

intemin
Instituto nacional de tecnología minera
Secretaría de Minería

ARENAS PARA LA INDUSTRIA DEL VIDRIO CARACTERÍSTICAS Y PROCESOS DE PURIFICACIÓN

Ana María Celeda * y Eduardo A. Mari **

* CIPROMIN - Centro de Investigación de Procesamiento de Minerales - INTEMIN

** CIDEMAT - Centro de Investigación y Desarrollo de Materiales - INTEMIN

PUBLICACION TECNICA INTEMIN N° 1

1994

PRESENTACIÓN

La presente PUBLICACIÓN TÉCNICA Nº 1 del INTEMIN constituye el inicio de una serie de publicaciones técnicas que esperamos sean útiles a los productores de materias primas minerales, a las industrias manufactureras, a usuarios, a estudiosos y estudiantes, a funcionarios gubernamentales y al público en general. De esta manera nos acercamos al cumplimiento de los objetivos de nuestro INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA MINERA, que debe estar al servicio de los productores mineros y de los sectores industriales que utilizan materias primas de origen mineral.

Contribuiremos así al mejoramiento de la calidad de materias primas y productos, a la mejor competitividad de las empresas, y al fortalecimiento de las economías regionales.

Todas las sugerencias, críticas o comentarios que sirvan para mejorar estas PUBLICACIONES TÉCNICAS INTEMIN, tanto en su contenido como en su forma, serán bienvenidos, así como toda colaboración que se nos haga llegar en ese sentido.

El futuro de nuestro país dependerá en buena medida del empuje que sepamos dar a nuestro desarrollo tecnológico, sobre bases científicas y con visión de nuestra realidad.

Ing. Hugo Nielson

PRESIDENTE

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA MINERA

ÍNDICE

1. Introducción	7
1.1. Evolución histórica	7
1.2. Desarrollo actual de los yacimientos en el mundo	8
1.3. Antecedentes de la explotación de arenas para vidrio en Argentina	9
2. Características y requisitos de las arenas para vidrios	11
3. Caracterización	18
3.1. Análisis químico	18
3.2. Análisis mineralógico	18
3.3. Análisis granulométrico	19
3.4. Ensayos de fusión	20
3.5. Otros ensayos	20
4. Procesamiento de arenas para fabricación de vidrio	21
4.1. Antecedentes	21
4.2. Técnicas de beneficio	22
4.2.1. Atrición y clasificación mecánica	22
4.2.2. Concentración gravitacional	24
4.2.3. Separación magnética	25
4.2.4. Flotación	25
4.2.5. Lixiviación	26
5. Aplicación de técnicas de beneficio en distintas arenas. Resultados obtenidos	28
5.1. Arena de Ibicuy	28
5.2. Arena de Diamante	29
5.3. Arena del yacimiento de Jandakot, Australia	31
5.4. Arena del yacimiento de Normanville, Australia	31
6. Selección de la tecnología de procesamiento	33
6.1. Elección de la técnica más adecuada	33
6.2. Evaluación comparativa de los costos de procesamiento para purificación de arenas para vidrios	34
6.3. Diagrama de flujo del proceso de selección de una arena para fabricación de vidrio	35
7. Bibliografía	36

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Las arenas silíceas constituyen hoy la materia prima básica para la fabricación de objetos de vidrio de uso común, y millones de toneladas de la misma se consumen anualmente en todo el mundo con este fin. Pero no siempre fue así, y a esta situación se ha llegado después de una larga evolución ⁽¹⁾.

Los primeros vidrios fabricados por el hombre datan del cuarto milenio a.C., y fueron hechos por los babilonios presumiblemente fundiendo feldespatos y otros minerales con alto contenido de elementos alcalinos y alcalinotérreos, lo que podía lograrse con temperaturas relativamente bajas. El propósito era esmaltar recipientes y otros objetos de cerámica, como ladrillos y abalorios, para lo cual agregaban óxidos colorantes. Más tarde se fabricaron objetos de vidrio por el procedimiento de fusión y modelado. Posteriormente se desarrolló la técnica del "núcleo de arena". Los egipcios copiaron estas técnicas y llevaron artesanos babilonios a su país para la fabricación de objetos de pequeño tamaño y muy decorados como perfumeros, recipientes para aceites, cuentas, varillas, etc., reservados al uso de los poderosos y al culto.

En algún momento alrededor del siglo I a.C., y probablemente en Fenicia (hoy Líbano) se comenzó a desarrollar una nueva técnica de fusión, consistente en usar arenas de río mezcladas con nitro ("natrón", nitrato de sodio, proveniente principalmente de Egipto), a temperaturas alcanzables con los hornos desarrollados en aquella época para la metalurgia. Al mismo tiempo, se difundía el uso de la caña de soplar, técnica que facilitaba enormemente el conformado de objetos de una gran variedad de formas y de mayor tamaño. Estas técnicas llegaron tardíamente a los griegos, pero los romanos las adoptaron con entusiasmo, en Roma (donde usaban arenas del Tíber) y en otras partes del Imperio, al punto que los objetos de vidrio llegaron a hacerse tan populares que los vidrieros constituían un gremio numeroso. A ello contribuyó en buena medida el hallazgo de que las cenizas vegetales (con alto contenido de álcalis) eran buenos fundentes de la arena, y podían sustituir al costoso nitro.

Con la caída del Imperio Romano se perdió buena parte de estas técnicas artesanales, aunque la tradición se conservó en Bizancio y se llegó a ciertos desarrollos en el mundo islámico. Fueron retomadas, en el siglo XII, por los venecianos, que llevaron a cabo una verdadera tipificación de las arenas de su

región, usando tanto arenas silíceas como feldespáticas. Partiendo de arenas muy blancas, con bajo contenido de hierro, y agregando a la mezcla pequeñas cantidades de decolorantes, lograron obtener el "cristallo", vidrio prácticamente incoloro. Pese al celo con que fue guardado su secreto, las recetas venecianas fueron difundiendo en las nacientes manufacturas de vidrio de la Europa pre-industrial, fundamentalmente en Bohemia, Francia, Bélgica e Inglaterra. En este último país G. RAVENSCROFT inventó el "cristal de plomo" (1650), que además de porcentajes importantes de minio, necesita arena silícea de muy bajo contenido de hierro.

La Revolución Industrial demandó materias primas en cantidades masivas y calidad constante. Mientras N. LEBLANC (en 1780) instaló la primera fábrica de "soda" (carbonato de sodio), reemplazada casi un siglo después por la "soda SOLVAY", se iniciaron estudios geológicos en toda Europa para ubicar y caracterizar yacimientos de arenas para vidrio. Así comenzaron a explotarse yacimientos de calidad sobresaliente, algunos de los cuales están aún en explotación, en Francia (Fontainebleau, Maintenon, Nemours y Campines), Alemania (Doerentrup, Hohenbocka, Herzogenrath, Hannover), Inglaterra (Isla de Wight), Italia (Istria, Trapani, Vicentino, Tenda), Bélgica (Charleroi) y otros, siendo la arena de cada uno de ellos recomendada para vidrios de diferentes tipos.

También se han usado y se usan otros minerales para introducir la sílice en la mezcla, tales como el cuarzo (molido o proveniente del lavado de caolines), y arenas feldespáticas con diversos porcentajes de sílice y alúmina. Con todo, las arenas silíceas son, en tonelaje, las mayormente utilizadas.

Los desechos ("casco") de vidrio se han reciclado desde los comienzos de esta industria para fundirlos y producir nuevo vidrio. En la actualidad, el creciente uso de vidrio reciclado trae aparejado el consiguiente ahorro de arena, por lo que esta materia prima se transforma en un recurso natural si bien no renovable, prácticamente inagotable.

1.2. DESARROLLO ACTUAL DE LOS YACIMIENTOS EN EL MUNDO

Hoy en todo el mundo se conocen y explotan yacimientos de arena silícea de calidad adecuada para los distintos tipos de vidrio fabricados, y en cantidades suficientes como para asegurar reservas abundantes por mucho tiempo ^(2,3).

Bélgica sigue siendo uno de los principales proveedores, en calidad y en cantidad; son de destacar los depósitos de Mol y Maasmechelen (con 0,005 a 0,015 % de Fe_2O_3). En Francia los más importantes están en la zona de París (Compiègne, Montgru St. Hilaire y Fontainebleau) y en el sud (Entraigues, Hostun). Alemania también es un importante productor y exportador, con yacimientos en distintas regiones: Renania del Norte-Westfalia, Baviera y Baja

Sajonia, Inglaterra, Italia, España y otros países productores tienen una producción insuficiente, y deben importar, sobre todo las arenas de mejor calidad. Entre los países de Europa oriental, la ex-Checoslovaquia y la ex-Yugoslavia poseen yacimientos de cierta importancia, y exportan.

En los Estados Unidos, ya antes de la independencia fueron reconocidos yacimientos de arenas de excelente calidad para vidrios en las zonas de Boston y Virginia. Hoy en día la industria vidriera de este país tiene la suerte de contar con vastísimos yacimientos de arenas de características óptimas para todo tipo de vidrios ⁽³⁹⁾.

En otras regiones, Australia se autoabastece y exporta arenas de alta calidad. También son de destacar los yacimientos en explotación en Malasia e Indonesia. Turquía tiene yacimientos importantes, así como India, Paquistán, Sud-Africa, Israel. En América Latina: México, Brasil y Argentina.

Sin embargo, las arenas rara vez se emplean tal como se extraen, sobre todo si están destinadas a la fabricación de vidrios incoloros (denominados corrientemente "blancos"); las explotaciones modernas emplean diversas tecnologías de extracción, clasificación y purificación de las mismas, para responder a las exigencias de la industria. Cabe señalar que los grandes grupos vidrieros poseen yacimientos propios y compañías dedicadas a su explotación, así como al procesamiento y comercialización de las arenas que extraen de los mismos.

1.3. ANTECEDENTES DE LA EXPLOTACIÓN DE ARENAS PARA VIDRIO EN ARGENTINA

En cuanto al uso de arenas silíceas para la fabricación de vidrio en nuestro país, debemos comenzar por mencionar los trabajos de L. GRIANTA ⁽⁴⁾, quien verificó -tal como lo había señalado PUIGGARI ⁽⁵⁾- que en las fábricas de vidrio de esa época se utilizaba arena importada para fabricar vidrios incoloros y de alta calidad; para calidades inferiores se usaban arenas del Río de La Plata o cuarcitas del Uruguay, y altos porcentajes de casco de vidrio. Luego de un estudio geológico, mineralógico y químico de los yacimientos de arena de costas marítimas y ríos, concluyó que las arenas más adecuadas para ser usadas como materias primas por la industria vidriera son aquellas ubicadas en las regiones del litoral, y particularmente en los ríos Paraná, Uruguay y Río de la Plata, tanto en las costas argentinas como uruguayas, donde la acción de las aguas durante enormes períodos de tiempo ha contribuido a su purificación. En particular, recomienda a las provenientes de Diamante, Concepción del Uruguay, Bajada Grande (Paraná), y zonas del Río Paraná en Corrientes, "las que sometidas a un lavaje previo con ácido clorhídrico diluido, podrían competir con las mejores extranjeras".

En la década del treinta, la creciente industria vidriera nacional comenzó a utilizar cada vez más las arenas de Diamante, Ibicuy, Gualeguaychú y otras

zonas ribereñas, constituyéndose las empresas areneras que hoy en día abastecen a las industrias del vidrio ubicadas en el Gran Buenos Aires y el litoral. En el interior del país las fábricas de envases y otros productos de vidrio han recurrido generalmente a arenas feldespáticas (de San Luis, en particular de la zona de Jarilla, y también Córdoba, Mendoza y Tucumán) para el vidrio verde, mientras que para el vidrio incoloro (blanco) debe transportarse la arena de los mencionados yacimientos de Entre Ríos. En la zona de Cuyo, en ocasiones, se ha usado cuarzo de San Luis para vidrio incoloro, pero por lo general resulta más costoso.

No abundan los estudios publicados sobre nuestras arenas para vidrios, pudiendo mencionarse los de *CORDINI* ⁽⁶⁾ y de *BATTAGLIA* ⁽⁷⁾, sobre los depósitos de los alrededores de Diamante. Es de presumir que las empresas que explotan los yacimientos los han llevado a cabo. De todos modos, hay consenso general en la industria vidriera que tanto las arenas de Diamante (utilizadas en general para envases y vajilla), como las de Ibicuy (para vidrio plano), son de excelente calidad, y en caso necesario puede disminuirse el porcentaje de hierro mediante tratamientos adecuados.

En base a los datos disponibles, la producción de vidrios de todo tipo en Argentina fue de 560.800 t en 1991. Teniendo en cuenta el reciclado (de mayor importancia en el caso de los envases de vidrio), dicha cantidad debería reducirse en un 30%. De la cifra resultante, aprox. 400.000 t, puede estimarse, en base a las composiciones habituales, que un 70% corresponde a la sílice proveniente de la arena, con lo que el consumo de arena para vidrio en nuestro país puede fijarse en una cifra estimativa de 280.000 t por año. De éstas, un 50% está destinada a vidrio incoloro.

2. CARACTERÍSTICAS Y REQUISITOS DE LAS ARENAS PARA VIDRIOS

La industria vidriera, en todo el mundo, ha ido incrementando sus exigencias en cuanto a los requisitos que deben reunir las materias primas que utiliza, incluyendo, por supuesto, a las arenas. El contenido de hierro ha sido reconocido desde hace mucho tiempo como el principal indicador de su grado de pureza, pero poco a poco se ha ido controlando también la presencia de otras impurezas indeseables, así como la composición mineralógica y la distribución granulométrica. Así, se han establecido especificaciones según el tipo de vidrio a fabricar, que las empresas vidrieras aplican en sus compras, e inclusive en algunos países normas de aplicación general, como se detalla más adelante.

Las arenas silíceas están formadas por cuarzo alfa, la forma cristalina termodinámicamente estable de la sílice a temperatura ambiente y presión normal. Pero si bien los granos están formados por dicha especie mineralógica, a veces pura o bien con impurezas, pueden estar también acompañados por granos de otros minerales que, aún en pequeñas cantidades, ocasionan defectos en el producto final (**inclusiones**), que se observan como puntos oscuros o brillantes o como zonas inhomogéneas. Esto ocurre con minerales de alto punto de fusión o formados por sustancias que no dan origen a eutécticos con los componentes de la mezcla vitrificable; los más comunes son el granate, las espinelas, la cromita, el rutilo, el circón, y otros (ver 3.2). Por lo tanto, no basta con especificar, por ejemplo, que la arena silícea deba tener como mínimo un 98,5 % de SiO₂, sino que también debe asegurarse, mediante el análisis mineralógico de muestras representativas, la ausencia de dichos minerales infusibles, o bien que el tamaño de grano de los mismos no supere ciertas dimensiones, para que no den origen a defectos críticos (ver por ej. la especificación brasileña, TABLA 1).

La presencia de hierro es indeseable en los vidrios incoloros ya que imprime a los mismos una coloración verdosa con tonalidades que van desde el azulado al amarillento. El origen de estas coloraciones se encuentra en los espectros de absorción de los iones férrico y ferroso (ver FIGURA 1). El primero absorbe fuertemente en la zona entre el violeta y el verde, y también en el rojo, por lo que su presencia imprime al vidrio una coloración amarilla. Los iones ferrosos, por su parte, absorben desde el verde al rojo, por lo que imprimen una coloración azul. Ahora bien, dado que ambos iones están siempre presentes en los vidrios, el color final resultante será verde, con una tonalidad amarillenta o azulada según predomine uno u otro ión.

El contenido de hierro por lo tanto es la característica más importante para decidir el uso final de una arena. Los vidrios para óptica (tanto para instrumental como para uso oftálmico) son los más exigentes a este respecto, así como los destinados a cristalería y vajilla y, en menor medida, a envases de vidrio incoloro (TABLA 2).

Los vidrios de color verde y ámbar admiten cantidades mayores de hierro (un caso típico es el "verde botella"), pero cantidades muy elevadas de este elemento (mayores del 1%), son desaconsejables por otra razón. Los iones ferrosos, y, en menor medida, los férricos, disueltos en la masa fundida, absorben

TABLA 1. ESPECIFICACIONES DE MATERIAS PRIMAS PARA FABRICACION DE VIDRIOS. ATBIAV, BRASIL (8).

ARENA: fuente de SiO₂ (principal formador de vidrio). Se incluye en este ítem el cuarzo.

Especificación química:

Componentes	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
SiO ₂ (mín.)	99,5	99,5	99,4	99,0
Al ₂ O ₃ (máx.)	0,20	0,20	0,30	0,5
Fe ₂ O ₃ (máx.)	0,002	0,015	0,03	0,15
TiO ₂ (máx.)	0,02	0,02	0,03	0,05
Cr ₂ O ₃ (máx.)	0,0002	0,0003	0,0005	0,0005
PPC (máx.)	0,10	0,20	0,20	0,30

Especificación granulométrica (% en peso):

Abertura (mm)	Mínimo	Máximo
0,589	-	0
0,417	-	10
0,147	80	-
0,074	98	-

Minerales pesados (en 400 g de muestra):

Abertura (mm)	Mínimo	Máximo
0,417	-	2
0,246	-	20

Nota: las cantidades retenidas se refieren al número de partículas.

Observaciones:

- Tipo A : Vidrios especiales (por ej. ópticos, oftálmicos, y otros).
- Tipo B : Vidrios incoloros de alta calidad (por ej. cristales, frascos y artículos de mesa).
- Tipo C : Vidrios incoloros comunes (por ej. envases en general y vidrio plano).
- Tipo D : Vidrios de color (por ej. frascos, envases en general y vidrio plano).
- PPC : Pérdida por calcinación a 1.000° C

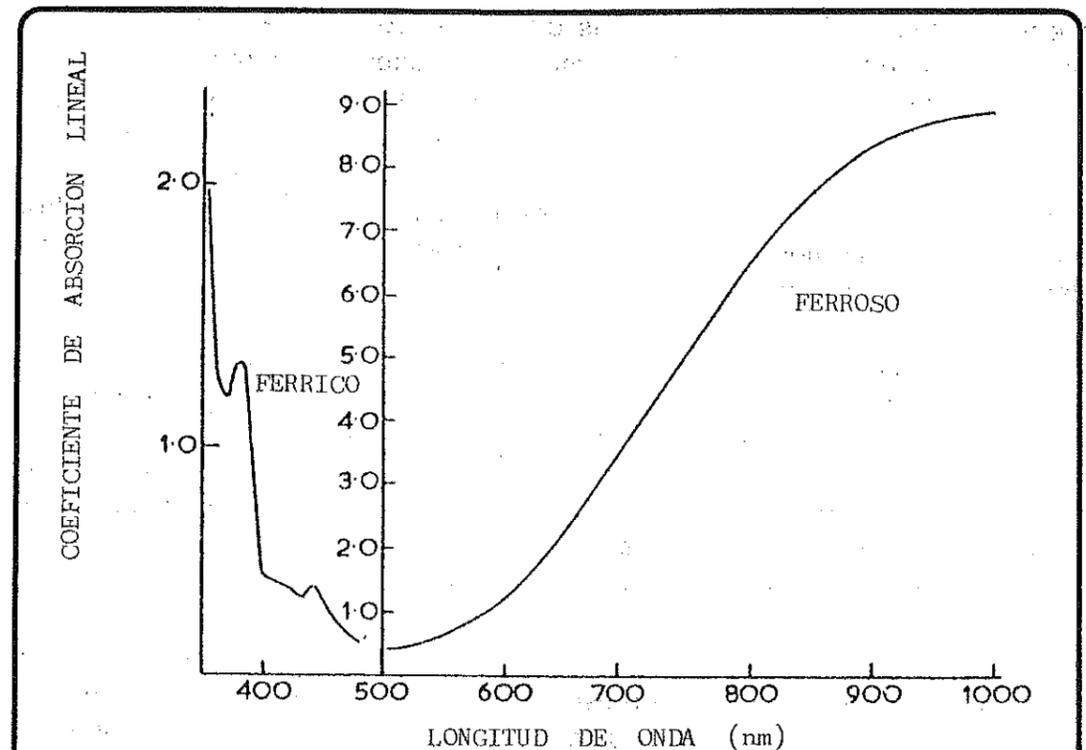


FIGURA 1. Coeficientes de absorción lineal de los iones ferroso y férrico. El coeficiente de absorción lineal es igual a la densidad óptica por centímetro recorrido por el haz de luz, multiplicada por el porcentaje en masa del óxido de hierro expresado como Fe₂O₃ (40). De estos datos puede derivarse la relación ferroso/férrico, la cual es un indicador de las condiciones redox en el horno.

TABLA 2. LIMITES GENERALMENTE ADMITIDOS PARA CONTENIDOS DE SÍLICE Y HIERRO EN ARENAS Y CUARZOS (% m/m). (9,12).

Producto	SiO ₂ mín.	Fe ₂ O ₃ máx.
Vidrios ópticos	99,5	0,01
Cristalería fina	99,0	0,02
Vidrios incoloros para material de laboratorio y vajilla	99,0	0,02
Vidrios incoloros para envases y artículos prensados	98,5	0,03 a 0,05
Vidrio plano incoloro	98,5	0,05 a 0,10
Vidrio verde para envases	98,5	0,10 a 0,50
Vidrio ámbar para envases	98,5	0,50 a 1,00

fuertemente las radiaciones infrarrojas, disminuyendo así la transmisión de calor por radiación. Ello hace que la temperatura en las capas inferiores de la cuba de fusión puedan llegar a ser bastante menores que en la superficie del vidrio fundido, y por lo tanto que el vidrio en esas capas tenga una viscosidad tan elevada que no fluya. Por lo tanto, además de un desaprovechamiento energético, baja el rendimiento del horno. De hecho, y para atenuar este efecto, las cubas para fundir vidrios verdes o ámbar tienen menor profundidad que las destinadas a fundir vidrios incoloros.

Otro caso que merece un comentario es el de los vidrios planos, para los cuales se admite en las arenas un contenido de hierro que puede parecer elevado. De hecho, al mirar a través de un vidrio plano, o sea en el uso normal (el espesor del vidrio es de unos pocos milímetros, habitualmente entre 3 y 6, pudiendo llegar hasta 10), la coloración verdosa no llega a advertirse. Si el mismo vidrio se observa de canto, se verá, dado el recorrido mucho más largo de la luz dentro del mismo, un color verde intenso (*ley de LAMBERT-BEER*).

Una cuestión muy importante es determinar cómo se encuentra el hierro en las arenas, pues puede estar presente en granos sueltos de otros minerales acompañantes o bien estar adherido como óxido en la capa superficial alterada de los granos, o bien en el interior de los mismos. *DE GIUSTO*⁽¹⁰⁾ propone una metodología que involucra el uso de microscopía óptica, análisis de imágenes y determinaciones químicas para la caracterización mineralógica, granulométrica y morfológica de los granos, ya que la complementación de todas estas técnicas permite identificar las fases contaminantes para la fabricación de vidrio, y de ello dependerá la selección del método de purificación más adecuado. Su investigación, realizada sobre muestras de arenas cuarzosas procedentes de yacimientos ubicados al sur de la ciudad de Paraná, en la provincia de Entre Ríos, permitió reconocer la presencia de cuatro fases ferruginosas, vinculadas de distinta manera con el cuarzo y el feldespato presentes: ellas se presentan como granos aislados de óxidos de hierro y titanio (magnetita, hematita, ilmenita); silicatos ferromagnesianos sin dependientes (hornblenda); inclusiones de óxidos de hierro en cuarzo, y también como pátinas ferruginosas.

No existen normas internacionales sobre arenas para vidrios, pues ello está supeditado, en cada país, a las características de los yacimientos existentes y a los requerimientos de las industrias vidrieras respectivas. Pero, como lo indican las TABLAS 1, 2 y 3, los valores especificados son en general similares. En algunos países existen normas nacionales; una de las más conocidas es la BS 2975, de Gran Bretaña, que especifica valores para las fracciones granulométricas según el tipo de vidrio, y para los contenidos de impurezas; estos se resumen en la TABLA 3.

En otros países existen especificaciones de las empresas proveedoras o consumidoras, o bien aceptadas por consenso general. Por ejemplo, en los EE.UU. es habitual referirse a la arena para vidrio de mejor calidad como la "N° 1 glass sand",

con más del 99,6-99,8% de SiO_2 y menos del 0,024% de Fe_2O_3 ; esta arena es usada para muchas aplicaciones porque su precio no es mayor que el de otras de menor calidad, salvo fletes⁽¹²⁾. Las características de las arenas y otras materias primas corrientemente utilizadas en los EE.UU. han sido resumidas por *HARBEN*⁽¹³⁾. En Argentina se han publicado especificaciones de arenas para vidrios planos^(14,38).

TABLA 3. ESPECIFICACIONES QUIMICAS DE ARENAS PARA VIDRIOS SEGUN LA NORMA BRITANICA BS 2975⁽¹¹⁾.

Tipo de vidrio	% SiO_2 mín.	% Fe_2O_3 máx.
Envases incoloros	99,8	0,03
Envases coloreados	97,0	0,25
Vajilla de mesa	99,6	0,010
Borosilicato	99,6	0,010
Cristal de plomo	99,6	0,010
Vidrio plano incoloro	99,0	0,10
Optico y oftálmico	99,7	0,013
Fibra para aislación	94,5	0,3

NOTA: se especifican además contenidos máximos para alúmina, Cr, PPC (pérdida por calcinación), álcalis, Co, Ni y V.

Las especificaciones indican los contenidos permitidos de hierro total (expresado convencionalmente como Fe_2O_3 , aunque no todo el hierro se encuentre con estado de oxidación 3). Sin embargo, es importante tener presente que una especificación de contenido de hierro de la arena no es, por sí sola, suficiente, pues las otras materias primas (como feldespatos, calizas, casco de vidrio, etc.), contienen también hierro cuyo porcentaje debe especificarse, ya que finalmente todo se sumará en la fusión y contribuirá al contenido total de hierro en el producto final.

Un ejemplo numérico, como el que presentamos en la TABLA 4, aclarará este concepto. Puede verse que, si bien se ha partido de una arena con un contenido de hierro relativamente bajo, dicho contenido, sumado al de las demás materias primas, bastará para dar en el producto final una coloración verdosa apreciable a la vista. Por lo tanto, no tiene sentido una especificación sobre el contenido de hierro sólo para la arena, pues se está introduciendo también hierro con las otras materias primas, y especialmente con el casco de vidrio (vidrio roto reciclado) que además de contener hierro en el vidrio, contiene muchas veces partículas y trozos de hierro metálico o aleaciones ferrosas mezclados con los trozos de vidrio. Si bien existen métodos magnéticos para eliminar los materiales ferrosos del casco, las vidrierías prefieren que el vidrio reciclado que compran esté lo más limpio posible, y que cumpla determinadas especificaciones, es decir, cada vez más se tiende a considerarlo como una materia prima al nivel de las materias primas minerales. Por las mismas consideraciones, no resulta conveniente utilizar casco de vidrio verde o ámbar para fabricar vidrio incoloro.

TABLA 4. CALCULO DEL HIERRO INTRODUCIDO CON LAS MATERIAS PRIMAS PARA UNA FORMULACION DE VIDRIO COMUN.

Materia prima	Peso kg	Fe2O3 %	kg vidrio formado	Oxido	Fe2O3 total aportado, kg
Arena silícea	100	0,03	100,0	SiO ₂	0,030
Soda Solvay	33	0,01	19,3	Na ₂ O	0,003
Caliza	22	0,03	18,5	CaO	0,007
Feldespato	12	0,07	2,2	Al ₂ O ₃	
			1,6	K ₂ O	
			8,2	SiO ₂	0,008
Casco	20	0,25	20,0	vidrio	0,050
TOTALES	187		169,8		0,098
Contenido de hierro (como Fe₂O₃) en el vidrio final: 0,058%					

La influencia del contenido de hierro de la arena sobre el color del vidrio, y la posibilidad de usar arenas con alto contenido de Fe₂O₃ ha sido discutida, entre otros, por MILLS^(15, 16).

En lo que respecta a otras impurezas indeseables, están en primer lugar los elementos que pueden provocar alguna coloración anómala en el vidrio, como el cromo, el manganeso y el titanio; éste último puede actuar también como agente nucleante, favoreciendo la desvitrificación, es decir, la cristalización parcial o total del material. Los porcentajes admitidos de estos elementos no van más allá de unas pocas centésimas.

El aluminio está siempre presente, como alúmina, formando parte de feldespatos que impurifican las arenas silíceas y, naturalmente, en las arenas feldespáticas. La alúmina es necesaria para aumentar la resistencia química del vidrio, y si bien no provoca coloración, su contenido no debe superar el 3 al 4 % en peso, pues en tal caso aumentaría mucho la viscosidad del vidrio fundido, produciendo problemas en el conformado y favoreciendo la desvitrificación. Es por eso que hay que tener en cuenta los aportes de alúmina de las arenas, del orden de las décimas por ciento en las silíceas y hasta un 6% en las feldespáticas. En realidad muchas veces se agrega feldespato no sólo para introducir alúmina, sino también potasio en caso de ser necesario; pero estas cantidades deben estar siempre controladas. Hay que tener también en cuenta que el casco de vidrio reciclado puede contener trozos de aluminio metálico (por ejemplo, de tapas de envases); el aluminio metálico, que al reducir la sílice provoca inclusiones de silicio metálico, es más difícil de separar que el hierro, y existen procedimientos especiales para ello.

Finalmente, las arenas suelen contener pequeñas cantidades de materia orgánica, del orden de pocas décimas por ciento, que se informan como "pérdida por calcinación", junto con algo de dióxido de carbono producto de la descomposición de pequeñas cantidades de carbonatos de calcio y magnesio que pueda contener la arena). Esta materia orgánica se quema durante el proceso de fusión y crea un medio reductor que es importante controlar, especialmente en los vidrios de color, en particular el ámbar, pues de ello depende la relación entre el hierro ferroso y el férrico, que da la tonalidad al vidrio, como se dijo anteriormente.

La "humedad" (contenido de agua eliminable por calentamiento, por lo general a 110 °C), se refiere al agua líquida ocluida entre los granos de arena (salvo el caso excepcional de agua de cristalización de algún mineral acompañante). La arena se entrega en fábrica húmeda, con un contenido de agua especificado entre ciertos límites convenidos entre proveedor y usuario, y que depende de los métodos de extracción y tratamiento, y del sistema de transporte utilizado. El agua se evapora en el horno, pero su presencia en la arena es útil para evitar el "desmezclado" de la mezcla vitrificable, así como el arrastre de las partículas más finas de ésta última por las corrientes de los gases de combustión.

3. CARACTERIZACIÓN

Todas las materias primas que entran en la fabricación del vidrio deben someterse a tres tipos de ensayos de caracterización, para evaluar su aptitud según el tipo de producto final a fabricar: análisis químico, mineralógico y granulométrico. Es conveniente además llevar a cabo ensayos de fusión en pequeña escala.

3.1. ANÁLISIS QUÍMICO

Los métodos tradicionales, seguidos aún hoy para los componentes principales, son los clásicos por vía húmeda, gravimétricos y volumétricos. Tienen dos finalidades: determinar el título, ley o contenido de las sustancias que interesan para la composición del vidrio (en el caso de las arenas, el contenido de sílice), que deben estar por encima de valores mínimos, y establecer la presencia de impurezas o sustancias indeseables que no deben superar valores máximos. En este último caso se recurre a métodos de determinación final instrumentales, como por ejemplo para el caso del hierro la espectrofotometría (con tiocianato ú orto-fenantrolina). Actualmente se aplica en forma creciente la espectrometría de absorción atómica (en estudio en la Comisión Internacional del Vidrio, ICG, para la determinación de impurezas en arenas para vidrios), y otros métodos instrumentales^(17,18,19). El contenido de sílice se determina habitualmente por diferencia. En muestras de las que no hay referencias analíticas previas, es recomendable efectuar primero un análisis espectrográfico.

3.2. ANÁLISIS MINERALÓGICO

Es de gran importancia en el caso de yacimientos poco conocidos. La identificación de especies mineralógicas mediante el microscopio petrográfico u otros métodos, como la difracción de rayos X, permite detectar la presencia de minerales infusibles ("pesados") y el tamaño de sus granos, así como las características morfológicas de las especies principales. Por ejemplo, en el caso de las arenas para vidrio se ha determinado que la forma de los granos tiene mucha importancia en la velocidad de reacción y fusión de los mismos en el horno de cuba⁽²⁰⁻²⁴⁾. En la TABLA 5, se resumen algunos de los minerales infusibles que pueden encontrarse contaminando arenas para vidrio. La presencia de estos minerales provoca defectos denominados "inclusiones" en los objetos de vidrio, y debe evitarse al máximo.

TABLA 5. PRINCIPALES MINERALES INFUSIBLES PRESENTES COMO CONTAMINANTES EN ARENAS PARA VIDRIO.⁽²⁵⁾

Mineral	Fórmula química	Densidad g.cm ⁻³
Casiterita	SnO ₂	6,8-7,1
Cromita	(FeMg)Cr ₂ O ₄	4,5-4,8
Disteno	Al ₂ [O/SiO ₄]	3,6-3,7
Epidoto	Ca ₂ (FeAl)Al ₂ [O/OH/SiO ₄ /Si ₂ O ₇]	3,3-3,5
Goethita	FeOOH	3,8-4,3
Ilmenita	FeTiO ₃	4,5-5,0
Corindón	Al ₂ O ₃	3,9-4,1
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5,2
Olivino	(MgFe) ₂ [SiO ₄]	3,2-4,2
Pirita	FeS ₂	5,0-5,2
Rutilo	TiO ₂	4,2-4,3
Espinela	MgAl ₂ O ₄	3,5
Topacio	Al ₂ [F ₂ /SiO ₄]	3,5-3,6
Turmalina	NaFe ₃ (AlFe) ₆ [(OH) ₄ /(BO ₃) ₃ /Si ₆ O ₁₈]	3,0-3,3
Circón	ZrSiO ₄	3,9-4,8
Piroxenos	silicatos de Ca, Mg, y Fe de cadenas simples	3,1-3,5
Zoisita	Ca ₂ Al ₃ [O/OH/SiO ₄ /Si ₂ O ₇]	3,2-3,4

3.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El tamaño de los granos o partículas debe ser el adecuado para que la fusión proceda de manera rápida y controlable. Sin embargo, no debe haber muchos finos, pues éstos pueden ser arrastrados por las corrientes del aire y de los gases de combustión, que circulan a gran velocidad dentro del horno. Ello provocaría oclusiones en las cámaras regenerativas. Los granos muy finos tienen también el inconveniente de incluir mucho aire en la mezcla, lo que dificulta la homogeneización térmica, aunque puede facilitar el afinado. Debe tenerse en cuenta que de la granulometría de la arena, el componente principal de la mezcla vitrificable, depende en gran medida la velocidad de fusión y también la homogeneidad del vidrio obtenido.

Los tamaños de grano recomendados para la fusión en hornos de cuba están entre 0,8 y 0,2 mm, y para fusión en crisoles entre 0,4 y 0,2 mm (correspondientes en forma aproximada a las mallas ASTM 20/70 y 40/70, respectivamente). Las arenas deben clasificarse para llegar a las granulometrías

indicadas. En caso de requerirse un tamaño de partícula muy fino, para ciertos vidrios especiales, por ejemplo para óptica, las arenas deben molerse, evitando impurificarlas con hierro de los equipos utilizados para ese fin.

La mencionada Norma BS 2975 incluye también especificaciones para granulometría de las arenas, según el tipo de vidrio ⁽¹¹⁾. Por su parte, la Comisión Internacional del Vidrio ha llevado a cabo estudios específicos sobre el tema ⁽²⁶⁾. Otros aspectos muy importantes a tener en cuenta son la densidad aparente (relacionada con la granulometría y determinada en condiciones estándar), y la humedad.

3.4. ENSAYOS DE FUSIÓN

Aún en posesión de todos los datos anteriores, es altamente recomendable llevar a cabo ensayos de fusión. Estos ensayos consisten en la formulación y preparación de una mezcla vitrificable usando la arena en estudio y el resto de los componentes de calidad "pro-análisis", en las proporciones en que se hará en la fábrica de vidrio.

La práctica corriente consiste en preparar una mezcla con la formulación adecuada; fundirla en horno eléctrico y colarla en molde de acero; la fusión suele repetirse para lograr mayor homogeneidad. Se obtienen así probetas de vidrio que, una vez recocidas, pueden examinarse en cuanto a su aspecto, color, presencia de inclusiones sólidas provenientes de minerales no fundidos, y facilidad de colado, así como determinarse sus principales características como la densidad, el índice de refracción, la resistencia hidrolítica, el coeficiente de dilatación lineal, etc.

En lo que respecta al color del vidrio, este ensayo es muy sensible, y da una indicación directa del mismo, en vez del que podría inferirse del contenido analítico de hierro. Pueden prepararse también probetas con cantidades crecientes de hierro, para usarlas como escala comparativa ⁽²⁷⁾.

El ensayo de fusión es insustituible cuando se trata de ensayar materias primas nuevas o poco conocidas, sin arriesgar a efectuar el ensayo en el horno de fabricación. Su realización es práctica habitual en muchos laboratorios y fábricas, y ha sido recomendada por el Bureau of Mines de los EE.UU. y por el Laboratorio de Vidrios de la Universidad de Sheffield, Gran Bretaña.

3.5. OTROS ENSAYOS

Para estudiar las características de las arenas se han aplicado numerosos criterios y metodologías además de las técnicas mencionadas: microscopía óptica y electrónica, microsonda, determinación del área superficial por el método BET, y otras ⁽²⁰⁻²⁴⁾.

4. PROCESAMIENTO DE ARENAS PARA FABRICACIÓN DE VIDRIO

4.1. ANTECEDENTES

Por muchos años, la arena para fabricar vidrios ha sido simplemente extraída, clasificada y lavada, con escaso control de calidad previo a su envío a las vidrierías, donde se produce el ajuste de la formulación para poder utilizarla arena recibida, que debe no obstante, mantener una calidad uniforme dentro de los límites máximos permitidos. Pero con las actuales exigencias, pocos son los yacimientos de los que la arena pueda ser extraída y utilizada directamente sin ningún tipo de tratamiento previo. En particular, en el caso de la fabricación de artículos de vidrio incoloro o "blanco" (envases, vajilla, vidrios ópticos, etc.), el tipo de procesamiento a utilizar para su purificación, depende de las características de la arena disponible en el depósito a explotar y de los requerimientos del uso al que se destine.

Los principales procesos para beneficiar o purificar una arena son los siguientes:

- A) Separación de material grueso, piedras, ramas etc., por clasificación en zarandas fijas, vibratorias o rotatorias a tambor (**tipo "trommel"**).
- B) Lavado para eliminar partículas contaminantes, por lo general finos arcillosos con alto contenido de hierro; se realiza mediante la utilización de un cono lavador.
- C) Clasificación para remover materiales gruesos y finos. Puede realizarse por hidrociclono, por tornillo clasificador (**tornillo AKINS**) o mediante zarandas.
- D) Separación de los minerales contaminantes, presentes como partículas individuales, parcial o totalmente liberadas de la sílice, como ser granos de hematita, ilmenita, magnetita, turmalina, granate, circón, líticos, feldespatos etc., mediante el uso de una o varias de las siguientes alternativas:
 - separación gravitacional por mesa vibratoria, como **REICHERT** o espirales **HUMPHREY**,
 - separación magnética en húmedo de baja o alta intensidad,
 - separación magnética en seco de baja o alta intensidad.
 - flotación espumante.
- E) Lixiviación química para eliminar material ferruginoso que se encuentra en canales o poros, rellenando oquedades o en forma de pátinas o crecimientos secundarios en granos de sílice, que se realiza preferentemente en medio ácido.

En general no es necesaria la secuencia de todos los procesos mencionados anteriormente para purificar una arena. Habitualmente se usa una secuencia con algunos de ellos, seleccionada convenientemente en función de las características del material a procesar, la calidad del producto final buscado y consideraciones económicas respecto de la inversión y los costos operativos.

Así por ejemplo en Inglaterra el uso de arenas nacionales para la producción de vidrio blanco, obtenidas por tratamientos de purificación, ha tomado impulso frente a los costos de transporte que significaba la importación de arenas de calidad comparable desde Bélgica. La *BRITISH INDUSTRIAL SAND* explota yacimientos de la región de Surrey. La arena extraída se somete a un tratamiento que se inicia con un lavado con agua, una posterior lixiviación con ácido fluorhídrico y ditionito ("hidrosulfito") de sodio, y una flotación final ^(2,28).

En Bélgica, en la zona de Mol y Maasmechelen los yacimientos son de una pureza tal que en algunos puntos pueden extraerse arenas de 0.005% de Fe_2O_3 aunque en cantidades limitadas. Por eso debe recurrirse a un proceso de lavado y flotación para alcanzar un volumen de producción comercializable, de pureza comparable.

La *QUARZWERKE Co.* explota en Alemania, yacimientos en la localidad de Frechen, en las cercanías de Colonia, aplicando un tratamiento que incluye lavado, clasificación, secado y molienda ⁽³⁾.

Las fábricas del centro de Italia, usan arenas extraídas de yacimientos de la localidad de Priverno, explotados en la actualidad por la *SA.SI.FO. DI STEFANO* ⁽²⁹⁾ da un completo detalle de las características del yacimiento de Fossanova y su potencialidad, como así también del esquema de procesamiento utilizado en la planta de beneficio, que por atrición y lavado produce un corte apto para envases coloreados y sobre otra fracción, procesada por flotación para eliminar el óxido remanente y los feldespatos, produce un producto apto para la producción de vidrio plano. La *SIROSUD Co.* procesa las arenas del yacimiento de Colle Veduto, realizando operaciones de desagregación, atrición, clasificación, separación magnética y filtración, para abastecer de materia prima a las vidrierías del sur ⁽²⁾.

En EE.UU., la *OTTAWA SILICA Co.* procesa por flotación arenas de un vasto yacimiento de Michigan.

4.2. TÉCNICAS DE BENEFICIO

4.2.1. ATRICIÓN Y CLASIFICACIÓN MECÁNICA

El objetivo de la atrición es la remoción mecánica de la mayor cantidad posible de las impurezas que se encuentran adheridas no muy fuertemente en la

superficie de los granos de arena. La remoción se produce por frotado entre los mismos granos ⁽²⁸⁾. La atrición también produce la rotura de agregados friables, facilitando la remoción de las impurezas intersticiales. A veces, ya durante el bombeo de las suspensiones ("pulpas") de arenas, los granos sufren una atrición superficial.

En caso de requerirse, la atrición se realiza en equipos que consisten en un tanque agitado por un rotor de alta velocidad, en el cual se procesa una suspensión al 60 - 75% de sólidos (m/m), ya que si la misma es muy diluida, la energía entregada al sistema se gasta en agitar el agua y los granos no tienen un contacto adecuado. Por el contrario, si es demasiado concentrada, la paleta tiende a cortarla, sin provocar el movimiento de los granos, que permite la atrición superficial entre ellos. El rotor puede tener dos o más filas de paletas de forma tal que la circulación de la arena provoca el roce forzado de los granos.

La atrición puede realizarse a pH ácido o alcalino. El agregado de agentes humectantes y surfactantes mejora la eficiencia, disminuyendo la energía consumida. El efecto logrado durante la atrición puede ser mejorado utilizando la capacidad de la vibración ultrasónica de producir, en determinadas condiciones el fenómeno de cavitación en el agua en contacto con la superficie (en este caso de los granos de arena), con un efecto erosivo que facilita la separación de las impurezas de la superficie de los granos ⁽³⁰⁾. Por lo general, durante el proceso de atrición, la temperatura aumenta alcanzando más de 30°C.

Tanto el tanque como el rotor deben estar protegidos contra la abrasión y la corrosión. Para atriciones en medio ácido se usan revestimientos resistentes. Para atriciones en medio alcalino puede utilizarse equipamiento de hierro (hard iron) no obstante lo cual los rotores deben ser reemplazados frecuentemente.

En lo que respecta a los clasificadores mecánicos, su función es la de permitir la recuperación por sedimentación de las partículas con un tamaño superior al deseado, y la eliminación en el rebalse de las partículas con un tamaño inferior al deseado, y de las lamas. Básicamente un clasificador consta de un tanque sedimentador, con un mecanismo de agitación continua para permitir la separación de las partículas finas que quedan atrapadas en el sólido que sedimenta y mover el sólido sedimentado para su descarga.

Los hidrociclones cumplen la misma función que un clasificador mecánico. La diferencia básica está en el principio en que se basan y en los caudales que manejan: en el clasificador mecánico, el "underflow" tiene mayor porcentaje de sólidos y menor cantidad de finos que quedan atrapados, mientras que en el hidrociclón el "overflow" tiene mayor contenido de sólidos.

4.2.2. CONCENTRACIÓN GRAVITACIONAL

La concentración gravitacional se fundamenta en la separación de los constituyentes de una mena debido a la diferencia de densidades y tamaños entre ellos y la consiguiente variación en los tiempos de sedimentación de distintas partículas en un fluido, siendo a veces necesario hacer intervenir otras fuerzas además de la gravedad para que la separación se realice ⁽³¹⁾.

Los métodos de concentración gravitacional pueden ser agrupados así:

- separación por medios densos
- separación por "jig"
- separación por película de agua
- separación por mesa vibratoria.

De éstos, sólo los dos últimos son los adecuados para el tratamiento de minerales con granulometrías finas por debajo de 20 mallas, como es el caso de las arenas para vidrio.

Uno de los equipos que se basan en la separación por película de agua es la espiral de *HUMPHREY*. En ella, la película de agua se extiende sobre una superficie semicircular, desenvuelta helicoidalmente alrededor de un eje vertical. El mineral es alimentado en el tope de la espiral. Mientras descienden, las partículas menos densas y más gruesas alcanzan los bordes por acción de la fuerza centrífuga y las partículas más densas, resistiendo esta acción, descienden por la parte interna de la voluta.

Otro concentrador de película de agua es el sistema conocido como cono *REICHERT*, desarrollado en Australia. Se trata de un tubo circular con una serie de estrangulaciones, de manera que asemeja a dos conos invertidos apoyados por la base. El mecanismo de separación involucra una combinación entre escurrimiento intergranular y sedimentación impedida, lo que resulta en la formación de un lecho estratificado, en el cual las partículas finas y pesadas son concentradas en la parte inferior del flujo y son removidas por una ranura anular.

La mesa vibratoria es una superficie plana rectangular en posición horizontal, dotada de un movimiento vibratorio horizontal en la dirección longitudinal y que puede ser inclinada reguladamente en relación con la horizontal. Su superficie está constituida por una parte lisa y una parte con pequeños surcos paralelos o casi paralelos a la dirección longitudinal. Entre los surcos ocurren los fenómenos de sedimentación retardada y consolidación intersticial y como consecuencia de ello, ocurre una estratificación de acuerdo con la densidad y el tamaño. Así, las partículas más pequeñas y pesadas se encuentran más próximas a la superficie de la mesa y son las más influenciadas por el movimiento horizontal longitudinal de la mesa y se mueven más rápidamente hacia el lado de la descarga de pesados que las más gruesas y livianas, que son arrastradas por la película de agua hacia la zona de la descarga de livianos.

4.2.3. SEPARACIÓN MAGNÉTICA

La concentración por separación magnética se logra por la acción simultánea sobre todas las partículas de arena, de una fuerza magnética que actuará sólo sobre las partículas magnéticas y una segunda fuerza o combinación de fuerzas que actuarán tanto sobre las partículas magnéticas como sobre las no magnéticas ^(28,32). Esta segunda fuerza puede ser la gravitacional, la fuerza centrífuga o la fuerza de arrastre de un fluido.

La separación magnética puede ser clasificada en cuatro tipos, dependiendo si el mineral es procesado en seco o en húmedo y dependiendo de la intensidad del campo aplicado, que puede ser de baja intensidad (menos de $0,2 \text{ Wb.m}^{-2}$) o de alta intensidad, donde generalmente se usan campos de hasta 1 a 2 Wb.m^{-2} . El uso de la separación magnética de alta intensidad en húmedo para la separación de contaminantes débilmente magnéticos presentes en las arenas para la fabricación de vidrio tiene la ventaja de ser más selectiva, comparada con la separación gravitacional.

Las separaciones de baja intensidad permiten separar productos ferromagnéticos como hierro y magnetita. Las separaciones de alta intensidad permiten separar productos débilmente magnéticos como hematita.

4.2.4. FLOTACIÓN

La flotación, o más específicamente la flotación por espumas, es un método físicoquímico para concentrar minerales en granulometrías por debajo de 30 mallas ^(28,33,37). El proceso envuelve el tratamiento físicoquímico de una suspensión para crear las condiciones favorables para la adhesión de ciertas partículas minerales con burbujas de aire. Estas burbujas son las que llevan a algunos minerales selectivamente a la superficie, estabilizando la espuma la cual es removida de la celda de flotación, mientras que los otros minerales permanecen sumergidos en la suspensión.

Luego de que la arena ha sido atricionada y deslamada y/o lavada convenientemente, la suspensión se acondiciona con los reactivos específicos en el acondicionador con tiempos que varían entre 5 a 20 minutos, siendo importante no generar finos adicionales que provocarían un incremento en el consumo de reactivos. La flotación de estas impurezas se realiza en celdas con aireación mecánica del tipo *DENVER* o *FAGERGREEN*, pues como la arena sedimenta rápidamente, una celda con agitación neumática no es aconsejable.

Dos tipos de circuitos son los más utilizados para flotar los contaminantes en arenas para vidrios: uno usando ácidos grasos a pH alcalino y otro usando sulfonatos de petróleo y/o colectores catiónicos del tipo sales de aminas en pH ácido. La elección de uno u otro circuito depende del tipo de contaminante que

deba ser eliminado y de la calidad del producto requerido, siendo altamente recomendable la realización previa de ensayos de laboratorio ya que, para arenas de distintos orígenes, un circuito puede dar mejores resultados que el otro.

Para la eliminación de granos de minerales de hierro y granos de cuarzo altamente contaminados con minerales de hierro, se utilizan colectores aniónicos, del tipo sulfonato de petróleo o ácido graso, dependiendo si se usa un circuito en medio ácido o medio básico respectivamente. Para la eliminación de materiales feldespáticos, micas y otro tipo de contaminantes, se usan colectores catiónicos del tipo amina. Si bien en el caso de arenas para vidrios, en general, son los contaminantes los que se flotan, existen antecedentes de estudios de laboratorio y en escala piloto donde se procede a flotar en una primera etapa, los granos de cuarzo limpios con sales de amina en pH ligeramente alcalino. Posteriormente, en una segunda etapa de flotación, a pH ácido, con sales de amina y ácido fluorhídrico para deprimir el cuarzo, se flota el feldespato, obteniéndose así productos con distintas características y posibilidades de uso, con y sin otra etapa de purificación posterior (por separación magnética o lixiviación) ⁽³⁰⁾.

La flotación se realiza con aproximadamente un 35% de sólidos y el tiempo de residencia de la arena es de hasta 15 minutos. En general, las celdas de tamaños grandes no son eficientes ya que la agitación de la pulpa se mantiene a expensas de altas velocidades de los rotores. Si el concentrado obtenido por flotación contiene los minerales pesados, los minerales portadores de hierro y los minerales arcillosos remanentes que no han sido eliminados en etapas previas de lavado, la arena purificada es el producto no flotado. La misma es espesada por medio de hidrociclones espesadores y enviada a una playa de almacenamiento donde el agua drena naturalmente llegando a contenidos de humedad del 5 al 8%, con los que la arena está en condiciones de ser transportada.

4.2.5. LIXIVIACIÓN

Parte del hierro que contamina las arenas para vidrio se halla contenido en minerales que se encuentran formando pátinas sobre los granos de arena puros o rellenando las roturas superficiales y capilares que puedan presentar otros granos.

La eliminación de las pátinas superficiales puede ser lograda total o parcialmente por atrición y lavado. La eliminación total de las pátinas y del relleno en huecos y capilares puede lograrse por disolución en un agente químico adecuado ⁽²⁸⁾. Habitualmente se utiliza el ácido clorhídrico. Se han desarrollado procesos de lixiviación utilizando ácido sulfúrico con ácido oxálico o ácido fluorhídrico diluido en presencia de agentes reductores, usualmente sulfito ácido de sodio.

La lixiviación se realiza luego de eliminadas las partículas gruesas y luego de realizado el deslamado. Se utilizan tanques agitados donde se alimenta la arena en suspensiones al 60% de sólidos y los reactivos elegidos, con un tiempo de residencia aproximado de 10 minutos. Luego, la pulpa es hidrociclada para recuperar el medio lixivante y separar la arena.

5 - APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE BENEFICIO EN DISTINTAS ARENAS

Las distintas técnicas para la purificación de arenas que se enumeraron y detallaron anteriormente, fueron ensayadas en nuestros laboratorios (ver 5.1 y 5.2) utilizando arenas provenientes de distintos yacimientos de las zonas de Ibicuy y Diamante, provincia de Entre Ríos, tradicionalmente reconocidas como abastecedoras de distintas vidrierías. Como ejemplo a escala industrial, se detallan los parámetros de procesamiento en dos yacimientos de Australia (ver 5.3 y 5.4).

5.1. ARENA DE IBICUY ⁽³⁴⁾

En este caso particular, se trata de una arena blancoamarillenta, mediana a fina, redondeada, bien seleccionada, determinándose que el 99.7% en peso corresponde a minerales livianos y el 0.3% a minerales pesados. En la fracción de minerales livianos, la mayor parte del cuarzo está impurificado con hierro principalmente como:

- cuarzo con crecimiento secundario con impurezas de hierro en los contornos primitivos: 4.0%
 - cuarzo con crecimiento secundario: 1.0%
 - cuarzo con hoyuelos y marcas de percusión rellenos con material ferruginoso: 37.0%
 - cuarzo con pátina de hierro: 11.0%
 - cuarzo con inclusiones: 30.0%
- Además, feldespatos: 12.0% y líticos: 2.0%

En la fracción de minerales pesados, el 50% en peso es asignado a ilmenita/magnetita. El resto se asigna a estauroлита, leucoxeno, turmalina, circón, hematita, rutilo, hornblenda, biotita, topacio, líticos etc. Los resultados del análisis químico se resumen en la TABLA 6.

Los resultados del análisis granulométrico y distribución de las impurezas, se resumen en la TABLA 7.

Considerando la información obtenida sobre las características de la arena extraída, la disminución del tenor de hierro estará asociada con un tratamiento que permita:

- Separar las partículas de minerales portadores de hierro por excelencia (ilmenita, magnetita, hematita, etc.), que se concentran preferencial-

mente en la fracción granulométrica inferior a 140 mallas.

- Eliminar las delgadas pátinas que cubren los granos.
- Eliminar el material ferruginoso que se concentra en los hoyuelos y marcas de percusión y/o en crecimientos secundarios.

Los resultados obtenidos para las distintas técnicas de purificación ensayadas se resumen en la TABLA 8.

TABLA 6. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA ARENA DE UN YACIMIENTO DE IBICUY.

Determinación	% m/m
SiO ₂	98,40
Al ₂ O ₃	0,97
Fe ₂ O ₃	0,14
TiO ₂	0,10
K ₂ O	0,20
Na ₂ O	0,04
Cr ₂ O ₃	0,01

TABLA 7. ANALISIS GRANULOMETRICO Y DISTRIBUCION DE IMPUREZAS EN LAS FRACCIONES.

Fracción tamiz ASTM	% m/m	% Fe ₂ O ₃ en la fracción	% Pesados en la fracción	Distribución %	
				Fe ₂ O ₃	Pesados
+ 30	0,25	0,656	-	1,1	-
30 - 40	1,49	0,078	-	0,8	-
40 - 100	68,49	0,075	0,04	37,5	14,0
100 - 140	30,97	0,123	0,21	26,5	31,0
- 140	0,20	26,630	69,70	37,1	55,0
TOTAL	100,00	(0,144)	(0,21)	100,0	100,0

5.2. ARENA DE DIAMANTE ⁽³⁵⁾

Se trata de una arena con cuarzo, feldespatos y plagioclasas parcialmente alteradas a caolín. Presenta escasa hematita, magnetita e ilmenita. Algunos granos se presentan manchados puntualmente por óxidos de hierro. Los resultados obtenidos con las técnicas de purificación ensayadas para una muestra se resumen en la TABLA 9.

Los resultados obtenidos aplicando separación magnética a otra muestra de la misma zona se resumen en la TABLA 10.

TABLA 8. RESULTADOS DE LA APLICACION DE DISTINTAS TECNICAS DE PURIFICACION A UNA ARENA DE IBICUY.

Técnica ensayada	% Recuperación	% Fe ₂ O ₃
Arena de cabeza	100	0,140
CLASIFICACION Clasificación seco: fracción #40-100	83	0,078
CONCENTRACION GRAVITACIONAL C. gravitacional en mesa vibratoria	86-88	0,080-0,071
SEPARACION MAGNETICA S. magnética húmeda alta intensidad	91-97	0,066-0,067
S. magnética seco baja intensidad	81	0,076
ATRACION Atrición básica y clasif. fracc. #40-100	80	0,058-0,061
Atrición ácida y clasif. fracc. #40-100	80	0,070
FLOTACION Flotación ácida sin atrición previa*	87	0,070
Flotación ácida c/atrición y lavado*	97-96	0,065-0,059
Flotación básica sin atrición previa**	80-98	0,070
Flotación básica c/atrición y lavado**	97	0,056
ESQUEMA ESPECIAL Atrición, lavado, acondicionamiento de alta energía, flotación ***	94-96,5	0,046-0,049

NOTAS DE LA TABLA 8:

* Los reactivos se acondicionaron en un tanque agitado con 40-45% de sólidos. Se usaron sulfonatos de petróleo como reactivos colectores.

** Los reactivos se acondicionaron en un tanque agitado con 40-45% de sólidos. Se usó ácido oleico en combinación con sulfonatos de petróleo como reactivos colectores.

*** La arena atricionada y lavada se acondicionó con ácido oleico como reactivo colector, utilizándose el equipo atricionador como tanque de acondicionamiento de reactivos alimentando una suspensión con 70-80% de sólidos. Se comprobó la necesidad del uso de reactivos de tipo amina, dosificados durante la flotación para lograr contenidos de Fe₂O₃ inferiores a 0.050%.

TABLA 9. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE DISTINTAS TÉCNICAS DE PURIFICACIÓN A UNA ARENA DE DIAMANTE.

Técnica ensayada	% Recuperación	% Fe ₂ O ₃
Arena de cabeza	100,0	0,057
ATRACION Atrición y clasificación >#120	99,4	0,032-0,037
FLOTACION Flot. ácida s/atric. previa	99,8-99,6	0,032-0,042
Flot. ácida c/atric. + clasif >#120	97,1	0,026
LIXIVIACION Lixiviación con HCl	99,8	0,038-0,047

TABLA 10. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA SEPARACION MAGNETICA A UNA ARENA DE DIAMANTE.

Técnica ensayada	% Recuperación	% Fe ₂ O ₃
Arena de cabeza	100,0	0,066
SEPARACION MAGNETICA Sep. mag. en húmedo alta intens.	99,6	0,055

5.3. ARENA DEL YACIMIENTO DE JANDAKOT, AUSTRALIA (31)

Las arenas del depósito Jandakot, en Perth, Australia del oeste, contienen 0.05% de Fe₂O₃ y son procesadas para obtener un producto que tenga menos de 5% m/m con granulometría superior a 600 micrometros y menos de 0.015% de Fe₂O₃. Los estudios indican que el hierro está contenido principalmente en la forma de minerales pesados, especialmente ilmenita. Separada la fracción liviana, el análisis químico revela que tiene 0.006% de Fe₂O₃, lo que indica que la separación gravitacional es la técnica adecuada para purificar este material. La eliminación del material con granulometría superior a 600 micrometros se realiza por medio de hidrociclones, ya que la clasificación por tamices mostró problemas de taponamiento en las mallas debido a la forma de las partículas. En la TABLA 11 figuran las características del producto que se obtiene.

TABLA 11. PROCESAMIENTO DE UNA ARENA DEL YACIMIENTO DE JANDAKOT (AUSTRALIA).

Técnica ensayada	% Recuperación	% Fe ₂ O ₃
Arena de cabeza	100	0,50
CONCENTRACION GRAVITACIONAL Concentración con espiral	90	0,11

5.4. ARENA DEL YACIMIENTO DE NORMANVILLE, AUSTRALIA (31).

Se procesan arenas con contenidos de minerales pesados entre 0.4% a 4.0%. Los principales minerales pesados detectados son granate e ilmenita, mientras que andalucita, epidoto, rutilo, circón y monacita se presentan en menor cantidad.

El circuito incluye el procesamiento por tamizado en tambor para eliminar ramas, piedras etc., pasaje por tamiz vibratorio que realiza un corte granulométrico en 500 micrometros, tanque agitado y tornillo clasificador, atrición y circuito de flotación adecuado tanto para la producción de arena para vidrio ámbar como para vidrio plano.

En la flotación se usa una sola etapa para remover feldespatos, ilmenita, rutilo, granate y monacita, utilizando una mezcla de colectores catiónico y aniónico: una amina y un sulfonato de petróleo. Cuando se desea obtener arena para vidrio ámbar, se dosifica tan solo el sulfonato de petróleo.

Los resultados del análisis químico antes y después de la flotación en sus dos opciones se resumen en la TABLA 12.

Análisis químico (%)	Cabeza	Producto de flotación	
		p/v ámbar	p/v incoloro
Fe ₂ O ₃	0,60	0,07	0,030
Al ₂ O ₃	0,90	0,70	0,060
CaO	0,80	0,30	0,040

6. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO

6.1. ELECCIÓN DE LA TÉCNICA MÁS ADECUADA

Analizando los ejemplos presentados, puede concluirse que cada tipo de arena requiere para su purificación la implementación de un circuito propio, de acuerdo con el tipo de impurezas que deben ser eliminadas. Por lo tanto, es necesario realizar una cuidadosa evaluación del depósito a explotar y estudios de purificación a nivel laboratorio, para asegurar la calidad del mineral que se envíe a la planta de procesamiento, diseñada adecuadamente en función de las impurezas a eliminar y el cumplimiento de especificaciones comerciales de granulometría y composición química fijadas para el producto final.

Los ensayos de laboratorio mostrarán la mejor calidad que puede lograrse con una dada arena y que se tratarán de reproducir en la planta de procesamiento, teniendo en cuenta las limitaciones y dificultades que pueden surgir en el cambio de escala ("**scale up**"), en procesos tales como por ejemplo la separación de finos por clasificación, la atrición y lixiviación para la remoción de pátinas superficiales que contaminan los granos de arena, etc. La realización de ensayos en escala piloto puede proveer datos para el correcto diseño de los equipos de la planta ⁽³⁶⁾.

Generalizando, puede decirse que si el hierro se encuentra presente solamente en los minerales pesados, la concentración gravitacional será la etapa más importante del proceso de purificación, que además eliminará otros minerales pesados como cromitas, espinelas etc., y la eficiencia del proceso se mantendrá en todas las granulometrías.

En cambio, la concentración gravitacional se torna ineficiente cuando se trata de separar partículas planas y/o de densidades próximas a la de la arena como limonitas, o minerales semi-pesados. En este caso, la separación magnética de alta intensidad en húmedo puede ser la alternativa para separar estos minerales conformando un producto intermedio. Campos magnéticos con intensidades por encima de los 1,4 Wb.m⁻² son necesarios para la separación de partículas de minerales de baja susceptibilidad magnética.

Si una alta proporción del hierro se encuentra como pátinas o como manchas en los granos de arena, que no pueden ser eliminadas por atrición y además, deben eliminarse impurezas con densidad próxima a la de la arena

como ser feldspatos, líticos, carbonatos etc., la flotación parece ser la técnica más adecuada para la purificación y será la parte principal del circuito de purificación que se implemente.

6.2. EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS COSTOS DE PROCESAMIENTO PARA PURIFICACIÓN DE ARENAS PARA VIDRIOS

En el procesamiento de arenas para la industria del vidrio, la naturaleza abrasiva de la arena genera la necesidad de trabajar con equipamientos recubiertos o contruidos con materiales resistentes a la abrasión; así por ejemplo, el uso de poliuretanos para fabricar partes de bombas, cañerías y revestimientos en celdas de flotación ha probado ser una solución técnica y económicamente efectiva en estos casos como en el reemplazo del uso de zarandas contruidas en acero inoxidable ⁽³⁶⁾.

En su estudio sobre las posibilidades de la aplicación de técnicas de la metalurgia extractiva a la producción de arenas para vidrio, CARTA ⁽³⁰⁾ realiza un análisis económico en relación con la inversión y los costos operativos de una planta de procesamiento de arena para la fabricación de vidrio que incluye etapas de atrición, clasificación y flotación, con posibilidades de obtener productos de distinta calidad, comercializables en el mercado a distintos valores.

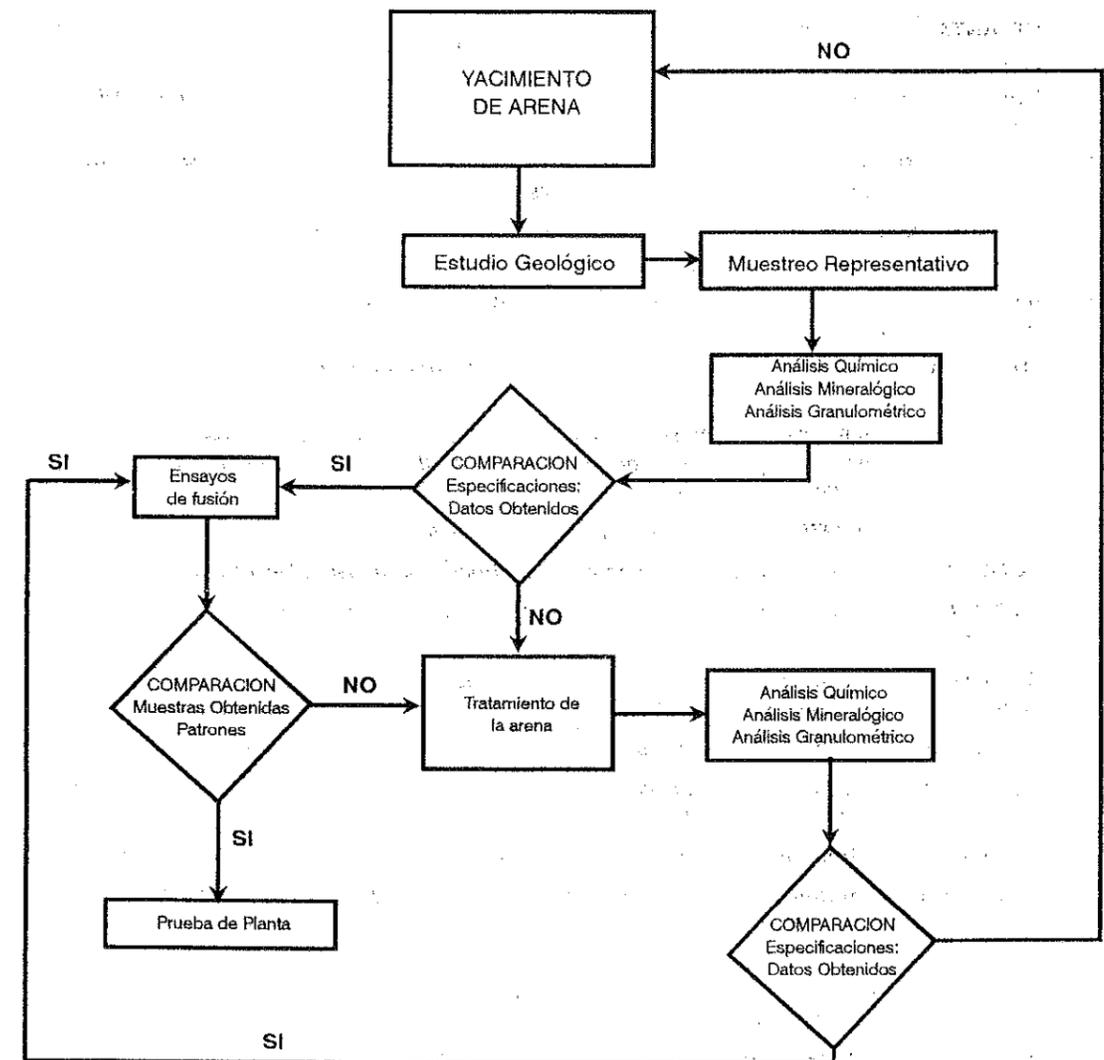
Según la experiencia obtenida en una planta de purificación de arenas en Australia ⁽³¹⁾, cuyos resultados se mencionaron anteriormente, para obtener un producto con igual calidad, el costo por tonelada por unidad de área superficial de procesamiento es para una espiral aproximadamente la mitad que para un banco de celdas de flotación. Las espirales modernas son fabricadas de poliuretano, en unidades modulares con escasas partes móviles que hacen muy bajo su costo operativo.

La separación magnética de alta intensidad en húmedo tiene alto grado de inversión, pero con bajos costos operativos, por lo tanto deberá entrar en consideración cuando las otras técnicas no resulten adecuadas. Debe tenerse en cuenta que el uso de la separación magnética de alta intensidad en húmedo permite separar tanto partículas muy finas de material ferruginoso como así también partículas con gruesas pátinas de óxido.

En relación a los costos operativos, el costo de bombeo de una suspensión de arena es el mismo si se alimenta a una planta de concentración gravitacional o a una planta de flotación. No obstante, en la flotación existe un consumo energético adicional en la etapa del acondicionamiento de reactivos. La flotación tiene además asociado el costo de los reactivos, en tanto que el costo de mantenimiento de equipos, relacionado con el desgaste por abrasión que produce la arena, es comparable en ambos casos.

6.3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE UNA ARENA PARA FABRICACIÓN DE VIDRIO

Para evaluar la factibilidad técnica de la utilización de un yacimiento de arena para la fabricación de vidrio, resulta aconsejable, de acuerdo con todo lo dicho anteriormente, seguir una secuencia lógica de etapas. Estas etapas se representan en la FIGURA 2 en forma de diagrama de flujo, que podría repetirse, en forma iterativa, todas las veces que fuera necesario.



7. BIBLIOGRAFÍA

1. DOUGLAS, R.W. and FRANK, S.: "A history of glassmaking". G.T.Foulis & Co., Henley-on-Thames (1972).
2. SCAGLIONI, O.: "L'industria del vetro per contenitori e table ware". Faenza Editrice, Faenza (1988).
3. ANON.: "Silica sand. Competition in a tight market". IM Glass & Ceramics Survey (1987), p. 61-73.
4. GRIANTA, L.: "Contribución al estudio de las arenas argentinas". Tesis: Universidad de Buenos Aires (1911).
5. PUIGGARI, M.: "Visita a las fábricas de vidrio". Anales Sociedad Científica Argentina 2 (1876), p. 198-204.
6. CORDINI, I.R.: "Contribución al conocimiento de la geología económica de Entre Ríos". Dirección General de Industria Minera, Buenos Aires (1949).
7. BATTAGLIA, A.: "Informe preliminar de las arenas de Entre Ríos". Servicio Geológico, Secretaría de Minería, Carpeta N° 196 (1949).
8. ATBIAV (Asociación Técnica Brasileira das Industrias Automáticas do Vidro): "Especificação de matérias-primas para fabricação de vidro". Vidro 8 (1989) N° 65, p.4-13.
9. MARI, E.A.: "Los vidrios. Propiedades, tecnologías de fabricación y aplicaciones". AMERICALEE, Buenos Aires (1982).
10. DE GIUSTO, M. y ETCHEVERRY, R.: "Análisis de imágenes en arenas destinadas a la fabricación de vidrio. Determinación de las fases ferruginosas". Actas II Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. La Plata (1992), p. 1-3.
11. British Standard 2975: "Sand for making colourless glasses" (1978).
12. TOOLEY, F.V.: "Handbook for glass manufacture". Books for Industry, New York (1974).
13. HARBEN, P.: "Glass raw materials. Aspects of quality, quantity and prices". Ind. Min. (1991), N° 7, p. 31-43.
14. SUBATIN, J.L.: "Especificaciones de materias primas para la fabricación de vidrios planos". Cerámica y Cristal 25 (1986) 98, p. 53-54.
15. MILLS, H.N.: "Raw materials for glass manufacture". Glass Ind. (1977), N° 11, p. 37-41.
16. MILLS, H.N.: "Empleo de arena con alto contenido de hierro en vidrio blanco para envases". Vidrio Latinoamericano (Sept-Nov. 1984), p. 19-21.
17. ASTM C-146-80 (Reapproved 1989): "Standard test methods for chemical analysis of glass sand".
18. ICG (International Commission on Glass), Technical Committee 2: "Analytical determination of impurities in glassmaking sands containing at least 95% SiO₂". Glass Technol. 34, (1993) N° 6, p. 239-248.
19. ANON.: "Specifications for and recommended procedures for the testing and analysis of glassmaking sands 1978". Glass Technol. 19 (1978) 5, p. 93-101.
20. HREGLICH, S., PROFILO, B., VERITA M.: "Valutazione chimico-mineralogica di alcune sabbie impiegate per la produzione del vetro". Rivista Staz. Sper. Vetro (1979), N° 5, p. 122-130.
21. SEWELL, P.A. and MORGAN, A.M.: "Physical adsorption properties, structure, and composition of some glassmaking sands". Glass Technol. 11 (1970) N° 1, p. 23-28.
22. NIETO, M.I., DIEZ, J.C., DABRIO, M. y OTEO, J.L.: "Determinación de la superficie específica y de la forma del grano en arenas y materias primas para vidriería". Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr. 14 (1975) N° 5, p. 449-451.
23. IBIDEM: "Sobre el 'factor de forma' de los granos de las arenas para vidriería. Microscopía electrónica de barrido". Ibid. 15 (1976) N° 3, p. 171-173.
24. JOBSTRAIBIZER, A.: "Sabbie per vetreria: origine, natura e caratterizzazione dei giacimenti; metodi analitici di laboratorio". Rivista Staz. Sper. Vetro (1979), N° 3, p. 113-121.
25. GOERK, H.: "Glass raw materials and batch preparation". Survey Papers XIth Int. Congress on Glass, Praga (1977), p. 40-111.
26. FLETCHER, W.W.: "The sieve analysis of glassmaking sands. Part 1. A survey of existing conditions in the industry". Glass Technol. 24 (1983) N° 2, p. 57-59.- Part 2: "The results of two collaborative investigations". Ibid., p. 59-62.
27. CARTER, G.J., KELLY, H.J. and PARSONS, E.W.: "Industrial silica deposits of the Pacific Northwest". U.S. Bureau of Mines IC 8112 (1962).
28. SEGROVE, H.D. and STANYON, R.W.: "Processing of British sand for glass-making". Proc. IX Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, Vol 3 (London, 1969), p. 583.
29. DI STEFANO, P., FOLLONI, M.: "Sabbie silicee: il giacimento di Fossanova come fonte nazionale di materia prima per l'industria vetraria e la fondería". Rivista Staz. Sper. Vetro (1979), N° 5, p. 32-54.
30. CARTA M.: "Possibilità dell' applicazione mineralurgica per l'approvvigionamento di materie prime per il vetro". Rivista Staz. Sper. Vetro (1979), N° 5, p. 62-79.
31. RICHARDS, R.G., and FARMER, A.D.: "The processing of silica sand for glass-making feedstock. Australian practice". Proc. VI Industrial Minerals International Congress RGR. (Toronto, 1984).
32. CARTER, G.J., HARRIS, H.M. and STRANDBERG, K.G.: "Beneficiation studies of the Oregon coastal dune". U.S. Bureau of Mines RI 6484 (1964).
33. BENTZEN, E.H.: "Producing sand for the glass industry". AIME Annual Meeting 1977.
34. CORREA, A.F. y CELEDA, A.M.: "Purificación de una arena para fabricación de vidrio blanco". Actas I Simposio sobre Tecnología de Flotación de Minerales. San Juan, Argentina (1992).
35. "Purificación de una arena de Diamante, Pcla. de Entre Ríos". Informe CIIM, 1982.
36. KIRBY, C. and LAVENDER, M.: "Development in the glass sands supply industry". Industrial Minerals, (1987), p. 55-63.
37. PUTRIN, A.M.; NAUMOVA, R.A. y DIMITRIEV, J.G.: "Instalación para el enriquecimiento de arenas cuarcíferas mediante flotación" (ruso). Steklo i Keramika 30 (1973) 5, p. 7-8.
38. TOTINO, L.: "El vidrio - características generales". Panorama Minero, marzo 1984, p. 38-50.
39. SPARKS, R.W.: "Glass sand in the 1980s". Proc. Minerals and Chemicals in Glass and Ceramics, Corning, N.Y. (October 1981), p. 9-14.
40. BAMFORD, C.R.: "Colour generation and control in glass". ELSEVIER, Amsterdam (1977).

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer muy especialmente al Ing. Emilio Dublanc y al Lic. Carlos R. Hense por la lectura y discusión del manuscrito y sus útiles sugerencias para introducir correcciones al mismo.