



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE ARQUITECTURA**

**PROPUESTA DE UN MORTERO CON MATERIAL RECICLABLE  
DE DESECHOS DEL MÁRMOL GRIS EN LA CIUDAD DE CUENCA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE ARQUITECTO**

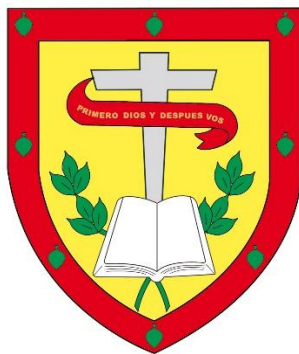
**AUTOR: CARLOS IVÁN PANGOL VELETANGA**

**DIRECTOR: PEDRO JAVIER ANGUMBA AGUILAR**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE ARQUITECTURA**

**PROPUESTA DE UN MORTERO CON MATERIAL RECICLABLE  
DE DESECHOS DEL MÁRMOL GRIS EN LA CIUDAD DE CUENCA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE ARQUITECTO**

**AUTOR: CARLOS IVÁN PANGOL VELETANGA**

**DIRECTOR: ARQ. PEDRO JAVIER ANGUMBA AGUILAR**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Carlos Iván Pangol Veletanga portador de la cédula de ciudadanía N° 015035968. Declaro ser el autor de la obra: "Propuesta de un mortero con material reciclable de desechos del mármol gris en la ciudad de Cuenca", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 15 de septiembre de 2025

F:  .....

Carlos Iván Pangol Veletanga

0105035968

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo de titulación "PROPUESTA DE UN MORTERO CON MATERIAL RECICLABLE DE DESECHOS DEL MÁRMOL GRIS EN LA CIUDAD DE CUENCA" fue desarrollado por, CARLOS IVÁN PANGOL VELETANGA, estudiante de la carrera de Arquitectura de la Universidad Católica de Cuenca, bajo supervisión del suscrito; trabajo que reúne los requisitos necesarios para su presentación y sustentación ante el tribunal que se disponga.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal dotted line.

ARQ. PEDRO JAVIER ANGUMBA

**C.I. 0102407079**

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres, Gabriel Pangol y María Veletanga, dedico este logro con todo mi corazón.

A mi padre, mi primer y más grande maestro, le dedico mi gratitud más profunda. Él no solo me enseñó con el ejemplo, sino que también confió en mí plenamente y se sacrificó para que tuviera las oportunidades de crecer y convertirme en la mejor versión de mí mismo.

A mi madre, mi más grande amor, le agradezco por su amor incondicional y eterno. Su presencia ha sido un bálsamo en mi vida, una guía constante que me ha acompañado en cada paso del camino, dándome la fuerza y el consuelo que solo su amor puede ofrecer.

Ustedes son mi pilar y mi mayor fortaleza. Cada uno de sus consejos, su apoyo y su amor inquebrantable han sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mis metas. Todo lo que soy hoy se lo debo a su fe en mí.

Con este trabajo, les ofrezco el fruto de su paciencia y dedicación, esperando siempre ser motivo de orgullo. Los amo con todo mi corazón.

## **AGRADECIMIENTO**

- Gracias a Dios por guiarme en este camino y por estar siempre a mi lado.
- A mis hermanos, Ana, Fanny, Paula, Eduardo y Paúl, les dedico este logro con el corazón. Su incondicional apoyo ha sido un pilar fundamental en cada paso de este camino. Gracias por estar siempre a mi lado, por ser mi mayor fortaleza y por darme el aliento necesario para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Su presencia y amor han sido la fuerza que me ha impulsado hasta aquí.
- A mi alma máter, la Universidad Católica de Cuenca, mi profundo agradecimiento por ser el crisol donde mis sueños se forjaron y se hicieron realidad. Más allá de las aulas, me brindó las herramientas, el conocimiento y la disciplina necesarios para crecer profesionalmente.
- De manera especial, extendo mi más sincero agradecimiento a mi tutor de tesis Arq. Pedro Xavier Angumba Aguilar. Su guía, paciencia y valiosos consejos fueron esenciales para llevar a cabo este trabajo.
- A toda mi familia, en particular a mi abuelita María Luisa a Fabián y Adriana, por su apoyo incondicional. Finalmente, a mis queridos sobrinos, David, Daniel, Joaquín, Israel y Darío, quienes, con su energía y alegría, me recordaron cada día la importancia de no rendirme. Su amor ha sido mi mayor inspiración.

## RESUMEN

La presente investigación aborda la imperiosa necesidad de soluciones constructivas que armonicen la eficiencia arquitectónica con la sostenibilidad ambiental. En este contexto, se postula una propuesta de gran relevancia: el desarrollo y caracterización de un mortero de adherencia que incorpora material reciclable proveniente de los desechos del mármol gris. Este enfoque responde a un doble beneficio: la reducción del impacto ambiental generado por la acumulación de residuos industriales y la optimización de los recursos en el sector de la construcción. El núcleo de la investigación reside en la reutilización integral de los restos pulverizados de mármol gris, transformándolos de un pasivo ambiental en una valiosa materia prima para la fabricación de un mortero destinado al pegado de revestimientos cerámicos. Esta estrategia se rige como una alternativa no solo ecológicamente responsable, sino potencialmente superior en términos de costo-efectividad. Para validar esta hipótesis, se implementa una metodología rigurosa. Inicialmente, se lleva a cabo una exhaustiva investigación bibliográfica para determinar las propiedades físico-químicas, las normativas técnicas vigentes y las características óptimas que este tipo de mortero debe cumplir para garantizar su funcionalidad y durabilidad. Posteriormente, la fase experimental es crucial. Se diseña y ejecuta pruebas de laboratorio especializadas, enfocadas en determinar con precisión la adherencia, la resistencia a la compresión del material resultante. Estos ensayos permitieron evaluar su desempeño estructural frente a los morteros convencionales. El objetivo fundamental de este trabajo demuestra la viabilidad técnica y económica de integrar los residuos de mármol gris en la cadena de valor de la construcción, ofreciendo un mortero innovador cuyo uso responsable y factibilidad constructiva lo que aporta significativamente a la mitigación del problema de los desechos.

*Palabras clave:* cerámica, construcción, mármol, mortero, adherencia.

## **ABSTRACT:**

This research addresses constructive solutions that harmonize architectural efficiency with environmental sustainability through the development and characterization of an adhesive mortar that incorporates recyclable material derived from gray marble waste. This approach has a dual benefit: reducing the environmental impact generated by the accumulation of industrial waste and optimizing resources in the construction sector. The core of the research lies in the comprehensive reuse of pulverized gray marble waste, transforming it from an environmental liability into a valuable raw material for the manufacture of mortar intended for bonding ceramic coatings. A rigorous methodology was implemented to validate this hypothesis. Initially, an exhaustive literature review was conducted to determine the physical-chemical properties, current technical standards, and optimal characteristics that this type of mortar must meet to guarantee its functionality and durability. Subsequently, the experimental phase will be crucial. Specialized laboratory tests were designed and executed, focused on accurately determining the adhesion and compressive strength of the resulting material. These tests made it possible to evaluate its structural performance compared to conventional mortars. The main objective of this study is to demonstrate the technical and economic viability of integrating gray marble waste into the construction value chain, offering an innovative mortar whose responsible use and construction feasibility contribute significantly to mitigating the waste problem.

*Keywords:* ceramics, construction, marble, mortar, adhesion

## INDICE DE CONTENIDO

<b>DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>3</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>5</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>6</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>ABSTRACT:</b> .....	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemática .....	1
1.2 Definición de la zona de estudio.....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivos generales .....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
2.1 Introducción.....	3
2.2 Estudios previos.....	11
2.3 Estado del arte .....	15
2.3.1 Evolución tecnológica en la fabricación del mortero.....	15
2.3.2 Mármol. ....	28
2.3.3 Mortero.....	31
2.3.4 Propiedades del mortero. ....	33
2.3.5 Tipos de morteros.....	35
2.3.6 Mortero para unir unidades de mampostería (mortero de pega).....	36
2.3.7 Clasificación del mortero según sus propiedades.....	37
2.3.8 Dosificación porcentual del mortero. ....	40
2.3.9 Características del mortero para el pegado de cerámica. ....	41
2.3.10 Compresión de los morteros.....	43
2.3.11 Flexibilidad de los morteros.....	45
2.3.12 Polvo de mármol como sustituto parcial de cemento. ....	46
2.3.13 El polvo de mármol y su aplicación en morteros.....	47
2.4 Normativas del mortero para el pegado de cerámica. ....	48

2.5 Normativa ASTM C109/C109M-20 .....	48
2.5.1 Normativa ASTM C1329-05 .....	49
<b>CAPÍTULO III ELABORACIÓN DEL MORTERO .....</b>	<b>50</b>
3.1 Introducción.....	50
3.2 Descripción del proceso para la elaboración del mortero con material reciclado.....	50
3.2.1 Preparación de la materia prima (agregados) .....	52
3.2.1.1 Residuo del mármol gris .....	52
3.2.1.2 Árido fino.....	55
3.3 Cálculo granulométrico del árido fino (módulo de finura) .....	56
3.3.1 Cemento .....	57
3.4 Diseño de morteros.....	57
3.4.1 Confección del mortero: cemento, árido fino, residuo del mármol y agua. .....	57
3.4.2 Cálculos del mortero patrón .....	58
3.4.3 Dosificación: peso para 12 morteros .....	59
3.4.4 Ruptura de probetas.....	64
3.5 Valores del patrón con un tiempo de curado de 7 días.....	65
3.5.1 Muestra 50% caolín, 50% material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 7 días.....	67
3.5.2 Valores del patrón con un tiempo de curado de 7 días, mezcla del 50%- 50% del material .        reciclado del mármol gris. ....	67
3.5.3 Muestra del 100% del material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 7 día .....	68
3.5.4 Valores del patrón con un tiempo de curado de 28 días.....	70
3.5.5 Muestra 50% caolín 50% material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 28 días. ....	71
3.5.6 Muestra del 100% del material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 28 días .....	72
3.6 Prueba de adherencia.....	73
3.6.1 Prueba de adherencia (muestra 1).....	75
3.6.2 Prueba de adherencia (muestra 2).....	78
3.6.3 Comparación de resultados de la experimentación del mortero con material reciclado del mármol gris.....	80

<b>4. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>83</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>85</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa del Ecuador.....	2
<b>Figura 2.</b> Zona de estudio.....	2
<b>Figura 3:</b> Estructura Yiftahel con suelo enlucido.....	17
<b>Figura 4:</b> La pirámide de Keops se alza en la llanura de Giza, cerca de El Cairo.....	18
<b>Figura 5:</b> La Esfinge de Giza.....	19
<b>Figura 6:</b> El Palacio de Knossos.....	20
<b>Figura 7:</b> Hefestión de Atenas.....	22
<b>Figura 8:</b> Capas superpuestas de escombros mortero como núcleo estructural (Opus caementicium).....	22
<b>Figura 9:</b> Invención del Cemento Portland, un hito gris de la humanidad moderna.....	27
<b>Figura 10:</b> Mármol gris.....	29
<b>Figura 11:</b> Mortero para experimento en laboratorio.....	31
<b>Figura 12.</b> Prensa japonesa SHIMADZU CONCRETO 2000X.....	43
<b>Figura 13.</b> Prensa de compresión de baja capacidad.....	46
<b>Figura 14:</b> Resistencia a la compresión de las pastas de cemento Portland endurecidas que incorporan 3%(M3), 4% (M4) y 5%(M5) de residuos de polvo de mármol versus tiempo de curado.....	47
<b>Figura 15:</b> Estanques del desecho del mármol gris.....	50
<b>Figura 16:</b> Fabrica cortadora del mármol gris Baguanchi.....	53
<b>Figura 17:</b> Residuo del mármol gris antes de su procesamiento.....	53
<b>Figura 18:</b> Residuo del mármol.....	53
<b>Figura 19:</b> Residuo en proceso de trituración.....	53
<b>Figura 20:</b> Tamizadora #200.....	54
<b>Figura 21:</b> Residuo tamizado.....	54
<b>Figura 22:</b> Secado de la arena.....	55
<b>Figura 23:</b> Molde cónico, para saber el estado del árido.....	55
<b>Figura 24:</b> Peso del cemento.....	59
<b>Figura 25:</b> Peso del agua en una probeta.....	59
<b>Figura 26:</b> Peso de la arena.....	59
<b>Figura 27:</b> Peso del caolín.....	60
<b>Figura 28:</b> Mezcla de los áridos.....	60
<b>Figura 29:</b> Mezcla de los áridos más agua.....	61
<b>Figura 30:</b> Mortero, pasta.....	61
<b>Figura 31:</b> Moldes 5x5x5 cm.....	61
<b>Figura 32:</b> Vertido del mortero en moldes.....	61

<b>Figura 33:</b> Golpes para una mejor compactación.....	61
<b>Figura 34:</b> Moldes pulidos para su secado.....	63
<b>Figura 35:</b> Desmolde de cubos.....	62
<b>Figura 36:</b> Vertido de agua.....	63
<b>Figura 38:</b> Medición de cubos 5x5.....	63
<b>Figura 39:</b> Cubos pesados.....	64
<b>Figura 40:</b> Ruptura de cubos.....	64
<b>Figura 41:</b> Cubos rotos.....	65
<b>Figura 42:</b> Pegado de ladrillos.....	74
<b>Figura 43:</b> Montaje de ladrillos.....	74
<b>Figura 44:</b> Ladrillos pegados.....	74
<b>Figura 45:</b> Calibración de prensa.....	73
<b>Figura 46:</b> Prueba 1 a compresión.....	75
<b>Figura 47:</b> Ruptura de junta.....	76
<b>Figura 48:</b> Controlando las pruebas.....	74
<b>Figura 49:</b> Ruptura de junta.....	78
<b>Figura 50:</b> Juntas desprendidas.....	78

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Tipos de mortero, dosificación y resistencia mínima a compresión a los 28 días	35
<b>Tabla 2:</b> Clasificación de morteros según sus propiedades, usados para pruebas de laboratorio.....	37
<b>Tabla 3:</b> Clasificación de los morteros de pega para mampostería simple según resistencia a la compresión.....	44
<b>Tabla 4.</b> Proporciones de mortero .....	48
<b>Tabla 5.</b> Granulometría del árido fino .....	56
<b>Tabla 6.</b> Gráfico de la curva granulométrica de la arena.....	56
<b>Tabla 7.</b> Resultados del cálculo de la muestra patrón.....	59
<b>Tabla 8.</b> Muestra patrón .....	66
<b>Tabla 9.</b> Muestra 50% carbonato, 50% residuo del mármol gris .....	68
<b>Tabla 10.</b> Muestra de 100% residuo del mármol gris 7 días de curado.....	69
<b>Tabla 11.</b> Muestra patrón de los 28 días de curado.....	70
<b>Tabla 12.</b> Muestra 50% caolín, 50% residuo del mármol gris 28 días de curado .....	72
<b>Tabla 13.</b> Muestra de 100% residuo del mármol gris 28 días de curado.....	73
<b>Tabla 14.</b> Muestra de adherencia prueba 1 a los 28 días de curado.....	77
<b>Tabla 15.</b> Muestra de adherencia prueba 2 a los 28 días de curado.....	80
<b>Tabla 16.</b> Cantidades de los áridos. ....	81
<b>Tabla 17.</b> Precios comparativos del carbonato y residuo del mármol. ....	81
<b>Tabla 18.</b> Costos de los áridos. ....	81
<b>Tabla 19.</b> Costos de los áridos. ....	82

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

### **1.1 Problemática**

Los autores Aldana y Serpell (2012) mencionan que la construcción es una actividad que afecta al medio ambiente, pues gran parte de los materiales usados para la construcción de obras se han convertido en un depósito de escombros y rellenos sanitarios, del mismo modo los residuos generados en el mundo corresponden del 15% al 25% a la industria de la construcción.

De acuerdo con lo que indica el estudio de Betancourt et al. (2019) ante el incremento de las obras en el sector de la construcción, las cuales buscan mejorar la infraestructura de los países, ha traído consigo una alta demanda de materiales principalmente el concreto y sus agregados, ante lo cual existe el interés tanto a nivel académico como empresarial de disminuir el impacto ambiental que traen consigo este tipo de residuos, con la inclusión de materiales amigables con el medio ambiente.

El problema surge por el corte industrial del mármol gris en la ciudad de Cuenca, en el sector de Baguanchi, este corte genera desechos líquidos blanquecinos, los cuales son almacenados en pozos a la intemperie que, al llenarse, este líquido se riega hacia quebradas y áreas verdes, lo cual produce impactos ambientales contaminantes. De igual manera, estos residuos por estar a la intemperie con los rayos del sol, producen el efecto de evaporación de este líquido, quedando un polvo blanco que debido a los factores climáticos como el viento eleva este polvo generando contaminación en áreas verdes.

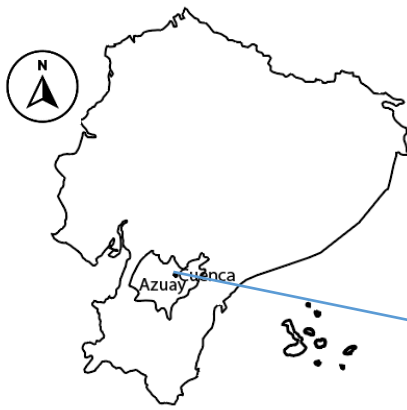
Con la reutilización de este residuo, se busca ayudar a reducir la contaminación en el medio ambiente en el sector de Baguanchi, y de esta manera aprovechar el residuo generado para la fabricación de un mortero para el pegado de cerámica, esta pasta blanca se obtendrá del residuo del mármol gris, a la vez que permite implementar el nuevo aglomerante que será un aporte para el sector constructivo.

## 1.2 Definición de la zona de estudio

El trabajo a realizarse durante la presente investigación está dirigida a la reutilización de un residuo del mármol gris, la zona de estudio se encuentra dentro de la República del Ecuador, en la provincia del Azuay, dentro de una zona rural de la ciudad de Cuenca en el sector de Baguanchi en la vía Monay Baguanchi Paccha, con las coordenadas -2.915303,-78.950485. A continuación, en la Figura 1 y la Figura 2, se presenta la ubicación a nivel macro y micro de la fábrica de corte del mármol.

### Macro ubicación

*Figura 1. Mapa del Ecuador*



Ecuador-Cuenca

### Micro ubicación

*Figura 2. Zona de estudio*



Cuenca-Baguanchi

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivos generales

Determinar la factibilidad constructiva y económica de la propuesta de un mortero para el pegado de cerámica con el uso de un mármol gris reciclado para reducir el impacto ambiental de este elemento constructivo.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Identificar las características y normativas que debe cumplir un mortero para el pegado de cerámica en espacios interiores a través de recopilación bibliográfica.
- Analizar la dosificación adecuada del mortero de mármol gris a través de pruebas experimentales de adherencia y compresión.
- Determinar cualitativa y cuantitativamente el impacto económico de la propuesta que muestre los mejores resultados en la experimentación.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Introducción**

La economía circular “EC” como alternativa al modelo tradicional cuya base es la “economía lineal”, se trata del ciclo de vida de los productos, procesos de producción y su entorno físico-social de manera integral. Esta manera de ver los procesos productivos trata de dejar de pensar en el exponencialmente desperdiciado e ir al enfoque donde “desechos” se convierten en recursos. La EC propone un sistema económico centrado en la recuperación de materiales, en la reducción, reutilización, reciclaje y otras formas en las etapas de producción, distribución y consumo. Esta estrategia se aplica a diferentes niveles de micro producto, entidad, usuario; meso infraestructuras tales como Eco-Industrial Parks y macro formas urbanas, territoriales o nacionales de orden. Su propósito esencial es proteger el ambiente, promover la equidad y evolucionar la economía; en otras palabras, desarrollar de forma óptima con beneficios a la sociedad ahora y en el futuro (Arce, 2022).

Existen múltiples estudios que demuestran los beneficios ambientales que la implementación de la EC puede brindar. Un ejemplo notable es el proyecto de simbiosis industrial implementado en Kalundborg, Dinamarca, donde se logró reducir cerca de 635.000 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> y 87.000 toneladas de insumos como etanol,

cenizas, yeso, azufre y arena (Danielsson, 2018). De la misma manera, Glogic (2021) documentó en la industria de fabricación de baterías la implementación de tres estrategias destinadas a aumentar la circularidad del sistema: extensión de la vida útil del producto, material reciclable y aumento del contenido de materiales re ciclados en su elaboración. El estudio técnico de cada una de estas opciones mostró un efecto benéfico a nivel de sostenibilidad ambiental.

El crecimiento urbano de grandes asentamientos, así como el crecimiento en núcleos poblacionales más pequeños ha estado internamente ligado a la emergencia de problemáticas socio ambientales cuya profundidad se ve aumentada por el crecimiento demográfico. Como respuesta a la problemática, tanto los actores estatales como los colectivos sociales han estado, en sus esfuerzos, a edificar un modelo de desarrollo enfocado en criterios de sostenibilidad, lo que ha permitido que se formulen políticas ecológicas que se integren con principios de responsabilidad social (Raza & Acosta, 2022).

De tal manera que, la gestión de residuos sólidos constituye uno de los desafíos más persistentes. Este fenómeno ha sido, históricamente, asociado a la expansión demográfica y a la industrialización descontrolada. Estas prácticas han contribuido a la disminución de recursos que son vitales para la subsistencia humana. A nivel internacional, se han creado propuestas legislativas que controlan el umbral de calidad ambiental y que son administradas por los Estados con el objetivo de reducir la carga que estas prácticas suponen para los ecosistemas (Kanhai et al., 2021).

Desde otra perspectiva, los conceptos de desecho y residuo sólido pueden considerarse sinónimos, aunque con diferencias en su valor dentro de los procesos de gestión ambiental. Definido estrictamente, el desecho incluye materiales que no tienen valor, como restos completamente orgánicos, radiactivos o eco tóxicos, y no pueden ser reutilizados en ciclos productivos. Por otro lado, hay materiales conocidos como desechos reutilizables o inertes

que pueden volverse reutilizables si se cumplen ciertos criterios delineados y se aplica una clasificación adecuada (E. M. Gutiérrez et al., 2024). El reciclaje requiere una transformación significativa y un reintegro al sistema productivo, lo que lleva a una forma sofisticada de minimización de desechos. Estas prácticas no solo ayudan a mantener el equilibrio ambiental, sino a convertir en fuente de empleo importante, debido a las colosales cantidades de desechos sólidos generados por la sociedad moderna. A pesar de estos optimismos, la ausencia de políticas y planes de acción bien integrados para acciones ambientalmente responsables y comprensivas ha llevado a prácticas ineficientes que crean impactos deterioros antes en la infraestructura y la calidad de vida directamente para la población (Mejía et al., 2024).

Las actividades industriales originan una gran variedad de residuos, predominantemente de carácter inorgánico, cuya acumulación repercute negativamente en los sistemas naturales, generando alteraciones ambientales, degradación de ecosistemas y contribución al fenómeno del calentamiento global (Khan et al., 2021). La minería y la extracción de recursos naturales, como el mármol, han devengado importantes preocupaciones a nivel mundial en relación al crecimiento económico, especialmente de los países desarrollados a costa de la infraestructura y los gastos intrínsecos a estos sistemas. Recientemente, el mármol ha aumentado su demanda en la construcción. Esta demanda ha ampliado las capacidades de plantas industriales, las cuales ya no pueden almacenar los residuos que generan. El uso de estos residuos, que no pueden permanecer almacenados por largos periodos de tiempo, en otras actividades productivas permite, en cierta medida, atenuar el valor que está siendo depreciado y al mismo tiempo disminuir la contaminación ambiental (Tugrul, 2019).

Desde periodos griegos y romanos, los mármoles blancos han tenido gran aprecio por sus propiedades estéticas y físicas. En la actualidad, su uso se centra, en su mayoría, en

ornamentos arquitectónicos, aunque también se ha incorporado en la construcción estructural, en el concreto, en productos cerámicos, cemento y fundentes (Sufian et al., 2021). De la misma manera, se ha utilizado en industrias especializadas como la óptica, en descontaminación ambiental y en otras tecnologías de alto nivel auxiliar, tales como en sistemas de acristalamiento estructural por fusión con vidrio (Kulali, 2020).

Además, el mármol es una de las piedras naturales más utilizadas a nivel mundial, con un impacto del 50% en la explotación de piedra natural. Esta actividad artesanal genera en torno a 3 millones de toneladas de residuos anualmente. Las etapas de extracción y procesamiento de mármol permiten manufacturar alrededor del 20% a 30% de su valor; en ocasiones, sobrepasa un 60% dependiendo la geometría del bloque, el método de corte, y el tratamiento superficial que se le aplique. El incremento volumétrico de estos desechos impacta de manera significativa en el medioambiente durante las etapas de explotación y operación de aserrado en el blanqueo. De los mármoles con algunos agregados de desechos es de una manera que se puede emplear como insumo concreto, lo que resulta ventajoso para la producción de residuos y al mismo tiempo hace posible avanzar hacia una construcción sustentable (Yifru & Mitikie, 2020).

En 2017, la producción total de mármol a nivel mundial alcanzó 2,352,614 toneladas, lo que resultó en una generación aproximada de desechos de aproximadamente 941,045 toneladas considerando una pérdida del 40% durante las etapas de procesamiento (Servicio Geológico Mexicano, 2023). Por otro lado, los tres principales países productores de mármol son China, India y México. Este material incluye varias litologías como granito, caliza y mármol que se cortan de acuerdo con los requisitos constructivos y ornamentales (Moreno et al., 2022).

Los depósitos más grandes conocidos de este material se encuentran en Europa, especialmente en Italia, España, Portugal, Turquía y Grecia. Además, se puede destacar a

India, Turquía, China, Italia y España en relación con las regiones prolíficas por volumen en el mercado del mármol. Estados Unidos, Canadá, México y Brasil están profundamente involucrados en la industria y se puede clasificarlos como países emergentes en las Américas. Por otro lado, los materiales de desecho del procesamiento del mármol en forma de polvo y fragmentos de piedra son un problema ambiental y económico para la industria del mármol, debido a la alta ocupación espacial del área operativa y las pérdidas financieras incurridas. Sin embargo, estos materiales pueden ser recuperados como materias primas para la producción de elementos de construcción como ladrillos, morteros, bloques de concreto y concretos especiales (Betancourt, 2019)

El mármol de Macael o también conocido como “oro blanco”, que se extrae de la Sierra de los Filabres en Almería, España, se destaca como uno de los tipos de mármol más prestigiosos. Además, denominado como mármol “lunense” o mármol de Carrara, se extrae de los Alpes Apuane en Italia. El mármol pantélico, ahora considerado un patrimonio cultural, proviene de la cordillera del Pentélico en Grecia, cuyas canteras han sido explotadas desde la antigüedad, y se le denomina sencillamente mármol de Himeto. Utilizado también en épocas clásicas, provenía de la montaña de Himeto en el mismo país y es conocido por un olor particular que lo distingue debido a su alta concentración de compuestos orgánicos (Pie et al., 2023).

Rajasthan, un estado de India, tiene algunas de las reservas no explotadas más grandes de mármol. El Servicio Geológico de la India afirma que hay 1.2 mil millones de toneladas métricas de reservas recuperables, más del 90% de las cuales son 1.1 mil millones de toneladas métricas concentradas en esa área. En 1999 y 2000, se produjeron más de 4.27 millones de toneladas métricas en Rajasthan, mostrando su importancia estratégica como un centro de extracción dentro del mercado internacional (Singh et al., 2025).

Turquía tiene una producción anual de mármol de casi 7 millones de toneladas, que es aproximadamente el 40% de las reservas globales del recurso. Durante los procesos de corte, modelado y acabado de superficies, aproximadamente del 20 al 25% del material procesado se convierte en residuos sólidos, ya sea en forma de trozos o polvo mineral. El vertido incontrolado de tales residuos se ha consolidado como una preocupación medioambiental global. Sin embargo, su aplicación como insumo en la industria del concreto ha demostrado ser técnicamente viable y económicamente sostenible. Los residuos de mármol pueden añadirse como un sustituto parcial del cemento Portland o mezclarse directamente en el diseño de la mezcla de concreto para optimizar las propiedades físico-mecánicas del concreto (Aydin & Şahan, 2019).

Por otra parte, de acuerdo con los datos del Servicio Geológico de Estados Unidos USGS, México se posiciona como uno de los principales productores a escala internacional de minerales no metálicos. Según la Dirección General de Minas DGM, entre 2017 y 2018 se registró un incremento de 4.663 millones de pesos en la producción nacional de este tipo de materiales, lo cual representa un aumento del 23,9% (Servicio Geológico Mexicano, 2023). El mármol mexicano tiene como principal destino de exportación a los Estados Unidos, concentrando el 99% de los envíos. En cuanto a las importaciones, se abastecen principalmente de mercados europeos, con Italia, España y Grecia como los mayores proveedores, aportando conjuntamente más del 70% del total (Secretaría de Economía de México, 2022).

En el ámbito cubano, la explotación de rocas ornamentales se inicia desde la mitad del siglo XX cuando se empezaron a realizar incursiones de tipo artesanal en lugares tales como Sigua y la Sierra de la Gran Piedra, en la porción oriental de la isla. Actualmente, la industria extractiva de rocas ornamentales está al cuidado de la Empresa de Mármoles Cubanos, la que tiene catorce concesiones activas repartidas en tres zonas geográficas: el occidente

Artemisa y Pinar del Río, el centro Sancti Spíritus, Villa Clara y Cienfuegos y el oriente Granma (Pie et al., 2023).

Además, en Ecuador se han localizado 112 manifestaciones geológicas de rocas carbonatadas, tales como calizas mármoles y travertinos. El aprovechamiento del mármol es casi artesanal y, en gran medida, decorativo. En el año de 2004, la producción nacional alcanzaba aproximadamente las 1,431.49 toneladas, provenientes de los yacimientos de Azuay minas de Santa Rosa, Chimborazo minas de Nueva Carolina y Loja minas de Machay (Cornejo, 2016).

En el año 2019, las importaciones de mármol y travertino de Ecuador para la clasificación aduanera estudiada alcanzaron la suma de 3.4 millones de dólares estadounidenses, lo que representó una contracción del 13.1% en comparación con el período anterior. Perú se convirtió en el principal país exportador al mercado ecuatoriano con una participación del 45% del total de las importaciones. Dentro del contexto de América Latina y el Caribe, ese país también sigue siendo el principal proveedor de estas piedras ornamentales (Departamento de inteligencia de mercado, 2021).

En Cuenca, hay importantes características litológicas como crestas de andesita que bordean valles glaciares en el Parque Nacional Cajas. Además, se identifican conglomerados en Chaucha, con formaciones de travertino en la parroquia de Baños, así como mármol calcáreo distribuido de manera irregular en algunos lugares. Entre estos, la región del Río Amarillo se destaca como una referencia geológica (GAD Municipal Cuenca, 2014).

En la parroquia de Sinincay de la ciudad de Cuenca, específicamente en la región identificada como Minas, solían existir depósitos de mármol en colores rosa, gris y verde. Esta abundancia de materia prima incentivó a la gente local a dedicarse al trabajo de la talla

en piedra, lo que llevó a que se les conociera como picapedreros. Las prácticas artesanales asociadas con el mármol fomentaron aún más el desarrollo de alguna forma de arte popular en la parroquia, lo que promovió el surgimiento de famosos marmolistas y escultores en la zona. Estos artesanos han producido una amplia variedad de piezas ornamentales y utilitarias que se distribuyen por diferentes lugares del país. La proximidad a las canteras permitió a la comunidad emprender este trabajo a muy bajos costos operativos, facilitando fácilmente la producción de artículos como cruces de mármol utilizadas en las celebraciones tradicionales huasipichanas, figuras religiosas, lápidas, maceteros, morteros, esculturas zoomórficas, comederos para animales y frisos de yeso arquitectónico de muros (Mendieta, 2020).

Por otro lado, la industria del mármol genera una cantidad considerable de residuos durante las fases de extracción y procesamiento. La eliminación de dichos residuos en espacios abiertos incurre en múltiples secuelas negativas acerca del medio ambiente y la salud pública. Entre los impactos más importantes están la reducción de la porosidad y permeabilidad de la capa superior del suelo, así como la pérdida de fertilidad del suelo, esto se debe a la alta concentración de partículas de mármol finas con un pH elevado. Adicionalmente, existen fenómenos de contaminación atmosférica, corrosión de maquinaria adyacente, agotamiento de recursos naturales, inclusión de agua, erosión de la capa fértil del suelo y alteración de cuerpos de agua como ríos y arroyos. Esto se ve agravado por las vibraciones y el ruido asociados con las voladuras y perforaciones características de las operaciones mineras de canteras (Yifru & Mitikie, 2020).

Desde una perspectiva cuantitativa, la industria del mármol puede generar hasta 450 toneladas de residuos en forma de polvo cada día debido a los procesos de corte y pulido. Esta materia particulada se suspende fácilmente en corrientes de aire, aumentando el

riesgo de exposición de la población general a enfermedades respiratorias, como la neumoconiosis (Ponce et al., 2021).

La diseminación de residuos de la industria del mármol representa no solo una contaminación del aire y suelo, sino también un gran riesgo en el área de la salud. La neumoconiosis, una enfermedad respiratoria crónica, se encuentra entre las más dañinas y se caracteriza por la muerte de los pulmones debido a la inhalación de finas partículas de polvo, y es considerada la enfermedad más común entre los obreros de esta industria. Para abordar esta situación, múltiples estudios han propuesto políticas eficaces como la reducción de desperdicios en la explotación de rocas ornamentales. Estos restos pueden ser utilizados en la producción de edificaciones tales como tejas, bloques y ladrillos, lo que incrementa su consideración en la construcción civil (Massuela et al., 2022). Algunos estudios específicos han evaluado la incorporación de residuos de mármol en mezclas de concreto autocompactante al reemplazar parcialmente el cemento con polvo de mármol como relleno. Los hallazgos han mostrado que las propiedades mecánicas de estas mezclas se desempeñaron de manera comparable a los controles de concreto de referencia. (Betancourt, 2019)

## **2.2 Estudios previos**

A nivel internacional, diferentes estudios analizaron la utilización de materiales reciclables en la construcción de morteros, enfatizando los beneficios como la protección del medio ambiente y la reutilización de los residuos formados por la construcción, en especial los sobrantes de mármol. Las investigaciones alcanzaron avances considerables en aspectos como la resistencia mecánica, durabilidad y sostenibilidad del producto elaborado. No obstante, a nivel nacional, no se han encontrado estudios que sistematizan la elaboración de mortero con material reciclable de desechos del mármol gris. La falta de información

plantea la problemática que pretende resolver la presente investigación al establecer un aporte técnico y ecológico para la industria constructiva ecuatoriana.

(Córdova & Rodríguez 2025) publicaron un estudio en Trujillo-Perú titulado: “Determinación de las propiedades de mortero con polvo de mármol como agregado fino mejorando la resistencia contra la salinidad, Trujillo”. La investigación se centra en el análisis en profundidad de morteros para uso como revestimiento en diferentes estructuras, prestando especial interés en la utilización de mármol en polvo en diferentes proporciones 5 %, 10 %, 15 % y su posible efecto positivo en la acción del salitre. El estudio se centró en la construcción de probetas cúbicas de 5 cm por lado, para ser sometidas a compresión axial en una prensa hidráulica, de acuerdo con la Norma Técnica Peruana N.T.P 334.051. Al término de los ensayos, se realizó la expansión de las barras, analizando así el comportamiento del mortero en condiciones salinas. Finalmente, se procedió con el análisis de los datos e interpretación de la información que se obtuvo de las pruebas realizadas, destacando que es posible sustituir hasta un 75% de mármol residual.

Moreno et al. (2022) realizaron un estudio en México titulado: “Residuos de mármol en materiales para la construcción: una revisión del uso del polvo de mármol en morteros, concretos y ladrillos”, la investigación tuvo como propósito realizar la revisión sistemática de una serie de obras que utilizaron polvo de mármol como parcial sustituto de cemento, arena o agregado fino en la fabricación de elementos constructivos como concreto estructural, mortero cementicio y unidades de mampostería. Se consideraron trabajos provenientes de diferentes partes del mundo que aplicaron distintas metodologías de corte experimental. Los resultados indican que, el polvo de mármol se sustituyó en un 15% de cemento o de agregado fino, sin afectar a la resistencia a la compresión, independientemente de la geometría de las piezas. Por consiguiente, su uso no solo ayuda a disminuir los impactos negativos derivados de los residuos de mármol, sino que aumenta

la reducción de materiales tradicionales como la arena, lo que fomenta un cambio positivo en la construcción.

Un estudio publicado en Turquía por Yamanel et al. (2019) realizaron una investigación titulada: "Influencia del polvo de mármol residual como sustituto del cemento en las propiedades del mortero". En las mezclas de mortero, la relación agua-aglomerante se escogió en 0,5 y la relación arena-aglomerante en 3. Los resultados experimentales mostraron una mejora en la trabajabilidad del mortero en su estado fresco, así como un aumento en la resistencia a temperaturas más altas. Además, se observaron valores de retracción por secado al compararlo con el mortero de referencia elaborado sin la incorporación de polvo de mármol. No obstante, se encontraron efectos negativos en relación con la absorción de agua, la resistencia a la abrasión y la resistencia a la carbonatación. En términos de resistencia a la compresión, con períodos de curado cortos, la sustitución del cemento por polvo de mármol resultó en reducciones leves de la resistencia a la compresión para sustituciones del 5-10%, pero reducciones considerables para niveles de sustitución del 15-20%.

En México, Betancourt (2019) publicaron un estudio titulado: "Comportamiento de mezclas de mortero con residuos de mármol (polvo), cáscara de nuez y mucílago de nopal", el estudio tuvo como finalidad desarrollar una mezcla según las pautas establecidas para morteros de recubrimiento, para mejorar su rendimiento en comparación con mezclas tradicionales. Después de caracterizar los materiales, se desarrollaron cuatro fases de diseño experimental. En la primera fase, llamada fase exploratoria 1, se realizaron mezclas de 2 partes de cemento por 2.75 partes de agregado fino 1:2.75. La fase exploratoria 2 mantuvo la misma proporción. Luego, se llevaron a cabo las fases experimentales 1 y 2 con una dosificación base de 1 parte de cemento por 3 partes de agregado fino 1:3. Los resultados mostraron que la adición de mucílago de cactus mejora la viscosidad de la

mezcla y reduce los requerimientos de agua. Es recomendable realizar más investigaciones para definir una proporción óptima que incorpore mucílago de cactus y polvo de mármol, ya que utilizar dichos materiales a más de reducir el impacto ambiental, también proporcionaría una alternativa económica a los morteros convencionales.

Baca (2019) publicó una investigación en Cusco-Perú titulada: “Estudio comparativo de las propiedades físico-mecánicas del mortero de cemento Pórtland tipo IP elaborado con residuos de mármol en porcentajes del 10%, 15% al 20% producto de la explotación de la cantera de Cullpahuanca - Quiquijana Quispicanchi– Cusco”. Para la elaboración del mortero, los agregados fueron de canteras de Cunyac 70% y Vicho 30%. Se estudió la variación de la resistencia a la adherencia por flexión del mortero a los 28 días, realizando comparativa entre las mezclas que incluían residuos de mármol con un mortero convencional. Asimismo, se elaboraron las curvas de compresión y flexión a los 7, 14, 21 o 28 días en comparación con el mortero convencional. Los resultados indicaron que, en relación a la adherencia por flexión, al 15% de sustitución con residuos de mármol se presentó incremento de la resistencia de 7.05% en comparación con el mortero patrón. Por otro lado, en cuanto a la resistencia a la compresión, se presentó un decremento a partir del 20% de sustitución con residuos de mármol. Con respecto a la resistencia a la flexión, esta mejora levemente en relación al mortero tradicional con hasta 20% de sustitución.

Kabeer & Vyas (2018) realizaron cuatro mezclas distintas de mortero para evaluar las propiedades del reemplazo de polvo de mármol, tanto en estado fresco como endurecido. Los resultados concluyeron que, la sustitución de arena de río colabora con la reducción del agua en la mezcla de mortero debido a la propiedad tixotrópica del polvo de mármol. A su vez, la disminución de la cantidad de agua, en adición del polvo de mármol, aceleró el  $C_3S$ , formando carboaluminatos de cal. La microestructura mortal resultante era más densa y mejoraba considerablemente el rendimiento mecánico de los morteros. El mortero

compuesto por 60% de polvo de mármol como sustituto de arena, sobrepasó las expectativas al igualar la resistencia a la compresión del mortero de cemento de control. Se constató que la retracción por secado se comportó similar a la del mortero de cemento convencional. Comparado al mortero de control, los valores de absorción de agua y porosidad estaban mucho más elevados. Se considera que sustituir un 20% de la arena en la mezcla por polvo de mármol ahorraría considerablemente la utilización de arena de río en obras de construcción y ayudaría a la reducción de residuos generados en el proceso de fabricación de piedra dimensional de mármol.

A partir del análisis preliminar de la problemática, se ha observado que existe un interés creciente sobre el uso de residuos de mármol como adición mineral en cemento diseño cerámica, ampliando la obtención y mejoras en propiedades como resistencia mecánica, estabilidad físico-química y criterios de sostenibilidad. Sin embargo, en el contexto ecuatoriano, más específicamente en Cuenca, se nota una falta de análisis exhaustivos acerca de la utilización de gris de mármol en polvo como sustituto parcial de aglomerante en las composiciones de argamasa. Esta escasez de investigación técnica justifica la necesidad de formular una propuesta técnica que contribuya a la valorización de residuos inertes generados en los procesos constructivos.

## **2.3 Estado del arte**

### **2.3.1 Evolución tecnológica en la fabricación del mortero.**

La invención del mortero representa una mejora significativa en las técnicas de construcción. Este avance se logró con la invención del aglutinante y su combinación con otros componentes agregados para formar un material que se endurecería y se comportaría como una piedra natural. El deseo de comprender los materiales utilizados en la construcción de monumentos, edificios y construcciones en general, su evolución a lo largo

del tiempo, así como los cambios que han experimentado en algunos casos, ha motivado la realización de numerosas investigaciones.

#### ***a. Morteros prehistóricos***

El origen de los morteros podría atribuirse al descubrimiento de la cal y el yeso y, en opinión de algunos autores como Malinowski & Garfinkel (1991), afirman que los orígenes de los morteros pueden datar de la época prehistórica, junto con la utilización del fuego y la calcinación de piedras. Hay algunas evidencias de morteros en Turquía, donde se descubrieron morteros de cal fechado entre el 12.000 y el 5.000 a.C. y en la Máscara de Jericó 7.000 a.C., donde morteros de cal proporcionaron superficies de acabado pulido (Lara et al., 2020). En Çatal Hüyük 6.000 a.C., los pisos y paredes de arcilla compactada, cal, yeso y color recubierto demuestran su uso temprano como soporte para pinturas (Álvarez et al., 1995; Ontiveros, 2001).

Excavaciones posteriores verificaron la existencia de casas con pisos de mortero de cal datadas alrededor del 7.000 a.C. y estratos más antiguos datados por C-14 que retroceden hasta el 9.000-8.000 a.C. (Álvarez et al., 1995). La investigación en Nevalı Çori y otras áreas del Este Mediterráneo ha encontrado pavimentos similares que llevaron a Wooley (1958) a referirse a estos asentamientos como "el pueblo del piso pulido". Estas habilidades demuestran técnicas sofisticadas en la quema de piedra caliza, apagado, hidratación y mezcla, e incluso a los ojos de algunos la evidencia más temprana de pirotécnica (Frierman, 1971).

En Galilea, los pavimentos de Yiftah se caracterizaban por sus morteros de cal con un acabado superficial fino. Esto sugiere una base bien compactada y un pavimento de mortero de alta dureza. Adicionalmente, se han hallado fragmentos de revestimientos de hornos de cal fabricados con conglomerados de arcilla reforzados con paja o rama (Lamdan

& Davies, 1983; Malinowski & Garfinkel, 1991). En la Figura 3, se puede apreciar la estructura Yiftabel con suelo enlucido.

*Figura 3: Estructura Yiftabel con suelo enlucido*



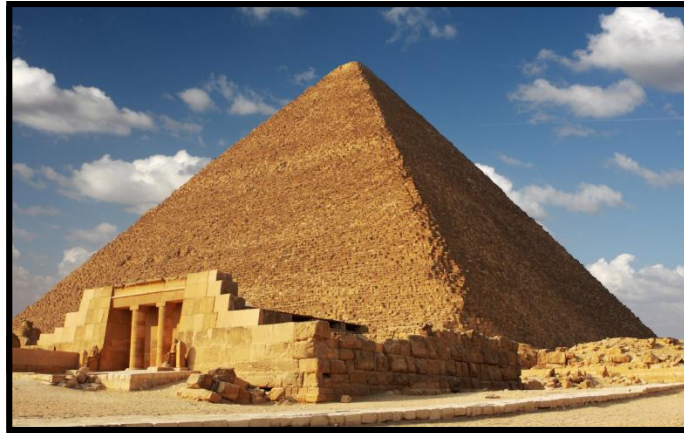
*Fuente: Tomado de Wikipedia (2025)*

Por otro lado, Europa central y del Norte parece no tener evidencia clara del uso prehistórico de la cal, y en su lugar, parece que se utilizó arcilla cruda y tierra apisonada para cubrir pisos y paredes (Furlan & Bissegger, 1975). Sin embargo, algunos hallazgos cerámicos decorados con pastas calcínicas templadas con hueso, yeso o arcilla muestran que puede haber existido una comprensión rudimentaria de sus propiedades, aunque no está claro si se utilizó como cal hidratada o simplemente como piedra caliza triturada.

### ***b. Morteros egipcios***

La estrecha relación entre la utilización del yeso y sus mecanismos de fabricación en el Antiguo Egipto permite inferir su uso más primitivo. Es plausible deducir que el yeso fue empleado inicialmente de forma simple como mortero de unión y aglutinante para los bloques de las pirámides, un destino atestiguado en la Pirámide de Keops (c. 2600 a. C.). En la Figura 4, se visualiza una de las siete maravillas del mundo antiguo (Furlan & Bissegger, 1975; Martinet et al., 1992). En comparación con otras civilizaciones contemporáneas, el egipcio no se destacó solo por el empotramiento de grandes bloques de piedra, sino que lo usó con fines en el arte y la escultura (Ghorab et al., 1986; Ragai, 1988, 1989; Ragai et al., 1987).

*Figura 4: La pirámide de Keops se alza en la llanura de Giza, cerca de El Cairo*



*Fuente: Tomado de Sadurní (2024)*

Las civilizaciones egipcias han demostrado que el antiguo Egipto fue una de las etapas más importantes en la civilización y el uso del yeso por lo su aducción, como se ha mencionado, se pudo resumir en tres técnicas principales. Yesos para decoración, los cuales fueron producidos a altas temperaturas dentro de los 120 °C y 160 °C. Yesos de acabado para empotramiento y de menos de 300 °C. Yesos de colocación, sobre los cuales no se tiene mucha información y lo que sí se sabe es que el blender, que se utiliza de forma habitual al ser sobre proporciones, y se utilizan de aditivos como lubricantes. Y yesos de acabado, los que fueron fabricados a esas temperaturas altas que se utilizan cuando el tiempo es superior a los 120 °C y se utilizan para enfriarse cuando el tiempo es menos hectormino (Ashurst, 1983; Frizot, 1975; Martinet et al., 1992).

La investigación arqueológica muestra que los morteros de la Esfinge y los templos asociados variaron en su composición, con predominancia de yeso, calcita o cuarzo, así también presentaron diferencias respecto a las técnicas empleadas, así como en los sus recursos (Ghorab et al., 1986; Ragai, 1988).

Como se muestra en la Figura 5, se aprecia que, desde el aspecto físico, el yeso era necesario para las pinturas murales sagradas; materiales como la loza, debido a su alta porosidad, solo podía ser trabajado pictóricamente después de ser enyesados.

*Figura 5: La Esfinge de Giza*



*Fuente: Tomado de Ruz (2023)*

Sin embargo, la ausencia de morteros de cal durante el período faraónico fue bastante curiosa, dada la cantidad de canteras de piedra caliza. La explicación más aceptada es la alta temperatura calcinatoria y la disponibilidad limitada de madera como combustible. Los primeros morteros de cal, asociados con la influencia cultural griega y romana, solo aparecerán en el período ptolemaico (Martinet et al., 1992). Por lo tanto, la tradición egipcia en construcción está marcada por la predominancia del yeso sobre otros aglutinantes, y se elimina el origen egipcio para los morteros de cal (Furlan & Bissegger, 1975).

### ***c. Morteros griegos***

A pesar de todos los esfuerzos realizados por arqueólogos, científicos e historiadores, aún persisten muchas interrogantes sin respuesta sobre el uso de morteros de cal y su preparación. Un mortero de cal como aglutinante, puede datar de la etapa de la Edad Neolítica, mientras que el verdadero mortero de cal fue utilizado por los griegos y romanos (Ashurst, 1983; Krivenko, 2017). Las excavaciones dan testimonio de que los constructores griegos conocían aglutinantes artificiales desde tiempos muy antiguos, lo que apoya la teoría del origen neolítico del mortero de cal. Sin embargo, el uso de mortero con cal en Grecia para construir muros es mucho más tardío, a finales del siglo II o principios del siglo I a.C. Casas de Délos y de Thera (Furlan & Bissegger, 1975). En construcciones anteriores,

las piedras se mantenían unidas con mortero hecho de tierra y arcilla (Orlandos, 1969). Ya en el siglo VII a.C., los constructores griegos tenían que utilizar la técnica de estuco y capas enlucidas para ocultar el aspecto áspero de algunos materiales como el toba y la piedra caliza; Vitruvio admira el enlucido griego, similar al mármol, en el Palacio de Knossos, el pulido del enlucido, la capa inferior para pinturas y frescos, como se puede ver en la Figura 6, el Palacio de Knossos.

*Figura 6: El Palacio de Knossos*



*Fuente: Tomado de González & Guzmán (2017)*

Además, se han encontrado algunos ejemplos de morteros enlucidos de alta calidad en los asentamientos de 1,500 a.C. de Micenas y Minos, en la famosa cisterna de Micenas, y en algunos edificios de Festos y Malia en Creta. La técnica desarrollada por los griegos sería utilizada más tarde por los romanos en sus construcciones hidráulicas muros, pisos, columnas en cisternas y en los interiores de acueductos. Sin embargo, Vitruvio afirma que los morteros pulidos son una técnica antigua de los griegos dado que tal atención ayuda a mitigar la contracción y las fracturas. También habla de la aplicación de mortero en capas, de 3 a 6. La comprensión del mecanismo y la técnica de pulido del mortero, así como la razón de su aplicación en varias capas, es el resultado de investigaciones recientes (Krivenko, 2017).

El pulido es una técnica antigua, siendo la misma que la de la trituración de cal, del mortero, del carbonato, o de la puzolana, para formar una superficie densa que aumenta la impermeabilidad del material y que es, en todos los otros aspectos del trabajo, siendo el mismo, el material que se establece para el endurecimiento de la puzolana. Para las estructuras que se utilizan para el transporte de agua, la superficie pulida y asentada ejerce, además de la resistencia perenne a la contracción y rotura del mortero, el valor añadido de la prevención de depósitos calcáreos en las cisternas y los acueductos debido a la mejora del flujo de agua (Krivenko, 2017).

En términos generales, los morteros helénicos están compuestos de cal, arena fina, yeso y mármol en polvo. Sin embargo, dependiendo de los requisitos, se añadieron modificadores a la cal para aumentar la dureza y estabilidad del mortero. En Thera, los morteros de cal-arena se aumentaron con una ceniza volcánica descrita como "Tierra de Santorini" que se extrae en la isla. De esta manera, se logró la producción de morteros estables en agua, que pueden considerarse el inicio de los morteros hidráulicos modernos. Estos morteros estables en agua, así como las técnicas de pulido mencionadas anteriormente, también fueron adoptados por los romanos para la construcción de sus cisternas de agua y acueductos (Furlan & Bissegger, 1975).

La técnica de agregar a una mezcla de cal y arena sustancias que dieran al mortero estabilidad impermeable y mayor dureza también se practicaba fuera de esa isla y en otras regiones de Grecia. Así se encontró la "Tierra de Santorin" en morteros que decoraban el Hefestión de Atenas (Furlan & Bissegger, 1975). En ausencia de roca volcánica, las materias primas preferidas eran azulejos o ladrillos rotos, como lo atestigua el visible color rosa de algunos revestimientos externos. El momento crucial en la historia del mortero es la adición a la mezcla de materiales que podrían mejorar las propiedades del mortero y, más particularmente, el uso generalizado de puzolanas, primero naturales, luego artificiales,

que, al mezclarse con cal, mejoran la resistencia y la estabilidad a la fragilidad del mortero. A continuación en la Figura 7, se puede apreciar la mezcla de materiales en la edificación de Hefestión de Atenas.

*Figura 7: Hefestión de Atenas*



*Fuente: Tomado de Wikipedia (2025b)*

El primer uso conocido de tierra cocida tejas y ladrillos se remonta a la época de la construcción de las cisternas en Jerusalén durante el reinado del rey Salomón, en el siglo X a.C. (Santarelli, 1960). Se dice que esta incorporación fue traída por trabajadores fenicios que, como resultado de su experiencia pragmática, tenían cierto conocimiento de las propiedades de dichos materiales puzolánicos.

#### ***d. Morteros romanos***

La civilización romana pasó de construir estructuras como el Panteón y el Coliseo, y acueductos a gran escala, al uso de mortero de mármol *opus caementitium*, tomando prestados los constructos geométricos de los romanos. El uso de mortero multicapa contrae e impermeabiliza, según la investigación realizada en el acueducto de Cesarea (Krivenko, 2017). También utilizaron morteros con propiedades hidráulicas en base a ceniza volcánica, tierra cocida o teja triturada (Morgan, 1988; Rassineux et al., 1989). En la Figura 8, se puede observar el uso del mortero como núcleo estructural.

*Figura 8: Capas superpuestas de escombros mortero como núcleo estructural (Opus caementicium)*



*Fuente: Tomado de Martínez (2022)*

Vitruvio discutió las proporciones utilizadas en la mezcla: una parte de cal por tres partes de arena, o dos a cinco dependiendo del grado del material, junto con el uso extenso de la puzolona de Pozzuoli que, cuando es calcárea, genera compuestos similares a los cementos modernos (Rassineux et al., 1989). La calidad de estos morteros no solo depende de la adición de aditivos tecnológicos, sino también de la cuidadosa construcción de un sistema de materiales, del diseño preciso de las proporciones de mezcla y del método de construcción de consolidación que aseguraba que los morteros estuvieran libres de vacíos y aire (Furlan & Bissegger, 1975; Kakavas et al., 2022; Krivenko, 2017).

Los estudios comparativos sobre morteros romanos y modernos han determinado la mayor durabilidad del primero bajo condiciones ambientales hostiles. Tal durabilidad se demuestra en los acueductos romanos preservados y estructuras marítimas en contraste con la construcción moderna en decadencia (Krivenko, 2017). Además, los aditivos orgánicos que se han hipotetizado como utilizados en situaciones específicas, como la albúmina, caseína y urea, o las emulsiones de aceites, no parecen ser responsables de la durabilidad de estas estructuras, que proviene principalmente de la combinación de materias primas de alta calidad, procesos de cocción precisos y técnicas de construcción meticulosas (Furlan & Bissegger, 1975; Krivenko, 2017).

### ***e. Morteros medievales***

Con la caída del Imperio Romano, la tradición constructiva se rompió. Esto dio variaciones regionales junto con la preparación de morteros. En el periodo medieval, no hubo avances significativos y, en su mayor parte, los materiales utilizados eran de baja calidad, muy heterogéneos y usados sin el rigor característico de la ingeniería romana, lo que creó cavidades internas dentro de las paredes (Kakavas et al., 2022). Los constructores medievales continuaron utilizando cal o yeso como aglutinantes principales, a veces con adiciones como fragmentos de tejo. Sin embargo, la reactividad de estos aditivos era bastante inadecuada, determinada por el carácter de la arcilla y las condiciones de cocción (Furlan & Bissegger, 1975). Las deficiencias de calidad, la falta de uniformidad, así como la proporción de los fragmentos y la mezcla junto con el conocimiento romano, que era la selección, el periodo de cocción y extinción de la cal, llevaron a una drástica reducción de la calidad (F. Gutiérrez et al., 1989).

Desde el siglo XII se empieza a notar cierto avance en el mortero, que se hacía más homogéneo y se incorporaban elementos como carbón de leña para aumentar la porosidad. Sin embargo, la economía del siglo XIII condicionó la calidad de los morteros, como, por ejemplo, en los morteros de cal pobre que se empleaban en catedrales en Francia. En los siglos XIV y XV, el cambio de grava por arenas lavadas constituyó una mezcla más estable y más favorable en el mortero (Furlan & Bissegger, 1975).

Un aspecto del debate es la incorporación de materiales orgánicos. Mientras que algunos autores refutan la presencia de proteínas animales en los morteros medievales (Böttger et al., 2002), cada vez más personas atestiguan el uso de sangre, clara de huevo, jugo de fruta, cerveza y cera de abejas, cuyo uso ha sido documentado desde la antigüedad y también está respaldado por el estudio de morteros renacentistas (Newton & Sharp, 1987; Sickles, 1981). Estos materiales, que sirven como aditivos, podrían mejorar la

trabajabilidad, pero también aumentaron la susceptibilidad a microorganismos, la solubilidad en agua y la vulnerabilidad.

De acuerdo con Furlan & Bisseger (1975), en los procedimientos romanos y en la era medieval se utilizaban yeso como agente aglutinante en mezclas con fragmentos pétreos. Durante los últimos siglos de la Edad Media, el cambio a la construcción de piedra fue tanto un fenómeno condicionado económicamente como un código de prevención de incendios público, así como una disposición reguladora que reforzaba el uso de yeso para iglesias y fortalezas de piedra.

#### ***f. Morteros modernos***

El proceso para hacer ligantes hidráulicos no se completó hasta el siglo XVIII. Sin embargo, los griegos y romanos habían utilizado tierra de Santorini, tejo y puzolana, todos los cuales tenían algún tipo de propiedades hidráulicas. La estabilidad en agua se debe a la reacción con cal, sílice coloidal y alúmina, formando compuestos complejos similares a los aglutinantes modernos (Furlan, 1975; Rassineux, 1989). Los morteros romanos se destacan por su impermeabilidad de los agentes agresivos, las reacciones de puzolana y la formación de costra protectora de carbonato (Rassineux et al., 1989).

En el año 1756 fue la primera vez que comenzó la historia de los aglutinantes hidráulicos modernos. Este fue el momento en que Smeaton descubrió que la arcilla en la piedra caliza tenía la hidráulicidad más fuerte. Esto se oponía directamente a los romanos que utilizaban sistemáticamente piedra caliza pura. Estudios minerales en curso probaron que la capa costrosa de ladrillo o puzolana que contenía compuestos hidratados era cemento. Los materiales de silicato de calcio hidratado también mantenían ciertas condiciones unidas durante mucho tiempo (Furlan, 1975; Rassineux, 1989).

De acuerdo con la literatura romana Vitruvio, los morteros se hacían a partir de la quema de roca caliza, apagado de cal y mezclándola con arena. La caliza podía ser llevada a un horno de cal, en el cual la temperatura necesaria para descomponer el carbonato de calcio era de  $1000^{\circ}$  C. Es posible desarrollar silicatos y aluminatos anhidros  $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$  y  $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$ . Las rocas, eran aquellas calizas de las que había cal apagada que contenía solo proporciones mínimas de sílica y alúmina y, así, en ese tipo de cal apagada no había duda de que había rastro de silicatos y aluminatos anhidros. Además, esas cales apagadas se mantenían en silos de almacenamiento durante un par de años antes de su despliegue (Rassineux et al., 1989).

Por otro lado, la mezcla de compactación de materiales junto con la precisión romana resultó en morteros excepcionalmente compactos y duraderos. Años después, en 1812, Vicat utilizó experimentos reactivos con cal y arcilla durante la cocción, que crearon compuestos como silicatos de calcio hidratados CSH, para demostrar que ciertas propiedades dependían de la reactividad hidráulica de los materiales utilizados (Furlan, 1975). La cal apagada impermeable, también llamada cal hidráulica, se crea como un producto intermedio entre la cal apagada y el cemento Portland. El producto también se caracteriza por una abundancia de cal libre que debe someterse a un apague controlado (Ashurst, 1983; Furlan & Bissegger, 1975).

Por lo tanto, se puede señalar que un ejemplo tangible del desarrollo de la cabeza y las manos de los morteros romanos y las calces hidráulicas del siglo XIX es la transformación de los morteros romanos a lo largo de los siglos, que ilustra una evolución de un enfoque empirista hacia una mayor apreciación de las reacciones químicas que provocan y sostienen la durabilidad de los aglutinantes.

### ***g. Morteros actuales***

James Frost en 1811, patentó un cemento artificial resultado de la lenta calcinación de piedra caliza triturada y arcilla, precursor del proceso que luego resultó en la producción de algunos cementos hidráulicos artificiales, el más famoso de los cuales se llama Portland debido a la supuesta semejanza y apariencia de la piedra caliza de ese nombre. Como los primeros años de 1800 fueron testigos de una serie de experimentos e investigaciones impulsadas por Vicat (Ashurst, 1983) sobre estos materiales. Apsdin (1983) lo preparó triturando y calcinando piedra caliza, mezclando la cal resultante con arcilla y tierra, e hidratando cuidadosamente la mezcla resultante. Luego calcinó la amalgama, la trituró y la calcinó una segunda vez para eliminar el ácido carbónico residual. La calidad del cemento era baja porque se producía a bajas temperaturas (Ashurst, 1983; Furlan & Bissegger, 1975). A continuación en la Figura 9, se puede observar la invención del cemento Portland.

*Figura 9: Invención del Cemento Portland, un hito gris de la humanidad moderna*



*Fuente: Tomado de Trofelly (2024)*

El cemento producido después del año 1850 se hacía utilizando técnicas modernas, que consistían en moler la cal y la arcilla en un molino de pan húmedo y, posteriormente, calcinando la mezcla a temperaturas de 1300° - 1500° C. La piedra caliza en este punto se convierte en cal viva, que luego se combina químicamente con la arcilla para dar un clínker de cemento Portland. El clínker de color blanco caliente, después de haber sido triturado

nuevamente y recalado, se enfría y se agrega una pequeña cantidad de yeso para aumentar el tiempo de fraguado (Ashurst, 1983; Furlan & Bisseger, 1975).

La Expo Mundial de 1851 le hizo un gran favor al darle una gran visibilidad y permitirle exhibir una nueva invención. Desde entonces, casi todos los fabricantes de aglutinantes practican la calcinación a alta temperatura, y la cal apagada fue reemplazada cada vez más por cemento. Los argumentos en contra de la utilización de cal hidráulicas, cementos naturales, y cemento Portland, son su resistencia, su calidad relativamente impermeable y el riesgo de transferencia de sales solubles, especialmente sales de sodio solubles que perturban los materiales de construcción ((Ashurst, 1983; Furlan & Bisseger, 1975).

En conclusión, desde finales del siglo XIX, los principios generales sobre la preparación del cemento Portland y los procesos industriales involucrados han cambiado muy poco. Sin embargo, ha habido una evolución sustancial en los ámbitos técnico y científico hacia la creación de aglutinantes que amplían enormemente el alcance de la investigación en estos materiales.

### **2.3.2 Mármol.**

El mármol se define como una roca metamórfica de origen carbonatado, constituida principalmente por calcita y dolomita; además, la calcita posee una estructura cristalina fina. El 99% del mármol está compuesto por carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ , así como también de otros óxidos de menor proporción como  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$  y  $\text{Zn}$  (Ruiz et al., 2019). Según la granulometría, puede variar desde tamaños microscópicos hasta cristales de mayor escala; en otros casos, pueden ser lo suficientemente gruesos como para mostrar la exfoliación característica del mineral. Sus características incluyen la suavidad dureza media de 3 a 4 en la escala de Mohs, el cual

depende de si es calcítico o dolomítico y su reacción ácida, así como su uso comercial como caliza que puede ser pulida (Pie et al., 2023). En la Figura 10, se puede observar la composición del mármol gris.

*Figura 10: Mármol gris*



A diferencia del granito, cuya formación se da por procesos ígneos intrusivos, el mármol se origina a partir de calizas sedimentarias que, sometidas a condiciones de presión y temperatura elevadas, atraviesan un proceso de recristalización metamórfica. Este fenómeno transforma su estructura interna, otorgándole un alto grado de cristalinidad y una textura homogénea que resalta por su valor estético. Gracias a dichas cualidades, el mármol se convierte en un material idóneo para aplicaciones arquitectónicas como revestimientos, pavimentos, componentes escultóricos y acabados de carácter ornamental (J. Betancourt et al., 2019).

La utilización del mármol como piedra decorativa se practicaba en la antigua Grecia y El Imperio Romano, aproximadamente en el año 600 a.C. En esta época, se extraían de los territorios conocidos los mármoles más hermosos del mundo, que servía para la elaboración de una diversa gama de elementos columnas, estatuas, suelos, etc., lo que lo convertía en un indicativo de estatus social. Desde este periodo, el mármol ha encontrado apreciación en todas las culturas (Navarro et al., 2017). Los mármoles poseen características

heterogéneas, variando en el tamaño del grano 0.5 a 3 mm junto con diferentes matices blanco, celeste, gris o rosa y formas internas masivas y de leve bandeado o plegado (Murra et al., 2021).

De acuerdo con Wahab et al. (2019), el mármol se divide en cuatro grupos con respecto a su "Soundness" solidez: A, B, C, y D. Dicha clasificación describe qué daños sería necesario reparar antes o durante el proceso de instalación, basándose en las prácticas comerciales usuales. Los grupos A, B, C, y D deben tenerse en cuenta al especificar el mármol, dado que no todas las variedades son apropiadas para los usos constructivos, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM-C503. Esto es particularmente cierto para los mármoles comparativamente más frágiles que son catalogados en los Grupos C y D, los cuales podrían necesitar que se les haga mayor modificación antes o durante la instalación. Para cualquier instalación exterior o cualquier uso que demande que el panel de piedra resista cargas laterales o peso sin soporte estructural, solo se deberá utilizar mármoles del Grupo A de Soundness.

El mármol se lo reconoce como una roca metamórfica apreciada a nivel mundial por sus expresiones estéticas y su valor patrimonial. Su formación casi completamente carbonática, junto a un proceso geológico de recristalización, otorgan al mármol notables características físico-mecánicas que sobrepasan su uso ornamental. En los proyectos contemporáneos, el mármol toma gran importancia debido a su color, textura, y desempeño potencial en aplicaciones estructurales o de recubrimiento, siempre sujeto a una caracterización técnica adecuada. En su integración se debe considerar la compatibilidad con el contexto edificado, así como los parámetros de resistencia a compresión, curva granulométrica, y estabilidad volumétrica. Con un criterio normativo y un enfoque sensible al diseño, el mármol reafirma su pertinencia para propuestas arquitectónicas contemporáneas al integrar memoria material con estrategias de innovación formal y constructiva.

### 2.3.3 Mortero.

Desde la perspectiva de Valbuena et al. (2016), al mortero lo definen como “aquella pasta formada por la combinación de materiales cementantes, agregados y aditivos, que mezclados con una cantidad conveniente de agua dan lugar a una masa plástica” (p. 116). Además, cabe mencionar que hay una amplia gama de morteros de acuerdo a sus composiciones y el uso al que se destinan.

Asimismo, Cañarte et al. (2023) sostienen que es un material compuesto principalmente por una mezcla de cemento, árido fino como arena) y en otros casos, materiales conglomerantes o aditivos. Al agregar agua, esta mezcla inicia una serie de reacciones fisicoquímicas que da paso al fraguado y al endurecimiento progresivo de la mezcla. Como resultado de su proceso de fraguado, el mortero adquiere una estructura compacta y resistente, comparable a la solidez de la piedra natural. Esta condición lo hace idóneo para sistemas de mampostería, revestimientos superficiales y capas de asiento. Como se aprecia en la Figura 11, así se muestra el mortero utilizado para experimento dentro del laboratorio.

*Figura 11: Mortero para experimento en laboratorio*



*Fuente: Tomado de (Patiño et al., 2018)*

Por otro lado, Jouve et al. (2021) mencionan que mortero es un material ampliamente empleado en diversas soluciones constructivas, como soleras, protección de pendientes, cerramientos verticales y sistemas de cielorrasos. La composición del mortero se basa en cemento, cal, o una combinación de ambos conglomerantes. Asimismo, la arena puede tener diferentes granulometrías, y su naturaleza puede ser silíceo, calcáreo, o incluso derivada de agregados reciclados o subproductos industriales. La cantidad de agua añadida a la mezcla también tiene un impacto en las propiedades físicas del mortero, en particular en su porosidad, trabajabilidad y resistencia mecánica.

El mortero puede ser definido como un componente constructivo resultante de la mezcla homogénea de materiales conglomerantes con áridos finos e, incluso, con incorporación de áridos gruesos según su aplicación específica. Hay una variedad de investigaciones disponibles relacionadas con el comportamiento de morteros en estado endurecido, ya sea con la adición de modificadores químicos, fibras de acero y minerales, para mejorar sus propiedades. No obstante, el uso de materiales reciclables adquiere cada vez más relevancia, debido a la inclusión de materiales reciclables como alternativa sostenible (Rocha, 2024).

En otras palabras, se considera el mortero como un material aglomerante perteneciente a cemento, el cual resulta de una mezcla dosificada de conglomerantes hidráulicos, áridos finos y agua. Este sistema inicialmente plástico sigue un proceso de secado, posteriormente desarrolla una matriz endurecida que presenta alguna medida de resistencia a la compresión, por lo que permite considerar que existe cohesión interna, adherencia sobre sustratos, y resistencia estructural. Además, su ductilidad permite que se utilice para cubrir, nivelar, o unir piezas en mampostería, lo que refuerza su carácter como un material esencial que operativamente permite ejecutar construcciones. El uso de aditivos, fibras técnicas, o

subproductos reciclados también permite mejorar su comportamiento físico-químico, reológico, retracción, y durabilidad.

#### **2.3.4 Propiedades del mortero.**

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014) el mortero está definido como la “Mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos y agua y en algunos casos adiciones y aditivos” (p. 13). Según Ávila et al. (2019), las propiedades de cualquier mortero en estado fresco incluyen las siguientes: adhesión, retención de agua, cohesión, tiempo abierto, fluidez, tixotropía, trabajabilidad y docilidad. Además, las propiedades de un mortero endurecido son: permeable y superficie de endurecimiento, libre de heladas y libre de fracturas, resistente a eflorescencias, libre de grietas internas, resistencia a compresión no confinada, resistencia a compresión axial y resistencia a compresión longitudinal.

Además, la trabajabilidad es una propiedad importante del mortero, porque ayuda a mezclar y colocar el mortero fácilmente sin segregación. Un indicador de la trabajabilidad es el grado de consistencia, que se clasifica en tres tipos: seco, plástico y fluido. También es trascendental que, la trabajabilidad inicial se mantenga en su condición plástica durante la colocación de las unidades de mampostería (Navas & Arias, 2015).

Por otro lado, uno de los factores que afecta la consistencia del mortero es el agua. Además, se debe tener en cuenta el tipo de agregado y su graduación. Asimismo, el contenido de cemento, así como las propiedades del mortero con la adición de algunos aditivos (Salvatierra & Valle, 2021).

Cabe destacar que, entre las características o propiedades de los morteros se distinguen dos estados fundamentales:

- **En estado fresco:** es cuando la mezcla aún no ha fraguado y está en una fase plástica y trabajable, por lo que se puede colocar en obra. La duración de este estado está relacionada con los siguientes factores: tiempo de fraguado, temperatura, humedad, entre otros. Superada esta fase, el mortero empieza a albergar hasta consolidarse. De tal forma que, es necesario distinguir las propiedades y exigencias en función del estado en que el mortero se encuentre. Las propiedades en estado fresco están ligadas a requerimientos específicos de la obra, afectando de manera directa el rendimiento y la calidad de la ejecución (Jouve et al., 2021).
- **En estado endurecido:** Las propiedades se indican a partir de las estipulaciones del proyecto, así como el cumplimiento de normativas y reglamentos vigentes. Las características corresponden, en primera instancia, al arquitecto o ingeniero que está a cargo de la obra. Es importante mencionar que la condición del mortero en estado fresco tiene un aporte muy importante en prestarles al material las prestaciones finales. En este sentido, las propiedades del mortero, en estado fresco y endurecido, dependen de su aplicación prevista y clasificación correspondiente (Jouve et al., 2021).

Aunando lo antes descrito, las propiedades del mortero en estado fresco y endurecido son determinantes para el desempeño técnico y constructivo del proyecto. Su trabajabilidad, cohesión y adherencia garantizan precisión en la ejecución, mientras que su resistencia, durabilidad e impermeabilidad aseguran estabilidad y calidad final. Las características dependen de una adecuada formulación y control de materiales. Así, el mortero trasciende su función de unión para convertirse en un elemento estratégico dentro del sistema constructivo arquitectónico.

### 2.3.5 Tipos de morteros.

Existen varios tipos de morteros conocidos según su composición y uso. Por ejemplo, el mortero “Portland” es un tipo de mortero que es una mezcla de material cementante, agregado fino, agua y a veces, aditivos. Al endurecerse, tiene propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto. El dicho mortero natural se define como mezcla homogénea hecha con otros elementos compuesta por materiales alternativos, cementante cal, un agregado material cerámico molido o puzolana, aditivo yeso y agua (Patiño et al., 2018).

Por otro lado, las NEC (2014) clasifican al mortero según la resistencia a la compresión y la dosificación mínima de sus componentes. En la Tabla 1, se muestra la resistencia a la compresión y su correspondiente clasificación.

**Tabla 1:** Tipos de mortero, dosificación y resistencia mínima a compresión a los 28 días

Tipo de Mortero	Resistencia mínima a compresión 28 días (MPa)	Composición en partes por volumen		
		Cemento	Cal	Arena
M20	20.0	1	-	2.5
M15	15.0	1	-	3
		1	0.5	4.0
M10	10.0	1	-	4.0
		1	0.5	5.0
M5	5.0	1	-	6.0
		1	1.0	7.0
M2.5	2.5	1	-	7.0
		1	2.0	9.0

**Fuente:** Tomado de Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014)

Se injerta el dosificado volumétrico de cemento, cal, y árido fino. Resalta una relación directa entre la resistencia a la compresión y el volumen de cemento en la mezcla. En formulaciones como la M20 - 20.0 MPa, por ejemplo, existe un gran contenido de aglomerante hidráulico, sin cal y con menor proporción de arena, lo que aumenta la capacidad resistente del compuesto. En contraposición, mezclas M2.5 - 2.5 MPa exhibe un gran aumento de la proporción de cal y árido, por lo que la mezcla resulta en una matriz

menos densa con mecánicamente inferiores. Debe destacarse que el comportamiento estructural de los morteros relacionados a la resistencia a compresión lime que el elemento que gobierna el contenido es el cemento, mientras que la arena y la cal actúan como modificadores de consistencia y plasticidad sin mayor aporte a la resistencia.

De acuerdo con Valbuena et al. (2016), los morteros se pueden utilizar en varias aplicaciones como:

- Mortero para enlucido o revestimiento, referido como un material compuesto de un recubrimiento exterior.
- Mortero de relleno o mortero de reparación, para llenar huecos o cavidades estructurales.
- Mortero de unión, para la unión de unidades de mampostería.

Actualmente, el mortero más prevalente es el que consiste en cemento, arena y agua, debido a que es altamente resistente debido al rápido proceso de curado y endurecimiento que experimenta.

#### **2.3.6 Mortero para unir unidades de mampostería, mortero de pega.**

El mortero adhesivo o de pega debe soportar esfuerzos estructurales moderados en estado fresco y, al fraguar y endurecerse, debe soportar cargas verticales en el caso de un muro de cerramiento o en muros portantes debe resistir cargas gravitacionales significativas; por lo tanto, el mortero debe tener resistencia a la compresión y criterios de selección de mortero, y el sistema de control del sistema de construcción es el principal donde la resistencia a la compresión se denomina la propiedad de retención que debe considerarse (Valbuena et al., 2016). Cabe resaltar que, los morteros de pegado están permanentemente sujetos a lesiones de daño físico debido a la humedad, conocido como eflorescencia, lo que lleva a la erosión de propiedades físicas como el color, la densidad y la masa debido a la

floración superficial de sales, acumulación interna y descamación superficial (Cañola et al., 2020).

De acuerdo a lo antes expuesto, la elección del mortero adhesivo para instalaciones de azulejos y piedras debe basarse en la resistencia a compresión del material, especialmente cuando se trata de sistemas con muros portantes. Tipos como M20 o M15 serían adecuados para afrontar tales requisitos mecánicos. Sin embargo, aparte del criterio estructural, su comportamiento frente a patologías recurrentes también necesita ser evaluado, como la eflorescencia salina que modifica las propiedades físico-químicas del material debido a la acción capilar de la humedad. Este proceso compromete tanto la durabilidad de la fachada como la calidad estética del acabado. En este sentido, se debe implementar un diseño de mezcla técnica estricto acompañado de control de calidad durante la construcción para garantizar la integridad funcional y la durabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

### 2.3.7 Clasificación del mortero según sus propiedades.

La clasificación del mortero según sus propiedades tiene mayor relevancia para los que son sometidos a pruebas de laboratorio, sin embargo, los que se utilizan en obra de construcción no es tan importante. La Tabla 2, proporciona una clasificación de morteros a partir de sus propiedades físicas más comunes. En lo que respecta a las clasificaciones por proporciones, se basan en los pesos unitarios de los componentes que forman la mezcla del mortero (Calle, 2018).

*Tabla 2: Clasificación de morteros según sus propiedades, usados para pruebas de laboratorio*

Mortero	Tipo de mortero	Resistencia promedio a la compresión a 28 días, Kg/Cm <sup>2</sup> (MPa)	Retención mínima de agua, %	Contenido máximo de aire, %	Relación de agregados (medidos en condición húmeda y suelta)
Cemento y cal	M	17.2	75	12	No menos que
	S	12.4	75	12	2¼ y no más
	N	5.2	75	14 <sup>C</sup>	que 3½ veces
	O	2.4	75	14 <sup>C</sup>	los volúmenes

Cemento para mortero	M	17.2	75	12	separados de materiales cementantes
	S	12.4	75	12	
	N	5.2	75	14	
	O	2.4	75	14	
Cemento para mampostería	M	17.2	75	18	
	S	12.4	75	18	
	N	5.2	75	20	
	O	2.4	75	20	

*Fuente: Tomado de Salamanca (2001)*

Una vez abordadas las clasificaciones de los morteros según sus propiedades físicas y sus proporciones, es preciso ahondar en la clasificación tipológica mediante las letras “M”, “S”, “N” y “O”, establecida por normas como la ASTM C270. Esta clasificación responde a las propiedades mecánicas y de adherencia que presentan los distintos tipos de mortero, los cuales son seleccionados en función de las exigencias estructurales y las condiciones de uso en obra. Cada tipo de mortero posee características específicas que los hacen adecuados para distintas aplicaciones en el ámbito de la construcción. A continuación, Salamanca (2001) en su estudio detalla algunas de sus propiedades más relevantes:

### **Morteros tipo “M”**

- Este tipo de mortero se distingue precisamente por su elevada resistencia a la compresión, en este caso, es la máxima entre los morteros de letra clasificada.
- En su comparativa suele alterar otros tipos por su durabilidad, lo cual lo vuelve favorable para condiciones extremas.
- Es muy común en uso tanto en albañilería reforzada como no reforzada, en especial cuando las construcciones soportan altos esfuerzos de cargas verticales o laterales, congelamiento, descongelamiento, fuertes vientos o actividad sísmica.
- Se aconseja su aplicación en elementos estructurales, los cuales se encuentran en contacto directo con el suelo, como fundaciones, contención de muros, pavimentación, alcantarillado de aguas residuales, y más.

### **Morteros tipo “S”**

- Los morteros de este tipo se caracterizan por su alta adherencia, incluso mayor que otros tipos.
- Funciona adecuadamente en estructuras que son sometidas a fuerzas compresivas moderadas, además se necesita unión efectiva entre los elementos.
- Cuando el mortero actúa como el único agente de adherencia, por ejemplo, en la colocación de cerámicos o plintos de barro cocido sobre planos verticales, es óptimo.

#### **Mortero tipo “N”**

- Es considerado un mortero de uso general pues marca un buen desempeño en estructuras de albañilería de nivel en el suelo.
- Desempeña muy bien en la colocación de enchapes y elementos de mampostería, ya sea de carácter interno o externo.
- Existen muchas aplicaciones en construcción que se benefician de su resistencia mecánica, trabajabilidad y coste, convirtiéndolo en un mortero equilibrado.

#### **Mortero tipo “O”**

- Es caracterizado por su baja resistencia a la compresión y su gran cantidad de cal, lo que le confiere una alta trabajabilidad.
- Se utiliza únicamente para muros no estructurales y terminaciones en exteriores, realizándose en regiones que no sufren heladas.
- Es apropiado en casas de hasta dos niveles, y junto con su simple aplicación y versatilidad en el acabado decorativo, lo convierten en uno de los morteros más usados en construcción.

En el caso de Ecuador, la división técnica de los cementos es útil en el contexto de obras donde se exige control de calidad, acatando normas. Esta forma de clasificación en la normativa internacional ASTM C270, también es adaptada por el Instituto Ecuatoriano de

Normalización INEN en conjunto con las directrices del MIDUVI, para su incorporación en documentos técnicos de obra. La tipificación ejecutable en el laboratorio consiste, a nivel M, S, N o O, de ensayos cuyo nivel de dificultad del mortero, compresión, retención, aire y cantidad de agregado, determine. Cada una de estas designaciones representa una diferente aplicación constructiva portante y no estructural. Esta forma de clasificación permite a la ordenación de sistemas cubrir objetivos estandarizar métodos de construcción, así como el control de calidad de los materiales e interrelación con otros elementos de construcción, que son aspectos fundamentales para un país, como Ecuador, sísmico donde el control de seguridad estructural es exigente respecto a normas.

### **2.3.8 Dosificación porcentual del mortero.**

Según Salvatierra & Valle (2021), la elaboración del mortero de la realizar de acuerdo con la siguiente dosificación porcentual:

- Cemento blanco 34,2 %
- Arena natural 52 %
- Agua potable 13 %
- Aditivo reductor de agua 0,10 %
- Proporciones del mortero volumen: 1: 1,50

Después de que se seleccionan y preparan los materiales, el siguiente paso es la fabricación del mortero hidráulico en un entorno de laboratorio controlado. Para lograr la reproducibilidad de los resultados y el cumplimiento de los límites legales, la temperatura ambiental durante el ciclo de trabajo debe estar dentro del rango de  $25 \pm 5$  °C, mientras que los materiales deben tener un contenido de humedad del 3%. Dichas condiciones garantizan una representación consistente y uniforme del rendimiento del mortero.

### **2.3.9 Características del mortero para el pegado de cerámica.**

El mortero para pegado de cerámica está caracterizado por la adherencia, compresión y la flexibilidad.

#### **a. Adherencia de los morteros**

Adherencia en el mortero se puede definir como la capacidad del aglomerante para permanecer firmemente unido al sustrato cerámico, garantizando la integridad del sistema muro-revestimiento. Esta propiedad se asocia con la transferencia de esfuerzos mecánicos en la interfaz de contacto. De tal forma que, la adherencia se obtiene a partir de la potencia que se realiza para disolver la unión, es decir, hasta que deje de actuar como un elemento cohesivo. La adherencia entre materiales se determina a través de la cuantificación del esfuerzo de cohesión requerido para inducir una falla de unión, expresada comúnmente como delaminación o desprendimiento. Por ello, la respuesta mecánica está condicionada por la compatibilidad fisicoquímica y el coeficiente de absorción superficial de los sustratos involucrados (García, 2020).

Según Lordsleem & Faro (2017), la pérdida de adherencia es un fenómeno que ocurre cuando hay un fallo en la interfaz entre la cerámica y el mortero adhesivo o a veces entre el mortero adhesivo y el sustrato. Esto sucede cuando hay tensiones que superan la resistencia que las uniones pueden soportar. En situaciones donde el recubrimiento cerámico se despega, pero solo dentro de la capa de mortero adhesivo, la causa del defecto es probable que sea un error de aplicación cometido por el operario, por ejemplo, losas de mortero excesivamente grandes, o algunas deficiencias del material cuando no se encuentra disponible el nivel de adhesión requerido.

En cuanto a la adherencia en función de las características del mortero, una de las consideraciones más importantes son las propiedades físico-mecánicas del material, que

incide en la capacidad de fijación del mortero. De tal forma que, a mayor superficie de contacto, mayor será la adherencia; además, la trabajabilidad del mortero está asociada con la granulometría de sus componentes, lo cual presenta una variabilidad en la obra. En el caso de García (2020), propone tres factores objetivos que influyen en la trabajabilidad del mortero:

- a. Consistencia: El estado plástico del mortero está asociado con la trabajabilidad, lo que facilita la manipulación de la mezcla sobre el sustrato sin pérdida de cohesión ni segregación de componente.
- b. Retención de agua: La pérdida de contenido hídrico durante el proceso de mezclado afecta negativamente la trabajabilidad de la masa del mortero, lo que compromete a la capilaridad y la interacción pasta-sustrato.
- c. Tiempo utilizable: Durante el tiempo de manejabilidad del mortero en estado fresco, es esencial que mantenga su estabilidad reológica y su capacidad de adherencia al sustrato. Si se produce una pérdida anticipada de plasticidad o se activa el proceso de fraguado antes de su colocación en obra, se compromete la capacidad de anclaje mecánico y la integración material con los elementos constructivos.

Algunas de las estrategias básicas para mejorar la trabajabilidad en relación con los factores son: usar una consistencia plástica que permita una fácil extensibilidad de la masa del mortero, mejorar la retención de agua utilizando arenas finas y de baja absorción, seleccionar cementos de granulación de alta finura, utilizar aditivos plastificantes y de grano fino como las cenizas volantes, y aumentar aún más el tiempo de mezcla mediante retardantes.

### 2.3.10 Compresión de los morteros

Entre las propiedades mecánicas del mortero se encuentra la resistencia a compresión (León & Rodríguez, 2022), se considera la más importante y crucial, puesto a que influye en gran medida en la durabilidad del material (Contreras et al., 2023). El objetivo principal de esta prueba es verificar que los componentes del mortero resistirán las fuerzas que se aplicarán externamente (Wahab et al., 2019).

Al medir la resistencia a compresión, se construyen cubos de mortero con lados de 50 mm. El procedimiento de llenado de los cubos y la prueba se realizan de acuerdo con las directrices establecidas en ASTM C 109, que incluye la creación, curado y ensayo de compresión de muestras cúbicas de mortero (Mendoza et al., 2016). Además, para realizar este experimento en el laboratorio, se necesita de una Máquina de Compresión SHIMADZU CONCRETO 2000X. A continuación en la Figura 12, se aprecia la prensa japonesa SHIMADZU CONCRETO 2000X.

**Figura 12.** Prensa japonesa SHIMADZU CONCRETO 2000X



La resistencia a la compresión del mortero, en este caso, está directamente relacionada con el volumen de cemento y la relación de peso de agua a cemento W/C. En la cantidad total de agua utilizada para preparar el mortero, una parte de ella es absorbida por los

agregados, y el resto se denomina agua libre. Solo una cierta porción de agua libre puede reaccionar con el cemento. El agua en exceso, que no participa en la reacción, se introduce durante la mezcla y luego se evapora, dejando vacíos en forma de burbujas de aire. Así, la porosidad debida a las burbujas de aire formadas resulta en una mayor trabajabilidad del mortero. Agregar más agua resulta en una reducción de la resistencia. Por otro lado, una relación agua-cemento demasiado baja conduce a mezclas secas que son difíciles de compactar, resultando en porosidad y, por lo tanto, pérdida de resistencia (Ávila et al., 2019).

De acuerdo con la norma ASTM C109/C109M-20 (2020), las cantidades de material necesarias para preparar entre seis y nueve especímenes son las siguientes:

- Cemento: 500 g - 740 g
- Arena: 1375 g - 2035 g
- Agua: 242 ml - 359 ml

La preparación de muestras implica un procedimiento de curado que previene la retracción del mortero durante el fraguado. Los períodos de curado recomendados son: 7, 14, 21 o 28 días, lo que permite que el mortero alcance sus propiedades máximas. No curar adecuadamente por niveles de agua insuficientes o al requerir menos del tiempo de fraguado prescrito, puede hacer que la resistencia mecánica disminuya hasta un 30% del valor esperado (Ávila et al., 2019). A continuación en la Tabla 3, se detalla la clasificación de los morteros de pega para mampostería simple según la resistencia a la compresión.

**Tabla 3:** Clasificación de los morteros de pega para mampostería simple según resistencia a la compresión

<b>Tipo de Mortero</b>	<b>Resistencia a la compresión mínima (MPa)3 días</b>	<b>Resistencia a la compresión mínima (MPa)7 días</b>	<b>Resistencia a la compresión mínima (MPa)14 días</b>	<b>Resistencia a la compresión mínima (MPa)28 días</b>
M	6.88	11.18	15.48	17.2
S	4.96	8.06	11.16	12.4
N	2.08	3.38	4.68	5.2

O	0.96	1.56	2.16	2.4
K	0.20	0.325	0.45	0.5

*Fuente: Tomado de Ávila et al. (2019)*

### 2.3.11 Flexibilidad de los morteros

Los paneles o superficies cerámicas de gran formato, en especial los que reciben alta insolación, requieren mayor flexibilidad con el objeto de evitar problemas de adherencia. También la sobrecarga cíclica puede generar daños: los movimientos de expansión y contracción, de forma repetitiva, perjudican la adherencia y eventualmente, por efecto de fatiga del material, originan daños severos como rupturas o desprendimientos. En este sentido, la flexibilidad es, sin lugar a dudas, el recurso más eficaz para mitigar estas complicaciones (Medeiros et al., 2019).

La resistencia a la flexión de los morteros se realiza conforme a lo citado en la norma, usando fibras de 40 x 40 x 160 mm como probetas prismáticas (ASTM C348-21, 2021). Por otro lado, para calificar la flexibilidad de un mortero adhesivo debe cumplir con los límites máximos de deformación y carga mínima en las condiciones de ensayo de flexión. En dichos ensayos se utiliza un panel de poliestireno expandido sobre el que se coloca una capa de mortero de 3 mm de espesor. El mortero alcanza la flexibilidad requerida cuando la carga de rotura es igual o superior a 3N, además de que la deformación correspondiente a este valor, debe ser, no menor a 5mm (Medeiros et al., 2019). Asimismo, para realizar el experimento en el laboratorio, se necesita de la Prensa CBR, la cual está equipada con un medidor de carga colocado en el centro de sus anillos. A continuación en la Figura 13, se aprecia a detalle la prensa de compresión de baja capacidad

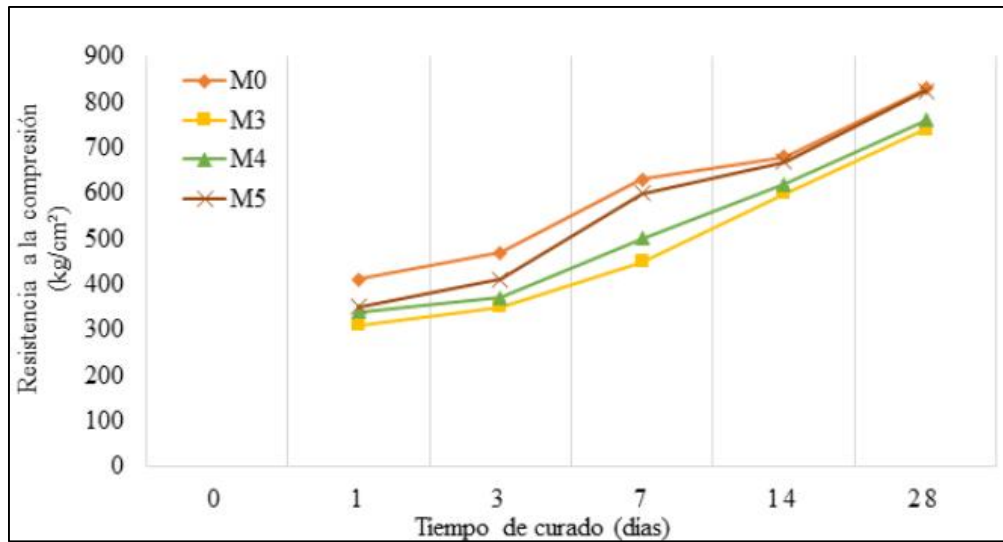
**Figura 13.** Prensa de compresión de baja capacidad



### **2.3.12 Polvo de mármol como sustituto parcial de cemento.**

El polvo de mármol tiene alto contenido de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ , por lo que se puede usar como un aditivo en los morteros y concretos a base de cemento Portland. El polvo de mármol en adiciones de un 3%- 5% en las pastas de cemento Portland no se altera mecánicamente, por el contrario, se han incrementado sus características mecánicas (Moreno et al., 2022). Por otro lado, El-Sayed et al. (2018) al hacer sustituciones del 3, 4 y 5% del peso del cemento por polvo de mármol, exponen que por la gran cantidad de  $\text{CaCO}_3$ , las características del cemento no se afectaron. A su vez, se realizaron ensayos de los métodos de resistencia a compresión en las porciones de cemento a la edad de 1, 3, 7, 14 y 28 días, durmiendo los resultados que, en el tiempo de curado mayor, se logra mayor resistencia.

**Tabla 4:** Resistencia a la compresión de las pastas de cemento Portland endurecidas que incorporan 3%(M3), 4% (M4) y 5%(M5) de residuos de polvo de mármol versus tiempo de curado



**Fuente:** Tomado de El-Sayed et al. (2018)

En la Tabla 4, se visualiza que el espécimen con una sustitución del 5% de cemento por polvo de mármol M5 alcanzó a los 28 días de curado una resistencia a la compresión igual a la muestra control M0 cuyo mortero esculpido está compuesto por cemento Portland ordinario. A diferencia de las muestras con adición de 3% y 4% que presentó valores de resistencia menor que M5 y M0. Dichos resultados corroboran que el uso de polvo de mármol en la elaboración de morteros y cementos es factible técnicamente y al mismo tiempo, constituir una alternativa sustentable desde el punto de vista económico y ambiental al darle utilidad a un residuo industrial que de otra manera sería considerado basura. (El-Sayed et al,2018).

### **2.3.13 El polvo de mármol y su aplicación en morteros.**

Dentro de la industria de la construcción, los morteros de cemento Portland son uno de los más utilizados, debido a su durabilidad y versatilidad. Sin embargo, la fabricación de cemento es uno de los principales contribuyentes a la emisión de CO<sub>2</sub> debido al alto consumo de energía durante su producción. Para mitigar los impactos ambientales, una

serie de estudios experimentales han buscado abordar el problema mediante la sustitución parcial del cemento con otros materiales, como polvo de mármol, en un esfuerzo por reducir el impacto ambiental mientras se mantienen las propiedades mecánicas del mortero. Específicamente, se probó la sustitución del 10% de cemento con polvo de mármol en especímenes de referencia, lo que resultó en los hallazgos presentados en la Tabla 5, (Moreno et al., 2022).

**Tabla 5.** *Proporciones de mortero*

<b>Mezcla</b>	<b>Ref</b>	<b>10% Cemento</b>
A/C	0.61	0.68
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	275	276
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	450	405
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	1350	1350
Polvo de mármol (kg/m <sup>3</sup> )	0	45

*Fuente:* Tomado de Moreno et al. (2022)

#### **2.4 Normativas del mortero para el pegado de cerámica.**

Las normas son importantes porque aseguran calidad, durabilidad y resistencia en los pegados de cerámicas. Entre las normas importantes la ASTM tiene tres de rango internacional; la ASTM C109/C109M-20 que detalla la resistencia a la compresión de morteros hidráulicos y por último la ASTM C1329-05 que regula el desempeño del mortero para unidades de mampostería.

#### **2.5 Normativa ASTM C109/C109M-20**

Con este método, se determina la resistencia a compresión de los morteros de cemento hidráulico utilizando especímenes cúbicos de 50 mm, 2 pulgadas por lado. El mortero se produce mezclando una parte de cemento con dos puntos setenta y cinco partes de arena en masa. Para los cementos Portland, se modifica la relación agua-cemento según los valores aceptados de las normas. Para otros tipos de cemento, la norma requiere que el agua añadida sea suficiente para obtener un flujo de  $110 \pm 5$  después de 25 golpes en una mesa de flujo. Las losas de concreto se vierten en los moldes, se endurecen mediante compactación en dos etapas y se curan durante 24 horas dentro de los moldes. Luego se

desmoldan para su inmersión en agua saturada de cal hasta la prueba (ASTM C109/C109M-20, 2020).

### **2.5.1 Normativa ASTM C1329-05**

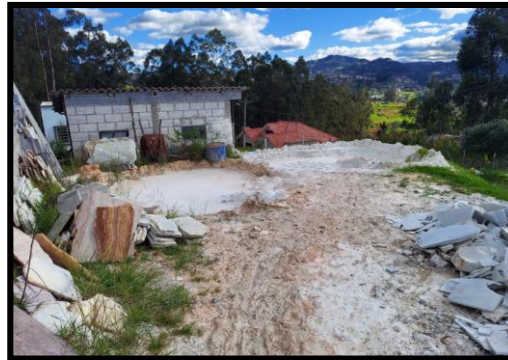
Para mortero para la prueba de incorporación de aire, retención de agua, resistencia a la compresión y prueba de retención de agua, el agua que se añadirá se determina que produzca un valor de flujo de 11065, según lo determinado por el método C 109/C 109M. La arena se compondrá de 810 g de arena estándar clasificada y 810 g de arena estándar de grano 20-30. Además, la cantidad de agua que se añadirá y el peso total del mortero se calculan para incluir 1620 g de arena y 'X' g de cemento. (ASTM C1329-05, 2012).

## CAPÍTULO III ELABORACIÓN DEL MORTERO

### 3.1 Introducción

Para la implementación de la propuesta se tomó en cuenta, como punto de partida, la inspección del sitio en donde se encuentra el residuo del mármol gris tal como indica la Figura 14. Este se localiza dentro de la provincia del Azuay, en la República del Ecuador, específicamente en la ciudad de Cuenca, sector Baguanchi, en la vía Monay–Baguanchi–Paccha. La visita permitió obtener una idea del comportamiento de la materia prima para su posible uso en la elaboración del mortero. Se constató que la empresa no realiza ningún tratamiento de reciclaje, ya que su única actividad consiste en recolectar el residuo de mármol gris en pozos. Este material es posteriormente vendido para el sistema constructivo, utilizándose en el recubrimiento de paredes como empaste en viviendas.

*Figura 14: Estanques del desecho del mármol gris*



De esta manera, se visitó distintos lugares en la ciudad de Cuenca donde se trabaja con mármol, con el fin de obtener el desecho del mármol gris y así reciclar dicho material. En la actualidad, este residuo se genera principalmente en el sector de Baguanchi y en el Valle, considerados los mayores productores en el ámbito del corte de mármol. Con la recolección de este material se procedió a su reutilización, aplicándole el tratamiento adecuado para obtener un polvo fino, el cual fue empleado en la composición de un mortero que se pretende utilizar en el área constructiva para el pegado de cerámica en espacios interiores.

Asimismo, con la reutilización de esta pasta blanquecina se busca reducir la contaminación en las áreas verdes que rodean la fábrica de Baguanchi.

### **3.2 Descripción del proceso para la elaboración del mortero con material reciclado**

Para dar cumplimiento al objetivo específico se realizó el siguiente procedimiento en el diseño y ensayos.

Se trata de una investigación de carácter experimental, desarrollada en laboratorio, enfocada en la elaboración de mezclas con los siguientes materiales: cemento, arena, mármol gris molido empleado como material reciclado y previamente sometido a un proceso de secado, así como aditivos de tipo acelerante.

Una vez establecido el lugar de donde se recicló el residuo de mármol, se procedió a determinar los parámetros empleados en la elaboración de las mezclas y en los ensayos del material. Entre estos se incluyeron la determinación de materia orgánica, los pesos específicos y volumétricos, así como el análisis granulométrico.

En nuestro país no existe una normativa específica para morteros elaborados a partir de mármol gris reciclado; por ello, resulta necesario desarrollar un modelo que permita establecer procedimientos comparativos y definir estándares de calidad. En este contexto, se plantea la formulación de un mortero uniforme destinado al pegado de cerámica de libre distribución, empleando los materiales disponibles a nivel local. Con este objetivo, el material fue caracterizado mediante la determinación del módulo de finura y la densidad, así se elaboraron morteros con dosificaciones de 1:3 y 1:3,5.

La elección de esta dosificación se fundamenta en la ausencia de guías precisas en la bibliografía consultada para establecer una dosificación específica. Asimismo, este tipo de dosificaciones se ha estandarizado en diversos proyectos de investigación. El objetivo principal fue evaluar el comportamiento de los morteros y establecer una dosificación

modelo que pueda compararse con la obtenida a partir de material reciclado de mármol gris.

Los resultados de los ensayos permitieron determinar la dosificación ideal con la que se debe fabricar el mortero patrón. A esta dosificación ideal se le sumaron porcentajes correspondientes del 50 y 100% del desecho del mármol gris en reemplazo del carbonato de calcio del mortero patrón. Este último pasó por un proceso de moldeado y prensado en moldes suministrados por el laboratorio de la universidad UCACUE.

Una vez finalizado el diseño del mortero, se colocó las muestras cúbicas de 5x5x5 cm en la prensa para evaluar sus características de resistencia a la compresión. Posteriormente, se recopiló y analizó los resultados para elaborar el documento final.

### **3.2.1 Preparación de la materia prima (agregados)**

#### **3.2.1.1 Residuo del mármol gris**

Tras la identificación y adquisición de la materia prima sustituto del carbonato, se llevó a cabo su elección y limpieza. Para el procedimiento, es necesario que el residuo del mármol gris esté exento de cualquier impureza que pueda impedir su adherencia con la cerámica. La pasta blanquecina reciclada se trajo de la fábrica de Baguanchi en una volqueta de 4 metros el cual fue trasladado a una fábrica para su debido tratamiento, como podemos ver en la Figura 15 y 16.

**Figura 15:** Fabrica cortadora del mármol gris Baguanchi

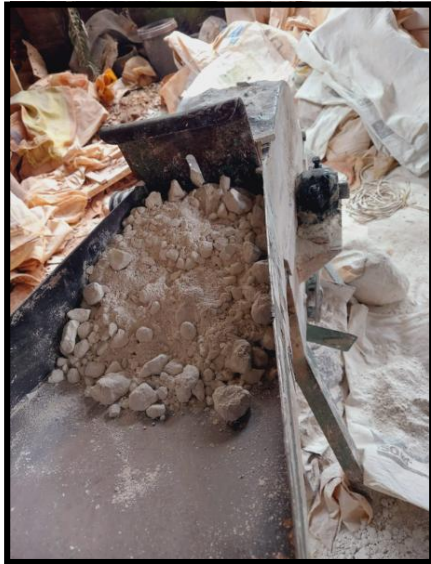


**Figura 16:** Residuo del mármol gris antes de su procesamiento



Se aprecia el ingreso de la materia prima en la tolva parte del molino eléctrico, para posteriormente ser sometido a trituración como se puede apreciar en la Figura 17, obteniendo una granulometría controlada, adecuada para el proceso subsecuente, como se puede apreciar en la Figura 18.

**Figura 17:** Residuo del mármol



**Figura 18:** Residuo en proceso de trituración



La máquina utilizada en el proceso de trituración es de procedencia norteamericana, la fábrica que la produce es Nelmor Co. Inc, modelo: G1012M1, Serie: 77-01-9899, PlasticMachinery.

El material triturado pasa por el tamiz en una zaranda número 200 de manera que se obtuvo una granulometría ideal para la utilización del diseño del mortero a desarrollar. A continuación, en las Figuras 19 y 20, se puede observar Tamizadora #200 y Residuo tamizado.

**Figura 19:** Tamizadora #200



**Figura 20:** Residuo tamizado



El material resultante de la trituración posee ciertas condiciones similares al árido fino, y es bajo este criterio que inicialmente se estableció de manera empírica el tamaño apropiado

de la trituración. Luego, la materia prima se sometió a un estudio granulométrico en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Cuenca. El agregado fino debía estar ordenado entre los límites fino y grueso, y poseer una granulometría apropiada.

### 3.2.1.2 Árido fino

Procedencia del árido fino: Río Jubones, que es parte de la parroquia Santa Isabel.

Para que no afecte la resistencia del diseño del mortero, se aseguró que este material esté libre de impurezas orgánicas y sea inerte.

El agregado fino debe tener una granulometría apropiada (ASTM 33) y estar graduado entre los límites grueso y fino. A continuación en la Figura 21 y 22, se puede apreciar el secado de la arena, así como el molde para lograr el estado del árido.

*Figura 21: Secado de la arena*



*Figura 22: Molde cónico, para saber el estado del árido*



Para el cálculo granulométrico del árido fino, este debe estar en un estado entre seco y húmedo.

### 3.3 Cálculo granulométrico del árido fino (módulo de finura)

Se indica que el agregado fino arena está dentro de los límites establecidos por la norma ASTM 136-06 B basado en la arena de OTTAWA [31].

La granulometría del árido fino se presenta a continuación, con un módulo de finura de 1,1 que está dentro del rango de finura. A continuación en la Tabla 6, se muestran las características de la granulometría del árido fino.

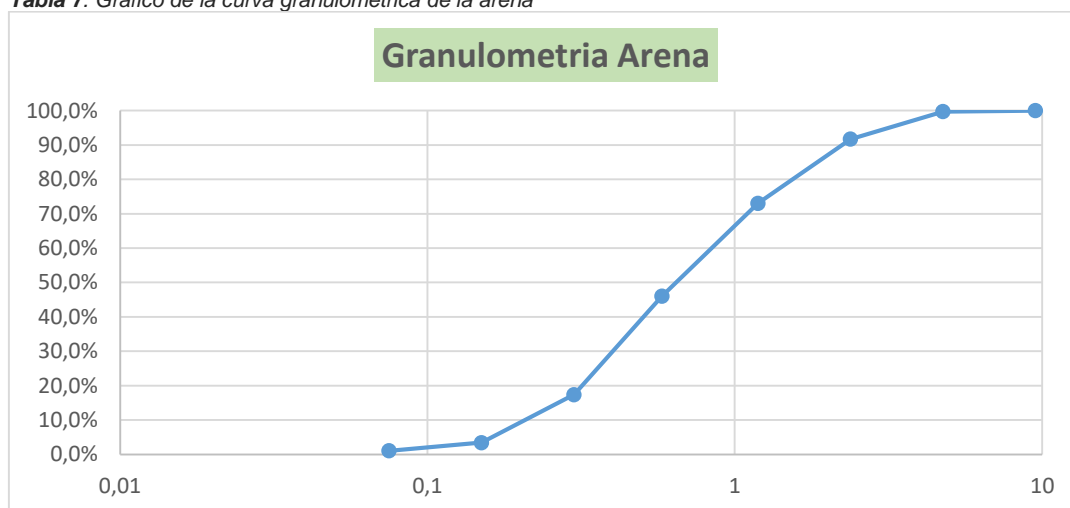
**Tabla 6.** Granulometría del árido fino

# TAMIZ	ABERTURA	PESO RETENIDO (gramos)	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% PASA
3/8	9,52	0	0	0,0%	100,0%
4	4,76	1,9	1,9	0,3%	99,7%
8	2,38	51	52,9	8,3%	91,7%
16	1,19	119	171,9	26,9%	73,1%
30	0,58	172,3	344,2	53,9%	46,1%
50	0,3	183,2	527,4	82,6%	17,4%
100	0,15	89	616,4	96,6%	3,4%
200	0,075	15,09	631,49	98,9%	1,1%
<b>FONDO</b>		6,8			
<b>TOTAL</b>		638,29			

*Fuente:* Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

A continuación en la Tabla 7, se aprecia el proceso para la obtención del porcentaje de absorción de la arena en condiciones superficialmente seca y saturada.

**Tabla 7.** Gráfico de la curva granulométrica de la arena



*Fuente:* Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

### **3.3.1 Cemento**

El cemento es el elemento que se utiliza para unir o compactar las partículas de los agregados, consiguiendo así la unión de los materiales pétreos que conforman una masa coherente, dura y compacta.

La variedad de cemento que mayormente se usa en la ciudad de Cuenca es como aglomerante utilizado para la elaboración del mortero en cemento portland aglomerante utilizado para la elaboración del mortero en cemento portland clase I.

La calidad del cemento portland debe alcanzar los estándares de calidad. conforme a la normativa ASTM C150. El cemento que se emplee en la construcción la producción mortero debe acatar las exigencias de la normativa. con la NTE INEN 152[32].

El cemento Guapan se encuentra en la mayoría del sur del país. Ecuador, con destacadas propiedades fundamentadas principalmente en la finura de este material es de 4000 ppm, lo que lo convierte en un material de gran calidad. Es requerido por la mayoría de los técnicos relacionados con el sector de la edificación, así como todas las industrias de hormigón del sector.

### **3.4 Diseño de morteros**

Se consideró que, para la creación y diseño del mortero se realizaron dos patrones 1-3,5 y 1-3, los materiales empleados son producidos y extraídos de la zona austral de nuestro país.

#### **3.4.1 Confección del mortero: cemento, árido fino, residuo del mármol y agua.**

Para la elaboración del mortero que sirve como base para la confección de las probetas cúbicas de 5 x 5 x 5 cm. Se utiliza, cemento, árido fino, residuo del mármol y agua.

El árido fino es sometido a dos primeros ensayos: módulo de finura y ensayo de la densidad, Norma INEN 294.

Así, los procedimientos empleados para la creación de los morteros se originaron a partir del acuerdo establecido en el libro materiales instructivo sobre mecánica de suelos para el ensayo de suelos.

El procedimiento para obtener una adecuada dosificación del mortero fue formulado con los siguientes pasos:

Se realizó un cálculo de gravedad específica de los agregados grueso y fino del cemento, agua, arena y caolín como mezcla del patrón uno y así obtener una dosificación adecuada del diseño para el mortero.

### 3.4.2 Cálculos del mortero patrón

$$H_2O = 220 \text{ LT} / \text{ m}^3$$

$$Y_{H_2O} = 1000 \text{ Kg} / \text{ cm}^3 \text{ (densidad del agua)}$$

$$Y_{\text{Cemento}} = 2900 \text{ Kg} / \text{ cm}^3 \text{ (densidad del cemento)}$$

$$a/c = 0.5$$

$$C = 440 \text{ Kg}$$

$$\text{Agregamos} = 440 \times 3 = 1320 \text{ Kg}$$

Volumen m<sup>3</sup> Húmedo

$$C = 440 \text{ Kg} / 2900 \text{ Kg} / \text{ m}^3 = 0.15 \text{ m}^3 \quad 440$$

$$H_2O = 220 \text{ Kg} / 1000 \text{ Kg} / \text{ m}^3 = 0.22 \text{ m}^3 \quad 220$$

$$\text{Are agreg} = 1320 \text{ kg} / 2478 \text{ kg} / \text{ m}^3 = 0.53 \text{ m}^3 \quad 1320$$

$$\text{Carbonato} = 1 - (0.151 + 0.22 + 0.53) = 0.1 \quad 260$$

Volumen M<sup>3</sup> materiales secos

A continuación en la Tabla 8, se visualiza las cantidades de los diferentes agregados para el diseño del mortero patrón.

**Tabla 8.** Resultados del cálculo de la muestra patrón

	Seco	1 cubo	8 cubos
Cemento	440kg	55g	440g
H2O	220L/cm3	33.5L/cm3	268L/cm3
Arena	1272kg	159g	1272g
Carbonato de calcio	260kg	32.5g	260g
<b>TOTAL</b>	<b>2192kg</b>	<b>280g</b>	<b>2240g</b>

**Fuente:** Fuente: Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

### 3.4.3 Dosificación: peso para 12 morteros

Ya obtenido los resultados para el diseño de un cubo 5x5x5 se multiplicó cada resultado por ocho para obtener un volumen total de mezcla de 2240g.

Los agregados cemento, agua, arena y carbonato se pesa de acuerdo a los cálculos, para la muestra patrón como podemos ver en las Figuras 23, 24, 25, 26, para su posterior mezcla.

**Figura 23:** Peso del cemento



**Figura 24:** Peso del agua en una probeta



**Figura 25:** Peso de la arena



**Figura 26:** Peso del caolín



En la Figura 27, 28 y 29, en este procedimiento, se mezcla en seco con un bailejo el cemento, la arena y el carbonato hasta conseguir una amalgama total de todos los agregados, posteriormente se vertió el agua para su mezcla y así conseguir una pasta homogénea y colocarlos en los moldes 5x5x5cm

**Figura 27:** Mezcla de los áridos



**Figura 28:** Mezcla de los áridos más agua



**Figura 29:** Mortero, pasta



En la Figura 30 y 31, se puede apreciar el proceso de elaboración de los morteros en probetas cúbicas de cobre 5 x 5 x5cm.

**Figura 30:** Moldes 5x5x5cm



**Figura 31:** Vertido del mortero en moldes



En la Figura 32 y 33, las probetas utilizadas para la elaboración de los cubos son normadas y de uso común en los diferentes laboratorios vinculadas al mundo de la construcción. Luego de haber sido limpiados adecuadamente se procedió a revestirlos de un desmoldante para alcanzar un correcto desmoldamiento de los doce cubos planteados para cada dosificación. Cada dosificación se vertió en cuatro probetas con la finalidad de obtener doce cubos por cada una de ellas; el proceso de relleno se lo hizo por tres capas de 1.5 cm de espesor aproximadamente y cada una se compactó con un pisón normalizado a razón de ocho golpes en un sentido y ocho golpes en otro sentido, posteriormente la superficie externa fue alisada con una paleta apropiada para el proceso.

**Figura 32:** Golpes para una mejor compactación



**Figura 33:** Moldes pulidos para su secado



En la Figura 34, 35 y 36, cada dosificación fue desmoldada a las 24 horas para su posterior curado en agua.

**Figura 34:** Desmolde de cubos



**Figura 35:** Vertido de agua



**Figura 36:** Curado de cubos



#### **3.4.4 Ruptura de probetas.**

Una vez cumplido el tiempo determinado según la norma se procedió a realizar el ensayo a la compresión, previo a ser medidas y pesadas como se puede ver en las Figuras 37 y 38, para cada una de las dosificaciones.

**Figura 37:** Medición de cubos 5x5



**Figura 38:** Cubos pesados



En las Figuras 39 y 40, se observa el rompimiento de los moldes sometidos a compresión. Los resultados de las diferentes dosificaciones de la mezcla patrón se pueden apreciar en el cuadro de la Tabla 8, donde se especifica las medidas, pesos, área, volumen, fechas de rotura por día, carga y resistencia de cada mortero.

**Figura 39:** Ruptura de cubos



**Figura 40:** Cubos rotos



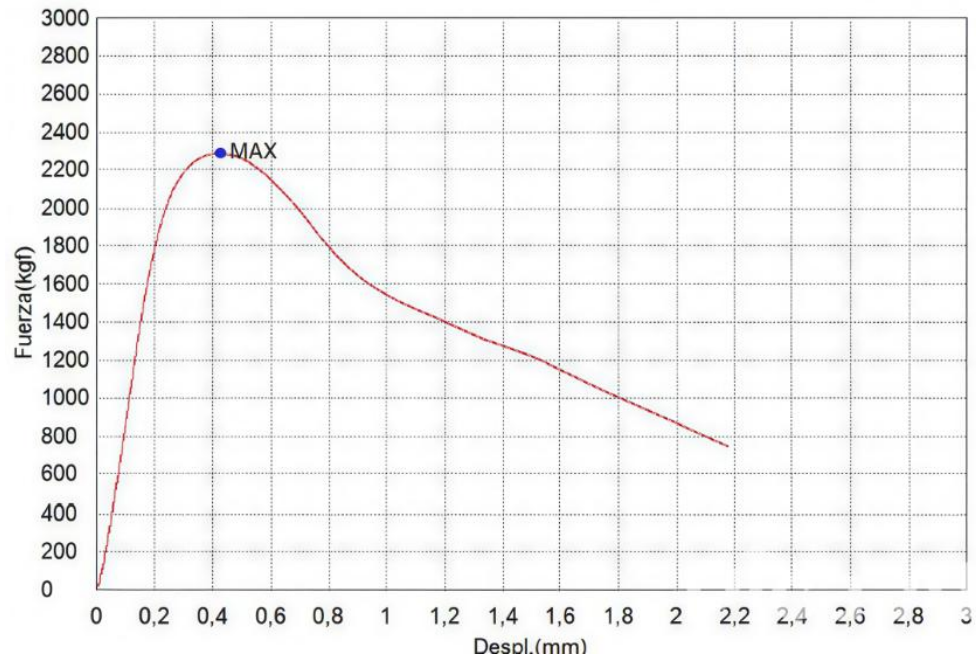
### **3.5 Valores del patrón con un tiempo de curado de 7 días.**

En la Tabla 9, se puede apreciar que en la muestra patrón con los agregados cemento, agua, arena, y carbonato dio un valor de 91,5153kg de esfuerzo máximo lo cual indica que es un Morteros tipo "S", además se visualiza que la curva ilustra la respuesta del material bajo carga, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 91,5153kgf, siguiendo de un desplazamiento de 0,46mm.

**Tabla 9. Muestra patrón**

Nombre de archivo de ensayo	_20250815_1248.xtux	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	15/8/2025
Fecha de ensayo	15/8/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	2,5mm/min
Forma	Plana	N°de partidas:	1
N°de muestras:	1		

Nombre Parametros Unidad	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._ESFUERZO Calc. at Entire Areas kgf/cm2	Max._Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm	Max._Deformacion Calc. at Entire Areas %
1_1	2287,88	91,5153	0,42700	0,83725
Media	2287,88	91,5153	0,42700	0,83725
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000



*Fuente: Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.*

*Nota.* El gráfico representa el comportamiento de la cuba bajo carga, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 91,5153kgf seguido de un desplazamiento de 0,46mm.

### **3.5.1 Muestra 50% caolín, 50% material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 7 días.**

En la Tabla 10, se empleó el 50% del material reciclado del mármol gris y el 50% de carbonato

dándonos resultados satisfactorios con una resistencia de 88,83kg de comparación, llegando a los estándares adecuados de resistencia.

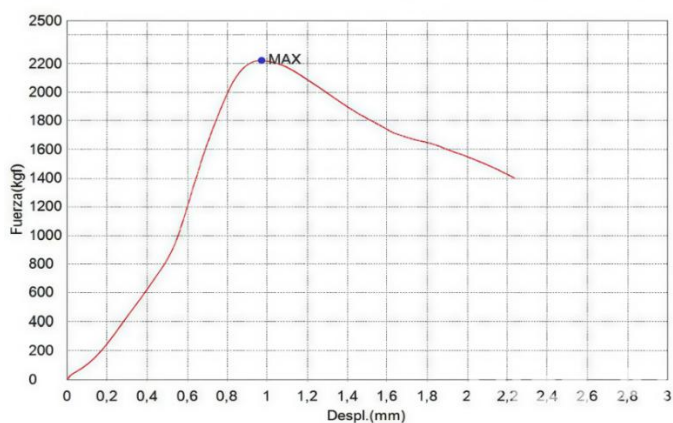
Se lo podría clasificar como un **Morteros tipo “S”**, por el motivo que este funciona adecuadamente en estructuras que son sometidas a fuerzas compresivas moderadas, además se necesita unión efectiva entre los elementos, cuando el mortero actúa como el único agente de adherencia, por ejemplo, en la colocación de cerámicos o plintos de barro cocido sobre planos verticales, es óptimo.

### **3.5.2 Valores del patrón con un tiempo de curado de 7 días, mezcla del 50%-50% del material reciclado del mármol gris.**

**Tabla 10.** Muestra 50% carbonato, 50% residuo del mármol gris

Nombre de archivo de ensayo	_20250815_1316.txt	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	15/8/2025
Fecha de ensayo	15/8/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	2,5mm/min
Forma	Plana	N°de partidas:	1
N°de muestras:	1		

Nombre	Max._Fuerza	Max._ESFUERZO	Max._Desplazamiento	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2	mm	%
1 - 1	2220,75	88,8300	0,97438	1,91054
Media	2220,75	88,8300	0,97438	1,91054
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000



**Fuente:** Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

*Nota.* En la gráfica se aprecia que hay un aumento secuencial inicial del esfuerzo hasta llegar a su máximo pico de 88,33kgf, seguido de una disminución graduada a medida que la deformación unitaria pasa por un rango de 2,22.

### 3.5.3 Muestra del 100% del material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 7 días.

La mezcla de la Tabla 11, muestra el mortero ya sometido a compresión lo que reflejó un resultado netamente satisfactorio de 95,6308kg dado que cumple con los estándares de compresión dentro de los rangos de resistencia.

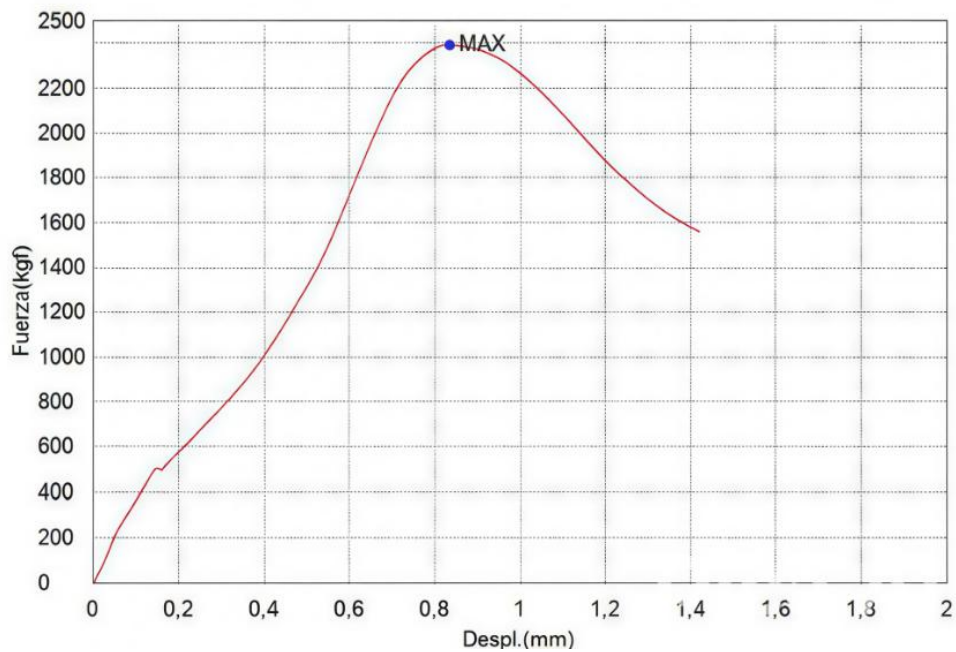
De esta forma se lo podría clasificar como un **Morteros tipo “S”**, puesto que este mortero funciona adecuadamente en estructuras que son sometidas a fuerzas compresivas moderadas, además se necesita unión efectiva entre los elementos, cuando el mortero

actúa como el único agente de adherencia, por ejemplo, en la colocación de cerámicos o plintos de barro cocido sobre planos verticales, es óptimo.

**Tabla 11.** Muestra de 100% residuo del mármol gris 7 días de curado.

Nombre de archivo de ensayo	_20250815_1308.xtux	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	15/8/2025
Fecha de ensayo	15/8/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	2,5mm/min
Forma	Plana	N°de partidas:	1
N°de muestras:	1		

Nombre	Max._Fuerza	Max._ESFUERZO	Max._Desplazamiento	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2	mm	%
1_1	2390,77	95,6308	0,83675	1,64069
Media	2390,77	95,6308	0,83675	1,64069
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000



**Fuente:** Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

**Nota.** En la gráfica de la curva refleja un aumento de la fuerza hasta un primer pico, seguido de una secuencia continua hasta llegar a su pico máximo de 95,6308kgf .

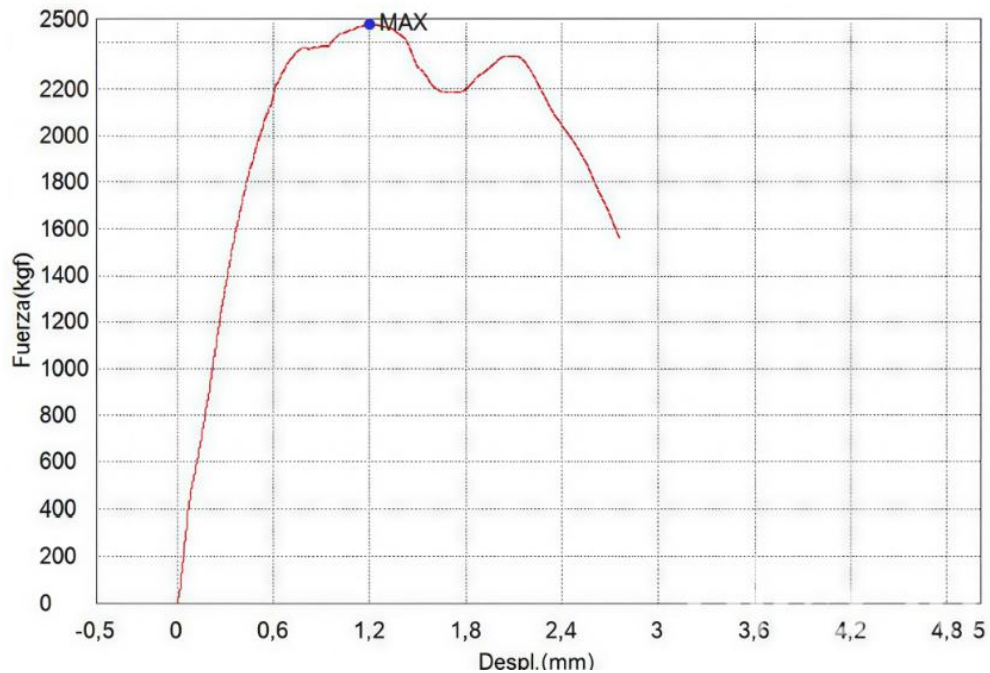
### 3.5.4 Valores del patrón con un tiempo de curado de 28 días.

De acuerdo a la Tabla 12, se puede apreciar que en la muestra patrón con los agregados cemento, agua, arena, y carbonato dio un valor de 99,15kg de esfuerzo máximo lo cual indica que es un **Morteros tipo “S”**

Tabla 12. Muestra patrón de los 28 días de curado

Nombre de archivo de ensayo	_20250911_1550.xtux	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	11/9/2025
Fecha de ensayo	11/9/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	2,5mm/min
Forma	Plana	N° de partidas:	1
N° de muestras:	1		

Nombre Parametros Unidad	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max_ESFUERZO Calc. at Entire Areas kgf/cm2	Max_Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm	Max_Deformacion Calc. at Entire Areas %
1_1	2478,88	99,1551	1,20338	2,40675
Media	2478,88	99,1551	1,20338	2,40675
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000



Fuente: Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

*Nota.* La gráfica de la curva muestra un incremento inicial rápido del esfuerzo hasta llegar a un primer pico seguido de una continua fuerza, para luego aumentar a su pico máximo de 99,1551, para luego tener una caída constante y luego formarse un nuevo pico y seguido de una disminución final de la curva.

### **3.5.5 Muestra 50% caolín 50% material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 28 días.**

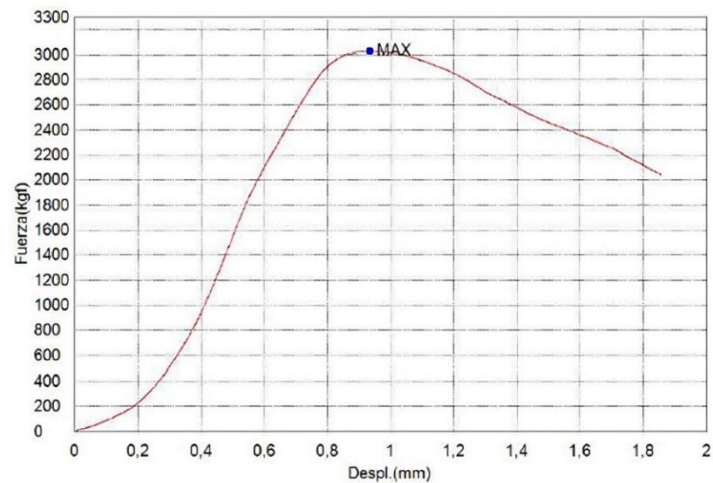
A continuación en la Tabla 13, se empleó el 50% del material reciclado del mármol gris y el 50% de carbonato, mostrando resultados satisfactorios con una resistencia de 121,145kg de comparación, llegando a los estándares adecuados de resistencia.

Clasificándolo como un **Morteros tipo “S”**, considerando que este mortero funciona adecuadamente en estructuras que son sometidas a fuerzas compresivas moderadas, además se necesita unión efectiva entre los elementos, cuando el mortero actúa como el único agente de adherencia, por ejemplo, en la colocación de cerámicos o plintos de barro cocido sobre planos verticales, es óptimo.

**Tabla 13.** Muestra 50% caolín, 50% residuo del mármol gris 28 días de curado

Nombre de archivo de ensayo	_20250911_1618.xtux	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	11/9/2025
Fecha de ensayo	11/9/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	2.5mm/min
Forma	Plana	Nº de partidas:	1
Nº de muestras:	1		

Nombre Parametros	Max. Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max. ESFUERZO Calc. at Entire Areas kgf/cm2	Max. Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm	Max. Deformacion Calc. at Entire Areas %
1_1	3028.62	121.145	0.93488	1.86975
Media	3028.62	121.145	0.93488	1.86975
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



**Fuente:** Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

*Nota.* El gráfico de curva exhibe un aumento de la fuerza con poca pendiente, hasta aumentar su pendiente y llegar a un pico máximo continuo de 121,145 seguido de una caída lenta de la curva de fuerza.

### 3.5.6 Muestra del 100% del material reciclado del mármol gris con un tiempo de curado de 28 días.

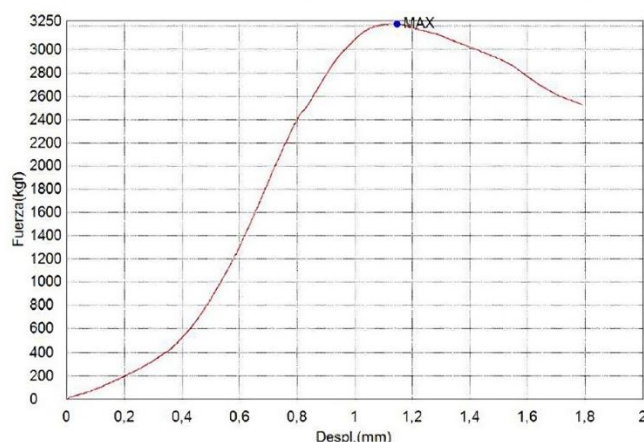
De acuerdo a la Tabla 14, esta mezcla del mortero ya sometido a compresión, muestra un resultado netamente satisfactorio de 128kg cumpliendo con los estándares de compresión dentro de los rangos de resistencia.

Donde podría entrar a la clasificación de un **Morteros tipo "S"**, dado que este mortero funciona adecuadamente en estructuras que son sometidas a fuerzas compresivas moderadas, además se necesita unión efectiva entre los elementos, cuando el mortero actúa como el único agente de adherencia, por ejemplo, en la colocación de cerámicos o plintos de barro cocido sobre planos verticales, es óptimo.

**Tabla 14.** Muestra de 100% residuo del mármol gris 28 días de curado.

Nombre de archivo de ensayo	.20250911_1645.xtux	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	11/9/2025
Fecha de ensayo	11/9/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	2.5mm/min
Forma	Plana	N°de partidas:	1
N°de muestras:	1		

Nombre	Max_Fuerza	Max_ESFUERZO	Max_Desplazamiento	Max_Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2	mm	%
1_1	3220.75	128.830	1.14700	2.29400
Media	3220.75	128.830	1.14700	2.29400
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



**Fuente:** Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

*Nota.* El gráfico de la curva se observa que la curva muestra un incremento inicial de la fuerza relativamente continuo hasta llegar a su punto máximo de 128.830kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de la deformación de la curva.

### 3.6 Prueba de adherencia

Para la prueba de adherencia se utilizó el material reciclado del mármol gris al 100% en sustitución del carbonato.

En este ensayo se realizaron dos moldes, los cuales cada uno se pegaron tres ladrillos alternados como podemos ver en la Figura 41 y 42, se dejó secar durante 28 días para sus posteriores ensayos en la máquina de compresión de hormigones.

**Figura 41:** Pegado de ladrillos



**Figura 42:** Montaje de ladrillos



En la Figura 43, se aprecia la culminación del armado de los moldes de los ladrillos que se secaron durante 28 días.

**Figura 43:** Ladrillos pegados



### 3.6.1 Prueba de adherencia muestra 1

En las Figuras 44, 45 y 46, se puede observar los moldes sometidos a compresión en la máquina de prensa de compresión de hormigón y en la Figura 46, el molde llega a su punto máximo de su resistencia generando el desprendimiento entre ladrillo y mortero.

**Figura 44:** Calibración de prensa.



**Figura 45:** Prueba 1 a compresión



*Figura 46: Ruptura de junta*



Según la Tabla 15, en el punto máximo de fuerza da un valor de 388,195kg en este pico más alto genera el desprendimiento entre el ladrillo y el diseño del mortero, con la siguiente formula de esfuerzo se sabe que en un cm<sup>2</sup> podrá soportar en un área 1.05 kg/cm<sup>2</sup>.

Cálculo del lado de la junta de pegado entre ladrillo y mortero.

$$A = 12,5 \times 12,8$$

$$A = 160 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esfuerzo} = P / A$$

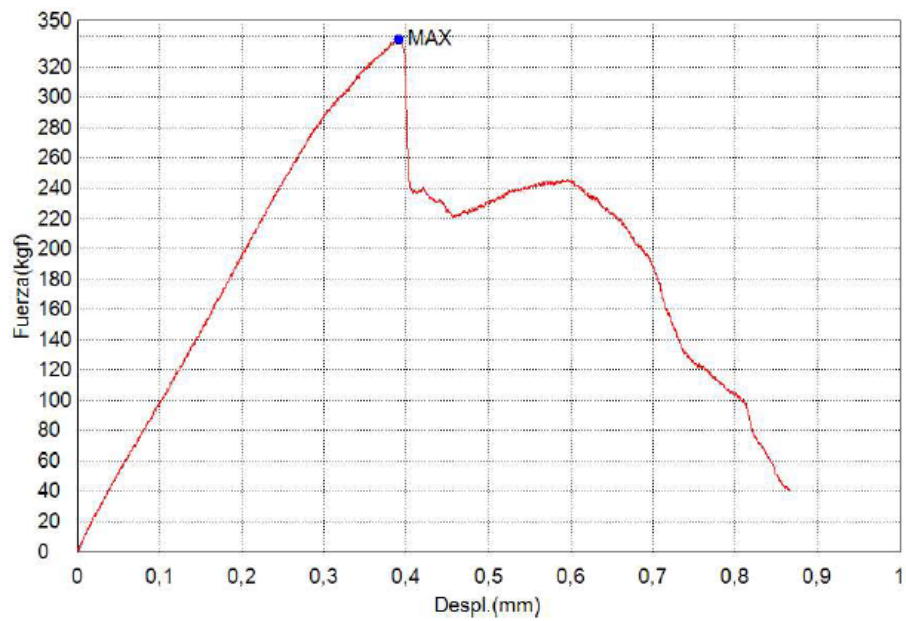
$$\text{Esfuerzo} = 388 / 160$$

$$\text{Esfuerzo} = 2,425 \text{ kg/cm}^2$$

**Tabla 15. Muestra de adherencia prueba 1 a los 28 días de curado.**

Nombre de archivo de ensayo	_20250911_1658.xtux	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	11/9/2025
Fecha de ensayo	11/9/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	1mm/min
Forma	Plana	N°de partidas:	1
N°de muestras:	1		

Nombre Parametros Unidad	Max. Fuerza Calc. at Entire Areas kgf
1 _ 1	338,195
Media	338,195
Desviacion Estandar	--
Rango	0,00000



**Fuente:** Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

*Nota.* El gráfico de la curva se muestra curvas complejas con múltiples picos incluido un pico principal de alto esfuerzo llegando a 338,195kg.

### 3.6.2 Prueba de adherencia muestra 2

En la Figura 47, 48 y 49, se visualiza el control, verificación y el desprendimiento del molde de la muestra dos y obteniendo datos exactos de la resistencia de adherencia del mortero.

*Figura 47: Controlando las pruebas*



*Figura 48: Ruptura de junta*



*Figura 49: Juntas desprendidas*



Se aprecia en la Tabla 16, que en el punto máximo de fuerza da un valor de 427,663kg en este pico más alto genera el desprendimiento entre el ladrillo y el diseño del mortero, con el siguiente cálculo del esfuerzo se sabe que, en un cm<sup>2</sup>, podrá soportar en un área 1.33 kg/cm<sup>2</sup>.

Cálculo del lado de la junta de pegado entre ladrillo y mortero.

$$A = 12,5 \times 12,8$$

$$A = 160 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esfuerzo} = P / A$$

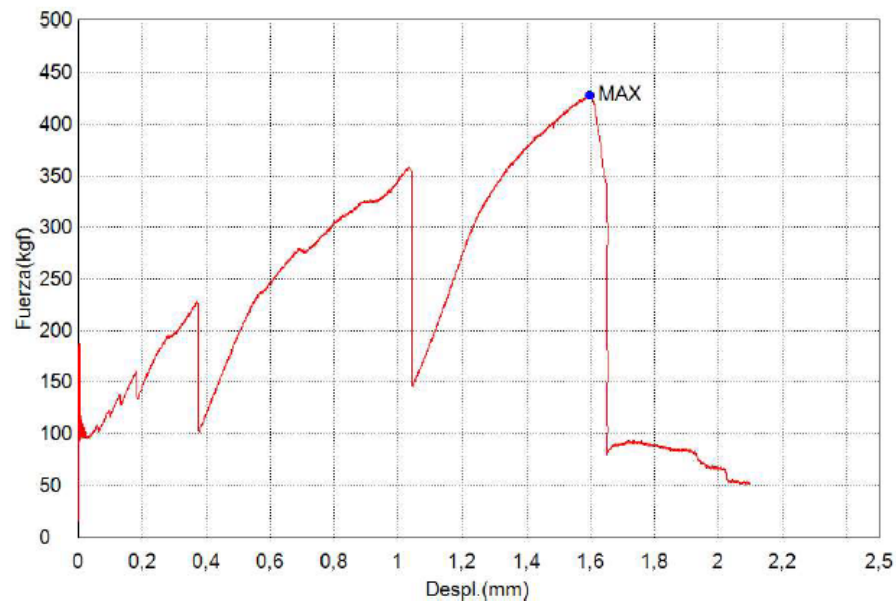
$$\text{Esfuerzo} = 427,663 / 160$$

$$\text{Esfuerzo} = 1.33 \text{ kg/cm}^2$$

**Tabla 16.** Muestra de adherencia prueba 2 a los 28 días de curado.

Nombre de archivo de ensayo	_20250911_1720.xtux	Nombre de metodo de ensayo	
Operador		Fecha de informe	11/9/2025
Fecha de ensayo	11/9/2025	Modo de Ensayo	Sencillo
Tipo de ensayo	Compresion	Velocidad	1mm/min
Forma	Plana	Nº de partidas:	1
Nº de muestras:	1		

Nombre Parametros	Max. Fuerza Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf
1_1	427,663
Media	427,663
Desviacion Estandar	--
Rango	0,00000



**Fuente:** Laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

*Nota.* El gráfico de la curva ilustran tres picos de fuerza máxima, con caídas abruptas hasta llegar a un pico máximo de 427,663kg.

### 3.6.3 Comparación de resultados de la experimentación del mortero con material reciclado del mármol gris.

En la Tabla 17 se observa, los resultados obtenidos de la muestra patrón, se calculó el peso del saco comercial en gramos dando un resultado de 25000 gramos.

*Tabla 17. Cantidades de los áridos.*

	<b>Seco</b>	<b>1 cubo</b>	<b>101.5 cubos</b>
Cemento	440g	55g	5582.5g
Arena	1272g	159g	16138.5g
Residuo mármol	260g	32.5g	3298.5g
<b>TOTAL</b>	<b>2192g</b>	<b>260g</b>	<b>25000g</b>

En la Tabla 18, se visualiza los precios comparativos del carbonato y el material reciclado del mármol gris.

*Tabla 18. Precios comparativos del carbonato y residuo del mármol.*

50000g carbonato	\$11.86
50000g de residuo del mármol	\$4

En la Tabla 19, el cálculo para obtener un saco de 25000 gramos de los diferentes materiales como el cemento la arena y el carbonato se obtuvo un costo final \$3.81 dólares, específicamente en materia prima y mano de obra por hora.

*Tabla 19. Costos de los áridos y costo total del mortero.*

<b>Descripción</b>	<b>Precio</b>	<b>101.5 cubos</b>	<b>Precio U</b>
1g de cemento	\$0.000158	5582.5g	\$0.88
1g de arena	\$0.00000906	16138.5g	\$0.15
1g carbonato	\$0.000237	3298.5g	\$0.78
	<b>SUB TOTAL</b>	<b>25000g</b>	<b>\$1.81</b>
<b>1 hora de trabajo</b>			<b>\$1.95</b>
	<b>TOTAL</b>		<b>\$3.76</b>

Se obtuvo un valor total de 3.76 dólares de un saco de 25000g.

En la Tabla 20, se visualiza las diferentes cantidades y precios como el cemento, arena y residuo del mármol gris, para obtener un saco de 25000 gramos de mortero para el pegado de la cerámica, así se obtuvo un costo total de \$3.11 dólares, específicamente en materia prima y mano de obra por hora.

**Tabla 20.** Costos de los áridos y costo total del mortero con el material reciclado.

<b>Descripción</b>	<b>Precio</b>	<b>101.5 cubos</b>	<b>Precio U</b>
1g de cemento	\$0.000158	5582.5g	\$0.93
1g de arena	\$0.00000906	16138.5g	\$0.15
1g de residuo del mármol	\$0.00008	3298.5g	\$0.26
	<b>SUB TOTAL</b>	<b>25000g</b>	<b>\$1.34</b>
<b>1 hora de trabajo</b>			<b>\$1.95</b>
	<b>TOTAL</b>		<b>\$3.29</b>

Con los costos obtenidos de la Tabla 19 y 20, se puede visualizar que el precio del mortero patrón por saco de 25000 gramos es de \$3.76 dólares y el mortero con el material reciclado dio un valor de \$3.29 dólares por un saco de 25000 gramos, dando una diferencia de \$0.47 dólares.

#### 4. CONCLUSIÓN

- La presente investigación abordó la factibilidad constructiva y económica de un mortero para el pegado de cerámica utilizando como aglomerante principal el residuo del mármol gris, un desecho industrial abundante en el sector de Baguanchi, Cuenca. Los hallazgos confirman la viabilidad de esta propuesta, no solo como una solución innovadora en el ámbito de la construcción, sino también como una estrategia efectiva para mitigar el impacto ambiental generado por la disposición de los residuos.
- Los objetivos específicos del estudio se cumplieron satisfactoriamente. A través de una exhaustiva recopilación bibliográfica, se identificaron las características y normativas esenciales que debe cumplir un mortero para uso interior, sirviendo de base para el diseño de las pruebas experimentales. Las pruebas de laboratorio, que evaluaron la resistencia a la compresión, la adherencia y la flexión, demostraron que la dosificación optimizada del mortero de mármol gris reciclado supera los estándares requeridos.
- Desde una perspectiva económica, el estudio determinó cualitativa y cuantitativamente que la utilización del residuo reduce significativamente los costos de producción del mortero, convirtiéndole en una alternativa competitiva frente a los productos comerciales tradicionales. El factor, combinado con el beneficio ambiental de reutilizar un material que de otro modo contaminaría el entorno, hace que la propuesta sea no solo viable, sino también sumamente atractiva y sostenible.
- En resumen, la investigación concluye que el mortero a base de residuo de mármol gris es una alternativa constructiva superior, tanto técnica como económica. Su implementación no solo contribuiría a la reducción de la huella ambiental en la provincia de Azuay, sino que también ofrecería un nuevo y valioso aglomerante para el sector de la construcción, demostrando que la innovación y la sostenibilidad pueden ir de la mano para generar soluciones que benefician tanto a la industria como al planeta.

## 5. RECOMENDACIONES

- Para alcanzar el 100% de eficiencia y poder determinar cuál es el mortero más adecuado para pegar cerámica en interiores, es crucial llevar a cabo una mayor cantidad de pruebas patrón.
- Sería beneficioso llevar a cabo mezclas y curado en condiciones ambientales reales, no solo en el laboratorio. Para ello, se deberían tener en cuenta variables como la pérdida de resistencia de los distintos tipos de piso que se pegarían con cerámica utilizando el diseño del mortero y las diferentes clases de fraguados prolongados.
- Para analizar el rendimiento a largo plazo del diseño del mortero, se aconseja realizar pruebas de penetración de cloruros, absorción capilar y ciclos de temperatura climática.
- Si se decide aplicar el diseño del mortero utilizando material reciclado, es necesario establecer una guía técnica que contenga indicaciones concretas acerca de la mezcla, el manejo, el curado y las temperaturas mínima y máxima para asegurar las características del mortero.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, J., Martín, A., & García, P. (1995). *Historia de los morteros*. Universidad de Navarra. [https://www.researchgate.net/publication/273110688\\_Historia\\_de\\_los\\_morteros](https://www.researchgate.net/publication/273110688_Historia_de_los_morteros)
- Arce, F. (2022). Beneficios ambientales del reciclaje de residuos plásticos posconsumo para la producción de postes en Mendoza, Argentina. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(Supl.1), 1–11. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.nSupl.1.2022.2145>
- Ashurst, J. (1983). *Mortars, plasters and renders in conservation*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000084146>
- ASTM C109/C109M-20. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). In *ASTM International*. [https://store.astm.org/c0109\\_c0109m-20.html](https://store.astm.org/c0109_c0109m-20.html)
- ASTM C348-21. (2021). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. <https://store.astm.org/c0348-21.html>
- ASTM C1329-05. (2012). *Standard Specification for Mortar Cement*. <https://store.astm.org/c1329-05.html>
- Ávila, J., Eguez, H., & Roa, O. (2019). Evaluación del Comportamiento en Compresión de Morteros Reforzados con Óxido de Grafeno y Costos Inherentes al Proceso Productivo de Mezcla. *Investigatio*, 12, 49–66. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2019.12.3>
- Aydin, E., & Şahan, H. (2019). High-volume marble substitution in cement-paste: Towards a better sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 237, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117801>
- Baca, N. (2019). *Estudio comparativo de las propiedades físico-mecánicas del mortero de cemento Pórtland tipo Ip elaborado con residuos de mármol en porcentajes del 10%, 15% y 20% producto de la explotación de la cantera de Cullpahuanca - Quiquijana Quispicanchi-Cusco* [Tesis de grado, Universidad Andina del Cusco]. [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UACI\\_0ce3ff7a22e4af79b85414c3e3e0b6e5](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UACI_0ce3ff7a22e4af79b85414c3e3e0b6e5)
- Betancourt, J., Cortés, F., Rentería, J., Díaz, A., & Vaquera, M. (2019). Comportamiento de mezclas de mortero con residuos de mármol (polvo), cáscara de nuez y mucílago de nopal. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 13(1), 1–17. <https://www.redalyc.org/journal/1939/193958877005/193958877005.pdf>
- Betancourt, J., Lizárraga, L., Narayanasamy, R., Olguín, F., & Sáenz, A. (2015). Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 9(3), 1–12.

[https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/7250/revision\\_sobre\\_el\\_uso\\_de\\_residuos\\_de\\_marmol.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/7250/revision_sobre_el_uso_de_residuos_de_marmol.pdf)

- Betancourt, J. R., González, M. A., & Rentería, J. (2023). Ladrillos a base de desechos de mármol, una propuesta sustentable. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39, 617–626. <https://doi.org/10.20937/RICA.54673>
- Böttger, K., Thiedig, F., & Knöfel, D. (2002). Keltisch-römische Mörtel vom Magdalensberg in Kärnten / Celtic-Roman Mortars from Magdalensberg in Carinthia. *Restoration of Buildings and Monuments*, 8(1), 19–42. <https://doi.org/10.1515/rbm-2002-5638>
- Calle, M. (2018). *Influencia de la granulometría y el tipo de cemento en la contracción por secado de morteros estructurales* [Tesis de grado, Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/c19549d7-fd54-4802-b22a-fd5d18927fce/content>
- Cañarte, D., Bravo, Y., & Guerra, J. (2023). Estudio comparativo del comportamiento de morteros de albañilería elaborados con varios tipos de agregados finos. *Dom. Cien.*, 9(3), 1606–1623. <https://doi.org/10.23857/dc.v9i3.3516>
- Cañola, H., Granda, F., & Arroyave, J. (2020). Emulsión asfáltica como alternativa de reducción de la presencia de eflorescencias en morteros de pega. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 103–114. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021009>
- Carrera, S. (2016). *Mármol gris (3.8.4)* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/14273>
- Contreras, L., Mayorga, D., Peñafiel, G., & Navarro, C. (2023). Análisis Comparativo de la Resistencia a compresión entre el hormigón tradicional y el preparado con escombros de hormigón. *Investigación y Desarrollo*, 18(1), 1–14. <https://doi.org/10.31243/id.v18.2023.2020>
- Córdova, D., & Rodríguez, B. (2025). *Determinación de las propiedades de mortero con polvo de mármol como agregado fino mejorando la resistencia contra la salinidad, Trujillo* [Tesis de grado, Universidad Privada Antenor Orrego]. [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPAO\\_8a9c263c35136bde1f22feaf343f5e86](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPAO_8a9c263c35136bde1f22feaf343f5e86)
- Cornejo, P. (2016). *Depósitos minerales no metálicos del Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional - Ingeniería Geológica del Ecuador. [https://www.researchgate.net/profile/Paul-Cornejo-2/publication/317613312\\_DEPOSITOS\\_MINERALES\\_NO\\_METALICOS\\_DEL\\_ECUADOR/links/594339ffa6fdccb93ab276a7/DEPOSITOS-MINERALES-NO-METALICOS-DEL-ECUADOR.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Paul-Cornejo-2/publication/317613312_DEPOSITOS_MINERALES_NO_METALICOS_DEL_ECUADOR/links/594339ffa6fdccb93ab276a7/DEPOSITOS-MINERALES-NO-METALICOS-DEL-ECUADOR.pdf)

- Danielsson, S. E., Møller, P., & Randers, L. (2018). *Modelling CO<sub>2</sub> savings and economic benefits for the Kalundborg Symbiosis*. Symbiosis Center Denmark. <https://www.symbiosis.dk/wp-content/uploads/2018/06/KalundborgSymbiosisPaperLCA2018-06.pdf>
- Departamento de inteligencia de mercado. (2021). *Mármol y Travertino en Ecuador*. PromPerú. <https://boletines.exportemos.pe/recursos/boletin/Perfil%20Producto%20Mercado%20-%20M%C3%A1rmoles%20y%20travertinos%20en%20Ecuador%202021.pdf>
- El-Sayed, H. A., Farag, A. B., Kandeel, A. M., Younes, A. A., & Yousef, M. M. (2018). Characteristics of the marble processing powder waste at Shaq El-Thoaban industrial area, Egypt, and its suitability for cement manufacture. *HBRC Journal*, *14*(2), 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2016.06.002>
- Frierman, J. C. (1971). Lime-Burning Precursor of Fired Ceramics. *Israel Exploration Journal*, *21*(4), 212–216. <https://www.jstor.org/stable/27925291>
- Frizot, M. (1975). Mortiers et enduits peints antiques. Etude technique et archéologique. *Revue Archéologique Du Centre de La France*, *14*(4), 316–317. [https://www.persee.fr/doc/racf\\_0220-6617\\_1975\\_num\\_14\\_3\\_2006\\_t1\\_0353\\_0000\\_2](https://www.persee.fr/doc/racf_0220-6617_1975_num_14_3_2006_t1_0353_0000_2)
- Furlan, V., & Bisseger, P. (1975). Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique. *Revue Suisse d'Art et d'Archéologie*, *32*, 1–14. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=zak-003%3A1975%3A32%3A%3A176>
- GAD Municipal Cuenca. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca*. GAD Municipal Cuenca.
- García, G. (2020). *Análisis de la adherencia entre morteros y piezas cerámicas* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.64577>
- Ghorab, H., Ragai, J., & Antar, A. (1986). Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars. Part I: X-ray diffraction studies. *Cement and Concrete Research*, *16*(6), 813–822. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90004-9)
- Glogic, E., Sonnemann, G., & Young, S. B. (2021). Environmental Trade-Offs of Downcycling in Circular Economy: Combining Life Cycle Assessment and Material Circularity Indicator to Inform Circularity Strategies for Alkaline Batteries. *Sustainability*, *13*(3), 1040–1051. <https://doi.org/10.3390/su13031040>
- González, M., & Guzmán, J. (2017, September 9). *El palacio de Knossos*. *Historia Universal*. Historia Universal. <https://mihistoriauniversal.com/edad-antigua/palacio-de-knossos>
- Gutiérrez, E. M., García, T. E., Roca, K. L., & Valiente, Y. M. (2024). Gestión de residuos sólidos y la contaminación ambiental en el sector urbano. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, *9*(17), 108–118. <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i17.3156>

- Gutiérrez, F., Jáuregui, M., Bohigas, R., & Sarabia, P. (1989). Análisis de morteros medievales de dos castillos de Cantabria. España. *Materiales de Construcción*, 39(213), 37–45. <https://doi.org/10.3989/mc.1989.v39.i213.815>
- Jouve, A. D., Andrade, O. A., & Areche, J. N. (2021). Mortero con incorporación de fibra de coco y cerámica para acabados interiores de edificaciones. *Polo de Conocimiento*, 6(4), 315–336. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2564>
- Kabeer, S. A., & Vyas, A. K. (2018). Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. *Construction and Building Materials*, 165, 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061>
- Kakavas, P., Lycourghiotis, S., & Kalapodis, N. (2022). Characterization of the Historical Mortars Concerning Ancient Monuments-Experimental Approach. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4070263>
- Kanhai, G., Fobil, J. N., Nartey, B. A., Spadaro, J. V., & Mudu, P. (2021). Urban Municipal Solid Waste management: Modeling air pollution scenarios and health impacts in the case of Accra, Ghana. *Waste Management*, 123, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.005>
- Khan, A., Patidar, R., & Pappu, A. (2021). Marble waste characterization and reinforcement in low density polyethylene composites via injection moulding: Towards improved mechanical strength and thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 269, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121229>
- Krivenko, P. (2017). Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 323–334. [https://www.ceramic-science.com/articles/all-articles.html?article\\_id=100561](https://www.ceramic-science.com/articles/all-articles.html?article_id=100561)
- Kulali, F. (2020). Simulation studies on the radiological parameters of marble concrete. *Emerging Materials Research*, 9(4), 1341–1347. <https://doi.org/10.1680/jemmr.20.00307>
- Lamdan, M., & Davies, M. (1983). *Mollusca from Yiftah'el, Lower Galilee, Israel* (Vol. 87). L Antropologie. [https://www.persee.fr/doc/paleo\\_0153-9345\\_1987\\_num\\_13\\_1\\_4425](https://www.persee.fr/doc/paleo_0153-9345_1987_num_13_1_4425)
- Lara, M., Sanz, D., & Del Pino, I. (2020). Morteros históricos en las construcciones de Quito de los siglos XVI, XVII y XVIII. *Ge-Conservación*, 17, 71–81. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7600262>
- León, L., & Rodríguez, C. (2022). Factores que influyen en la resistencia a la compresión del hormigón. Estado del arte. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 16(3), 1–11. <https://www.redalyc.org/journal/1939/193972950003/html/>
- Lordsleem, A. C., & Faro, H. (2017). Descolamento de revestimento de fachada: Estudo de caso. *Revista ALCONPAT*, 7(2), 148–159. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i2.126>

- Malinowski, R., & Garfinkel, Y. (1991). *Prehistory of Concrete*. Concrete International. [https://www.researchgate.net/publication/321318324\\_R\\_Malinowski\\_and\\_Y\\_Garfinkel\\_1990\\_Prehistory\\_of\\_Concrete\\_Concrete\\_International\\_133\\_62-68](https://www.researchgate.net/publication/321318324_R_Malinowski_and_Y_Garfinkel_1990_Prehistory_of_Concrete_Concrete_International_133_62-68)
- Martinet, G., Deloye, F., & Deloye, F. (1992). Caractérisation des mortiers pharaoniques du temple d'Amon à Karnak. *Bulletin de Liaison Du Laboratoire de Physique et Chimie*, 181, 7. <https://bibliotheques.inp.fr/Default/doc/SYRACUSE/353780/caracterisation-des-mortiers-pharaoniques-du-temple-d-amon-a-karnak>
- Martínez, J. (2022). El consumo de agua en la construcción romana con morteros de cal: un método de cálculo. *Arqueología de La Arquitectura*, 19, 1–18. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2022.008>
- Massuela, D., Pons, J. A., Ramírez, M. C., Ulloa, M., & Cachapa, A. (2022). Caracterización química y mineralógica del pasivo ambiental generado por la minería del mármol en Namibe, Angola. *Minería y Geología*, 38(3), 277–287. <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v38n3/1993-8012-mg-38-03-277.pdf>
- Medeiros, J. S., Sabbatin, F. H., & Akiama, S. Y. (2019). *Flexibilidad de morteros adhesivos: un estudio experimental* [Ponencia, Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo]. <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/9823012s.pdf>
- Mejía, G., López, T., & Haro, F. (2024). La percepción social acerca del reciclaje en el municipio de Xalisco, Nayarit. *Journal of Negative and No Positive Results*, 8(2), 531–541. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.4806>
- Mendieta, J. (2020). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquial de Sinincay*. [https://sinincay.gob.ec/wp-content/uploads/2024/06/19.PDOT\\_2021\\_2023.pdf](https://sinincay.gob.ec/wp-content/uploads/2024/06/19.PDOT_2021_2023.pdf)
- Mendoza, J., Flores, J., De Los Santos, E., & Garcés, P. (2016). Durabilidad de morteros de reparación sustentables expuestos a ambiente industrial. *Revista ALCONPAT*, 6(1), 41–51. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ralconpat/v6n1/2007-6835-ralconpat-6-01-41.pdf>
- Moreno, A. N., García, M. A., Avalos, F., & Múzquiz, E. M. (2022). Residuos de mármol en materiales para la construcción: una revisión del uso del polvo de mármol en morteros, concretos y ladrillos. *Revista ALCONPAT*, 12(2), 162–183. <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.522>
- Morgan, G. (1988). A survey of Romano-British wall-plaster. *Journal of the Oil and Colour Chemists' Association*, 71(71), 417–418. <https://archaeologydataservice.ac.uk/library/browse/details.xhtml?recordId=3114582&recordType=Journal>

- Murra, J. A., Baldo, E. G., Verdecchia, S. O., Ramacciotti, C. D., & Galindo, C. (2021). Los mármoles cálcicos de El Escorial (Complejo Metamórfico Cushamen, Macizo Norpatagónico): caracterización isotópica de  $^{87}\text{Sr}$ - $^{86}\text{Sr}$  y edad de sedimentación. *Andean Geology*, 49(1), 77–93. <https://doi.org/10.5027/andgeoV49n1-3387>
- Navarro, R., Cruz, A. S., Arriaga, L., & Baltuille, J. M. (2017). Characterization of the main types of marble extracted in the area of Macael (Almeria, southeastern Spain) and its historical importance. *Boletín Geológico y Minero*, 128(2), 345–361. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.128.2.005>
- Navas, A., & Arias, E. (2015). Propiedades del mortero empacado en seco para pega de bloques de mampostería. *Ingeniería*, 25(2), 45–58. <https://doi.org/10.15517/jte.v25i2.18228>
- NEC. (2014). *Mampostería estructural*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/10.-NEC-SE-MP-Mamposteria-Estructural.pdf>
- Newton, R., & Sharp, J. (1987). An investigation of the chemical constituents of some renaissance plasters. *Studies in Conservation*, 32(4), 163–175. <https://doi.org/10.1179/sic.1987.32.4.163>
- Ontiveros, E. (2001). Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: morteros empleados en construcciones históricas. *PH: Boletín Del Instituto Andaluz Del Patrimonio Histórico*, 9(34), 78–89. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=190104>
- Orlandos, A. (1969). Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs II. *Travaux et Mémoires*, 16(2), 315–316. [https://cefael.efa.gr/detail.php?site\\_id=1&actionID=page&serie\\_id=TravMem&volume\\_number=16&issue\\_number=1&page\\_number=3](https://cefael.efa.gr/detail.php?site_id=1&actionID=page&serie_id=TravMem&volume_number=16&issue_number=1&page_number=3)
- Patiño, J. A., Gutiérrez, Y. C., Leal, J. I., Castro, J. J., & Hurtado, O. (2018). Estudio del comportamiento de muestras de mortero natural sometidas a esfuerzo de compresión. *Lámpsakos*, 20, 22–28. <https://doi.org/10.21501/21454086.2736>
- Pie, I. O., Acebal, A. T., & Arada, M. (2023). Propuesta de aplicaciones para los mármoles blancos de la sierra de la Gran Piedra. *Revista Cubana de Química*, 35(1), 167–184. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v35n1/2224-5421-ind-35-01-167.pdf>
- Ponce, C., Carrillo, J., & López, A. (2021). Fabricación de ladrillos con polvo-residuo de mármol en México Propiedades físicas y mecánicas del polvo-residuo de mármol de la provincia de la Comarca Lagunera, en México. *Revista de Arquitectura*, 22(2), 106–113. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2554>

- Ragai, J. (1988). Surface and bulk properties of Ancient Egyptian mortars, Part IV: Thermal studies. *Cement and Concrete Research*, 18(2), 179–184. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90002-6)
- Ragai, J. (1989). Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars, Part v: Thermal studies (b). *Cement and Concrete Research*, 19(1), 42–46. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90063-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90063-X)
- Ragai, J., Ghorab, H. Y., & Antar, A. (1987). Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars, part II: Adsorption and infrared studies. *Cement and Concrete Research*, 17(1), 12–21. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90053-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90053-6)
- Rassineux, F., Petit, J., & Meunier, A. (1989). Ancient Analogues of Modern Cement: Calcium Hydrosilicates in Mortars and Concretes from Gallo–Roman Thermal Baths of Western France. *Journal of the American Ceramic Society*, 72(6), 1026–1032. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1989.tb06263.x>
- Raza, D., & Acosta, J. (2022). Planificación ambiental y el reciclaje de desechos sólidos urbanos. *Economía Sociedad y Territorio*, 22(69), 519–544. <https://doi.org/10.22136/est20221696>
- Rocha, F. (2024). Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento con Incorporación de Esferas de Poliestireno. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 7704–7715. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i2.11199](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.11199)
- Ruz, S. (2023, May 18). *La Esfinge de Giza: orígenes y características de este monumento egipcio*. Psicología y Mente. <https://psicologiaymente.com/cultura/esfinge-de-giza>
- Sadurní, J. M. (2024, September 2). *Keops, la leyenda negra del constructor de la Gran Pirámide*. National Geographic. [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/keops-la-leyenda-negra-del-constructor-de-la-gran-piramide\\_18856](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/keops-la-leyenda-negra-del-constructor-de-la-gran-piramide_18856)
- Salamanca, R. (2001). La Tecnología de los morteros. *Ciencia e Ingeniería*, 11, 41–48. <https://www.redalyc.org/pdf/911/91101107.pdf>
- Salvatierra, A., & Valle, A. (2021). Diseño de un mortero hidráulico, utilizando cemento blanco como aglomerante de los agregados. *Revista Científica Yachana*, 10(2), 151–160. <http://revistas.ulvr.edu.ec/index.php/yachana/article/view/737/559>
- Santarelli, L. (1960). *Elementi di chimica del cemento*. <https://www.abebooks.it/prima-edizione/ELEMENTI-CHIMICA-CEMENTO-Santarelli-Luigi-LIBRERIA/30741035148/bd>
- Secretaría de Economía de México. (2022). *Perfil de Mercado del Mármol*. Dirección General de Desarrollo Minero.

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692291/17.\\_Perfil\\_M\\_rmol\\_2021\\_\\_T\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692291/17._Perfil_M_rmol_2021__T_.pdf)

Servicio Geológico Mexicano. (2023). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*. <https://www.gob.mx/terminos>

Sickles, L. (1981). *Organics vs. synthetics : their use as additives in mortars = Rome* (1982 Rome : ICCROM, Ed.). [https://www.lrmh.fr/Default/doc/SYRACUSE/70181/organics-vs-synthetics-their-use-as-additives-in-mortars-rome?\\_lg=en-US](https://www.lrmh.fr/Default/doc/SYRACUSE/70181/organics-vs-synthetics-their-use-as-additives-in-mortars-rome?_lg=en-US)

Singh, R., Fitzgerald, S., Dada, R., & Frank, A. L. (2025). Marble Waste Dump Yard in Rajasthan, India Revealed as a Potential Asbestos Exposure Hazard. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(2), 215–222. <https://doi.org/10.3390/ijerph22020215>

Sufian, M., Ullah, S., Ostrowski, K. A., Ahmad, A., Zia, A., Śliwa, K., Siddiq, M., & Awan, A. A. (2021). An Experimental and Empirical Study on the Use of Waste Marble Powder in Construction Material. *Materials*, 14(14), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma14143829>

Trofelly, F. (2024, October 20). *A 200 años de la invención del Cemento Portland, un hito gris de la humanidad moderna*. *Tiempo Argentino*. [https://www.tiempoar.com.ar/ta\\_article/cemento-portland/](https://www.tiempoar.com.ar/ta_article/cemento-portland/)

Tugrul, E. (2019). Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of Environmental Management*, 231, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.034>

Valbuena, S., Mena, M., & García, C. (2016). Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. Estudio de caso. *Tecnura*, 20(48), 115–122. <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257046835009.pdf>

Wahab, G. M. A., Gouda, M., & Ibrahim, G. (2019). Study of physical and mechanical properties for some of Eastern Desert dimension marble and granite utilized in building decoration. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 907–915. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.003>

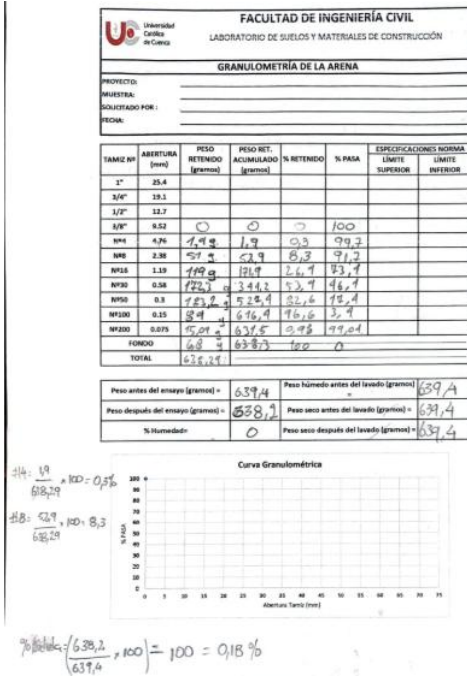
Wikipedia. (2025a, February 8). *Yiftahel*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Yiftahel>

Wikipedia. (2025b, April 16). *Hefestión (Atenas)*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Hefesti%C3%B3n\\_%28Atenas%29](https://es.wikipedia.org/wiki/Hefesti%C3%B3n_%28Atenas%29)

Wooley, L. (1958). *History Unearthed* (Vol. 21). Benin Ltd. <https://www.abebooks.com/History-Unearthed-Sir-Leonard-Woolley-Ernest/995546967/bd>

- Yamanel, K., Durak, U., İlkentapa, S., İsa Atabey, İ., Karahan, O., & Duran, C. (2019). Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar. *Revista de La Construcción*, 18(2), 290–300. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.290>
- Yifru, B. W., & Mitikie, B. B. (2020). Partial replacement of sand with marble waste and scoria for normal strength concrete production. *SN Applied Sciences*, 2(12), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03716-9>

## 7. ANEXOS



Anexo 1. Tabla granulométrica de la arena específica, agregados

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS AGREGADOS (GRUELOS Y FINOS)			
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA GRAVA: MÉTODO VOLUMÉTRICO			
A=	E	MASA EN AIRE DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	
B=	E	MASA EN AIRE DE LA MUESTRA S&S	
C=	E	MASA APARENTE EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA	
GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA AL HORNO=		$\frac{A}{B-C}$	
GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECO=		$\frac{B}{B-C}$	
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE=		$\frac{A}{A-C}$	
% DE ABSORCIÓN=		$\frac{B-A}{A} \times 100$	
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA ARENA: MÉTODO GRAVIMÉTRICO			
Materiales Presentes en el Tamiz No. 4			
A=	E	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	
B=	E	PONOMETRO + AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN	
C=	E	PONOMETRO + AGUA + MUESTRA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN	
S=	E	MASA DE LA MUESTRA S&S	
GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA AL HORNO=		$\frac{A}{B-C}$	
GRAVEDAD ESPECÍFICA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECO=		$\frac{S}{B-C}$	
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE=		$\frac{A}{A-C}$	
% DE ABSORCIÓN=		$\frac{S-A}{A} \times 100$	
OBSERVACIONES: Muestra depositada en el Laboratorio			

Anexo 2. Tabla de las fórmulas de la gravedad

$H_2O \rightarrow 2.00 \text{ kg/cm}^3$   
 $\gamma_{H_2O} \rightarrow 1000 \text{ kg/cm}^3$   
 $\gamma_{Cemento} \rightarrow 2.400 \text{ kg/cm}^3$   
 $q/c = 0.5$   
 $C = 2.00 \text{ kg/cm}^3 \cdot 0.5 = 1.00 \text{ kg/cm}^3$   
 $C = 3.84 \text{ kg/cm}^3$   
 $C = \frac{3.84 \text{ kg}}{2.400 \text{ kg/cm}^3} = 0.16 \text{ m}^3$   
 $H_2O = \frac{2.00 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/cm}^3} = 0.002 \text{ m}^3$

	1-cubos	2-cubos
C	0.018	1.8
H <sub>2</sub> O	0.025	2.5
arena	0.155	1.55
CaOH	0.032	3.2

Prueba Patrón  
Prueba Error

Anexo 3. Cálculo prueba error

$H_2O \rightarrow 2.20 \text{ kg/m}^3$   
 $\gamma_{H_2O} \rightarrow 1000 \text{ kg/m}^3$   
 $\gamma_{Cemento} 2.400 \text{ kg/m}^3$   
 $q/c = 0.5$   
 $C = 440 \text{ kg}$   
 $\text{Agregado} = 440 \times 3 = 1320 \text{ kg}$   
 $\text{Volumen Húmedo}$   
 $C = \frac{440 \text{ kg}}{2.400 \text{ kg/m}^3} = 0.183 \text{ m}^3 \times 2.400 = 440 \text{ kg}$   
 $H_2O = \frac{2.20 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.0022 \text{ m}^3 \times 1000 = 2.20 \text{ kg}$   
 $\text{Agregado} = \frac{1320 \text{ kg}}{2.448 \text{ kg/m}^3} = 0.539 \text{ m}^3 \times 2.448 = 1320 \text{ kg}$   
 $\text{CaOH} = 1 - (0.183 + 0.0022 + 0.539) = 0.276 \text{ m}^3 \times 2.60 = 717.6 \text{ kg}$

	1-cubos	2-cubos
C	5.8 kg	440 kg
H <sub>2</sub> O	33.5 kg	2.20 kg
arena	159 kg	1320 kg
CaOH	33.5 kg	2.60 kg

Dosificación 1-3  
Prueba Patrón Final

Anexo 4. Cálculo dosificación final



**Anexo 5.** *Árido sumergido en agua*



**Anexo 6.** *Secado de árido*



**Anexo 7.** *Árido colocado en probeta y pesado*



**Anexo 8.** *Árido en proceso de tamizado*



**Anexo 9.** *Secado de residuo del mármol*



**Anexo 10.** *Probetas 5x5x5 de cobre*



**Anexo 11.** *Probetas 5x5x5 de madera*



**Anexo 12.** *Probetas 5x5x5 de madera y cobre*

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Carlos Iván Pangol Veletanga** portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105035968.

En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación

“ **Propuesta de un mortero con material reciclable de desechos del mármol gris en la ciudad de Cuenca**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código

Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 29 de octubre de 2025



F: .....

Pangol Veletanga Carlos Iván