

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		



Humo de sílice



Humo de sílice densificado (x5) <sup>(1)</sup>

### 1.- ORIGEN

El humo de sílice, también llamado microsílíce o sílice activa, es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura que se origina en la reducción del cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco. El polvo se recoge en filtros de mangas, constando de partículas esféricas de SiO<sub>2</sub> amorfo en un porcentaje variable entre un 85 y un 98%.

### 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

En España la producción de humo de sílice se concentra en una única empresa (FerroAtlántica S.A) que cuenta con tres fábricas de silicio metal que lo produce, todas situadas en la provincia de La Coruña, con una producción anual de 33.000 t <sup>(2)</sup>.

La siguiente tabla indica las cifras de producción de humo de sílice por fábrica:

<b>FÁBRICA</b>	<b>PRODUCCIÓN DE HUMO DE SÍLICE (2010)(toneladas)</b>
Cee (A Coruña)	3.000
Dumbría (A Coruña)	13.000
Sabón (A Coruña)	17.000

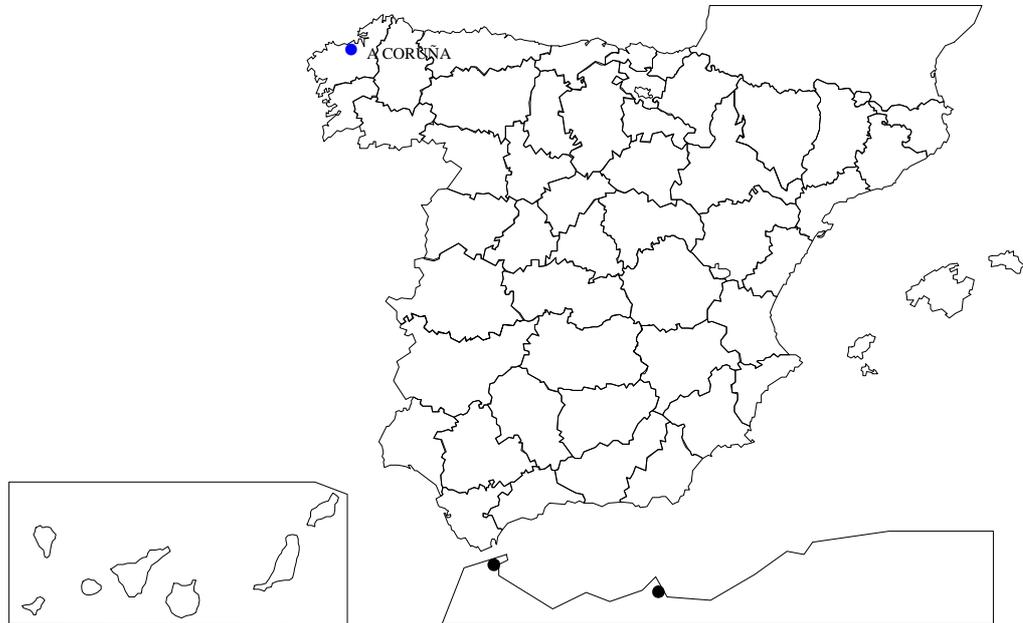
**Tabla 1:** Producción de humo de sílice por planta <sup>(2)</sup>

Se desconoce en el momento actual el porcentaje de humo de sílice que es utilizado en construcción. El último dato, correspondiente al año 2003 indicaba que se comercializaba el 67% de la producción.

## HUMO DE SÍLICE

**LEYENDA**

- Fábricas de producción de humo de sílice (Cee, Dumbría y Sabón)

**3 VALORIZACIÓN**

A continuación se detalla el proceso de fabricación del silicio y su subproducto el humo de sílice en la planta española de mayor producción (Sabón) <sup>(1)</sup>.

Como materia prima de base para la obtención del silicio se utiliza cuarzo autóctono, que proviene de yacimientos en la misma provincia de A Coruña. El agente reductor, carbono, se consigue utilizando carbón de hulla importado y de madera troceada autóctona.

El proceso de obtención completo del silicio y microsílíce, tal y como se desarrolla en Sabón, se muestra a continuación de forma esquemática (Figura 1):

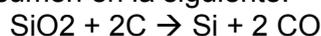
## HUMO DE SÍLICE



**Figura 1:** Esquema del proceso de fabricación del silicio y microsíllice en la fábrica de Sabón, A Coruña

A continuación, se explicita el proceso de obtención del silicio y de la microsíllice:

La obtención del silicio es un proceso químico de reducción, que se desarrolla según una secuencia de reacciones que se resumen en la siguiente:



El cuarzo es un mineral muy estable que ya de por sí requiere temperaturas elevadas para fundirse. Además entre las reacciones secundarias que ocurren en el proceso está la de formación de CSi. Para destruir este compuesto intermedio se necesitan temperaturas superiores a 2.700°C. Con estas premisas, la única energía que permite alcanzar tales niveles de temperatura, sin aportar impurezas al proceso, es la eléctrica. Por ello se utilizan hornos eléctricos, de los denominados de arco sumergido.

El humo de sílice se produce como consecuencia de reacciones secundarias durante la obtención del silicio. Forma parte mayoritaria de los humos que son captados y filtrados en filtros de mangas. Contiene más de un 90 % de sílice amorfa y se presenta en forma de finísimas partículas esféricas submicrónicas.

### 3.1- PROPIEDADES

#### Propiedades Químicas

Las propiedades químicas del residuo dependen en gran medida del tipo de producto que se pretenda obtener (silicio, ferro-silicio u otras silico-aleaciones), pudiéndose distinguir tres tipos:

Procedentes de la fabricación de silicio: El contenido en SiO<sub>2</sub> del humo se sitúa en torno al 92%, aunque puede ser más bajo para productos cargados en carbono o carburo de silicio.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

El humo de sílice se condensa de los gases de emisión de los hornos de producción de silicio metal, metaloide utilizado para la fabricación de aleaciones aluminio-silicio, siliconas y silicio para placas solares.

La captación de estos humos para la protección del medio ambiente, permite obtener un nuevo producto, del que se deben aprovechar sus particulares propiedades químicas y físicas.

Procedentes de la fabricación de ferro-silicio: El contenido de Si y de SiC es menor que en el caso anterior. Las impurezas minerales son más altas, pues se utiliza cuarzo y reductores de calidad más baja. El contenido total de impurezas oxidadas puede llegar al 6 ó 7%.

En la tabla 2, se recogen los contenidos habituales en SiO<sub>2</sub> del humo de sílice, cuando procede de distintas aleaciones ferro-silicio <sup>(3)</sup>.

<b>Tipo de aleación</b>	<b>Rango contenido en SiO<sub>2</sub> (%)</b>
50% ferro-silicio	74-84
75% ferro-silicio	84-91
Metal de silicio (98%)	87-98

**Tabla 2:** Contenido en SiO<sub>2</sub> del humo de sílice procedente de aleaciones ferro-silicio

Procedentes de la fabricación de aleaciones calcio-silicio: Proviene de procesos con cargas que contienen altas proporciones de óxidos alcalino-térreos (tipo CaO). Como se trata de humos que reagrupan fabricaciones de diversas silico-aleaciones, hay que esperar composiciones muy heterogéneas. Así, el contenido en CaO puede variar del 3 al 20%. El porcentaje en SiO<sub>2</sub> es más bajo que el de los otros humos y además mucho más variable.

En la siguiente tabla se resumen las propiedades de las diferentes clases de humos de sílice <sup>(4)</sup>, junto a la composición típica del que se produce en nuestro país <sup>(2),(3),(5)</sup>

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

COMPOSICIÓN (%)	SILICIO	FERRO-SILICIO	OTRAS ALEACIONES	HUMO DE SÍLICE PRODUCIDO EN ESPAÑA
SiO <sub>2</sub>	92	74-98	87	+95
C libre	2,6	2,5	1,7	-
SiC	1,8	0,2	0,5	-
MgO	0,6	0,6	1,0	0,22
Si libre	0,3	0,1	0,1	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,5-3	1,0	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	1-2,5	0,3	-
CaO	0,5	0,3	6,0	0,68
Na <sub>2</sub> O	0,1	1	0,2	0,10
K <sub>2</sub> O	0,6	1	1,6	0,22
S total	0,2	0,4	0,6	-
SO <sub>4</sub>	-	-	-	0,076
Cl	-	-	-	0,006
Pérdida al fuego(1.000°C)	2,8	3,0	4,0	2,78

**Tabla 3:** Composición química del humo de sílice

### **Actividad puzolánica**

Se define la actividad puzolánica de un material como la capacidad de fijar hidróxido cálcico a la temperatura ordinaria en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica.

En presencia de cemento Pórtland hidratado, el humo de sílice desarrolla su actividad puzolánica, al ser un material muy fino rico en sílice (el hidróxido cálcico se combina con la sílice para formar silicato cálcico hidratado).

La actividad puzolánica del humo de sílice es efectiva en los primeros días de edad, aproximadamente al segundo día, y su actividad es tanto mayor cuanto mayor es la edad hasta los 28 días aproximadamente. A los 90 días se ha paralizado prácticamente la actividad puzolánica.

### **Propiedades Físicas**

**Color:** El humo de sílice es un polvo de color variable, desde casi negro a ligeramente blanquecino, en función de su contenido en óxidos de carbono y hierro <sup>(3)</sup> En general, cuanto más elevado es el contenido de carbono, más oscuro es el humo de sílice. Cuando se mezcla con agua, el humo de sílice produce una pasta de color negro.

**Peso específico:** El peso específico del humo de sílice es aproximadamente 2,2 <sup>(6)</sup>, inferior al del cemento Portland que es aproximadamente 3,1, aunque depende del tipo de aleación que se fabrique.

**Densidad:** El humo de sílice que se produce en nuestro país tiene una densidad real de 2226 kg/m<sup>3</sup> y una densidad aparente o de conjunto de 660 kg/m<sup>3</sup> <sup>(5)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CLAVE: 2.4</b>	<b>Mes: DICIEMBRE Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

Tamaño de las partículas: El humo de sílice consiste en partículas esféricas muy finas con una superficie específica del orden de 20.000 m<sup>2</sup>/kg. La distribución del tamaño de las partículas de un humo de sílice típico indica que la gran mayoría de las mismas son menores a 0,5 µm, con un diámetro promedio generalmente entre 0,1 y 0,2 µm que es menor casi cincuenta veces a la partícula promedio de cemento. En la siguiente tabla se recoge la distribución granulométrica del humo de sílice producido en España <sup>(5)</sup>.

<b>DIÁMETRO (µm)</b>	<b>MASA (%)</b>
100-50	1,2
50-20	2,0
20-10	0,2
10-5	0,5
5-2	1,4
2-1	1,5
1-0,5	8,3
0,5-0,2	43,0
<0,2	41,9

**Tabla 3:** Distribución granulométrica del humo de sílice

### 3.2.- PROCESAMIENTO

El humo de sílice puede presentarse en el mercado sin densificar, densificado, en suspensión o granulado.

Polvo sin densificar: Es la forma en que se presenta en su estado original. Al tratarse de un material extremadamente fino se dificulta enormemente su manipulación, genera gran cantidad de polvo y encarece el coste de transporte.

Polvo densificado: Mediante un proceso de densificación el producto adquiere la suficiente densidad para ser transportado económicamente, y puede ser manipulado en las plantas de hormigonado como el cemento o las cenizas volantes. Además con este proceso se reduce el polvo que genera el humo de sílice en estado original. La densificación se puede realizar mediante aire a presión, soplando desde el fondo del silo donde se almacena el humo de sílice. Provoca una agitación de las partículas de humo de sílice y su posterior aglomeración. Otro método consiste en comprimir el material de forma mecánica<sup>(3)</sup>.

Humo de sílice en suspensión: En este caso, el humo de sílice se mezcla con agua en un porcentaje entre un 42% y 60% en masa de humo de sílice. De esta forma se eliminan las dificultades de manipulación y transporte. El coste de este último, aún considerando el volumen de agua, suele ser más rentable que en el caso del humo de sílice sin densificar. Las mezclas con un contenido sólido del 50% tienen más o menos 700 kg/m<sup>3</sup> de material seco y entre 130 y 430 kg/m<sup>3</sup> de humo de sílice<sup>(3)</sup>.

Humo de sílice granulado: El humo de sílice en estado original se mezcla con una pequeña cantidad de agua y a menudo un poco de cemento. Se vibra en un disco formándose gránulos de diferentes tamaños. La granulación no es un proceso fácilmente reversible ya que los gránulos son bastante duros para descomponerse con facilidad durante la producción del hormigón. Por este motivo este tipo de producto no se utiliza como adición al hormigón, siendo

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CLAVE:</b> 2.4	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

su uso más adecuado para rellenos. En Noruega, el humo de sílice granulado ha sido utilizado en rellenos para muros de contención en zonas públicas y privadas<sup>(3)</sup>.

El tipo empleado, puede influir en las características del hormigón final y debe evitarse cualquier cambio de tipo durante la ejecución de los proyectos.

La utilización de un tipo en particular dependerá del volumen de hormigón total y de las características específicas del proyecto, así como de las instalaciones de la central de hormigón (disponibilidad de amasadoras, silos, etc.).

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

Se recoge a continuación la densidad aparente, o de conjunto, del humo de sílice según los diferentes tratamientos descritos anteriormente:

Humo de sílice en suspensión ⇒ 700 kg de humo de sílice por m<sup>3</sup> de suspensión.

Humo de sílice densificado ⇒ 480 a 640 kg/m<sup>3</sup>. Este es el proceso habitual que se utiliza en el humo de sílice español, con una densidad final de 500 kg/m<sup>3</sup> <sup>(2)</sup>.

### 3.4.- APLICACIONES

#### 3.4.1.- Fabricación de cemento

Según La RC-08<sup>(7)</sup>, se emplea humo de sílice en mayor o menor proporción en los siguientes tipos de cementos:

Cementos comunes	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	6 a 10%
	Cemento Portland mixto <sup>(*)</sup>	CEM II/A-M	<10%
		CEM II/B-M	<10%
	Cemento Puzolánico <sup>(**)</sup>	CEM IV/A	<10%
		CEM IV/B	<10%

(\*) Cemento que puede incorporar escoria de horno alto, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes y caliza, en una proporción de 6 a 20%. La proporción de humo de sílice se limita al 10%.

(\*\*) Cemento que puede incorporar humo de sílice, puzolanas naturales y cenizas volantes, en una proporción de 21 a 35%. La proporción de humo de sílice se limita al 10%.

**Tabla 3:** Tipos de cementos con humo de sílice

La utilización de los cementos comunes que incorporan humo de sílice en hormigón estructural se regula según la Instrucción EHE<sup>(8)</sup>, e incluye unas recomendaciones generales para su utilización. Actualmente<sup>(9)</sup> no se están fabricando en España cementos que incorporen humo de sílice.

El cemento Portland con humo de sílice (CEM II/A-D), resulta especialmente adecuado para su aplicación en hormigón pretensado, hormigón que contiene áridos reactivos, hormigón proyectado u hormigón para desencofrado y descimbrado rápido.

La Norma UNE-EN 197-1:00<sup>(10)</sup> recoge las especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su utilización en la fabricación de cementos, mientras que la Instrucción para la Recepción

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	<b>Mes: DICIEMBRE Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

de Cementos (RC-08) establece las prescripciones técnicas generales y las condiciones de suministro e identificación que deben satisfacer los cementos que incorporan humo de sílice.

A continuación se resumen las especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su incorporación al cemento según esta norma.

NORMA	UNE-EN 197-1 <sup>(10)</sup>
Dióxido de silicio amorfo (SiO <sub>2</sub> )	≥ 85%
Pérdida por calcinación	≤ 4%
Superficie específica (BET) <sup>(*)</sup>	≥ 15 m <sup>2</sup> /g
Porcentaje máximo admisible	10%

<sup>(\*)</sup> El procedimiento para determinar la superficie específica según el método BET se describe con detalle en las Normas DIN 66131.

**Tabla 4:** Especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su incorporación al cemento

### 3.4.2.- Fabricación de hormigón

Las posibilidades de utilización del humo de sílice en el hormigón son:

- La obtención de hormigones de alta resistencia, de resistencias superiores a 100 N/mm<sup>2</sup>.
- La obtención de hormigones de alta durabilidad, si bien el empleo adecuado de este material puzolánico mejorará en todo caso ambas características, contribuyendo a la producción de los que se denominan hormigones de altas prestaciones.

Estos hormigones se emplean en grandes obras como puentes, viaductos, puertos, grandes edificios, plataformas “offshore” etc.

- Otras aplicaciones específicas como:
  - Coadyuvante de bombeo.
  - Corrector de finura.
  - Hormigonado submarino.
  - Alta impermeabilidad.
  - Hormigón proyectado.

Otras aplicaciones de interés creciente son la fabricación de materiales de fibrocemento o servir de soporte a pigmentos <sup>(2)</sup>.

El humo de sílice se puede incorporar al hormigón como un sustituto parcial del cemento o como adición.

En el primer caso, parte del cemento se reemplaza por una cantidad mucho menor de humo de sílice. Se define como “coeficiente de eficacia de una adición” al contenido de cemento en kg

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CLAVE:</b> 2.4	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

que se puede sustituir por un kg de adición sin que la resistencia del hormigón varíe; en el caso del humo de sílice el coeficiente de eficacia vale 2<sup>(11)</sup>.

El humo de sílice también se puede utilizar como adición a las pastas, morteros y hormigones. Añadiendo pequeñas cantidades de humo de sílice, entre un 5 y un 10% del peso del cemento, se mejoran ciertas propiedades o se confieren propiedades especiales.

En ambos casos, la pérdida de docilidad que se produce se puede compensar utilizando superplastificantes.

A continuación se especifican los efectos de la utilización del humo de sílice, tanto en las propiedades del hormigón fresco como en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón endurecido.

#### Efectos del humo de sílice en el hormigón fresco<sup>(6)</sup>

- *Demanda de agua:* Como ya se ha comentado, la incorporación de humo de sílice produce un aumento de la demanda de agua, debido principalmente a su gran superficie específica, por lo que generalmente será necesario el uso de aditivos plastificantes o superplastificantes que compensen esta demanda.
- *Consistencia:* El hormigón fresco es más cohesivo y menos propenso a la segregación que un hormigón sin humo de sílice. Si se incrementa el contenido de humo de sílice, el hormigón se vuelve viscoso. La experiencia ha demostrado que es necesario disminuir la consistencia del hormigón con humo de sílice, utilizando un cono mayor (aproximadamente 5 cm) que el de un hormigón convencional con cemento Pórtland, para conseguir la misma trabajabilidad real<sup>(3)</sup>.
- *Tiempo de fraguado:* El humo de sílice acelera la hidratación del cemento a edades bajas del hormigón, provocando también un incremento del calor de hidratación<sup>(3)</sup>.
- *Exudación:* Se reduce considerablemente, debido a la finura del humo de sílice.
- *Retracción plástica:* Como la exudación disminuye de forma considerable, el potencial de fisuración por retracción plástica es mayor<sup>(3)</sup>.
- *Color:* Tanto el hormigón fresco como el endurecido presentan un color más oscuro. Esta diferencia se acentúa más en hormigones con alto porcentaje de humo de sílice o en aquellos en los que el humo de sílice tenga un elevado contenido en carbón.
- *Aireantes:* La dosificación de aireantes para producir un cierto volumen de aire en el hormigón generalmente aumenta con la incorporación de humo de sílice.
- *Segregación:* El hormigón con humo de sílice normalmente no segrega de forma apreciable debido a la finura de la adición. En cualquier caso, la segregación podría presentarse en hormigones con un excesivo cono, una dosificación inapropiada, colocación indebida o vibración prolongada, tal como sucede en los hormigones convencionales<sup>(3)</sup>.
- *Autodesecación:* los hormigones con humo de sílice sufren el fenómeno de autodesecación aunque siguen ganando resistencia sin aportación de agua adicional<sup>(3)</sup>.
- Efectos del humo de sílice en el hormigón endurecido<sup>(6)</sup>
  - *Permeabilidad:* Este tipo de hormigón se caracteriza por su baja permeabilidad, produciendo así una menor absorción de agua y una mayor durabilidad.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CLAVE:</b> 2.4	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

- *Módulo de elasticidad:* El módulo de elasticidad del hormigón con humo de sílice es similar al de un hormigón con la misma resistencia que no incorpore esta adición.
- *Fluencia:* La fluencia del hormigón con humo de sílice no es en ningún caso superior a la de un hormigón de la misma resistencia sin humo de sílice<sup>(3)</sup>.
- *Retracción:* La retracción plástica de un hormigón con humo de sílice es superior al que no la incorpora. Cuando la tensión inducida por la retracción autógena supera la resistencia a tracción del hormigón, se forman fisuras. De hecho, la fisuración que aparece en hormigones de alta resistencia con adiciones de humo de sílice coartados para deformarse y que aparece incluso en condiciones de sellado (sin posibilidad de evaporación de agua) se atribuye al desarrollo de una intensa retracción autógena. No obstante al final del proceso, la retracción total es comparable a la de un hormigón ordinario sin humo de sílice y de misma composición<sup>(3)</sup>.
- *Resistencia a compresión:* Es la propiedad que mejora más notablemente con el uso del humo de sílice. Se pueden conseguir hormigones con valores comprendidos entre 100 y 120Mpa en resistencia media a 28 días<sup>(12)</sup>.
- *Adherencia pasta-árido:* Incluso pequeñas adiciones de humo de sílice (entre un 2% y 5%) crean una interfase pasta de cemento-árido más homogénea y densa al generarse un efecto filler en esta zona. Las mejoras en las propiedades mecánicas que se observan en el hormigón con humo de sílice se atribuyen en su mayoría a la creación de una interfase pasta de cemento-árido de muy buena calidad<sup>(3)</sup>.
- *Resistencias a flexión y tracción:* El desarrollo de las resistencias a flexión y tracción del hormigón con humo de sílice es similar al que experimenta un hormigón sin humo de sílice.
- Efectos del humo de sílice en la durabilidad del hormigón<sup>(6)</sup>
  - *Resistencia al hielo y deshielo:* El hormigón con humo de sílice suele presentar buenos resultados frente a los ciclos de hielo y deshielo.
  - *Resistencia al ataque químico:* Debido a su baja permeabilidad, este tipo de hormigón presenta una mejor resistencia al ataque de sustancias químicas.
  - *Resistencia a la abrasión:* La incorporación del humo de sílice en hormigones reduce la abrasión de los mismos.
  - *Reacción álcali-árido:* El humo de sílice es especialmente beneficioso para que no se produzca la reacción álcali-árido.
  - *Porosidad:* El humo de sílice provoca una mayor homogeneidad de la estructura de poros de la pasta de cemento y del mortero, al disminuir el número de macro poros y el radio de entrada de los poros capilares. Sin embargo, la porosidad total no se ve afectada por la utilización del humo de sílice<sup>(3)</sup>.
  - *Agentes agresivos:* Debido a su reducida permeabilidad, este tipo de hormigón presenta una buena resistencia a los sulfatos y cloruros.
- Especificaciones técnicas

La Instrucción EHE<sup>(8)</sup> permite la utilización del humo de sílice como adición no sólo para hormigón en masa y armado sino también para hormigón pretensado, exigiendo unos requisitos mínimos en sus características que garanticen que el hormigón alcanzará las

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

propiedades esperadas. Esta Instrucción incorpora unas recomendaciones sobre la utilización del humo de sílice en hormigón de alta resistencia.

Así mismo se prescribe que no se podrá añadir humo de sílice al hormigón en cantidad superior al 10% del peso de cemento, y que sólo se utilizará la adición con cementos CEM I según la Instrucción RC-08<sup>(7)</sup>.

A continuación, se resumen las especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su incorporación al hormigón según las normas españolas y las europeas.

<b>NORMA</b>	<b>Instrucción EHE-08<sup>(8)</sup></b>	<b>UNE-EN 13263-1<sup>(13)</sup></b>
Óxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	≥ 85%	≥ 85%
Pérdida por calcinación <sup>(*)</sup>	≤ 5%	≤ 4%
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	< 0,1%	< 0,30%
SO <sub>3</sub>	-	≤ 2%
Óxido de calcio libre	-	≤ 1%
Silicio libre	-	≤ 0,4%
Carbono libre	-	-
Finura	-	-
Índice de actividad resistente a los 28 días	≥ 100%	-
Superficie específica (BET)	(***)	>15.000 m <sup>2</sup> /kg
Coeficiente de eficacia <sup>(**)</sup>	≤ 2	-
Porcentaje máximo admisible	10%	-

(\*) Según RC-08 la pérdida de calcinación no superara el 4% en masa, determinada como la norma UNE-EN 196-2 pero empleando un tiempo de calcinación de 1h.

(\*\*) Según la EHE, para hormigones con relación agua/cemento mayor que 0,45 que vayan a estar sometidos a clases de exposición H ó F se tomará k=1. La UNE-EN 206-1 admite k=1 en las clases de exposición XC y XF.

(\*\*\*) Según RC-08 la superficie específica (BET) sin tratar será al menos de 15.000 m<sup>2</sup>/kg, determinada conforme a la norma ISO 9277.

**Tabla 5:** Especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su adición al hormigón

### 3.5.- OBRAS REALIZADAS

En España se ha utilizado humo de sílice principalmente como adición al hormigón de alta resistencia (HAR)<sup>(14)(15)</sup>. En los años 70 se llevaron a cabo las primeras realizaciones en traviesas prefabricadas; en los años 80 se alcanzó, en alguna aplicación singular, una

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

resistencia a compresión de 100 N/mm<sup>2</sup>, aunque ha sido en esta última década cuando se han proyectado y construido estructuras de hormigón de alta resistencia.

La primera obra fue la "Pasarela peatonal de Montjuïc" en 1992. Se trata de una pasarela de hormigón pretensado con 31,80 m de luz, en la que se empleó un hormigón con una resistencia característica de 80 N/mm<sup>2</sup>.

Se empleó también en la construcción del "Puente sobre el río Guadalete" en 1995. Se trata de un puente de autovía de 210 m de longitud, cuyo tablero está formado por vigas pretensadas de hormigón de alta resistencia (80 N/mm<sup>2</sup>).

Otras obras en las que se ha utilizado hormigón de alta resistencia han sido: Pasarela del Puerto de Málaga (1992), Puente sobre el río Miño (1995), Puente del Eje Transversal de Cataluña (1996), Dovelas para el túnel del Transvase Guadiaro-Majaceite (1996) y el Conjunto Residencial Natura Playa (1996).

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

El humo de sílice viene incluido en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" con el siguiente código:

- 10 08 16: Partículas procedentes de los efluentes gaseosos distintas de las especificadas en el código 10 08 15, y están caracterizadas como residuos no peligrosos.

El humo de sílice es un subproducto industrial que si no fuera utilizado como adición en el hormigón, debería almacenarse en vertedero. Su aprovechamiento tiene por tanto un valor ecológico importante, mejorando a la vez las propiedades de los materiales a los que se incorpora.

#### **Ventajas**

- Reducción del impacto medioambiental, por la disminución del volumen de residuos depositados en vertederos.
- Disminución de las materias primas utilizadas, conservando de esta forma las explotaciones mineras.
- Obtención de cementos y hormigones de propiedades mejoradas.

#### **Inconvenientes**

- Su mayor inconveniente es su dificultad de manipulación es estado original, debido a su gran finura, lo que puede hacer necesario en algunos casos, un tratamiento previo del residuo.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CLAVE:</b> 2.4	<b>Mes: DICIEMBRE</b> <b>Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

### 5.- **NORMATIVA TÉCNICA**

- UNE 83460-1. "Adiciones al hormigón. Humo de sílice. Parte 1: Especificaciones y control de calidad". 2006.
- UNE 83460-2. "Adiciones al hormigón. Humo de sílice: Recomendaciones generales para la utilización del humo de sílice". 2005.
- UNE 80-300-IN. "Recomendaciones para el uso de los cementos". 2000.
- UNE-EN 197-1. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". 2000.
- UNE-EN 13263-1. "Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad". 2006
- RC-08. "Instrucción para la recepción de cementos". 2008.
- EHE. "Instrucción de Hormigón Estructural". 2008.
- UNE-EN 206-1: Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad.

### 6.- **REFERENCIAS**

- [1] Ferroatlántica. División de Electrometalurgia. Fábrica de Sabón. Declaración medioambiental 2009.
- [2] [www.ferroatlantica.es](http://www.ferroatlantica.es)
- [3] ACI 234R-06 "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete". American Concrete Institute. Abril 2006.
- [4] SANZ, A. "Formación del humo de sílice". Ingeniería Civil, Nº 79 , p.164-166. Abril-Junio 1991.
- [5] TARRÍO SAAVEDRA J., "Aportaciones a la clasificación de curvas con datos funcionales y a la modelización del crecimiento de grietas por fatiga. Aplicaciones a la ciencia de los materiales. Julio 2010.
- [6] ACI 232.2R-96. "Use of Silica Fume in Concrete". Manual of Concrete Practice. Part 1-1999. American Concrete Institute.
- [7] Ministerio de Fomento. "Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)". 2008.
- [8] Ministerio de Fomento. "Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)". 2008.
- [9] Información facilitada por IECA. [http://www.ieca.es/default.asp?id\\_cat3](http://www.ieca.es/default.asp?id_cat3)
- [10] UNE-EN 197-1. "Cemento. Composición, especificaciones y criterios de conformidad. Cementos comunes". 2000.
- [11] ALAEJOS, M<sup>a</sup> P.; FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. "El coeficiente de eficacia del humo de sílice". Materiales de Construcción, Vol. 49, nº 253, p. 57-63. 1999.
- [12] F. DE LARRAND Y. MALIER. "Propriétés constructives des bétons à très hautes performances de la micro à la macrostructure".
- [13] UNE-EN 13263-1: Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad. 2006

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	<b>Mes: DICIEMBRE Año: 2012</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

[14] GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN (GEHO). "Hormigones de alta resistencia. Fabricación y puesta en obra". Comisión I, G.T. I/2. Boletín N°20. Febrero, 1997.

[15] GÁLLIGO, J.M.; ALAEJOS, M<sup>a</sup> P. "Hormigón de alta resistencia. Estado actual de conocimientos". M19. CEDEX. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. 1990.

#### **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- ANEFHOP (Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado)  
c/ Antonio González Porras nº35 - 2º  
Tel. 91 4690420  
<http://www.hormigon.org/>
  
- IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)  
c/ José Abascal nº 53 - 2º  
28003 Madrid  
Tel. 91 4429311  
Fax 91 4427294  
[http://www.ieca.es/default.asp?id\\_cat3](http://www.ieca.es/default.asp?id_cat3)