

CAPACITACIÓN EN VIVO

¿Has constatado la eficacia de tu filtro (rápido) de lecho profundo?

MARTES
15 de julio

Presentado por:
GERMÁN GROSSO

Carbotecnia
PURIFICACIÓN AVANZADA



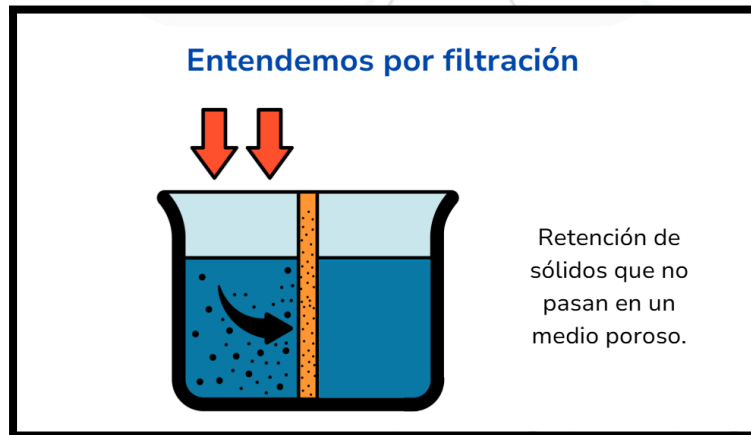
Cuando hablamos de filtración en lecho profundo, comúnmente nos referimos a la filtración rápida en lecho profundo. Es la que se lleva a cabo en un tanque atmosférico o en un recipiente a presión en los que se instala una cama formada por un medio granular. El medio granular más utilizado es la arena sílica, por lo que a estos filtros se les suele nombrar “filtro de arena”. También se les conoce como “filtro multimedia”, cuando el medio granular está compuesto por dos o tres materiales distintos.



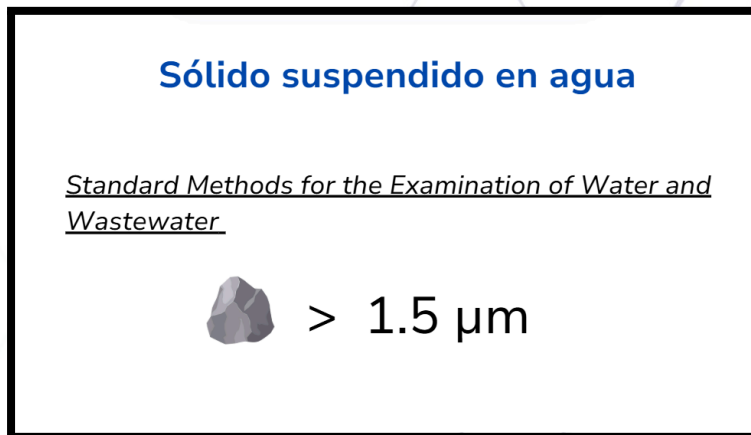
Como dijimos, los filtros rápidos de lecho profundo pueden ser tanques a gravedad o recipientes a presión. En ingeniería de procesos, “tanque” (*tank*) es el que opera a presión atmosférica, y “recipiente” (*vessel*) es el que opera a presión.



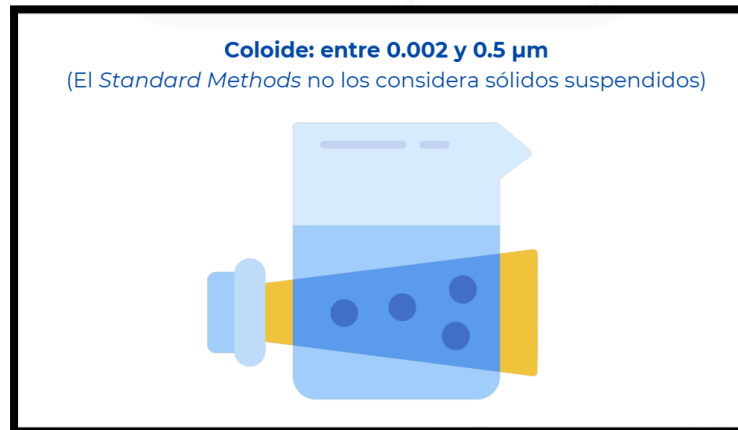
La filtración lenta en lecho profundo, aunque es un proceso de filtración, es más un reactor biológico. Estos equipos ocupan grandes extensiones. Se forman bacterias en la cama de arena y degradan la materia orgánica (disuelta y suspendida) que contiene el agua. La velocidad de flujo es menor al 5% de la que se utiliza en la filtración rápida. Estos equipos no se retrolavan.



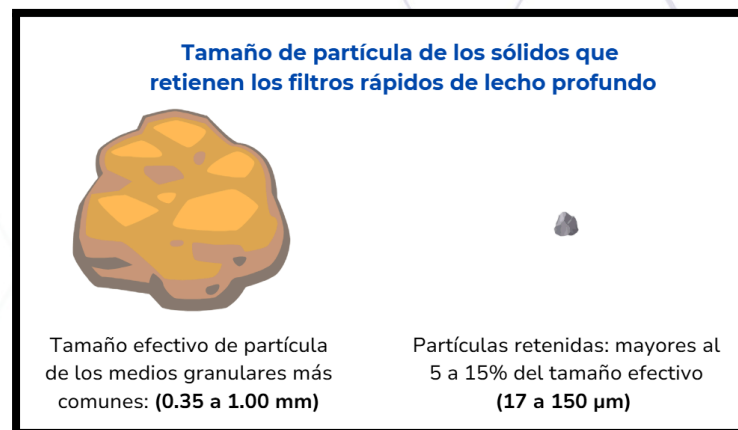
En el ámbito del tratamiento de agua, entendemos por “filtración” a la separación de sólidos suspendidos que se encuentran presentes en ella, a través de un medio poroso que los retiene mecánicamente. Los sólidos quedan retenidos debido a su tamaño.



Desde el punto de vista de la fisicoquímica, sólido es un estado de agregación de la materia en el que las moléculas que lo forman se encuentran juntas, mantienen una gran cohesión y oponen resistencia a cambios de forma y de volumen. Los líquidos solamente oponen resistencia a cambios de volumen. Los gases no oponen resistencia a cambios ni de forma ni de volumen. Desde el punto de vista de la prueba para determinar sólidos suspendidos totales en agua del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, sólido es una partícula mayor a 1.5 μm .



Los coloides son sólidos suspendidos de un tamaño muy pequeño. En tratamiento de agua se considera que son de entre 2 y 500 nm (para la IUPAC y otros organismos, los coloides miden entre 1 y 1000 nm). Ya que 500 nm son 0.5 μm , no se reflejan como sólidos suspendidos totales en los resultados de análisis de agua.



Tamaño efectivo de partícula de los medios granulares más comunes: (0.35 a 1.00 mm)

Partículas retenidas: mayores al 5 a 15% del tamaño efectivo (17 a 150 μm)

El 95% de las partículas que retiene el medio granular en un filtro rápido de lecho profundo son mayores al 5 - 15% del tamaño efectivo de partícula del propio medio granular. Ya que los medios granulares más comunes que se utilizan en filtros rápidos de lecho profundo suelen tener un tamaño efectivo de partícula de entre 0.35 y 1.00 mm, retienen partículas mayores a 17 a 150 μm .

Medios granulares filtrantes de textura rugosa



Teoría de la filtración: medios granulares de textura más rugosa pueden retener sólidos suspendidos **ligeramente** menores.

Un medio granular de textura más rugosa puede retener sólidos suspendidos ligeramente menores, pero no significativamente menores, como a veces se afirma en publicaciones comerciales.

Cuando la filtración rápida en lecho profundo hace algo más que filtrar mecánicamente

- Adsorción (repulsión).
- Precipitación química.
- Oxidación, precipitación o catálisis ocasionada por compuestos adsorbidos o precipitados en la superficie del medio granular.
- Reacciones biológicas.

En los fenómenos anteriores intervienen moléculas disueltas. No obstante, los fenómenos químicos en la cama granular pueden generar partículas secundarias o modificar las existentes, lo que sí mejora los valores relativos a la eficacia de la filtración.

Los fenómenos mencionados en la imagen pueden influir indirectamente en la presencia de sólidos suspendidos en agua cuando:

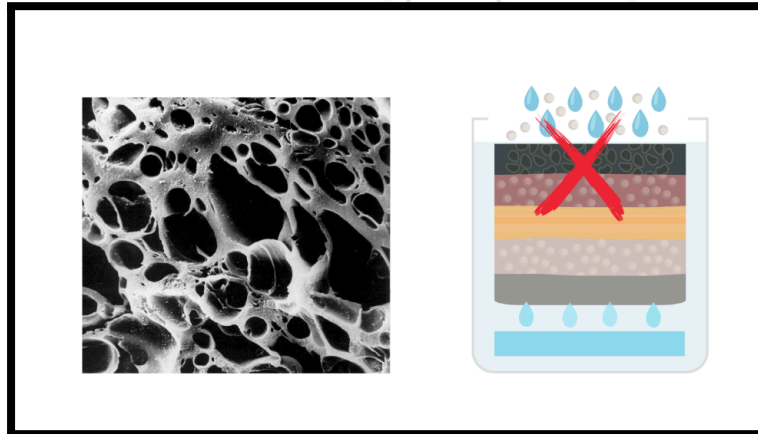
a) Provocan o favorecen la formación de sólidos nuevos:

Ejemplo: precipitación de hierro como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, o de manganeso como MnO_2 (forman partículas que retienen).

b) Modifican las cargas superficiales de partículas, y de esta manera favorecen su aglomeración.

c) Adsorción de iones sobre partículas coloidales puede neutralizar cargas y favorecer así la aglomeración y retención mecánica.

c) Aportan sitios de nucleación o retención superficial: las superficies rugosas o cargadas del medio pueden adsorber flóculos blandos, arcillas o fragmentos de algas.



Medios granulares con mayor porosidad no necesariamente filtran mejor. Si así fuera, el carbón activado sería el mejor medio granular filtrante ya que es el que posee mayor área superficial (y no filtra mejor que otros). Como vimos en la imagen previa, algunos medios granulares con porosidad pueden tener un efecto indirecto en los parámetros con los que se evalúa la eficacia de la filtración.



La necesidad o no de filtración rápida en lecho profundo va a depender del origen del agua...



... del destino que le vamos a dar a esta.



... y del caudal que requiere tratarse.

Destino del agua	Parámetros que hay que cumplir
Red municipal (NOM-127-SSA1-2021)	Turbiedad < 3.0 UNT Color verdadero < 15 Pt/Co
Bebidas embotelladas y hielo (NOM-201-SSA1-2015)	Turbiedad < 3.0 UNT Color verdadero < 15 Pt/Co
Ósmosis inversa	SDI ₁₅ < 5
Descarga de agua residual tratada (NOM-001-SEMARNAT-2021)	Sólidos suspendidos totales < a: VI: 28 a 140 mg/l PM: 20 a 100 mg/l

El destino del agua que se va a filtrar puede conllevar el cumplimiento de parámetros relacionados con la presencia de sólidos suspendidos en agua, como los mismos sólidos suspendidos totales, la turbidez y el SDI (*Silt Density Index*). El color verdadero también puede afectarse, ya que es el que corresponde al agua filtrada en membrana de 0.45 µm. Si el color se debe únicamente a sólidos disueltos, no se afectará al filtrar el agua en la membrana de 0.45 µm. Si el color se debe también a sólidos mayores a 0.45 µm, se afectará al filtrarse por la membrana

Determinación de SDI (*Silt Density Index*) con base en ASTM D-4189

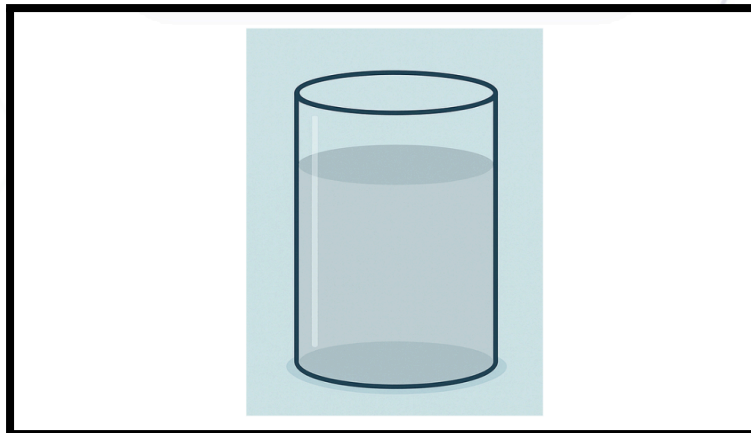
Se filtra agua a través de una membrana de 0.45 µm (generalmente de acetato de celulosa). La presión se mantiene constante a 30 psi (2.07 bar). La temperatura debe estar entre 20–25 °C.

Se mide el tiempo inicial (T_0) que tarda en filtrar 500 mL de agua. Luego se continúa la filtración durante 15 minutos (sin interrupción).

Se mide nuevamente el tiempo (T_{15}) que tarda en filtrar 500 mL al minuto 15.

$$SDI = \left(1 - \frac{T_0}{T_{15}}\right) \times \frac{100}{15}$$

Este es el método resumido para medir el SDI_{15} de agua (en 15 minutos).

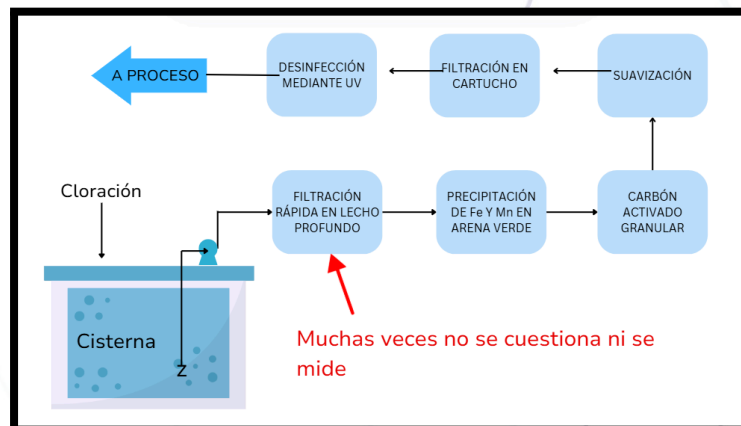


Cuando un agua presenta turbidez, puede provenir de partículas de muy distintos tamaños. Si estas son menores a 1 - 20 µm, es probable que la turbidez solamente podrá disminuirse mediante un proceso de coagulación-floculación.

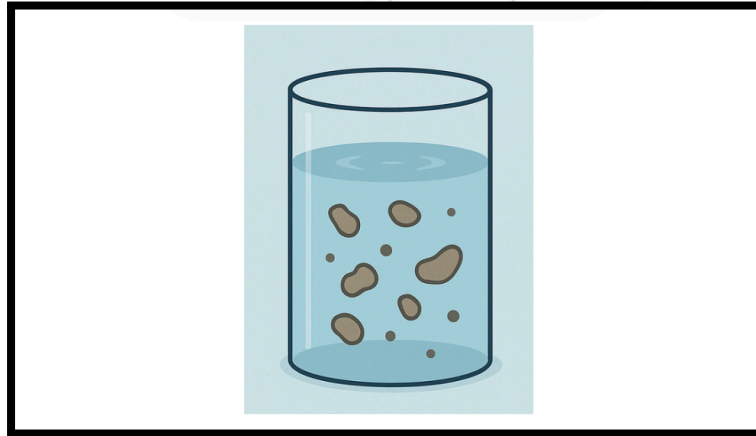
Potabilizadora municipal



Hay casos en que la eficacia del filtro de lecho profundo es tan importante, que se le da seguimiento acucioso. Un ejemplo, son las potabilizadoras municipales.



En los procesos industriales de tratamiento de agua, casi siempre se incluye la filtración rápida en lecho profundo, sin cuestionar si es necesaria o si es el tipo de filtración más adecuada. Cuando el agua a tratar contiene una baja cantidad apreciable de sólidos suspendidos visibles, ¿pueden retenerse en el CAG o en un filtro de cartucho? Si no son apreciables visualmente, es común que no nos cuestionamos si realmente requerimos el proceso de filtración y que luego no midamos si su aportación es importante. Habría que medir la turbidez, los sólidos suspendidos totales y el SDI en el agua de entrada y salida de un filtro de lecho profundo, y buscar cuál de estas variables refleja la eficacia del filtro rápido de lecho profundo.



Supongamos que tenemos agua de pozo y únicamente hay que retener sólidos mayores a 1 μm .



Si la cantidad de sólidos es tan baja, que el filtro utilizado se colmataría en mucho tiempo (varios días o semanas), pudiera ser más competitivo un filtro de cartuchos, uno de canasta o uno de malla o discos de limpieza manual.

Filtros de discos autolimpiante



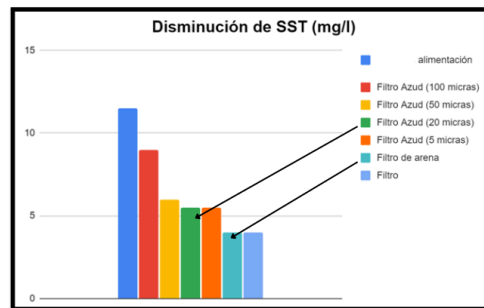
Si se requiere limpiar el filtro más de una vez por semana y no es necesario un filtro rápido de lecho profundo

Regla heurística: cuando la concentración de sólidos a retener en el filtro es mayor al 0.01% (100 mg/L si la densidad del sólido es cercana a la del agua

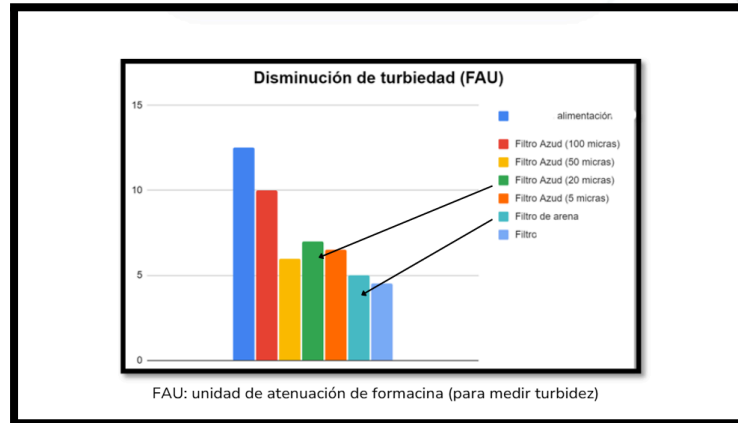
Ahorran entre el 95 y el 99% de agua de retrolavados

Si el filtro se colmataría frecuentemente (más de una vez por semana), probablemente sea más adecuado instalar un filtro de discos autolimpiante. Este requiere una cantidad mucho menor de agua para retrolavar que un filtro de lecho profundo. Los filtros de discos autolimpiantes ahorran entre el 95 y el 99% del agua de retrolavado.

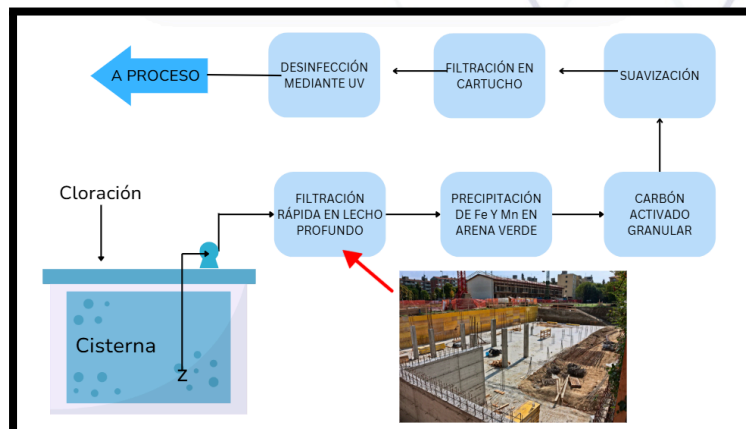
Filtración después del proceso de coagulación-floculación-clarificación en una potabilizadora que parte de una fuente de agua superficial



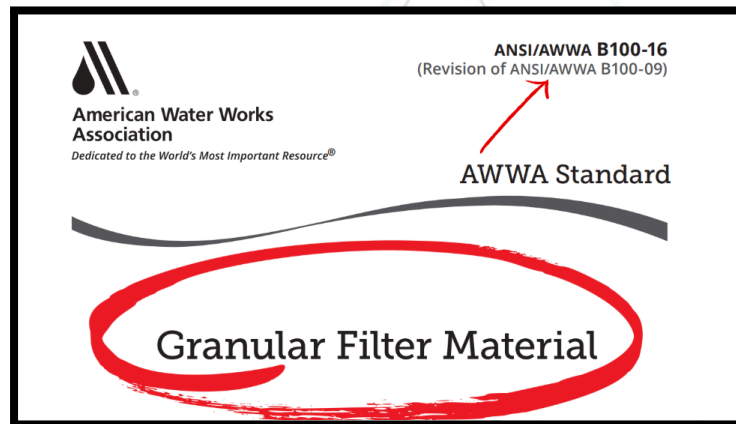
Estos son los resultados comparativos entre filtración en discos y filtración en lecho profundo de arena sílica en una planta potabilizadora que parte de una fuente de agua superficial. La filtración se llevó a cabo después del proceso de coagulación-floculación-clarificación. Se puede observar que tanto los sólidos suspendidos totales disminuyen más en los filtros de arena que en filtros de discos de hasta 5 μm . Considerando el tamaño efectivo de la arena sílica utilizada (0.5 mm), si esta únicamente hubiera retenido partículas mecánicamente (debido a su tamaño), en el mejor de los casos, debería haber logrado la misma disminución en la concentración de sólidos suspendidos totales que el filtro de discos con graduación de 20 μm . Si la arena logró una mayor disminución de los sólidos disueltos totales (no mucho mayor), debe de haber sido como un efecto indirecto de los fenómenos distintos a la filtración. Como se observa, la arena disminuyó los sólidos suspendidos totales más de lo que los disminuyó el filtro de discos con graduación de 20 μm , pero no mucho más.



La arena también logró una disminución mayor de la turbidez que el filtro de discos de 20 μm , pero no mucho mayor.



Si después de analizar el caso encontramos que el tren de tratamiento de agua que vamos a instalar requiere filtración rápida en lecho profundo, esta irá normalmente al inicio. Podría equivaler a los cimientos de un edificio. Desde otro punto de vista, si no realizamos correctamente la filtración, etapas posteriores deberán realizar los que el filtro rápido de lecho profundo no llevó a cabo eficazmente.



La norma ANSI/AWWA B100-16 *Granular Filter Material* es una muy buena referencia en relación a la calidad de los medios filtrantes, la calidad de las camas de soporte y las prácticas para la instalación de las mismas. Vale la pena adquirirla. Está disponible en la página de la AWWA.



En Carbotecnia ponemos particular atención a la selección de medios granulares filtrantes. Estos deben cumplir con los parámetros de calidad que establece la norma B100-16. Lo consideramos un compromiso ético.

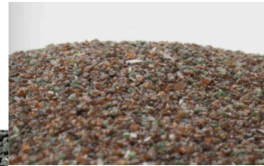
Medios granulares que considera la última revisión del estándar ANSI/AWWA B100 (*Granular Filtering Material*): 2016



arena sílica



antracita



arenas de alta densidad

- Granate: $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
- Ilmenita: FeTiO_3
- Magnetita: Fe_3O_4
- Hematita: Fe_2O_3

Estos medios granulares tienen como características comunes: suficiente resistencia mecánica, suficientemente libres de materiales ajenos, y suficientemente libres de compuestos solubles que modificarían el perfil de sabor y retrogusto del agua.

Calidad física y química de antracita



- Ausencia visible de materiales ajenos, incluyendo carbones que no sean antracita.
- Solubilidad en HCl al $\approx 18\%$ en peso $< 5\%$.
- Gravedad específica aparente > 1.4 (ASTM C128; debe reportarse también gravedad específica OD, gravedad específica SDD y valor de absorción).
- Dureza Mohs > 2.7 .
- Si hay duda: ASTM D388 Standard Classification of Coal by Rank (Resultado: es antracita y no es antracita). No debe ser carbón bituminoso.

La imagen muestra las características físicas y químicas que debe tener una antracita que se utilizará en potabilización de agua, de acuerdo con el estándar ANSI/AWWA B100-16. El estándar señala que deben reportarse todos los valores que se obtienen al aplicar el estándar ASTM C128 [*Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*]: gravedad específica aparente, gravedad específica OD (*oven dry*, que corresponde a la antracita secada en horno), gravedad específica SDD (*saturated surface-dry*, que corresponde a la antracita con los poros y grietas inundados con agua, y sus gránulos secos por la parte exterior) y el valor de absorción.

Si es notoria la presencia de materiales ajenos, el material debe estar dentro de los siguientes límites: (1) Máximo 1% de material menor a la malla 200 mediante lavado (determinado de acuerdo con ASTM C117); (2) Máximo 0.5% de impurezas inorgánicas como virutas de madera, raíces y ramas (determinado por ASTM C123, excepto porque se usa base seca y no SSD. El

material flotante debe separarse inmediatamente. El líquido debe tener gravedad específica de 1.0).

Calidad física y química de arena sílica



- Gránulos duros, durables y densos con al menos 85% de SiO_2 . Deben resistir degradación durante el manejo y el uso.
- Ausencia visible de materiales ajenos. De no cumplirse, máx. 2% material menor a malla 200, y color del extracto en NaOH al 3% < 5 unidades Pt-Co.
- Solubilidad en HCl al \approx 18% en peso < 5%.
- Gravedad específica aparente > 2.5 (ASTM C128).
- Si hay duda: ASTM C114-15 Standard Test Method for Chemical analysis of Hydraulic Cement (Resultado: % de SiO_2).

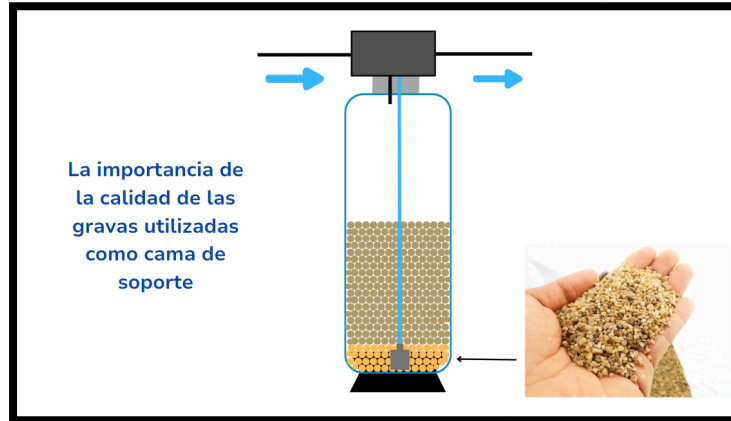
Estas son las características físicas y químicas con las que debe cumplir una arena sílica que se utilizará en potabilización de agua. En caso de que sea notoria la presencia de materiales ajenos, el material debe estar dentro de los siguientes límites: (1) Máximo 2% de material menor a la malla 200 mediante lavado (determinado de acuerdo con ASTM C117); (2) El color del extracto con solución de NaOH al 3% no debe ser mayor al estándar, que corresponde a 5 unidades de Pt-Co.

Calidad física y química de arenas de alta densidad (granate, ilmenita, magnetita, hematita y similares)




- Gránulos duros, durables y densos. Deben resistir degradación con el manejo y el uso. Al menos 95% del material asociado.
- Ausencia visible de materiales ajenos. De no cumplirse, máx. 2% material menor a malla 200, y color del extracto en NaOH al 3% < 5 unidades Pt-Co.
- Solubilidad en HCl al \approx 18% en peso < 5%.
- Gravedad específica aparente > 3.8 (ASTM C128).

Estas son las características físicas y químicas con las que debe cumplir la arena de alta densidad. En caso de que sea notoria la presencia de materiales ajenos, el material debe estar dentro de los siguientes límites: (1) Máximo 2% de material menor a la malla 200 mediante lavado (determinado de acuerdo con ASTM C117); (2) El color del extracto con solución de NaOH al 3% no debe ser mayor al estándar, que corresponde a 5 unidades de Pt-Co.



Es estándar ANSI/AWWA B100-16 también contempla la calidad física y química que deben tener las gravas de soporte: tanto las típicas como las de alta densidad.

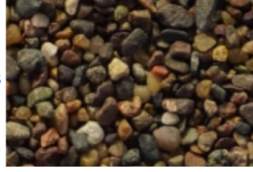
Calidad física y química de grava como cama de soporte
(cuando las perforaciones o ranuras del distribuidor inferior no son menores a la mitad del tamaño de los gránulos más pequeños del medio a retener)



- Alta proporción de partículas redondas.
- Resiste degradación durante el manejo y el uso.
- Ausencia visible de materiales ajenos.
- Gravedad específica SDD > 2.5 (ASTM C128).
- No más de 25% de partículas con más de una cara fracturada.
- No más de 2% de partículas elongadas ($D/d > 5$).
- Solubilidad en ácido: < 5% (grava < 1/8"); < 17.5% (grava entre 1/8" y 1"); < 25% (grava > 1").

Para el caso de la grava sílica, si es notoria la presencia de materiales ajenos, el material debe estar dentro de los siguientes límites: (1) Máximo 1% de material menor a la malla 200 mediante lavado (determinado de acuerdo con ASTM C117); (2) Máximo 0.5% de carbón, lignita y otras impurezas inorgánicas como raíces y ramas (determinado por ASTM C123 para partículas de baja densidad mediante líquido de gravedad específica de 2.0).

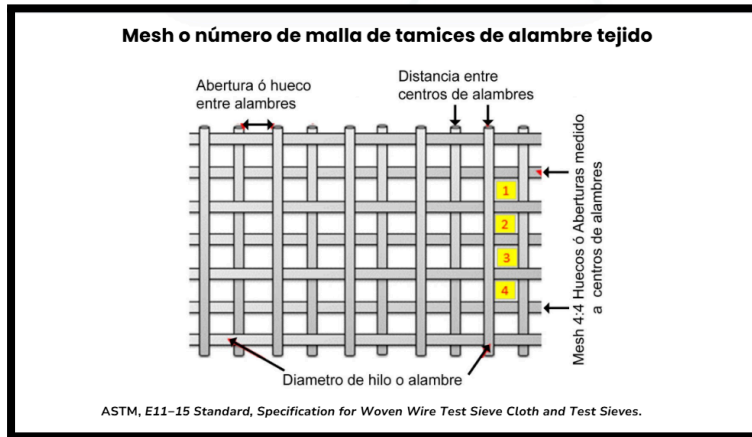
Calidad física y química de grava de alta densidad como cama de soporte (cuando la cama inferior del medio filtrante es arena de alta densidad o cuando se requiera una grava menos susceptible a moverse)



- Granate, ilmenita, magnetita, hematita o minerales asociados.
- Alta proporción de partículas redondas.
- Resiste degradación durante el manejo y el uso.
- Ausencia visible de materiales ajenos.
- Gravedad específica SDD de al menos el 95% del material > 3.8 (ASTM C128).
- No más de 2% de partículas elongadas ($D/d > 5$).
- Solubilidad en ácido: < 5% (grava < 1/8"); < 17.5% (grava entre 1/8" y 1"); < 25% (grava > 1").

Cuando la cama inferior del medio filtrante es arena de alta densidad o cuando se requiere una grava menos susceptible a moverse, es necesaria una grava de alta densidad como cama de soporte. La imagen muestra las características físicas y químicas que debe tener una grava de alta densidad de acuerdo con el estándar ANSI/AWWA B100-16.

Especificación de la distribución de tamaño de partícula de un medio granular filtrante



Según normas como ASTM E11 o ISO 3310, el número de malla se define como el número de alambres por pulgada, siempre que el tejido sea uniforme. En casos donde el número no sea exacto, se redondea conforme a las reglas estándar: hacia el entero inferior si la fracción es ≤ 0.5 , y al superior si > 0.5 .

Abertura de tamices de alambre tejido (U.S. Standard Mesh)

Número Malla (U.S. STD. Sieve)	Abertura (mm)	Número Malla (U.S. STD. Sieve)	Abertura (mm)
4	4.75	35	0.600
5	4.00	40	0.420
6	3.35	45	0.354
8	2.38	50	0.297
10	2.00	60	0.250
12	1.68	70	0.210
14	1.41	80	0.177
16	1.19	100	0.149
18	1.00	200	0.074
20	0.841	325	0.044
25	0.707	400	0.037
30	0.600		

Aunque el número de malla está definido de forma estandarizada como el número de alambres por pulgada lineal, el tamaño real de las aberturas varía según el diámetro del alambre con el que se fabrica la malla. Por ello, dos mallas con el mismo número pueden tener distintas aberturas si sus alambres difieren en grosor. En el ámbito de los medios granulares utilizados en filtración de agua, el estándar más utilizado es el ASTM E11. Este estándar especifica las dimensiones nominales de las mallas de ensayo, incluyendo el número de malla, el diámetro del alambre y la abertura resultante. La tabla muestra los valores de abertura correspondientes a distintas mallas conforme a dicho estándar.



Para llevar a cabo un análisis de distribución de tamaño de partícula en un medio granular, se emplean mallas estandarizadas conforme al sistema *U.S. Standard Sieve Series* (ASTM E11). Es altamente recomendable utilizar un equipo de tamizado mecánico que genere un movimiento consistente y reproducible en la columna de tamices, con el fin de garantizar una adecuada separación de las fracciones granulométricas. Uno de los equipos más utilizados para este propósito es el tamizador Ro-Tap, una marca registrada de W.S. Tyler, ampliamente aceptado por las normas internacionales para ensayos de análisis granulométrico. Este dispositivo combina movimientos de rotación y golpeo, lo que mejora la eficiencia del tamizado, especialmente en materiales de difícil separación.

Especificación de buena fe (el medio granular está bien distribuido en todo el rango)

Se especifican los números de malla que acotan la distribución de tamaño de partícula del medio granular, así como un % (en peso) de material mayor a la malla más abierta ("gruesos") y un % (en peso) de material menor a la malla más cerrada ("finos").

Ejemplo: arena 16 x 35 (máx. 5% gruesos y máx. 5% finos)

Es común especificar la distribución de tamaño de partícula de medios granulares indicando únicamente el rango de mallas dentro del cual debe concentrarse la mayor parte del material. En estos casos, además del rango principal, se establece el porcentaje máximo en peso permitido de partículas que:

- son más gruesas que la malla de abertura mayor del rango especificado, y
- más finas que la malla de abertura menor del mismo rango.

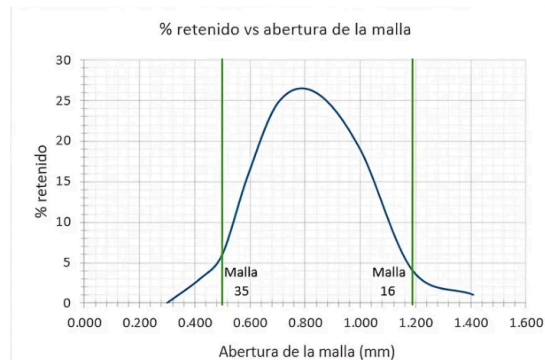
Resultado de la prueba de granulometría de arena sílica 16 x 35

Gruesos: 5% Finos: 3%

Malla	Abertura de malla (mm)	% retenido sobre la malla
14	1.410	1
16	1.190	4
18	1.000	19
20	0.841	26
25	0.707	25
30	0.595	16
35	0.500	6
40	0.420	3
Plato	0.300	0
SUMA		100

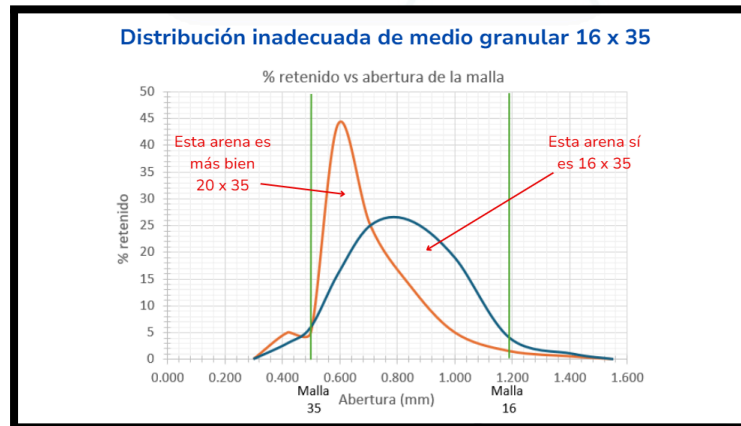
La tabla de la imagen muestra un análisis granulométrico de una arena sílica 16 x 35. El 5% en peso del material quedó por encima de la malla 16 y el 3% en peso del material quedó por debajo de la malla 35.

Distribución de tamaño de partícula ideal de medio granular 16 x 35

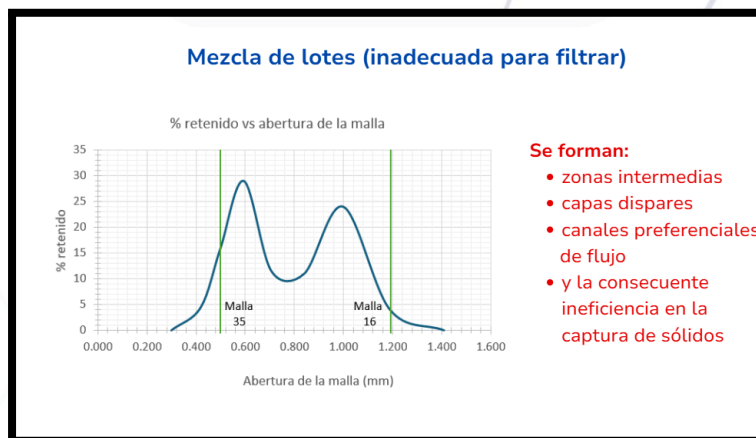


La imagen muestra la gráfica de distribución de tamaño de partícula correspondiente a los valores de la tabla de la imagen previa

Los valores de esta tabla muestran un medio granular filtrante que se ofrece como 16 x 35. La especificación granulométrica señala que no más del 5% en peso es mayor a la malla 16 y no más del 5% en peso es menor a la malla 35. El material cumple. No obstante, la mayor parte de las partículas de este medio granular están entre las mallas 20 y 35.



El medio granular cuyos resultados se mostraron en la tabla de la imagen previa es el que se representa con la curva naranja. Se observa que la mayoría de las partículas que forman este medio granular se encuentran entre las mallas 20 y 35. Por lo tanto, este medio no filtrará igual que un medio que realmente esté entre las mallas 16 y 35.



Cuando un medio granular no se obtiene mediante un proceso de molienda y cribado, sino a partir de la mezcla de dos medios granulares de distinta distribución de tamaño de partícula, la curva de distribución queda bimodal, como lo muestra la imagen. Esto no es deseable ya que se forman zonas intermedias, capas dispares, canales preferenciales y la consecuente ineficiencia en la captura de sólidos.

Especificación que garantiza una distribución de tamaño de partícula en todo el rango

(¡solamente debe usarse uno!)

- a) Se especifica el porcentaje en peso mínimo que debe medir un rango de tamaño. ejemplo: 10% entre X y Y mm; 60% entre A y B mm; y 90% entre S y T mm.
- b) Se especifica el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad.

Para evitar una distribución de tamaño de partícula que no corresponda con lo que realmente buscamos, el estándar ANSI/AWWA B100-16 propone una de las dos maneras que se mencionan en la imagen.

Tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad

1892: Hazen encontró que la permeabilidad de arena granular está correlacionada con el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad.

Tamaño efectivo (d_{10}): abertura de la malla por la que pasaría el 10 % en peso del material. Se mide en mm y se especifica un rango.

Ejemplo: Tamaño efectivo: 0.55 a 0.65 mm

Coficiente de uniformidad: abertura de la malla por la que pasaría el 60% del material (d_{60}) entre tamaño de la malla por la que pasaría el 10% del material (d_{10}).

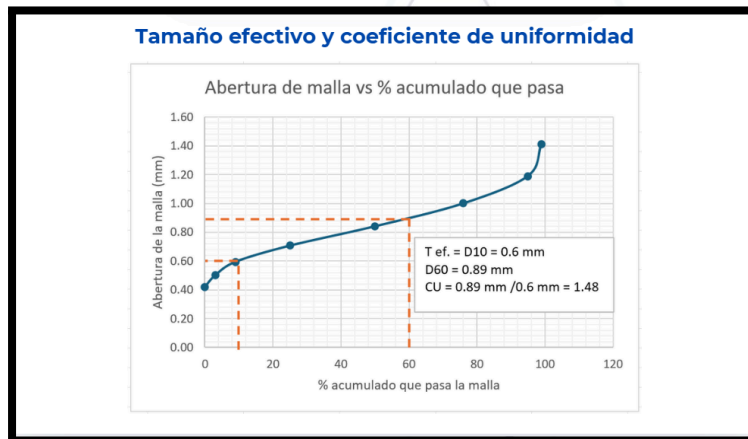
Ejemplo: Coeficiente de uniformidad: < 1.6

La más común es la segunda: mediante el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad. La imagen explica lo que significa cada uno de estos términos.

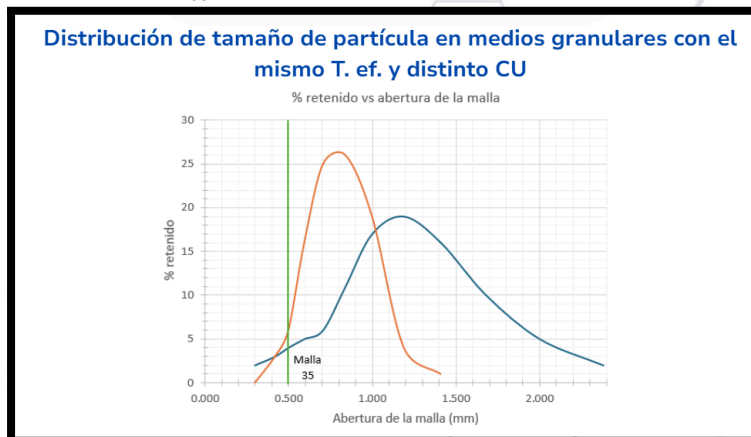
Resultado de la prueba de granulometría de arena 16 x 35

Malla	% retenido sobre la malla	% acumulado que pasa la malla	Abertura de malla (mm)
14	1	99	1.41
16	4	95	1.19
18	19	76	1
20	26	50	0.841
25	25	25	0.707
30	16	9	0.595
35	6	3	0.5
40	3	0	0.42
Plato	0	0	0.3
SUMA	100		

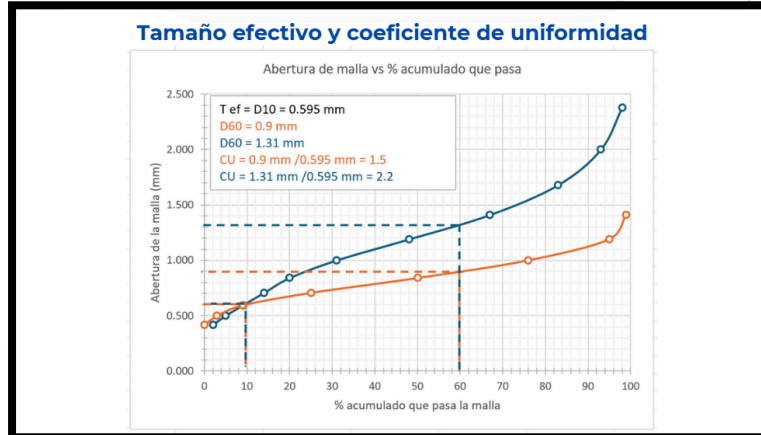
Para medir el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad, se puede hacer una tabla con el % de material acumulado que pasa cada malla y con la abertura de cada malla en mm.



Luego se grafica, en las ordenadas, la abertura de la malla (mm) y en las abscisas, el % acumulado que pasa cada malla. El tamaño efectivo se lee en las ordenadas; se traza una vertical a partir del valor de 10% en las abscisas y se traza una horizontal a la izquierda al tocar la curva. Al tamaño efectivo también se le llama d_{10} . Para calcular el coeficiente de uniformidad, se lee el valor de d_{60} en la gráfica y se divide entre el valor de d_{10} .



En esta gráfica se muestra la distribución de tamaño de partícula de dos medios granulares con el mismo tamaño efectivo y con distinto coeficiente de uniformidad. La curva anaranjada corresponde a un medio granular formado por partículas de un tamaño más homogéneo, por lo que su coeficiente de uniformidad es menor. La curva azul corresponde a un medio granular formado por partículas de tamaños más diversos, por lo que su coeficiente de uniformidad es mayor. Como comentario: el menor coeficiente de uniformidad posible es de 1.0, que corresponde a esferas idénticas.



En la gráfica se puede leer el tamaño efectivo y los valores para calcular el coeficiente de uniformidad de los dos medios granulares mostrados en la imagen anterior. Como se indicó, ambos tienen un tamaño efectivo de 0.595 mm. El coeficiente de uniformidad (CU) de la curva anaranjada es 1.5, valor típico de una arena sílica filtrante; mientras que la curva azul, con un CU de 2.2, es representativa de un carbón activado granular (CAG). Recordemos que, después de un retrolavado con expansión de cama, las partículas más grandes tienden a depositarse en el fondo, mientras que las más finas se ubican en la parte superior. Este fenómeno de estratificación hidráulica depende directamente de la distribución de tamaños de partícula. Cuando el medio granular se utiliza principalmente para retención mecánica de sólidos suspendidos —como es el caso de la arena sílica en filtros de profundidad—, se prefiere un coeficiente de uniformidad bajo (generalmente $CU \leq 1.7$). Esto asegura una granulometría más homogénea y permite que una mayor profundidad de la cama actúe como zona activa de filtración, con poros interparticulares más uniformes que retienen las partículas suspendidas. En cambio, cuando el medio granular se emplea para provocar cambios fisicoquímicos —como es el caso del carbón activado granular—, es deseable que el medio se estratifique lo más eficientemente posible tras el retrolavado. Para lograrlo, se especifica un coeficiente de uniformidad mayor (por ejemplo, $CU \geq 1.8$), ya que esto permite una separación más efectiva de tamaños: las partículas más finas arriba y las más gruesas al fondo. Esta estratificación favorece que el lecho se sature de manera progresiva, lo que extiende su vida útil operativa.

Valores típicos del tamaño efectivo y del coeficiente de uniformidad (ANSI/AWWA B100-16)

Antracita

T. Ef: 0.60 a 1.60 mm
CU: 1.7 y menores

Arena sílica

T. Ef.: 0.35 a 0.65 mm
CU: 1.7 y menores

Arena de alta densidad

T. Ef.: entre 0.18 a 0.6 mm
CU: 2.2 y menores

De acuerdo con el estándar ANSI/AWWA B100-16, los valores típicos del tamaño efectivo y del coeficiente de uniformidad de los tres medios filtrantes contemplados son los que se muestran en la imagen.

Medios granulares como lecho multimedia



Antracita 1.5 (10x20)

Arena sílica 16 x 35

Granate 30 x 40

Granate 8 x 12
(como cama de soporte)

Se pueden armar lechos de filtración duales con arena sílica 16 x 35 en la parte inferior, y antracita del 1.5 (10 x 20) en la parte superior. O bien, lechos triples, con granate 30 x 40 abajo, arena 16 x 35 en medio, y antracita del 1.5 arriba. En este caso, ya que la capa inferior es arena de alta densidad, la grava de soporte también debe ser de alta densidad. Los tres medios granulares mencionados, con el rango de tamaño de partícula mencionado, se expanden con la misma velocidad de flujo: la antracita del No. 1.5 un poco más que la arena sílica 16 x 35, y la arena sílica 16 x 35 un poco más que el granate 30 x 40. De esta manera, al retrolavar, los tres se expanden y se expulsan eficazmente los sólidos suspendidos retenidos en los tres. Si los medios granulares mencionados se aplican en otros rangos de tamaño de partícula, alguno de ellos no expandirá y en poco tiempo la cama filtrante quedará colmatada.

Arena sílica nacional

Muy buena calidad física y química

El cribado no ha sido consistentemente adecuado



“10 x 20” -> “arena gruesa”

“20 x 30” -> “arena fina”

Los productores de arena sílica en México ofrecen materiales de excelente calidad química y física y de excelente pureza. No obstante, en Carbotecnia no hemos tenido buena experiencia con una distribución de tamaño de partícula que sea adecuada y consistente. En México, por alguna razón que desconocemos, los fabricantes de arena sílica para filtración comúnmente llaman “10 x 20” a la arena gruesa (aunque no esté compuesta por gránulos cuyo tamaño se encuentre entre las mallas 10 y 20) , y “20 x 30” a la fina (aunque no esté compuesta por gránulos cuyo tamaño esté entre las mallas 10 y 20).

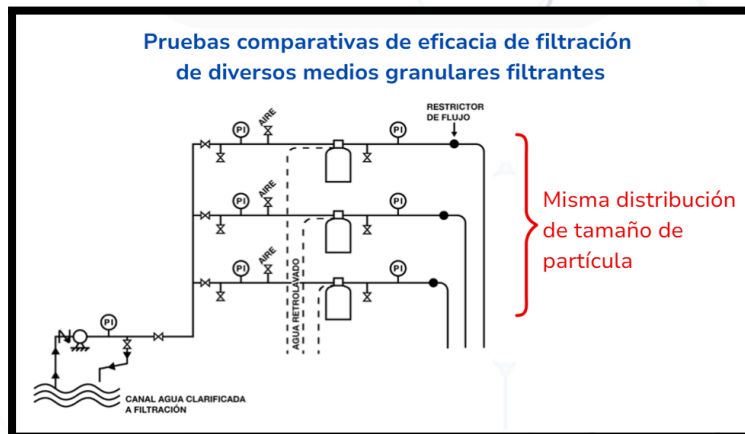
Los medios granulares que ofrece Carbotecnia
(incluyendo las gravas de soporte)
cuentan con certificado de calidad



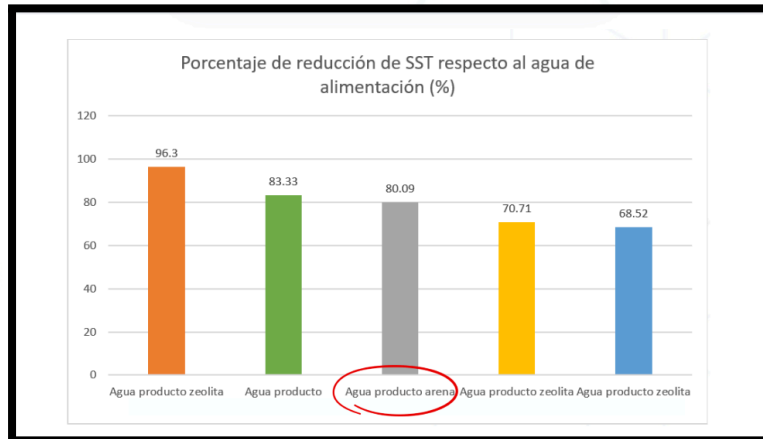
Hemos invertido un gran esfuerzo para contar con proveedores extranjeros que cumplan cabalmente con las especificaciones de pureza química y física, y con la especificación de distribución del tamaño de partícula que recomienda el estándar ANSI/AWWA B100-16. Por otro lado, actualmente estamos colaborando en el desarrollo de un fabricante nacional de arena sílica que cumpla con la especificación de tamaño de partícula.



Cuando el fabricante de la arena sílica, además de cumplir con el estándar ANSI/AWWA B100-16, cuenta con el certificado NSF/ANSI/CAN 61, le damos un valor especial.



En Carbotecnia, a lo largo de más de dos años hemos realizado pruebas comparativas de eficacia de filtración de distintos medios granulares. En todos los casos, para hacer comparaciones con la misma base, en lo posible, hemos buscado cribar los medios probados con el objeto de tener el mismo tamaño efectivo y el mismo coeficiente de uniformidad. Hemos realizado estas pruebas con agua de distinta calidad, que ha ido desde pozo profundo, hasta agua que proviene de un cuerpo natural superficial y que, antes de filtrarse, se somete a un proceso de coagulación-floculación-clarificación.



En la imagen se muestra la disminución de sólidos suspendidos totales por parte de arena sílica, tres zeolitas y un óxido férrico. No se muestran las marcas. En términos generales, hemos encontrado que el tamaño efectivo es el principal parámetro del que depende la calidad del agua filtrada y que, como dijimos al inicio de este webinar, una textura rugosa de los gránulos puede mejorar la eficacia de filtración, pero solo hasta cierto punto. En la imagen no mostramos marcas. Se observa que la arena sílica dio resultados similares a los de los demás medios granulares probados.



Lo mismo ocurrió con la turbidez.

Profundidad del lecho en filtración rápida

En 2000, Kawamura reportó que el valor de L/d (en donde L es la profundidad de la cama y d es el tamaño efectivo del medio granular) para distintos medios granulares, suele tener los siguientes valores:

Caso	Valor de L/d
Camas ordinarias de arena y camas duales	≥ 1,000
Camas multimedia (antracita, arena y granate) o camas ordinarias de arena gruesa (1.5 mm > d > 1.0 mm)	≥ 1,250
Camas ordinarias de un medio muy grueso (2 mm > d > 1.5 mm)	1,250 – 1,500
Si se desea obtener una turbiedad menor a 0.1 NTU, y no se usan filtroayudas poliméricos	Aumentar el L/d 15%

Nota: para camas duales o multimedia, se determina el L/d de cada medio y se suman.

Nix, D. N. y J. S. Taylor, *Filter Evaluation Procedures for Granular Media*, 2ª Ed., American Water Works Association, Denver, 2018.

La profundidad típica de un lecho profundo está entre 50 y 90 cm.

La mayor parte de la retención física de partículas ocurre en los primeros 20 a 30 cm de cama. Ocurre en la parte superior ya que, después de retrolavar la cama, los gránulos menores que la componen quedan en la parte superior. La profundidad adecuada de un lecho profundo para filtración rápida depende del tamaño efectivo, al que también llaman “diámetro efectivo de partícula”.

Velocidad de flujo en filtros rápidos de lecho profundo

Escenario	Velocidad del flujo de filtración (gpm/ft ²)
Cama de arena después de un clarificador. El valor mayor aplica cuando previo al clarificador se aplicó un coagulante y un polielectrolito [1]	2.46 a 4.91
Filtros multimedia [1]	Se operan a la misma velocidad a la que se opera un filtro de cama profunda y homogénea de arena.
Cuando hay preocupación por ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> o quistes de <i>Giardia</i> en suministros de agua cruda (se busca minimizar el riesgo de fuga de partículas). [1]	2.46 a 2.86
Cama de arena para retener hierro [1]	2.46 a 3.07
Costa Oeste de Estados Unidos (a menos de que una prueba piloto demuestre que se puede filtrar a mayor velocidad) [1]	6.0
Velocidad arriba de la que tiende a deteriorarse la calidad del filtrado [1]	6.0
Velocidad arriba de la que aumenta desproporcionalmente la caída de presión [1]	8.2
Velocidad a la que actualmente se promueve el diseño de filtros que utilizan zeolita como medio granular	Arriba de 12.

En filtración, no es necesario tener un tiempo de contacto. La variable de diseño fundamental es la velocidad de flujo de filtración. La tabla de la imagen muestra la velocidad de flujo a la que suelen operar los filtros rápidos de lecho profundo. Mientras menor es la velocidad de flujo, la calidad del filtrado (la que ocurre por tamaño del sólido retenido) es mejor. No son pocos los casos en los que se diseñan los filtros rápidos de lecho profundo demasiado estrechos y se operan a velocidades muy altas. Esto se lleva a cabo principalmente cuando no se va a medir la calidad del agua filtrada, y no importa su calidad.

Gracias por su atención

Tel. + 52 33 3834-0906
ventas@carbotecnia.com.mx

C^arbotecnia
PURIFICACIÓN AVANZADA