

LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL

Nombre en inglés : Sludge from ornamental stone cutting and superficial treatment



BLOQUE DE GRANITO



LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL



1.-ORIGEN ^(1, 2, 14)

Bajo la denominación de piedra natural o roca ornamental se engloban aquellas rocas que, una vez extraídas y tras un proceso de elaboración, son aptas para ser utilizadas como materiales nobles de construcción (pavimentos, aplacados, mampostería, cubiertas, etc.), elementos de ornamentación, arte funerario o escultórico y objetos artísticos variados, conservando íntegramente su composición, textura y propiedades físico-químicas.

Las rocas ornamentales de mayor interés comercial y económico son aquellas que por sus características de vistosidad, físico-mecánicas y aptitud para el pulido constituyen la materia prima que ha dado lugar al desarrollo de la llamada Industria de la Piedra Natural. Atendiendo a estos criterios se conocen mundialmente los tres grupos denominados genéricamente: Granitos, Mármoles y Pizarras, también llamados Rocas Ornamentales.

Los bloques de piedra obtenidos en cantera se envían a fábrica para su elaboración, donde se cortan en láminas mediante telares multifleje para obtener las tablas o tableros. Los bloques más pequeños se cortan con cortabloques o hilos diamantados. Para dar el tamaño final se cortan con discos de diamante o chorro de agua y se realizan los acabados tipo pulido, flameado, abujardado, etc.

Durante el proceso de elaboración de la piedra ornamental (corte y pulido) se generan dos tipos de residuos inertes: los recortes y los lodos procedentes del proceso, compuestos por las aguas de refrigeración de los telares y granos de la roca elaborada. Los lodos están compuestos de partículas finas de la roca origen, así como de algunos aditivos empleados, como la cal y la granalla, empleada como abrasivo para el corte del granito, además de las partículas derivadas del desgaste progresivo de los elementos empleados en el corte y el pulido.

Los lodos se recogen por gravedad en un pozo desde donde se bombean hacia depósitos de decantación primaria donde se espesan mediante floculantes. De este modo se obtiene, por un lado, el agua clarificada que se suele incorporar de nuevo al proceso y, por otro lado, los lodos espesados con restos de floculante.

Los lodos espesados se depositan en balsas de evaporación o bien, se someten a un proceso de deshidratación mediante filtros prensa, que tienen un mayor rendimiento. Una vez filtrados la relación entre partículas finas y agua es de 80% - 20 %, respectivamente. Posteriormente se trasladan a plantas de gestión de residuos para su posterior reutilización en aplicaciones o se depositan en vertederos controlados.

LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL

Las aplicaciones de estos residuos dependen del tamaño de sus partículas; los de mayor tamaño, que principalmente proceden de los recortes, son demandados por otras industrias para producir aglomerados o áridos para la construcción. Estos no son objeto de esta ficha. Las partículas más finas, generalmente en forma de lodo, frecuentemente no son reutilizadas y son llevadas habitualmente a vertederos.

La acumulación de grandes cantidades de estos lodos produce, en algunas zonas, un impacto ambiental y económico significativo, pudiendo representar una fuente de contaminación medioambiental en algunos casos, y en otros, supone un coste económico por el tratamiento, transporte y depósito en vertedero.

2.-VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN (2, 4, 6, 8, 9, 12,14)

En España, la actividad de extracción de rocas ornamentales se produce en la mayoría de las comunidades autónomas; no obstante, las que aportan el mayor valor de producción en términos económicos son: Galicia (36,9 %) con 116 explotaciones, Comunidad Valenciana (19,5 %) con 34 explotaciones y Castilla y León (18,8 %) con 104 explotaciones (datos de 2013 ⁽¹²⁾).

En la Figura 1 se muestra la distribución porcentual del valor de la producción de las rocas ornamentales en 2012 por Comunidades Autónomas. Galicia tiene la mayor producción de roca ornamental debido a la pizarra de techar y al granito. Castilla y León también tiene una alta producción de pizarra y, la Comunidad Valenciana y Murcia destacan por la producción de mármol. Conviene apuntar que, desde el punto de vista geológico, la mayor parte de las reservas nacionales de mármol se encuentran en Almería.

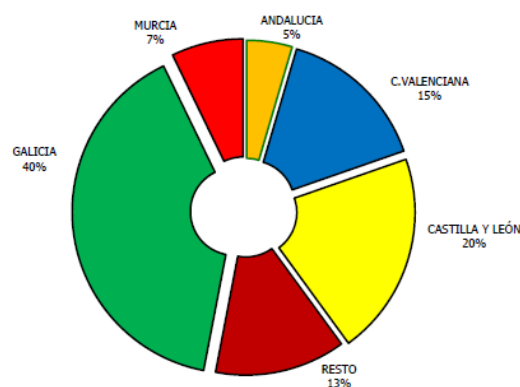


Figura 1: Porcentaje de producción de rocas ornamentales por Comunidades Autónomas (año 2012)

En la Tabla 1 se han recogido los datos de producción de los años 2008 a 2012 de los distintos tipos de roca ornamental (granito, mármol y caliza ornamental, pizarras para techar y otras rocas) en España.

LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL

Tabla 1: Producción de rocas ornamentales en España (mt)

MATERIAL (mt)	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Granito	1.571,1	1.271,7	1.093,1	901,0	681,8	614,000
Mármol/caliza	3.538,6	2.359,8	2.448,9	2.310,9	2.210,0	2.070,0
Pizarras	877,3	611,1	581,5	642,1	666,4	637,0
Otras rocas ornamentales	489,6	344,9	304,1	254,9	246,7	234,0
TOTAL	6.476,6	4.587,5	4.427,6	4.108,9	3.804,9	3.555,0

Fuentes: Elaboración propia con datos de la Estadística Minera de España

En la Figura 2, se representa gráficamente la producción de roca ornamental, observándose una fuerte disminución en la producción de mármol entre los años 2006 a 2009, que se estabiliza en los años siguientes. En cambio en el caso del granito, la producción empieza a decaer a partir de 2009 debido al Plan E. Las pizarras tienen una producción relativamente sostenida aumentando incluso en los últimos años, ya que se exporta casi toda la producción.

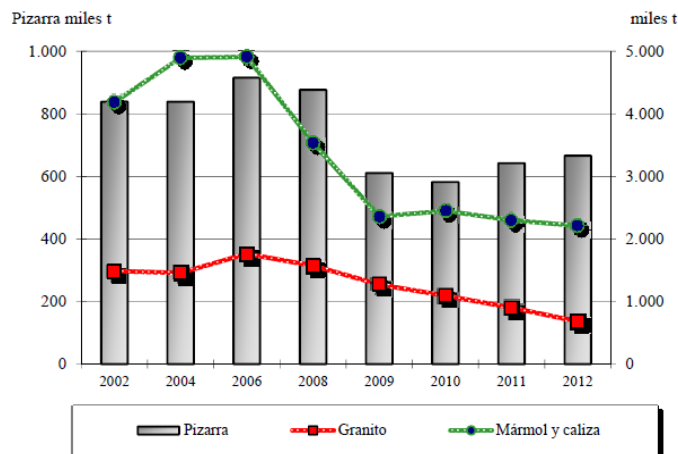


Figura 2: Producción de rocas ornamentales en España (mt)

En cuanto al número de explotaciones de producción de roca ornamental, se ha recogido su evolución para el periodo 2008 a 2012 en la Tabla, donde se refleja una disminución en el número de explotaciones, lo que está en consonancia con la menor producción durante esos mismos años.

Tabla 2: Evolución del número de explotaciones en España

	2008	2009	2010	2011	2012
Rocas Ornamentales	845	742	674	635	589

Fuente: Estadística Minera de España

LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL

A nivel mundial, en 2012, los principales productores de piedra natural fueron: China (22%), India (20%), Turquía (11%), Irán (10%), Italia (8%), España (7%) y Brasil (7%).

Se estima que entre el 20% - 30% de los bloques serrados de granito, e incluso más en el caso del mármol, se convierten en polvo fino y recortes sólidos.

Según las estadísticas a nivel mundial, la producción de residuos procedentes de las rocas ornamentales fue de 42,9 millones de toneladas (Mt) en el año 2009.

En Europa, se producen alrededor de 25,5 Mt de piedra ornamental al año (datos de 2005); la cantidad total de piedra ornamental procesada varía anualmente en función de su demanda, estimándose que se generan 6 Mt de lodos (en forma de residuo seco) al año.

Mármol

España es uno de los principales productores de mármol a nivel mundial junto con Italia, China, Irán y Turquía. La mayor parte de los yacimientos y extracciones se concentran en las provincias del arco mediterráneo situándose Almería a la cabeza donde se encuentra la "Comarca del Mármol". El mayor volumen de producción se concentra en las Comunidades Autónomas: Valenciana, 46,6 % (Alicante 45,8 %), seguida por Andalucía, con un 24,2 % (Almería 21,6 %) y Murcia, 14,6 %. Estas tres CCAA han producido en 2012 casi el 86 % del total nacional. En la Figura 3 se muestra el mapa de producción de mármol en España.

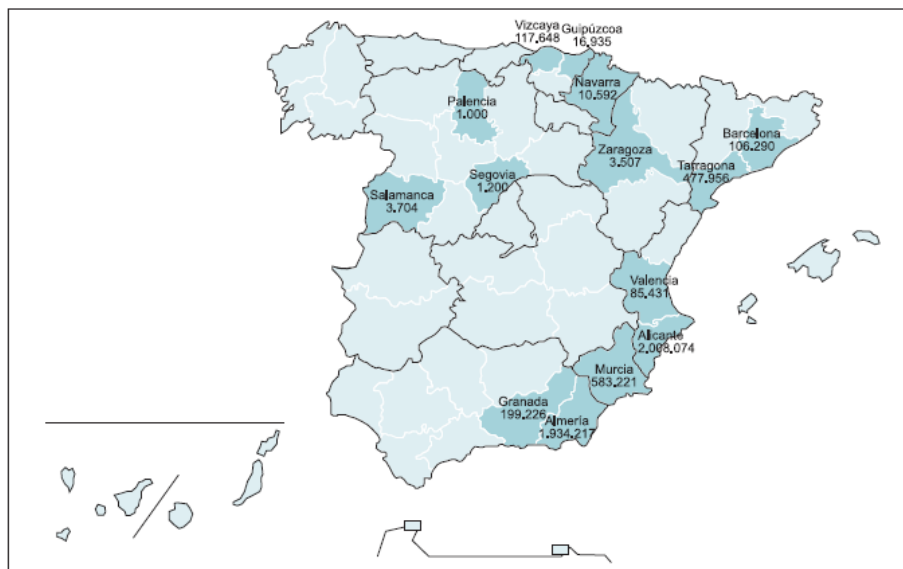


Figura 3: Extracción de mármol por provincias en toneladas (2006)

Fuente: Estadística Minera de España (2006). Elaboración propia.

En España, los lodos producidos ascienden aproximadamente a unas 700.000 t anuales⁽⁹⁾. Se estima que durante el proceso de corte de bloques para producir placas de 20 mm de espesor

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

se pierde entre un 20-25 % de la masa del bloque en forma de residuo y, durante el proceso de pulido de las tablas, se pierde 0,2 cm de grosor de cada tabla. De modo que, aproximadamente, se producen unos 200 kg de residuo seco por metro cúbico de mármol tratado

Granito

Galicia es la Comunidad Autónoma de España de mayor producción (92% del total nacional) y de transformación del granito, seguida de Madrid y Extremadura. España ocupa, a nivel europeo, el segundo puesto tras Italia, y el quinto a nivel mundial. Se estima que en la zona de O Porriño (Pontevedra), la zona granitera más importante de España, se generan anualmente más de 300.000 t de lodos de corte del granito ⁽¹⁷⁾.

Pizarra

España es el primer productor de pizarra, situándose muy por encima de Francia que ocupa el segundo lugar. Otros países destacados en este sector son: Alemania, Reino Unido e Irlanda. Por zonas, dos son las Comunidades Autónomas donde se concentra la producción española de pizarra: Galicia, con el 55,3 % del total español, y Castilla y León, con un 38,6 %, (datos de 2012). Le siguen: Cataluña (2,4 %), Andalucía (2,3 %), Extremadura (1 %).

3.- VALORIZACIÓN

Los residuos procedentes de la elaboración de la piedra ornamental, en su gran mayoría lodos, una vez tratados tienen una variedad de usos potenciales. No obstante, en la actualidad, grandes cantidades no encuentran una salida comercial. Se hace necesario realizar estudios para evaluar la viabilidad de valorización de este tipo de residuos como materia prima en la elaboración de materiales para la construcción o en otras aplicaciones potenciales.

3.1.- PROPIEDADES DEL RESIDUO ^(1, 2, 3, 9, 14, 15)

En el tratamiento, corte y pulido de la piedra ornamental, se genera principalmente lodos de diferente naturaleza según el tipo de roca de la que procedan: mármol, granito o pizarra, cuyas características físicas y químicas reflejan la composición original de la roca, y por tanto, tienen unas características muy estables.

Estudios ⁽¹⁵⁾ realizados han demostrado que durante los procesos de aserrado o acabado, al igual que durante el proceso de deshidratación, no se utilizan aditivos ni elementos que puedan alterar la composición química del residuo que varíe su carácter inerte.

Los diferentes tipos de telares y otros instrumentos de corte (cortabloques, discopunte, etc) y de pulido (calibradora, pulidora, pulecantos, etc.) empleados en la elaboración de la piedra influyen en el tamaño de los residuos generados, por lo que el diámetro de las partículas presenta dispersión.

LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL

Propiedades físicas

Lodos procedentes del tratamiento del mármol

Según el tipo de telar empleado en el corte del mármol el tamaño de partículas de residuo generadas varía entre $1\mu\text{m}$ y $50\mu\text{m}$.

El tamaño D_{80} del lodo está en torno a $50\mu\text{m}$ y $70\mu\text{m}$. Según su distribución granulométrica presenta una textura de tipo limoso ⁽³⁾.

La distribución granulométrica de los lodos es ligeramente menor que la del filler calizo (Figura 4).

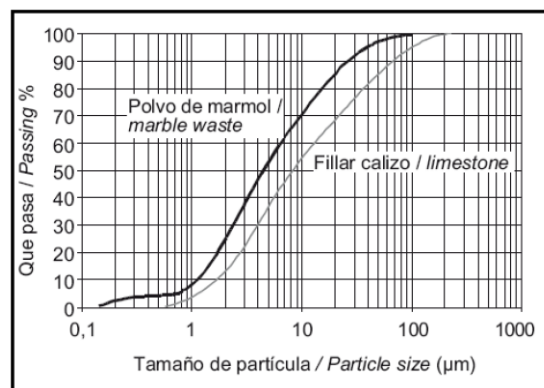


Figura 4: Distribución granulométrica del filler calizo y lodos del corte de mármol^[9]

La densidad ⁽⁷⁾ del residuo seco de mármol es del orden de $2,78\text{ g/cm}^3$

Lodos procedentes del tratamiento del granito

El serrín de granito es un material de grano fino (silt loam) con baja plasticidad, que puede clasificarse, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, como Limo de Baja plasticidad (ML).

La superficie específica de los serrines es significativamente inferior a la que se observa en materiales naturales de igual tamaño de grano. Se trata de un material sin tendencia a la expansividad.

La densidad de las partículas sólidas presenta un valor próximo a $3,2\text{ Mg/m}^3$, muy por encima del valor esperable a priori para una roca ígnea clásica o un suelo, debido a los restos de granalla y virutas de flejes, ambas de aceros.

La densidad seca óptima para el Próctor Normal está en torno a $1,41\text{ Mg/m}^3$, para una humedad ligeramente superior al 33 %, y el índice CBR presenta un valor ligeramente superior a 10, característico de explanadas poco deformables (tipo E2).

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

En el caso del Próctor Modificado, la densidad seca óptima está en torno a 1,72 Mg/m³, para una humedad del 16 % y; el índice CBR, alrededor de 60, valor propio de explanadas tipo E3 (muy poco deformables).

El ángulo de rozamiento presenta un valor medio de 34°. Los valores de cohesión son muy bajos, 21 kPa, en promedio, tal y como corresponde a un material constituido por partículas sueltas no cementadas.

Propiedades químicas ^(1, 2, 14, 17)

Lodos procedentes del tratamiento del mármol

El mármol es una roca carbonada metamórfica compuesta predominantemente por calcita y/o dolomita, cuyo contenido supera el 90 %. La composición química de los residuos generados en la elaboración del mármol carece de elementos tóxicos o nocivos, ya que está constituida mayoritariamente por partículas minerales (calcita, dolomita y trazas de cuarzo, micas, feldespatos y minerales arcillosos), junto con concentraciones del orden de ppm de floculantes y restos de resinas. El componente principal de los lodos residuales es el carbonato cálcico (CaCO₃), por lo que las propiedades del lodo son las de este mineral. Sin tratamiento presentan una humedad alrededor del 20%-30%. Tiene un pH ligeramente alcalino, en torno a 8,3, no muestra salinidad, tiene baja capacidad de almacenar cationes y un alto contenido en calcio. Su composición química se puede ver en la Tabla3.

Tabla 3: Composición química del polvo de mármol (% en peso)

Óxido	CaO	MgO	(K,Na) ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P.F.	Varios
Residuo de mármol	55,1	1,3	0,3	0,3	0,3	0,14	42,7	0,1

Lodos procedentes del tratamiento del granito ⁽¹⁷⁾

Los residuos procedentes de la elaboración del granito están constituidos por una masa de cristales y, en menor proporción, por fragmentos de roca, cuya composición mineralógica es semejante a la de las rocas graníticas de las que proceden; su composición química está enriquecida en compuestos de Fe y cal.

No obstante, el empleo de hidróxido de calcio y de granalla unido al desgaste producido de los flejes de los telares, les otorga un carácter alcalino y la presencia de partículas metálicas incrementa la densidad de las partículas sólidas, pudiendo dar lugar a la formación de costras de oxidación.

La Tabla4 muestra el análisis químico del polvo procedente de la elaboración del granito.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

Tabla 4: Composición química del polvo de granito (% en peso)

Óxido	SiO ₂	MgO	(K,Na) ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P.F.	Varios
Residuo de Granito	61,2	0,9	7,5	6,6	12,3	12,3,14	0,7	0,051

Se ha estudiado la composición de los lixiviados de muestras de residuos de la elaboración del granito (Tabla 5), dando como resultado que cumplen los criterios sobre valores límite de lixiviación de residuos no peligrosos inertes ⁽¹⁴⁾.

Tabla 5: Proporciones promedio de agua, cal, granalla y polvo mineral presente en los serrines de granito de telares españoles. Fuente: ANGE (2002)

Componente	% en peso	g/L	% en volumen
Agua	36,7	640	67,9
Cal	0,45	8	0,4
Granalla	16,3	294	4,2
Lodo Mineral	47,1	845	27,6

3.2.- PROCESAMIENTO ^(1, 9, 10)

El proceso de tratamiento y reutilización de los lodos generados en la elaboración y corte de la piedra ornamental es viable técnicamente porque se dispone de la tecnología necesaria para ello: equipos de espesamiento rápido y de filtración de lodos; molinos micronizadores para reducir el tamaño de las partículas del orden de 10 micrómetros; equipos de secado de lodos (secadores, molinos secadores y sistemas de cogeneración).

Según las especificaciones del uso industrial al que se vaya a destinar el residuo, para la preparación de los lodos se debería tener en consideración una serie de características, como son: tamaño de partícula y clasificación, contenido de humedad, color, control de calidad, presencia de impurezas y metales traza, cantidad producida y localización, gastos de tratamiento, transporte, etc. En el caso de su aplicación en la fabricación de cemento y de productos de hormigón y cerámicos, tanto el tamaño de partícula como la proporción del contenido de magnesio son factores poco condicionantes.

Los lodos del corte del mármol tras el proceso de sedimentación se presentan en forma de terrones de una masa húmeda y poco manejable, floculados a partir de aditivos químicos y prensados, con poca uniformidad en cuanto a su contenido de humedad.

Para su empleo en hormigones se requiere formar una lechada, añadiendo agua a los terrones y mezclarlos enérgicamente hasta alcanzar una lechada fluida y homogénea. Otra posibilidad consiste en secar los lodos para posteriormente disgregarlos por medios mecánicos, aunque el coste energético de esta opción es alto. La tercera posibilidad consiste en utilizar los lodos de la manera en que se presentan, esta opción es sencilla pero se pierde precisión en el cálculo de la relación agua/cemento.

La opción más conveniente y económica, para la formulación de hormigones autocompactantes, es la lechada.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

3.3.- APLICACIONES (1, 2, 3, 5, 7, 9, 14, 16, 17, 18, 19)

Desde el punto de vista técnico y de acuerdo con los requisitos de las materias primas, el reciclado de estos residuos es viable y tiene un amplio rango de aplicaciones potenciales, como son la producción de cemento y hormigón, la industria cerámica y de productos prefabricados de hormigón (baldosas, bloques, etc.), en la fabricación de piedra artificial (jardineras, bancos, etc., sin poliéster) y otros posibles usos en la fabricación de plásticos, pintura, papel, etc.

Los sectores del cemento, de hormigón y zahorras junto con la industria cerámica podrían ser las aplicaciones potenciales con un mayor consumo de los lodos del mármol empleados como materia prima.

3.3.1. Utilización de los lodos procedentes del corte y pulido del mármol

Los lodos procedentes del corte y tratamiento superficial del mármol al estar formados básicamente por carbonato cálcico, tendrían las mismas aplicaciones que los productos derivados de la caliza. Los recortes se pueden emplear en la construcción como áridos para morteros y hormigones o para fabricación de terrazos, entre otros.

Los problemas fundamentales para el empleo de estos residuos son la humedad y la heterogeneidad del color.

Su empleo para la fabricación de cemento, prefabricados o cerámica, por ejemplo, no requiere molienda previa, en cambio para otros usos, como por ejemplo para carga de papel o de pintura si es necesario un proceso de molienda previo para conseguir el tamaño uniforme de partícula con el diámetro requerido, así como un secado para evitar el alto contenido de humedad (en torno al 20%-30%), con el consumo de energía que ello conlleva.

Se pueden realizar tres tipos de molienda:

- Molienda Fina 1mm - 100µm
- Molienda Ultrafina 100 µm - 10µm
- Micronización 10 µm - 1µm

Si fuera posible, sería conveniente almacenar los residuos generados en depósitos diferentes en función de la composición química de la roca de la que proceden. De este modo se obtendrían residuos con un valor añadido: residuos con una composición química homogénea que se destinarían a los usos dónde mejor se adecúen en función de sus características técnicas.

Entre las diferentes aplicaciones se pueden señalar:

- La **producción de cal**: representa uno de los principales usos ya que las especificaciones no son muy estrictas. En el proceso de calcinación se debe aumentar el poder calorífico para evaporar el exceso de humedad.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

- **Prefabricados** para la construcción: consumen una tonelada de residuo por cada m³ de elemento prefabricado.
- Producción de cemento: La caliza es la materia prima básica en la producción de cemento, siendo la industria del cemento la principal consumidora potencial de los residuos de mármol
- Finos calcáreos para la elaboración de hormigón: Está en fase de estudio.
- En la industria de la pintura también se emplea carbonato de calcio como extensor, además de ser utilizado como pigmento y carga.
- En plásticos, y en particular el PVC, el carbonato de calcio también se utiliza como carga en la producción de PVC y poliéster, mejorando la rigidez y la densidad del plástico y reduciendo el costo de producción.
- **Usos agrícolas:** debido al alto contenido en calcio, los lodos residuales pueden ser utilizados como nutriente para plantas y suelos y también para animales. Se pueden emplear como sustrato de plantas para fitorremediación y regeneración paisajística en taludes y canteras. Como el lodo retiene una cantidad elevada de agua a bajas tensiones, hay que tener en cuenta este aspecto de cara a su empleo en cultivos ⁽³⁾.
- Como **aditivo** ⁽⁵⁾ para la rehabilitación natural asistida de suelos ácidos contaminados con metales pesados por drenajes ácidos procedentes de escombreras mineras. La adición de carbonato cálcico micronizado reduce la acidez y eleva el pH del suelo de 3,2 a 6.
- En la **estabilización de suelos** evitando el hinchamiento en suelos arcillosos expansivos, debido a su alto contenido en cal (CaO) de hasta 55 % en peso. Añadiendo un 5 % de residuo en polvo se reduce hasta un 28 % el hinchamiento, reduciéndose hasta un 50 % si la cantidad añadida es de un 30 % ⁽¹⁶⁾.

Otros usos posibles serían la industria del hierro y el acero, la del papel, como materia prima para la fabricación de vidrio común, para mejorar pastas cerámicas para fabricación de materiales de construcción (baldosas, azulejos, ladrillos, tejas, bloques, etc.), o bien para la corrección de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos, en la restauración de elementos constructivos como desulfurante en la depuración de gases, para la preparación de cosméticos y productos farmacéuticos, etc..

Industria Cerámica ⁽²⁾

El uso de estos residuos en la fabricación de productos cerámicos (ladrillos, tejas, baldosas, etc.) influye de forma importante sobre sus propiedades. Así, el carbonato cálcico adicionado junto a las arcillas provoca una reducción de la temperatura de cocción, según los estudios de investigación llevados a cabo, lo que supondría un ahorro energético.

Los residuos de mármol reaccionan fácilmente con los filosilicatos y cuarzo proporcionando una mejor sintonización de los polvos originales, además corrigen la expansión debido a la humedad. En experimentos llevados a cabo, se ha demostrado que el empleo de una

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

proporción de entre 15-20% de polvo de mármol en la composición de la cerámica roja mejora las propiedades del ladrillo cerámico. Además, se puede emplear como pigmento porque da un color amarillento a las pastas cerámicas. Entre los inconveniente se ha visto que la resistencia a la flexión disminuye cuando la adición de lodos aumenta significativamente.

Fabricación morteros y hormigones y sustitución del cemento ^(7, 9, 10, 11)

Las características intrínsecas del lodo de corte del mármol: composición, tamaño de partícula y compatibilidad con los componentes del hormigón, le confiere unas características ideales para su empleo en materiales de construcción.

Estos lodos pueden sustituir satisfactoriamente parte de la caliza usada en la fabricación de cemento, teniendo en cuenta el factor humedad.

Se han realizado diferentes estudios para evaluar las posibilidades de utilización de los lodos, residuos del corte y tratamiento superficial del mármol en el hormigón. Se ha visto que su empleo como filler en hormigones autocompactantes (HAC) es adecuado, ya que químicamente es comparable al filler calizo, y se pueden obtener HAC con mayores prestaciones y más económicos.

En sustitución del filler calizo el HAC presenta una mayor resistencia a compresión y una menor permeabilidad al agua. Así, el polvo de mármol es una adición efectiva para mejorar la cohesión de las mezclas, además permite sustituir hasta un 10% de arena sin que la resistencia a compresión se vea afectada. Asimismo, favorece la hidratación del cemento a tiempos cortos y no altera la hidratación final de las pastas compuestas por cemento portland.

Algunos estudios han observado que la utilización de los residuos del corte de granito y de mármol, hasta en un 50% en peso del cemento, no afecta a las propiedades de los hormigones y ayudan a conseguir las propiedades de autocompactabilidad en los HAC. Estos residuos son un excelente filler para los HAC de alta resistencia y pueden sustituir totalmente al filler calizo^[9]. Por otro lado, se ha visto que el empleo de residuos del granito incrementa la durabilidad del hormigón; esto se puede atribuir a la composición química del granito.

En la producción HAC se puede reemplazar hasta un 30% el cemento que constituye el hormigón por estos residuos sin afectar a sus propiedades. Durante las dos primeras horas tras su fabricación no se evidencia una pérdida importante de fluidez. En general se observa que su empleo no afecta la demanda de aditivo y no se producen incompatibilidades con los aditivos floculantes presentes en el polvo del mármol. Para su empleo es más factible trabajar con el residuo en forma de lechada.

Los HAC que incorporan lodos de mármol presentan un acabado superficial excelente (El diámetro medio de las partículas del lodo de mármol es de 12um).

Dada la coloración que presentan los lodos, si se separa en origen se podrían aplicar en hormigones y cementos blancos.

En hormigones convencionales para aplicaciones no estructurales ⁽⁷⁾, la incorporación del residuo en su estado natural (saturado) en sustitución de arena en distintos porcentajes no

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

influye en la consistencia del hormigón (ensayo slump), en cambio sí disminuye la resistencia a compresión.

3.3.2. Empleo de los lodos del corte y pulido del granito ^(8, 9, 17, 18)

Los lodos del aserrado del granito se pueden emplear en diversos usos:

- **Remineralización de suelos** agrícolas y forestales.
- **Producción de materiales vitrocerámicos.** Los serrines graníticos se pueden emplear como materia prima en la industria cerámica al tener una composición similar (cuarzo, feldespato y micas) cumpliendo con las prescripciones técnicas. Otra aplicación en esta línea sería como fuente para la extracción de feldespato.
- **Aditivo** de hormigones y mezclas bituminosas, obteniendo pequeñas mejoras en el comportamiento resistente. Como se ha indicado anteriormente, se puede emplear como filler mineral.
- Mezclados con cemento en la **fabricación de losetas para pavimento** doméstico.
- En la **construcción de barreras de impermeabilización** y/o sellado en vertederos, como alternativa al empleo de otros materiales sintéticos.
- Como **material de relleno** dado su comportamiento frente a la consolidación y permeabilidad.

Los serrines de granito son un buen material de préstamo para la construcción de rellenos. También podrían usarse como material de terraplén de obras lineales, ya que pueden ejecutarse terraplenes de altura moderada con asientos reducidos y sin limitaciones en el proceso constructivo. Sin embargo sería necesario utilizar aditivos estabilizantes en la zona final de la explanada para que las deflexiones generadas por cargas en superficie fuesen pequeñas.

Por sus características granulométricas, se clasificarían como suelos tolerables, lo cual limita, a priori, su uso al núcleo o cimiento de terraplenes. No obstante, los índices CBR obtenidos (≥ 10) permitirían su uso en capas de coronación. En cuanto a su uso para espaldones, habría que tener en cuenta las características específicas de cada proyecto.

- Se han realizado estudios y ensayos geotécnicos empleando este residuos en la **estabilidad de taludes**. Se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto al ángulo de rozamiento, consolidación o impermeabilización.
- También ha sido modelizado su uso en firmes y explanadas de viales. Se simuló el comportamiento de un relleno de serrines como subcapa en un pavimento de una obra lineal y como material de préstamo en obras de tierra, obteniendo buenos resultados de cara al uso masivo de este material. Según el PG-3 serían materiales marginales, que podrían ser mejorados con cementos, geotextiles o una eficiente compactación.

La exposición al aire de los serrines en capas delgadas húmedas puede oxidar la granalla que contiene y dar lugar al desarrollo de costras de oxidación. Si se forman en el interior, mejoran su resistencia debido a que presentan mayor cohesión y su rugosidad superficial es muy alta. Si se forman costras superficiales, contribuyen a

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

impermeabilizar la superficie, limitando la infiltración de agua y mejorando la resistencia a la erosión de los serrines expuestos en taludes por acción de la escorrentía superficial. No obstante, la formación de las costras implica un aumento de volumen por lo que existe la posibilidad de que en obras de tierra en las que se empleen serrines se produzcan levantamiento de capas compactadas cerca de la superficie, o que se desarrollen caminos para el flujo preferente del agua.

3.4. OBRAS REALIZADAS

La utilización de lodos procedentes de tratamiento del granito y del mármol se encuentra en fase experimental, por lo que prácticamente no existen obras en las que se hayan utilizado los lodos procedentes del tratamiento de la piedra ornamental.

4.-CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES (1, 13, 14)

La Directiva Marco de Residuos, 2008/98/CE, establece el marco jurídico de la Unión Europea para la gestión de los residuos. En España, la transposición de esta Directiva al ordenamiento jurídico interno se ha llevado a cabo a través de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados que sustituye a la anteriormente vigente Ley 10/1998, de Residuos.

La Ley 22/2011 establece en su artículo 6 que la determinación de los residuos que han de considerarse como residuos peligrosos y no peligrosos se hará de conformidad con la Lista Europea de Residuos (LER).

Dentro de la Lista Europea de Residuos, la clasificación de los lodos se corresponde con el Código 01 04 13 relativo a “Residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales. Residuos de la transformación física y química de minerales no metálicos. Residuos del corte y serrado de piedra distintos de los mencionados en el código 01 04 07”, y se consideran residuos de carácter no peligroso.

El Real Decreto 777/2012, de 4 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por las actividades mineras, en su Anexo I detalla las características que han de tener los residuos con código LER 01 04 13 para poder ser calificados como inertes, y que se recogen en la siguiente Tabla 6

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

Tabla 6: Características de los residuos con código LER 01 04 13 para calificarse como inertes

<i>Tipo de residuo de industrias extractivas (Código LER)</i>	Residuos del corte y serrado de piedra distintos de los mencionados en el código 01 04 07 (Código LER: 01 04 13)
<i>Naturaleza del residuo de industrias extractivas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos de grano fino producidos por corte y aserrado de piedra natural. Los residuos pueden ser sólidos (secos o húmedos), semisólidos o en forma de pulpa formada por una suspensión de sólidos en agua. • Residuos extractivos gruesos formados por fragmentos de rocas no aptos para su posterior procesamiento, venta o utilización.
<i>Procesos o actividades donde se produce.</i>	<p>Los residuos de la extracción se producen durante la separación, aserrado, corte y acabados superficiales de la piedra natural, mediante alguna de las siguientes técnicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aserrado de bloques con telares multifleje. • Aserrado de bloques con discos diamantados o hilos diamantados. • Acabados de planchas de roca (pulido, apomazado, abujardado, flameado, arenado, etc.). • Corte secundario con discos o similar. • Acabado secundario
<i>Tipos de materiales a partir de los cuales se puede producir el residuo de industrias extractivas.</i>	<p>Los residuos pueden producirse durante el tratamiento de los siguientes recursos minerales de origen natural en la planta de tratamiento. En concreto, los residuos en forma acuosa o con un alto grado de humedad y, en menor medida, en fragmentos de roca, pueden provenir del tratamiento de las siguientes tipologías de rocas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rocas ígneas: granitos, granodioritas, dioritas, gabros, tonalitas, peridotitas, etc. • Rocas en diques: cuarzos, aplitas, pegmatitas, lamprófidos, anfibolitas y pórfidos. • Rocas sedimentarias, de precipitación o biogénicas: calizas, dolomías, travertinos, areniscas, calcirruditas, calcarenitas. • Rocas metamórficas y metasomatismo: mármoles, calizas marmóreas, serpentinas, gneises, esquistos, cuarcitas, migmatitas. Pizarras de las zonas de Valdeorras (Ourense), Caurel (Lugo), Ortigueira (A Coruña), La Cabrera (León) y Aliste (Zamora). <p>Los residuos procedentes del acabado de planchas de rocas no deben contener sustancias peligrosas procedentes del tratamiento físico o químico de los minerales no metálicos. Cuando se utilicen, se deberá acreditar este extremo, a partir de las informaciones proporcionadas por el fabricante de dichas sustancias (fichas de características de los aditivos, reactivos, resinas, etc.) y de las concentraciones finales de estas sustancias presentes en los residuos.</p>

Los residuos de industrias extractivas que cumplan con todas las características detalladas en la tabla anterior tendrán la condición de «inertes» a efectos de lo dispuesto en Real Decreto 975/2009, de 12 de junio. La clasificación de estos residuos como inertes no estará sometida a la realización de pruebas adicionales. La evaluación del carácter inerte habrá de completarse mediante su caracterización según lo dispuesto en el apartado 2.3 del anexo I

Se pueden resaltar algunos beneficios ambientales y económicos como consecuencia del tratamiento y el aprovechamiento de los residuos de la elaboración de la piedra ornamental como materia prima en diversos materiales de construcción:

- Se utilizan residuos destinados a eliminación, por lo que se minimiza los costes debido a su almacenamiento y disminuye la cantidad de los residuos generados destinados a vertedero, a la vez que se evita la afección al medio natural.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

- Se obtiene hormigones de menor impacto ambiental al reutilizar un residuo a la vez que se puede ahorrar entre el 10 y 30% de cemento en la formulación.
- Posibilita el reciclaje de los materiales que los componen permitiendo su empleo en otros usos, tales como materiales de construcción (cemento, cal, etc.).
- Supone un ahorro económico para la industria cementera y de la cal que no pagan por la adquisición de estos residuos. El único inconveniente sería su transporte a las fábricas.
- Mejor aprovechamiento de los recursos naturales con el ahorro de materias primas que supone, así como la conservación de los recursos naturales.
- Menores emisiones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero al suministrar una materia prima.

Como inconvenientes cabe resaltar, los costes relacionados con el transporte, cuando las distancias entre la planta de generación y la planta de destino sean grandes. Si ambas plantas estuvieran relativamente cerca la valorización sería muy eficiente puesto que el coste de valorización y caracterización de los lodos es menor que el coste de las materias primas convencionales

5.- NORMATIVA TÉCNICA

No existe normativa técnica específica que regule el uso de estos residuos, si bien se incluye a continuación la normativa técnica española y de la ASTM referente a distintos materiales de construcción donde es posible su empleo como materia prima:

- UNE-EN 459-1:2011 Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad
- EN 197-1 Cemento Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- UNE-EN 771-3:2011 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 3: Bloques de hormigón (áridos densos y ligeros).
- EN 771-1:2011 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida.
- EN 15285:2008 Piedra aglomerada. Baldosas modulares para suelos (uso interno y externo).
- UNE-EN ISO 3262-5:1999 Pigmentos extendedores para pinturas. Especificaciones y métodos de ensayo. Parte 5: Carbonato cálcico cristalino natural. (ISO 3262-5:1998).
- ASTM C1097-06a Standard Specification for Hydrated Lime for Use in Asphalt Cement or Bituminous Pavements.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

- ASTM C141-97(2005) Standard Specification for Hydraulic Hydrated Lime for Structural Purposes.
- ASTM C1489-01 Standard Specification for Lime Putty for Structural Purposes.
- ASTM C150-07 Standard Specification for Portland Cement.
- ASTM C1529-06a Standard Specification for Quicklime, Hydrated Lime and Limestone for Environmental Uses.
- ASTM C33-03 (2005) Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM D1199-86 (2003) Standard Specification for Calcium Carbonate Pigments.
- ASTM D1366-86 (1997) Standard Practice for Reporting Particle Size Characteristics of Pigments.

6.- REFERENCIAS

- [1] SANTOS RUIZ, J. "Estudio para tratar de identificar posibles aplicaciones industriales para los residuos generados en el proceso de corte y elaboración de piedra natural, en concreto del mármol, analizando su viabilidad técnica y económica". Proyecto fin de carrera. EUPM-UPC, 2004.
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3877/34033-3.pdf?sequence=3>
- [2] CASTAÑO DOMENE, R. "Propuesta de instalación para la recuperación de lodos procedentes del mecanizado del mármol". Proyecto fin de Máster. Universidad de Almería, 2011.
- [3] ORTEGA, M., ORDOVÁS, J.C. "Aprovechamiento de los lodos residuales de la industria del mármol como componente de sustratos de especies para fitorremediación". ETSIA, Universidad de Sevilla
https://investigacion.us.es/sisius/sis_showpub.php?idpers=4370
- [4] Panorama Minero 2014. Instituto Geológico y Minero de España
<http://www.igme.es/PanoramaMinero/Panorama%20minero%202014.pdf>
- [5] FERNÁNDEZ-CALIANI, J.C., BARBA-BRIOSO, C., "Metal immobilization in hazardous contaminated minesoils after marble slurry waste application. A field assessment at the Tharsis mining district (Spain)". Elsevier, 2010 Sep 15;181(1-3):817-26. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.087.
- [6] Cluster del Granito: <http://www.clustergranito.com/magnitudes.php>
- [7] SANTOS, A., VILLEGAS, N., BETANCOURT, J., "Residuo de mármol como insumo en la

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

- construcción civil, diagnóstico de la Comarca de la Laguna”. Revista de la Construcción, vol. 12, nº 22, 2012.
- [8] MONEM, A., TAMAN, Z., EL-KALIOUBY, B., “Recycling of ornamental stones hazardous wastes”. Natural Resources, 2011, 2, 244-249.
- [9] VÁLDEZ, P., BARRAGÁN, B., GIRBÉS, I., SHUTTLEWORTH, N., COCKBURN, A., “Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes”, Materiales de Construcción, vol. 61, nº 301. 61-76, 2010.
- [10] GIRBÉS, I., “Reutilización de residuos de corte y pulido de mármol para el desarrollo de hormigones autocompactantes”. AIDICO
[https://www.cma.gva.es/comunes_esp/documentos/agenda/val/62563-Presentaci%C3%B3nTL\(AIDICO\)ISABEL%20GIRB%C3%89S.pdf](https://www.cma.gva.es/comunes_esp/documentos/agenda/val/62563-Presentaci%C3%B3nTL(AIDICO)ISABEL%20GIRB%C3%89S.pdf)
- [11] HEBHNOUB, H., AOUN, H., BELACHIA, M., HOUARI, H. GHORBEL, E., “Use of waste aggregates in concrete”. Construction and Building Materials, nº 25, 2011, 1167-1171.
- [12] Estadística Minera de España 2013. Ministerio de Energía, Industria y Turismo
- [13] Versión inicial Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR), junio 2015
http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/20150601pemarconsultapublica_tcm7-383820.pdf
- [14] AIDICO, AINTEMIN, CEVALOR, IMM CARRARA, “Guideline of posible application os slurries in industries demanding microniced materials and valorization os slurries”. Deliverable, LIFE+RECYSLURRY, LIFE Project Number LIFE10 ENV/ES000480, 2012.
- [15] INSTRUCCIÓN técnica de residuos ITR/01.0/04, de 2 de junio de 2005, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, referente a la gestión de residuos de elaboración de rocas ornamentales. Diario Oficial de Galicia nº 113, Consellería de Medio Ambiente. Junio 2005.
- [16] BAŞER, O., “Stabilization of expansive soils using waste marble dust”. Tesis doctoral. School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. 2009.
- [17] BARRIENTOS RODRIGUEZ, V., “Caracterización geotécnica de los serrines de granito y algunas aplicaciones en ingeniería civil”. Tesis doctoral. Instituto Universitario de Geología “Isidro Pongal”. 2007.
- [18] FALCÓN SUÁREZ, I., “Los serrines de granito como barrera de impermeabilización para su uso en vertederos”. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de La Coruña. 2011.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: NOVIEMBRE Año: 2015
LODOS PROCEDENTES DEL CORTE Y TRATAMIENTO DE LA PIEDRA ORNAMENTAL		

7. - ENTIDADES DE CONTACTO

- Asociación Empresarial de Investigación Centro Tecnológico del Mármol, la Piedra y Materiales

Ctra. De Murcia, s/n – 30430 – Cehegín (Murcia)
Tif. 968 741500
info@ctmarmol.es
<http://www.ctmarmol.es/>

- Cluster de la piedra

Av. Madroños, 39
28043 Madrid
Tif.917 218 766
<http://clusterpiedra.com/>

- Centro Tecnológico Avanzado de la Piedra

Ctra. Olula del Río Km 1.7
Macael
Tif. 950 126 370
Fax. 950 126 078
<http://www.ctap.es/>

- Asociación de Productores de Piedra Natural de la Región de Murcia (M.A.R.S.A.).
- Federación Europea e Internacional de Industrias de la Piedra Natural (EUROROC).
- Red Temática de la Piedra Natural (RedPNAT)