiones y enfermedades

#### **Tasas de incidencia de las lesiones y enfermedades**

De acuerdo con los datos del Departamento de Trabajo de Estados Unidos, los fabricantes de productos de piedra, arcilla y vidrio (SIC 32) tienen una tasa total de incidencia "registrable"

### Piedras preciosas sintéticas

Las piedras preciosas sintéticas son química y estructuralmente idénticas a las naturales. Las piedras de imitación, por el contrario, se han sometido a un tratamiento que las hace semejantes a otras naturales. Unos pocos tratamientos básicos producen diversas piedras preciosas. Se fabrican granates, espinelas, esmeraldas, zafiros y diamantes sintéticos. Casi todas estas piedras se usan en joyería, aunque los diamantes también se emplean como abrasivos, y los rubíes y granates en la construcción de láseres.

La primera piedra preciosa sintética usada en joyería fue la esmeralda. El método de fabricación está registrado y es secreto, pero probablemente se basa en el crecimiento en estado fluido; esta técnica consiste en fundir conjuntamente silicatos de alúmina y berilio con aportes de cromo para dar color. Las esmeraldas cristalizan a partir de la masa fundida, y el proceso puede durar hasta un año.

El proceso Verneuil o de fusión a la llama se usa en la producción de zafiros y rubíes. Consume grandes cantidades de oxígeno e hidrógeno y, por tanto, de energía. Se basa en el calentamiento de un germen de cristalización con llama oxhídrica hasta licuar la superficie seguido de aportación cuidadosa de materia prima en polvo ( $Al_2O_3$  para producir zafiros, por ejemplo). A medida que se funde la materia prima, se aleja de la llama para que solidifique la zona más alejada del calor y se mantenga en estado líquido y dispuesta para recibir más materia prima la más cercana a la llama. El producto final es un cristal en forma de varilla. Los colores se forman añadiendo a la materia prima pequeñas cantidades de distintos iones. El rubí se crea reemplazando el 0,1 % de los iones de aluminio por átomos de cromo.

La espinela, una piedra preciosa sintética incolora ( $MgAl_2O_4$ ), se obtiene también por el método Verneuil. Junto con el zafiro, en la industria se emplea la espinela para elaborar piedras de una gama de colores muy amplia que se usan como "piedra natal" y en anillos de graduación. Los mismos iones metálicos producen colores distintos en la espinela y el zafiro.

Los diamantes sintéticos se utilizan en aplicaciones industriales que exigen dureza, como corte, pulido, molturación y perforación. Son usos comunes el corte y amolado del granito para elaborar

materiales de construcción, la perforación de pozos y el afilado de aleaciones no ferrosas. Además están desarrollándose técnicas de deposición de diamante sobre superficies para hacerlas transparentes, duras y resistentes a los arañazos.

Los diamantes se forman sometiendo carbono elemental o grafito a presión y temperatura elevadas durante mucho tiempo. La técnica industrial consiste en combinar grafito con catalizadores metálicos y en prensar el conjunto a temperatura elevada (más de 1.500 °C). El tamaño y la calidad de los diamantes se controlan ajustando el tiempo, la presión y la temperatura. Para alcanzar en un tiempo razonable las elevadas presiones necesarias para formar los diamantes se emplean grandes moldes de carburo de tungsteno. Estos moldes, de forma parecida a una rosquilla gigante, miden más de 2 m de ancho y 20 cm de espesor. La mezcla de grafito y catalizador se coloca en una empaquetadura cerámica, donde es comprimida desde arriba y desde abajo con pistones cónicos. Transcurrido el tiempo especificado, se saca de la prensa la empaquetadura que contiene los diamantes, se rompe y se somete el grafito portador de las gemas a una serie de agentes que destruyen todo el material que no sea diamante. Los reactivos empleados son energéticos y constituyen una fuente potencial de quemaduras graves y lesiones respiratorias.

Esta misma técnica sirve para fabricar diamantes con calidad de joyería, pero el tiempo de prensado necesario para lograr este efecto la hace prohibitivamente cara.

Los riesgos derivados de la fabricación de diamantes comprenden la exposición potencial a grandes cantidades de agentes ácidos y cáusticos sumamente activos, ruidos, polvo de la formación y rotura de la empaquetadura cerámica y exposición al polvo metálico. Otro riesgo potencial es la rotura de los enormes moldes de carburo. Después de un número variable de usos, los moldes se rompen y pueden causar lesiones si no están aislados. La clasificación y el calibrado de los diamantes fabricados plantea problemas ergonómicos, pues su pequeño tamaño convierte el trabajo en tedioso y repetitivo.

**Basil Dolphin**

de lesiones y enfermedades profesionales no mortales de 13,2 casos por 100 trabajadores a jornada completa al año. Este valor es más elevado que los correspondientes al conjunto del sector manufacturero (12,2) y a toda la industria privada (8,4). Aproximadamente el 51 % de los casos de "lesiones registrables" en el sector de fabricación de productos de piedra, arcilla y vidrio no se traducen en pérdida de días de trabajo (tiempo fuera del trabajo).

Las tasas de incidencia de los "casos de pérdida total de días de trabajo" basadas en el número de lesiones o enfermedades incapacitantes que se traducen en días de trabajo perdidos por uno de cada 100 trabajadores a jornada completa también se han obtenido a partir de los datos del Departamento de Trabajo de Estados Unidos. La tasa de incidencia total de días de trabajo perdidos incluye los casos en que se pierden días de trabajo y el trabajador no está en condiciones de desempeñar el trabajo en su totalidad (tarea restringida o liviana). Los fabricantes de productos de piedra, arcilla y vidrio tienen una tasa de incidencia total de pérdida de días de trabajo de 6,5 casos por 100 trabajadores por año. Esta tasa es más elevada que las correspondientes al conjunto de la producción manufacturera (5,5) y al conjunto de la industria privada (3,8). Aproximadamente el 93 % de los casos de días de trabajo perdidos en el sector de

fabricación de productos de piedra, arcilla y vidrio son consecuencia de lesiones, no de enfermedades profesionales.

La Tabla 84.6 proporciona información más detallada sobre tasas de incidencia de lesiones y enfermedades (combinadas) o lesiones (solamente) para diversos procesos de fabricación dentro del sector de fabricación de productos de piedra, arcilla y vidrio (Código SIC 32). Las tasas de incidencia y los datos demográficos pueden no ser representativos de la información global, pero es la información más completa de que se dispone.

#### **Datos demográficos de los casos de lesiones y enfermedades**

Los trabajadores de 25 a 44 años representan aproximadamente el 59 % de los 23.203 casos de tiempo perdido por lesiones o enfermedades en el sector de fabricación de productos de piedra, arcilla y vidrio de Estados Unidos. El siguiente grupo más afectado es el de los trabajadores de 45 a 54 años, que suponen el 18 % de los casos de tiempo perdido por lesiones o enfermedades (véase la Figura 84.22).

Aproximadamente el 85 % de los casos de tiempo perdido por lesiones y enfermedades en el Código SIC 32 son varones. En el 24 % de los casos de tiempo perdido (ambos sexos), los trabajadores tienen menos de 1 año de servicio en el puesto de trabajo.

Figura 84.21 • Las superficies de paso y de trabajo deben estar libres de riesgos de tropezos y resbalones.



Owens Corning

Los trabajadores con 1 a 5 años de servicio en el empleo representan el 32 % de los casos. Los empleados con experiencia que llevan más de 5 años de servicio suponen el 35 % de los casos de tiempo perdido.

**Naturaleza.** El análisis del perfil de los incidentes de tiempo perdido caracteriza la naturaleza de las lesiones y enfermedades incapacitantes y ayuda a explicar los factores causantes o que contribuyen a ellas. Distensiones y esguinces son las lesiones y patologías dominantes en el sector de fabricación de productos

Figura 84.23 • Naturaleza de los casos de días de trabajo perdidos por lesiones y enfermedades ocupacionales, Estados Unidos, Código SIC 32, 1994.

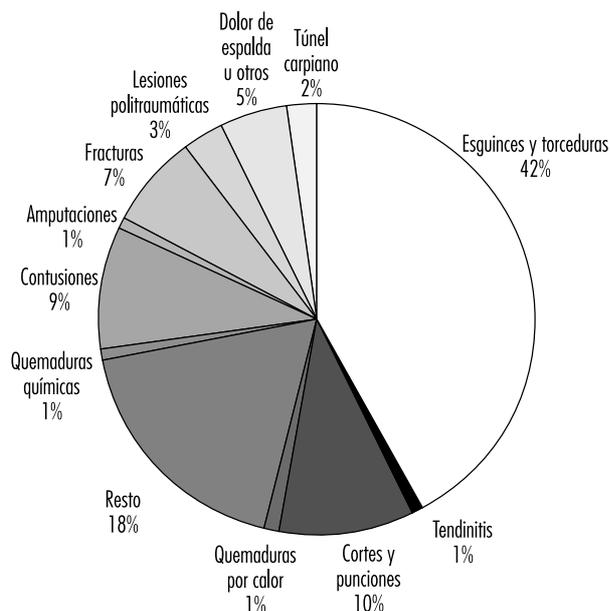
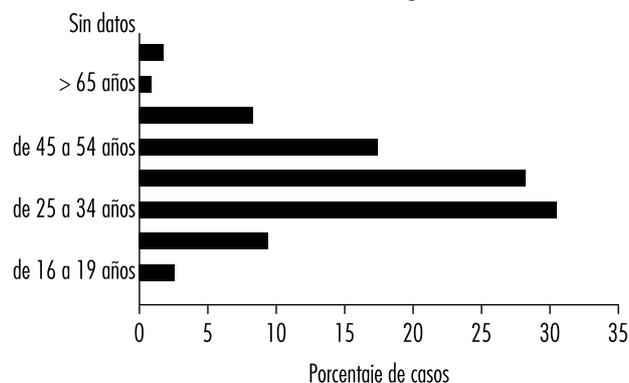


Figura 84.22 • Porcentaje de lesiones y enfermedades con pérdida de tiempo de trabajo, por edades. Estados Unidos, Código SIC 32, 1994.



de piedra, arcilla y vidrio. Como ilustra la Figura 84.23, los esguinces y torceduras constituyen aproximadamente el 42 % de todos los casos de tiempo perdido. Cortes e incisiones (10 %) son el segundo tipo más común de lesiones o patologías incapacitantes. Otras categorías importantes son las contusiones (9 %), las fracturas (7 %) y el dolor de espalda o de otra parte del cuerpo (5 %). Las quemaduras por calor o por sustancias químicas y las amputaciones son más raras (1 % o menos).

**Sucesos o exposiciones.** La Figura 84.24 ilustra que el esfuerzo excesivo al levantar objetos ocupa el primer lugar en la lista de sucesos o exposiciones. El esfuerzo excesivo al levantar objetos es un factor causal en aproximadamente el 17 % de los casos incapacitantes; el movimiento repetitivo es la exposición en otro 5 % de casos de incapacitación. El golpe dado por un objeto es la siguiente causa más común, responsable del 16 % de los casos. El impacto contra un objeto causa el 10 % de los casos. Otras circunstancias importantes son quedar atrapado en un objeto

Figura 84.24 • Circunstancia o exposición en los casos de días de trabajo perdidos por lesiones o enfermedades ocupacionales, Estados Unidos, Código SIC 32, 1995.

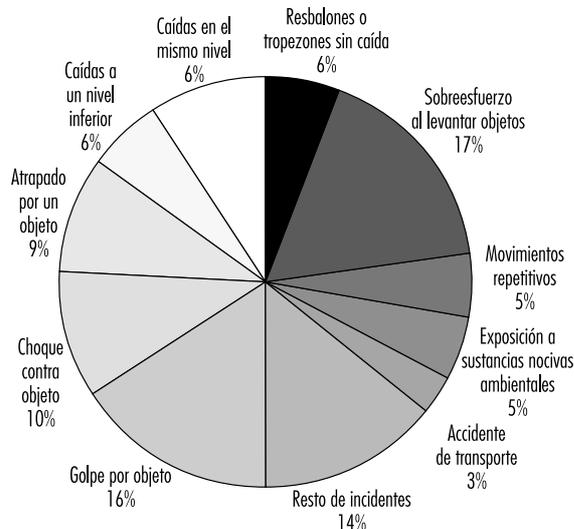


Tabla 84.6 • Tasas de incidencia de las lesiones y enfermedades ocupacionales no mortales por 100 trabajadores a jornada completa para empresas de Estados Unidos en Código SIC 32, industria privada y fabricación, 1994.

Industria	Código SIC <sup>2</sup>	Empleo medio anual <sup>3</sup> (000,s)	Lesiones y enfermedades				Lesiones			
			Casos de días de trabajo perdidos				Casos de días de trabajo perdidos			
			Casos totales	Total <sup>4</sup>	Con días de absentismo laboral	Casos sin días de trabajo perdidos	Casos Totales	Total <sup>5</sup>	Con días de absentismo laboral	Casos sin días de trabajo perdidos
Industria privada		95.449,3	8,4	3,8	2,8	4,6	7,7	3,5	2,6	4,2
Fabricación		18.303,0	12,2	5,5	3,2	6,8	10,4	4,7	2,9	5,7
Productos de piedra, arcilla y vidrio	32	532,5	13,2	6,5	4,3	6,7	12,3	6,1	4,1	6,2
Vidrio plano	321	15	21,3	6,6	3,1	14,7	17,3	5,2	2,6	12,1
Vidrio y vajilla de vidrio, prensada o soplada	322	76,8	12,5	6,0	3,0	6,5	11,3	5,5	2,8	5,8
Envases de vidrio	3221	33,1	14,1	6,9	3,4	7,2	13,2	6,5	3,2	6,7
Vidrio prensado y soplado, ncol	3229	43,7	11,3	5,4	2,8	5,9	9,8	4,8	2,4	5,1
Productos de vidrio comprado	323	60,7	14,1	6,1	3,1	8,0	12,7	5,4	2,9	7,4
Productos arcillosos para la construcción	325	32,4	14,1	7,7	4,2	6,5	13,1	7,2	4,0	5,9
Ladrillo y baldosas para la construcción	3251	-	15,5	8,4	5,1	7,1	14,8	7,9	5,0	6,9
Refractarios arcillosos	3255	-	16	9,3	4,7	6,8	15,6	9,3	4,7	6,4
Productos de alfarería y afines	326	40,8	13,6	6,8	3,8	6,8	12,2	6,1	3,5	6,1
Accesorios sanitarios vitrificados	3261	-	17,8	10,0	3,8	7,8	16,1	9,0	3,5	7,1
Vajilla de mesa y de cocina de porcelana	3262	-	12,8	6,3	4,4	6,5	11,0	5,6	3,8	5,5
Materiales eléctricos de porcelana	3264	-	11,3	5,8	3,7	5,6	9,8	5,0	3,4	4,8
Productos de alfarería, ncol	3269	-	12,6	5,6	3,7	7,1	11,6	5,0	3,5	6,6
Productos de hormigón, yeso y estuco	327	198,3	13,4	7,0	5,6	6,4	13	6,9	5,5	6,2
Adoquin y ladrillo de hormigón	3271	17,1	14,5	7,8	6,8	6,8	14	7,7	6,7	6,2
Productos de hormigón, ncol	3272	65,6	17,7	9,8	7,0	7,9	17,1	9,5	6,8	7,6
Cemento premezclado	3273	98,8	11,6	6	5,3	5,6	11,5	6,0	5,3	5,5
Productos minerales varios no metálicos	329	76,7	10,7	5,4	3,3	5,3	9,8	5,0	3,2	4,9
Productos abrasivos	3291	20	10,2	3,9	2,5	6,3	9,5	3,7	2,4	5,8
Lana mineral	3296	23,4	11,0	6,1	3,0	4,9	10,0	5,6	2,7	4,3
Refractarios no arcillosos	3297	-	10,6	5,8	4,5	4,8	10,2	5,7	4,3	4,6
Productos minerales no metálicos, nec	3299	-	13,1	8,2	5,8	4,9	11,4	7,0	5,5	4,3

ncol = no clasificados en otro lugar. - = no se dispone de datos

<sup>1</sup> Las tasas de incidencia representan el número de lesiones y enfermedades por 100 trabajadores a jornada completa y se calcularon como número de lesiones y enfermedades dividido por horas trabajadas por todos los empleados en las 200.000 horas del año civil (el equivalente base de 100 trabajadores a 40 horas por semana y 52 semanas por año). <sup>2</sup> Manual de Normas de Clasificación Industrial, Edición de 1987.

<sup>3</sup> El empleo se expresa como promedio anual y proviene básicamente del programa de BLS State Current Employment Statistics. <sup>4</sup> Casos totales, incluidos aquellos que implican sólo actividad laboral restringida, además de los casos de días de absentismo laboral con o sin actividad laboral restringida. <sup>5</sup> Casos de días de ausencia laboral, incluidos aquellos que resultan de días de absentismo laboral, con o sin actividad laboral restringida.

Fuente: Basado en el informe nacional de lesiones y enfermedades relacionadas con el trabajo en la industria privada del Departamento de Trabajo, Departamento de Estadística Laboral de EE.UU.

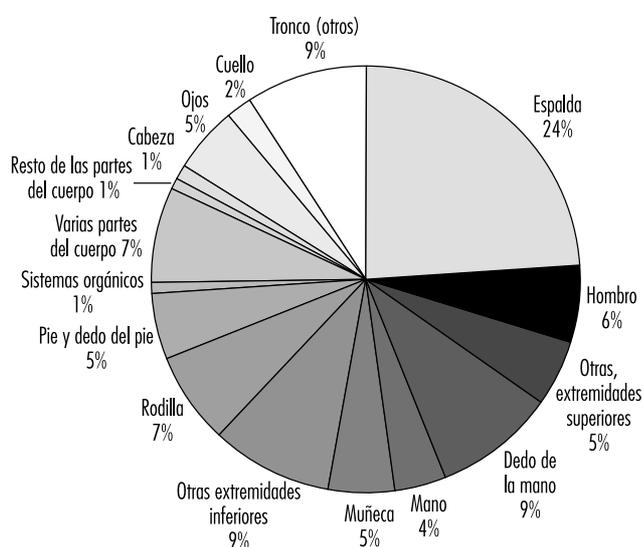
(9 %), las caídas en el mismo nivel (9 %), las caídas a un nivel inferior (6 %) y los deslizamientos sin caída (6 %). La exposición a sustancias o ambientes nocivos es un factor causal en sólo el 5 % de los casos.

*Parte del cuerpo.* La parte del cuerpo más frecuentemente afectada es la espalda (24 % de los casos) (véase la Figura 84.25). Las lesiones interesan las extremidades superiores (dedos, mano,

muñeca y brazo combinados) en el 23 % de los casos, con lesión de los dedos de la mano en el 7 % de los casos. Las lesiones de las extremidades inferiores fueron similares (22 % de los casos), siendo la rodilla la parte afectada en el 9 % de los casos.

*Fuentes.* Las fuentes más comunes de los casos de lesiones o enfermedades incapacitantes son: piezas y materiales (20 %); posición o movimiento del trabajador (16 %); superficies de

Figura 84.25 • Parte del cuerpo afectada en los casos de pérdida de días de trabajo por lesión o enfermedad, Estados Unidos, Código SIC 32, 1994.



suelos, pasarelas o terreno (15 %); contenedores (10 %); maquinaria (9 %); vehículos (9 %); herramientas manuales (4 %); mobiliario y accesorios (2 %); y sustancias y productos químicos (2 %) (véase la Figura 84.26).

### Prevención y control de las enfermedades

Los traumatismos superpuestos asociados con el movimiento repetitivo y el esfuerzo excesivo y prolongado son comunes en este sector industrial. Empiezan a utilizarse equipos robotizados, pero todavía predominan las prácticas manuales. Compresores, ventiladores, extractores, vibradores neumáticos y equipos de embalaje pueden emitir ruidos que superan los 90 a 95 dBA. La protección acústica y un programa de conservación de la capacidad auditiva evitarán alteraciones permanentes de la capacidad auditiva.

Esta industria consume grandes cantidades de sílice cristalina. Deben limitarse las exposiciones durante la manipulación, el mantenimiento y la limpieza. Una buena limpieza con un sistema de aspiración adecuado o con métodos por húmedos reducirá las exposiciones potenciales. Si se han producido exposiciones excesivas a la sílice, deberían realizarse exámenes periódicos con pruebas de funcionalismo pulmonar y radiografías torácicas. También deberían reducirse al mínimo las exposiciones a los metales pesados presentes en las materias primas, esmaltes o pigmentos. El uso de sustitutos de los metales pesados presentes en los esmaltes también eliminará las preocupaciones sanitarias por la lixiviación de estos compuestos hacia alimentos o bebidas. Las buenas prácticas de mantenimiento y el uso de protecciones respiratorias evitan efectos adversos. Puede ser necesario implantar un sistema de vigilancia médica con control biológico.

Los aglutinantes con formaldehído, epóxidos y silanos son de uso común en la fabricación de fibras de vidrio. Deben tomarse medidas para minimizar la irritación cutánea y respiratoria. En muchos países el formaldehído está clasificado como cancerígeno. Se forman fibras respirables durante la producción,

Figura 84.26 • Fuentes de los casos de días de trabajo perdidos por lesiones y enfermedades ocupacionales, Estados Unidos, Código SIC 32, 1994.

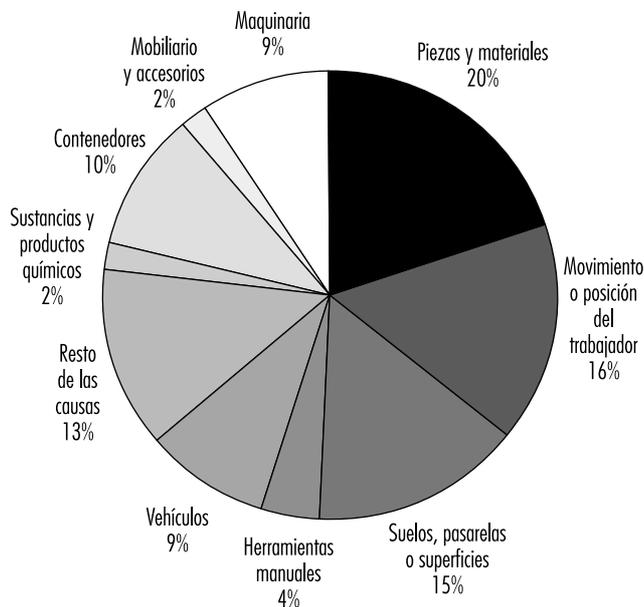


Figura 84.27 • Los aerosoles de agua de condensación reutilizada que no es tratada pueden provocar enfermedades por las materias en suspensión en el agua.



Owens Corning

conformación, corte e instalación de productos de vidrio, piedra, escorias y fibra cerámica refractaria. Aunque la exposición a fibras suspendidas en el aire para muchos de estos materiales ha sido generalmente baja (menos de 1 fibra por centímetro cúbico), en las aplicaciones por soplado tienden a ser mucho mayores.

Piedra, escorias y vidrio figuran entre los aislantes comerciales actuales más estudiados. Investigaciones epidemiológicas han revelado que el consumo de cigarrillos influye mucho en la mortalidad por cáncer de pulmón entre los trabajadores fabriles. Estudios de muestras representativas bien realizados no han revelado que las fibras produzcan exceso de mortalidad o morbilidad de pulmón. Investigaciones recientes de inhalación crónica en ratas han revelado que la durabilidad de las fibras vítreas es un determinante crítico de su potencial biológico. La composición, que determina la durabilidad, es muy variable. Para evitar problemas de salud pública, un Comité Técnico de la Comisión Europea ha propuesto recientemente que se someta a prueba la biopersistencia de las fibras vítreas empleando la inhalación a corto plazo. Como fibra de referencia se ha sugerido una composición de lana aislante, que fue ensayada exhaustivamente a la dosis máxima tolerada en ratas sin que se detectasen enfermedades irreversibles.

### Medio ambiente y problemas de salud pública

El principal contaminante en suspensión en el aire emitido durante la fabricación de vidrio, productos cerámicos, alfarería y ladrillo son las partículas. La tecnología de reducción de emisiones más eficaz conocida consistente en instalar depuradores de filtración y precipitadores electrostáticos en húmedo. Están empezando a estudiarse los contaminantes atmosféricos peligrosos emitidos en operaciones de mezcla, aplicación y fraguado de aglomerantes. Pertenecen a esta clase de sustancias el

estireno, los silanos y los epóxidos utilizados sobre filamento de vidrio continuo, y el formaldehído, el metanol y el fenol empleados durante la fabricación de piedra, escorias o vidrio. El formaldehído es un peligroso contaminante atmosférico y se ha convertido en objeto preferencial de las normas de control en las líneas de producción más modernas. Los metales pesados susceptibles de actuar como contaminantes atmosféricos peligrosos, entre ellos el cromo, determinan las normas de control de los hornos de fundición de vidrio, mientras que el NO<sub>x</sub> y el SO<sub>x</sub> siguen siendo problemas en algunos países. Las emisiones de fluoruros y boro constituyen una preocupación en la producción de filamento de vidrio. El boro puede también convertirse en motivo de inquietud ambiental si en algunos países se exigen fibras de lana de vidrio muy solubles.

Debido al alto volumen de descarga de aire y a la naturaleza de la formación y fusión del vidrio, en este sector se evaporan cantidades considerables de agua. En Estados Unidos, por ejemplo, hay muchas instalaciones que descargan un volumen nulo de agua de condensación. Cuando contiene materia orgánica, este agua reciclada puede provocar riesgos biológicos en el lugar de trabajo si no se instaura un tratamiento que impida la proliferación de organismos (véase la Figura 84.27). Los residuos generados por este sector industrial comprenden metales pesados, productos corrosivos y cierta cantidad de aglomerantes y disolventes perdidos. El sector de la fibra de vidrio se ha convertido en un destino importante para el reciclaje de envases de vidrio y de vidrio plano. Los productos de lana de vidrio actuales contienen entre un 30 % y un 60 % de vidrio reciclado. También se recuperan los refractarios consumidos y se reutilizan de manera provechosa.

*Agradecimientos:* quiero manifestar mi gratitud a Dan Dimas, CSP, Libbey-Owens-Ford, por las fotografías, y a Michel Soubeyrand, Libbey-Owens-Ford, por la información sobre deposición de vapores químicos, descrita en el apartado dedicado al vidrio.

### Referencias

American National Standards Institute (ANSI). 1988. *Ceramic Tile*. ANSI A 137.1-1988. Nueva York: ANSI.

Carniglia y SC Barna. 1992. *Handbook of Industrial Refractories Technology: Principles, Types, Properties and Applications*. Park Ridge, Nueva Jersey: Noyes Publications.

Haber, RA, PA Smith. 1987. *Overview of Traditional Ceramics*. New Brunswick, Nueva Jersey: Ceramic Casting Program, Rutgers, Universidad Estatal de Nueva Jersey.

Persson, HR. 1983. *Glass Technology Manufacturing and Properties*. Seúl: Cheong Moon Gak Publishing Company.

Tooley, FV (dir.). 1974. *The Handbook of Glass Manufacture*. Vols. I y II. Nueva York: Books for Industry, Inc.

### Otras lecturas recomendadas

Kroschwitz, JI, M Howe-Grant (dirs.). 1991. *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4ª ed. Nueva York: Wiley & Sons.

Lowenstein, KL. 1983. *The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibres*. Amsterdam, Nueva York: Elsevier Science Publishers.

