

ALTERNATIVAS SUSTENTABLES PARA USO DE RESIDUOS DE EXPLOTACIÓN DE TOBAS VOLCÁNICAS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MSc. R.G Ortiz-Mena
Dr. M.G. Navarro-Rojero
Postgrado CIATEQ, A.C.
Querétaro-México
rgortiz@iteshu.edu.mx
maria.navarro@ciateq.mx

Dr. T. López-Lara
Dr. J.B. Hernández-Zaragoza
Universidad Autónoma de Querétaro México
lolte@uaq.mx
bosco@uaq.mx

MSc. D.N. Gómez-Balbuena
Instituto Tecnológico Superior de Huichapan México
dngomez@iteshu.edu.mx

Recepción: 10 de Enero de 2018 / Aceptación: 03 de Marzo de 2018

Innovación Tecnológica como Proceso

Resumen

La generación de residuos sólidos derivados de diversos procesos en la explotación de bancos de materiales para construcción a nivel mundial está ocasionando deterioro en la calidad del aspecto ambiental. Diversas empresas buscan alternativas que permitan dar un manejo adecuado a sus residuos, reduciendo la contaminación paisajística provocada y manteniéndose dentro del cumplimiento legal en materia de cuidado al medio ambiente que se les está demandando. Tal es el caso de la Industria canterera dedicada a la explotación de tobas volcánicas, que tras los procesos para disposición y detallado de su materia prima genera volúmenes significativos de residuos dentro de los que predominan los polvos como deshecho del proceso de corte. La presente investigación consistió en analizar geotécnica y químicamente estos polvos, para categorizar y revisar la factibilidad de las alternativas de uso con base en la naturaleza de sus componentes empleando normativas ASTM, para analizar

el comportamiento del material elaborado con polvo de deshecho de corte. Los resultados indican la clasificación del residuo como *Riolita*, clasificado como Limo Inorgánico (ML): La Difracción de Rayos X indica un contenido del 76% de Sílice (SiO_2), lo que resultó pertinente para emplear los polvos en la sustitución de cemento portland hasta en un 67%, para obtener un cementante hidráulico con resistencias de 13 MPa; así como en la total sustitución de arena como agregado fino; dicha resistencia puede aprovecharse para emplearse en obras de albañilería como aplanados y emboquillados. Sus bajas composiciones en Óxidos de Sodio y Magnesio (Na_2O y MgO), 0.96 % y 0.15% respectivamente, no provocarán efectos como desintegración del concreto o la expansión por magnesia a través de los años.

Palabras Claves: Arena, Concreto, Mortero, Polvo de cantera. Riolita, Tobas.

**SUSTAINABLE ALTERNATIVES FOR
THE USE OF VOLCANIC TUFF EXPLOIT
WASTES IN CONSTRUCTION MATERIALS**

**ALTERNATIVES DURABLES POUR
L'UTILISATION DE RÉSIDUS
D'EXPLOITATION EN VRAC
VOLCANIQUE DANS DES MATÉRIAUX DE
CONSTRUCTION**

Abstract

The generation of the solid waste that derives from various processes in the exploitation of building material banks worldwide is causing a deterioration in the quality of the environment. Several companies have been searching for alternatives that will allow them to manage their residues adequately, which in turn will aid in reducing the contamination of the landscape that has been caused by their activities, while complying at the same time with environmental care legislation, which they are required to do. Such is the case of the “quarry” industry, dedicated to the exploitation of volcanic tuff, which, after the processes for the provision and grinding of its raw material, generates significant volumes of waste, being dust the residue that predominates the most in this process. This study sets out to analyze these powders geotechnically and chemically in order to categorize them, and to review

Résumé

La production de déchets solides dérivés de divers procédés dans l'exploitation des rives de matériaux de construction dans le monde entier entraîne une détérioration de la qualité de l'aspect environnemental. Diverses entreprises cherchent des alternatives qui permettent une bonne gestion des déchets, réduction de la pollution et le paysage tout en restant dans le respect de l'environnement juridique en matière de soins qui les poursuit en justice. Tel est le cas de l'industrie canterera dédiée à l'exploitation de tuf, qui, après les processus d'élimination et de matières premières détaillées génère des quantités importantes de déchets dans les poudres prédominant en tant que déchets du processus de coupe. Cette recherche était d'analyser et chimiquement ces géotechniques poudres, pour classer et examiner la faisabilité d'autres utilisations en fonction de la nature de ses

the feasibility of alternative uses, based on the nature of their components, and based on ASTM standards; and to analyze the behavior of material elaborated with grinded waste powder. The results indicate that the residue is a Rhyolite, classified as inorganic silt (ML); X ray diffraction indicated a content of 76% Silica (SiO₂) which makes it possible for the residue to be used in the replacement of Portland cement in quantities of up to 67% in order to obtain 13 MPa resistant hydraulic cement. Likewise, it is considered feasible for it to be used in the total substitution of sand as a fine aggregate. The resistance values obtained make it possible for it to be used in masonry work such as in levelling and tunneling. Its low compositions in Sodium and Magnesium Oxides (Na₂O and MgO), 0.96% and 0.15% respectively, will not cause effects such as concrete disintegration, or expansion due to magnesia over the years.

Keywords: Sand, Concrete, Mortar, Waste dust, Rhyolite, Tuff.

composants en utilisant les normes ASTM, pour analyser le comportement du matériau en taillant des poussières de déchets. Les résultats indiquent la classification du résidu comme rhyolite, classée Boue inorganique (ML): La diffraction des rayons X indique une teneur de 76% de silice (SiO₂), ce qui était approprié d'utiliser des poudres en remplaçant le ciment Portland à de 67%, pour obtenir un ciment hydraulique avec des résistances de 13 MPa; ainsi que dans le remplacement total du sable comme granulats fins; Cette résistance peut être utilisée pour être utilisée dans des travaux de maçonnerie comme aplatis et emboquillados. Leur faible composition en oxydes de sodium et de magnésium (MgO et Na₂O), 0,96% et 0,15%, respectivement, ne provoquera pas la désintégration des effets concrets ou l'expansion de la magnésie au fil des ans.

Mots-clés: Sable, béton, mortier, poussière de carrière. Rhyolite, Tobas.

Introducción

Las operaciones de explotación de bancos de materiales para construcción, son esenciales para el desarrollo de la economía de varios países. Sin embargo, durante la producción de estos materiales grandes cantidades de subproductos, como el polvo y lodos derivados de procesos de corte, son generados. La manipulación y eliminación de estos subproductos plantea graves problemas ambientales ya que contribuyen en gran medida a la acumulación y dispersión perjudicial en el aire, el agua y el suelo de partículas sólidas finas (Galetakis & Soultana, 2016) En la actualidad, los bancos de material en varias partes de México, con la finalidad de disminuir la contaminación paisajística (Méndez, 2013) y dar cumplimiento a las exigencias en materia de cuidado ambiental (Diario Oficial de la Federación, 2011), han realizado procesos para incorporar sus residuos en nuevas mezclas, sin considerar los efectos que producen diferentes dosificaciones así como la naturaleza química de los compuestos. Por tal motivo, los objetivos de esta investigación fueron 1) Realizar una revisión bibliográfica a nivel nacional e internacional sobre el uso de residuos procedentes de la actividad de extracción de piedra de cantera, estratificando las alternativas sustentables en la aplicación de estos materiales para determinar la estrategia en la disposición de los residuos de cantera 2) Realizar análisis químicos y geotécnico del polvo derivado de procesos de corte, proveniente de tobas volcánicas del distrito minero de la región Huichapan Hidalgo México para orientar su disposición de re uso y 3) Analizar el comportamiento mecánico originado por la presencia del residuo en diferentes mezclas elaboradas a través de un diseño experimental (Montgomery, 2009), manteniendo porcentajes del residuo de 50% a 80% con relación a la cantidad de cemento y utilizando la menor relación agua/agregados posible. El objetivo 3, surge de la hipótesis de que el residuo por su naturaleza volcánica y aspecto físico, podría comportarse como una puzolana natural (Sánchez & Rivera, 2001)

Múltiples estudios se han realizado en torno al aprovechamiento de residuos debido a las leyes que restringen la contaminación del medio ambiente (Menéndez & Bonavetti, 2008). Tal es el caso de los residuos generados del trabajo en las minas de Panasqueira (Covilhã, Portugal), los cuales son utilizados como componente principal en la fabricación del molde refractario para la fundición de metales no ferrosos moldeados en verde (Montoya & Durán, 2013). Los lodos estudiados en el trabajo de PINACAL (2007) han sido utilizables para su comercialización de arenas silícico feldespáticas para morteros de construcción con una importante limitación

de precio y porcentaje en la masa total. La propuesta de IFOMEGEM (2005) de eliminar los sitios de disposición de residuos procedentes de la construcción y trasladarlos a sitios donde los materiales se convierten en subproductos como gravas, piedra y arena, para utilizarlos como baldosas y bloques. Por otra parte Ruiz *et al.* (2012), reporta el empleo de botellas PET llenas de tierra respaldando la propuesta con pruebas de resistencia mecánica a la compresión y pruebas de comportamiento mecánico.

La elaboración de concretos reciclados ha sido en los últimos años una alternativa para la disposición de residuos, Medina *et al.* (2011) plantea la posibilidad de reutilizar los residuos cerámicos de sanitarios como árido grueso sustituyendo de forma parcial 15, 20 y 25% resultando posible la utilización de este tipo de residuo cerámico en la elaboración de hormigones con fines estructurales. En otros casos, se han elaborado concretos con un contenido muy bajo de agua, en el cual, al menos 50% de la masa del cemento Portland (CP), es reemplazado con una ceniza volante (FA) tipo F o C conforme a lo establecido en las normas ASTM. (Valdez, Durán & Rivera, 2007). La investigación de Martínez & Torres (2015) resalta el uso de agregados triturados provenientes de la demolición de concreto hidráulico que se aprovechan para generar concreto Hidráulico Reciclado. En la elaboración de concretos, la resistencia es la característica de calidad más valiosa, por estar directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento (Neville & Brooks, 2010). Se ha demostrado que el empleo de Metacaolín adicionados a la elaboración de concretos alcanza una resistencia de 66,4 MPa a los 180 días de curado (Mejía de Gutiérrez *et al.*, 2009)

Se encuentran investigaciones que incluyen el análisis de dosificación adecuada para obtener mejores resultados, algunos de ellos resaltando el modelo matemático en cuestión. Al respecto se tienen los trabajos de Hassan, Fattah, & Tamimi (2017) y Gulfam & Tighe (2016) el primero, modeló mediante el uso del diseño de experimentos, el comportamiento del uso potencial de nano partículas en la preparación de hormigón. Gulfam por su parte, diseñó un experimento para analizar los efectos del clima, los materiales y la estructura del pavimento, sobre la fractura térmica del hormigón asfáltico. Por otra parte Ramírez de Alba & Camacho (2016) proponen un procedimiento alternativo para construir placas plegadas de concreto reforzado por medio de sub ensamblajes adheribles y se reportó el trabajo experimental sobre un modelo representativo.

Materiales y métodos

Materiales

Las mezclas preparadas en los experimentos se conformaron de los siguientes materiales:

1. Cemento Portland CPC 30 Moctezuma.
2. Agua potable.
3. Residuo (polvo derivado del proceso de corte de piedra de cantera).

Población y muestra

Se consideró como población el depósito de residuos de la empresa “Canteras” Jaramillo ubicada en Ranchó Dandhó s/n Huichapan Hidalgo México (Gráfica 1). De este depósito se realizó un muestreo estratificado (Montgomery, 2009), segmentando los montículos de polvo en divisiones de 2 m de longitud, de cada estrato se tomaron 10 muestras aleatorias de aproximadamente 1kg.



Gráfica 1. Depósito de lodos de la empresa “Canteras” Jaramillo (Fuente propia, 2017).

Preparación de la muestra

Una vez tomadas las muestras estas se mezclaron nuevamente de forma manual, esta nueva mezcla sirvió para: 1) El análisis geotécnico del material y 2) Volver a seleccionar 10 muestras de modo aleatorio las cuales para los análisis químicos fueron deshidratadas en mufla a 50 °C durante 20 min, posteriormente trituradas en mortero de porcelana, y tamizadas en malla de abertura de tamiz de 0.1 mm especificaciones necesarias para introducir las muestras en los equipos de Difracción y Fluorescencia de Rayos X.

Técnica estadística empleada

Para el análisis estadístico de los datos, se empleó el diseño de experimentos factorial completo 3^3 (Montgomery, 2009). A través del Software MINITAB 16®

Procedimientos empleados

Se realizó una investigación bibliográfica a nivel nacional e internacional sobre el uso de residuos procedentes de la actividad minera, para estratificar las alternativas sustentables en la aplicación de estos materiales y tener la pauta para el re uso del residuo de piedra de cantera.

Conceptualización del modelo estadístico.

- Se eligió un diseño factorial completo, por la naturaleza del problema como lo recomienda Fernández et al. (2008). La variable de respuesta seleccionada fue la resistencia a la compresión. (Neville & Brooks, 2010). Los factores a considerar en el experimento fueron tres: Agua (A), Cemento Portland (CPC 40-Moctezuma) (B) y Residuo (Polvo de cantera). (C), en tres niveles cada uno, es decir, un Diseño factorial 3^3 (Tabla 1). Cualitativamente se asignan a tres niveles de un diseño experimental las etiquetas bajo, medio y alto (Montgomery, 2009).
- Los niveles corresponden a las cantidades de cada sustancia (Factor) a combinar, se eligieron estas cantidades considerando: 1) Tener la mezcla suficiente para el tamaño de los especímenes a realizar (0,1 m de altura por 0,05 m de diámetro) y 2) Trabajar sobre el objetivo de combinar una mayor proporción de residuo (polvo de cantera) respecto al cemento en la mezcla de agregados (residuo (polvo de cantera) + cemento) de esta forma dentro de las combinaciones posibles, la mínima cantidad de residuo a utilizar respecto de la de cemento es del 50%, esta cantidad es mayor a la reportada en otras investigaciones, ya que en ellas se ha sustituido hasta 30% máximo (Santaella & Salamanca, 2004), (Medina et al., 2011).

Tabla 1. Factores del diseño de experimentos

Factor	Número de niveles	Nivel 1 (g) Bajo	Nivel 2 (g) Medio	Nivel 3 (g) Alto
Cemento	3	50	75	100
Polvo de cantera	3	100	150	200
Agua	3	50	75	100

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Para el desarrollo exitoso del experimento, se consideraron algunas recomendaciones definidas por Fernández et al. (2008), como: a) Medir respuestas cuantitativamente. En este caso la respuesta a medir fue la resistencia a la compresión, en Mega pascal (MPa). b) Replicar para amortiguar la variación incontrolable (ruido), por lo que se decidió realizar tres réplicas de cada combinación; y c) Generar un orden aleatorio de las corridas.
- Para la construcción del modelo se tienen:
 - 81 combinaciones con $3(3^3) - 1 = 79$ grados de libertad, y $(3^3)(3 - 1) = 54$ grados de libertad para el error (Montgomery, 2009)
 - Las interacciones de los efectos a considerar son:
 - $AB, AB^2, BC, BC^2, AC, AC^2, AB^2C^2, AB^2C, ABC^2, ABC$ (Montgomery, 2009)

Caracterización Físico-química y Geotécnica del material.

- La caracterización mineralógica para la determinación de especies minerales primarias (asociaciones minerales del yacimiento), se realizó por Difracción de Rayos-X (DRX) en un equipo marca Bruker D8-Advance con espejo Göebel (muestras no planas), con cámara de alta temperatura (hasta 900°C), con un generador de rayos-x KRISTALLOFLEX K 760-80F (Potencia: 3000W, Tensión: 20-60KV y Corriente: 5-80mA) y un Seifert modelo JSO-DEBYEFLEX 2002 que está provisto de un cátodo de cobre y un filtro de níquel.
- Los análisis químicos de los polvos, se realizaron con un analizador de Fluorescencia de Rayos X, el cual cuenta con cristales analizadores, trabaja con un tubo con ánodo de Rodio, dependiendo del elemento y su concentración es el cambio de potencia que se administra (KV-mA).

- Análisis Geotécnico del material: Se realizó el análisis granulométrico (ASTM D422-63, 2007), la determinación de los límites líquido y plástico (ASTM Standard D 4318-10, 2010) y la clasificación del material según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (ASTM Standard D 2487-93, 1993).

Estratificación de información.

- La información derivada de la revisión bibliográfica que se efectuó a nivel nacional e internacional sobre la aplicación en materiales de construcción, fue dividida en grupos homogéneos, categorizando las aplicaciones conforme a la naturaleza de los residuos, con la finalidad de establecer la relación de semejanza entre las alternativas y los resultados de análisis mineralógicos y granulométrico realizados a los polvos de deshecho de corte.

Ejecución del experimento

- Una vez planeado el Diseño de experimentos, se llevaron a cabo las 81 mezclas (ASTM C31 / C31M-17, 2017) para ello se preparó el residuo (polvo de cantera) pasándolo por una criba de arena para albañilería, con la finalidad de retirar elementos de otra naturaleza, ya que este residuo se encuentra depositado a cielo abierto a orillas de carreteras.
- Tras pesar las proporciones de residuo y cemento Portland, estas se combinaron hasta obtener una mezcla homogénea, (Brown *et al.*, 1993) posteriormente se añadió agua potable y se mezcló durante un minuto aproximadamente. (Neville & Brooks, 2010). (Gráfica 2).



a) Pesado

b) Mezcla Cemento/Polvo

c) Mezcla Con Agua
de cantera

Gráfica 2. Proceso de mezclado (Fuente propia, 2016).

- Las mezclas se vaciaron y varillaron en probetas cilíndricas de policloruro de vinilo (PVC) hidráulico, con dimensiones de 0.05 m de diámetro y de 0.1 m de altura. Se desmoldaron a los tres días de edad y se dejaron en reposo para continuar con su proceso de curado. (gráfica 3) (ASTM C31 / C31M-17, 2017).



a) Varillado de la mezcla



b) Curado de las probetas

Gráfica 3. Procedimiento de varillado y curado de mezclas (Fuente propia, 2016).

- Se replicó la preparación de probetas para los mejores 10 valores de resistencia a la compresión, para observar su comportamiento a 3, 7, 14 y 28 días de edad.

Ensayos a especímenes preparados

- Para las primeras 81 probetas, a la edad de 70 días se determinaron, masa, diámetro y longitud; posteriormente, se depositaron en agua para medir la absorción tras 24 horas. (Neville & Brooks, 2010)
- Se calcularon la densidad y los porcentajes de humedad de cada probeta.
- Se calculó el porcentaje de polvo de cantera (Ec 1) y la relación agua/agregados (polvo de cantera + cemento) (Ec. 2) con base en las proporciones de materia prima.

$$\% \text{ Polvo de cantera} = \frac{\text{gramos Polvo de cantera}}{\text{gramos Polvo de cantera} + \text{gramos cemento}} * 100 (\text{Ec 1})$$

$$\text{Relación Agua/agregados (Polvo de cantera + cemento)} = \frac{\text{gramos de agua}}{\text{gramos de polvo C.} + \text{gramos de cemento}} (\text{Ec 2})$$

- A la edad de 90 días, se determinó la resistencia a la compresión (ASTM International, 01) de cada probeta (Gráfica 4). Para ello se utilizó una prensa hidráulica TRUPER PREH 20 toneladas, con sensor de Presión WIKA modelo A10, de 0 a 200 Bar y salida analógica de 0 a 10 Vdc.
- Así mismo se determinó la compresión para las réplicas de los mejores 10 resultados, a 3,7, 14 y 28 días de edad.



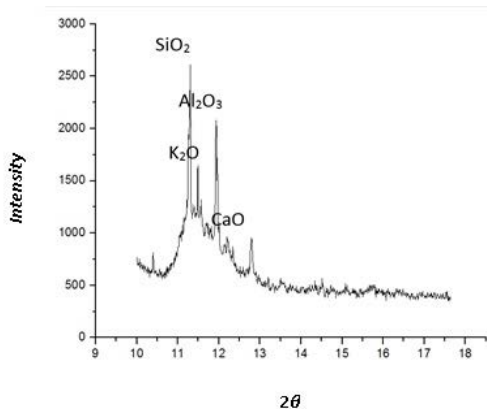
Gráfica 4. Ensayo de compresión a la edad de 90 días (Fuente propia, 2017).

Resultados y discusión

Difracción de Rayos X: Análisis Cualitativo

Milán *et al.* (1993) indica que la geología de la caldera de Huichapan corresponde a una *Riolita* superior con fracturamiento columnar y parcialmente soldada. Contienen fragmentos líticos de andesitas y cuarzo y feldespatos en matriz vítrea. Presenta fragmentos vítreos ligeramente aplastados.

La gráfica 5 muestra el espectro de Difracción de Rayos X obtenido del análisis realizado al residuo (polvo de cantera). Se determina la presencia de sílice como componente mayoritario.

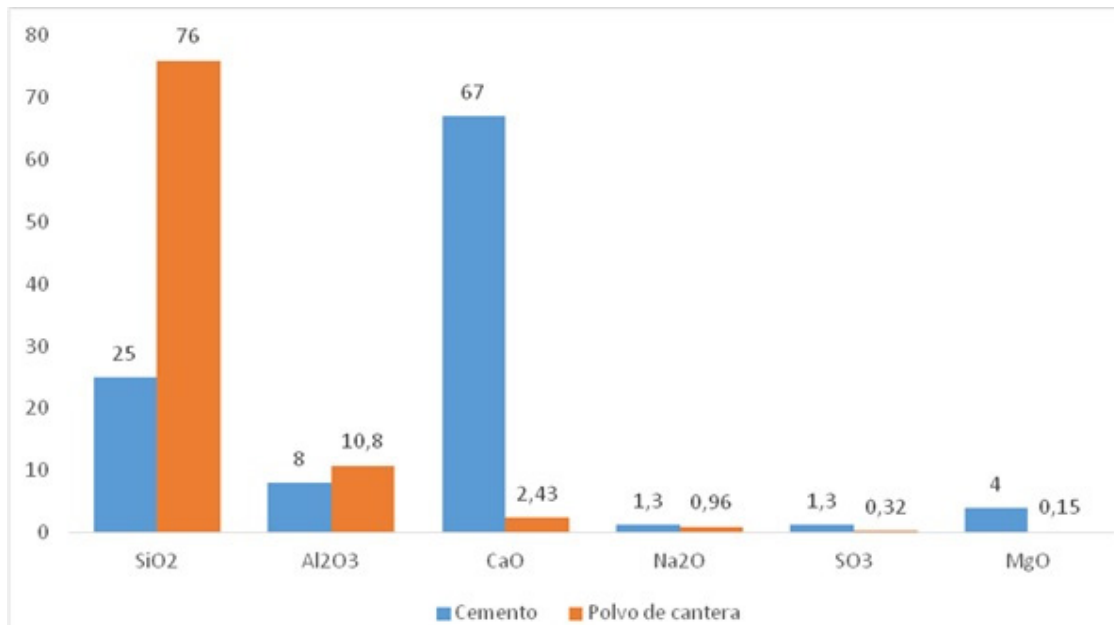


Gráfica 5. Espectro de Difracción de Rayos X de la *Riolita* (Fuente propia, 2017).

Fluorescencia de Rayos X: Análisis Cuantitativo

Los resultados del análisis de Fluorescencia de Rayos X realizado al residuo (polvo de cantera), proyectaron el porcentaje de sus compuestos presentes, lo cual se comparó con el porcentaje en composición del cemento Portland, la gráfica 6 muestra esta relación.

Los datos indican compuestos similares pero en diferentes proporciones, cuatro de ellos son de resaltar: 1) Dióxido de silicio, siendo el componente mayoritario y presente en 76% en el polvo de cantera; como lo indican Neville & Brooks (2010), los silicatos, son los componentes más importantes y los causantes de la resistencia de la pasta hidratada de cemento, también son benéficos durante la elaboración del cemento, porque favorecen la combinación de cal y sílice, este compuesto presenta una diferencia significativa entre el residuo y el cemento, ya que éste último requiere tan solo el 25% de contenido. Basado en Valdés (2015) este exceso de sílice favorecerá la reducción de la porosidad de la mezcla, lo que logra mejorar la inter fase de la pasta de cemento Portland adherida al agregado derivándose en un producto más resistente y duradero, aumentando también la compacidad del producto final. 2) CaO es el compuesto que brinda la mayor resistencia al cemento (Neville & Brooks, 2010). El residuo de *Riolita*, presenta cantidades menores que el cemento, 2.4% contra 67%, respectivamente. Se esperaría que las mezclas que contienen altos porcentajes de residuo, presenten bajas resistencias. 3) Los compuestos alcalinos como Na_2O , causan desintegración del concreto. y afectan el índice de incremento de la resistencia del cemento (Neville & Brooks, 2010); este compuesto presente en 0.96% en la *Riolita* se encuentra dentro del rango permisible del 0.2 a 1.3 % del cemento. 4) El óxido de magnesio (MgO), (Neville & Brooks, 2010) indica, que es llamado también magnesia, es una sustancia que frecuentemente acompaña al óxido de calcio. La magnesia no se combina durante el proceso de cocción del cemento Portland, es decir, no forma componentes hidráulicos, sino que permanece como magnesia libre. Dado que la magnesia, similarmente a la cal, en contacto con el agua se hidrata y aumenta su volumen, un porcentaje elevado de magnesia implica peligro de expansión (Irassar *et al.*, 2010). La expansión por magnesia es más peligrosa porque se manifiesta con gran lentitud, a través de los años, y por lo tanto no se puede determinar con certeza mediante pruebas breves de constancia de volumen. Por este motivo la norma de cemento estipula un límite máximo de 5% para el contenido de MgO, favorable en el caso de los residuos ya que se encuentra en 0.15%. El color verde grisáceo del cemento Portland se debe a la magnesia (Neville & Brooks, 2010).



Gráfica 6. Análisis comparativo del % de compuestos presentes entre polvo de cantera (*Rolita*) y cemento (Fuente propia, 2017).

Caracterización Geotécnica del residuo

La identificación de campo, el análisis granulométrico (ASTM D422-63, 2007) y la determinación de los límites líquido y plástico (ASTM Standard D 4318-10, 2010) realizados a las muestras de los residuos, proporcionó el siguiente resultado:

Identificación de campo: Material con baja tenacidad nula y dilatancia lenta, presenta muy baja resistencia en estado seco. No se percibe olor. El color del material se observa en tonos claros del café al blanco.

El material es un suelo limoso (ASTM Standard D 2487-93, 1993) o polvo de roca con poco contenido de arcilla inorgánica ligeramente plástica, que se ubica por debajo de la línea “A” en la carta de plasticidad, con alto contenido de finos. Más del 90% del material pasa la malla de abertura de tamiz de 0.1 mm. Límite Líquido de 24.98%, Límite Plástico de 21.25% e Índice Plástico = 4% en promedio (ASTM Standard D 4318-10 , 2010).

La clasificación del material según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM Standard D 2487-93, 1993) es un ML (Limo inorgánico de baja compresibilidad), por lo que basados en Cabrera & Beira (2007) tienen las siguientes propiedades importantes de ingeniería estando compactado y suturado: presenta un estado de permeabilidad de semipermeable a impermeable, presenta una resistencia aceptable al esfuerzo cortante, compresibilidad media y una trabajabilidad aceptable como material de construcción.

Estratificación de alternativas sustentables

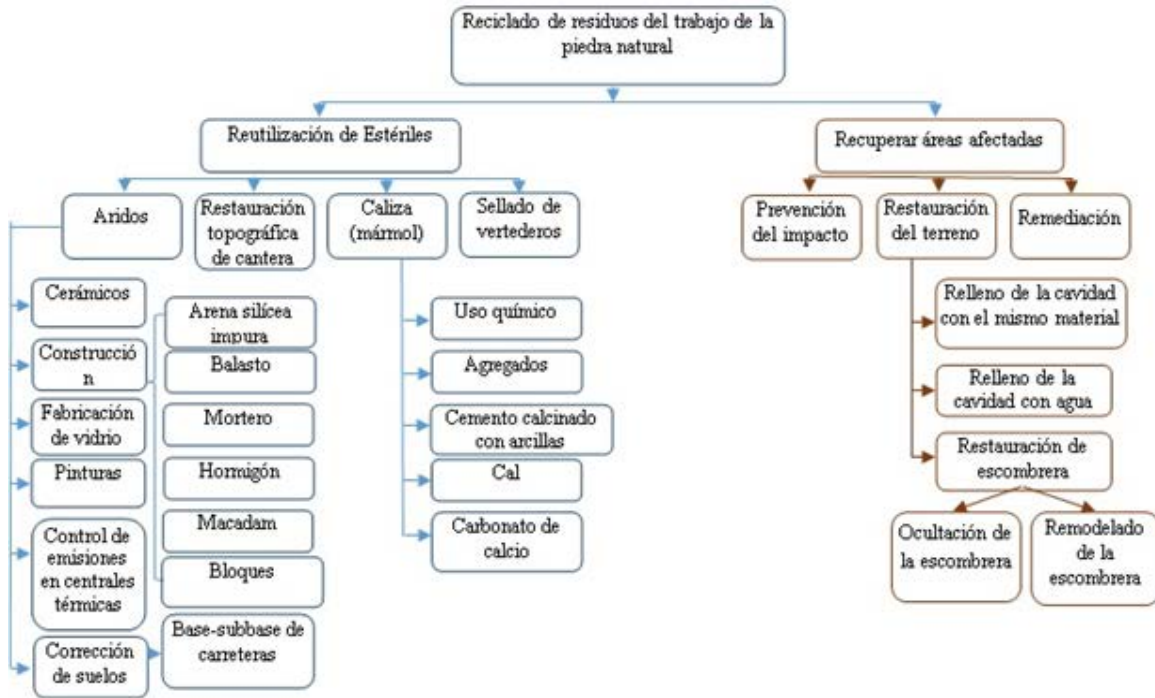
La gráfica 7 muestra una estratificación a partir de la revisión bibliográfica realizada en Alba & Camacho (2016), Álvarez & Torres (2006), Carvalho (2008), Castells, (2000), Gulfam & Tighe (2016), Hassan *et al.* (2017), IFOMEGEM (2005), ITGE (1995), López (2007), Martínez & Torres (2015), Medina *et al.* (2011), Mejía de Gutiérrez *et al.* (2009), Montoya & Durán (2013), PINACAL (2007), Ruiz *et al.* (2012), UNEP (1996), Vadillo *et al.* (1995), Valdez *et al.* (2007) y Zárraga *et al.* (2006), la cual permitió identificar acciones en la disposición de los residuos basados en sus características geotécnicas y químicas. Dentro de las opciones se observa lo siguiente:

Se recomienda utilizarlos para reestructurar las zonas explotadas así como otros terrenos, estrategia que han seguido los empresarios a cargo de los banco de material de la región, con el fin de recuperar algunas áreas explotadas, pero que en la actualidad ya no es suficiente para disponer de la gran cantidad de residuo generado.

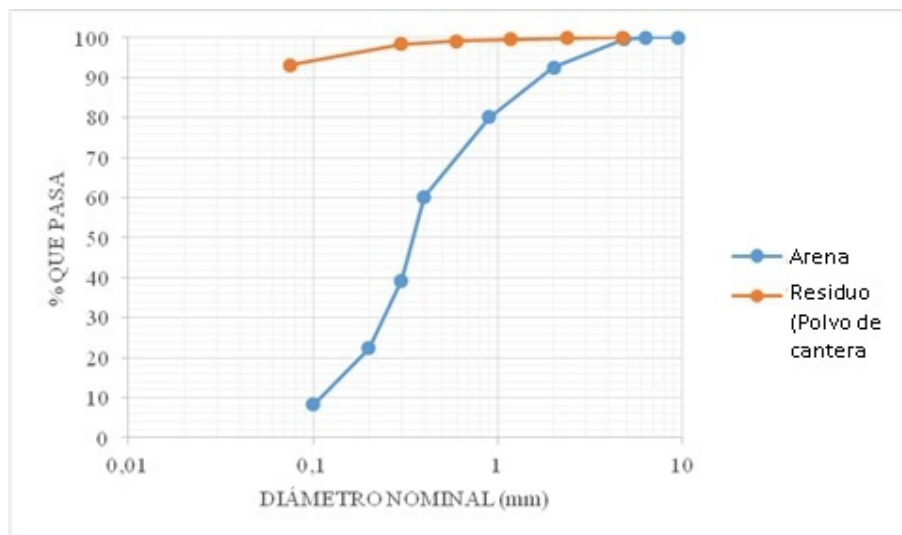
Dentro de las alternativas sustentables en la reutilización de estériles como áridos en el área de la construcción se encuentran: arena silícea, balasto, mortero, hormigón, macadam y bloques. De estas opciones el balasto quedaría descartado ya que con base en los resultados geotécnicos (ASTM Standard D 2854-10, 2010) no cumpliría las características del tamaño de partícula.

La gráfica 8 muestra las curvas granulométricas del residuo (polvo de cantera) y la de arena utilizada en la región de Huichapan Hidalgo como agregado en el área de construcción. Para el caso del polvo, más del 99% en masa pasa el tamiz con abertura de malla de 1 mm mientras que para la arena corresponde al 80% de masa el que pasa el tamiz con abertura de malla de 1 mm. Como lo indica PINACAL (2007) se recomienda utilizarlo como arena para morteros de construcción en el 100% de su masa.

La granulometría y composición elemental sugieren la pertinencia para emplearse como arena silícea (PINACAL, 2007) y como material cementante. Para evaluar esta premisa que en un principio se estableció como hipótesis, se realizaron las mezclas correspondientes para analizar los efectos que este residuo genera dentro de una mezcla cementante.



Gráfica 7. Alternativas sustentables en la aplicación de residuos de la explotación de piedra de cantera (Fuente propia, 2016).



Gráfica 8. Curvas granulométricas de polvo de cantera (*Riolita*) y arena silícea (Fuente propia, 2017).

Ensayos a especímenes preparados

La Tabla 2, muestra los 81 resultados de los ensayos a compresión. En la determinación experimental de la resistencia a la compresión, se observaron valores desde los 2 MPa hasta 12.9 MPa; los valores más bajos los reportan las mezclas que en la proporción de polvo de cantera/(cemento + Polvo de cantera) rebasan el 70%, y con relaciones de agua/(cemento + Polvo de cantera) superiores a 0.4 y a su vez inferiores a 0.33.

Tabla 2. Resultados de compresión del diseño de experimentos (MPa), a los 90 días de edad de las probetas.

		Niveles de Agua (g) (Factor A)								
		50			75			100		
Niveles de cemento (g) (Factor C)		Niveles de polvo de cantera (g) (Factor B)								
		100	150	200	100	150	200	100	150	200
Replica 1	50	9.3	3.6	4.3	6	5.2	6.9	3.2	3.6	2.9
	75	7.5	5.7	3.7	6.3	8	7.1	5.5	7.4	7.9
	100	6.7	2	3.8	6	5.9	8.7	11	4.4	4.7
Replica 2	50	10.4	2	4.5	3.5	6.9	5.6	4.1	3.3	3.3
	75	6.5	3.7	3.1	9.8	6.9	10.4	3.8	7.4	9
	100	4.4	6.1	5.1	11.4	10.6	2.6	10.2	4.7	8.3
Replica 3	50	8.7	2.4	4	8.2	4.4	5.8	2.4	6.1	3.2
	75	6.9	1.1	1.9	5.1	12.9	8.3	9.7	8.1	6.5
	100	5	3.1	3.7	9.7	11.3	6.3	6.5	4	8.9

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Derivado de los resultados de la Tabla 2, se seleccionaron las 10 combinaciones que presentaron los valores más altos en cuanto a la resistencia, asociando a ellas el % de residuo en la mezcla, la relación Agua/agregados (polvo de cantera + cemento), la densidad y el % de humedad. Los datos se muestran en la tabla 3.

Al comparar las mezclas con porcentaje similar de polvo de cantera, se observa que la mayor humedad y menor densidad, lo presentan las probetas con mayor relación agua/agregados, como lo reporta Moreno *et al.* (2004), denotando una relación entre la pérdida de masa por secado al ambiente y el tipo de mezcla; a mayor relación agua/agregados, mayor porcentaje de pérdida de masa.

Tabla 3. Análisis de las 10 probetas con mejor Resistencia a la compresión.

Mezcla	% Polvo de cantera	Relación agua / agregados	Resistencia a la compresión Mpa	Densidad g/ml	% Humedad
1	67%	0.33	12.9	1.55	14%
2	60%	0.30	11.4	1.70	6%
3	73%	0.27	11.3	1.60	10%
4	73%	0.36	11.0	1.43	17%
5	50%	0.38	10.4	1.59	10%
6	67%	0.25	9.8	1.64	8%
7	57%	0.43	9.7	1.36	21%
8	57%	0.57	9.0	1.53	18%
9	67%	0.44	8.7	1.60	13%
10	50%	0.50	8.1	1.38	23%

Fuente: Elaboración propia, 2017.

A la edad de 90 días, se registraron valores de resistencia, de 12 y 13 MPa, correspondientes a las siguientes combinaciones: **1)** 50% de polvo de cantera en relación a la cantidad de agregados (polvo de cantera + cemento) en la mezcla, con una relación de agua/ agregados de 0.38.

Y **2)** 67% de polvo de cantera en relación a la cantidad de agregados (polvo de cantera + cemento) en la mezcla, con relación de 0.33 de agua/ agregados.

Entre estas dos combinaciones, la de mejor trabajabilidad fue la 1.

El comportamiento de las 10 mejores muestras a través de los días se presenta en la tabla 4, las mezclas conformadas por polvo de cantera (Q), cemento (C) y agua (W).

MEZCLAS		DIAS			
		3	7	14	28
MEZCLAS	¹ QCW-	3.6	8.8	9.9	12.4
	² QCW-	5.6	6.6	9.3	11.9
	³ QCW-	2.4	3.9	4.2	5.4
	⁴ QCW-	2.6	5.6	6.6	5.6
	⁵ QCW-	5.1	8.8	13.3	14
	⁶ QCW-	1	1.7	2.1	3.3
	⁷ QCW-	3.2	6.5	8.4	8.4
	⁸ QCW-	3.9	3.7	4.4	4.6
	⁹ QCW-	2.8	4.1	5.1	4.5
	¹⁰ QCW-	3.4	5.7	6.1	7.5

Tabla 4. Resistencia a la compresión de las mezclas a 3, 7, 14 y 28 días en MPa

Fuente: Elaboración propia, 2017.

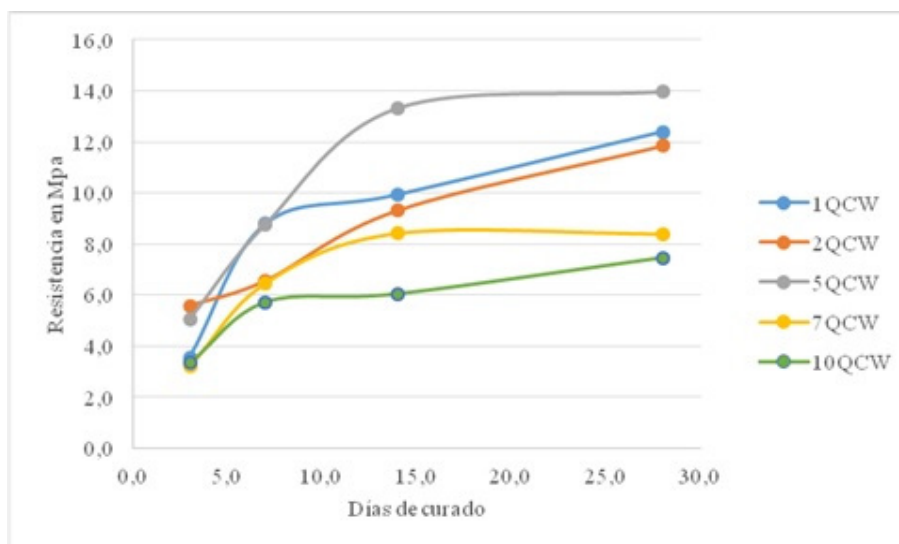
La tabla 5 muestra las mezclas con los valores más altos de resistencia a la compresión calculados a 28 días de edad, siendo el valor más alto de resistencia 14 MPa

Tabla 5. Mezclas con mayor resistencia a compresión en MPa determinadas a 28 días.

Mezcla	% Polvo de cantera	Relación Agua / agregados	Resistencia a la compresión MPa
1QCW	67%	0.33	12.4
2QCW	60%	0.30	11.9
5QCW	50%	0.38	14.0
7QCW	57%	0.43	8.4
10QCW	50%	0.50	7.5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la gráfica 9 se presenta el comportamiento de las mejores mezclas a través del tiempo. Se observa un incremento significativo de 7 a 14 días de edad. A su vez, se observa el efecto entre la cantidad de polvo de cantera y la relación de agua en la mezcla, para una misma proporción de sustitución del residuo se observa una mejor resistencia a la compresión a menor relación de agua/ agregados entre los límites de 0.5 y 0.3,



Gráfica 9. Comportamiento de las mezclas a través del tiempo (Fuente propia, 2017).

Análisis del diseño experimental

En la tabla 6, se presenta el análisis de varianza realizado al diseño de experimentos factorial, ubicados en las dos últimas columnas de la matriz se examinan los **valores F** (Medida de divergencia entre la distribución de sus datos y una distribución esperada) **y p** (probabilidad de obtener una estadística de prueba que sea por lo menos tan extrema como el valor calculado) respectivamente. Estos valores se calculan para determinar si se tienen efectos significativos o no. **Un efecto no significativo** indica que los resultados no son afectados por la forma en cómo se realizaron las mezclas de concreto. Los valores significativos corresponden a aquellos que cumplen en que $p \leq \alpha$, donde α es el nivel de significancia del experimento, en este caso se estableció un $\alpha = 0.05$. (Montgomery, 2009)

Por lo tanto, se observa que las relaciones significativas ($p \leq \alpha$) que afectarán la resistencia de las mezclas, son los efectos entre agua y polvo de cantera y por ende agua con cemento con valores p de 0.026 y 0.002 respectivamente.

Tabla 6. ANOVA Análisis de varianza de los efectos de polvos, cemento y agua sobre la resistencia a la compresión.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados ajustada	Media de cuadrados ajustada	F	P
155						
Regresión	9	266.576	266.576	29.6196	6.50	0.000
Lineal	3	78.811	78.811	26.2703	5.76	0.001
Cantera	1	29.817	29.817	29.8166	6.54	0.013
Agua	1	18.658	18.658	18.6584	4.09	0.047
Cemento	1	30.336	30.336	30.3360	6.66	0.012
Cuadrática	3	117.552	117.552	117.552	8.60	0.000
Cantera*Cantera	1	9.359	9.359	9.3591	2.05	0.156
Agua*Agua	1	86.771	86.771	86.7713	19.04	0.000
Cemento*Cemento	1	21.422	21.422	21.4221	4.70	0.034
interacción	3	70.212	70.212	23.4041	5.14	0.003
Cantera*Agua	1	23.529	23.529	23.5290	5.16	0.026
Cantera*Cemento	1	0.248	0.248	0.2483	0.05	0.816
Agua*Cemento	1	46.435	46.435	46.4351	10.19	0.002
Error Residual	71	323.579	23.579	4.5574		
Lack of adjustment	17	135.674	135.674	135.674	2.29	0.011
pure Error	54	187.905	187.905	3.4797		
Total						
	80	590.				

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para poder dar detalle sobre la validez del modelo obtenido, se evaluará el coeficiente de determinación (R^2) del modelo de regresión obtenido del análisis del diseño de experimentos (Montgomery, 2009).

R^2 (R-cuadrado) es el porcentaje de variación de la variable de respuesta que se explica por su relación con una o más variables predictoras. En general, mientras más alto sea R^2 , mejor se ajustará el modelo a los datos. R^2 está siempre entre 0 y 100%. Valores mayores al 70% hay relación aceptable, entre 40% y 70 % hay baja relación y valores menores a 40% indican que no existe relación. (Montgomery, 2009)

El coeficiente de Determinación (R^2) del modelo, calculado junto con la tabla ANOVA por el software Minitab 16® tiene un valor de 71.16%, es decir, el 71.16% de variación de la resistencia a la compresión se explica por su relación con uno o más de sus tres factores. En teoría, si un modelo pudiera explicar 100% de la varianza, los valores ajustados siempre serían iguales a los valores observados (Montgomery, 2009).

El modelo matemático obtenido por Minitab 16® para este proceso es:

$$\hat{y} = -0.334 + 0.317X_1 + 0.165X_2 - 0.145X_3 - 0.0035X_1^2 - 0.002X_2^2 + 0.0003X_3^2 + 0.002X_1X_2 + 0.0006X_1X_3 - 6.6 * 10^{-5} X_2X_3$$

Donde

X_1 = Agua (A), X_2 = Cemento (B), X_3 = Polvo de cantera (C)

\hat{y} = Es la resistencia a la compresión determinada por la cantidad de materia prima en la mezcla. En la ejecución del experimento, representa el promedio de todas las observaciones (Montgomery, 2009).

Conclusiones

La composición del polvo de *Riolita* se basa en fragmentos líticos de andesitas y cuarzo y feldespatos en matriz vítrea. Presenta fragmentos vítreos ligeramente aplastados. Contiene Si_2O como compuesto mayoritario con un 76%. La *Riolita* tiene una distribución mundial (Lagomarsino, 2009), por lo que el estudio puede ser reproducido donde se tenga la explotación de esta roca.

Basado en Valdés (2015) el exceso de sílice favorecerá la reducción de la porosidad de la mezcla, lo que logra mejorar la inter fase de la pasta de cemento Portland adherida al

agregado derivándose en un producto más resistente y duradero, aumentando también la compacidad del producto final.

El CaO presente en el residuo, en cantidades mucho menores que el cemento, 2.4% contra 67%, respectivamente, provocó que las mezclas que contienen porcentajes de residuo superiores al 70%, presentaran muy bajas resistencias, alrededor de 2 MPa.

El ahorro en cemento es factible en un 50% ya que los datos indican que los mejores valores de resistencia a la compresión fueron 12 y 13 MPa y corresponden a las mezclas con 50% y 67% de polvo de cantera en relación a la cantidad de agregados. Estos valores de resistencia resultan viables para aplicación de firmes y plantillas. (González, 2012).

Dentro de los compuestos que pudieran afectar el comportamiento mecánico están los alcalinos como Na_2O , y el óxido de magnesio, sin embargo en el residuo se encuentran por debajo de los límites permisibles enmarcados para el cemento.

La granulometría y composición elemental sugieren la pertinencia para emplearse como arena silícea (PINACAL, 2007)

Se consigue un beneficio ambiental al obtener un material elaborado con residuo de polvo de cantera. En específico como un concreto, se pueden retirar los residuos de los depósitos y entrar directamente al proceso sin algún tratamiento ya que como lo ha reportado el análisis de difracción de rayos X, no contienen elementos contaminantes y en segundo lugar al utilizar menor cantidad de cemento Portland en la mezcla se pueden reducir las emisiones de contaminantes que se generan por el proceso de producción del cemento; aunado al ahorro por consumo del cemento.

Dentro de las alternativas sustentables para la reutilización de estériles como áridos en el área de la construcción se encuentran: arena silícea, balasto, mortero, hormigón, macadam y bloques. De estas opciones el balasto quedaría descartado ya que con base en los resultados geotécnicos (ASTM Standard D 2854-10, 2010) no cumpliría las características de tamaño de partícula.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez, M.; Torres, G. A. y Luis, C. (2006) Síntesis y Caracterización de Vitrocerámicos a partir de residuos sólidos inorgánicos industriales. *Ciencia UANL* 143-148. México.
- ASTM C31 / C31M-17. (2017). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*, ASTM International. West Conshohocken, PA.
- ASTM D422-63. (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International. West Conshohocken.
- ASTM International. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. [En línea] (2016) de Agosto de 01. [Citado el: 10 de Abril de 2017.] www.astm.org.
- ASTM Standard D 2487-93. (1993). *Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes*. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, United States.
- ASTM Standard D 2854-10. (2010). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken United States.
- ASTM Standard D 4318-10. (2010). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils*. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA.
- Brown, T L.; LeMay, E.; Bursten, B. (1993). *Química. La Ciencia Central*. Prentice-Hall. México.
- Cabrera, P.M.; Beira, E. (2007). Geotechnical characterization of the experimental field at the civil engineering from the University of Oriente. *Universidad Autónoma de Yucatán*. 2. Vol. 11. 57-66. Yucatán. México.
- Carvalho, J. H. (2008). Decision criteria for the exploration of ornamental stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 45. 1306-1319. Granada.
- Castells, J. (2000). *Reciclaje de Residuos Industriales. Aplicación a la fabricación de materiales para la construcción*. Diaz de Santos. Madrid.
- Diario Oficial de la Federación. (2011). NORMA Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. México.
- Fernández, N.; Eutimio, G.; Fernandez,M.; Perez, I.; Morón, Y.; García, V.; Perdomo, I.; Perez,

- N. (2008). Diseños de experimentos en tecnología y control de los medicamentos. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*. 2. Vol. 39. 28-40. México.
- Galetakis, M.; Soultana, A. (2016). A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*. Vol. 102. 210-220. Grecia.
- González, F. (2012). *Manual de supervisión de obras de concreto*. Limusa, México.
- Gulfam, J.; Tighe, S.L. (2016). An experimental design-based evaluation of sensitivities of MEPDG prediction: investigating main and interaction effects. *International Journal of Pavement Engineering*. 7. Vol. 17. 615-625. Canadá.
- Gutierrez, H.; De la Vera, R. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Mc Graw-Hill. México
- Hassan, M.; Fattah, K.P.; Tamimi, A.K. (2017). Modelling mechanical behavior of cementitious material incorporating CNTs using design of experiments. *Construction and Building Materials*, Vol. 154. 763-779. United Arab Emirates.
- IFOMEGEM. (2005). *Anuario estadístico de la minería en el estado de México*. Estado de México. Instituto de fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México. México.
- Irassar, E.F.; Bonavetti, V.L.; Menéndez, G.1. (2010). Cementos con Material Calcáreo: Formación de Thaumasia por Ataque de Sulfatos. *Revista de la Construcción*. Vol. 9. 63-73. Santiago, Chile.
- ITGE. (1995) *Contaminación y Depuración de suelos*. Publicaciones ITGE. España.
- Lagomarsino, J. (2009). *Rocas y Minerales*. Parragon Books Ltd, Reino Unido.
- López, F. (2007). *La Piedra Natural. El recorrido de los minerales*. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Madrid.
- Martínez, W.; Torres, A.A. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*. 3. Vol. 5. 235-248. México.
- Medina, C.; Juan, A.; Frías, M.; Sanchez de Rojas, M.I.; Morán, J.M.; Guerra, M.I. (2011). Characterization of concrete made with recycled aggregate from ceramic sanitary ware. *Materiales de Construcción*. 304. Vol. 61. 533-546. Madrid España.
- Mejía de Gutiérrez, R.; Rodríguez, C.; Rodríguez, E.; Torres, J.; Delvasto, S. (2009). Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2. Vol. 48. 55-64. Colombia.

- Méndez, A. (2013). Visual Pollution. *Gestión y Ambiente*. 1. Vol. 16. 45-60. Medellín, Colombia.
- Menéndez, G.; Bonavetti, V I. (2008). The Experimental Design and the Technology of Concrete. *Revista de la Construcción*. 1. Vol. 7. 94-104. Buenos Aires.
- Milán, M.; Yañez, C.; Navarro, I.; Verma, S.P.; Carrasco, G. (1993). Geología y geoquímica de elementos mayores de la Caldera de Huichapan Hidalgo México. *Geofísica Internacional*. 2. Vol. 32. 261-276. México.
- Montgomery, D.C. (2009). *Desing and Analysis of Experiiments*. Wiley. USA.
- Montoya, J.; Durán, J.A. (2013). Recycling of aggregates of Panasqueira mines as refractory lining of metal casting. *CTMAT*. Vol. 25. 129-137. Granada España.
- Moreno, E.I.; Dominguez, G.; Cob, E.; Duarte F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*. 2. Vol. 8. 117-130. México.
- Neville, A.; Brooks, J.I. (2010). *Tecnología del concreto*. Trillas. México.
- PINACAL. (2007). *Planes de competitividad, innovacion y entorno*. Valladolid: Unión Europea,
- Ramírez de Alba, H.; Camacho, E. (2016). Estudio experimental sobre un procedimiento para construir placas plegadas de concreto reforzado. *Ingeniería*. 1. Vol. 10. 5-16. México.
- Ruiz, D.; López, C.; Cortes, E.; Froese, A. (2012). Nuevas alternativas en la construcción: Botellas PET con relleno de tierra. *Revista Javeriana*. 2. Vol. 25. 292-303. Bogotá Colombia.
- Santaella, L.; Salamanca, R. (2004). Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Vol. 14. 14-19. Colombia.
- Santos, A.; Villegas, N.; Betancourt, J. (2012). Residuo de mármol como insumo en la construcción civil - diagnóstico de la Comarca Lagunera. *Revista de la Construcción*. 2. Vol. 11. 17-26. Chile.
- Servicio Geológico Mexicano. gov.mx. [En línea] [Citado el: 11 de Noviembre de 2017.] http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1653_F14-C78_GM.pdf.
- UNEP. (1996). *Environmental and Safety Incidents Concerning Tailing Dams at Mines mining*. Journal Research Services.
- Vadillo, L.C.; López-Jimeno, J.; González-Cañibano, A.; González-Santos, E.; Navarro-Moreno,

E.; y Vazquez-García, A. (1995) *Manual de reutilización de residuos de la Industria Minera, Siderometalurgica y Termoeléctrica.*» Ingeniería Geoambiental.

Valdés, S. (2015). La Adición de Humo de Sílice para Concretos de Alta Resistencia. *LIEC* México.

Valdez, P.L.; Durán, A.; Rivera, J. (2007). Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante. *Ciencia UANL*. Vol. X. 49-58. México.

Zárraga, R.; Cervantes, J.; Álvarez, D.; Reyez, V. y Salzar M. (2006). *La Investigación Científica en la Conservación de Monumentos de Cantera*. Acta Universitaria. 38-50. México