



ID: XXXIXJSIE-07-001

VALORIZACIÓN DEL RESIDUO DE CANTERA DE AGREGADOS DENOMINADO “POLVO DE PIEDRA” PARA SU EMPLEO EN HORMIGÓN

VALUATION OF THE AGGREGATE QUARRY WASTE CALLED "STONE DUST" FOR USE IN CONCRETE

Gemma Rodriguez de Sensale (1); Carola Romay (P) (2); Viviana de Lima (3); Camila de los Santos (4); Ana Lutzen (5); Diego Novello (6).

(1) Dr., Prof. Titular, Universidad de la Republica (UDELAR), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) – Facultad de Ingeniería (FING), Montevideo, Uruguay.

(2) MSc., Prof. Agregado, UDELAR, FADU – FING, Montevideo, Uruguay.

(3) (4) (5) (6) Arq., Ayudante, UDELAR, FADU, Montevideo, Uruguay

Dirección para correspondencia: gemma@fing.edu.uy; (P) Presentador.

Area Temática: Materiales y Durabilidad.

Resumen

Para alcanzar una economía circular en las canteras de agregados de Uruguay es necesario encontrarle empleo al polvo de piedra, residuo sin demanda que ocupa gran espacio y genera problemas de diferente índole. En el trabajo se estudian dos polvos de piedra evaluando su aptitud como agregados finos para hormigón, luego su incidencia en las propiedades físico-mecánicas y durabilidad de un hormigón convencional (resistencia a compresión, a tracción por compresión diametral, permeabilidad al aire, absorción de agua) sin y con diferentes porcentajes de sustitución de agregados finos por polvo de piedra. Los resultados obtenidos permitirán valorizar estos residuos, reduciendo su cantidad y permitiendo que pasen a formar parte como insumo de un modelo de producción que tienda hacia la economía circular de este y otros sectores productivos. En Uruguay para hormigón los agregados finos que se emplean son arenas naturales; el consumo interno solamente de estas arenas, es de aproximadamente 2.200.000 toneladas/año, de allí que la sustitución aunque sea parcial de estas arenas naturales por polvo de piedra permitiría también disminuir la contaminación visual y reducir la extracción de recursos naturales

Palabras-clave: residuo de cantera – polvo de piedra - valorización – hormigón.

Abstract

In order to achieve a circular economy in aggregate quarries in Uruguay, it is necessary to find a use for stone dust, a waste product that is not in demand, takes up a lot of space and generates problems of different kinds. In this paper, two stone powders are studied to evaluate their suitability as fine aggregates for concrete, then their impact on the physical-mechanical properties and durability of conventional concrete (compressive strength, splitting tensile strength, air permeability, water absorption) without and with different percentages of fine aggregate substitution by stone powder. The results obtained will make it possible to recover this waste, reducing its quantity and allowing it to become an input in a production model that tends towards a circular economy in this and other production sectors. In Uruguay, the fine aggregates used for concrete are natural sands; the internal consumption of these sands is approximately 2.200.000 tons /year, therefore, even partial substitution of these natural sands with stone dust would also decrease visual pollution and reduce the extraction of natural resources.

Keywords: Quarry waste - stone dust - valorization - concrete.



1. INTRODUCCION

En Uruguay, los agregados finos empleados para elaborar hormigón son arenas naturales; el consumo interno solamente de estas arenas, que en promedio es de aproximadamente 2.200.000 toneladas/año, representa una cantidad muy grande para el tamaño de nuestro país. La extracción de arenas se desarrolla básicamente en depósitos fluviales (cuerpos de arena vinculados a cursos de agua) de allí que casi todos los depósitos explotados de este tipo están ubicados en las márgenes de los arroyos y cursos de agua; por ejemplo en el Departamento de Maldonado los depósitos asociados a procesos actuales y subactuales de los arroyos Maldonado, San Carlos y Potrero están ubicados geográficamente en los alrededores de la ciudad de San Carlos. Los tres desembocan en el río de la Plata en la playa Chihuahua (en él actualmente funcionan 3 areneras estando una de ellas junto al Club del Lago), de allí que la sustitución aunque sea parcial de estas arenas naturales por otros agregados alternativos a ellas disponibles en la zona permitirían reducir la extracción de recursos naturales y también disminuir la contaminación visual.

La Ley No. 19.829 (2019) de gestión integral de residuos que promueve una estrategia de economía circular en nuestro país en su exposición de motivos, expresa que “se optimiza el uso de materiales, dando una segunda vida a los residuos y potenciando el desarrollo de nuevas formas de negocios y la creación de empleos verdes asociados a la cadena de recuperación y valorización de materiales”. Para alcanzar una economía circular en el sector de las canteras de agregados en el Uruguay es necesario encontrarle un empleo al polvo de piedra ya que es un residuo de las canteras que no tiene una demanda efectiva, por lo que la gran mayoría queda en la cantera ocupando gran cantidad de espacio y generando problemas de diferente índole (logísticos, seguridad laboral, etc.).

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la posibilidad de valorizar estos residuos como sustitución parcial de agregados finos en hormigones, lo cual permitirá solucionar tres problemas: disminuir las cantidades del residuo, encontrarle una aplicación a él ya que es muy abundante en todas las canteras y reducir la cantidad de arenas naturales que se emplean en hormigón. Como antecedentes en la temática se tiene investigaciones de Celik y Marar (1996), Sahu et al. (2003), Cabrera et al. (2010), Nagpal et al. (2013), Singh et al. (2015), Acchar et al. (2016), Mundra et al. (2016), Rajput (2018), Gupta et al. (2019 y 2021), Mundra et al. (2020), Verma et al. (2020), Kirthika et al. (2020), Mupparisetty and Mohammed (2022).

2. METODOLOGIA

Se estudiaron dos polvos de piedra diferentes provenientes de fases sucesivas del proceso de trituración de la piedra, tal como resultan acopiados en una cantera de la ciudad de Maldonado. Se evaluó primeramente su aptitud como agregados finos para hormigón, luego la incidencia de ellos en las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de un hormigón convencional.

Para ello, primeramente, se tomaron en la cantera muestras de campo representativas siguiendo UNIT-NM 26:2009. En el laboratorio de UDELAR siguiendo la norma UNIT-NM 27:2000 estas fueron reducidas hasta la obtención de las muestras de ensayo necesarias para la caracterización de los dos polvos de piedra. Fueron determinadas propiedades físicas (densidad y absorción de agua siguiendo UNIT-NM 52:2009 y UNIT-NM 30:2002, respectivamente), composición granulométrica (UNIT-NM 248:2002), porcentaje de material que pasa por tamiz 75mm por lavado (UNIT-NM 46:2002), determinación de impurezas orgánicas (UNIT-NM 49:2002), equivalente de arena (UNIT 957:1994), así como el contenido de arcilla y partículas friables (UNIT-NM 44:1998), analizándose el



cumplimiento de requisitos indicados en UNIT 1050:2005 para agregados finos a ser empleados en hormigón.

Luego, fue elaborado un hormigón estructural convencional de referencia, sin polvo de piedra, de relación agua/cemento 0,50 con un contenido de cemento de 400 kg/m^3 , 675 kg/m^3 de agregado fino (obtenido mezclando $236,25 \text{ kg/m}^3$ de arena fina y $438,75 \text{ kg/m}^3$ de arena gruesa o sea 35% y 65%, respectivamente) y 1041 kg/m^3 de agregado grueso. Los materiales empleados fueron: cemento portland con filler calcáreo (CPF 40), arena fina y arena gruesa naturales de río, agregado grueso de origen granítico y aditivo superplastificante. Se estudió la influencia de la sustitución parcial de agregados finos por polvo de piedra en las propiedades en estado fresco y endurecido de dicho hormigón; las variables consideradas fueron dos polvos de piedra (A y B) y tres porcentajes de sustitución de agregados finos (10%, 20% y 30% de la arena gruesa, de acuerdo con Mundra *et al.*, 2020). Los hormigones fueron realizados en una hormigonera convencional de eje inclinado. En estado fresco, fue determinado el contenido de aire, densidad y asentamiento con tronco de cono de cada uno de los hormigones realizados, siguiendo la norma UNIT-ISO 1920-2. Se elaboraron probetas cilíndricas de 15cm de diámetro por 30cm de altura que se ensayaron a los 28 días de edad, determinándose la resistencia a compresión y tracción por compresión diametral (UNIT ISO 1920-4), la permeabilidad al aire por el método Torrent (COGUANOR NTG41017 h 43) y la absorción de agua (UNIT-ISO 1920-5:2018). Se ensayaron por lo menos 3 probetas por variable considerada.

3. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSION

3.1. Caracterización de los polvos de piedra

Los resultados obtenidos de la caracterización de los dos polvos de piedra se presentan a continuación, junto con la evaluación de cada propiedad estudiada y el análisis del cumplimiento de los requisitos para los agregados finos a ser empleados en hormigón indicados en la norma UNIT 1050:2005.

Las propiedades físicas se presentan en la Tabla 1. La norma UNIT 1050:2005 indica que la absorción de agua de los agregados debe ser menor de 5%, por lo que ambos polvos de piedra cumplen dicho requerimiento.

Tabla 1. Propiedades físicas

Propiedad	Norma empleada	Polvo de Piedra A	Polvo de Piedra B
Absorción de agua	UNIT NM 30:2002	2,75%	1,73%
Densidad	UNIT-NM 52:2009	2,42 g/cm^3	2,22 g/cm^3

La composición granulométrica de los dos polvos de piedra estudiados se grafica en la Figura 1, junto con los valores límites de granulometría establecidos por la norma UNIT 82:1951 para los agregados finos recomendables y aceptables para ser empleados en hormigón, a los cuales denomina clases 1 y 2, respectivamente. La distribución granulométrica de la muestra A se acerca mucho a los límites aceptables para su empleo en hormigón; la muestra B cae en la clase recomendable para su empleo en hormigón, excepto en el tamiz de $150 \mu\text{m}$.

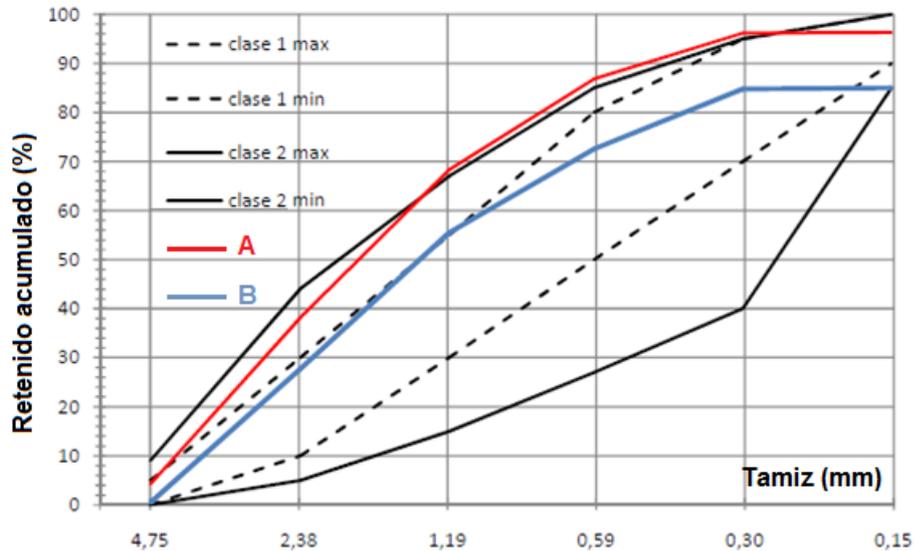


Figura 1. Curva granulométrica de los polvos de piedra analizados

El material fino que pasa por el tamiz 75 μm se denomina polvo impalpable, la norma UNIT 1050:2005 indica que en los agregados finos a ser empleados en hormigón el contenido máximo debe ser menor o igual a 8%. Los resultados obtenidos para el polvo de piedra A y B, siguiendo la norma UNIT NM 46:2002 que rige su determinación por lavado, fueron de 11,80% y 8,10% respectivamente. En base a esto se puede observar que la muestra B es apenas superior (1,25%) que la cantidad máxima indicada, mientras que la A excede bastante dicha cantidad (47,5%). En este trabajo el porcentaje máximo de sustitución está limitado en 30% del contenido de arena gruesa (aproximadamente 20% del total del agregado fino), por lo que no habría inconveniente en su empleo.

Siguiendo el procedimiento de ensayo indicado en UNIT 44:1998 se determinó el contenido de arcilla en terrones y partículas friables que tienen los dos polvos de piedra. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2, resultados menores y menor variación tiene B que A. UNIT 1050 indica que la cantidad máxima en porcentaje del peso total de la muestra para agregados finos debe ser de 1,50%. Por lo que B cumple con el requisito, pudiendo incluso realizarse sustitución total de agregados finos. Con el polvo de piedra A con el porcentaje máximo utilizado es de esperar no tener inconvenientes, a pesar de la variabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 2. Contenido de arcilla en terrones y partículas friables

Polvo de piedra A	%	Polvo de Piedra B	%
Muestra A1	1,00	Muestra B1	0,85
Muestra A2	2,02	Muestra B2	0,93

UNIT 1050:2005 indica que no deben utilizarse agregados finos que presenten una proporción de materia orgánica tal que, ensayados siguiendo UNIT-NM 49:2002, produzcan un color más oscuro que el de la sustancia patrón. El color del líquido sobrenadante en muestras de ambos polvo de piedra fue más claro que el de la solución de referencia, por lo que cumplen con el requerimiento relativo al contenido de materia orgánica pudiendo emplearse para hormigones.

Además, UNIT 1050:2005 indica que no se deben utilizar agregados finos cuyo equivalente de arena (EAV), determinado según UNIT 957:1994, sea inferior a 75%. Los resultados del ensayo de las muestras A y B fueron 36% y 62%, respectivamente, menores al valor mencionado (concordando con los resultados de contenido de terrones de arcilla para el polvo de piedra A). Por



lo que podrían emplearse como agregado fino para hormigón sustituyendo parcialmente arena, combinando el porcentaje de arena con el de polvo de piedra para que el equivalente de arena visual obtenido sea por lo menos de 75%.

Finalmente, de los ensayos de caracterización realizados se puede concluir que el polvo de piedra B es de mejor calidad que el A, debiéndose estudiar la influencia de ambos en hormigón convencional a los efectos de poder extraer conclusiones relativas a las posibilidades de valorización de estos residuos como sustituto parcial de arenas en hormigones.

3.2. Efectos de la incorporación de polvo de piedra en hormigón

3.2.1. Propiedades en estado fresco

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3 para el hormigón de referencia y los hormigones con ambos polvos de piedra. Estos fueron denominados indicando el porcentaje de sustitución de arena gruesa por polvo de piedra, A y B; en correspondencia se indica la cantidad de aditivo incorporada en porcentaje del peso del cemento en cada uno de los hormigones.

Tabla 3. Propiedades en estado fresco de los hormigones sin y con polvo de piedra

Hormigón	Aditivo (%)	Asentamiento (cm)	Contenido de Aire (%)	Densidad (kg/m ³)
Referencia	0,63	18,8	3,15	2316
10% A	0,30	12,5	2,55	2369
10% B	0,15	17,3	2,2	2340
20% A	0,02	16,2	2,1	2349
20% B	0,01	19,9	2,1	2362
30% A	0,12	7,1	2,4	2385
30% B	0,03	12,1	1,8	2410

Todos los asentamientos fueron superiores a 12cm, excepto con 30% de polvo de piedra A (para ese hormigón mayores dosis de aditivo no aumentaban los asentamientos). Los contenidos de aire de todos los hormigones realizados están dentro de los límites normales (son menores a 4%); el mayor porcentaje de aire lo tiene el hormigón de referencia, posiblemente debido a que dicho hormigón tiene mayor cantidad de aditivo que los otros (el aditivo normalmente incorpora aire, pudiendo ser la causa de ello), aunque Celik y Marar (1996) indican que a medida que el contenido de polvo aumenta el contenido de aire disminuye, atribuyendo ello a que el polvo de piedra actúa como material fino o filler, de allí que los vacíos en el hormigón fresco son llenados por el polvo de piedra disminuyendo el contenido de aire a medida que aumenta el contenido de polvo de piedra. Las densidades están dentro de los límites normales, siendo cercanas a 2400 kg/m³

3.2.2. Propiedades de los hormigones en estado endurecido

La tabla 4 presenta el análisis estadístico básico de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y tracción por compresión diametral de los hormigones a los 28 días de edad, siendo \bar{x} la media, δ la desviación estándar y CV el coeficiente de variación. En todos los hormigones los coeficientes de variación son menores a 10%.



Tabla 4. Resultados de resistencia mecánica de los hormigones estudiados

Hormigón	Compresión			Tracción por compresión diametral		
	x (MPa)	δ (MPa)	CV(%)	x (MPa)	δ (MPa)	CV(%)
Referencia	28,62	0,82	3,27	2,07	0,14	6,66
10% A	28,84	1,68	6,61	2,35	0,29	7,10
10% B	21,99	1,21	6,3	2,07	0,12	3,41
20% A	24,63	1,79	8,3	1,93	0,20	5,51
20% B	20,49	1,47	8,1	1,71	0,19	5,79
30% A	33,54	0,82	2,8	2,34	0,14	3,47
30% B	28,64	1,89	7,5	1,93	0,07	1,97

En relación a la resistencia a compresión, para ambos polvos de piedra, 30% de sustitución de arena gruesa podría considerarse el porcentaje óptimo de empleo obteniéndose 17% de aumento con A mientras que con B se tienen resultados similares al hormigón de referencia. En relación a la resistencia a tracción por compresión diametral, al igual que se observó en la resistencia a compresión el polvo de piedra A tiene mejor comportamiento que el B. Los resultados obtenidos están de acuerdo a los presentados por otros investigadores. Sahu *et al.* (2003) concluyen considerando la resistencia a compresión y a tracción por compresión diametral que éstas aumentan cuando se sustituye parte de arena por polvo de piedra. Gupta *et al.* (2019), obtuvieron mejores resultados de resistencia a compresión con reemplazo de 30% de arena por polvo de piedra, también observaron que 30% de polvo de piedra mejora la resistencia a tracción; ellos indican que si bien los ensayos de resistencia a compresión y a tracción responden a diferentes mecanismos de rotura, similares comportamientos se observan cuando se emplea hasta 30% de polvo de piedra debido a que las partículas finas que contienen los polvos de piedra actúan como filler llenando vacíos entre la pasta y los agregados, mejorando la resistencia, la compacidad, la zona de transición y la capacidad de carga frente a esfuerzos. Mundra *et al.* (2020) también indican que con 30% de polvo de piedra se obtienen mayores resultados debido al efecto filler.

En relación con la durabilidad se estudió la permeabilidad al aire de los hormigones mediante el método Torrent con el cual se determina el coeficiente Kt de permeabilidad al aire, la resistividad del hormigón (ρ) y mediante el empleo de un nomograma se obtiene su calidad; también, se determinó la absorción total de agua. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 2; en general la calidad del hormigón corresponde a hormigones de calidad normal y la absorción total se corresponde con las resistencias a compresión obtenidas.

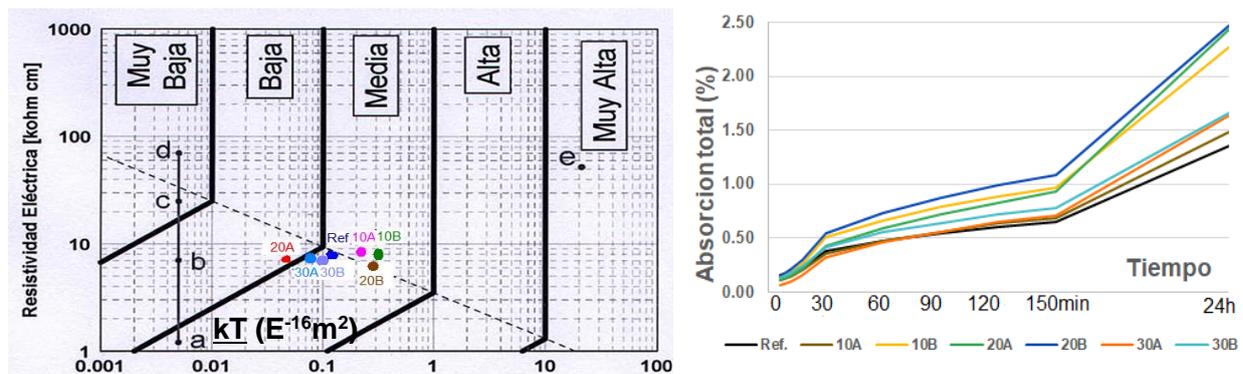


Figura 2. Permeabilidad al aire y absorción de agua total de los hormigones estudiados



4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los ensayos físicos, mecánicos y de durabilidad realizados mostraron que el polvo de piedra se puede usar como sustituto parcial de arena natural en la producción de hormigón. Es importante caracterizar al polvo de piedra previamente a su empleo, debido a la variabilidad que existe en el proceso de molienda, y en función de los resultados obtenidos calcular el porcentaje máximo de polvo de piedra a ser utilizado a los efectos de no sobrepasar valores límites indicados en normas y obtener hormigones con características adecuadas para usos específicos.

A los efectos de validar completamente el empleo del polvo de piedra en la aplicación estudiada, se deben realizar estudios complementarios considerando aspectos de durabilidad y deformaciones en el tiempo (reacción álcali-agregado, retracción hidráulica, etc.) y a escala de planta de producción convalidar los resultados obtenidos en laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC-UDELAR) y a la empresa COROLA S.A. el apoyo brindado para la realización del Proyecto Vinculación Universidad Sector Productivo (PVUSP) cuyos resultados se presentan en el trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acchar, W.; Duarte, J.B. and Silva V.M. (2016). Study of the substitution of natural aggregates by stone dust in the concrete of the Portland cement. *Materials Science Forum*, v. 881, p. 331-335.
- Cabrera, O.A.; Ortega N.F. and Traversa L.P. (2010). Una fuente alterantiva de agregados finos para el hormigón. *Ciencia y Tecnología*, n.10, p. 17-37.
- Celik, T. and Marar, K. (1996). Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, v.26, n. 7, p. 1131-1130
- Comisión Guatemalteca de Normas (2018). Método de ensayo para la medición in situ de la permeabilidad al aire del concreto. (Método Torrent). (COGUANOR) NTG 41017 h43
- Gupta, T.; Kothari, S.; Siddique, S.; Sharma, R.K. and Chaudhary, S. (2019). Influence of Stone processing dust on mechanical, durability and sustainability of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 918-927
- Gupta, A.; Gupta, N.; Saxena, K.K. and Goyal, S.K. (2021). Investigation of the mechanical strength of stone dust and ceramic waste based composite. *Materials Today: Proceedings*, v.44, n. 1, p. 29-33.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (1951). Granulometría de agregados finos para hormigones. UNIT 82. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (1994). Áridos para hormigones. Determinación del equivalente de arena. UNIT 957:1994. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2005). Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado. UNIT 1050:2005. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2016). Ensayos de hormigón – Parte 2: Propiedades del hormigón en estado fresco. UNIT-ISO 1920-2:2016. Montevideo.



- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2020). Ensayos de hormigón — Parte 4: Resistencia del hormigón endurecido. UNIT-ISO 1920-4:2020. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2018). Ensayos de hormigón — Parte 5: Densidad y profundidad de penetración del agua. UNIT-ISO 1920-5:2018. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2002). Agregados finos. Determinación de la absorción de agua. UNIT-NM 30:2002. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (1998). Agregados. Determinación del contenido de arcilla en terrones y materiales friables. UNIT-NM 44:1998. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2002). Agregados. Determinación del material fino que pasa por el tamiz 75 μm por lavado. UNIT-NM 46:2002. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2002). Agregado fino. Determinación de impurezas orgánicas. UNIT-NM 49:2002. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2009). Agregado fino - Determinación de la densidad relativa y de la densidad relativa aparente. UNIT-NM 52:2009. Montevideo.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2002). Agregados. Determinación de la composición granulométrica. UNIT-NM 248:2002. Montevideo.
- Kirthika, S.K.; Singh, S.K. and Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete – A review. *Journal of Cleaner Production*, v.260, 122089.
- Mundra, S.; Agrawal, V. and Nagral, R. (2020). Sandstone cutting waste as partial replacement of fine aggregates in concrete: A mechanical strength perspective. *Building Engineering*, v. 32, 101534.
- Mupparisetty V.K.R. and Mohammed, F.A. (2022). Crushed stone dust as a replacement for river sand in self compacting repair mortars – A sustainable solution. *Materials Today: Proceedings*, v.52, n. 3., p. 1168-1174.
- Nagpal, L.; Dewangan, A.; Dhiman, S. and Kumar, S. (2013). Evaluation of strength characteristics of concrete using crushed stone dust as fine aggregate. *International Journal of Innovative Tecnology and Exploring Engineering (IJITEE)*, v. 2, n. 6, p. 102-104.
- Rajput, S.P.S. (2018). An experimental study on crushed stone dust as fine aggregate in cement concrete. *Materias Today: Proceedings*, v.5, n. 9, p. 17540-17547.
- Registro Nacional de Leyes y Decretos (2019). Gestión integral de residuos. Ley N° 19.829. Poder Legislativo, Montevideo, Uruguay.
- Sahu A.K., Kumar S., Sachan A.K. (2003). Crushed stone waste as fine aggregate for concrete. *The Indian Concrete Journal*, January, p. 845-848
- Singh, A.K.; Srivastava, V. and Agarwal, V.C. (2015). Stone dust in concrete: effect on compressive strength. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, v.3, n. 8, p. 115-118
- Verma, S.K.; Singla, C.S.; Nadda, G. and Kumar, R. (2020). Development of sustainable concrete using silica fume and stone dust. *Materials Today: Proceedings*, v.32, n. 4., p. 882-887.