# CATÁLOGO DE RESIDUOS UTILIZABLES EN CONSTRUCCIÓN

CEDEX







## LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DE ROCA ORNAMENTAL





GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
CEDEX

# ÍNDICE GENERAL

**1. ANTECEDENTES Y OBJETO** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**2. RESUMEN Y CONCLUSIONES** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**1. ORIGEN** ..... **1**
**2. VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DEL RESIDUO (2, 4, 6, 8, 9, 12,14, 19, 21, 24-29)** ..... **3**
2.1 MÁRMOL ..... 6
2.2 GRANITO ..... 6
2.3 PIZARRA ..... 6
**3. VALORIZACIÓN** ..... **7**
3.1 PROPIEDADES DEL RESIDUO (1, 2, 3, 9, 14, 15, 20, 28) ..... 7
3.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS ..... 7
3.1.1.1 LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL MÁRMOL ..... 7
3.1.1.2 LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL GRANITO ..... 8
3.1.1.3 LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DE LA PIZARRA (31, 32, 33 ,34 ..... 8
3.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS (1, 2, 14, 17, 27, 35) ..... 9
3.1.2.1 LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL MÁRMOL ..... 9
3.1.2.2 LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL GRANITO (14, 17, 27,29, 30, 31, 35) ..... 9
3.1.2.3 LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DE LA PIZARRA (34, 36 ..... 10
3.2 PROCESAMIENTO (1, 9, 10) ..... 11
3.3 APLICACIONES (1, 2, 3, 5, 7, 9, 14, 16-19, 38) ..... 11
3.3.1 USO DE LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL MÁRMOL(22) ..... 12
3.3.1.1 INDRUSTRIA CERÁMICA (2,39- 41) ..... 12
3.3.1.2 FABRICACIÓN MORTEROS, HORMIGONES Y SUSTITUCIÓN DEL CEMENTO (7, 9, 10, 11, 16, 42) ..... 12
3.3.1.3 OTRAS APLICACIONES ..... 13
3.3.2 USO DE LOS LODOS DE TRATAMIENTO DEL GRANITO (8, 9, 17, 18) ..... 14
3.3.3 USO DE LOS LODOS DE TRATAMIENTO DE LA PIZARRA ..... 15
3.4 OBRAS REALIZADAS ..... 16
**4. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES (1, 13, 14)** ..... **17**
4.1 INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL ..... 20
**5. NORMATIVA TÉCNICA** ..... **20**
**6. REFERENCIAS** ..... **21**
**7. ENTIDADES DE CONTACTO** ..... **25**
**AGRADECIMIENTOS** ..... **26**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Varios procesos del tratamiento de la roca ornamental (fuente: INTROMAC) ..... 2

Figura 2.- Número de explotaciones y tipo de roca ornamental por provincias en 2023 (elaboración propia con datos procedentes de Estadística Minera 2023[12]) ..... 3

Figura 3: Porcentaje de producción (de miles de toneladas) de rocas ornamentales para el año 2023 (datos tomados de Estadística Minera 2023[12]) ..... 5

Figura 4.- Distribución granulométrica del filler calizo y lodos del corte del mármol [9] ..... 7

Figura 5.- Evolución temporal del relleno de un hueco minero con lodos deshidratados (fuente Sestrama Ibérica) ..... 17

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.-Producción de rocas ornamentales en España (miles de toneladas) [datos procedentes de Estadística Minera 2023[12]] ..... 4

Tabla 2.-Producción porcentual (en toneladas) de roca ornamental en el año 2023 por CCAA. [elaboración propia con datos de Estadística Minera 2023[12]] ..... 4

Tabla 3.- Composición química del polvo de mármol (% en peso) ..... 9

Tabla 4.- Composición química del polvo de granito (% en peso [1, 29, 31, 35, 57, 58]) ..... 10

Tabla 5.- Composición química del polvo de la pizarra (% en peso [34, 36, 37]) ..... 10

Tabla 6.- Características de los residuos con código LER 01 04 13 para calificarse inertes (tomado del RD 777/2012) ..... 18

## 1. ORIGEN



Imagen cenita de una cantera de mármol (Fotos cortesía de INTROMAC)



Lodos de granito tras prensado (Fotos cortesía de INTROMAC)

Los lodos procedentes del corte y tratamiento de la roca ornamental son un residuo inerte que se genera en dicha industria. Están constituidos por el agua de refrigeración de los equipos de corte y tratamiento, partículas finas de la roca ornamental y algunas impurezas de los equipos de tratamiento [(20)].

Bajo la denominación de roca ornamental o piedra natural 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 [(21)].

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 la terminología empleada en el mercado (y que se aleja de un rigor geológico/petrográfico) se conocen mundialmente los tres grupos, denominados genéricamente: Granitos, Mármoles y Pizarras (la terminología para la piedra natural se recoge en la norma UNE-EN 12670).

Los bloques de roca obtenidos en cantera (mediante corte con hilo diamantado o con perforación y voladura) se envían a fábrica para su elaboración donde se someten a procesos de aserrado. En general, los bloques se cortan en láminas mediante máquinas de hilo diamantado (hilo/multihilos), máquinas de discos cortabloques para obtener las tablas o tableros. Para dar el tamaño final se cortan con discos de diamante y se realizan los acabados tipo pulido, flameado, abujardado, etc.



Corte con hilo diamantado



Frente de extracción por perforación-voladura




Corte con agua a presión



Pulido del mármol

**Figura 1.- Varios procesos del tratamiento de la roca ornamental (fuente: INTROMAC)**

Durante el proceso industrial para elaborar piedra ornamental se generan dos tipos de residuos[22]: (1) escombros de cantera: formados por residuos sólidos procedentes de la extracción y reducción de tamaño de los bloques (no son objeto de esta ficha), (2) vertidos de transformación: entre los que se encuentran los lodos procedentes del proceso de aserrado, corte y pulido. Los lodos están compuestos por agua, partículas finas procedentes de la roca y, en ocasiones, partículas derivadas del desgaste de los elementos empleados. Habitualmente, los lodos son depositados en balsas y suelen representar entre el 20%-30% de la producción total [23].

En general, 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.

En las plantas elaboradoras 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. En el caso de las canteras

los lodos generados con los equipos de corte con hilo diamantado y perforación se depositan en balsas (en la entrada a estas pueden aplicárseles floculante o no, dejando que decante con el tiempo).

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 (sustituto de agregados naturales en hormigón, mortero de cemento, mejora de firmes y pavimentos (20)). Estos no son objeto de esta ficha. Por su parte, las partículas más finas, generalmente en forma de lodo, frecuentemente no son reutilizadas y son llevadas habitualmente a vertederos.

Los lodos procedentes del corte y tratamiento de la roca ornamental están clasificados como residuos no peligrosos con el código LER 01 04 13.

## 2. VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DEL RESIDUO [2, 4, 6, 8, 9, 12,14, 19, 21, 24-29]

España es uno de los mayores productores y exportadores de roca ornamental, ocupando el séptimo y sexto lugar respectivamente [21], con un valor de producción para el año 2023 de 452 millones de euros [12]. 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 [12]: Galicia (41,2 %) con 94 explotaciones, Castilla y León (25,9 %) con 77 explotaciones y Extremadura (8,2%) con 24 explotaciones. En la Figura 2 se muestra el número de explotaciones de roca ornamental en el año 2023 por comunidades autónomas, así como el tipo de piedra ornamental que explotan.

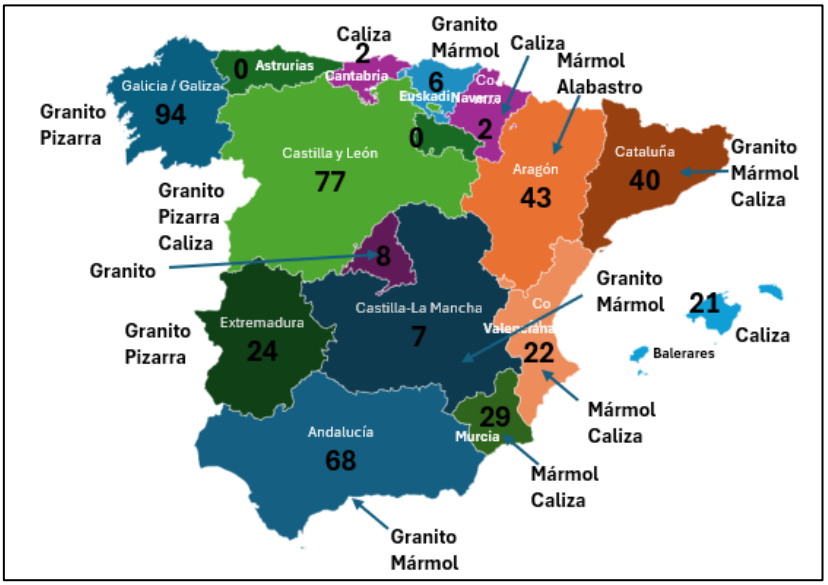



**Figura 2.- Número de explotaciones y tipo de roca ornamental por provincias en 2023 (elaboración propia con datos procedentes de Estadística Minera 2023[12])**

En la Tabla 1 se han recogido los datos de producción (en miles de toneladas), de los años 2015 a 2023, de los distintos tipos de roca ornamental en España [(12)].

**Tabla 1.-Producción de rocas ornamentales en España (miles de toneladas) [datos procedentes de Estadística Minera 2023[(12)]]**

| Material | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Alabastro** | 19 | 17 | 11 | 9 | 7 | 6 | 8 | 9 | 9 |
| **Arenisca** | 169 | 157 | 172 | 157 | 158 | 137 | 146 | 124 | 141 |
| **Caliza** | 1282 | 1110 | 1037 | 836 | 674 | 563 | 642 | 551 | 521 |
| **Cuarcita** | 36 | 25 | 24 | 16 | 13 | 10 | 13 | 21 | 15 |
| **Granito** | 578 | 647 | 677 | 749 | 719 | 707 | 829 | 902 | 868 |
| **Mármol** | 601 | 718 | 598 | 582 | 379 | 396 | 299 | 306 | 312 |
| **Pizarra l** | 778 | 932 | 1019 | 849 | 924 | 1088 | 907 | 1011 | 931 |

Por su parte, en la Tabla 2 se indica el porcentaje de producción (referido a toneladas) de roca ornamental en el año 2023 distribuido por comunidades autónomas. Galicia presenta la mayor producción de cuarcita, granito y pizarra. Castilla y León es la segunda productora destacando la explotación de pizarra, mientras que Extremadura ocupa el tercer puesto gracias al granito.

**Tabla 2.-Producción porcentual (en toneladas) de roca ornamental en el año 2023 por CCAA. [elaboración propia con datos de Estadística Minera 2023[(12)]]**

| CCAA | Rocas ornamentales[1] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Arenisca | Caliza | Cuarcita | Granito | Mármol | Pizarra |
| **Andalucía** | | 8,9 | - | 0,0 | 30,0 | 2,9 |
| **Aragón** | 11,5 | 11,1 | - | - | - | - |
| **Baleares** | 54,7 | 3,9 | - | - | - | - |
| **Castilla y León** | 15,6 | 6,6 | 12,4 | 2,0 | - | 48,0 |
| **Castilla la Mancha** | - | 4,2 | - | - | - | - |
| **Cataluña** | 18,2 | 6,6 | - | - | 11,2 | 0,5 |
| **Extremadura** | - | - | - | 33,8 | - | [2] |
| **Galicia** | - | 1,6 | 87,6 | 49,1 | - | 48,6 |
| **Comunidad de Madrid** | - | - | - | 15,2 | - | - |

| CCAA | Rocas ornamentales[1] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Arenisca | Caliza | Cuarcita | Granito | Mármol | Pizarra |
| **Murcia** | - | 20,4 | - | - | - | - |
| **País vasco** | - | - | - | - | 28,8 | - |
| **Comunidad valenciana** | - | 36,7 | - | - | 30,0 | - |

[1]Datos en %, [2]Se sabe de la producción de pizarra en Villar del Rey, Alburquerque y Ladrillar, pero no se dispone de datos.
No se han incluido las CCAA que no presentan datos de producción

Por último, en la Figura 3 se han reflejado los porcentajes de producción de cada tipo de roca ornamental (referido a miles de toneladas), para el año 2023. Destaca la producción de pizarra, donde España llega a controlar el 80% del mercado mundial (19).

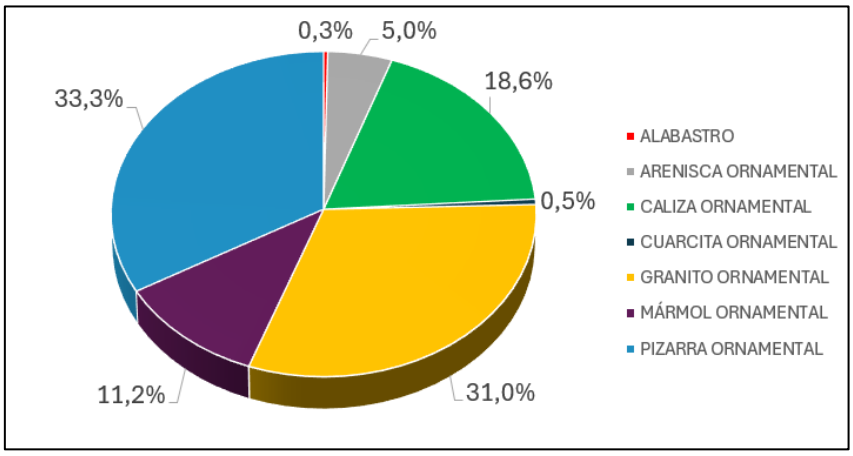



**Figura 3: Porcentaje de producción (de miles de toneladas) de rocas ornamentales para el año 2023 (datos tomados de Estadística Minera 2023[(12)])**

En el mercado internacional, en el año 2024[(24)], la roca ornamental que mayor valor económico ha generado es el granito, suponiendo el 40% del total. Es el mercado del Pacífico asiático el que acapara el 49% del valor de producción, seguido por Europa con el 18%. El uso mayoritario de la roca ornamental está dedicado a la decoración interior. Los principales productores de piedra ornamental fueron [(25)]: China (32,4%), India (17,2%), Turquía (7,6%), Brasil (5,3%) e Irán (5,3%).

Hay que tener en cuenta que, se estima que entre el 25% - 30% del material extraído en cantera se transforma en producto final, lo que genera que el 70%-75% del material sea residuo [(26, 27)]. Por su parte, del residuo total generado, entre el 55% y el 75% es en forma de lodos [(28)]. Así, se estima que en las plantas se generan unos 40-45 kilos de lodo por cada metro cuadrado serrado. Hay que destacar que, en las explotaciones de granito el aprovechamiento puede encontrarse entre un 25-35% en bloque, incluso superior si el corte se realiza con hilo diamantado. Además, en las canteras la cantidad de lodo generado es significativamente inferior.

Si bien no es posible tener una cifra exacta de la producción de roca ornamental mundial, una estimación prudente puede situarla en 100 millones de toneladas. Teniendo en cuenta los porcentajes de generación de residuos antes indicada, se podrían estar generando unos 70 millones de toneladas de residuos, de los cuales serían lodos entre 38,8 y 52,5 Mt (si bien hay que tener en cuenta que estos valores pueden variar ya que dependen de la producción de la roca ornamental considerada).

## 2.1 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 de Valencia (30,0 %) y Andalucía (30,0%), seguidas del País Vasco (28,8%).

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 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 [(1)].

## 2.2 GRANITO

Galicia es la Comunidad Autónoma de España de mayor producción y de transformación del granito, seguida de Extremadura y Madrid. 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)]. Estos lodos son también conocidos como "serrín de granito [(29)]". También merece especial mención Quintana de la Serena (Badajoz) donde se encuentra la mayor concentración de granito y, por ende, de residuos de lodo en Extremadura.

## 2.3 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 y Castilla y León. Algunos datos apuntan a que se generan cada año 18 millones de toneladas de residuos procedentes de la industria de la pizarra[1] (si bien no se hace distinción entre residuo sólido y lodos).

[1] Los residuos de la industria de la pizarra, un problema sin resolver - Gestores de Residuos

# 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, 20, 28]

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 bastante 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. En general, se considera que los lodos están compuestos por agua, partículas finas de la roca ornamental, y partículas procedentes de los elementos de corte [28].

Los diferentes tipos de instrumentos de corte (hilo, cortabloques, discopuente, 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.

### 3.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS

#### 3.1.1.1 *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 1µm y 50µm. El tamaño $D_{80}$ del lodo está en torno a 50µm y 70µm. Según su distribución granulométrica presenta una textura más fina de tipo limoso [3]. La distribución granulométrica de los lodos es ligeramente menor que la del filler calizo (véase Figura 4) y que el del granito[59].

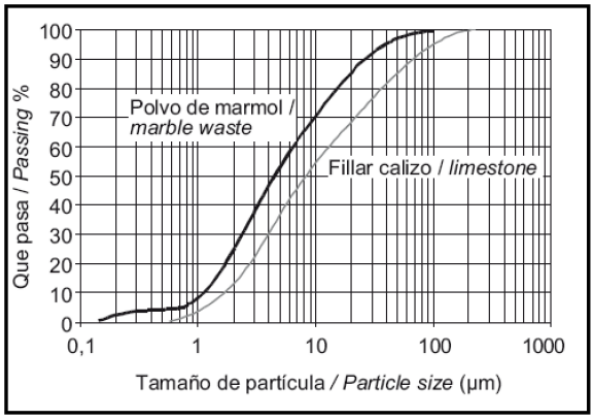



**Figura 4.- Distribución granulométrica del filler calizo y lodos del corte del mármol [9]**

La densidad del residuo seco de mármol puede variar entre 2,42 y 3,16 g/cm$^3$, pudiendo considerarse un valor representativo del orden de 2,78 g/cm$^3$ [7, 20]. El área superficial varía entre 2-8 m$^2$/g. Los estudios de (59) indican una humedad óptima del 17% con densidad seca máxima de 1,84 g/cm$^3$, cohesión de 21,6 kPa y ángulo de rozamiento de 36,5º y carácter no plástico. La conductividad hidráulica obtenida es de 0,8x10$^{-5}$ cm/s.

#### 3.1.1.2 *LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL GRANITO*

El lodo procedente del tratamiento del granito (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). El tamaño de partícula generado en el proceso de corte con hilo diamantado es inferior al obtenido del corte con telares. En general, presenta tamaños algo superiores a los obtenidos en el tratamiento de los mármoles [30].

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 g/cm$^3$, 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 g/cm$^3$, 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). En el caso del Próctor Modificado, la densidad seca óptima está en torno a 1,72 g/cm$^3$, 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 34º. Los valores de cohesión son muy bajos, 21 kPa, en promedio, tal y como corresponde a un material constituido por partículas sueltas no cementadas.

Presenta valores de permeabilidad [30] bajos, del orden de 10$^{-8}$ – 10$^{-9}$m/s.

#### 3.1.1.3 *LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DE LA PIZARRA [31, 32, 33 ,34*

Presentan tamaños comprendidos entre 1μm y 100 μm, con más del 50% del volumen con tamaños inferiores a 10 μm y con una textura limosa o arcillosa y bastante homogénea.

Presentan densidades comprendidas entre 2,1 – 3,0 g/cm$^3$ y porosidades del orden del 60%. Por su parte la permeabilidad está en el en torno a 10$^{-7}$ m/s. La capacidad de retención de agua (pF) es de 2, es decir, cercana a la capacidad de campo.

### 3.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS [1, 2, 14, 17, 27, 35]

#### 3.1.2.1 *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 [27], 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 ($CaCO_3$), 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 Tabla 3.

**Tabla 3.- Composición química del polvo de mármol (% en peso)**

| Óxido | Santos Ruiz J. [1] | Rincón Mora B. [35] |
|---|---|---|
| **CaO** | 54.9 – 55.2 % | 76.70 % |
| **$SiO_2$** | 0.08 – 0.67 % | 1.00 % |
| **$Al_2O_3$** | 0.10 – 0.28 % | 0.38 % |
| **$Fe_2O_3$** | 0.03 – 0.14 % | no detectable |
| **MgO** | 0.37 – 1.15 % | 0.25 % |
| **$K_2O$** | trazas (≈0.00–0.01 %) | -- |
| **$Na_2O$** | trazas (≈0.01–0.02 %) | -- |
| **$SO_3$** | ~0.1 % | 0.07 % |
| **L.O.I.** | 43.2 – 43.7 % | -- |

#### 3.1.2.2 *LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL GRANITO [14, 17, 27,29, 30, 31, 35]*

Los granitos (ornamentales) son rocas con una denominación más amplia que la definición geológica y que abarca cualquier roca ígnea o metamórfica (como la sienita, gabro, etc.). Presentan una alta dureza, resistencia y la capacidad de ser cortadas y pulidas. La composición es básicamente silícea, con la mineralogía típica de cuarzo, feldespato y mica. El pH registrado en algunas muestras es de 7,5 [59].

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. Algunos estudios [27] indican que los lodos silíceos se caracterizan a menudo por un alto contenido de metales pesados e hidrocarburos totales de petróleo (TPH) [30], especialmente cuando se utilizan sierras tradicionales de acero en el corte de bloques. No obstante, en la actualidad, la mayoría de las plantas utilizan multihilos con hilo diamantado. El cable de soporte de las perlas diamantadas es de acero y cuenta con elementos de sujeción de las perlas de plástico o caucho.

La Tabla 4 muestra el análisis químico del polvo procedente de la elaboración del granito según varias fuentes.

**Tabla 4.- Composición química del polvo de granito (% en peso [1, 29, 31, 35, 57, 58])**

| **Óxido** | Dehesa (UNEX) - lodos/polvo granito | Granito A | Granito B | Materioteca de Galicia | Granito gris de Quintana |
|---|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | ≈ 68,0 | 69,73 % | 66,18 % | 63,1 % | 67,78 % |
| **$Al_2O_3$** | ≈ 15,0 | 10,65 % | 8,32 % | 11 % | 13,11 % |
| **$Fe_2O_3$** | trazas bajas en lodos | 1,59 % | 1.99 % | 12 % | 5,46 % |
| **CaO** | — | 2,14 % | 2,07 % | 4,2 % | 5,88 % |
| **$K_2O$** | — | 5,14 % | 3,47 % | 3,8 % | 3,52 % |
| **$Na_2O$** | — | — | — | 3,7% | 0,41 % |
| **$TiO_2$** | — | 0,27 % | 0,35 % | 0,2% | 0,79 % |
| **L.O.I.** | puede existir pérdida por volátiles; < 5–10 % en función de humedad/organicos | — | — | -- | -- |

También se ha estudiado la composición de los lixiviados de muestras de residuos de la elaboración del granito dando como resultado que cumplen los criterios sobre valores límite de lixiviación de residuos no peligrosos inertes [14].

### 3.1.2.3 *LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DE LA PIZARRA [34, 36]*

Las pizarras son rocas que pueden dividirse fácilmente en láminas delgadas a lo largo de planos de foliación, generados por esquistosidad de flujo asociada a un metamorfismo de bajo o muy bajo grado, inducido por compresión tectónica. Habitualmente, están compuestos por cuarzo y filosilicatos de tipo moscovita, clorita e illita, siendo la composición de los lodos procedentes de su tratamiento muy similares en composición. En la Tabla 4 se muestra la composición representativa de los lodos de pizarra.

**Tabla 5.- Composición química del polvo de la pizarra (% en peso [34, 36, 37])**

| **Óxido** | González, A. [36] | Fernández, J. [37] | Carrillo et al. [34] |
|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | 58,1 % | 55,6 % | 50,7 % |
| **$Al_2O_3$** | 18,7 % | 19,1 % | 22,2 % |
| **$Fe_2O_3$** | 7,9 % | 8,4 % | 10,7 % |
| **CaO** | 1,6 % | 2,1 % | 0,5 % |
| **MgO** | 2,3 % | 2,5 % | 2,7 % |
| **$K_2O$** | 4,4 % | 4,8 % | 4,6 % |
| **$Na_2O$** | 1,7 % | 1,9 % | 1,2 % |
| **$TiO_2$** | 0,6 % | 0,7 % | 1,3 % |
| **$SO_3$** | 0,3 % | 0,4 % | 0,5 % |
| **L.O.I.** | 6,1 % | 5,8 % | 5,0 % |

El pH de los lodos presenta un carácter ligeramente básico, con valores del orden de 8,5. Su actividad puzolánica temprana es baja.

## 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, contenido de humedad, superficie específica, 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.

## 3.3 APLICACIONES [1, 2, 3, 5, 7, 9, 14, 16-19, 38, 59, 60]

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. También se ha evaluado la mezcla de estos lodos con otros residuos para la fabricación de áridos ligeros [60].

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.

Si bien no se trata de la aplicación más relevante, el uso de estos residuos para la construcción de obras de tierra también es factible. En este caso, hay que considerar la necesidad de utilizar agua adicional a la necesaria en la compactación para evitar la generación de polvo [(59)].

### 3.3.1 USO DE LODOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DEL MÁRMOL[22]

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.

#### 3.3.1.1 *INDRUSTRIA CERÁMICA [2,39- 41]*

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 mezcla 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 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 inconvenientes se ha visto que la resistencia a la flexión disminuye cuando la adición de lodos aumenta significativamente. También que porcentajes cercanos al 20% pueden aumentar en exceso la absorción y ser una penalización en su uso.

#### 3.3.1.2 *FABRICACIÓN MORTEROS, HORMIGONES Y SUSTITUCIÓN DEL CEMENTO [7, 9, 10, 11, 16, 42]*

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. Gran parte de estos estudios están enfocados a los hormigones autocompactantes (HAC). La revisión [43] de la literatura muestra que puede emplearse como sustituto parcial del árido fino o del cemento. Su uso en reemplazo del árido fino, en proporciones del 15 % al 75 %, mejora las propiedades mecánicas entre un 10 % y un 30 %, aunque reduce la trabajabilidad del hormigón fresco. En cambio, cuando sustituye al cemento en proporciones superiores al 20 %, se observan efectos negativos en las propiedades frescas y mecánicas. Otros estudios indican que el polvo de mármol es un excelente filler para los HAC de alta resistencia y pueden sustituir totalmente al filler calizo[9].

Para la elaboración del hormigón, se ha estudiado [44] la sustitución parcial de la caliza en el cemento que compone el hormigón. Se ha demostrado posible, si bien en porcentajes limitados ya que más del 5% provoca disminución en la resistencia. Si bien otros autores aumentan estos porcentajes hasta el 10%-15% [47, 48, 49]. 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 influye en la consistencia del hormigón (ensayo slump), en cambio sí disminuye la resistencia a compresión.

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

#### 3.3.1.3 *OTRAS APLICACIONES*

De los estudios revisados, se pueden destacar otro tipo de aplicaciones, tales como:

- 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.
- Prefabricados para la construcción: consumen una tonelada de residuo por cada $m^3$ de elemento prefabricado. Es habitual su uso para la fabricación de revestimientos tipo piedra, ya que este producto está formado por un 60%-70% de polvo de piedra2.
- 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.
- Fabricación de mortero adhesivo para los paneles aislantes[45]: se sustituye la dolomita por el polvo procedente del mármol en la fabricación de los morteros, resultando en la necesidad de un incremento de la cantidad de agua, una resistencia similar y un ahorro económico que llega al 30%.
- 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.

[2] https://www.epic-powder.com/es/10-ways-of-comprehensive-utilization-of-marble-tailing-and-waste-residue/

[3] https://www.aenverde.es/la-gestion-de-residuos-del-marmol-y-de-la-agricultura-produce-los-tecnosuelos/

- En la estabilización de suelos evitando el hinchamiento en suelos arcillosos expansivos, debido a su alto contenido en óxido de calcio (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]. También [46] reduce el índice de plasticidad, aumenta la densidad seca máxima y disminuye la humedad óptima en los ensayos de compactación.
- Para la fabricación de mezclas asfálticas [20]: Varios estudios recogen la posibilidad de usar el polvo de mármol con betún en las mezclas asfálticas. Se observa que con porcentajes superiores al 7% la plasticidad de la mezcla aumenta, pero que puede usarse sin tratamiento previo. Para mezclas en caliente se observa que el carácter básico de la muestra tiene más unión con las partículas, pero en comparación con polvos más ácidos disminuye la resistencia y la susceptibilidad a la humedad. Otros autores indican que porcentajes de polvo calcáreo de hasta el 25% presenta comportamientos más adecuados que otras mezclas.
- Otros [20] 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, tratamientos de spa, para adsorber metales pesados, etc. Por último, cabe destacar el proyecto RESIMACO donde se ha utilizado el polvo de mármol para la construcción de terraplenes de carretera, donde se ha observado su buen comportamiento [50, 51].

### 3.3.2 USO DE LOS LODOS DE TRATAMIENTO DEL GRANITO [8, 9, 17, 18]

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

- Para material de relleno, por ejemplo para la restauración de cortas mineras.
- 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. En hormigones autocompactantes [52] su inclusión provoca un aumento de la relación agua/árido y, por tanto, de la porosidad y disminución de la resistencia mecánica. Este estudio comprueba la posibilidad de la inclusión de hasta un 40% del polvo.

  Ahora bien, incluir filler de granito en el hormigón puede aumentar el contenido en álcalis, al liberarse estos desde los feldespatos molidos hacia la pasta cementante. Esto

puede ser muy perjudicial si se utilizan áridos reactivos con los álcalis (patología de reacción álcali árido en el hormigón), por lo que debe ser controlado.

- 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.
- 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 residuo 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.

### 3.3.3 USO DE LOS LODOS DE TRATAMIENTO DE LA PIZARRA

Algunos de los usos que se han recogido en la bibliografía para los lodos procedentes del tratamiento de la pizarra son:

- Fabricación de cerámicos tradicionales: Los estudios [31, 53] muestran que, al mezclarse con arcillas y someterse a procesos de compactación y sinterización, los residuos permiten obtener piezas cerámicas con resistencia mecánica adecuada y absorción de agua dentro de los rangos exigidos por la normativa. La principal conclusión es que los lodos de pizarra pueden sustituir parcialmente materias primas convencionales en la cerámica roja, reduciendo costes y favoreciendo la valorización de residuos.
- Regeneración de escombreras y restauración ambiental[54]: Se ha estudiado el uso de los lodos de pizarra en combinación con estériles para la restauración de escombreras mineras. El trabajo de la Universidad de León concluyó que los lodos contribuyen a mejorar la estabilidad física del sustrato y, al mismo tiempo, aportan finos minerales que ayudan a la retención de humedad. Esta aplicación se considera viable siempre que se controle la proporción de lodos y se garantice su estabilidad química.
- Uso como sustrato para revegetación[55]: En Galicia, se ha evaluado la utilización de lodos como componente de sustratos destinados a revegetar áreas degradadas por la minería

de pizarra. Los ensayos demostraron que, tras un acondicionamiento previo (mezclas con materia orgánica o enmiendas), los lodos favorecen el establecimiento de especies vegetales al mejorar la retención de agua y aportar minerales. La principal conclusión es que los lodos pueden contribuir a recuperar áreas impactadas, aunque requieren estabilización previa para evitar compactación excesiva.

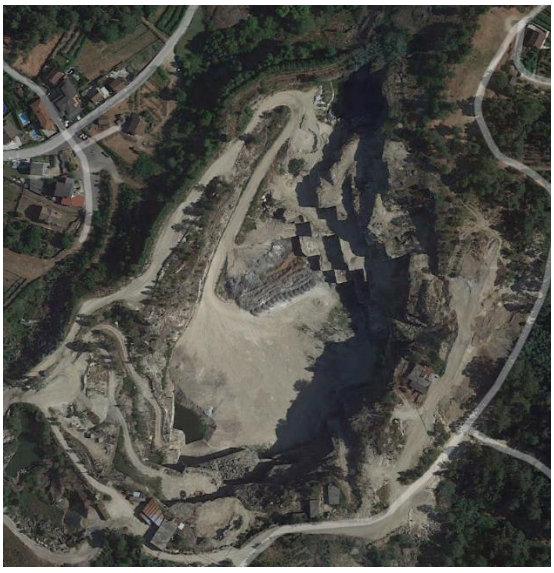
- Fabricación de geopolímeros [34] como aglutinantes: El lodo de pizarra resultó tener partículas muy finas, lo que mejora la reactividad para geopolimerización. No se necesita una molienda intensa previa al uso, lo que ahorra energía. El mejor activador alcalino fue con proporción de relación $Na_2SiO_3$/NaOH = 2.5, produciendo resistencia a compresión de ~27,23 MPa tras 7 días de curado. También [56] se ha estudiado esta función añadiendo además ceniza de fondo de la quema de olivo, obteniéndose resistencias a compresión de más de 24 MPa.
- Sustituto en fabricación de cemento [32]: El estudio busca una activación térmica de los lodos de pizarra para aumentar la actividad puzolánica. Restringen el porcentaje de sustitución a un máximo del 20% ya que cantidades superiores no cumplen los criterios para los cementos puzolánicos (CEM IV).

## 3.4 OBRAS REALIZADAS

El uso más habitual de estos materiales es la ejecución de obras de tierra, como por ejemplo la restauración de cortas mineras. A modo de ejemplo, se muestra el trabajo que se está llevando a cabo en las cercanías de A Porriño (Pontevedra), donde se está rellenando el hueco minero con lodos deshidratados de granito. En este caso, las capas de lodos se intercalan con capas de tierra.



Año 2013



Año 2020



Año 2023



Año 2025

**Figura 5.- Evolución temporal del relleno de un hueco minero con lodos deshidratados (fuente Sestrama Ibérica)**

También hay que destacar el proyecto REMISACO[4], liderado por la Universidad de Alicante, donde se ha utilizado la marmolina (polvo de mármol) para la construcción de un terraplén de carretera como sustitución parcial del terreno natural o de la cal, comprobando su buen comportamiento.

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

La Ley 7/2022, de 8 de abril, sobre Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular, establece en su artículo 6 que los residuos deben identificarse y clasificarse conforme a la Lista Europea de Residuos. Esta lista fue actualizada por la Decisión de la Comisión de 18 de diciembre de 2014, que modifica la Decisión 2000/532/CE, en aplicación de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

Dentro de la Lista Europea de Residuos, la clasificación de los lodos procedentes del tratamiento de roca ornamental 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

[4] https://web.ua.es/es/resimaco/difusion.html

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.

**Tabla 6.- Características de los residuos con código LER 01 04 13 para calificarse inertes (tomado del RD 777/2012)**

| ***Tipo de residuo de industrias extractivas (Código LER)*** | **Residuos del corte y serrado de piedra distintos de los mencionados en el código 01 04 07 (Código LER: 01 04 13)** |
|---|---|
| *Naturaleza del residuo de industrias extractivas* | • 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.<br>• Residuos extractivos gruesos formados por fragmentos de rocas no aptos para su posterior procesamiento, venta o utilización. |
| *Procesos o actividades donde se produce.* | 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:<br>• Aserrado de bloques con telares multifleje.<br>• Aserrado de bloques con discos diamantados o hilos diamantados.<br>• Acabados de planchas de roca (pulido, apomazado, abujardado, flameado, arenado, etc.).<br>• Corte secundario con discos o similar.<br>• Acabado secundario |
| *Tipos de materiales a partir de los cuales se puede producir el residuo de industrias extractivas.* | 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:<br>• Rocas ígneas: granitos, granodioritas, dioritas, gabros, tonalitas, peridotitas, etc.<br>• Rocas en diques: cuarzos, aplitas, pegmatitas, lamprófidos, anfibolitas y pórfidos.<br>• Rocas sedimentarias, de precipitación o biogénicas: calizas, dolomías, travertinos, areniscas, calcirruditas, calcarenitas.<br>• 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).<br>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. |

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 minimizan 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.
- Se obtienen 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 $CO_2$ y de otros gases de efecto invernadero al suministrar una materia prima.

En concreto, estudios como el elaborado por Ruiz Sánchez (2021)[20] muestran con Análisis del Ciclo de Vida las ventajas medioambientales del uso de lodos procedentes del mármol.

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.

En el contexto de las consideraciones medioambientales y de salud laboral asociadas a la explotación y uso de rocas ornamentales y, por tanto, de la generación de los lodos, la tesis doctoral de Tejado (2014) analiza la presencia de radionúclidos naturales y su posible contribución a la exposición radiológica, señalando que la aportación de estas rocas a la radiación ambiental es despreciable frente a otras fuentes y que su uso en edificación no supone un riesgo significativo. No obstante, el estudio subraya la necesidad de mantener una vigilancia prudente de las instalaciones incluidas en el ámbito de las industrias NORM y de las personas trabajadoras expuestas, en línea con la normativa vigente. Además, se destaca la generación de aerosoles durante la manipulación y transformación de las rocas, con presencia de sílice cristalina ($SiO_2$) en el polvo respirable, lo que constituye un riesgo ocupacional que requiere medidas preventivas de control del polvo, como ventilación localizada, equipos de protección individual y programas de vigilancia de la salud. De este modo, se propone un enfoque integral de seguridad, que protege frente a la exposición tanto radiológica como respiratoria, sin alarmar sobre los riesgos asociados al uso de roca ornamental en condiciones normales de trabajo.

Por último, el trabajo de Lohar y Shrivastava [59] analizan los lixiviados generados por estos materiales indicando que no superan los límites marcados para vertederos de residuos inertes.

## 4.1 INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Los indicadores de sostenibilidad ambiental son herramientas utilizadas para medir y evaluar el desempeño ambiental de una empresa, organización o proyecto.

Estos indicadores ambientales proporcionan información cuantitativa y cualitativa sobre diversos aspectos relacionados con el impacto ambiental de las actividades empresariales, permitiendo así monitorear, analizar y mejorar las prácticas ambientales.

Entre los indicadores pueden encontrarse:

- Indicadores de producción
- Indicadores de reciclaje y recirculación
- Indicadores técnicos
- Indicadores de coste

Las evidencias para valorar estos indicadores pueden encontrarse en:

- Productos con Marca: Marca AENOR N Sostenible. AENOR analiza al menos 20 indicadores y el resultado es un índice numérico que refleja el compromiso sostenible, es evaluable en el tiempo e impulsa la mejora continua en el sector. Ya existen cementos con marca Ns.
- Declaración ambiental de producto DAP (EN 15804:2012 + A2:2020). La ecoetiqueta DAP es una herramienta para mostrar el mejor comportamiento ambiental de un producto. La ISO 14025 define los requisitos que deben cumplir estas Declaraciones ambientales, incluyendo la verificación por tercera parte.
- Sistema de Gestión ambiental de las fábricas: Gestión medioambiental (UNE EB ISO 14001, el reglamento 1221/2009 (EMAS); Sistema de gestión energética (UNE EN ISO 50001) o Sistema de gestión de la calidad (UNE EN ISO 9001).

En el caso de los lodos procedentes del tratamiento de rocas ornamentales, dado que no se comercializan como producto, no se dispone de información relativa a los posibles indicadores de sostenibilidad medioambiental.

# 5. NORMATIVA TÉCNICA

- DIRECTIVA 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. [Directiva Marco de Residuos].
- LEY 7/2022. Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular.
- 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 actividades mineras

- 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.
- UNE-EN 12670:2020. Piedra natural. Terminología.

## 6. REFERENCIAS

[1] SANTOS RUIZ, J. 2004. 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. 2011. 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. 2011. 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., 2010. 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., 2012. Residuo de mármol como insumo en la construcción civil, diagnóstico de la Comarca de la Laguna. Revista de la Construcción, vol. 12, nº 22.

[8] MONEM, A., TAMAN, Z., EL-KALIOUBY, B., 2011. Recycling of ornamental stones hazardous wastes. Natural Resources, 2, 244-249.

[9] VÁLDEZ, P., BARRAGÁN, B., GIRBÉS, I., SHUTTLEWORTH, N., COCKBURN, A., 2010. 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.

[10] GIRBÉS, I., LÓPEZ-BUENDÍA, A., MARTÍ, P. RODRIGUEZ M.J. 2007. Reutilización de lodos de corte y pulido de mármol para la fabricación de hormigones. Conference: 1er congreso Internacional de piedra natural. Retos Medioambientales en el Sector de la Piedra Natural

[11] HEBHNOUB, H., AOUN, H., BELACHIA, M., HOUARI, H. GHORBEL, E., 2011. Use of waste aggregates in concrete. Construction and Building Materials,nº 25, 1167-1171.

[12] Estadística Minera de España 2023. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Estadistica Minera 2023.pdf

[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, 2012. Guideline of posible aplication of slurries in industries demanding microniced materials and valorization of slurries. Deliverable, LIFE+RECYSLURRY, LIFE Project Number LIFE10 ENV/ES000480.

[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. 2009. 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. 2007. Caracterización geotécnica de los serrines de granito y algunas aplicaciones en ingeniería civil. Tesis doctoral. Instituto Universitario de Geología Isidro Pongal.

[18] FALCÓN SUÁREZ, I. 2011. 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.

[19] Guía práctica para el crecimiento del sector de la Piedra natural Informes y cuadernos Stonegal para la industria de la Piedra natural FEB 2025. https://stone.es/wp-content/uploads/2025/02/Guia-de-Crecimiento2.pdf

[20] RUIZ SÁNCHEZ, A. 2021. Reutilización de lodos carbonatados para la preparación de cementos ecoeficientes y otras aplicaciones. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

[21] FERNÁNDEZ CORTES, F. 2023. Informe sectorial 2022. Piedra Clúster.

[22] ORDÓNEZ, S., RODRÍGUEZ M.A., GARCÍA DEL CURA, M.A. 1998. Aprovechamiento de los vertidos de la industria de la roca ornamental. X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. Valencia.

[23] CAREDDU, N., G. SIOTTO, R. SIOTTO and C. TILOCCA. 2013. From landfill to water, land and life: The creation of the Centre for stone materials aimed at secondary processing. Resources Policy, 38(3), 258-265.

[24] Natural Stone Market 2025-2034. Fundamental Business Insights & Consulting

[25] HUNT, K. 2024. Piedra ornamental: estándares para un material antiguo. ASTM. Piedra ornamental: estándares para un material antiguo | ASTM

[26] MATEC INDUSTRIES. 2025. Economía circular en la recuperación de residuos de piedra. Economía circular en residuos de piedra | Matec Industries

[27] CAREDDU, N. 2019. Dimension stones in the circular economy world. Resour. Policy 60, 243–245.

[28] STRZAŁKOWSKI, P. 2021. Characteristics of Waste Generated in Dimension Stone Processing. Energies, 14(21), 7232. https://doi.org/10.3390/en14217232

[29] VÁZQUEZ GONZÁLEZ, A.M. 2005. Modelización geoquímica de los serrines de granito. Tesis doctoral. Universidad de A Coruña. Departamento de química analítica.

[30] CAREDDU, N.; DINO, G.A. 2016. Reuse of residual sludge from stone processing: Differences and similarities between sludge coming from carbonate and silicate stones—Italian experiences. Environ. Earth Sci. 75, 1–9.

[31] GARCÍA GARCÍA M. 2015. Reciclado de lodos de pizarra y granito para la fabricación de cerámicos tradicionales de interés en el sector de los materiales de construcción. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura.

[32] SÁEZ DEL BOSQUE, I. F., FRÍAS, M., SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I., & MEDINA, C. 2018. Activation temperature-mediated mineralogical transformations in slate quarry sludge: Pozzolanic properties. Construction and Building Materials, 187, 819-829. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.238

[33] PARADELO, R., DEVESA-REY, R., MOLDES A.B. Y BARRAL, M.T. 2009. Estudio del comportamiento hídrico de lodos de serrado de pizarra y descripción mediante el modelo de Van Genuchten. BoletínGeológico y Minero, 120 (1): 61-68ISSN: 0366-0176.

[34] CARRILLO BELTRÁN, R., PICAZO CAMILO, E., PEREA TOLEDO, G., & CORPAS IGLESIAS, F. A. 2024. Towards a Sustainable Mining: Reuse of Slate Stone Cutting Sludges for New Geopolymer Binders. Sustainability, 16(8):3322. DOI:10.3390/su16083322 MDPI

[35] RINCÓN MORA, B. 2017. Sinterización y vitrificación de residuos enriquecidos en Ca, Li, Mn y Cr procedentes de procesos industriales. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche.

[36] GONZÁLEZ, A. 2015. Aprovechamiento de residuos de pizarra en materiales de construcción. Trabajo Fin de Grado, Universidad de León.

[37] FERNÁNDEZ, J. 2012. Caracterización de lodos de pizarra para su aplicación en cementos. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña.

[38] STRZAŁKOWSKI, P. 2021. Characteristics of Waste Generated in Dimension Stone Processing. *Energies*, *14*(21), 7232. https://doi.org/10.3390/en14217232

[39] SABOYA F., XAVIER G.C., ALEXANDRE J. 2007. The use of the powder marble byproduct to enhance the properties of brick ceramic, Constr. Build. Mater. 21 (2007) 1950–1960.

[40] MONTERO M.A., JORDÁN M.M., ALMENDRO-CANDEL, M.B., SANFELIU M.S., HERNÁNDEZ-CRESPO M.S. 2009. The use of a Calcium carbonate residue from the stone industry in manufacturing of ceramic tile bodies, Appl. Clay Sci. 43, 186– 189.

[41] MARRAS, G., CAREDDU, N., INTERNICOLA, C., SIOTTO, G. 2010. Recovery and reuse of marble powder by-product. In: Proceedings of the Global Stone Congress 2010, 2–5 March

2010, Alicante, Spain. S3-01. Ed. AIDICO (Instituto de la Construcción), València. ISBN: 978-84-614-1147-4. Also printed in Marmomacchine Magazine, n. 214, 2010, page. 34-48. Ed. Promorama, Milan, Italy. ISSN: 0392–6303

[42] GALETAKIS M., ALEVIZOS G., LEVENTAKIS K. 2012. Evaluation of fine limestone quarry byproducts, for the production of building elements – an experimental approach, Constr. Build. Mater. 26,122–130.

[43] AMIN, M., HADZIMA-NYARKO, M., AGWA, I. S., ZEYAD, A. M., TAYEH, B. A., ADESINA, A., & DE AZEVEDO, A. R. G. 2024. A Review on the Effect of Marble Powder on Properties of Self-Compacting Concrete. In 15th International Conference on Sustainable Green Construction and Nano-Technology (NTC). "Advances in Fire Safety, HVAC-R, and Built Environment." Trans Tech Publications Ltd. https://doi.org/10.4028/p-gw4vsr

[44] SATHE S.; PATI S., BHOSALE Y. 2024. Investigation of strength, durability, and microstructure properties of concrete with waste marble powder as a partial replacement of cement. World Journal of Engineering. https://doi.org/10.1108/WJE-06-2024-0372

[45] BUYUKSAGIS, I.S., UYGUNOGLU, T., TATAR, E. 2017. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. Constr. Build. Mater. 154, 734–742

[46] SIVRIKAYA, O., KIYILDI, K.R. & KARACA, Z. 2014. Recycling waste from natural stone processing plants to stabilise clayey soil. *Environ Earth Sci* **71**, 4397–4407. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2833-x

[47] AYYANAR, DHANALAKSHMI & HAMEED, M. 2022. Strength Properties of Concrete Using Marble Dust Powder. East Asian Journal of Multidisciplinary Research. 1. 2521-2530. 10.55927/eajmr.v1i11.1785.

[48] ABBAS, M. M., & MUNTEAN, R. 2025. Marble Powder as a Sustainable Cement Replacement: A Review of Mechanical Properties. *Sustainability (2071-1050)*, *17*(2).

[49] PRAKASH B., JOTHI SARAVANAN T., SYED AHMED KABEER K.I., BISHT K. 2023. Exploring the potential of waste marble powder as a sustainable substitute to cement in cement-based composites: A Review. Construction and Building Materials Volume 401,132887, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132887.

[50] PASTOR, J. L., TOMÁS, R., CANO, M., RIQUELME, A., & GUTIÉRREZ, E. 2019. Evaluation of the Improvement Effect of Limestone Powder Waste in the Stabilization of Swelling Clayey Soil. Sustainability, 11(3), 679. https://doi.org/10.3390/su11030679

[51] PASTOR, J. L., CHAI, J., & SÁNCHEZ, I. 2023. Strength and Microstructure of a Clayey Soil Stabilized with Natural Stone Industry Waste and Lime or Cement. Applied Sciences, 13(4), 2583. https://doi.org/10.3390/app13042583

[52] LOZANO-LUNAR, A. DUBCHENKO I., BASHYNSKYI S., RODERO A., FERNÁNDEZ J.M., JIMÉNEZ J.R. 2020. Performance of self-compacting mortars with granite sludge as aggregate, Construction and Building Materials, Volume 251, 118998, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118998.

[53] CAMPOS M., VELASCO F., MARTÍNEZ-CASANOVA M.A, TORRALBA J.M. 2004. Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles. Journal of the European Ceramic Society, Vol. 24, Issue 5, Mayo, pp. 811-819. ScienceDirect

[54] GARCÍA MARTÍNEZ, V. M., GARZÓN JIMENO, J. E., & GARCÍA TASCÓN, J. R. 2005. Aprovechamiento de los lodos de decantación en el proceso de regeneración de las escombreras de pizarra. La ingeniería rural para un desarrollo agrario compatible con el medio ambiente.

[55] SANTAOLLA, M. C., VIDAL, M., ÁLVAREZ, A., TEIJEIRO RODRÍGUEZ, T., LÓPEZ FABAL, A., SEOANE LABANDEIRA, S., & MEZQUITA, F. 1997. Utilización de lodos de pizarra en la recuperación de escombreras (II): Utilización como sustrato de vegetación. Tecno ambiente: Revista profesional de tecnología y equipamiento de ingeniería ambiental, 69, 60-63.

[56] PICAZO CAMILO, E., VALENZUELA EXPÓSITO, J. J., CARRILLO BELTRÁN, R., PEREA TOLEDO, G., & CORPAS IGLESIAS, F. A. 2025. Study of Properties of Novel Geopolymers Prepared with Slate Stone Cutting Sludge and Activated with Olive Stone Bottom Ash. Materials, 18(8):1774. DOI:10.3390/ma18081774

[57] Centro Tecnológico del Granito. Xunta de Galicia. Materioteca de Galicia. https://www.materioteca.gal/recursos-naturais/materiaprima/code/MPG-4009#

[58] TEJADO RAMOS, J.J. 2014. Análisis de la extracción y transformación de granitos como actividad NORM. Diseño de protocolo. Tesis Doctoral Universidad de Extremadura.

[59] LOHAR J. and SHRIVASTAVA N. 2025. Beneficial use of dimensional stone industry wastes in geotechnical fills: Geotechnical, environmental and economic perspectives. Resources Policy 101 (2025) 105465

[60] GONZÁLEZ-CORROCHANO, B. ALONSO-AZCÁRATE, J. RODRIGUEZ, L. PEREZ-LORENZO, A. FERNANDEZ-TORIO, M. TEJADO-RAMOS, J.J. CORVINOS, M.D. MURO, C. 2016- Valorisation of washing aggregate sludge and sewage sludge for lightweight aggregates production. ef. revista/Libro: Construction & Building Materials. Elsevier. Clave: A Volumen: 116 Páginas, inicial: 252 Final: Editorial Elsevier ISSN: 0950-0618

## 7. ENTIDADES DE CONTACTO

- **Centro Tecnológico Materias Primas Minerales y Materiales**
  www.ctmarmol.es
  Polígono Industrial "El Matadero"
  S/N, 30430 – Cehegín (Murcia),
  Teléfono 968 741 500
  promocion@clusterpiedra.com

- **Centro Tecnológico del Granito**
  https://www.piedra.online/centro-tecnologico-del-granito
  85, Lugar A Ribeira, 36410, O Porriño (Pontevedra)
  Teléfono 986 348 964
  info@fctgranito.es

- **Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción**
  Campus Universitario. 10071 Cáceres
  Teléfono 927 181 042
  informacion.intromac@org.juntaex.es

- **Centro de Estudios y Experimentación (CEDEX)**
  C/Alfonso XII, 3 y 5, 28014, Madrid
  info@cedexmateriales.es


## AGRADECIMIENTOS

El CEDEX desea expresar su agradecimiento al Centro Tecnológico del Granito y al Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción por su colaboración y apoyo durante la elaboración del presente documento.

www.cedex.es

Síguenos en:



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
CEDEX