

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS CIVILES**

**TEMA:
USO DE POLVO RESIDUAL PRODUCTO DEL CORTE DE PIEDRA DEL RÍO
CHOTA, COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PARA LA
ELABORACIÓN DE UN MORTERO ADHESIVO SECO COMO PEGANTE
CERÁMICO**

**AUTORES:
TANDALLA HERRERA JEFFERSON ALEJANDRO
SALGUERO BASANTES LUIS ANDRÉS**

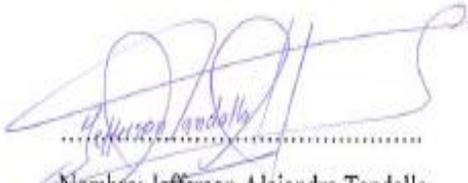
**TUTORA:
DORIS ALEXANDRA ANDRADE SANDOVAL**

QUITO, Enero 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Jefferson Alejandro Tandalla Herrera, con documento de identificación N° 1719064600 y Luis Andrés Salguero Basantes con documento de identificación N° 1719623777, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: USO DE POLVO RESIDUAL PRODUCTO DEL CORTE DE PIEDRA DEL RÍO CHOTA, COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE UN MORTERO ADHESIVO SECO COMO PEGANTE CERÁMICO, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Nombre: Jefferson Alejandro Tandalla
Herrera
Cédula: 1719064600



.....
Nombre: Luis Andrés Salguero
Basantes
Cédula: 1719623777

Quito, enero del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Doris Alexandra Andrade Sandoval declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo académico: USO DE POLVO RESIDUAL PRODUCTO DEL CORTE DE PIEDRA DEL RÍO CHOTA, COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE UN MORTERO ADHESIVO SECO COMO PEGANTE CERÁMICO, realizado por Jefferson Alejandro Tandalla Herrera y Luis Andrés Salguero Basantes, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, enero del 2020



Atentamente

Doris Alexandra Andrade Sandoval

C.I: 1720110657

USO DE POLVO RESIDUAL PRODUCTO DEL CORTE DE PIEDRA DEL RÍO CHOTA, COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE UN MORTERO ADHESIVO SECO COMO PEGANTE CERÁMICO

USE OF RESIDUAL DUST, PRODUCT OF THE CHOTA RIVER'S STONE CUT, AS A PARTIAL SUBSTITUTE OF CEMENT TO ELABORATE A DRY ADHESIVE MORTAR AS CERAMIC GLUE

Jefferson Tandalla-Herrera¹, Luis Salguero-Basantes²

Resumen

En la investigación que refleja este documento, se determinó cómo la sustitución de cemento por polvo de piedra residual, producto del corte de piedras del río Chota, influye en las propiedades mecánicas de un mortero que funcione como pegante cerámico. Primeramente, se analizó el mencionado polvo con un ensayo de Difracción de Rayos X, el cual contiene minerales como plagioclasas y otros que también se pueden encontrar en el cemento, como cuarzo y hematita. Con esto se planteó una dosificación “patrón”, misma que no contiene polvo residual y otras donde el cemento fue sustituido en porcentajes de 5%, 10%, 15%, 25% y 35% por polvo que pasó el tamiz No. 200. Estas muestras se evaluaron en cuatro ensayos de laboratorio, como son resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, determinación del deslizamiento y determinación del tiempo de fraguado, los cuales son necesarios para calificar el mortero en cuestión y donde concluyó, que el mortero con polvo residuo sí

Abstract

In the research behind this document has been determined how the substitution of the cement for residual stone dust, product of the Chota's river stones cut, has an effect on the mechanic properties of a mortar used for ceramic glue. Firstly, dust was analyzed with an X-ray Diffraction test, which contains minerals such as plagioclase and others that can also be found in cement, such as quartz and hematite. Therefore, with this information, a control dosage was stated, which does not contain residual dust and other dosages where the cement was substituted with percentages of 5%, 10%, 15%, 25% and 35% of dust that passed through a sieve No. 200. These samples were evaluated in four laboratory tests, which are compression resistance test, traction resistance test, slip determination test and setting determination time test, these tests are necessary to grade the mortar at issue and conclude that the mortar with residual dust does work as ceramic glue, the mix being more efficient with 35% of dust, being that,

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador
Autor para correspondencia: jtandalla,lsalguero@est.ups.edu.ec

funciona como pegante cerámico, siendo la mezcla más eficiente con un 35% de polvo, ya que, a pesar de que sus propiedades mecánicas si se ven afectadas, estas siguen cumpliendo con los requerimientos mínimos de las normativas pertinentes.

even though its Mechanical properties are being affected, they still fulfil the minimum requirements of the pertinent normatives.

Palabras Clave: Difracción de Rayos X, Mortero adhesivo, Plagioclasas.

Keywords: Adhesive mortar; Plagioclasses; X-ray Diffraction.

1. Introducción

En los últimos años la industria de la construcción ha experimentado un aumento significativo, lo que conlleva a que la demanda de productos elaborados crezca, algunos de los cuales pueden ser destinados para acabados que requieran recubrimiento cerámico en distintos ambientes arquitectónicos. Es por ello que la creación de nuevos materiales para esta finalidad podría traducirse en la implementación de nuevas gamas y líneas de productos innovadores por parte de las industrias, mismas que no deben pasar por alto el ideal de una construcción sostenible a favor de una mitigación de impactos ambientales.

Los cuales deben “priorizar el reciclaje, re-uso y recuperación de materiales frente a la tendencia tradicional de la extracción de materias naturales; además de fomentar la utilización de procesos constructivos basados en productos renovables [1].”

Es pertinente contemplar que los residuos para las industrias representan un problema, que se traduce en gastos de acopio y desalojo, sin embargo, estos residuos se pueden convertir en nuevos ingresos, al buscarles provecho para un fin útil y así evitar egresos económicos.

Según la EMGIRS [2] en el año 2018, el relleno sanitario de la ciudad de Quito sirvió de acopio para 764.146 toneladas de residuos sólidos, de los cuales conforme lo establece M. Castillo [3], los residuos inertes en el área comercial corresponden al porcentaje promedio de 0.08% lo que equivaldría a establecer que durante el año mencionado se produjeron 61.132 toneladas de los prenombrados desechos.

Razón por la cual el presente trabajo de investigación propone utilizar el polvo residual, que se produce al hacer cortes a piedras del río Chota que son utilizadas para la fabricación de fachaletas, como sustituto parcial del cemento para la elaboración de un mortero adhesivo seco que funcione como pegante cerámico y determinar cómo influye esta sustitución en las propiedades mecánicas del mortero, conjugando así el empleo de la construcción sostenible, al ahorrar recursos económicos por el aprovechamiento de material residual de una manufactura principal y que al no ser desechado coadyuvará a reducir el impacto ambiental y respetar la normativa ambiental vigente.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento

El cemento utilizado es de la marca Selvalegre [4] el cual sirve para construcciones en general y cumple con las exigencias de la norma NTE INEN 490 y ASTM C 595.

2.1.2 Agua de mezclado

El agua que interviene en la mezcla es agua potable que se encuentra a una temperatura de entre 18°C y 23°C.

2.1.3 Arena gradada

Se utilizó arena estándar gradada N°30 - N°100, la cual cumple los requisitos establecidos por la normativa ecuatoriana [5]. Mostrada en Figura 1.

Es una arena de sílice redondeada naturalmente de cuarzo casi puro, extraídas del área de Ottawa, Illinois y cumple con los requisitos para ASTM C 109 y C 778, así como para AASHTO T 106.



Figura 1. Arena Gradada ASTM

2.1.4 Polvo de piedra RiverRock

Este material utilizado, se encuentra bajo la marca RiverRock y es un polvo residual que se produce al realizar corte de piedras extraídas del río Chota, las cuales son usadas para la elaboración de fachaletas, que es la manufactura a la que la empresa se dedica.

2.2 Metodología

La presente investigación es de tipo descriptiva y cuantitativa, la cual se dividió en dos etapas: la etapa preliminar que es dónde se hizo una recopilación de información bibliográfica relacionada, además de efectuarse ensayos al cemento y al polvo de piedra, para conocer sus características y propiedades; y la etapa final donde se hicieron ensayos de caracterización al mortero, para analizar sus propiedades mecánicas.

Con el fin de alcanzar un mortero favorable para la colocación de cerámica, Sánchez de Guzmán [6] indica que, es importante que el mortero tenga una moderada resistencia inicial, además debe contar con una buena trabajabilidad, dichos factores están estrechamente ligados a la cantidad de cemento y arena que intervienen en la mezcla. La dosificación utilizada para la presente investigación es de 1:2.75, misma que se ampara en las normativas NTE INEN 488 y ASTM C-109. Es importante mencionar que esta dosificación se encuentra en pro de la investigación

planteada, ya que el objetivo es sustituir la mayor cantidad de cemento utilizando polvo de piedra, cumpliendo normativas establecidas.

El mortero se evaluó en cuatro ensayos de caracterización, como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, determinación del deslizamiento y determinación del tiempo de fraguado, para los cuales se realizan muestras de mortero sustituyendo el cemento por polvo residuo en porcentajes de 5%, 10%, 15%, 25%, 35%.

Se elaboró una dosificación que no contenga polvo de piedra, que sirve de patrón para comparar con las muestras que si contengan este polvo y ver como influye en las propiedades mecánicas del mortero.

2.3 Ensayos Previos

Los ensayos iniciales de caracterización realizados, se detallan en la Tabla 1:

Tabla 1: Ensayos Previos

Ensayo	Norma
DRX Polvo de Piedra	-
Densidad del cemento	NTE INEN 156
Densidad del polvo de piedra	NTE INEN 156

2.3.1 Difracción de rayos-X polvo de piedra

La difracción de rayos X es una técnica experimental “mediante la cual se pueden caracterizar las muestras y, aplicando conjuntamente un análisis cualitativo y cuantitativo se pueden detectar las estructuras cristalinas y sus variaciones [7].” Razón por la cual se acudió a este ensayo para caracterizar una muestra de polvo de piedra y así conocer desde una

perspectiva química los elementos que lo componen. Apoyados en un Difractómetro D8 Advance ilustrado en la Figura 2.



Figura 2. Difractómetro D8 Advance

2.3.2 Densidad del cemento y polvo de piedra

El método de ensayo es aplicable para ambos materiales, ya que “la determinación de la densidad del cemento consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier [8].” y en el caso del polvo se conserva este principio de volumen desplazado. Ilustrado en Figura 3.

En base a normativa, se utilizó querosén libre de agua o nafta, cuya densidad es mayor que 0.73 g/cm^3 , con un rango de temperatura dentro de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.



Figura 3. Ensayos de densidades

Esto se realiza con el fin de tener una característica física inicial del polvo

residual y del cemento para hacer una comparación, además de tener un indicio de si el mortero propuesto será más liviano al mortero ordinario.

2.4 Ensayos de caracterización al mortero

Los ensayos realizados al mortero para evaluar sus propiedades mecánicas, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Ensayos de caracterización mortero adhesivo

Ensayo	Norma
Resistencia a la compresión	ASTM C109
Resistencia a la tracción	AASHTO T 132
Determinación del deslizamiento	NTE INEN-ISO 13007-2
Determinación del tiempo de fraguado	ASTM C807

2.4.1 Resistencia a la compresión

Este ensayo brinda un medio “para determinar la resistencia a la compresión de los morteros de cemento [9]”, se evalúa este parámetro para saber si el mortero es capaz de resistir las solicitaciones de compresión ejercidas por las baldosas de piso y por ende del tránsito que sobre estas ocurre. Véase en Figura 5. y Figura 6.

Es importante mencionar que, la relación agua/cemento será constante en todas las dosificaciones cuyo valor será obtenido mediante tanteo en la dosificación patrón, el valor adecuado será cuando la mezcla posea una fluidez de 110 ± 5 en 25 caídas de la mesa de flujo. Véase en Figura 4.

Tandalla, Salguero / Uso de polvo residual producto del corte de piedra del río Chota, como sustituto parcial del cemento para la elaboración de un mortero adhesivo seco como pegante cerámico



Figura 4. Medición de la fluidez



Figura 7. Briquetas para ensayo de tracción



Figura 5. Muestras para ensayo de compresión



Figura 8. Ensayo de tracción



Figura 6. Ensayo de compresión

2.4.3 Determinación del deslizamiento

Este método de ensayo proporciona un medio para determinar la resistencia del mortero al deslizamiento, que es el “movimiento descendente de la baldosa en una capa de adhesivo extendida sobre una superficie vertical [11].” Véase en Figura 9.

El procedimiento de ensayo se realizó acorde a la normativa ecuatoriana NTE INEN-ISO 13007-2 [12].

2.4.2 Resistencia a la tracción

“Esta prueba determina la fuerza en tensión sobre un mortero de cemento utilizando un espécimen de briqueta [10]”, se lo realiza con el objetivo de conocer si el mortero en cuestión es adecuado para resistir las sollicitaciones de tracción que ejercen las piezas de cerámica. Véase en Figura 7. y Figura 8.



Figura 9. Determinación del deslizamiento del mortero patrón

2.4.4 Determinación del tiempo de fraguado Vicat Modificado

Este método de ensayo está acorde con la norma ASTM C807 [13] y permite conocer el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del mortero cementoso con agua. Véase en Figura 10.



Figura 10. Moldeos para la determinación del tiempo de fraguado

3. Resultados y Discusión

3.1 Etapa preliminar

3.1.1 Difracción de rayos-X polvo de piedra

Los compuestos con cristalización definida de la muestra se determinaron empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para la cualificación y semi-cualificación. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados DRX Polvo de Piedra

Mineral	Fórmula	Muestra 1 Cont. %
Grupo plagioclasas	$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	65
Cuarzo	SiO_2	10
Diópsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	8
Pigeonita	$(\text{Mg,Fe,Ca})(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	6
Cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	3
Hematita	Fe_2O_3	3
Clinocloro	$(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	2
Caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	1

Se conoce que las plagioclasas se utilizan para la elaboración de vidrio, cerámica y bloques de hormigón. En cuanto a este último, existe una investigación previa donde se analiza el efecto de un aditivo plastificante en conjunto con agua, a una mezcla fija de cemento y plagioclasa, la cual concluye que “el aditivo modifica el plano preferencial de estructura cristalina de la anortita-albita presente en la plagioclasa e incrementa el calor de reacción de hidratación, observándose un incremento en la resistencia a la compresión de los bloques [14].”

Adicionalmente es importante conocer que el clinker, que es el principal componente del cemento portland, dentro de sus fases minerales contiene de modo aproximado, SiO_2 en proporciones de entre 16-26% y Fe_2O_3 en proporciones de entre 2-5%, según lo mencionado por W. Duda [15].

Esta información anteriormente mencionada coadyuva a tener un indicio de que el Polvo de Piedra podría funcionar en pro de la presente investigación, ya que los constituyentes del polvo son minerales como plagioclasas que corresponden al 65% de la muestra, cuarzo (SiO_2) que corresponde al 10% de la muestra, hematita (Fe_2O_3) que corresponde al 3% de la muestra, y en general minerales que se componen de aluminio, silicio e hidróxidos.

3.1.2 Densidad del cemento y polvo de piedra

Se anexan los resultados en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados Densidad del Cemento y Polvo de Piedra

Material	Densidad [g/cm^3]
Cemento Selvalegre	2.87

Material	Densidad [g/cm ³]
Polvo de Piedra	2.67

Se evidencia en la Tabla 4, que la densidad del cemento es superior a la densidad del polvo de piedra, con lo que es posible mencionar que las mezclas de mortero con polvo de piedra en reemplazo parcial del cemento son más ligeras, obteniendo así un material adhesivo más liviano que uno conformado completamente por cemento.

3.2 Etapa final

3.2.1 Resistencia a la compresión

Se determinó la fluidez del mortero necesaria antes de realizar el ensayo de compresión, cuyos valores se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Relación a/c y Fluidez de las Muestras

Cemento	Arena ASTM	Polvo de piedra	Relación a/c	Fluidez
1.00	2.75	0.00	0.52	115
0.95	2.75	0.05	0.52	110
0.90	2.75	0.10	0.52	105
0.85	2.75	0.15	0.52	110
0.75	2.75	0.25	0.52	110
0.65	2.75	0.35	0.52	115

Es observa que la fluidez de todas las muestras se encuentra dentro del rango de 110 ± 5 , por lo que se establece que la relación agua/cemento tiene un valor de 0.52. Esto se aplica a todas las muestras de mortero, para así evitar vincular los resultados de los ensayos con la cantidad de agua de mezclado.

Se elaboraron 54 cubos para analizar 3 de los mismos por cada edad (3, 7, 28 días) según la NTE INEN 488.

Los resultados finales, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados Ensayo de Compresión

% Polvo	Resistencia a la compresión [MPa]		
	3 días	7 días	28 días
0%	13.78	17.75	24.78
5%	12.08	16.52	22.06
10%	11.42	14.48	19.57
15%	10.61	12.38	18.11
25%	9.13	11.22	15.39
35%	5.18	9.21	12.62

Estos valores tabulados, se trasladan a la Figura 11.

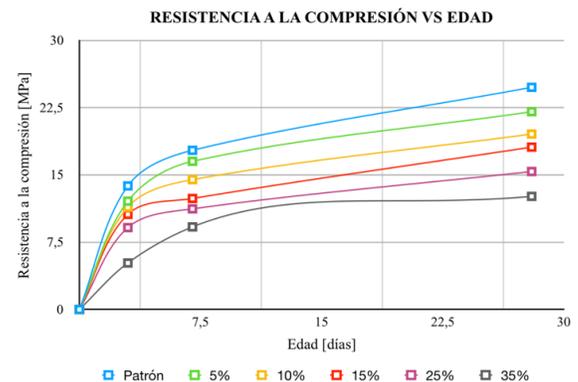


Figura 11. Resistencia a la compresión vs. Edad

Se puede ver tanto en la Tabla 6, como en la Figura 11, que los valores de resistencia a la compresión disminuyen cuando aumenta el porcentaje de polvo de piedra que sustituye al cemento, por lo cual se puede decir que la resistencia a la compresión es inversamente proporcional al porcentaje de polvo de piedra.

Es evidente que la diferencia de los valores entre edades no es excesiva, siendo la mezcla patrón la de mayor resistencia a la compresión en todas las edades y analizando los resultados a los 28 días de curado, las mezclas de 5%, 10%, 15%, 25% y 35%, disminuyen en un 10%, 21%, 26%, 37% y 49% su resistencia respectivamente, en

comparación con la mezcla conformada totalmente por cemento.

Es pertinente contrastar los resultados de la Tabla 6, con la ficha técnica de un mortero comercial especialmente formulado para pegar cerámica [16], en donde se indica que a los 28 días de curado el mencionado mortero alcanza 11.3 MPa de resistencia a la compresión. Por ende, es notable que este valor se encuentra por debajo de los resultados obtenidos, incluso de la mezcla con mayor porcentaje de sustitución (35%), siendo su resistencia de 12.62 MPa, existiendo una diferencia de 1.32 MPa, además de representar el 111% de la resistencia alcanzada por el mortero comercial.

Debemos hacer referencia a la Norma Ecuatoriana INEN 2518 [17] donde se habla de las especificaciones por propiedades de los morteros, razón por la cual según la Tabla 2 de dicha norma, el mortero conformado por 35% de polvo de piedra residuo entraría en una categoría de clasificación Tipo S ya que el valor de resistencia a los 28 días de curado obtenido de 12.62 MPa, supera el parámetro establecido de 12.4 MPa y desde luego lo mínimamente requerido para ser mortero Tipo N y Tipo O que es 5.2 MPa y 2.4 MPa, respectivamente. No obstante, un mortero elaborado con 15% de polvo residual lograría pertenecer a una categoría Tipo M, que cabe recalcar es la más alta, ya que a los 28 días de curado su resistencia a la compresión es de 18.11 MPa, valor que supera el parámetro mínimo de 17.2 MPa detallado en la norma.

Más adelante la mencionada normativa en su Tabla V.1 Guía para la selección de morteros para mampostería, recomienda que se utilice un mortero Tipo S para la construcción de muros de cimentación, paredes de retención, pozos de inspección, desagües, pavimentos,

caminos y patios, y un mortero Tipo N para la construcción de muros portantes, tanto en interiores como en exteriores, por lo que el mortero con 35% de polvo residual podría ser utilizado con estos fines, aunque la norma mencione también que una alternativa en ambos casos sería utilizar un mortero Tipo M, por consiguiente en este caso sería pertinente usar el mortero con 15% de polvo.

Adicionalmente, la Tabla X.1 recomienda que cuando el objetivo del mortero es utilizarlo en la reparación o acabado de un muro de mampostería, tanto en interiores como exteriores, se debe hacer uso de un mortero Tipo O, por lo que perfectamente se podría utilizar el mortero con 35% de polvo.

3.2.2 Resistencia a la tracción

Se elaboraron 54 briquetas para analizar 3 de las mismas por cada edad (3, 7, 28 días) requerida en la AASHTO T 132. Los resultados finales del ensayo, se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados Ensayo de Tracción

%	Resistencia a la tracción [MPa]			
	Polvo	3 días	7 días	28 días
0%		1.60	2.41	3.33
5%		1.23	2.07	2.48
10%		1.10	1.82	2.18
15%		1.05	1.46	2.31
25%		0.94	1.28	1.93
35%		0.86	1.28	1.93

Se trasladan los valores a la Figura 12.

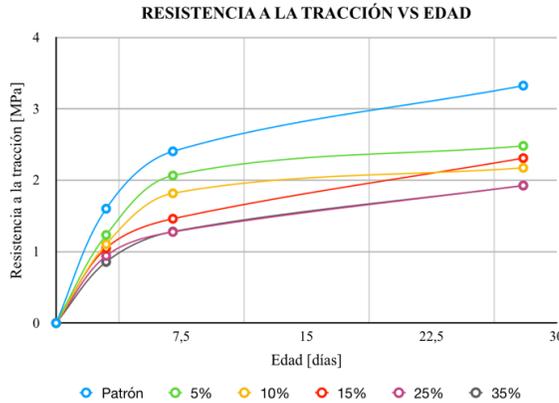


Figura 12. Resistencia a la tracción vs. Edad

Por lo visto en los resultados de la Tabla 7, se puede mencionar que no existe una tendencia definida en cuanto a las resistencias obtenidas en los ensayos, a pesar que se observa que en la mayoría de casos disminuye congruentemente, es prudente decir que no existe relación de proporcionalidad alguna. Con esta observación es evidente que las propiedades mecánicas se ven afectadas con la inclusión del nuevo material, sin embargo, no es un indicativo que determine el cambio de propiedades en todas las muestras elaboradas, ya que se presentan incrementos y decrementos variables, además de que en algunos casos se mantiene constante el parámetro de resistencia a la tracción.

Gutiérrez de López [18] menciona que la resistencia a la tracción representa generalmente el 10% de la resistencia a la compresión, dicha premisa aplicada a la investigación ayuda a comprender que el polvo de piedra favorece para que la resistencia a la tracción del mortero no disminuya considerablemente, es mas, el porcentaje que representa la tracción con respecto a la compresión, a los 28 días de curado, incrementa al aumentar la cantidad de polvo residual. Esto se puede observar en la Tabla 8.

Tabla 8: Representación de la Resistencia a la Tracción

Resist. [MPa]	Polvo de Piedra					
	0%	5%	10%	15%	25%	35%
Compresión	24.78	22.06	19.57	18.11	15.39	12.62
Tracción	3.33	2.48	2.18	2.31	1.93	1.93
% Representa	13.4%	11.3%	11.1%	12.8%	12.5%	15.3%

Es apreciable que la diferencia de los valores de resistencia a la tracción entre edades no es excesiva, siendo claramente la mezcla “patrón” la de mayor resistencia en todas las edades, y específicamente a los 28 días de curado, las mezclas de 5%, 10%, 15%, 25% y 35%, disminuyen su resistencia en un 25%, 34%, 30%, 42% y 42% respectivamente, en comparación con la mezcla conformada totalmente por cemento.

Es oportuno contrastar los resultados de la Tabla 8, con la ficha técnica de un mortero comercial [16], en donde se muestra que a los 28 días de curado el mencionado mortero alcanza 1.5 MPa de resistencia de adherencia a tracción, dicho valor se encuentra por debajo de los resultados obtenidos, inclusive de la mezcla con mayor porcentaje de sustitución (35%), siendo su resistencia a la tracción de 1.93 MPa, existiendo una diferencia de 0.43 MPa, además de representar el 129% de la resistencia alcanzada por el mortero comercial.

Es crucial agregar que todos los valores de resistencia, en todas sus edades, se ubican sobre el valor de ≥ 0.5 MPa, que es el límite especificado por la norma ecuatoriana NTE INEN ISO 13007-1 [11]. Esto se puede verificar en la Tabla 7, donde la resistencia mínima alcanzada es de 0.86 MPa por la mezcla con 35% de polvo

residuo y la resistencia máxima alcanzada es de 2.48 MPa por la mezcla con 5% de polvo residuo, que a su vez representan el 172% y el 496% del valor límite por normativa, respectivamente.

Es predominante conocer que los silicatos en el caso del cemento Portland ordinario, son los minerales a los que principalmente se le asignan las propiedades materiales del concreto [19]. Con tal premisa es posible mencionar que, el suceso de disminución tanto de la resistencia a la compresión como la resistencia a la tracción al momento de adicionarse polvo de piedra, se atribuye a que efectivamente el polvo de piedra tiene componentes mineralógicos similares al cemento en proporción importante, sin embargo, eso no significa que todo el SiO₂ esté disponible para reaccionar y producir los silicatos necesarios para el mejor desarrollo de la resistencia.

3.2.3 Determinación del deslizamiento

La normativa ecuatoriana indica que este procedimiento de ensayo se lo realiza a tres baldosas para cada mezcla de mortero [12]. Los resultados se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados Determinación del Deslizamiento

% Polvo	Deslizamiento [mm]			
	X_i	X_f	$X_i - X_f$	X_{prom}
0%	26.7	26.9	0.2	0.17
	25.5	25.6	0.1	
	26.4	26.6	0.2	
5%	22.7	22.9	0.2	0.20
	22.3	22.4	0.1	
	23.4	23.7	0.3	
10%	24.9	25.1	0.2	0.20
	28.3	28.4	0.1	
	26.2	26.5	0.3	
15%	24.4	24.6	0.2	0.17
	24.1	24.2	0.1	
	23.9	24.1	0.2	

% Polvo	Deslizamiento [mm]			
	X_i	X_f	$X_i - X_f$	X_{prom}
25%	24.3	24.5	0.2	0.23
	23.3	23.4	0.1	
	24.7	25.1	0.4	
35%	24.5	24.8	0.3	0.27
	23.5	23.6	0.1	
	23.8	24.2	0.4	

Estos valores se trasladan a la Figura 13.



Figura 13. Deslizamiento Promedio

Con esto, se obtiene que los resultados cumplen el requerimiento establecido en la norma NTE INEN ISO 13007-1 [11] que es < 0.5 mm. Lo que indica que, el porcentaje de polvo residuo no afecta este parámetro en las muestras de mortero, ya que el deslizamiento es mínimo a pesar de ser variable.

La consistencia plástica determinada anteriormente es un factor importante para cumplir con el límite de deslizamiento permisible, dada a través de la cantidad de agua obtenida con la fluidez del mortero, cuyo valor de 0.52 sugiere ser sustancial y constante.

Por lo que la mezcla que contiene la mayor cantidad de inclusión de polvo de piedra continúa siendo eficiente para la colocación de baldosas, ya que disminuiría el uso del cemento y además al ser el polvo menos denso se tiene un mortero más liviano.

Los resultados obtenidos cumplen las especificaciones por norma y se ubican sobre los valores que ofrece la ficha técnica de un mortero comercial. Esto se debe a que por un lado el cemento utilizado ha sido de buena calidad y almacenado en óptimas condiciones, impermeabilizándolo con plástico, libre de humedad. Otro factor que favoreció a lo mencionado, es la dosificación utilizada, por que como se había mencionado en 2.2, el objetivo de la experimentación era sustituir la mayor cantidad de cemento por polvo de piedra, lo que conlleva a que por normativa los valores sugieren estar muy bajos, ya que en el caso de tracción se pide un valor mínimo de 0.5 MPa y en el caso de deslizamiento que no supere los 0.5 mm, es preponderante indicar que en ambos casos solo tienen un límite mínimo y máximo, respectivamente.

3.2.4 Determinación del tiempo de fraguado Vicat Modificado

Se llevaron a cabo 6 moldeos por cada porcentaje de inclusión de polvo de piedra. Se muestran los resultados en la Tabla 10.

Tabla 10: Resultados Tiempo de Fraguado

% Polvo	Tiempo de Fraguado [min]
0%	299
5%	281
10%	323
15%	326
25%	319
35%	327

Estos resultados se llevan a la Figura 14.

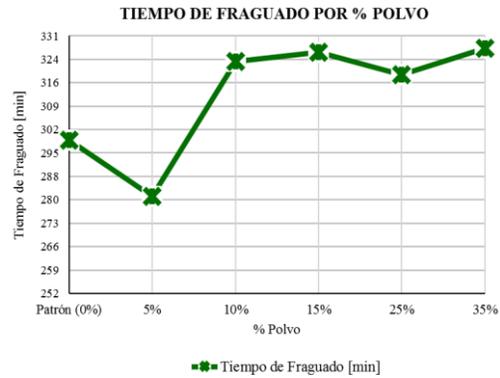


Figura 14. Tiempo de Fraguado

El tiempo de fraguado experimentalmente es amplio, teniendo un pico de 327 minutos y un valor mínimo de 281 minutos, que corresponden a las mezclas con 35% y 5% de polvo residual respectivamente. No obstante, entre una y otra mezcla no existe una diferencia considerable entre tiempos de fraguado, ya que son solo minutos, además no se puede establecer una relación de proporcionalidad, debido a que los resultados son variables y no mantienen una tendencia.

Estos resultados se contrastaron con los valores que ofrece la ficha técnica de un mortero comercial [16], donde se muestra un parámetro llamado *tiempo abierto*, que es el “intervalo máximo de tiempo después de la aplicación del adhesivo, durante el cual las baldosas pueden colocarse cumpliendo la especificación de adherencia [11].” El tiempo abierto de dicho mortero es ≥ 50 min y como es evidente, los resultados que se obtuvieron para el mortero con polvo residual se encuentran sobre este valor, lo que da un indicio de que el mortero puede funcionar con un amplio intervalo de tiempo.

Cabe mencionar que la tendencia en los resultados tanto de compresión como de tracción, es disminuir al aumentar la cantidad de polvo de piedra. Sin embargo, resultados específicos del mortero con 15% de

sustitución de cemento en comparación con el de 10%, presentan un comportamiento fuera de lo regular, ya que en el caso de resistencia a la compresión entre estos dos porcentajes se presenta un decremento congruente, no obstante esto no sucede en resistencia a la tracción, específicamente a los 28 días de curado. De la misma manera en el ensayo de deslizamiento existe un comportamiento fuera de la tendencia por parte del mortero con porcentaje de 15%. Sucede también, que con la sustitución de 10% se puede visualizar un leve decrecimiento de la fluidez, además de que otra leve disminución se ve en el caso del tiempo de fraguado con la sustitución de 25%. Retomando estos antecedentes se hace alusión a que estos comportamientos, observados en casos aislados de los morteros, posiblemente se deben directamente al proceso de mezclado de los componentes, al momento de su elaboración o ensayo, a pesar de que para las muestras, el procedimiento fue mecánico, debido a que era el mismo para todas, complementando a lo mencionado el polvo de piedra antes de introducirse en la mezcla de mortero, permanecía en el horno por un día y se utilizaba únicamente lo que pasaba el tamiz No. 200, descartando así que residuos impertinentes y que la humedad propia del polvo influyan en los resultados.

3.2.5 Análisis de la expansión del mortero

Como se conoce según la norma ecuatoriana INEN 200 [20] la determinación de la expansión a través del autoclave, se lo realiza a muestras elaboradas únicamente por cemento. No obstante, es una propiedad que se analizará en base a la siguiente tabla, extraída de la ficha técnica del cemento

utilizado a lo largo de toda la investigación [4].

Tabla 11: Requisitos Físicos Selvalegre

Parámetro	INEN 490	Selvalegre
Expansión	≤0.8%	0.04%

En este punto es importante mencionar que uno de los componentes que puede provocar una expansión destructiva es el óxido de magnesio, ya que al hidratarse lentamente, gran parte de la reacción se genera cuando el mortero ya está endurecido, por lo que este puede sufrir agrietamiento como repercusión [21].

Sin embargo, el cemento utilizado, aparte de cumplir con los requerimientos de la norma ecuatoriana, tiene un parámetro de expansión que se encuentra muy por debajo del máximo indicado, como se puede ver en la Tabla 11. Razón por la cual es posible mencionar que, pese a que las fases minerales del polvo de piedra residual contienen magnesio, según los resultados del análisis de difracción de rayos X mostrados en la Tabla 3, estos se encuentran en una concentración baja, por ende las sustituciones de cemento por polvo de piedra en las mezclas del mortero, sugieren no influir de manera exorbitante como para generar una expansión destructiva.

4. Conclusiones y Recomendaciones

El polvo de piedra residual, al contener en su composición química minerales como plagioclasas, cuarzo y hematita ayudan a que el mortero adhesivo no se vea afectado significativamente en sus propiedades mecánicas.

Es posible mencionar que el mortero elaborado con polvo de piedra residual si funciona como pegante cerámico, teniendo en cuenta que todos los factores importantes que a lo largo de este artículo se mencionaron, fueron constantes, como la dosificación, la fluidez y consistencia que van estrechamente ligados a la relación a/c. Sin embargo, la mezcla que resultó dar el mortero más eficiente es la que se elaboró con 35% de polvo residual, ya que a pesar de que sus características mecánicas disminuyen, comparadas con la mezcla patrón, estas se mantienen sobre los valores permisibles de las normativas y ficha técnica de un mortero comercial.

La resistencia a la compresión que posee el mortero elaborado con 35% de polvo de piedra, es de 12.62 MPa a los 28 días de curado. Por lo que es capaz de soportar los 5 lb/ft² (0.0002 MPa) [22], que es la carga que ejerce una baldosa de 60x60 cm, y si a esto le sumamos el peso promedio de una persona, da un valor de 0.0022 MPa, que el mortero seguiría resistiendo.

En cuanto a la resistencia a la tracción, el mortero elaborado con 35% de polvo de piedra en su mezcla, posee 1.93 MPa a los 28 días de curado. Por lo que es capaz de soportar los 0.062 kg/cm² (0.0061 MPa), que ejerce de tracción una baldosa de 30x30 cm, colocada en posición vertical.

No hay relación significativa entre el deslizamiento, tiempo de fraguado y el porcentaje de polvo residual, por la poca afectación que produce a estos parámetros.

El mortero al ser elaborado con polvo residual posee la ventaja de un costo reducido y además al aprovecharse material residuo de una manufactura principal, se ayuda a mitigar el impacto ambiental negativo que este puede causar. El costo del mismo, con respecto

al mortero elaborado completamente con cemento, disminuyó en un 24.51%, sin considerar los efectos que conlleva su industrialización, esto se puede corroborar en el Anexo 1.

A pesar de que la mezcla más eficiente haya sido la de 35% de polvo residual como sustituto del cemento, por seguridad se recomienda trabajar con un 25% de polvo residuo cuando el mortero vaya a ser utilizado como pegante cerámico.

El uso del mortero con 35% de polvo de piedra residual puede extenderse para la construcción de muros de cimentación, paredes de retención, muros portantes tanto en interiores como en exteriores, esto según la *guía para la selección de morteros para mampostería* detallada en la Tabla V.1 de la norma ecuatoriana INEN 2518 [17]. No obstante, una alternativa planteada por la misma norma, es usar un mortero Tipo N, el cual podría ser elaborado con un 15% de polvo residual, ya que cumple el requerimiento mínimo de resistencia a la compresión.

El mortero con 35% de polvo residual puede ser utilizado para reparaciones o acabados de un muro de mampostería, tanto en interiores como exteriores, esto según la *guía para la selección de morteros para reparación o acabado* detallada en la Tabla X.1 de la norma mencionada anteriormente, donde se recomienda un mortero Tipo O.

Se recomienda la realización del ensayo de expansión, ya que a pesar de que las fases minerales que contienen magnesio (Mg) están en concentración baja, al realizar esta medición se podría descartar la formación de periclasa (MgO).

Debido a la variabilidad de los resultados de resistencia a la tracción, se recomienda tener precaución en la

realización de las muestras y en el curado de las mismas para su ensayo.

La composición química del polvo residual da para que se continúen haciendo investigaciones experimentales sobre el uso del mismo en distintos materiales para la construcción, por lo que se recomienda analizarlo en la elaboración de bloques de hormigón o estudiarlo como adición para la producción de cemento.

Referencias

- [1] G. Plúa, “Análisis económico en proyectos de construcción sostenible,” Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2012.
- [2] “Nuevo espacio construido técnicamente para los residuos sólidos de Quito,” Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos, 2019. [Online]. Available: <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/noticiasep/476-nuevo-espacio-construido-tecnicamente-para-los-residuos-solidos-de-quito>. [Accessed: 15-May-2019].
- [3] M. Castillo, “Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el distrito metropolitano de Quito,” *Ecología*, vol. 3, no. 2, p. 27, 2012.
- [4] “Ficha Técnica Selvalegre,” UNACEM, 2018. [Online]. Available: <https://unacem.com.ec/wp-content/uploads/2018/09/selvalegre.pdf>. [Accessed: 17-Sep-2019]
- [5] *Arena Normalizada. Requisitos*, Norma NTE INEN 873, 2017.
- [6] D. Sanchez de Guzmán, “Morteros,” in *Tecnología del concreto y del mortero*, Quinta Edi., Santafé de Bogotá, D.C.: Multiletras Editores Ltda., 2001, pp. 303–317.
- [7] S. Aguaiza, “Análisis por Difracción de Rayos X de Fases Cristalinas Presentes en Muestras de Desechos Sólidos Producidos en la Extracción de Oro, sin y con Tratamientos Térmicos,” Escuela Politécnica Nacional, Quito, p. 125, 2013.
- [8] *Cemento Hidráulico. Determinación de la densidad*, Norma NTE INEN 0156:2009.
- [9] *Cemento Hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista*, Norma NTE INEN 488:2009.
- [10] *Standard Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars*, AASHTO T 132, 1987.
- [11] *Baldosas cerámicas – Morteros y adhesivos – Parte 1: Términos, definiciones y especificaciones para adhesivos (ISO 13007–1:2014, IDT)*, Norma NTE INEN-ISO 13007–1, 2015.
- [12] *Baldosas cerámicas – Morteros para juntas y adhesivos – Parte 2: Métodos de ensayo para adhesivos (ISO 13007–2:2013, IDT)*, Norma NTE INEN-ISO 13007–2, 2017.
- [13] *Cementos. Método para determinar el tiempo de fraguado de morteros de cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat Modificado*, Norma NTC 4088, 2009.
- [14] F. J. Jiménez-Álvarez, L. Téllez-Jurado, U. Profesional, and A. López, “Efecto de un aditivo plastificante comercial sobre la estructura cristalina de la

- plagioclasa utilizada en la fabricación de blocks ligeros de concreto,” *Superf. y vacío*, vol. 23, pp. 104–108, 2010.
- [15] W. Duda, “Materias primas,” in *Manual tecnológico del cemento*. Barcelona: Editorial Reverté, S. A., 2003, p. 5.
- [16] “Bondex ® Standard Cerámica. Mortero adhesivo para cerámica,” *INTACO*, 2018. [Online]. Available: https://www.intaco.com/sites/default/files/producto/guia-tecnica/ft_bondex_standard_ceramica_1.pdf. [Accessed: 19-Sep-2019]
- [17] *Morteros para unidades de mampostería. Requisitos*, Norma NTE INEN 2518: 2010.
- [18] L. Gutiérrez de López, “Concreto Hidráulico,” in *El concreto y otros materiales para la construcción*, Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2003, p. 33.
- [19] E. John, D. Stephan, T. U. Berlin, and G. Meyer, “Properties of Calcium Silicate Hydrates with varying Stoichiometry,” *Int. Conf. Sustain. Environ. Friendly Constr. Mater. ICSEFCM 2018*, no. May, pp. 7–14, 2018.
- [20] *Cemento hidráulico. Determinación de la expansión en Autoclave*, Norma NTE INEN 200:2009.
- [21] E. Monfore, “Propiedades de los cementos expansivos, hechos con cemento portland, yeso y cemento aluminoso,” © *Cons. Super. Investig. Científicas Licenc. Creat. Commons 3.0 España*, vol. 16, no. 6, pp. 19–29, 1966.
- [22] CustomBuildingProd, “El mortero VersaBond-LFT resiste el peso de las baldosas de formato grande,” 18-dic-2017 [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=6SH1oFJ-TqA>. [Accessed: 24-Oct-2019].

Anexos

Anexo 1. Reducción del costo del mortero adhesivo con polvo de piedra

2.1 Análisis de Precios Unitarios del mortero convencional

MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	SubTotal
Cemento Selvaegre	saco	10,362	7,68	\$ 79,58
Arena	m3	0,550	13,50	\$ 7,43
Agua	m3	0,269	0,85	\$ 0,23
Total Materiales				\$ 87,23
MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Tarifa/H	Rendim	SubTotal
Peón	5	3,58	1	\$ 17,90
Albañil	2	3,62	1	\$ 7,24
Total Mano de Obra				\$ 25,14
EQUIPO Y MAQUINARIA				
Descripción	Cantidad	Tarifa/H	Rendim	SubTotal
Herramienta menor 5% MDO				\$ 1,26
Total Equipo, Maquinaria y Herramientas				\$ 1,26
COSTO TOTAL DIRECTO				\$ 113,63

2.2 Análisis de Precios Unitarios del mortero con polvo de piedra

MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	SubTotal
Cemento Selvaegre	saco	6,735	7,68	\$ 51,72
Polvo de Piedra	m3	0,068	0,00	\$ 0,00
Arena	m3	0,550	13,50	\$ 7,43
Agua	m3	0,269	0,85	\$ 0,23
Total Materiales				\$ 59,38
MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Tarifa/H	Rendim	SubTotal
Peón	5	3,58	1	\$ 17,90
Albañil	2	3,62	1	\$ 7,24
Total Mano de Obra				\$ 25,14
EQUIPO Y MAQUINARIA				
Descripción	Cantidad	Tarifa/H	Rendim	SubTotal
Herramienta menor 5% MDO				\$ 1,26
Total Equipo, Maquinaria y Herramientas				\$ 1,26
COSTO TOTAL DIRECTO				\$ 85,78
% REDUCCIÓN DEL COSTO				24,51 %