



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

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

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE  
CEMENTO ROMANO (HOT MIXING) EN HORMIGÓN  
MODERNO: UN ESTUDIO SOBRE LA  
AUTOREPARACIÓN**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

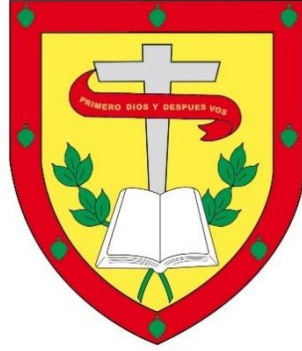
**AUTOR: ANGELO RAFAEL MOROCHO MINCHALA**

**DIRECTOR: CARLOS JULIO CORDERO CABRERA.**

**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 INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE  
CEMENTO ROMANO (HOT MIXING) EN HORMIGÓN  
MODERNO: UN ESTUDIO SOBRE LA AUTOREPARACIÓN.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: ANGELO RAFAEL MOROCHO MINCHALA**

**DIRECTOR: ING. CARLOS JULIO CORDERO CABRERA. Mgs**

**Cuenca – Ecuador**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Angelo Rafael Morocho Minchala portador de la cédula de ciudadanía N° 0106516735. Declaro ser el autor de la obra: "Análisis de la Implementación de Técnicas de Cemento Romano (Hot Mixing) en hormigón moderno: Un Estudio sobre la Autoreparación", 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, 09 de julio de 2025

  
F: .....  
Angelo Rafael Morocho Minchala  
0106516735

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo de titulación con el tema **“ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CEMENTO ROMANO (HOT MIXING) EN HORMIGÓN MODERNO: UN ESTUDIO SOBRE LA AUTOREPARACIÓN”** fue desarrollado por, **ANGELO RAFAEL MOROCHO MINCHALA**, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil 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.



**Msc. ING. CARLOS JULIO CORDERO CABRERA**

**C.I. 0103382958**

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y los valores que me inculcaron desde pequeño.

A mis maestros, por compartir su conocimiento y su pasión por el aprendizaje.

A mis amigos, por su compañía y aliento en los momentos más desafiantes.

Y a todos aquellos que, de alguna manera, formaron parte de este camino

## **AGRADECIMIENTO**

Dedico este trabajo de graduación a mis padres, por su amor incondicional, su apoyo incansable y sus sabios consejos, que han sido mi mayor fortaleza a lo largo de esta etapa.

A mi familia, por creer siempre en mí y alentarme en cada desafío.

A mis profesores y tutores, quienes compartieron su conocimiento y me guiaron con paciencia y dedicación en este camino académico.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra forma, han sido parte de esta meta alcanzada.

## RESUMEN:

El presente estudio explora el comportamiento mecánico y las características potencialmente autorreparatorias de un hormigón de inspiración romana. Se analizaron cilindros y placas elaborados con un reemplazo del 20% de cemento por ceniza volcánica y adiciones de cal viva al 5%, 10% y 15%. La mezcla fue diseñada por el método Fuller para una resistencia objetivo de 210 kgf/cm<sup>2</sup>. Los ensayos de compresión sugieren una tendencia en la que la dosificación con 5% de cal viva podría alcanzar una resistencia superior al valor de diseño, mientras que las concentraciones del 10% y 15% exhibir un desempeño mecánico inferior. No obstante, es imperativo señalar que, debido a la limitada cantidad de muestras, estos resultados no son estadísticamente concluyentes y solo indican un posible comportamiento del material bajo las condiciones estudiadas. En la evaluación de la autorreparación, las placas iniciales no evidenciaron cambios en sus fisuras. Sin embargo, al emplear un método de mezclado que promovió la activación térmica de la cal viva, se observó la formación de depósitos blanquecinos que ocluyeron parcialmente las microfisuras. Este fenómeno sugiere una posible manifestación de propiedades autorreparantes, aunque se requiere de análisis químicos más profundos para confirmar su naturaleza.

*Palabras clave:* autorreparación potencial, cal viva, ceniza volcánica, hormigón romano, resistencia a compresión

## **ABSTRACT:**

This study explores the mechanical behavior and potential self-healing characteristics of Roman-inspired concrete. Cylinders and slabs were produced with a 20% replacement of cement by volcanic ash and additions of 5%, 10%, and 15% quicklime. The mixture was designed using the Fuller method for a target strength of 210 kgf/cm<sup>2</sup>. Compression tests indicate a trend where the 5% quicklime dosage may achieve a strength exceeding the design value, whereas concentrations of 10% and 15% exhibit inferior mechanical performance. However, it is imperative to note that, due to the limited number of samples, these results are not statistically conclusive and only indicate a possible behavior of the material under the studied conditions. In the self-healing evaluation, the initial slabs showed no changes in their fissures. However, when using a mixing method that promoted the thermal activation of the quicklime, the formation of whitish deposits was observed, partially occluding the microfissures. This phenomenon suggests a possible sign of self-healing properties, although deeper chemical analysis is required to confirm its nature.

*Keywords:* potential self-healing, quicklime, volcanic ash, Roman concrete, compressive strength

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1 CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....	11
1.1 Planteamiento del problema .....	11
1.2 Objetivos .....	13
1.2.1 Objetivo general .....	13
1.2.2 Objetivos específicos .....	14
2 CAPÍTULO II: MARCO TERORICO Y ESTADO DEL ARTE .....	14
2.1 Marco teórico .....	14
2.2 Estado del arte .....	14
2.3 Conceptos .....	16
2.4 Tipo de estudio .....	18
2.5 Concreto romano antiguo .....	20
2.5.1 Antecedentes del cemento romano .....	20
2.5.2 Origen del cemento romano .....	21
2.5.3 Durabilidad en los concretos romanos .....	23
2.6 Morteros de cal caliente .....	23
2.6.1 Morteros de cal .....	24
2.6.2 Métodos de fabricación tradicional de mortero .....	25
2.6.3 Composición química del hormigón romano .....	26
2.6.4. Investigación en Privernum .....	28
2.7 Procesos de producción .....	29
2.7.1. Formulación Original .....	29
3 CAPITULO III: METODOLOGIA .....	32
3.1 Metodología .....	32
3.2 Formulación Adaptada .....	32
3.3 Elaboración de hormigón inspirado en técnicas romanas .....	35
3.4 Diseño de hormigón por el método FULLER-THOMPSON .....	37
3.5 Selección de la consistencia del hormigón .....	41
3.6 Selección de la cantidad de agua en la mezcla .....	42
3.7 Resistencia del diseño .....	44
3.8 Relación Agua-Cemento .....	44
3.9 Determinación de cemento por metro cubico de hormigón .....	45
3.10 Determinación de los porcentajes de agregados .....	46
3.11 Dosificación de materiales por metro cubico de hormigón .....	50

3.12 Corrección por humedad en los agregados .....	52
3.12.1 Corrección por humedad en el agregado grueso .....	52
3.12.2 Procedimiento del ensayo de la gravedad específica del agregado grueso .....	53
3.12.3 Cálculos de la gravedad específica de la grava .....	54
3.12.4 Procedimiento del ensayo de la gravedad específica del agregado fino .....	56
3.12.5 Ensayo del Picnómetro.....	57
3.12.6 Cálculos Gravedad específica agregado fino.....	57
3.13 Cilindros patrón .....	58
3.13.1 Formulación de cilindros patrón .....	59
3.14 Formulación de hormigones de inspiración romana .....	70
3.15 Corrección de la relación agua cemento por agua cemento y puzolana .....	72
3.16 Elaboración de cilindros y placas en concentración de 5 % de cal viva .....	74
3.17 Elaboración de cilindros y placas en concentración de 10 % de cal viva .....	100
3.18 Elaboración de cilindros y placas en concentración de 15 % de cal viva .....	120
3.19 Elaboración y Evaluación de Placas Adicionales para Análisis Complementario .....	140
3.20 Resultados del estudio .....	152
3.21 Comportamiento mecánico del hormigón.....	152
3.22 Evaluación de la posible capacidad de autoreparación .....	154
3.23 Consideraciones finales.....	155
4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	156
4.1 Conclusiones.....	156
4.2 Recomendaciones.....	160
5 ANEXOS .....	162
5.1 Bibliografía .....	162

## Índice de tablas y figuras

### Tablas

<b>Tabla 1</b> .....	37
<b>Tabla 2</b> .....	38
<b>Tabla 3</b> .....	38
<b>Tabla 4</b> .....	39
<b>Tabla 5</b> .....	39
<b>Tabla 6</b> .....	40
<b>Tabla 7</b> .....	47
<b>Tabla 8</b> .....	49
<b>Tabla 9</b> .....	50

<b>Tabla 10</b> .....	51
<b>Tabla 11</b> .....	58
<b>Tabla 12</b> .....	59
<b>Tabla 13</b> .....	69
<b>Tabla 14</b> .....	76
<b>Tabla 15</b> .....	76
<b>Tabla 16</b> .....	77
<b>Tabla 17</b> .....	77
<b>Tabla 18</b> .....	78
<b>Tabla 19</b> .....	78
<b>Tabla 20</b> .....	100
<b>Tabla 21</b> .....	101
<b>Tabla 22</b> .....	101
<b>Tabla 23</b> .....	102
<b>Tabla 24</b> .....	102
<b>Tabla 25</b> .....	120
<b>Tabla 26</b> .....	121
<b>Tabla 27</b> .....	121
<b>Tabla 28</b> .....	122
<b>Tabla 29</b> .....	122
<b>Tabla 30</b> .....	143
<b>Tabla 31</b> .....	143
<b>Tabla 32</b> .....	144
<b>Tabla 33</b> .....	144
<b>Tabla 34</b> .....	144
<b>Tabla 35</b> .....	145
<b>Tabla 36</b> .....	146
<b>Tabla 37</b> .....	146

## **Figuras**

<b>Figura 1</b> .....	25
<b>Figura 2</b> .....	28
<b>Figura 3</b> .....	30
<b>Figura 4</b> .....	41
<b>Figura 5</b> .....	42
<b>Figura 6</b> .....	43
<b>Figura 7</b> .....	43
<b>Figura 8</b> .....	44
<b>Figura 9</b> .....	45
<b>Figura 10</b> .....	46
<b>Figura 11</b> .....	48
<b>Figura 12</b> .....	49
<b>Figura 13</b> .....	60
<b>Figura 14</b> .....	61
<b>Figura 15</b> .....	62
<b>Figura 16</b> .....	63
<b>Figura 17</b> .....	64
<b>Figura 18</b> .....	65
<b>Figura 19</b> .....	66
<b>Figura 20</b> .....	67
<b>Figura 21</b> .....	68
<b>Figura 22</b> .....	71
<b>Figura 23</b> .....	75

<b>Figura 24</b> .....	80
<b>Figura 25</b> .....	81
<b>Figura 26</b> .....	83
<b>Figura 27</b> .....	84
<b>Figura 28</b> .....	85
<b>Figura 29</b> .....	86
<b>Figura 30</b> .....	87
<b>Figura 31</b> .....	87
<b>Figura 32</b> .....	88
<b>Figura 33</b> .....	90
<b>Figura 34</b> .....	90
<b>Figura 35</b> .....	93
<b>Figura 36</b> .....	93
<b>Figura 37</b> .....	95
<b>Figura 38</b> .....	95
<b>Figura 39</b> .....	96
<b>Figura 40</b> .....	97
<b>Figura 41</b> .....	97
<b>Figura 42</b> .....	98
<b>Figura 43</b> .....	98
<b>Figura 44</b> .....	99
<b>Figura 45</b> .....	99
<b>Figura 46</b> .....	104
<b>Figura 47</b> .....	104
<b>Figura 48</b> .....	105
<b>Figura 49</b> .....	107
<b>Figura 50</b> .....	108
<b>Figura 51</b> .....	109
<b>Figura 52</b> .....	110
<b>Figura 53</b> .....	111
<b>Figura 54</b> .....	112
<b>Figura 55</b> .....	114
<b>Figura 56</b> .....	114
<b>Figura 57</b> .....	115
<b>Figura 58</b> .....	115
<b>Figura 59</b> .....	116
<b>Figura 60</b> .....	116
<b>Figura 61</b> .....	117
<b>Figura 62</b> .....	117
<b>Figura 63</b> .....	118
<b>Figura 64</b> .....	118
<b>Figura 65</b> .....	124
<b>Figura 66</b> .....	124
<b>Figura 67</b> .....	125
<b>Figura 68</b> .....	127
<b>Figura 69</b> .....	128
<b>Figura 70</b> .....	129
<b>Figura 71</b> .....	130
<b>Figura 72</b> .....	130
<b>Figura 73</b> .....	132
<b>Figura 74</b> .....	133
<b>Figura 75</b> .....	133
<b>Figura 76</b> .....	134
<b>Figura 77</b> .....	134
<b>Figura 78</b> .....	136

<b>Figura 79</b> .....	136
<b>Figura 80</b> .....	137
<b>Figura 81</b> .....	137
<b>Figura 82</b> .....	138
<b>Figura 83</b> .....	138
<b>Figura 84</b> .....	139
<b>Figura 85</b> .....	139
<b>Figura 86</b> .....	141
<b>Figura 87</b> .....	141
<b>Figura 88</b> .....	142
<b>Figura 89</b> .....	147
<b>Figura 90</b> .....	147
<b>Figura 91</b> .....	148
<b>Figura 92</b> .....	149
<b>Figura 93</b> .....	149
<b>Figura 94</b> .....	150

## **1 CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Desde la antigüedad, la humanidad ha alcanzado notables logros para satisfacer sus necesidades fundamentales, adaptando y modificando el entorno a fin de hacerlo más habitable y conveniente. Sin embargo, estas transformaciones han tenido un impacto significativo en el medio ambiente, afectando negativamente tanto a la flora como a la fauna. A pesar de que “la ecología, como campo científico, emergió en la segunda mitad del siglo XIX” (Lizarazo, 2018), no fue sino hasta décadas después que los efectos ambientales de la construcción comenzaron a ser considerados seriamente. Esto ha llevado a un deterioro ambiental notable en los países desarrollados. El proceso de modernización no es uniforme ni siquiera en el mismo continente; muchos países aún están en la etapa de modernizar su infraestructura y de construir instalaciones que cumplan con las necesidades de sus ciudadanos. Este continuo desarrollo plantea la cuestión de cómo se puede avanzar en la construcción y modernización sin perpetuar los daños al medio ambiente, un dilema que es particularmente pertinente en las naciones emergentes del siglo XXI.

Incorporar estas lecciones históricas en la construcción moderna es esencial para lograr estructuras más sostenibles y duraderas. Esto implica no solo la selección de materiales y técnicas de construcción más resistentes y ecológicas, sino también un enfoque en el diseño y planificación que tenga en cuenta el impacto a largo plazo en el medio ambiente. Las construcciones sostenibles deben ser diseñadas para minimizar el uso de recursos, reducir los residuos y maximizar la eficiencia energética, a la vez que se integran armoniosamente con el entorno natural.

La construcción sostenible no solo es beneficiosa para el medio ambiente, sino que también representa una inversión económica más inteligente que a largo plazo puede significar ahorro y mayor seguridad estructural. Edificaciones que requieren menos mantenimiento y renovaciones a lo largo del tiempo pueden significar un ahorro considerable para los gobiernos y las comunidades. Además, estas prácticas sostenibles pueden estimular la innovación y crear nuevas oportunidades de empleo en sectores relacionados con materiales ecológicos y tecnologías de construcción avanzadas basadas en conocimientos antiguos.

Las construcciones de la antigua Roma, son el punto de partida para la presente investigación; las construcciones romanas, demuestran una durabilidad excepcional, habiendo sobrevivido por milenios en condiciones ambientales adversas, incluso en entornos marinos. Investigaciones científicas recientes (Seymour et al., 2023) han revelado que este rendimiento superior se debe a una ingeniería de materiales avanzada para su época. El hormigón romano, u *opus caementicium*, incorporaba cenizas volcánicas (un material puzolánico) y cal viva. Estudios recientes sugieren que la clave de su longevidad y su aparente capacidad de autorreparación radica en las técnicas de "mezcla en caliente" (*hot mixing*), las cuales empleaban cal viva (óxido de calcio) en lugar de cal apagada. Este proceso generaba reacciones químicas exotérmicas que no

solo mejoraban la cohesión de la mezcla, sino que también formaban clastos de cal que funcionaban como reservorios reactivos capaces de sellar microfisuras con el tiempo.

A pesar de este conocimiento histórico y científico, existe una brecha significativa en la aplicación y validación de estos principios en la ingeniería civil contemporánea. La estandarización de los procesos y materiales modernos dificulta la integración de técnicas antiguas. Por lo tanto, el problema central de esta investigación es analizar la viabilidad técnica de adaptar los métodos del cemento romano al hormigón moderno. Para abordar este problema, se implementó un diseño experimental que consistió en la sustitución de un 20% del cemento Portland por ceniza volcánica y la incorporación de tres concentraciones distintas de cal viva (5%, 10% y 15%). Para la evaluación de estas tres formulaciones, se elaboraron un total de 18 probetas cilíndricas y 6 probetas tipo placa, correspondiendo a 6 cilindros y 2 placas por cada concentración. El objetivo es evaluar cuantitativamente el efecto de estas modificaciones en el comportamiento mecánico específicamente la resistencia a compresión mediante cilindros y observar, mediante un registro visual en las placas, la posible manifestación de fenómenos de autorreparación en placas fisuradas. De esta manera, la investigación busca sentar las bases para el desarrollo potencial de un hormigón más duradero y de menor impacto ambiental, alineado con las necesidades de la construcción sostenible del siglo XXI.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

- Analizar la aplicabilidad de técnicas de cemento romano y 'hot mixing' con cal viva en placas y cilindros de hormigón, con el fin de mejorar su durabilidad y otorgarles propiedades de autoreparación aplicados en la zona de Cuenca.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Fundamentar teóricamente, a través de una revisión bibliográfica, las propiedades del hormigón romano y las técnicas de mezcla en caliente (*hot mixing*) para definir las formulaciones experimentales.
- Analizar comparativamente la evolución de la resistencia a compresión de un hormigón con un 20% de reemplazo de ceniza volcánica, incorporando adiciones de cal viva en proporciones del 5%, 10% y 15% respecto al peso total de la mezcla, con el fin de determinar su incidencia en el desempeño mecánico a corto y mediano plazo (7, 14 y 28 días).
- Evaluar cualitativamente la posible manifestación de fenómenos de autorreparación en placas de hormigón fisuradas, elaboradas con las mismas concentraciones, a través de un registro fotográfico durante 28 días de curado hídrico.
- Comparar los resultados de resistencia de los cilindros experimentales con una muestra patrón y analizar los hallazgos visuales de las placas para determinar la viabilidad de las técnicas empleadas en la mejora del hormigón.

## 2 CAPÍTULO II: MARCO TERORICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Marco teórico

### 2.2 Estado del arte

La búsqueda de materiales de construcción más duraderos, sostenibles y eficientes ha llevado a la revalorización de técnicas antiguas, entre ellas, el hormigón romano. En particular, el uso de cenizas volcánicas y cal viva ha despertado interés por sus posibles propiedades de resistencia a largo plazo y capacidad de autoreparación. A través de diversos estudios experimentales y arqueológicos se ha intentado comprender los mecanismos que dotaron al hormigón romano de una longevidad superior, con el objetivo de adaptar estos conocimientos a los desafíos contemporáneos de la ingeniería civil y la conservación del patrimonio. En este contexto, a continuación, se presentan las

principales investigaciones científicas que constituyen el sustento teórico y técnico del presente estudio.

Uno de los estudios más influyentes en este campo es el de (Seymour et al., 2023), titulado “*Hot Mixing: Mechanistic Insights into the Durability of Ancient Roman Concrete*”. Esta investigación demostró que la adición de cal viva a mezclas cementicias modernas puede inducir propiedades de autoreparación, gracias a la formación de clastos de cal de alta área superficial que actúan como fuentes de calcio reactivo, capaces de rellenar grietas y poros con el tiempo. La mezcla propuesta replicó las proporciones romanas y confirmó que el mecanismo de curado interno podría estar estrechamente vinculado al desarrollo térmico inicial del material.

Complementando estos hallazgos, (Jackson et al., 2018) analizaron la microestructura y los procesos post-puzolánicos de los cementos romanos en su estudio “*Extreme Durability in Ancient Roman Concretes*”. Su investigación reforzó la idea de que la combinación de puzolanas naturales y técnicas específicas de producción otorgaron a estos materiales una longevidad excepcional, con implicaciones directas para la sostenibilidad y la reducción de emisiones en la construcción contemporánea.

Desde una perspectiva más técnica, (Forster, 2004), en “*Hot-Lime Mortars: A Current Perspective*”, destacó la importancia de los morteros de cal caliente (mezclados in situ con cal viva) como parte esencial de la construcción tradicional. Este enfoque ha sido retomado por publicaciones como la de (Historic Scotland, 2015), que en su *Inform Guide* proporciona recomendaciones prácticas para el uso de morteros mezclados en caliente en restauraciones patrimoniales, señalando su compatibilidad con estructuras históricas.

Por su parte, (Pavía et al., 2023) ofrecen un análisis exhaustivo sobre la temperatura y los métodos de mezclado de morteros de cal en “*How hot are hot-lime-*

*mixed mortars? A review*”. El estudio subraya que variables como el tipo de apagado (slaking), la calcinación y el almacenamiento son determinantes para el rendimiento final del mortero. Los autores concluyen que, si bien los morteros históricos eran probablemente mezclados en caliente, reproducirlos con precisión hoy en día es un reto debido a las diferencias materiales y tecnológicas.

En esta misma línea de experimentación con materiales alternativos, (Wang et al., 2025) evaluaron el efecto de sustituir parcialmente el cemento por cal viva en agregados artificiales de ceniza volante curados en autoclave. Su estudio evidenció que, aunque el incremento de cal redujo la resistencia a compresión y aumentó la porosidad, todos los agregados obtenidos calificaron como livianos y estructuralmente viables, aportando una perspectiva valiosa sobre el aprovechamiento de residuos industriales y la viabilidad de sistemas cementantes modificados con cal en contextos modernos.

Finalmente, aunque no directamente enfocado en materiales de construcción, (Lizarazo, 2018) aporta un enfoque transversal desde la *Economía Ecológica*, destacando la necesidad de repensar los procesos industriales bajo criterios de sostenibilidad. Su visión refuerza la importancia de redescubrir técnicas constructivas ancestrales como alternativa viable frente a los impactos medioambientales de la producción de cemento convencional.

En conjunto, estas investigaciones proporcionan un marco conceptual y técnico valioso que sustenta el desarrollo de nuevos hormigones inspirados en la tecnología romana, con potencial para lograr materiales más duraderos, sostenibles y resilientes.

### **2.3 Conceptos**

Cal Viva: “La cal viva es la materia prima que se produce cuando la piedra caliza (carbonato de calcio) se cuece en un horno a una temperatura de alrededor de

850°C. Durante este proceso, el dióxido de carbono se elimina, dejando óxido de calcio altamente reactivo, conocido como "cal viva" (Historic Scotland, 2015).

Hot Mixing: “Los morteros de cal mezclados en caliente se preparan agregando medidas específicas de cal viva a los agregados y agua y mezclándolos para formar un mortero”(Pavía et al., 2023). Durante este proceso, es fundamental alcanzar temperaturas apagado alcanzara “la temperatura mínima necesaria de alrededor de 100 °C” (Copsey, 2019).

Autoreparante: “Materiales cuyo comportamiento se asemeje al de los seres vivos. Por ejemplo, cuando se produce un corte en la piel, el organismo reacciona en una serie de etapas que van desde la coagulación rápida de la herida, la formación de una cicatriz y la lenta regeneración del tejido original”(Williams, 2013).

Morteros de Cal Viva: “Los morteros de cal mezclados en caliente se preparan agregando medidas específicas de cal viva al agregado y agua y mezclándolos para formar un mortero. La cal viva reacciona con el agua generando calor y simultáneamente se une con la arena o el agregado para producir un mortero. Este mortero está 'caliente', por la reacción, y puede utilizarse en caliente (para determinadas obras) o almacenarse ('bancararse') para su uso posterior. Esto difiere de otros métodos de preparación de morteros de cal donde se apaga” (Historic Scotland, 2015).

Puzolanas: “Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que incluyen polvo de ladrillo y cenizas de combustible pulverizado (PFA), o aditivos patentados, que se agregan en cantidades pequeñas y medidas a los morteros de cal, justo antes de su uso, para impartir propiedades hidráulicas”(Historic Scotland, 2015).

Hormigón:” Es una mezcla compuesta de agregados, material cementante, agua, aire y algunas veces aditivos, que cuando se encuentra en estado fresco (plástico),

admite cualquier forma y, en estado endurecido, resiste esfuerzos mecánicos y es durable frente a diversas acciones.”(Matallana Rodríguez, 2014).

Hormigón romano: “Este conglomerado, elaborado a partir de una mezcla de mortero de cal y mundano, el cemento, colado en un encofrado de madera o entre dos paredes de pequeño dispositivo, permitirá realizar un Arquitectura monumental de altas prestaciones”(Bukowiecki, 2010).

Agregado fino:” El árido fino consiste de arena natural, arena elaborada o una combinación de ellas”(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Agregado grueso: “El árido grueso debe consistir en grava, grava triturada, piedra triturada, escoria de altos hornos enfriada al aire u hormigón de cemento hidráulico triturado”(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Método FULLER-THOMPSON: “Fuller y Thompson seleccionaron una curva granulométrica continua para la composición óptima de los agregados en el hormigón. La ecuación de la curva es de la siguiente forma:

$$Y = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^m,$$

$$m=0.5$$

Y= el porcentaje en peso de los agregados que pasan a través del tamiz

d=Es la abertura del tamiz

D=es el tamaño máximo del agregado

(Orlando, 1987)”.

## 2.4 Tipo de estudio

La presente investigación se enmarca dentro de un enfoque de investigación aplicada, ya que se propone evaluar experimentalmente el comportamiento de un hormigón modificado, inspirado en las técnicas constructivas del hormigón romano. Para ello, se elaborarán cilindros y placas de hormigón utilizando una combinación de

materiales que incluye cemento Portland, arena, agua, agregado grueso, ceniza volcánica y cal viva.

Los cilindros elaborados en este estudio tuvieron como propósito principal la evaluación de la resistencia a compresión del material, mientras que las placas fueron diseñadas para observar posibles manifestaciones de procesos de autoreparación mediante un seguimiento visual sistemático. No obstante, se reconoce que, debido al número limitado de muestras por cada dosificación, los resultados obtenidos a partir de los cilindros no pueden considerarse estadísticamente representativos. Esta limitación experimental se enmarca como una deficiencia metodológica; sin embargo, fue abordada mediante una estrategia comparativa basada en antecedentes científicos validados.

La metodología general parte como base del estudio realizado por (Seymour et al., 2023), el cual sirvió como referencia técnica y conceptual, particularmente en lo relativo a la sustitución parcial de cemento por ceniza volcánica y la adición de cal viva como agentes modificadores. A su vez, para reforzar la interpretación de los resultados de resistencia a compresión obtenidos, se incorporó como respaldo el enfoque metodológico de (Wang et al., 2025), cuyo estudio reporta una tendencia de comportamiento mecánico similar, especialmente en las mezclas patrón sin cal viva, que presentaron leves reducciones respecto a los valores proyectados de diseño.

Este cruce de información permitió corroborar que los valores alcanzados en esta investigación, si bien no definitivos, siguen una tendencia coherente con lo observado en estudios previos. Por tanto, se consideró válida la continuidad del proceso experimental, orientado a explorar el efecto de las adiciones minerales y la técnica de mezcla en caliente en el desempeño del hormigón de inspiración romana.

En una primera etapa, se establecerá una mezcla patrón siguiendo el método de Fuller-Thompson para la dosificación de agregados, con el objetivo de obtener una granulometría óptima. A partir de esta mezcla base, se elaborarán las distintas formulaciones con variaciones en el contenido de cal viva (5%, 10% y 15%) sobre la masa total del hormigón, manteniendo constante el reemplazo del 20% de cemento por ceniza volcánica.

La evaluación de la resistencia mecánica se llevará a cabo mediante ensayos de compresión uniaxial en cilindros normalizados. Si bien el número de muestras no permite una generalización estadística de los resultados, estos ensayos proporcionarán datos indicativos relevantes para futuras investigaciones. En paralelo, las placas de hormigón serán fisuradas intencionalmente y sometidas a curado en agua, a fin de monitorear visualmente, mediante registro fotográfico, cualquier evidencia de autoreparación superficial o interna.

Finalmente, se realizará una revisión bibliográfica exhaustiva que contextualice la aplicación de estos materiales en el pasado, tomando como referencia hallazgos arqueológicos y documentación histórica relacionada con las prácticas constructivas del mundo romano. El propósito último de este trabajo es sentar las bases para futuras investigaciones y aportar resultados preliminares sobre el desempeño mecánico y la posible capacidad de autoreparación del hormigón de inspiración romana.

## **2.5 Concreto romano antiguo**

### **2.5.1 Antecedentes del cemento romano**

Antes de la llegada del Imperio Romano a la península ibérica, las civilizaciones ya conocían y utilizaban aglomerantes, así como el proceso de fabricación del yeso.

“Las piedras de origen calcáreo tienen la propiedad notable de que al ser calcinadas, es decir, cocidas a gran temperatura durante largo tiempo, se deshidratan por completo,

dando lugar a un nuevo material, que, una vez reducido a polvo, presenta unas nuevas propiedades” (Carles, 2014). Este polvo se mezclaba posteriormente con agua, lo que le confería la capacidad de endurecerse con el tiempo y actuar como un agente aglutinador para áridos, grava y arena. Esto convertía al yeso en un precursor tanto del hormigón romano como del moderno. Las técnicas de construcción se han desarrollado de manera consecutiva, adaptándose a cada etapa de la humanidad y a su capacidad para generar nuevos materiales.

Al igual que su homólogo moderno, el yeso antiguo tenía la capacidad de modelarse a voluntad. “antiguamente este se obtenía de la cal apagada  $Ca(OH)_2$ , que se obtenía hidratando en exceso el óxido de calcio (cal viva)”(Carles, 2014).

### **2.5.2 Origen del cemento romano**

Mucha información de la elaboración origen del cemento romano sigue en debate y en estudio, pese a los registros de historiadores como Marco Vitruvio Polion; la expansión del imperio romano a lo largo de Europa, trajo varios avances dado a su gran avance tecnología en varios ámbitos como la ingeniería y administración pública, ambos apartados claves en el avance de cualquier sociedad, ahí es cuando la ingeniería romana se innova ya que este deja de construir usando grandes moles pétreas de gran volumen, lo cual requerían una gran cantidad de esfuerzo animal como humano, lo cual daba como resultado una construcción muy tardada y cara.

“Cabe distinguir –como nos han enseñado los historiadores– tres períodos claramente diferenciados en la historia de Roma: la Monarquía (753-509 a.C.), el período Republicano que en el año 27 a.C. dio paso al Imperio Romano (27 a.C. - 476 d.C.). Y es en el segundo período en el que aparece uno de los materiales más revolucionarios –por su importancia– en la historia de la construcción.”(Carles, 2014).

A pesar de ser muy diferente del hormigón utilizado hoy en día, el opus caementicium poseía características únicas que lo hacían extraordinariamente útil en diversas aplicaciones. Una de sus propiedades más notables era su capacidad para endurecerse bajo el agua, lo que lo convertía en un material ideal para una amplia gama de proyectos de ingeniería civil. "El opus caementicium presentaba unas características notables: si se añadía la tierra volcánica de la zona de Pozzuoli, en las faldas del Vesubio, en proporciones adecuadas, juntamente con la arena y las piedras, y se amasaba con la cal, se obtenía una mezcla que endurecía incluso bajo el agua y confería características hidráulicas al producto obtenido"(Carles, 2014), muchas de sus construcciones bajo este método se mantiene en pie hasta el día de hoy, por lo cual se puede inferir una resistencia elevada al cloro y sodio del mar.

“La documentación más antigua que se ha encontrado del opus caementicium se debe a una cita de Marco Porcio Catón (234-149 a.C.). Aunque la técnica de utilización del mortero no se conoce con exactitud, ya a finales de la época Republicana (siglo II y I a.C.) el opus caementicium sustituyó otras formas de construir, como el opus quadratum hecho con bloques de piedra seca, o el opus latericium y crudus hecho con material cerámico en seco. Pero es con Julio César (100-44 a.C.) cuando se puede empezar a hablar de auténticos hormigones. Los escritos de Marco Vitruvio Polión (c. 80/70 - c. 15 a.C.) son la principal fuente de información sobre la construcción romana”(Carles, 2014)

Muchas de estas construcciones romanas han resistido la prueba del tiempo, lo que atestigua la calidad y resistencia del concreto romano. Ejemplos emblemáticos de estas obras son el Coliseo Romano y el Panteón de Agripa, que no solo destacan por su magnitud y belleza arquitectónica, sino también por su sorprendente longevidad. Estos

monumentos no solo son testimonios de la destreza ingenieril romana, sino también de su visión y capacidad para crear estructuras que perdurarían a lo largo de los milenios.

### **2.5.3 Durabilidad en los concretos romanos**

“Los hormigones de la antigua roma han sobrevivido durante miles de años gracias a las características únicas de los materiales. Análisis cuidadosos de microestructuras sementinas romanas y las propiedades pueden proporcionar información para mejorar las estrategias de ingeniería para los modernos”(Jackson et al., 2018) La mejora de estos rasgos es no solo posible sino también fundamental para el avance en cómo nuestras construcciones se mantienen actualmente. Por consiguiente, la incorporación de propiedades similares representa un salto significativo hacia el progreso en términos de cómo abordamos la sostenibilidad y la duración en la vida de las infraestructuras. Este enfoque puede llevar a una transformación en el diseño y la implementación de edificaciones y estructuras, permitiendo que sean más resistentes, eficientes y ecológicas. En última instancia, esta evolución en la ingeniería y la arquitectura no solo beneficia la durabilidad de las construcciones, sino que también promueve una mayor conciencia ambiental y responsabilidad en la gestión de recursos.

### **2.6 Morteros de cal caliente**

Los morteros de cal caliente representan una tecnología constructiva ancestral cuya relevancia, lejos de disminuir, se ha visto revitalizada en el ámbito de la investigación contemporánea y la práctica de la conservación del patrimonio edificado. Su importancia no radica únicamente en su testimonio como técnica histórica, sino también en su potencial emergente como alternativa en la búsqueda de materiales de construcción con menor impacto ambiental y mayor compatibilidad con las fábricas antiguas (Copsey, 2016). aunque su uso generalizado fue eclipsado por la aparición del cemento Portland, el legado de los morteros de cal perdura en innumerables estructuras

que han resistido el paso del tiempo, demostrando una durabilidad notable (González Sánchez et al., 2021).

### 2.6.1 Morteros de cal

Actualmente, los morteros de cal han caído en desuso, siendo reemplazados casi en su totalidad por mezclas a base de cemento Portland, cuya aplicación se ha estandarizado a nivel global en la industria de la construcción. No obstante, recientes hallazgos arqueológicos y estudios sobre durabilidad y sostenibilidad de materiales antiguos han puesto nuevamente en valor el uso de la cal como conglomerante, por estas cualidades beneficiosas las técnicas de hot lime mixig están teniendo su retorno hoy en día (Pavía et al., 2023).

Dada la notable resistencia al envejecimiento, es importante reconsiderar este método constructivo. Lejos de ser una tecnología obsoleta, los morteros de cal ofrecen cualidades únicas que podrían ser aprovechadas en contextos donde la compatibilidad con materiales tradicionales es crucial. Por tanto, su estudio y aplicación no deberían ser desestimados, sino integrados como parte de un enfoque más amplio hacia la construcción sostenible e históricamente informada. Por tanto, su estudio y aplicación no deberían ser desestimados, sino integrados como parte de un enfoque más amplio hacia la construcción sostenible e históricamente informada.

La característica principal de este mortero y por lo que se llama mortero de cal caliente, es la reacción exotérmica del óxido de calcio  $CaO$ , al ser apagado con agua. Este proceso, ampliamente utilizado en la antigüedad, ha sido reemplazado en gran medida por la cal apagada (hidróxido de calcio,  $Ca(OH)_2$ , en la construcción moderna. La cal viva  $CaO$ . En contraste, la cal apagada es más fácil de manejar, ya que no es tan reactiva y es más estable, pese a que los morteros de cal viva ofrecen mejor rendimiento.

## 2.6.2 Métodos de fabricación tradicional de mortero

“Los morteros de cal caliente parecen haber sido comúnmente utilizados en la construcción de edificios históricos, y la evidencia que respalda esto se deriva de documentos disponibles y de los resultados de una cantidad cada vez mayor de los análisis de morteros”(Forster, 2004); Los análisis indican que los morteros de cal caliente tienen una notable cantidad de grumos de cal no mezclados, resultando en la presencia de fragmentos de cal dentro de la mezcla final. Estos fragmentos, fácilmente identificables como partículas blanquecinas dispersas en la matriz del mortero, son un indicador de un apagado incompleto de la cal viva. Es común que en la fabricación de morteros de cal caliente no se logre una homogeneidad completa, lo que da lugar a estas inclusiones de cal no completamente apagada.

“Los materiales fabricados en caliente se habrían mezclado y utilizado inmediatamente mientras el proceso de apagado estaba activo, o se habrían mezclado y luego dejado durante un período específico dependiendo de la naturaleza de la cal viva y del proceso de construcción que se estaba llevando a cabo.”(Forster, 2004). Aunque los registros exactos son escasos, es difícil saber con detalle el proceso exacto por el cual se realizaba el concreto romano.

Se puede encontrar referencias en la construcción moderna de morteros de cal caliente en el código de prácticas estándar británico (British Standard Code of Practice) 121 publicado en 1951.

En el siguiente cuadro se notan las distintas proporciones de cal viva y arena, según lo que se desee, obtener.

### **Figura 1**

*Proporciones estándar de cal viva (quicklime) y arena para diferentes tipos de aglomerantes*

Tipo de aglomerante	Arena (Partes por peso)	
	Cal viva	Arena
Cales gruesas	1	3
Cales débilmente hidráulicas	1	2 1/2
Cales hidráulicas (como Lias)	1	2
Cemento romano	1	1 o 1 1/2
Medina	1	2
Atkinson's	1	2
Portland	1	5
Scott's	1	4

*Nota. La figura presenta las proporciones en peso entre cal viva (quicklime) y arenas utilizadas en la preparación de distintos tipos de aglomerantes, tales como cal gruesa, cal hidráulica, cemento romano, entre otros. Esta información es una referencia común en procesos de restauración patrimonial y en la comparación con morteros contemporáneos.*

*Fuente: Adaptado de Forster, A. (2004). Hot lime mortars: A current perspective. Journal of Architectural Conservation, 10(3), 7–27*

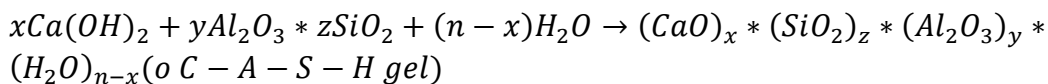
### **2.6.3 Composición química del hormigón romano**

El proceso exacto de elaboración del cemento romano continúa siendo incierto en la actualidad. No obstante, el estudio titulado “Mezcla caliente: Información mecanicista sobre la durabilidad del antiguo hormigón romano” (Seymour et al., 2023), que constituye el punto de partida de esta investigación, ha demostrado que es posible emular el comportamiento del hormigón romano mediante formulaciones modernas. Según los hallazgos del estudio, se elaboraron mezclas utilizando cemento Portland ordinario (OPC), ceniza volante pulverizada, arena y agua en una proporción másica aproximada de 1:0.2:2:1. A esta mezcla, denominada "Mezcla 1", se le añadió cal viva en distintas concentraciones que oscilaron entre el 7.5% y el 15% en masa,

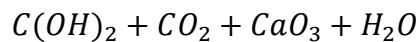
seleccionadas en función de la frecuencia observada de clastos de cal relictos en diversas muestras arqueológicas de hormigón romano. Las probetas resultantes fueron moldeadas en cilindros de 10 cm de altura por 10 cm de diámetro para su posterior fractura y colocación en un flujo constante de agua.

“Considerando que los morteros de cal aérea se basaron en la absorción de CO<sub>2</sub> desde el aire hasta el endurecimiento, los morteros hidráulicos combinaron cal y agua con silicatos reactivos y aluminosilicatos (materiales puzolánicos) para formar hidratos cementosos [por ejemplo, hidratos de aluminio-silicato de calcio (C-A-S-H)]” (Seymour et al., 2023)

La reacción puede estar conocida como reacción puzolánica, se puede escribir como:



“Cualquier exceso de cal sin reaccionar se carboniza lentamente en el aire a través de la reacción” (Seymour et al., 2023):



“El proceso de producción de mortero romano comenzó con la calcinación de cal de una fuente como piedra caliza, mármol o travertino (todos predominantemente calcita, CaCO<sub>3</sub>) para formar cal viva [óxido de calcio (CaO)]” (Seymour et al., 2023).

“En los últimos años, las investigaciones detalladas de morteros y hormigones antiguos permitieron identificar algunos de los procesos químicos y mineralógicos clave asociados con las interacciones entre los materiales puzolánicos y la cal hidratada y proporcionaron información sobre el rendimiento mecánico de estos materiales” (Seymour et al., 2023). Motivados por estos hallazgos, decidieron emprender una expedición al sitio arqueológico de la antigua ciudad de Privernum, cerca de Roma, Italia, con el propósito de recolectar muestras adicionales de mortero romano. Estas muestras, obtenidas de la estructura de la muralla de la ciudad, ofrecerían una nueva

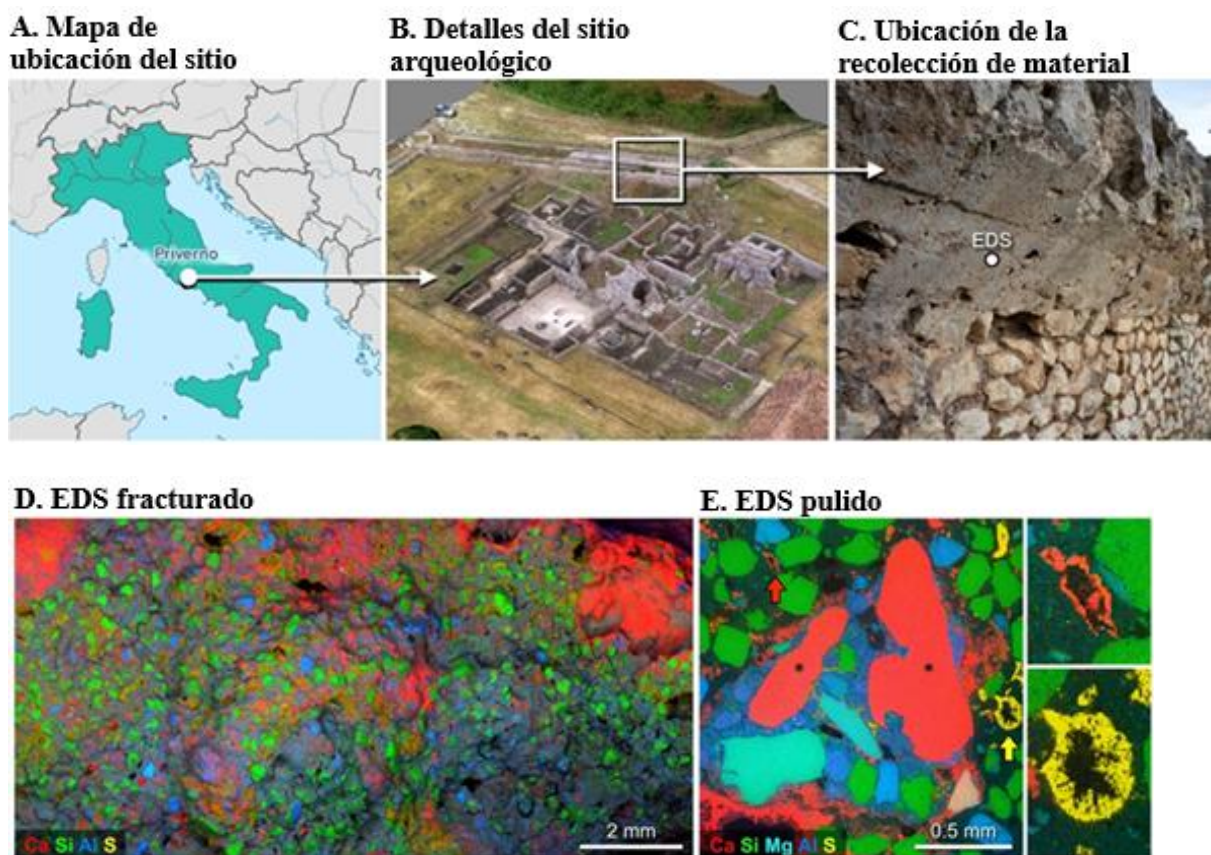
oportunidad para analizar de manera detallada las características composicionales y estructurales de los morteros y hormigones utilizados por los romanos, mediante el uso de nuevas tecnologías.

#### 2.6.4. Investigación en Privernum

“Las muestras que se investigaron fueron recolectadas de Priver, cerca del Romo en el país de Italia “Privernum se ocupó ya en el 2do siglo BCE hasta el 13er siglo CE, y el sitio se excavó primero en el 18vo siglo, con el trabajo más reciente realizado a partir de 1990 hasta el presente. Las muestras analizadas en el presente estudio fueron parte de la muralla de la ciudad” (Seymour et al., 2023). Para el más reciente estudio.

#### Figura 2

*Ubicación del sitio arqueológico de Privernum y detalles del análisis del concreto romano.*



*Nota: La figura muestra (A) la ubicación geográfica del sitio de Privernum en Italia, (B) una vista aérea del área arqueológica donde se recolectaron las muestras y (C) el punto específico de extracción del concreto. Las imágenes (D) y (E) corresponden a análisis de espectroscopía por dispersión de energía (EDS) en secciones fracturadas y pulidas del material, evidenciando la presencia de minerales reactivos en la matriz del concreto.*

*Fuente: Seymour, L. M., Maragh, J., Sabatini, P., Di Tommaso, M., Weaver, J. C., & Masic, A. (2023). Localization of the Privernum site and sampling details of Roman concrete. En Hot-mixed Roman concrete: Mechanistic insights into the durability of ancient mortars*

“Para investigar los detalles de composición a escala centimétrica, milimétrica y submilimétrica de las muestras de mortero, utilizamos SEM-EDS. Mapeo elemental de área grande de la superficie recién fracturada de una muestra representativa de mortero romano muestra su composición química compleja (con una presencia dominante de calcio, silicio y aluminio), los clastos de cal relictos a escala agregada y la evidencia de llenado de poros por fases minerales secundarias. Mapeo elemental adicional de muestras de mortero pulido proporcionó información estructural y compositiva a escala fina adicional, cuyos resultados fueron consistentes con estudios previos de morteros y hormigones romanos”

## **2.7 Procesos de producción**

### **2.7.1. Formulación Original**

“Después de un exhaustivo análisis utilizando microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDS) realizado por los investigadores, se propuso la creación de un análogo moderno del concreto romano para explorar las propiedades de la calcita en un proceso de curado a largo plazo. Para ello, en las “formulaciones cementosas, combinamos OPC, cenizas volantes pulverizadas, arena y agua a una relación de mezcla masiva de ca. 1:0.2:2:1. A esta

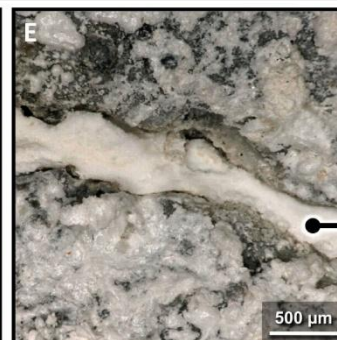
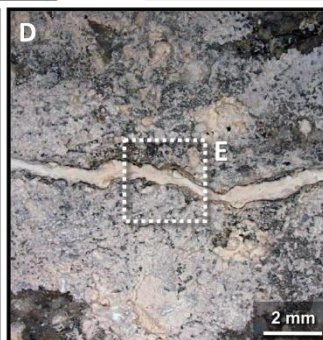
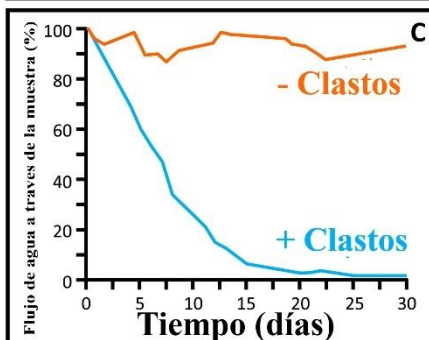
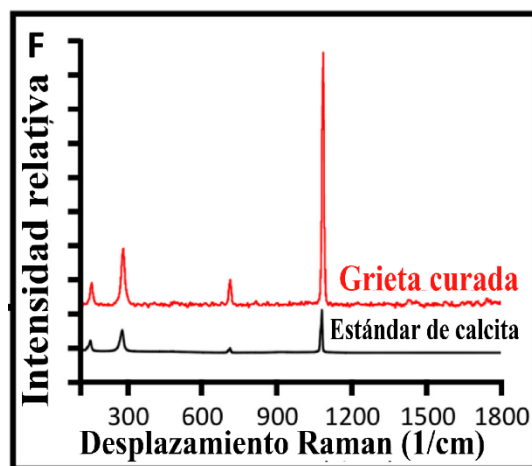
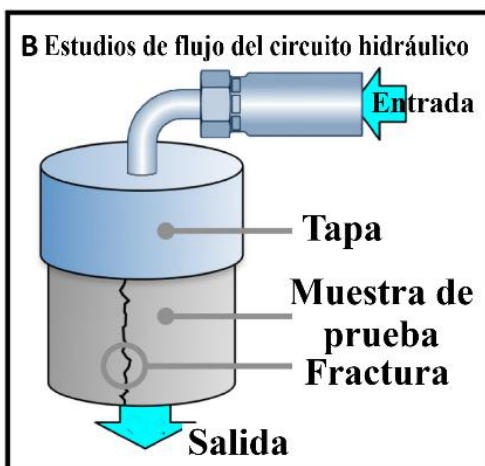
mezcla (conocida aquí como Mezcla 1), se agregó cal viva a diferentes muestras, abarcando una concentración que varía de 7.5 a 15% en masa (que se eligió sobre la base del rango de frecuencia encontrado de clastos de cal relictos en diferentes muestras de concreto romano) para investigar los efectos del contenido de cal viva en el rendimiento de los hormigones. Las mezclas resultantes se moldearon en moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 10 cm de altura y se curaron bajo agua durante 28 días antes de su uso.”(Seymour et al., 2023).

“Una vez que se completó la producción de nuestras muestras de concreto moderno, exploramos la microarquitectura de los clastos de cal y comparamos sus características con las encontradas en sus antiguos equivalentes romanos. En ambos tipos de muestras (antiguas y modernas), el color blanco brillante de los clastos de cal y su microestructura porosa eran visibles. Un examen más detallado de los clastos de cal de las muestras pulidas de las formulaciones de hormigón de inspiración romana utilizando microscopía óptica polarizada reveló una periferia visiblemente distintiva similar que se vio en el material romano nativo”(Seymour et al., 2023)

Como se puede observar las muestras fueron fracturadas, divididas por la mitad y puestas en flujo constante de agua.

### **Figura 3**

*Proceso de autocuración del hormigón mediante circuito hidráulico*



Nota. La figura muestra el mecanismo de autocuración en concreto romano, analizado mediante un sistema de circuito hidráulico: (A) muestra sin fractura, fracturada y reensamblada; (B) esquema del sistema de flujo hidráulico para la evaluación de grietas; (C) evolución de la permeabilidad; (D-E) imágenes microscópicas del proceso de cicatrización interna; (F) análisis Raman indicando la presencia de calcita en la fisura curada.

*Fuente: Seymour, L. M., Maragh, J., Sabatini, P., Di Tommaso, M., Weaver, J. C., & Masic, A. (2023). Imágenes del proceso de autocuración del hormigón mediante circuito hidráulico [Figura]. En Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. Science Advances, 9(1), ead11602.*

### **3 CAPITULO III: METODOLOGIA**

#### **3.1 Metodología**

Se parte de la formulación original propuesta por (Seymour et al., 2023), la cual fue adaptada a las condiciones locales y a los objetivos del presente estudio, tal como se detalla a continuación.

#### **3.2 Formulación Adaptada**

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con un diseño experimental. El objetivo fue formular y caracterizar un hormigón sostenible adaptado a los recursos y necesidades de la construcción en Ecuador. A diferencia del trabajo de (Seymour et al., 2023). que se basó en proporciones de mezcla tradicionales; OPC, cenizas volantes pulverizadas, arena y agua a una relación de mezcla masiva de ca. 1:0.2:2:1., este enfoque se centró en la optimización granulométrica y el cumplimiento de estándares de ingeniería reconocidos internacionalmente. El diseño se centró en la creación de una mezcla de hormigón con una resistencia a la compresión de diseño ( $f'c$ ) de 210 kgf/cm<sup>2</sup>, evaluando el efecto de la sustitución parcial de cemento por adiciones minerales de origen local, un 20% de ceniza volcánica por el cemento y adicionando porcentajes de 5%,10% y 15% a la masa total del hormigón, para el análisis de las muestras se enfocará con un número limitado de muestras por concentración de cal viva, 6 para las muestras patrón basados.

Para el análisis experimental de las muestras de hormigón con adición de cal viva, se ha optado por un número limitado, pero estadísticamente justificable de

especímenes por concentración. Esta decisión responde tanto a criterios de viabilidad técnica como a fundamentos metodológicos propios del diseño experimental. En concordancia con prácticas reportadas en (Arbeláez Pérez et al., 2023), se emplearán tres cilindros por cada concentración de cal viva (5%, 10% y 15%), número que ha demostrado ser suficiente para calcular promedios representativos y desviaciones estándar dentro de estudios similares de resistencia a compresión en hormigones.

Este enfoque también se respalda en los principios establecidos por (Bonilla & Sirit, s. f.) en su guía metodológica para ingenieros civiles, donde se señala que la repetición controlada de ensayos (réplicas) permite estimar la varianza del error experimental y aumentar la confianza en los resultados, siempre que se mantenga un equilibrio racional en el uso de recursos. Dichos autores subrayan que incrementar de forma indiscriminada el número de muestras no necesariamente mejora la precisión, y puede incluso introducir nuevos errores o volver el proceso experimental innecesariamente costoso y poco práctico. En consecuencia, proponen que el número de réplicas debe ser reducido, pero suficiente, según el tipo de ensayo, la variabilidad esperada y la experiencia del operador (Bonilla & Sirit, s. f.).

Dado que únicamente se contó con una muestra por edad (7, 14 y 28 días) para los cilindros con 10% y 15% de cal viva, y aunque para la dosificación del 5% se dispuso del mismo número de muestras, se adicionaron dos especímenes a los 90 días, no fue posible realizar un análisis estadístico completo. Sin embargo, según lo indicado por (Bonilla & Sirit, s. f.), cuando el tamaño de muestra es menor a 30, es recomendable aplicar la distribución t de Student como herramienta estadística adecuada. Para compensar esta limitación en el número de réplicas, se utilizaron datos adicionales del estudio de (Wang et al., 2025), que aborda una investigación similar sobre la sustitución parcial de cemento por cal viva. La comparación de resultados y tendencias permitió

validar de forma preliminar los datos obtenidos en esta investigación, reforzando su interpretación y otorgando mayor solidez a las conclusiones bajo condiciones experimentales controladas y homogéneas.

Por otro lado, en el caso de los cilindros correspondientes a la mezcla patrón — formulada sin adición de ceniza volcánica ni cal viva— se planificó inicialmente la elaboración de seis especímenes, con el propósito de contar con una base estadística sólida para la comparación de resultados. Sin embargo, por limitaciones logísticas durante el proceso experimental, únicamente se realizaron ensayos de resistencia a compresión en dos muestras, correspondientes a las edades de 7 y 14 días.

Esta reducción en el número de ensayos representa una deficiencia metodológica en cuanto a la robustez estadística de los resultados obtenidos para la mezcla patrón. No obstante, esta situación no compromete significativamente la validez general del estudio, ya que los datos obtenidos en dichas edades permitieron establecer una tendencia de comportamiento básica, suficiente para contrastar de manera preliminar el efecto de las adiciones en las mezclas modificadas.

Además, al tratarse de una mezcla de referencia sin componentes adicionales (ceniza o cal viva), su función principal fue servir como línea base de comparación cualitativa y no como objeto de análisis profundo. Por ello, si bien la cantidad de datos es limitada, su inclusión sigue siendo útil para interpretar de forma general la influencia de los materiales alternativos incorporados en las otras formulaciones.

Este enfoque guarda una estrecha analogía con estudios recientes que analizan la sustitución parcial de cemento por cal viva en la fabricación de materiales de construcción sostenibles, como es el caso del trabajo desarrollado por (Wang et al., 2025). En dicho estudio, se evaluó el comportamiento mecánico y estructural de agregados artificiales producidos a partir de ceniza volante y diferentes porcentajes de

cal viva, en condiciones de curado en autoclave. Aunque su objeto de estudio se centró en la producción de agregados y no del hormigón como material final, la metodología experimental implementada, así como los criterios de análisis y evaluación, comparten varios elementos con el presente trabajo.

Ambas investigaciones exploran el potencial de la cal viva como modificador de sistemas cementantes y su impacto en propiedades clave como la resistencia mecánica y la porosidad. En particular, (Wang et al., 2025) identificaron que la incorporación de cal viva, si bien conlleva una ligera disminución en la resistencia a compresión en ciertos casos, puede contribuir al desarrollo de estructuras internas más porosas pero funcionales, lo que resulta relevante en aplicaciones donde el peso reducido o la reactividad química son factores críticos.

Este paralelismo metodológico refuerza la validez del presente enfoque experimental, ya que evidencia una línea de investigación coherente con las tendencias actuales en el desarrollo de materiales cementantes alternativos. Además, permite evaluar el efecto preliminar de nuevos componentes o formulaciones en el comportamiento general del material.

### **3.3 Elaboración de hormigón inspirado en técnicas romanas**

Todos los procedimientos experimentales se llevaron a cabo en las instalaciones del laboratorio de suelos y materiales del Centro de Investigación, Transferencia de Tecnología e Innovación (CITT) de la Universidad Católica de Cuenca.

La caracterización rigurosa de las materias primas es fundamental, ya que sus propiedades físicas y químicas, como la distribución del tamaño de partícula y la composición química, tienen un impacto directo en la cinética de las reacciones, la demanda de agua y las propiedades mecánicas del producto final (Wang et al., 2025).

Se empleó cemento Holcim Fuerte (Tipo GU), conforme a la norma vigente NTE INEN 2380:2011 (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2011) y la ASTM 150 (ASTM International, 2020, p. 150). Además, se empleó Áridos (Fino y Grueso): El agregado grueso y fino utilizado en la elaboración del hormigón fue obtenido del cantón Santa Isabel, en la provincia del Azuay. Dicho material fue previamente caracterizado con el fin de garantizar su idoneidad para aplicaciones estructurales, verificándose su cumplimiento con los requisitos establecidos por la normativa ecuatoriana vigente, específicamente INEN 872 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

La ceniza volcánica utilizada en el presente estudio proviene del volcán Chimborazo. Al tratarse de un material de origen natural, no existe actualmente en el país una normativa técnica específica que regule su uso en aplicaciones cementantes o su caracterización estándar. Sin embargo, con el objetivo de asegurar su aptitud como adición puzolánica, la ceniza fue sometida a un proceso de caracterización física y química en laboratorio, evaluándose parámetros como su granulometría.

Por otro lado, la cal viva empleada fue suministrada por la empresa RELUBQUIM, la cual proporciona este producto con una pureza certificada del 98%, conforme a sus fichas técnicas de fábrica. Esta cal corresponde a un óxido de calcio de alta reactividad, cuyas características ya vienen definidas por análisis fisicoquímicos del proveedor, garantizando así su calidad y constancia en la aplicación dentro del diseño experimental.

El proceso de elaboración del hormigón comenzó aplicando el método de FULLER-THOMPSON (Orlando, 1987), el cual requiere la recopilación y análisis detallado de las características físicas de los agregados utilizados en la mezcla. Este método, conocido por su enfoque en la optimización granulométrica, busca lograr una

combinación ideal de tamaños de partículas en los agregados para maximizar la compacidad y minimizar los vacíos en la estructura del hormigón, lo que mejora su resistencia y durabilidad.

### 3.4 Diseño de hormigón por el método FULLER-THOMPSON

Una vez adquiridos los materiales a ser sometidos al ensayo granulométrico, se procedió a determinar la granulometría de cada uno. Los materiales evaluados fueron arena, grava y ceniza volcánica, todos ellos componentes fundamentales en la mezcla. Este análisis resultó crucial para conocer la composición granulométrica precisa de cada material, permitiendo identificar el tamaño y la distribución de las partículas. De acuerdo con lo especificado por el método de Fuller-Thompson descrito en (Orlando, 1987), se seleccionó una curva granulométrica continua para lograr la composición óptima de los agregados en el hormigón. Este método, diseñado para optimizar la distribución de los agregados gruesos y finos, no considera la ceniza volcánica, ya que se enfoca únicamente en los materiales estructurales principales. Sin embargo, la ceniza volcánica, como aditivo, sigue siendo relevante para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón a largo plazo. La determinación de la granulometría según este enfoque es esencial para garantizar que los agregados cumplan con los parámetros especificados en el diseño de la mezcla, asegurando una adecuada compacidad y resistencia en el material final. En las tablas 1,2,3,4,5 y 6 se muestran los resultados de los ensayos granulométricos realizados para los materiales evaluados.

**Tabla 1**

*Granulometría de la grava*

GRANULOMETRIA DE LA GRAVA					
d		PESO	PESO RET.	%	%PASA
mm	pulg	RETENIDO	ACUMULADO	RETENIDO	
76.2	3"	0	0	0%	100%

63.5	2 1/2"	0	0	0%	100%
50.8	2"	0	0	0%	100%
38.1	3/2"	0	0	0%	100%
25.4	1"	0	0	0%	100%
19.1	3/4"	1406.5	1406.5	11%	89%
12.7	1/2"	4083.50	5490	43%	57%
9.52	3/8"	2719.50	8209.5	64%	36%
4.76	N°4	4346.50	12556	99%	1%
FONDO		189.50	12745.5	100%	0%
TOTAL		12745.50			

*Nota: El porcentaje de material retenido y pasado se basa en el peso total de 12,745.50 g de material Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 2**

*Porcentaje de grava que pasa a través de los tamices*

mm	%PASA
76.2	100%
63.5	100%
50.8	100%
38.1	100%
25.4	100%
19.1	89%
12.7	57%
9.52	36%
4.76	1%

*Nota: El porcentaje de material retenido y pasado se basa en el peso total de 12,745.50 g de material Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 3**

*Granulometría de la arena*

GRANULOMETRIA DE LA ARENA					
mm	d pulg	PESO RETENIDO	PESO RET. ACUMULADO	%	%PASA
25.4	1"	0	0	0%	100%

19.1	3/4"	0	0	0%	100%
12.7	1/2"	0.00	0	0%	100%
9.52	3/8"	0.00	0	0%	100%
4.76	N°4	72.50	72.5	9%	91%
2.38	N°8	215.30	287.8	34%	66%
1.19	N°16	190.40	478.2	57%	43%
0.58	N°30	142.60	620.8	74%	26%
0.3	N°50	121.70	742.5	88%	12%
0.15	N°100	76.80	819.3	98%	2%
0.075	N°200	18.70	838	100%	0%
FONDO		1.00	839	100%	0%
TOTAL		839.00			

*Nota: El porcentaje de material retenido y pasado se basa en el peso total de 839.00 g de material Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 4**

*Porcentaje de arena que pasa a través de los tamices*

mm	%PASA
25.4	100%
19.1	100%
12.7	100%
9.52	100%
4.76	91%
2.38	66%
1.19	43%
0.58	26%
0.3	12%
0.15	2%
0.075	0%

*Nota: El porcentaje de material que pasado se basa en el peso total de 839.00 g de material Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 5**

*Granulometría de la ceniza*

GRANULOMETRIA DE LA CENIZA
----------------------------

d		PESO	PESO RET.	%	%PASA
mm	pulg	RETENIDO	ACUMULADO	RETENIDO	
25.4	1"	0	0	0%	100%
19.1	3/4"	0	0	0%	100%
12.7	1/2"	0.00	0	0%	100%
9.52	3/8"	5.40	5.4	2%	100%
4.76	N°4	14.00	19.4	7%	95%
2.38	N°8	31.00	50.4	17%	84%
1.19	N°16	34.90	85.3	30%	72%
0.58	N°30	35.80	121.1	42%	59%
0.3	N°50	40.00	161.1	56%	45%
0.15	N°100	52.40	213.5	74%	26%
0.075	N°200	63.10	276.6	96%	4%
FONDO		11.50	288.1	100%	0%
TOTAL		288.10			

*Nota: El porcentaje de material retenido y pasado se basa en el peso total de 288.10 g de material Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 6**

*Porcentaje de ceniza que pasa a través de los tamices*

mm	%PASA
25.4	100%
19.1	100%
12.7	100%
9.52	100%
4.76	95%
2.38	84%
1.19	72%
0.58	59%
0.3	45%
0.15	26%
0.075	4%

*Nota: El porcentaje de material retenido y pasado se basa en el peso total de 282.70 g de material Fuente: (Elaborado por autor).*

Una vez finalizado el análisis clave de la granulometría de los materiales, de acuerdo con el método Fuller-Thompson descrito por (Orlando, 1987), se procedió con el diseño correspondiente para iniciar la formulación óptima del hormigón. Este análisis

permitió determinar la distribución de los agregados finos y gruesos, lo que es esencial para asegurar una mezcla balanceada que cumpla con los parámetros de compacidad y resistencia requeridos para el hormigón.

### 3.5 Selección de la consistencia del hormigón

Para la presente investigación, se estableció como objetivo alcanzar una consistencia plástica en todas las mezclas de hormigón, dado que estas fueron concebidas para condiciones constructivas convencionales, sin requerimientos especiales de fluidez ni de colocación mediante bombeo o estructuras masivas como se especifica su requerimiento en la figura 4. Para validar dicha propiedad, se aplicó el ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams, obteniéndose valores de 3.5 cm para las formulaciones con 5% y 10% de cal viva, y de 4.0 cm para la mezcla con 15%.

Estos resultados se encuentran dentro del rango de asentamiento comprendido entre 3 y 5 cm, correspondiente a una consistencia plástica según los criterios establecidos como se puede ver en la figura 5. Esto confirma que las mezclas diseñadas cumplen con el objetivo de trabajabilidad propuesto, sin necesidad de recurrir a aditivos fluidificantes ni a métodos de colocación especializados como la vibrocompactación.

#### Figura 4

*Tabla de consistencia del hormigón*

<b>Tipo de Compactación</b>	<b>Consistencia</b>	<b>Utilización</b>
Picado con barra	Blanda y fluida	Bombeo y hormigón fuertemente armado
Vibrocompactación	Seca	Prefabricados, estructuras masivas
Vibración normal	Plástica	Hormigón normal

*Nota: Se consta la consistencia del hormigón según la compactación (Orlando, 1987).*

Posteriormente, siguiendo las directrices del método de formulación de Fuller-Thompson y tomando como referencia los asentamientos recomendados en el ensayo del cono de Abrams, así como los requisitos de fluidez, se estableció un rango de asentamiento adecuado en función de la consistencia esperada del hormigón. Para esta investigación, se optó por una consistencia plástica, ya que se consideró la más apropiada para garantizar la trabajabilidad de la mezcla, permitiendo una fácil colocación y manejo sin afectar negativamente las propiedades mecánicas y la resistencia final del material. La consistencia plástica facilita el cumplimiento de los objetivos de la investigación al asegurar que el hormigón mantenga su integridad estructural durante el proceso de fraguado.

**Figura 5**

*Tabla de asentamiento del hormigón*

Consistencia	Asentamiento (cm)	Fluidez (%)
Seca	0 - 2	0 - 40
Plástica	2 - 5	40 - 70
Blanda	5 - 11	70 - 100
Fluida	11 - 20	100 - 130

*Nota: Asentamientos para diferentes consistencias del hormigón (Orlando, 1987).*

**3.6 Selección de la cantidad de agua en la mezcla**

Siguiendo las directrices del método de Fuller-Thompson (Orlando, 1987), y considerando que el tamaño máximo del agregado, como se muestra en la Tabla 1, es de tres cuartos de pulgada (19.1 mm), se procedió a determinar la cantidad de agua requerida por metro cúbico de hormigón. La cantidad de agua varía dependiendo de si el agregado es redondeado o triturado, tal como se especifica en la figura 6, usando el grafico se determinó una cantidad de 199 kgf de agua por m<sup>3</sup> de hormigón. Sin embargo, al realizar la prueba de rendimiento la muestra salió muy seca por lo que, se

tuvo que hacer una corrección de humedad agregando un 15% adicional de agua final de 228.85 kgf.

### Figura 6

*Agua en kgf para diferentes agregados*

<b>Tamaño Máximo del Agregado (mm/pulg)</b>	<b>Agregado Redondeado (Kgf)</b>	<b>Agregado Triturado (Kgf)</b>
12,7 (1/2")	199	214
19,1 (3/4")	184	199
25,4 (1")	178	193
38,1 (3/2")	166	181
50,8 (2")	157	172
76,2 (3")	148	163
152,4 (6")	131	145

*Nota: La cantidad de agua en Kgf por metro cubico de hormigón se determina por medio del tamaño máximo del agregado (Orlando, 1987)*

Posteriormente, se realizó una corrección en la cantidad de agua utilizada para asegurar que el hormigón alcanzara su estado óptimo. Esta corrección fue aplicada de acuerdo con las recomendaciones mostradas en la figura 7, que indican los ajustes necesarios en función de las condiciones de asentamiento y la trabajabilidad del hormigón. Por cada incremento o disminución de 25 mm en el asentamiento, se realizó un ajuste del  $\pm 3\%$  en el contenido de agua, esta fue la configuración que se empleó en la elaboración de la formula patrón.

### Figura 7

*Corrección cantidad de agua*

<b>Cambio en las condiciones</b>	<b>Modificación en la cantidad de agua</b>
Por cada 25 mm de aumento o disminución en el asentamiento	$\pm 3\%*$
Arenas trituradas	+6,8%
Hormigones poco trabajables	-3,6%

*Nota. Corrección de la cantidad de agua se da por el asentamiento fuente:(Orlando, 1987).*

### **3.7 Resistencia del diseño**

Dado que se había estipulado previamente una resistencia nominal para el hormigón de 210 kgf/cm<sup>2</sup>, de acuerdo con la fórmula patrón, se procedió a aplicar una corrección de mayoración según lo establecido en el manual de diseño (Orlando, 1987). Basándose en la figura 8, se determinó un incremento adicional de 70 kgf/cm<sup>2</sup> en la resistencia original, lo que eleva la resistencia final de diseño del hormigón a 280 kgf/cm<sup>2</sup>.

### **Figura 8**

*Calculo de f'cr*

<b>Condición de resistencia</b>	<b>Cálculo de f'cr</b>
<b>f'c ≤ 210 Kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>f'cr = f'c + 70 Kgf/cm<sup>2</sup></b>
<b>210 Kgf/cm<sup>2</sup> &lt; f'c ≤ 350 Kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>f'cr = f'c + 85 Kgf/cm<sup>2</sup></b>
<b>f'c &gt; 350 Kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>f'cr = f'c + 100 Kgf/cm<sup>2</sup></b>

*Nota: Resistencia Promedio Requerida (Orlando, 1987)*

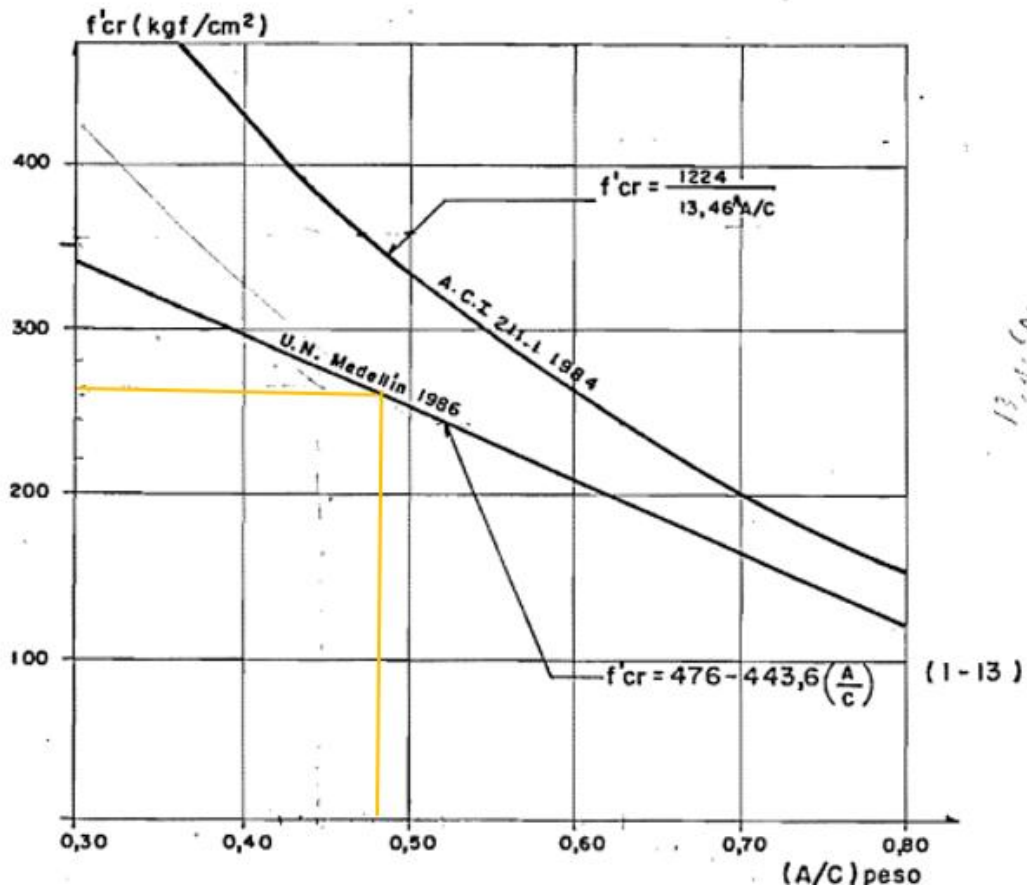
### **3.8 Relación Agua-Cemento**

En el manual se emplean las reglas tradicionales de Abrams, junto con otras aproximaciones lineales obtenidas experimentalmente en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín (Orlando, 1987). Estas relaciones experimentales se representan en la ilustración comparativa, la cual muestra los resultados obtenidos frente a los valores propuestos por el A.C.I 211.1 de 1984. En el gráfico, se observa la correlación entre la relación agua-cemento (A/C) y la resistencia del hormigón. El empleo de este método gráfico por medio de la figura 9, permitió obtener una relación agua-cemento de 0.47. Este valor se derivó de la

correlación observada entre la resistencia del hormigón y la proporción de agua y cemento utilizada en la mezcla.

**Figura 9**

Relacion entre  $f'_{cr}$  y (A/C).



*Nota: Relación entre  $f'_{cr}$  y (A/C). Vibración normal. Mezclas sin adiciones. (Orlando, 1987)*

### 3.9 Determinación de cemento por metro cubico de hormigón

Con la cantidad de agua determinada en 218.9 kgf y la relación agua-cemento (A/C) establecida en 0.47, se procedió a calcular la cantidad de cemento necesaria por metro cúbico de hormigón. Aplicando esta relación, se obtiene una cantidad de cemento de 465.74 kgf por metro cúbico de mezcla.

$$\frac{A}{C} = 0.47$$

$$\frac{218.9 \text{ kgf}}{C} = 0.47$$

$$\frac{218.9 \text{ kgf}}{C} = 0.47$$

$$0.47 * C = 218.9 \text{ kgf}$$

$$C = \frac{218.9 \text{ kgf}}{0.47}$$

$$C = 465.74 \text{ kgf}$$

### 3.10 Determinación de los porcentajes de agregados

Conforme a la guía la determinación de los porcentajes de agregados, “la curva este método toma como referencia para combinar granulométricamente los agregados es:”(Orlando, 1987).

$$Y = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^{0.5}$$

D: tamaño máximo del agregado

d: abertura de las mallas

### Figura 10

Curvas de Fuller

Valores de Y para diferentes tamaños máximos (D)						
d [mm (pulg)]	D = 12,5 mm (1/2")	D = 20 mm (3/4")	D = 25 mm (1")	D = 40 mm (1 1/2")	D = 50 mm (2")	D = 63,5 mm (2 1/2")
63,5 (2 1/2")	—	—	—	100	80	60
50 (2")	—	—	100	80	60	—
40 (1 1/2")	—	—	80	67	50	—
25 (1")	—	100	80	67	50	—
20 (3/4")	100	80	71	63	50	—
15 (1/2")	87	71	63	50	37	—
12,5 (3/8")	71	63	50	40	32	20
10 (N°10)	63	50	40	32	20	15
5 (N°50)	40	32	20	15	—	—
2 (N°100)	20	15	—	—	—	—

*Nota: se toma para diferentes tamaños máximos de agregado (Orlando, 1987)*

Empleado la ilustración 10 de las curvas de Fuller para diferentes tamaños de agregado(Orlando, 1987), se empleó la correspondiente a ¾ de pulgada como referencia para generar el gráfico de granulometría. A partir de este análisis gráfico, se determinaron los porcentajes óptimos de arena y grava que formarán parte de la formulación patrón. Este método gráfico permite ajustar la combinación de agregados finos y gruesos, garantizando una distribución adecuada de las partículas.

**Tabla 7**

Porcentaje de los analisis granulometricos

% PASAN DE LOS ANALISIS GRANULOMETRICOS			
ABERTURA TAMIZ	FULLER	GRAVA	ARENA
63.5	100	100	100
50	100.00	100	100
40	100.00	100	100
25	100.00	100	100

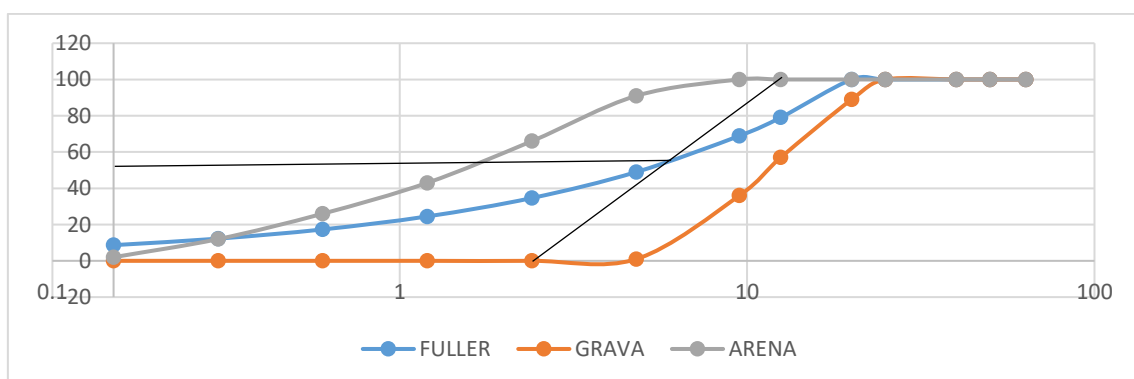
20	100.00	89	100
12.5	79.06	57	100
9.5	68.92	36	100
4.8	48.99	1	91
2.4	34.64	0	66
1.2	24.49	0	43
0.6	17.32	0	26
0.3	12.25	0	12
0.15	8.66	0	2

*Nota: El porcentaje de material retenido sirve para posteriores pasos Fuente: (Elaborado por autor).*

A partir de los porcentajes obtenidos y representados gráficamente en la figura 11, se pudo determinar una proporción óptima de agregados en la mezcla patrón, con un 55% de arena y un 45% de grava. Este análisis gráfico permitió visualizar la distribución granulométrica de los agregados finos y gruesos, asegurando que la formulación patrón cumpla con lo estipulado en la guía (Orlando, 1987).

### **Figura 11**

Dosificación grafica de agregados por Fuller



*Nota: Comparación gráfica entre la curva teórica de Fuller y las curvas granulométricas de los agregados utilizados (grava y arena), Fuente: (Elaborado por autor).*

Para verificar que los porcentajes de arena y grava son apropiados para la formulación, se emplea el método de comparación utilizando la abertura de los tamices. Se procede a realizar una sumatoria de los porcentajes correspondientes de arena y grava para cada abertura de tamiz, y los resultados obtenidos deben asemejarse a la curva granulométrica de referencia. Este proceso asegura que la distribución de los agregados en la mezcla esté dentro de los rangos establecidos.

**Tabla 8**

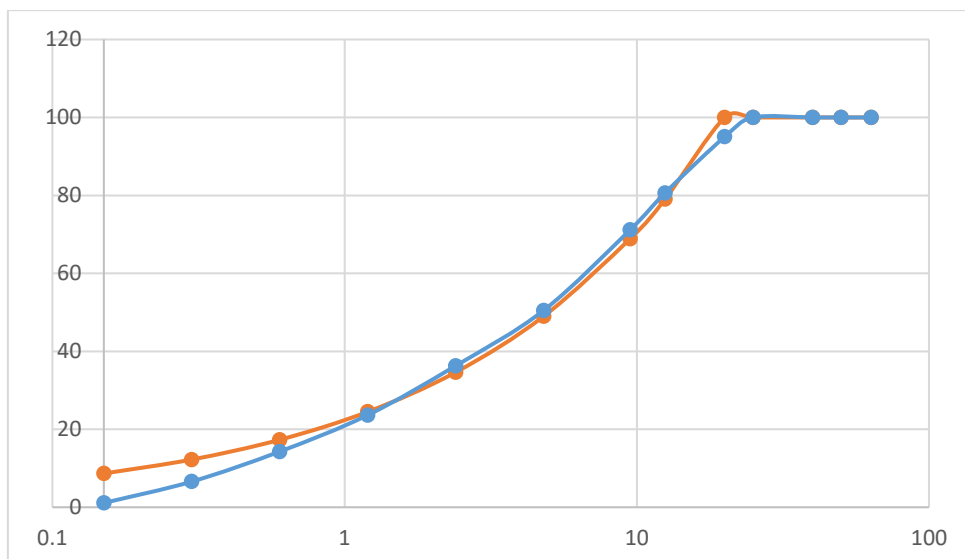
Tabla Sumatoria Grava y Arena

ABERTURA TAMIZ	FULLER	GRAVA	ARENA	SUMA (GRAVA +ARENA)
63.5	100	45	55	100
50	100.00	45	55	100
40	100.00	45	55	100
25	100.00	45	55	100
20	100.00	40.05	55	95.05
12.5	79.06	25.65	55	80.65
9.5	68.92	16.2	55	71.2
4.8	48.99	0.45	50.05	50.5
2.4	34.64	0	36.3	36.3
1.2	24.49	0	23.65	23.65
0.6	17.32	0	14.3	14.3
0.3	12.25	0	6.6	6.6
0.15	8.66	0	1.1	1.1

*Nota: La tabla muestra la verificación de la dosificación de agregados seleccionada mediante el método de Fuller fuente (Orlando, 1987).*

**Figura 12**

Comparación entre la curva granulométrica teórica de Fuller y la curva experimental obtenida de la combinación de grava y arena



*Nota. En la gráfica se observa la superposición entre la curva teórica de Fuller (línea azul) y la sumatoria experimental de los agregados (línea naranja), mostrando una adecuada concordancia entre ambas, lo cual valida la distribución granulométrica empleada en el diseño de la mezcla Fuente: (Elaborado por autor).*

### 3.11 Dosificación de materiales por metro cubico de hormigón

Con las proporciones previamente determinadas para la grava y la arena, junto con los pesos totales del agua y del cemento por metro cúbico de hormigón, es posible calcular el volumen de cada material utilizando su peso específico. Para ello, se aplican las relaciones correspondientes entre la masa y el peso específico de cada componente. En este caso, la masa de grava y arena, en conjunto con sus respectivos pesos específicos, permiten determinar con precisión los volúmenes ocupados por cada uno en la mezcla, como se ve en la tabla 9.

**Tabla 9**

Cálculo de masa y volumen de materiales

MASA CEMENTO	465.74	kg
PESO ESPECIFICO CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	2900	kg/m <sup>3</sup>
volumen cemento	0.16	m <sup>3</sup>

MASA AGUA	218.9	kg
PESO ESPECIFICO AGUA (kg/m <sup>3</sup> )	1000	kg/m <sup>3</sup>
volumen AGUA	0.22	m <sup>3</sup>
VOLUMEN AGREGADOS	0.62	m <sup>3</sup>
VOLUMEN ARENA	0.34	m <sup>3</sup>
VOLUMEN GRAVA	0.28	m <sup>3</sup>
PESO ESPECIFICO SSS GRAVA	2624	kg/m <sup>3</sup>
PESO ESPECIFICO SSS ARENA	2455	kg/m <sup>3</sup>
MASA GRAVA	732.69	kg
MASA ARENA	837.83	kg

*Nota: La tabla resume el cálculo de la masa y el volumen absoluto de cada componente necesario para fabricar un metro cúbico (1 m<sup>3</sup>) de hormigón Fuente: (Elaborado por autor).*

De forma resumida, los materiales utilizados en la formulación del hormigón pueden ser presentados de la siguiente manera, detallando las cantidades correspondientes de agua, cemento, grava y arena, junto con sus respectivos pesos. La sumatoria de estos componentes por metro cúbico de hormigón alcanza un total de 2254.29 kg/m<sup>3</sup>.

### **Tabla 10**

Resumen pesos materiales formula patron

PESO DE LOS MATERIALES SSS	
<i>AGUA</i>	<i>218.90 kg</i>
<i>CEMENTO</i>	<i>465.74 kg</i>
<i>GRAVA</i>	<i>732.69 kg</i>
<i>ARENA</i>	<i>837.83 kg</i>
<i>SUMA COMPONENTES</i>	<i>2255.16 kg/m<sup>3</sup></i>

*Nota La tabla detalla las cantidades en masa de cada material necesarias para producir un metro cúbico de hormigón según la fórmula patrón del estudio, considerando los*

*agregados en condición Saturada con Superficie Seca (SSS) Fuente: (Elaborado por autor).*

### **3.12 Corrección por humedad en los agregados**

#### **3.12.1 Corrección por humedad en el agregado grueso**

“En los ensayos de laboratorio los agregados generalmente están secos, pero en las obras más frecuente es que estén húmedos, en el primer caso (laboratorio) solo se corrige la cantidad de agua, pero en el segundo se deben corregir las cantidades de agregados y de agua para la preparación de los hormigones. El control de la humedad de los agregados es obligatorio en la preparación de hormigones de buena calidad ya que de no ser así se va a afectar la relación  $A/C$  y a su vez la resistencia del material.” (Orlando, 1987).

En el presente caso, se empleó el método de gravedad específica para determinar el porcentaje de absorción del agregado grueso, tal como lo especifica la norma ASTM C127-12 (ASTM, 2012).

“Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (no incluye el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{lb/ft}^3$ ) es expresada como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS), o como densidad aparente. De cualquier manera, la densidad relativa (gravedad específica), es una cantidad adimensional, es expresada como SH, SSS o como densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). La densidad SH y la densidad relativa SH son determinadas después de secar el agregado. La densidad SSS, la densidad relativa SSS y

la absorción son determinadas después de sumergir el agregado en agua por una duración preestablecida.”(ASTM, 2012).

Es “Una muestra de agregado es sumergida en agua por aproximadamente  $24 \pm 4$  horas para esencialmente llenar los poros. Después la muestra se retira del agua, se seca la superficie de las partículas y se determina su masa. Enseguida el volumen de la muestra se determina por el método de desplazamiento de agua. Finalmente, la muestra se seca en el horno y se determina su masa. Usando las masas obtenidas y las fórmulas de este método de prueba, es posible calcular la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción.”(ASTM, 2012).

“La densidad relativa (gravedad específica) es usada para calcular el volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que contienen agregados incluyendo concreto asfáltico, concreto hidráulico, y otras mezclas que son proporcionadas o analizadas con base en el volumen absoluto.”(ASTM, 2012)

Para llevar a cabo el ensayo de absorción de agregado grueso, se utilizó el laboratorio del CITT, el cual está equipado con los instrumentos necesarios conforme a los requisitos establecidos en la norma ASTM C127-12. Entre el equipo empleado se incluyen una balanza de precisión para medir el peso del material seco y saturado, un contenedor adecuado para contener las muestras, un tanque de agua para la saturación del agregado, mallas para tamizar el material y un horno para el secado de la muestra (ASTM, 2012).

### **3.12.2 Procedimiento del ensayo de la gravedad específica del agregado grueso**

En primer lugar, la muestra se secó en un horno del laboratorio del CITT a una temperatura constante de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una tolerancia de  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas.

Posteriormente, se permitió que las muestras se enfriaran a temperatura ambiente

durante una hora para asegurar que alcanzaran una condición de equilibrio antes de proceder con las siguientes fases del ensayo (ASTM, 2012).

A continuación, la muestra fue sumergida en agua durante un período de 24 horas, asegurando su completa saturación. Después de este tiempo, el agua de la bandeja fue cuidadosamente drenada, dejando únicamente el agregado grueso. El agregado fue secado superficialmente con un paño, eliminando la película de agua sin afectar su contenido interno de humedad. En esta condición, se determinó su peso en aire, conocido como la masa en aire del agregado saturado en superficie seca (SSS) (ASTM, 2012).

Inmediatamente después, la muestra fue colocada en una canastilla metálica sumergida en agua, donde se midió su peso bajo el agua. Este procedimiento se realizó cuidadosamente para evitar la presencia de burbujas de aire atrapado que pudieran alterar la medición. El peso sumergido de la muestra permitió obtener la masa aparente en agua de la muestra saturada (ASTM, 2012).

Finalmente, la muestra fue secada nuevamente en el horno a una temperatura de 100 °C con una tolerancia de  $\pm 5$  °C, siguiendo el mismo procedimiento de enfriamiento por una hora antes de determinar su peso seco. Este último valor corresponde a la masa en aire de la muestra seca al horno, siendo un parámetro clave para calcular tanto la densidad relativa como la absorción del agregado grueso (ASTM, 2012).

### **3.12.3 Cálculos de la gravedad específica de la grava**

Para determinar los valores obtenidos en el ensayo, se utilizará la siguiente nomenclatura:

A: Masa en aire de la muestra seca al horno, con un valor de 1257 g.

B: Masa en aire de la muestra en condición saturada superficialmente seca (SSS), con un valor de 1273 g.

C: Masa aparente de la muestra saturada sumergida en agua, con un valor de 788

g.

$$\text{Gravedad específica seca al horno} = \frac{A}{(B-C)} \quad (1)$$

$$\text{Gravedad específica seca al horno} = \frac{1257}{(1273-788)} = 2.591 \quad (2)$$

$$\text{Gravedad específica saturado superficialmente seco} = \frac{B}{(B-C)} \quad (3)$$

$$\text{Gravedad específica saturado superficialmente seco} = \frac{1273}{(1273-788)} =$$

2.591 (4)

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(A-C)} \quad (5)$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{1257}{(1257-788)} = 2.68 \quad (6)$$

$$\text{Porcentaje de absorción} = \frac{(B-A)*100}{A} \quad (7)$$

$$\text{Porcentaje de absorción} = \frac{(1273-1257)*100}{1257} = 1.27\% \quad (8)$$

Con los valores obtenidos, se determinó que el porcentaje de absorción del agregado grueso es del 1.27%. Este valor es consistente tanto para las muestras patrón como para las muestras de hormigón inspirado en técnicas romanas.

#### 3.12.4 Corrección por humedad en el agregado fino

A continuación, se comenzó con la gravedad específica del agregado fino por el método gravimétrico (ASTM, 2012).

Para llevar a cabo el ensayo de absorción de agregado fino, se utilizó el laboratorio del CITT, que cuenta con el equipamiento adecuado conforme a los requisitos de la norma ASTM C128 (ASTM, 2012). Entre los instrumentos utilizados se encuentran una balanza de precisión, un picnómetro, un frasco, un molde y pistón, un horno de convección, una cuchara de albañilería, una espátula, una malla N°4 y una bandeja metálica. El empleo de estos equipos asegura la precisión de los resultados

obtenidos en el ensayo, permitiendo medir con exactitud la densidad relativa (gravedad específica) y la capacidad de absorción del agregado fino.(Cañas, 2024)

#### **3.12.4 Procedimiento del ensayo de la gravedad específica del agregado fino**

El procedimiento comenzó con el muestreo del agregado grueso, el cual consiste en tomar una porción representativa de la muestra total y realizar un proceso de cuarteo para obtener una submuestra adecuada para el ensayo. La muestra inicial fue colocada en una bandeja amplia, y mediante el cuarteo se dividió en porciones iguales. Se descartaron dos de las fracciones de los extremos opuestos, mientras que la porción restante fue seleccionada para el ensayo de 494.7g (Cañas, 2024).

La muestra fue secada en una bandeja en el horno a una temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Después de dejarla reposar en el mesón por una hora, hasta que alcanzó una temperatura manejable, se procedió a pesarla, obteniéndose un peso seco de 383 g. Posteriormente, la muestra fue inmersa en agua por un período de 24 horas para asegurar su completa saturación. Tras este tiempo, se eliminó el exceso de agua con cuidado, evitando la pérdida de material, lo cual podría haber alterado los resultados posteriores de la medición de pesos (Cañas, 2024).

Para el ensayo de humedad superficial, se utilizó un molde con forma de cono colocado sobre una superficie lisa, limpia y seca. Se colocó el agregado fino, parcialmente seco y suelto, dentro del molde. Con un pistón, se compactó ligeramente el agregado con 25 golpes suaves. Posteriormente, se eliminó el exceso de material de la base del molde y se retiró verticalmente el cono. Este ensayo se realizó con el material en estado saturado superficialmente seco (SSS), donde el agregado fino colapsó ligeramente al retirar el molde, confirmando la condición deseada para el ensayo (Cañas, 2024).

### **3.12.5 Ensayo del Picnómetro**

Empleando un picnómetro, se introdujo la muestra de agregado fino en estado saturado superficialmente seco (SSS). A continuación, se llenó el picnómetro con agua hasta aproximadamente el 90% de su capacidad máxima. Luego, se agitó manualmente durante aproximadamente 15 a 20 minutos para eliminar todas las burbujas de aire presentes en la mezcla, asegurando que no quedaran oclusiones de aire que pudieran alterar las mediciones (Cañas, 2024).

Una vez que se eliminaron completamente las burbujas de aire, se procedió a llenar el picnómetro hasta el nivel de calibración. En este punto, se determinó la masa total del picnómetro, incluyendo el agregado fino y el agua. Posteriormente, se removió el agregado fino del picnómetro, y este fue secado en el horno a una temperatura constante de  $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta que alcanzó un peso constante (Cañas, 2024).

Finalmente, se determinó la masa del picnómetro lleno de agua hasta su capacidad de calibración, lo que permitió realizar los cálculos de densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (Cañas, 2024).

### **3.12.6 Cálculos Gravedad específica agregado fino**

Después de realizar los ensayos correspondientes con el picnómetro, se obtuvieron los siguientes valores necesarios para realizar los cálculos de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino:

A: Masa de la muestra seca al horno, con un valor de 383 g.

B: Picnómetro más agua hasta la marca de calibración, con un valor de 666.6 g.

C: Picnómetro más agua más muestra hasta la marca de calibración, con un valor de 903.7 g.

D: Masa de la muestra SSS, con un valor de 400 g.

$$\text{Gravedad específica seca al horno} = \frac{A}{(B+S-C)} \quad (9)$$

$$\text{Gravedad específica seca al horno} = \frac{383}{(666.6+400-903.7)} = 2.351 \quad (10)$$

$$\text{Gravedad específica saturado superficialmente seco} = \frac{S}{(B+S-C)} \quad (11)$$

$$\text{Gravedad específica saturado superficialmente seco} = \frac{400}{(666.6+400-903.7)} = 2.45 \quad (12)$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(B + A - C)}$$

(13)

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{383}{(666.6+383-903.7)} = 2.62 \quad (14)$$

$$\text{Porcentaje de absorción} = \frac{(S-A)*100}{A} \quad (15)$$

$$\text{Porcentaje de absorción} = \frac{(400-383)*100}{383} = 4.43\% \quad (16)$$

Tras realizar los ensayos correspondientes para determinar las propiedades del agregado fino, se obtuvo un porcentaje de absorción de agua del 4.43%. Este valor será utilizado de manera consistente en todas las formulaciones patrón, así como en las mezclas de hormigón inspiradas en técnicas romanas.

### 3.13 Cilindros patrón

Con todos los datos obtenidos, se procedió a realizar las correcciones de los pesos de los materiales, ajustando las cantidades según la absorción de agua, de acuerdo con nuestra fórmula patrón. Los datos iniciales utilizados para el diseño de la mezcla, con una relación agua-cemento de 0.47, fueron aplicados a los cilindros del CITT, que presentan las siguientes características:

#### Tabla 11

*Dosificación cilindros patrón*

Cantidad	8	uni
Diámetro	10	cm
Altura	20	cm
Área	78.54	cm <sup>2</sup>
Volumen	1570.80	cm <sup>3</sup>
Volumen total	12566.3706	cm <sup>3</sup>
Volumen + 30%	16336.2818	cm <sup>3</sup>
Volumen + 30%	0.01633628	m <sup>3</sup>

*Nota: Se toman como 2 cilindros más y un 30% adicional por posibles pérdidas de material Fuente: (Elaborado por autor).*

Con los pesos corregidos, se calculó la cantidad total de material necesaria para llenar todos los cilindros, considerando el ajuste de volumen

### **Tabla 12**

Cantidad de material total para cilindros patrón

<i>AGUA</i>	<i>3.241</i>	<i>kg</i>
<i>CEMENTO</i>	<i>7.608</i>	<i>kg</i>
<i>GRAVA</i>	<i>11.785</i>	<i>kg</i>
<i>ARENA</i>	<i>13.476</i>	<i>kg</i>
<i>SUMA</i>	<i>36.110</i>	<i>kg/m<sup>3</sup></i>
<i>COMPONENTES</i>		

*Nota: Estos pesos son para la fórmula patrón de 0.47 de relación agua-cemento Fuente: (Elaborado por autor).*

#### **3.13.1 Formulación de cilindros patrón**

Se elaboraron un total de seis cilindros correspondientes a la mezcla patrón, con el propósito de establecer una referencia inicial sobre el comportamiento del hormigón sin adiciones. Si bien se había previsto ensayarlos a los 7, 14 y 28 días para evaluar su capacidad de alcanzar la resistencia objetivo de 210 kg/cm<sup>2</sup>, por limitaciones operativas solo se realizaron ensayos a los 7 y 14 días. Estos resultados preliminares permitieron verificar la coherencia del diseño con respecto a la resistencia esperada y sirvieron

como punto de partida para comparar el efecto de las formulaciones modificadas inspiradas en técnicas romanas.

Las pruebas de resistencia a compresión serán realizadas en el Equipo para Ensayo de Compresión Shimadzu, como se puede apreciar en la figura 13, lo que garantizará una medición precisa y confiable de la capacidad de carga de los cilindros en los intervalos de tiempo establecidos.

### **Figura 13**

Ensayo de compresión en cilindro elaborado con la mezcla patrón



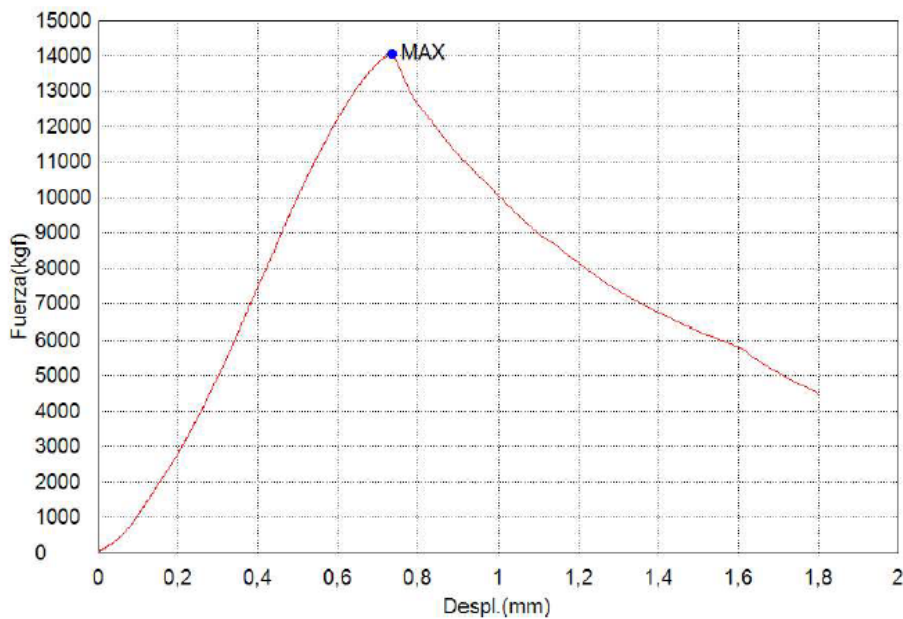
*Nota: Imagen del proceso de ensayo de resistencia a compresión realizado en un cilindro estándar. Este cilindro corresponde a la mezcla patrón, empleada como referencia en la presente investigación para evaluar el desempeño de las mezclas modificadas Fuente: (Elaborado por autor).*

Una vez elaborados y curados los cilindros, se procedió a realizar los respectivos ensayos de compresión. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 y 21. Para ello, se utilizó el equipo de ensayo de compresión Shimadzu, aplicando una carga controlada con una velocidad constante de 2.5 kgf/cm<sup>2</sup> por segundo.

**Figura 14**

*Gráfica carga-desplazamiento, fórmula patrón, 7 días.*

Nombre	Max_Fuerza	Max_Tension	Max. Desplazamiento
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2	mm
1_1	14100	169	0,73588
Media	14100	169	0,73588
Desviacion Estandar	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000



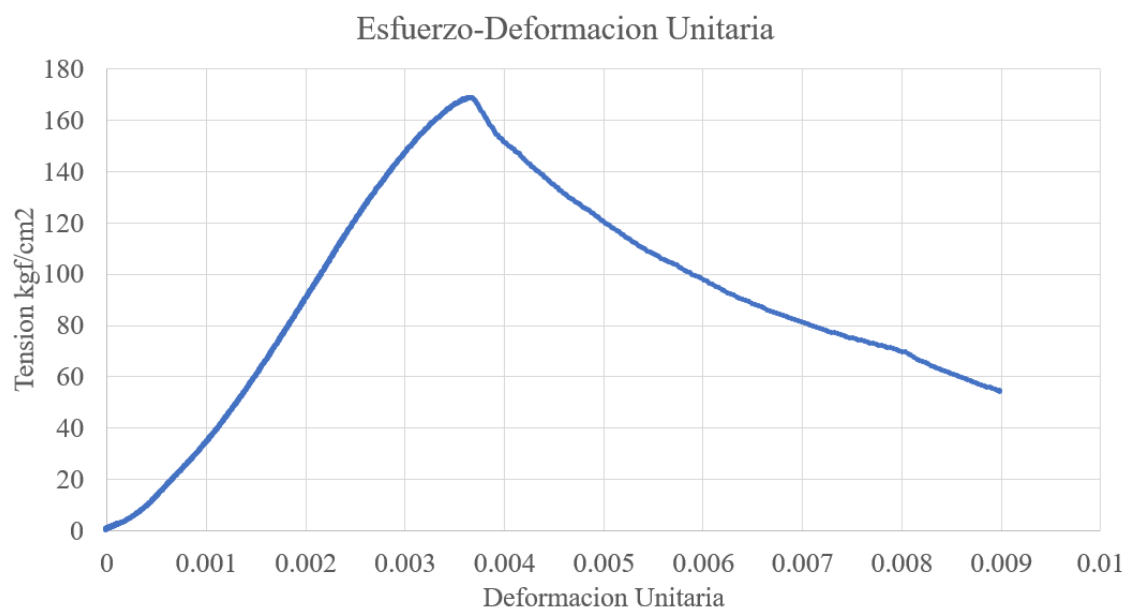
*Nota: Resultado del ensayo de compresión realizado a los 7 días sobre la muestra 1 de la mezcla patrón, la curva ilustra la respuesta del material bajo carga, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto*

máximo de 141000 kgf, seguido de un desplazamiento de 1.79 mm Fuente:

(Elaborado por autor).

### Figura 15

Gráfica esfuerzo-deformación unitaria, fórmula patrón, 7 días.



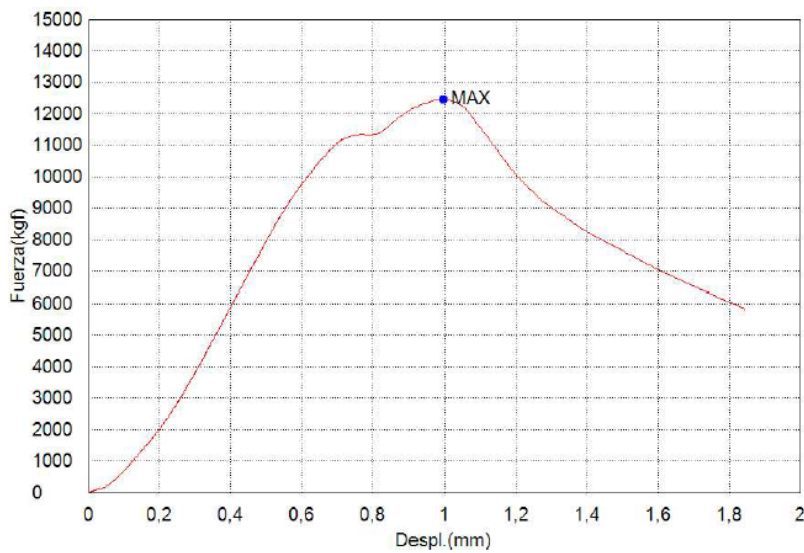
Nota: La curva muestra un comportamiento inicial elástico lineal, alcanzando un pico de esfuerzo máximo de 169 kgf/cm<sup>2</sup> con una deformación unitaria de 0.0036 Fuente:

(Elaborado por autor).

**Figura 16**

*Gráfica carga-desplazamiento, fórmula patrón, 7 días.*

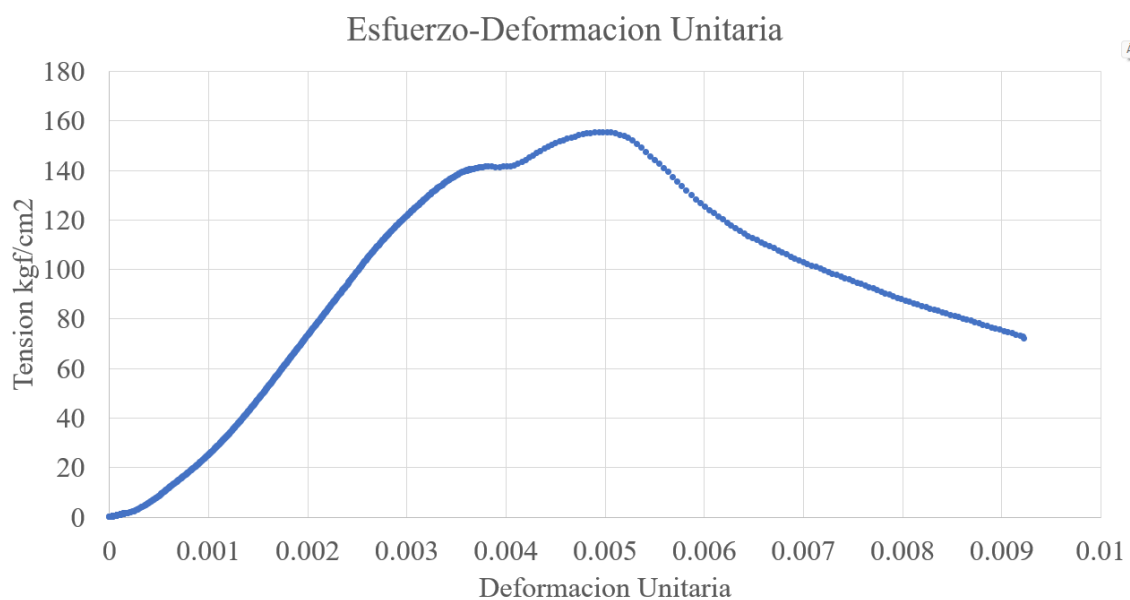
Nombre	Max_Fuerza	Max_Tension	Max._Desplazamiento
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2	mm
1_1	12500	156	0,99550
Media	12500	156	0,99550
Desviacion Estandar	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000



*Nota: Resultado del ensayo de compresión realizado a los 7 días sobre la muestra 2 de la mezcla patrón a los 7 días, la curva ilustra la respuesta del material bajo carga, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 12500 kgf, seguido de un desplazamiento de 0.9955 mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 17**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria, fórmula patrón, 7 días.*

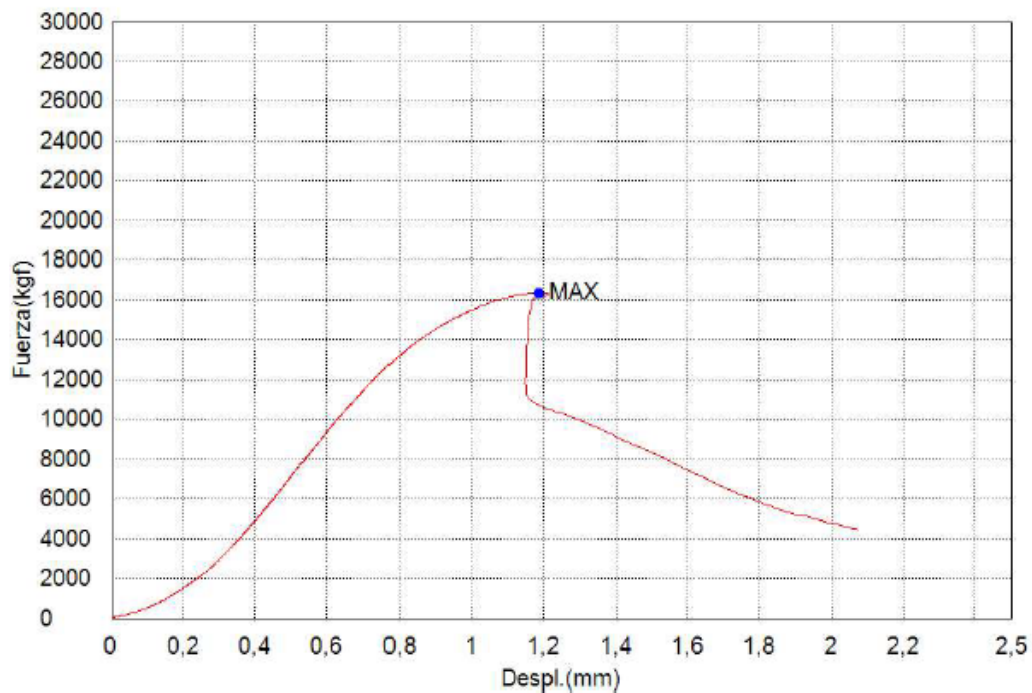


*Nota: Muestra dos, se observa una fase elástica inicial, seguida de un pico de esfuerzo y luego una disminución gradual a medida que la deformación unitaria aumenta; el esfuerzo máximo fue de 156 kgf/cm<sup>2</sup> con una deformación unitaria de 0.0049 Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 18**

*Gráfica carga-desplazamiento, fórmula patrón, 14 días.*

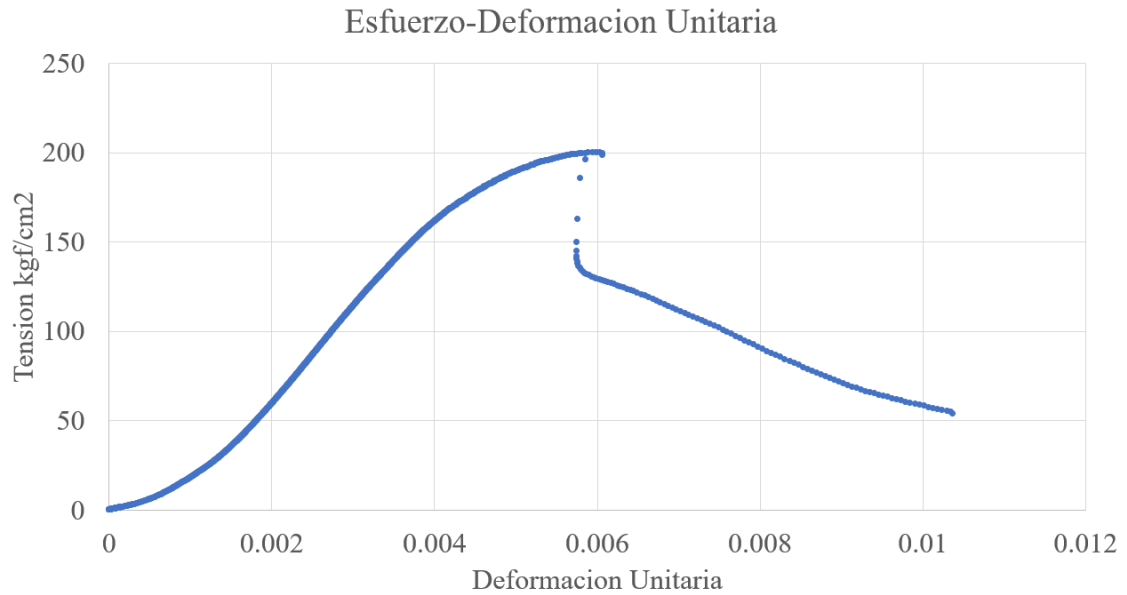
Nombre Parametros	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	16400	201
Media	16400	201
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



*Nota: Resultado del ensayo de compresión realizado a los 14 días sobre la muestra 3 de la mezcla patrón, la curva ilustra la respuesta del material bajo carga, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 16400 kgf, seguido de un desplazamiento de 1.18 mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 19**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria, fórmula patrón, 14 días.*

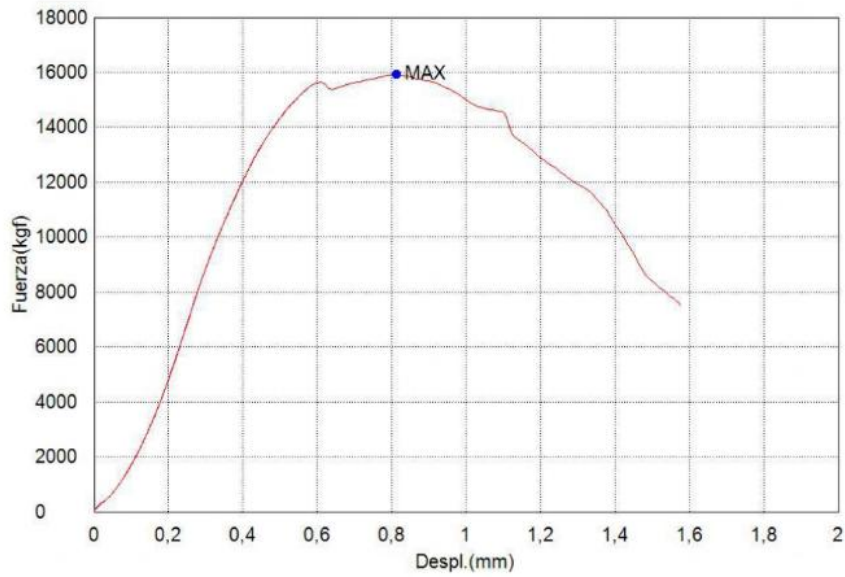


*Nota: Muestra un comportamiento elástico inicial hasta un pico de esfuerzo, seguido de una caída abrupta y una posterior disminución gradual del esfuerzo, el esfuerzo máximo fue de 201 kgf/cm<sup>2</sup> con una deformación unitaria de 0.00593 Fuente: (Elaborado por autor).*

## Figura 20

Gráfica carga-desplazamiento, fórmula patrón, 14 días.

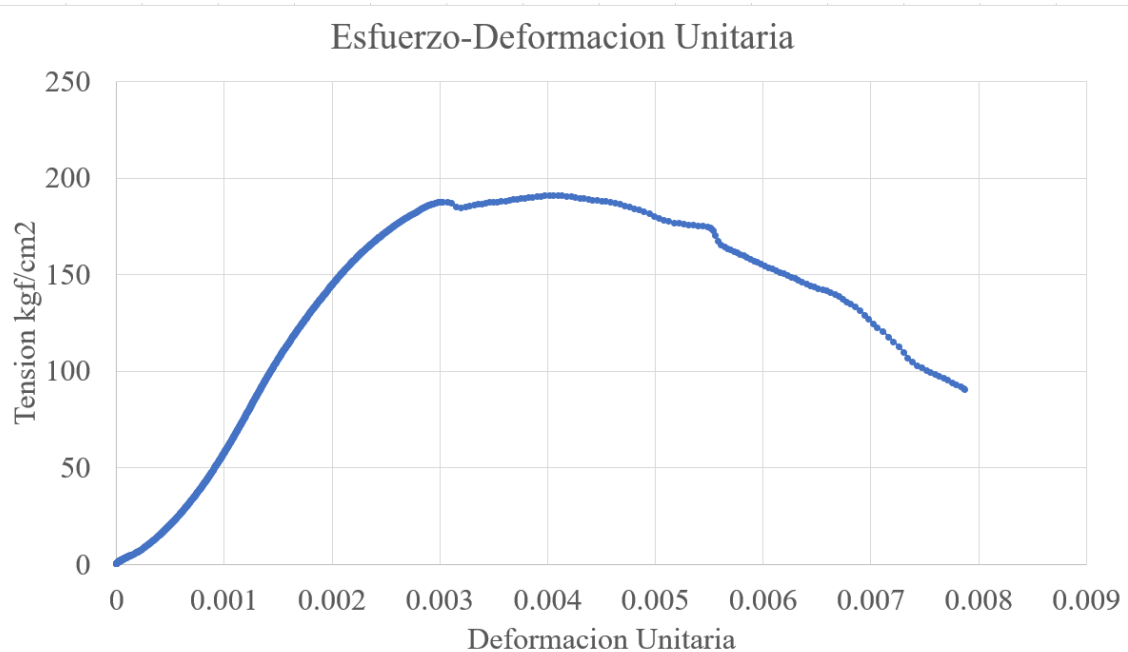
Nombre	Max. Fuerza	Max. Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	15900	191
Media	15900	191
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



*Nota: Resultado del ensayo de compresión realizado a los 14 días sobre la muestra 4 de la mezcla patrón, la curva ilustra la respuesta del material bajo carga, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 15900 kgf, seguido de un desplazamiento de 0.81 mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 21**

*Gráfica esfuerzo-deformación unitaria, fórmula patrón, 14 días.*



*Nota: Muestra un comportamiento inicial elástico hasta un esfuerzo máximo, seguido de una disminución gradual del esfuerzo con el aumento de la deformación, el esfuerzo máximo fue de 191 kgf/cm<sup>2</sup> con una deformación unitaria de 0.00405 Fuente: (Elaborado por autor).*

El resumen del hormigón con la fórmula patrón de 0.47 de relación agua-cemento muestra resultados satisfactorios, acorde con lo propuesto en las especificaciones iniciales. Esto es coherente con el proceso de curado del hormigón, donde la mayor parte de la resistencia a la compresión se desarrolla en las primeras semanas. A los 14 días, el hormigón suele alcanzar un porcentaje significativo de su resistencia final (a menudo entre el 85% y el 95% de la resistencia a los 28 días, que es la resistencia de diseño estándar). Por lo tanto, obtener resultados satisfactorios a esta edad indica un buen desempeño y valida la fórmula patrón como base para la creación

de los cilindros de inspiración romana. Los resultados obtenidos de los cilindros patrón se presentan a continuación en la tabla 13.

**Tabla 13**

Resumen resistencia a compresión Formula patrón

RESISTENCIA FORMULA PATRON RELACION AGUA CEMENTO 0.47			
Numero cilindro	días	máxima tensión	
1	7	169	kgf/cm <sup>2</sup>
2	7	156	kgf/cm <sup>2</sup>
3	14	201	kgf/cm <sup>2</sup>
4	14	191	kgf/cm <sup>2</sup>

*Nota: Solo se hicieron ensayos hasta los 14 días, al ya dar una resistencia de 201kgf/cm<sup>2</sup>*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

Si bien no se llevó a cabo una validación formal exhaustiva de la fórmula patrón, los resultados obtenidos a los 14 días de curado con resistencias a la compresión en el rango de 191 a 201 kgf/cm<sup>2</sup> fueron considerados suficientemente representativos para continuar con el desarrollo experimental. Al estar estos valores próximos a la resistencia objetivo de diseño de 210 kgf/cm<sup>2</sup>, se interpretó que el comportamiento mecánico de la mezcla era adecuado como referencia base para la comparación con las formulaciones modificadas inspiradas en técnicas romanas.

No obstante, esta situación representa una deficiencia metodológica, al no haberse verificado completamente el cumplimiento del valor objetivo mediante una serie de ensayos más extensa. Sin embargo, dicha limitación puede justificarse hasta cierto punto mediante la comparación con el estudio de (Wang et al., 2025), en el que también se observó una tendencia similar: las mezclas patrón, sin adiciones de cal viva, presentaron una ligera disminución respecto a la resistencia teórica estimada. Esta coincidencia sugiere que la leve desviación obtenida en la presente investigación se

encuentra dentro de un rango esperable, otorgando mayor solidez al criterio de continuidad adoptado.

### **3.14 Formulación de hormigones de inspiración romana**

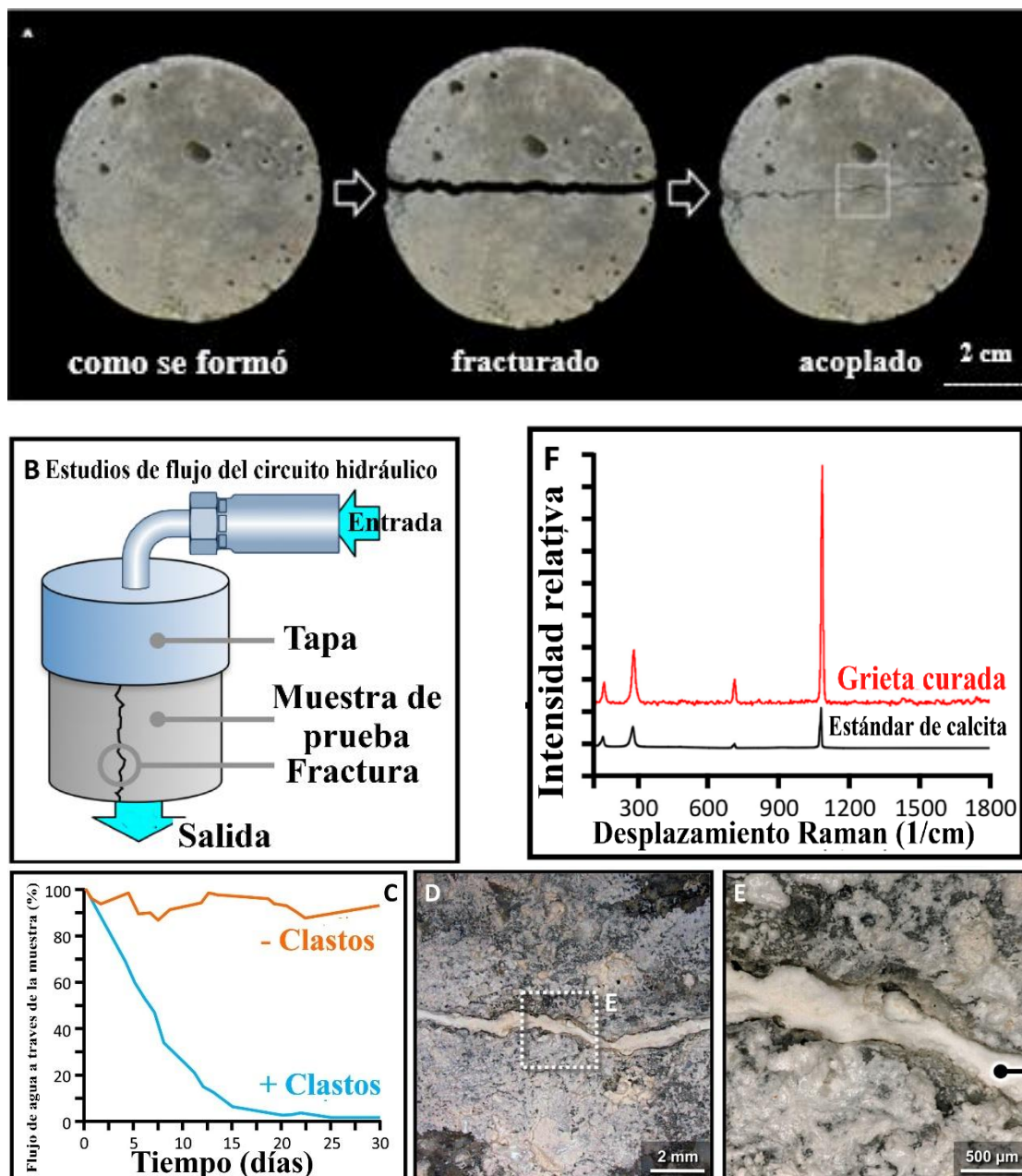
Para dar inicio a la formulación modificada, cuyo objetivo es dotar al hormigón de posibles propiedades de autorreparación y aumentar su resistencia a compresión, aunque la cantidad de muestras es insuficiente para tener una certeza absoluta; se decidió integrar ceniza volcánica y cal viva a la formulación moderna basada en el método Fuller-Thompson. Siguiendo las recomendaciones del estudio original de (Seymour et al., 2023) se realizó un reemplazo del 20% del cemento por ceniza volcánica. Este cambio implicó una corrección en la relación agua-cemento (A/C), que ahora se convierte en una relación agua-cemento-puzolana (A/C+P), con el fin de adecuar la mezcla a las propiedades esperadas.

Siguiendo el enfoque del estudio original, en el cual se establecieron variaciones en la cantidad de cal viva entre un 7.5% y un 15% de la masa total del hormigón (Seymour et al., 2023). En la presente investigación se decidió implementar un rango similar, pero con ajustes propios. Para este caso, se optó por variaciones del 5%, 10% y 15%, aplicadas tanto en la fabricación de cilindros como de placas, permitiendo así evaluar su impacto en las propiedades mecánicas y de autoreparación del material.

Los cilindros se emplearán para medir la resistencia a compresión de la formulación, evaluando si las mezclas modificadas cumplen con los requisitos estructurales necesarios para su uso en construcción. Por otro lado, las placas se utilizarán para llevar a cabo un registro fotográfico que permita observar de cerca si la adición de ceniza volcánica y cal viva otorga propiedades autorreparadoras al hormigón, tal como se ha observado en estudios anteriores. La ilustración 18 muestra los primeros resultados obtenidos.

Figura 22.

Proceso de autocuración



Nota: Seymour, L. M., Maragh, J., Sabatini, P., Di Tommaso, M., Weaver, J. C., & Masic, A. (2023). Imágenes del proceso de autocuración del hormigón mediante circuito

*hidráulico [Figura]. En Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. Science Advances, 9(1), eadd1602*

### **3.15 Corrección de la relación agua cemento por agua cemento y puzolana**

Tal como se ha descrito en los hallazgos arqueológicos sobre los hormigones romanos, las puzolanas eran un componente fundamental de su composición, siendo posiblemente una de las causas de su durabilidad y resistencia excepcionales a lo largo del tiempo. Los historiadores y estudiosos de la ingeniería romana destacan que la adición de materiales puzolánicos, como la ceniza volcánica, permitió a los romanos construir estructuras que han perdurado durante milenios. Inspirados en esta tecnología ancestral, en el presente estudio se ha decidido incorporar cenizas volcánicas en la formulación de un hormigón moderno, con el fin de explorar sus beneficios en cuanto a la resistencia y propiedades autoreparadoras (Carles, 2014).

“De la amplia utilización de las cenizas volantes, como aditivo mineral, finamente dividido, en el hormigón, se pueden enumerar, aunque cualitativamente, algunas propiedades importantes. Por ejemplo, se ha reconocido experimentalmente que las cenizas volantes pueden afectar la resistencia del hormigón de las siguientes maneras: a) por reacción puzolánica. b) por reducción de agua en la mezcla de hormigón, manteniendo una manejabilidad constante; c) por aumento del volumen de pasta en la mezcla. Estos y otros efectos adicionales demuestran que la adición de cenizas complica aún más la naturaleza compleja del hormigón. Algunas conclusiones de conocimiento general son las siguientes: a) Las cenizas volantes, de diferentes fábricas, pueden tener un comportamiento muy diferente en el hormigón, aunque ellas cumplan las especificaciones A.S.T.M. C-618. b) La misma ceniza puede tener un comportamiento diferente con los distintos cementos portland o inclusive con un mismo cemento portland pero que provenga de diferentes fábricas. c) El efecto de las cenizas

volantes puede variar con la edad del hormigón. A edades tempranas la resistencia se reduce, pero a edades de 90 días, o más, la resistencia aumenta notablemente. d) La ceniza volante puede tener un efecto apreciable en la cantidad de aire incluido. e) El hormigón hecho con cenizas volantes es más sensible a las condiciones de curado (humedad y temperatura) que el mismo hormigón de cemento portland. f) La calidad de la ceniza volante debe mejorar a medida que al hormigón se le exijan mayores resistencias”(Orlando, 1987).

Por lo tanto, es necesario ajustar la dosificación del hormigón cuando se incorpora ceniza volcánica o cenizas volantes en la mezcla. Según la bibliografía “desafortunadamente nuestro conocimiento es limitado, cuando se trata de evaluar cuantitativamente el efecto de las cenizas volantes en el hormigón.”(Orlando, 1987)

Para la presente investigación se utilizará una “nueva relación agua-conglomerante ( $A/(C + P)$ ), es decir (Agua/ (cemento + puzolana)). En lugar de la relación agua-cemento ( $A/C$ ) usada en el método anterior. Existen dos procedimientos para la determinación de una ( $A/(C + P)$ ) equivalente a una ( $A/C$ ): a) El método de pesos equivalentes, b) el método de los volúmenes absolutos equivalentes.”(Orlando, 1987)

En este caso, dado que se conoce el porcentaje de puzolana a añadir, así como las propiedades físicas de los componentes, es posible ajustar correctamente la relación agua-cemento-puzolana ( $A/(C+P)$ ) para optimizar la mezcla de hormigón. Los valores clave a tener en cuenta son los pesos específicos y las densidades tanto del cemento como de la ceniza volante, lo que permitirá un cálculo preciso de la dosificación.

En primer lugar, el cemento Holcim utilizado tiene un peso específico de 2.94 y una densidad de 2940 kg/m<sup>3</sup>, lo cual es un valor estándar y adecuado para formulaciones de hormigón estructural. Por otro lado, la ceniza volante, cuyo peso específico fue determinado a través del método del Frasco de Le Chatelier, tiene una densidad de 2390

kg/m<sup>3</sup> y un peso específico de 2.39, lo cual es muy cercano al valor recomendado en guías técnicas, que sugieren un peso específico de 2.94 (Orlando, 1987). Este resultado indica que la ceniza volante se encuentra dentro de los parámetros adecuados para su uso en el hormigón sin que genere variaciones significativas en la mezcla.

La fórmula que se usa es la siguiente:

$$\frac{A}{(C+P)} = \frac{A}{C} \times \frac{\rho_e}{\rho_e \times (1-Fv) + \rho_{ev} \times (Fv)} \quad (17)$$

$$\frac{A}{(C+P)} = 0.47 \times \frac{2.94}{2.94 \times (1-0.20) + 2.39 \times (0.20)} = 0.478 \quad (18)$$

Donde:

A/((C+P)): Es relación Agua-cemento-puzolana

A/C: Es relación Agua-cemento

Pe: Es el peso específico del cemento

Pev: Es el peso específico de la ceniza.

Fv: Es el porcentaje de ceniza.

Por lo tanto, se utilizará una relación corregida de 0.478 para las próximas muestras de cilindros de hormigón modificado y placas, con porcentajes variables de cal viva en 5%, 10% y 15%. En cuanto a la ceniza volcánica, se mantendrá como un componente fijo con un 20% de reemplazo del cemento en todas las mezclas.

### **3.16 Elaboración de cilindros y placas en concentración de 5 % de cal viva**

En adelante, se tomarán en cuenta las diferentes humedades presentes en los materiales para corregir la cantidad de agua en las mezclas, con el objetivo de producir un hormigón que sea apto para las condiciones particulares de cada día. Los materiales utilizados serán los mismos en cada tanda de placas y cilindros para asegurar la consistencia de los resultados.

La cal viva será proporcionada por la empresa RELUBQUIM CIA. LTDA. de Quito, la cual garantiza una pureza mínima del 98% de CaO (óxido de calcio). En

cuanto a la ceniza, aunque en Ecuador no existe una normativa específica sobre su distribución debido a su nulo uso en hormigones, se obtuvo ceniza proveniente del volcán Chimborazo, una fuente confiable en el contexto local. Por su parte, la grava y la arena fueron adquiridas a través de un distribuidor local, con materiales provenientes de Santa Isabel, los cuales son ampliamente utilizados en las construcciones de la ciudad de Cuenca. Finalmente, se empleará cemento HOLCIM, uno de los cementos más comunes y de reconocida calidad en el mercado ecuatoriano.

### **Figura 23**

*Ceniza volcánica almacenada en las instalaciones del CITT*



*Nota: Muestra de ceniza volcánica utilizada como puzolana natural en las formulaciones experimentales, observada en el Centro de Investigación, Tecnología y Transferencia (CITT) Fuente: (Elaborado por autor).*

Para la primera tanda cilindros y placas se tiene una humedad ese día que se ve en la tabla 14.

**Tabla 14***Corrección de humedad cilindros 5%*

AGREGADO GRUESO		
Porcentaje de humedad	0.49	%
Porcentaje de absorción	1.27	%
WG	5.76948489	kg
AGREGADO FINO		
Porcentaje de humedad	2.49	%
Porcentaje de absorción	4.43	%
WS	16.408996	kg

*Nota: Son los valores de humedad para los primeros ensayos Fuente: (Elaborado por autor).*

Dado los valores obtenidos en la corrección de humedad, se ha determinado que el material no está totalmente saturado, lo que indica que los agregados absorberán humedad durante la mezcla. Por lo tanto, será necesario aumentar la cantidad de agua en la mezcla para compensar esta absorción

La cantidad de agua a aumentar, basada en las mediciones de humedad, se detalla en la tabla 15, donde se especifican los ajustes necesarios para cada mezcla.

**Tabla 15***Corrección de cantidad de agua*

Ww	196.72	kg
AGUA	-22.18	kg

*Nota: Se aumenta 22.18kg de la cantidad original de agua Fuente: (Elaborado por autor).*

De manera en la cual determinamos que los pesos por m<sup>3</sup> de hormigón serán los siguientes.

**Tabla 16**

*Materiales saturados*

MATERIALES SATURADOS		
Agua	241.08	kg
CEMENTO	448.57	kg
GRAVA	724.63	kg
ARENA	793.54	kg
SUMA		
COMPONENTES	2207.82	kg

*Nota: Se aumenta el agua Fuente: (Elaborado por autor).*

Para esta tanda y las siguientes muestras de hormigón, se prepararán 6 cilindros, pero el cálculo se realizará considerando como si fueran 8 cilindros, añadiendo un 15% adicional al volumen total. Esta estrategia asegura que no haya problemas relacionados con la disponibilidad de material, garantizando que la mezcla sea suficiente para llenar los moldes de manera adecuada. Los detalles de este cálculo se reflejan en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Dosificación de cilindros*

Cantidad	8	uni
Diámetro	10	cm
Altura	20	cm
Área	78.54	cm <sup>2</sup>
Volumen	1570.80	cm <sup>3</sup>
Volumen total	12566.3706	cm <sup>3</sup>
Volumen + 15%	14451.3262	cm <sup>3</sup>
Volumen + 15%	0.01445133	m <sup>3</sup>

*Nota: El volumen se mantuvo constante en todas las pruebas Fuente: (Elaborado por autor).*

Con un volumen total de 0.01445133 m<sup>3</sup> para todos los cilindros, es posible ajustar el volumen de la tabla 16. Este ajuste permitirá calcular con precisión las cantidades de materiales necesarios para la mezcla de hormigón, asegurando que la relación agua-conglomerante se mantenga adecuada. Los valores ajustados se reflejan en la tabla 17.

**Tabla 18**

*Cantidad por todos los cilindros*

AGUA	3.484	kg
CEMENTO	6.482	kg
GRAVA	10.472	kg
ARENA	11.468	kg
SUMA COMPONENTES	31.906	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: El volumen cambia con todas las pruebas y las placas se manejan de forma distinta*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

A continuación, se procede con el reemplazo del 20% del cemento por ceniza volcánica, además de añadir un 5% de cal viva, calculado en base a la masa total del hormigón. Este ajuste en la formulación tiene como objetivo emular las propiedades del hormigón romano, conocido por su durabilidad y capacidad de autoreparación. Asimismo, este cambio implica la utilización de una menor cantidad de cemento Portland, lo cual no solo reduce el impacto ambiental asociado a la producción de cemento, sino que también incorpora las ventajas de las puzolanas y la cal viva, materiales clave en las mezclas tradicionales romanas.

**Tabla 19**

Dosificación con 5% de cal viva

CONCENTRACION DEL 5%		
AGUA	3.48	kg
CEMENTO	5.19	kg

CENIZA	1.30	kg
GRAVA	10.47	kg
ARENA	11.47	kg
CAL VIVA	1.66	kg
SUMA COMPONENTES	33.57	kg/m <sup>3</sup>

---

*Nota: La cal viva suma 1.66 kg a la mezcla mientras que la ceniza suma 1.30 kg como reemplazo del cemento Fuente: (Elaborado por autor).*

La primera mezcla se realizó de forma manual, utilizando una pala, asegurando que todos los materiales fueran integrados de manera homogénea. El proceso comenzó con la mezcla del agregado fino y agregado grueso, seguido de la incorporación de la ceniza volcánica y la cal viva. La mezcla se llevó a cabo de manera similar a como se prepararía un hormigón ordinario, prestando especial atención a la uniformidad de los componentes para garantizar una distribución adecuada de los materiales.

Adicionalmente, los cilindros y placas ya estaban preparados y listos para recibir la mezcla de hormigón, asegurando que el proceso se llevara a cabo de manera fluida y sin contratiempos. Este método manual permitió un control cuidadoso de cada fase de la mezcla, garantizando que los materiales fueran combinados correctamente y que la mezcla resultante cumpliera con las especificaciones previstas para la investigación.

Durante el proceso de mezcla, se tomó la temperatura de la mezcla, y se observó que no hubo un aumento significativo en su temperatura. La baja concentración de cal viva y ceniza volcánica en la mezcla provocó un incremento de apenas 1°C por encima de la temperatura ambiente, resultando en una temperatura final de 22°C. Este ligero incremento sugiere que la reacción exotérmica fue mínima, lo cual es consistente con la proporción de los materiales utilizados en esta formulación.

Además, durante el proceso de elaboración de la mezcla, se tomaron medidas de seguridad estrictas debido a la manipulación de cal viva, que puede ser peligrosa para la salud si entra en contacto con la piel o las vías respiratorias. Para evitar estos riesgos, se

utilizó mascarilla, gafas protectoras, guantes y un mandil, garantizando así la protección adecuada contra la irritación que la cal viva podría provocar durante la manipulación de los materiales y el proceso de mezcla.

#### **Figura 24**

Componentes iniciales para la formulación de hormigón romano experimental



*Nota: Disposición de los materiales utilizados en la formulación del hormigón romano experimental antes de su mezclado. Se observan los agregados gruesos y finos, la ceniza volcánica, la cal viva, el cemento y los moldes utilizados para la conformación de cilindros y placas de ensayo.*

Posterior a la mezcla, el hormigón fue vertido en los cilindros y placas, los cuales quedaron listos para iniciar el proceso de curado en agua. Este proceso de curado se realizará durante un período de 28 días, con el objetivo de asegurar que el hormigón adquiera las propiedades mecánicas óptimas, tales como la resistencia a compresión y durabilidad.

En el caso particular de las mezclas con 5% de cal viva, se tomó la decisión de que estas serían las únicas muestras que se someterían a pruebas de compresión a los 90 días. Esta medida tiene como finalidad evaluar el comportamiento a largo plazo de la mezcla y verificar si la adición de cal viva contribuye a mejorar la resistencia del hormigón con el tiempo.

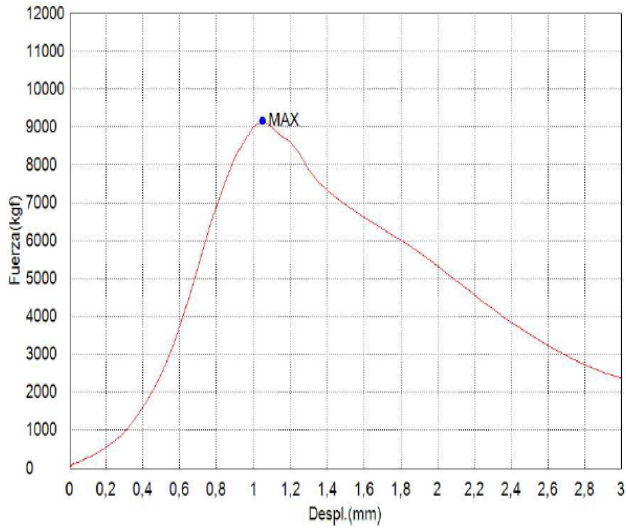
Adicionalmente, las placas fabricadas con esta misma mezcla fueron fisuradas de forma manual, con el propósito de observar su proceso de autoreparación. Este proceso será documentado mediante un registro fotográfico, que permitirá hacer un seguimiento visual de la evolución de las fisuras y analizar si el hormigón con cal viva es capaz de cerrar parcialmente o completamente las grietas de manera natural, replicando así las características autoreparadoras observadas en los hormigones romanos históricos.

A continuación, se presenta la evolución, en las figuras 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 y 34 de la resistencia de los cilindros sometidos a pruebas en el equipo para ensayo de compresión Shimadzu. Este análisis es fundamental para evaluar el desempeño mecánico del hormigón, particularmente en cuanto a su resistencia a compresión a lo largo del tiempo que es de 90 días.

## **Figura 25**

*Gráfica carga-desplazamiento hormigón con 5% de cal viva (día 7)*

Nombre Parametros	Max. Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max. Tension Calc. at Entire Areas kgf/cm2
1_1	9150	113
Media	9150	113
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000

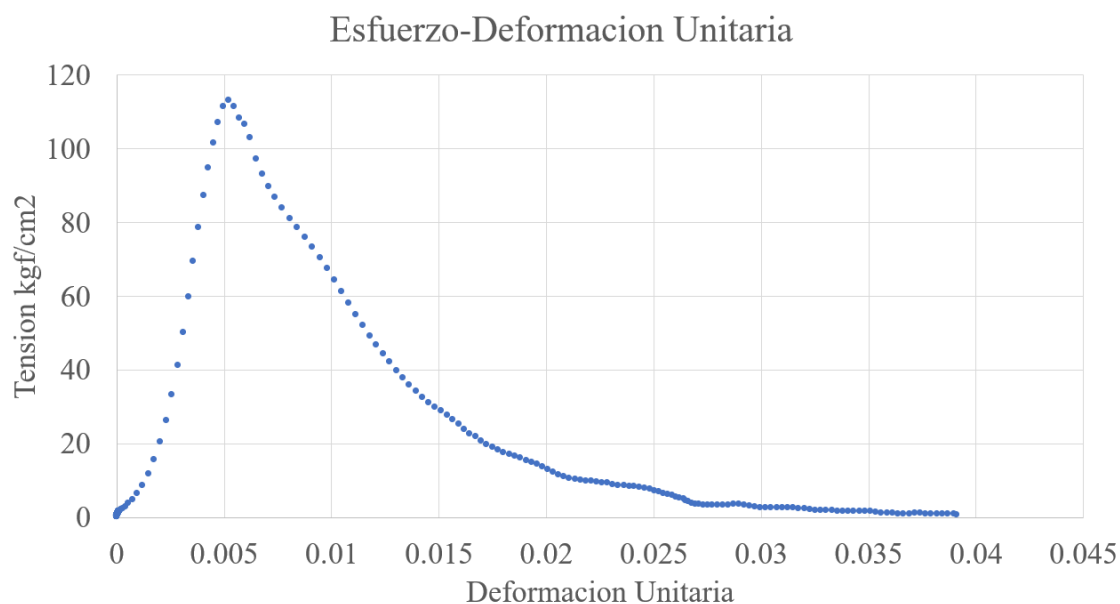


Comentarios

*Nota: La curva ilustra la respuesta del material bajo carga, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 9150 kgf, seguido de un desplazamiento de 1.045mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 26**

Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria hormigón con 5% de cal viva (día 7)

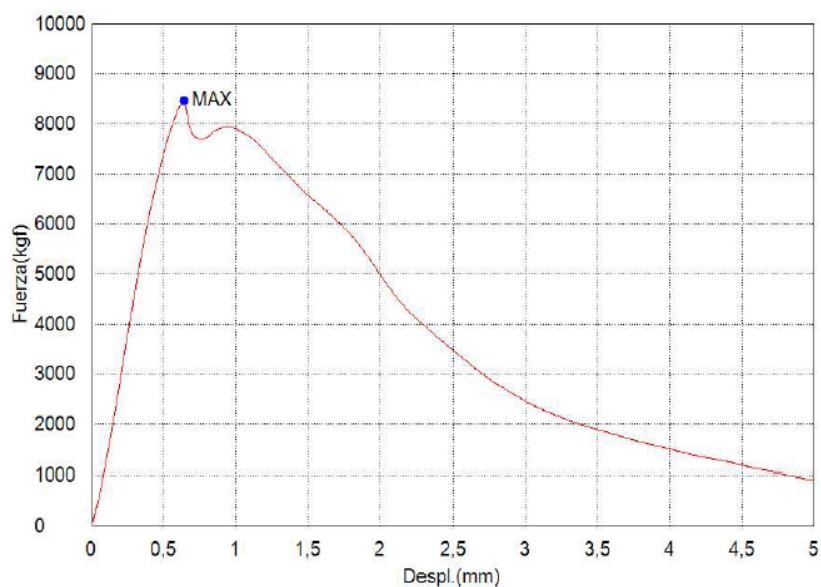


*Nota: Esta curva muestra un rápido aumento inicial del esfuerzo hasta alcanzar un pico, seguido de una caída pronunciada y luego una disminución más gradual del esfuerzo a medida que la deformación unitaria continúa incrementándose, alcanzo una tensión máxima de 113 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.00522 Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 27**

*Gráfica carga-desplazamiento– hormigón con 5% de cal viva (día 14)*

Nombre Parametros Unidad	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max_Tension Calc. at Entire Areas kgf/cm2
1_1	8450	103
Media	8450	103
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



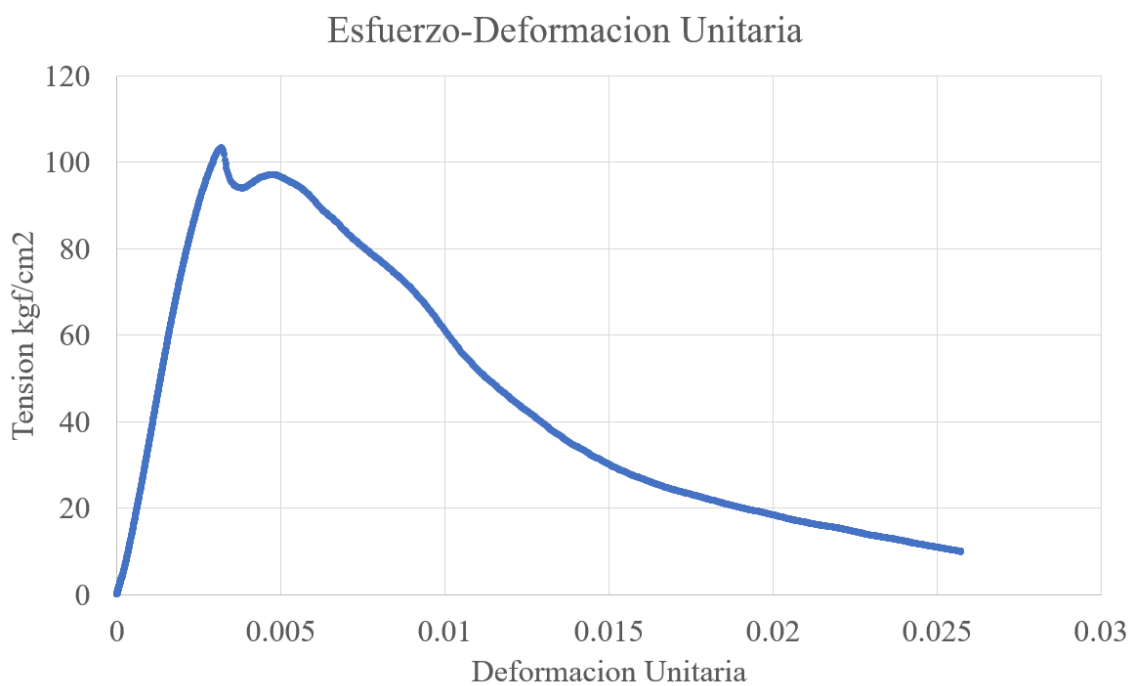
Comentarios

*Nota: Esta gráfica muestra la relación carga-desplazamiento para una muestra de hormigón con 5% de cal viva, evaluada a los 14 días de curado, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 8450 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 0.6 mm*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 28**

*Gráfica esfuerzo-deformación unitarias– Hormigón con 5% de cal viva (día 14)*

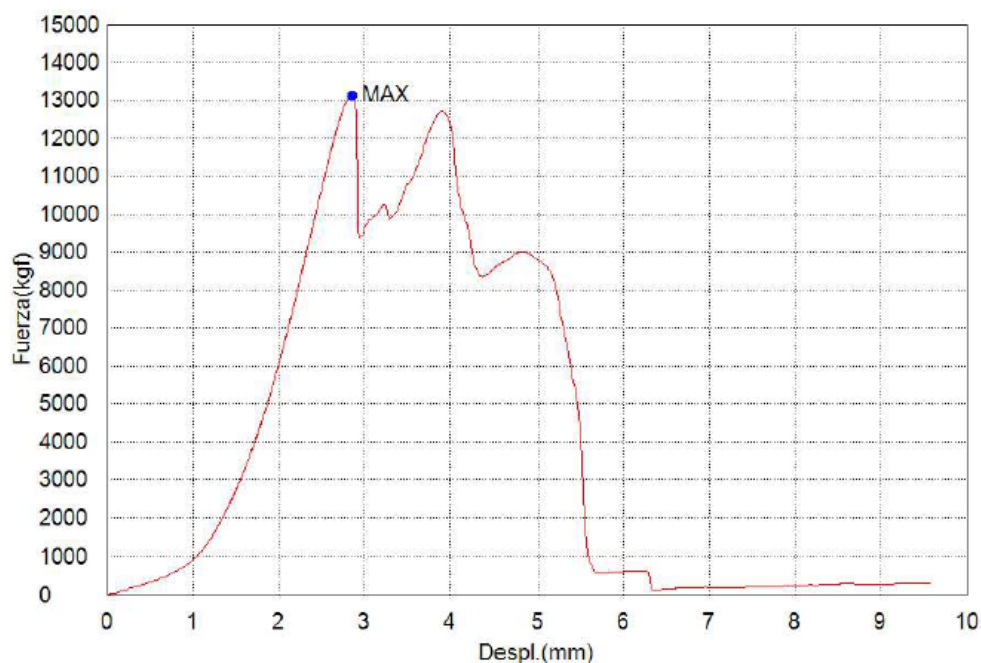


*Nota: La curva muestra un incremento inicial rápido del esfuerzo hasta un valor máximo, seguido de una meseta o ligera caída, para luego disminuir gradualmente del esfuerzo a medida que la deformación unitaria continúa incrementándose, alcanzo una tensión máxima de 103 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.00319 Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 29**

*Gráfica carga-desplazamiento hormigón con 5% de cal viva (día 28)*

Nombre Parametros	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1 _ 1	13100	164
Media	13100	164
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000

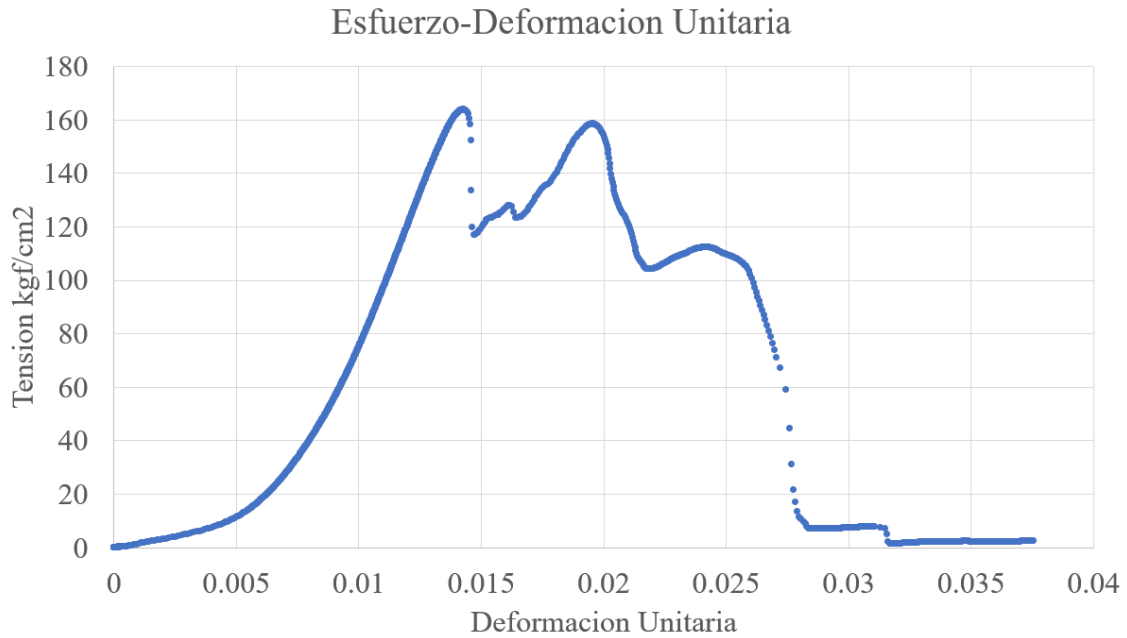


*Nota: La curva exhibe un aumento de la fuerza hasta un primer pico, seguido de una ligera caída y un posterior aumento hasta un segundo pico máximo, mostrando un incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 13100 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 0.6 mm*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 30**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria hormigón con 5% de cal viva, 28 días*

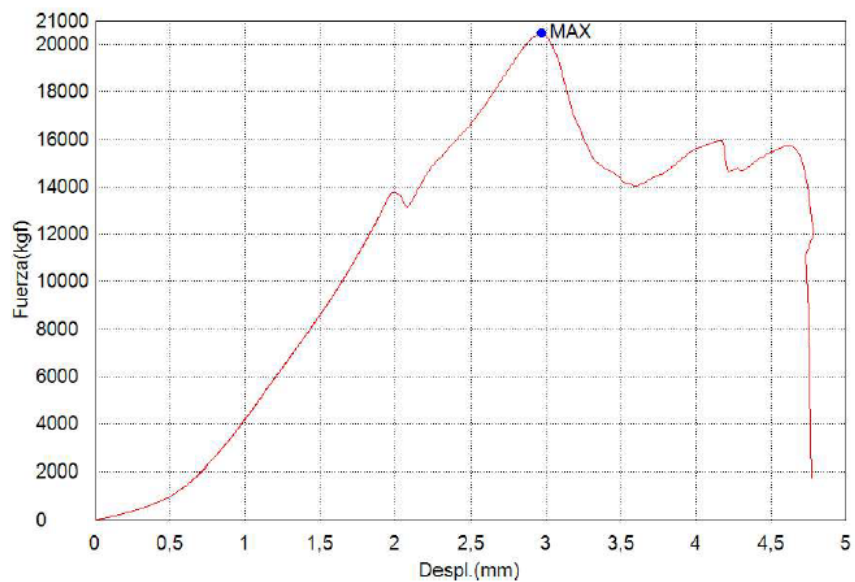


*Nota: La curva exhibe un comportamiento complejo con múltiples picos y mesetas, indicando fluctuaciones en la capacidad de soporte de carga a medida que la deformación unitaria continúa incrementándose, alcanzo una tensión máxima de 164 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.01426 Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 31**

Gráfica carga-desplazamiento hormigón con 5% de cal viva (día 90)

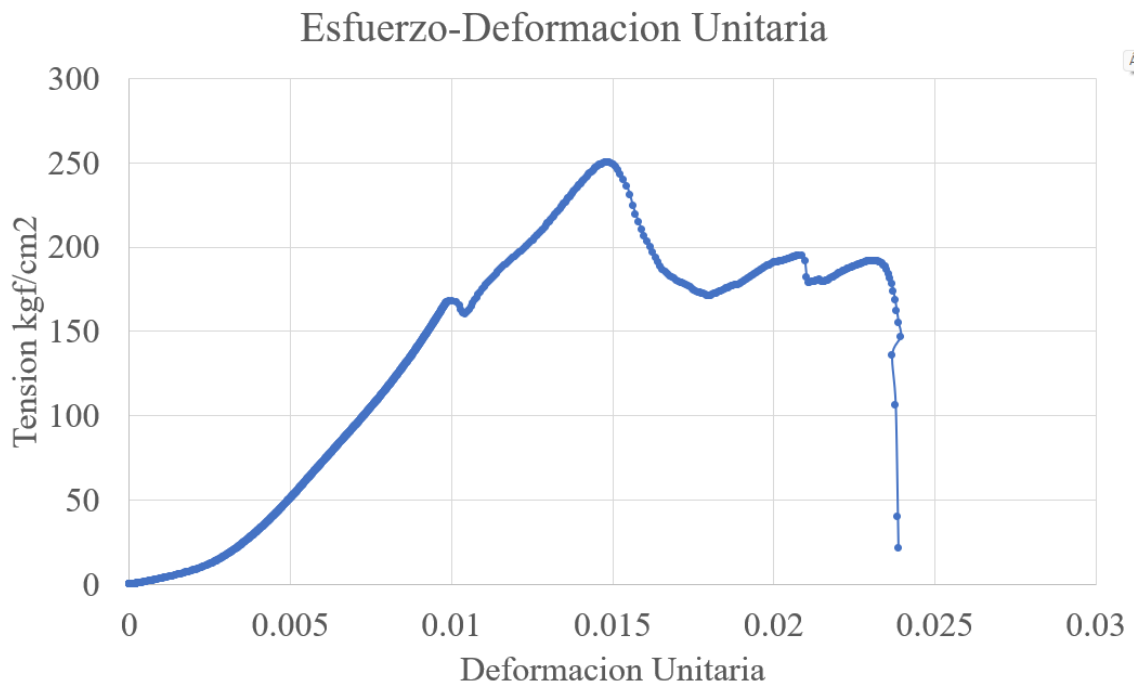
Nombre Parametros	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	20500	251
Media	20500	251
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0.00000	0.00000



Nota: La curva muestra un aumento continuo incremento de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 20500 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 2.96 mm Fuente: (Elaborado por autor).

Figura 32

Gráfica esfuerzo-deformación unitaria hormigón con 5% de cal viva (día 90)

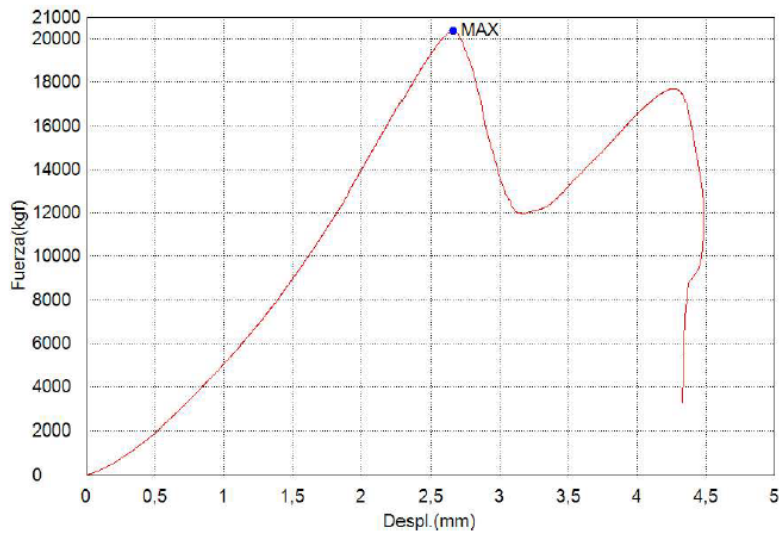


*Nota: La curva exhibe un comportamiento complejo con múltiples picos y mesetas de esfuerzo, incluyendo un pico principal de alta tensión, antes de una caída abrupta y final, alcanzo una tensión máxima de 251 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.01483 Fuente: (Elaborado por autor).*

### Figura 33

Gráfica carga-desplazamiento– Hormigón con 5% de cal viva, muestra dos (día 90)

Nombre Parametros	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	20400	245
Media	20400	245
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000

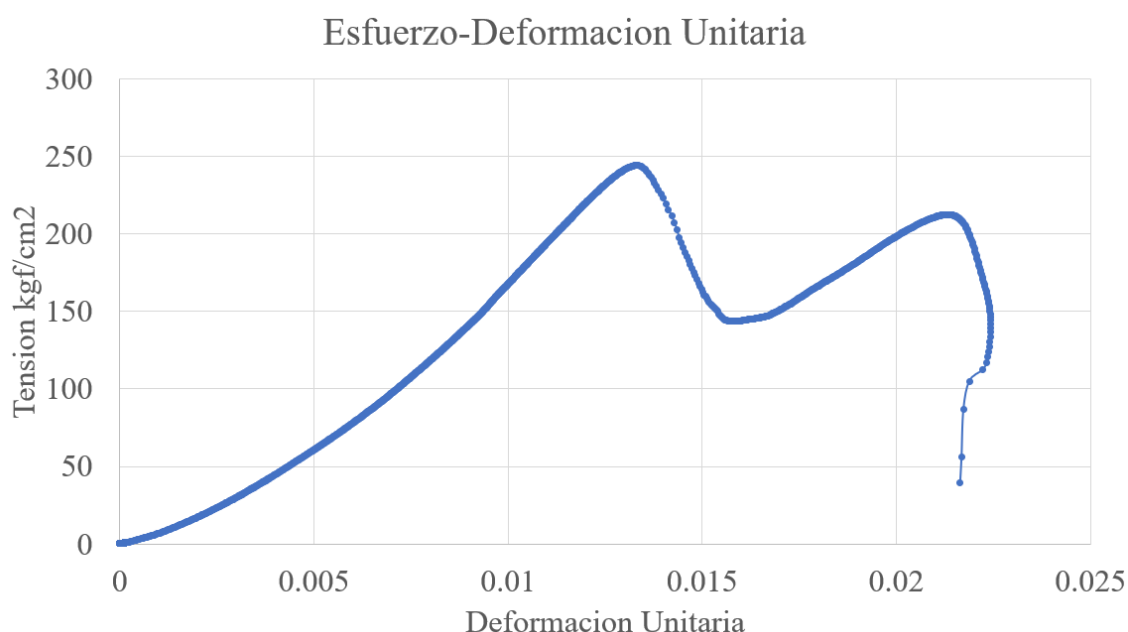


Nota: La curva muestra un aumento continuo de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 20400 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 2.66 mm

Fuente: (Elaborado por autor).

### Figura 34

*Gráfica esfuerzo-deformación unitaria– Hormigón con 5% de cal viva, muestra dos (día 90)*



*Nota: La curva muestra un incremento inicial del esfuerzo hasta un pico principal, seguido de una disminución y un posterior aumento para alcanzar un segundo pico, antes de una caída abrupta, alcanzo una tensión máxima de 245 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.0133 Fuente: (Elaborado por autor).*

Como se puede observar en las figuras 25, 27 y 29. las resistencias del hormigón presentaron una caída significativa en sus edades tempranas, lo cual es característico en este tipo de mezclas modificadas con ceniza volcánica y cal viva. Sin embargo, como se evidencia en las figuras 31 y 33, el hormigón no solo recuperó su resistencia, sino que excedió el valor de diseño original, que era de 210 kgf/cm<sup>2</sup>.

El hormigón mostró un aumento de resistencia del 116.66% al 119.52%, alcanzando resistencias a compresión de 245 kgf/cm<sup>2</sup> y 251 kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Este incremento en la resistencia a compresión refleja el efecto positivo de la adición de ceniza volcánica y cal viva en la mezcla, lo que contribuye a la durabilidad y capacidad

del hormigón para mejorar sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo, emulando las características del hormigón romano, sin embargo, debido a la escasa cantidad de probetas no se puede afirmar que esta tendencia sea la norma en ninguna de sus edades, pese a corresponder a lo esperado.

Respaldado por los hallazgos experimentales presentados en (Wang et al., 2025), se refuerza la hipótesis de que la incorporación controlada de cal viva en mezclas cementantes puede ofrecer un equilibrio técnico favorable. En su estudio, los autores evaluaron el efecto de sustituir progresivamente el cemento por cal viva en la fabricación de agregados livianos artificiales curados en autoclave. Los resultados demostraron que la mezcla con un 5 % de cal viva (formulación Q5) logró mantener una resistencia a compresión significativamente alta (aproximadamente 17.8 MPa), muy cercana a la obtenida con cemento sin sustitución (Q0: 18.5 MPa), lo cual indica que un bajo porcentaje de cal no compromete la integridad estructural del material.

Esta estabilidad mecánica en presencia de cal sugiere que, a bajas concentraciones, el CaO logra participar activamente en las reacciones de hidratación sin inducir una excesiva porosidad, como ocurre en formulaciones con mayor contenido. Además, el uso de ceniza volante como componente puzolánico permitió la formación de fases hidratadas beneficiosas, como la tobermorita, lo que contribuyó a la cohesión interna de los agregados.

Tales hallazgos son consistentes con los planteamientos de (Seymour et al., 2023) y (Jackson et al., 2018), quienes destacan que el uso controlado de cal viva puede mejorar propiedades como la durabilidad y la autoreparación del hormigón. En el caso de (Wang et al., 2025), aunque no se enfocan en autoreparación como tal, sus datos sugieren que un diseño balanceado con cal y materiales puzolánicos puede resultar en

un material resistente, liviano y potencialmente sostenible, alineado con los objetivos de esta investigación.

Mientras tanto, las placas experimentaron un desarrollo diferente al esperado. A lo largo del tiempo, se registró minuciosamente su evolución mediante un seguimiento continuo, a diferencia del estudio original donde los cilindros fueron sometidos a un flujo constante de  $\pm 5$  litros por hora de agua (Seymour et al., 2023). En este caso, se optó por mantener las placas sumergidas bajo agua de forma continua durante 28 días, con el propósito de observar si las condiciones de inmersión favorecían el proceso de autoreparación de las grietas.

Durante este período, las placas fueron fotografiadas periódicamente con el objetivo de documentar cualquier indicio de autoreparación. La intención fue identificar si, bajo estas condiciones controladas, las grietas podrían cerrarse o reducirse como resultado de la mezcla modificada con cal viva, en un intento de replicar el comportamiento del hormigón romano en términos de durabilidad y la posible capacidad autoreparadora.

**Figura 35**

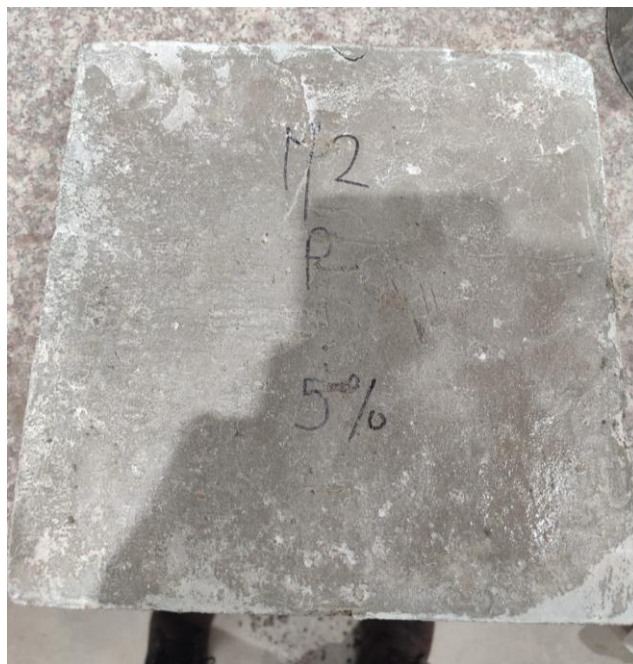
*Placa M1 5% cal viva estado inicial*

**Figura 36**

*Placa M2 5% cal viva estado inicial*



*Nota: La muestra corresponde a la mezcla M1, elaborada con ceniza volcánica y cal viva, y fue sometida a fisuración previa al proceso de curado para el seguimiento de su evolución estructural mediante registro fotográfico Fuente: (Elaborado por autor).*



*Nota: La muestra corresponde a la mezcla M2, elaborada con ceniza volcánica y cal viva, y fue sometida a fisuración previa al proceso de curado para el seguimiento de su evolución estructural mediante registro fotográfico Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 37**

*Placa M2 5% cal viva estado inicial parte trasera.*



**Figura 38**

*Placa M1 5% cal viva 7 días bajo el agua.*



*Nota: Placa M2 elaborada con una concentración del 5% de cal viva. La imagen muestra el estado inicial de la muestra, específicamente en su cara posterior, donde se aprecian fisuras visibles antes del proceso de curado. Esta observación forma parte del seguimiento fotográfico destinado a evaluar posibles propiedades autoreparantes del hormigón Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: La imagen muestra la placa M1 con una concentración del 5% de cal viva tras 7 días de curado bajo inmersión en agua. Se evidencia una fisura transversal sin signos visibles de autoreparación en esta etapa, lo cual sugiere una limitada eficacia del mecanismo de cicatrización en condiciones iniciales de exposición Fuente: (Elaborado por autor).*

### **Figura 39**

*Placa M2 5% cal viva 7 días bajo el agua*



***Nota:** En la imagen se observa la placa M2 con una concentración del 5% de cal viva luego de 7 días de curado bajo agua. Se evidencia una fisura vertical claramente definida, sin indicios visibles de procesos de autoreparación activa. La superficie permanece porosa y húmeda, sin formación de depósitos minerales que indiquen una respuesta cicatrizante del material Fuente: (Elaborado por autor).*

Durante los primeros 7 días bajo el agua, no se observó una mejoría notable en las grietas del material, a pesar de que la mezcla contenía un 5% de cal viva. Este resultado inicial sugiere que el proceso de autoreparación del hormigón no se activa de manera inmediata en estas condiciones.

**Figura 40**

*Placa M1 5% cal viva 14 días bajo el agua*



*Nota: Placa M1 con 5% de cal viva tras 14 días de curado bajo agua. Se observa que la fisura principal permanece sin cambios significativos, sin evidencia de procesos de autoreparación visibles. La superficie continúa mostrando porosidad, sin signos de precipitación de compuestos minerales Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 41**

*Placa M2 5% cal viva 14 días bajo el agua*

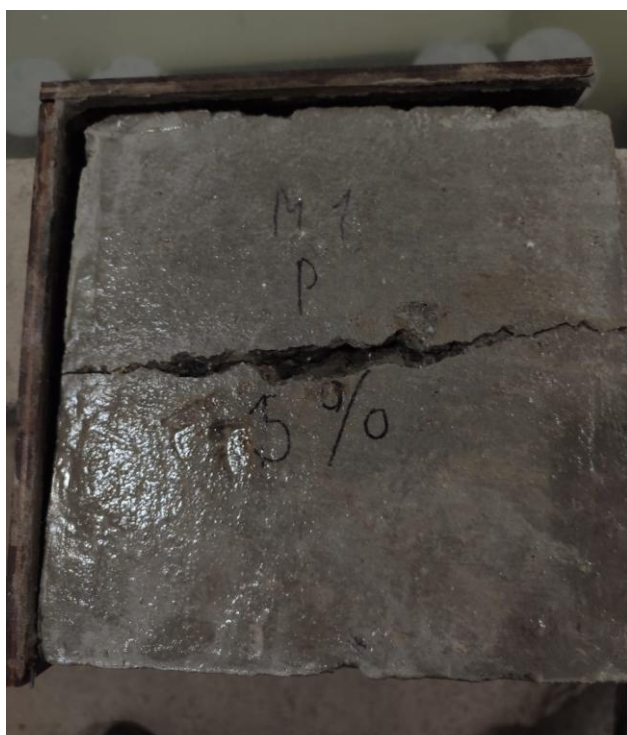


*Nota: Placa M2 con 5% de cal viva luego de 14 días bajo agua. La grieta central sigue siendo claramente visible y no se aprecian señales de sellado o formación de nuevos materiales en su interior. Al igual que en la Figura 28, no se detectan indicios visuales de comportamiento autoreparante Fuente: (Elaborado por autor).*

De igual forma, tras 14 días de inmersión, las placas no mostraron mejorías significativas en las grietas. A pesar de la presencia del 5% de cal viva en la mezcla, algún posible proceso de auto reparación aún no se activó de manera visible.

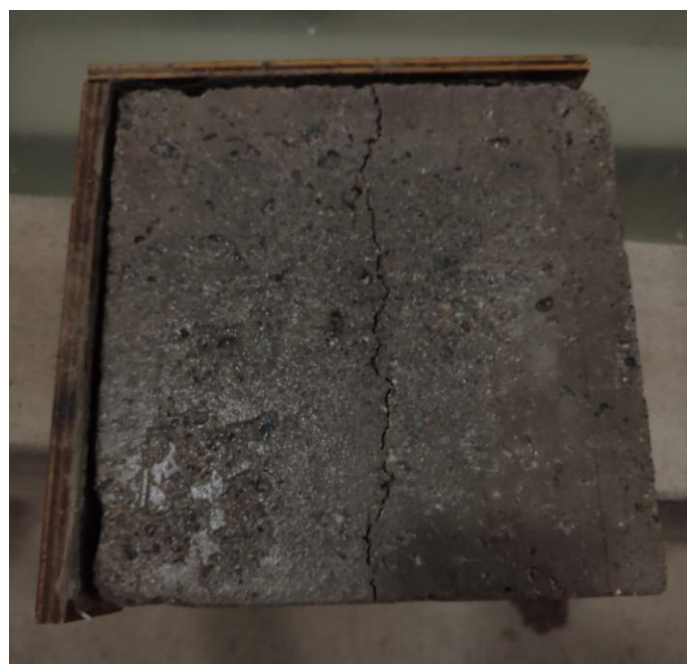
**Figura 42**

*Placa M1 5% cal viva 21 días bajo el agua*



**Figura 43**

*Placa M2 5% cal viva 21 días bajo el agua*



*Nota: Placa M1 con 5% de cal viva tras 21 días de curado bajo agua. A pesar del tiempo transcurrido, no se evidencian signos visibles de autoreparación. La fisura principal se mantiene abierta, sin presencia de depósitos minerales ni sellado superficial Fuente: (Elaborado por autor).*

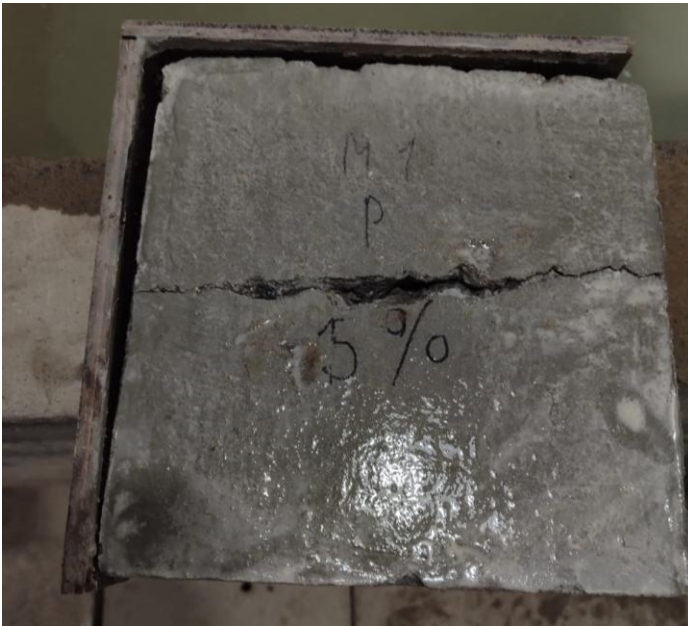
*Nota: Placa M2 con 5% de cal viva después de 21 días sumergida en agua. La grieta sigue siendo claramente perceptible, sin indicios visuales de cicatrización ni acumulación de productos derivados de reacciones químicas. La superficie mantiene una textura porosa Fuente: (Elaborado por autor).*

A los 21 días de estar sumergidas, las placas no mostraron una mejoría significativa en cuanto a la reparación de las grietas. Sin embargo, se observó que

pequeños fragmentos de cal viva comenzaron a expandirse dentro del hormigón, lo que es visible en la figura 44.

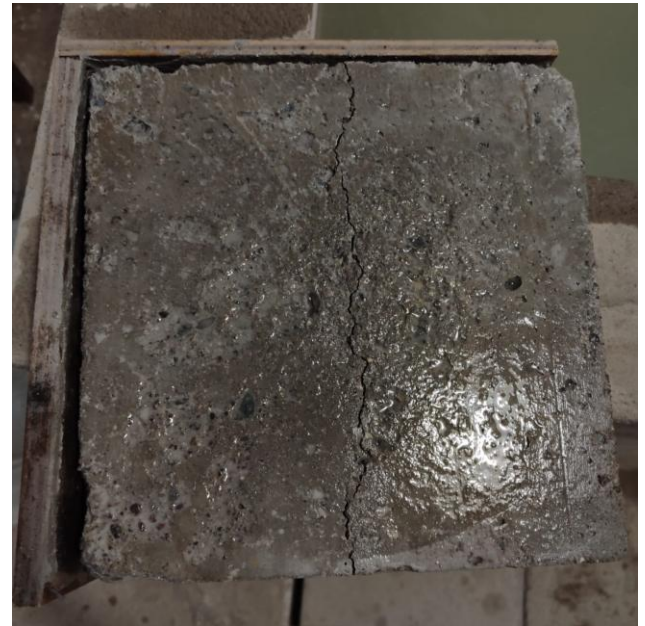
**Figura 44**

Placa M1 5% cal viva 28 días bajo el agua



**Figura 45**

Placa M2 5% cal viva 28 días bajo el agua



*Nota: Placa M1 con 5% de cal viva tras 28 días de curado en agua. No se observan signos evidentes de autoreparación. Las grietas se mantienen abiertas y sin formación de productos de sellado, lo que sugiere una limitada actividad reactiva en el interior de la mezcla Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: Placa M2 con 5% de cal viva luego de 28 días bajo curado hídrico. La fisura principal continúa visible y sin cambios aparentes, confirmando que en esta formulación las propiedades autoreparantes del hormigón no se han activado de manera significativa Fuente: (Elaborado por autor).*

A los 28 días, tras completar el tiempo estipulado de curado, las placas no mostraron ninguna mejoría en las grietas, lo que permite concluir que estas mezclas no poseen propiedades de autoreparación. Sin embargo, a pesar de no haber demostrado capacidad de autocierre de fisuras, estas mezclas sí presentaron un aumento de

resistencia a largo plazo, lo cual es notable considerando que el hormigón resultante es más poroso en comparación con el hormigón regular.

### 3.17 Elaboración de cilindros y placas en concentración de 10 % de cal viva

Pasados algunos días, se llevó a cabo la fabricación de las placas y cilindros con un 10% de cal viva, siguiendo las especificaciones planteadas previamente. Con el objetivo de garantizar que la mezcla mantenga las proporciones correctas, se realizó una muestra para la corrección de humedad. Esta medida es fundamental para ajustar con precisión la cantidad de agua necesaria en la mezcla, considerando la capacidad de absorción de los agregados y el efecto de la cal viva en la retención de humedad.

**Tabla 20**

*Corrección de humedad cilindros 10%*

AGREGADO GRUESO		
Porcentaje de humedad	0.18	%
Porcentaje de absorción	1.27	%
WG	7.79595044	kg
AGREGADO FINO		
Porcentaje de humedad	2.45	%
Porcentaje de absorción	4.43	%
WS	16.1936819	kg

*Nota: Los valores se tomaron en un día distinto a los primeros ensayos Fuente:*

*(Elaborado por autor).*

Con los valores iniciales del segundo ensayo, que incorpora un 10% de cal viva en el hormigón, se determinó, al igual que en el primer ensayo, que es necesario aumentar la cantidad de agua para la mezcla. Esta necesidad de corrección de humedad

se debe a la absorción adicional que la cal viva induce en los materiales, lo cual afecta la retención de agua en la mezcla.

La cantidad de agua adicional necesaria, calculada a partir de las mediciones de humedad, se encuentra detallada en la tabla 21.

**Tabla 21**

Corrección de cantidad de agua hormigón 10%

Ww	204.86	kg
AGUA	-23.99	kg

*Nota: Se aumenta 23.99 kg de la cantidad original de agua Fuente: (Elaborado por autor).*

De manera en la cual determinamos que los pesos por m<sup>3</sup> de hormigón serán los siguientes.

**Tabla 22**

*Materiales saturados 10%*

MATERIALES SATURADOS		
AGUA	252.84	kg
CEMENTO	479.77	kg
GRAVA	698.46	kg
ARENA	766.97	kg
SUMA		
COMPONENTES	2198.04	kg

*Nota: Se aumenta el agua Fuente: (Elaborado por autor).*

En el segundo lote de cilindros, se mantiene la cantidad de 6 cilindros, al igual que en el primer lote. De manera similar a lo indicado en la tabla 17, el volumen de 0.01445133 m<sup>3</sup> se conserva y se ajusta de acuerdo con los datos recalculados

presentados en la tabla 22. Los valores finales ajustados se exponen claramente en la tabla 23.

**Tabla 23**

*Cantidad por todos los cilindros 10%*

AGUA	3.654	kg
CEMENTO	6.933	kg
GRAVA	10.094	kg
ARENA	11.084	kg
SUMA COMPONENTES	31.765	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: El volumen cambia con todas las pruebas y las placas se manejan de forma distinta*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

A continuación, se procede con el reemplazo del 20% del cemento por ceniza volcánica, al igual que en el primer ensayo, además de añadir un 10% de cal viva, calculado sobre la masa total del hormigón. Este ajuste en la formulación tiene como objetivo emular las propiedades del hormigón romano, conocido por su notable durabilidad y capacidad de autoreparación.

Este cambio no solo reduce la cantidad de cemento Portland utilizado, disminuyendo así el impacto ambiental derivado de su producción, sino que también incorpora los beneficios de las puzolanas y la cal viva, materiales fundamentales en las mezclas tradicionales romanas.

**Tabla 24**

*Dosificación con 10% de cal viva*

CONCENTRACION DEL 10%		
AGUA	3.65	kg
CEMENTO	5.55	kg
CENIZA	1.39	kg
GRAVA	10.09	kg

ARENA	11.08	kg
CAL VIVA	3.32	kg
SUMA COMPONENTES	35.08	kg/m <sup>3</sup>

---

*Nota: La cal viva suma 3.32 kg a la mezcla mientras que la ceniza suma 1.39 kg como sustituto de cemento Fuente: (Elaborado por autor).*

En este ensayo, se utilizó una concretera para asegurar una mezcla uniforme y eficiente. El proceso comenzó con la combinación de los agregados fino y grueso, a los cuales se añadió ceniza volcánica y cal viva, siguiendo un procedimiento similar al de un hormigón convencional. Se prestó especial atención a la homogeneidad de los componentes, buscando una distribución equilibrada de todos los materiales.

Previo al inicio, los cilindros y las placas ya estaban preparados y engrasados para facilitar su desmoldeo posterior. Durante la mezcla, se registró un aumento de temperatura hasta los 28.7°C, lo que confirma la reacción característica de la cal viva en la composición.

Adicionalmente, se implementaron medidas de seguridad estrictas, incluyendo el uso de gafas protectoras, mascarilla, guantes y mandil, debido a la naturaleza potencialmente nociva de la cal viva. Estas precauciones fueron fundamentales para garantizar la seguridad en todo el proceso, minimizando riesgos y asegurando un entorno de trabajo seguro.

**Figura 46**

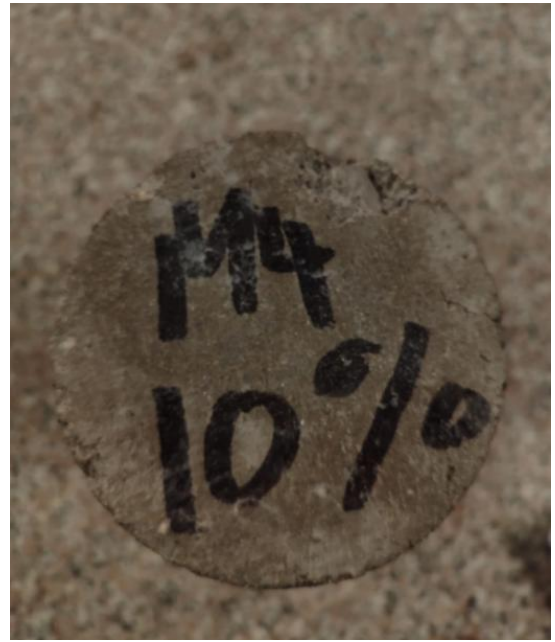
*Temperatura hormigón 10% cal viva*



*Nota: Registro de la temperatura interna de la mezcla fresca de hormigón con 10% de cal viva, evidenciando el efecto exotérmico generado por la reacción inicial de la cal con el agua Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 47**

*Cilindro de hormigón 10% M4*



*Nota: Vista superior del mismo cilindro M4, donde se aprecia con mayor claridad la inscripción del contenido de cal y el acabado superficial posterior al curado Fuente: (Elaborado por autor).*

## Figura 48

*Cilindro 10% M4 vista lateral*



*Nota: Observación lateral del cilindro M4 que contiene un 10% de cal viva. Se evidencian fisuras y porosidad superficial, lo que indica una cohesión limitada en esta concentración Fuente: (Elaborado por autor).*

Como se observa en la ilustración 48, el hormigón en los cilindros resultó ser notablemente frágil, poroso y agrietado. A pesar de que no hubo una variación significativa en el curado en comparación con las muestras que contenían un 5% de cal viva, el hormigón de este lote mostró una estructura menos compacta y más susceptible

a la formación de grietas. Este comportamiento sugiere que el aumento de cal viva podría haber influido en la cohesión interna del material, afectando su integridad estructural sin lograr las propiedades de resistencia esperadas.

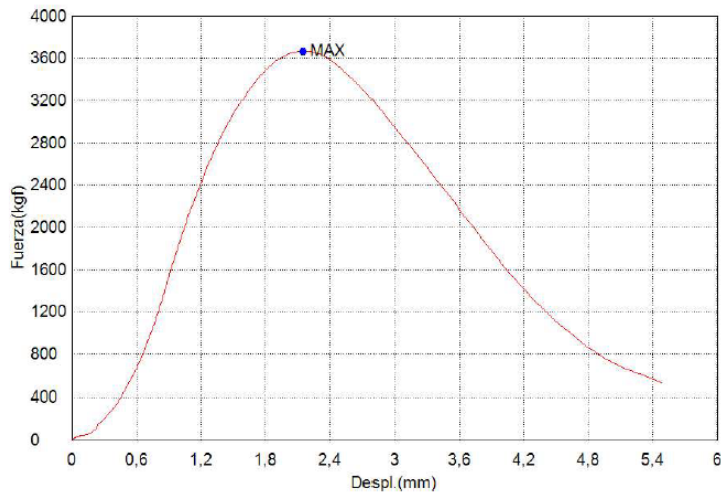
La dosificación con un 10% de adición de cal viva resultó ser estructuralmente inestable, manifestando una elevada fragilidad y porosidad desde las primeras etapas. Esta condición llevó a la pérdida accidental de tres especímenes antes de que pudieran ser ensayados. Dicha reducción en el tamaño de la muestra limita la validez estadística de los resultados obtenidos para esta serie; y si bien las probetas restantes confirmaron un desempeño mecánico muy deficiente, no es posible establecer un patrón de comportamiento concluyente para esta concentración.

Posteriormente, se inició el proceso de curado bajo agua durante un período de 28 días. A continuación, se presenta la evolución de la resistencia de los cilindros, evaluada a través de pruebas en el equipo para ensayo de compresión Shimadzu. Este análisis resulta esencial para valorar el desempeño mecánico del hormigón, con especial atención a su resistencia a compresión a lo largo del tiempo. La evolución de esta resistencia permitirá obtener una visión más clara sobre el comportamiento estructural del hormigón modificado y su potencial durabilidad bajo condiciones controladas de curado.

**Figura 49**

*Gráfica carga-desplazamiento hormigon 10% de cal viva, 7 dias.*

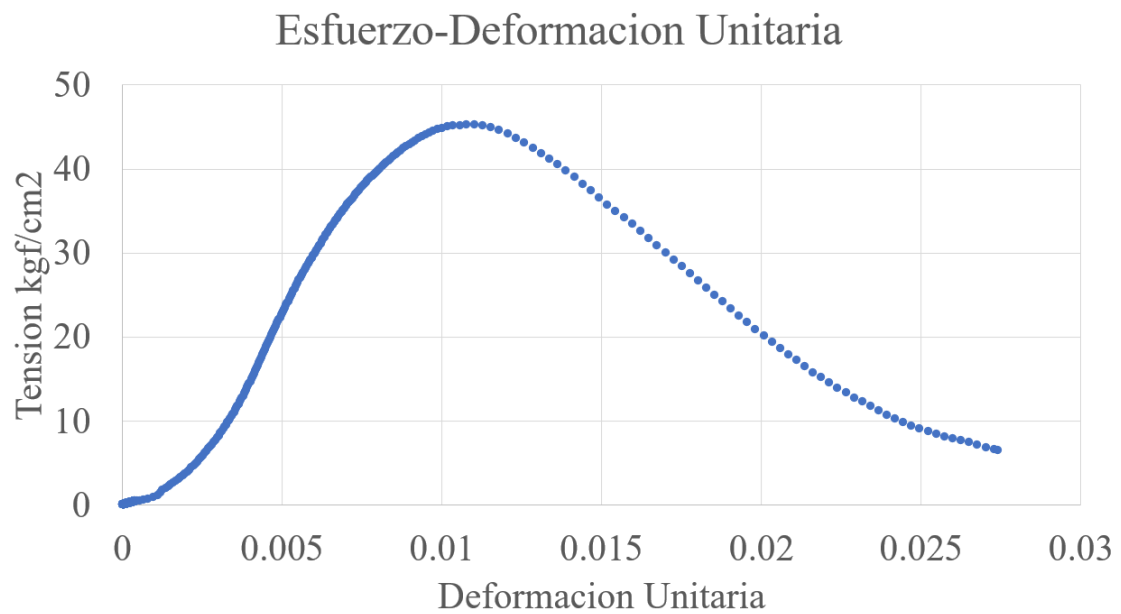
Nombre Parametros	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1 - 1	3670	45,4
Media	3670	45,4
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



*Nota: Curva obtenida del ensayo de compresión con una concentración del 10% de cal viva. La curva muestra un aumento continuo de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 3670 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 2.15 mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 50**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria 10% de cal viva, 7 días.*

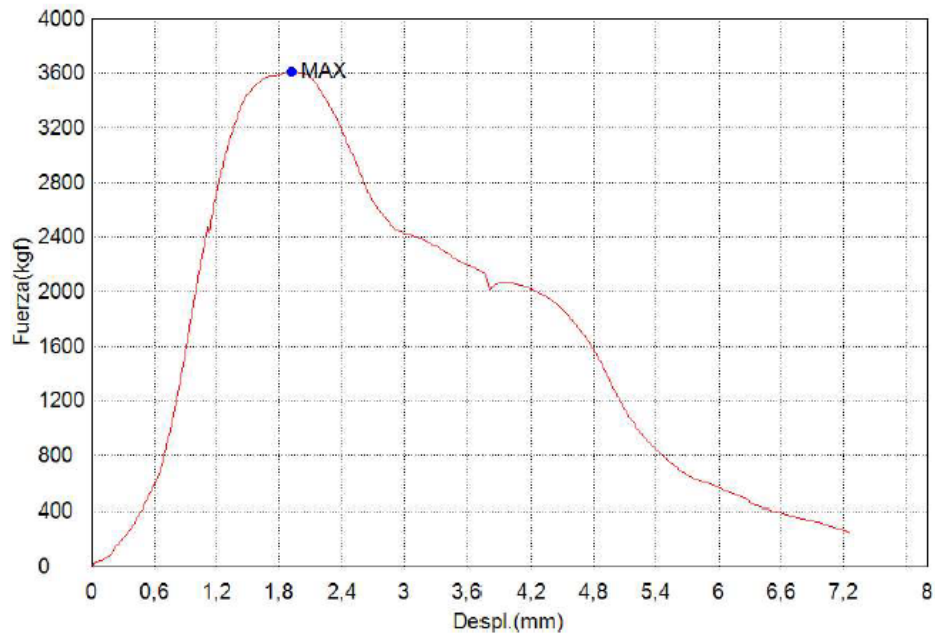


*Nota: Alcanzo una tensión máxima de 45.4 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.01077 Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 51**

*Gráfica carga-desplazamiento hormigon 10% de cal viva, 14 dias.*

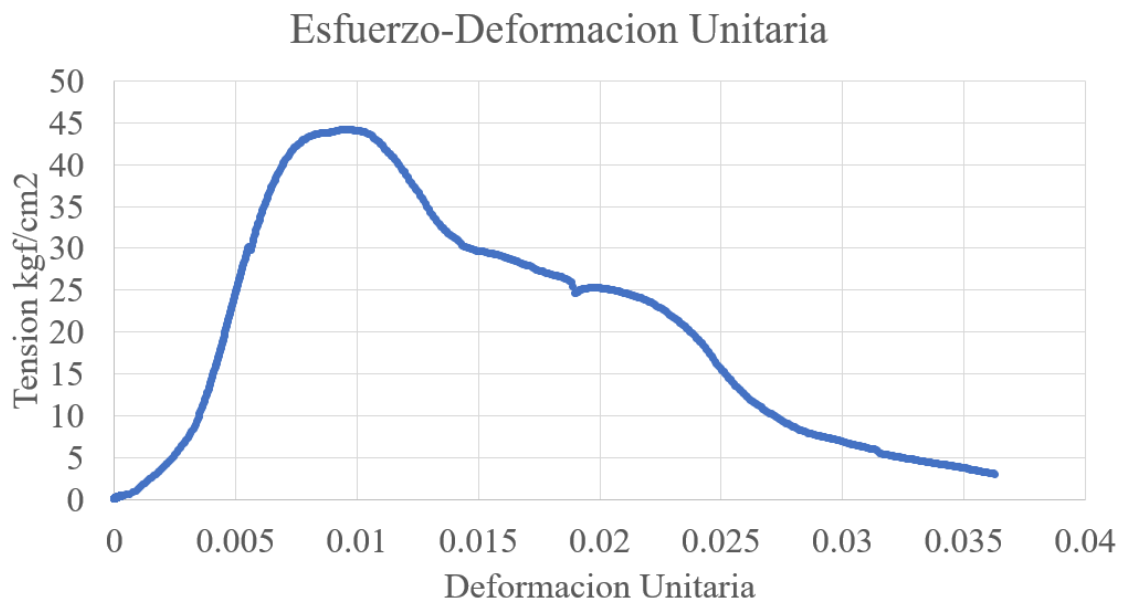
Nombre Parametros	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	3610	44,2
Media	3610	44,2
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



*Nota: Ensayo de compresión con 10% de cal viva. La curva muestra un aumento continuo de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 3610 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 1.913 mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 52**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria 10% de cal viva, 14 días.*

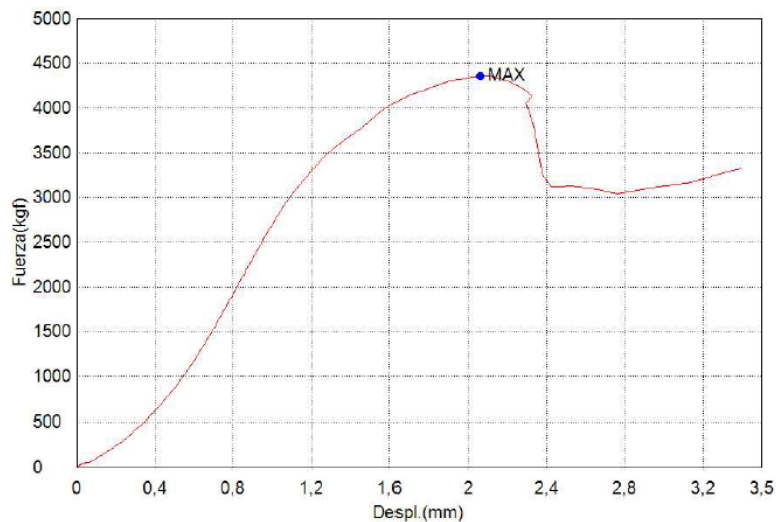


*Nota: La curva muestra un incremento inicial del esfuerzo hasta un pico, seguido de una caída y una posterior recuperación parcial o meseta, para luego disminuir progresivamente a medida que la deformación unitaria aumenta, alcanzo una tensión máxima de 44.2 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.00956 Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 53**

*Gráfica carga-desplazamiento 10% de cal viva, 28 días.*

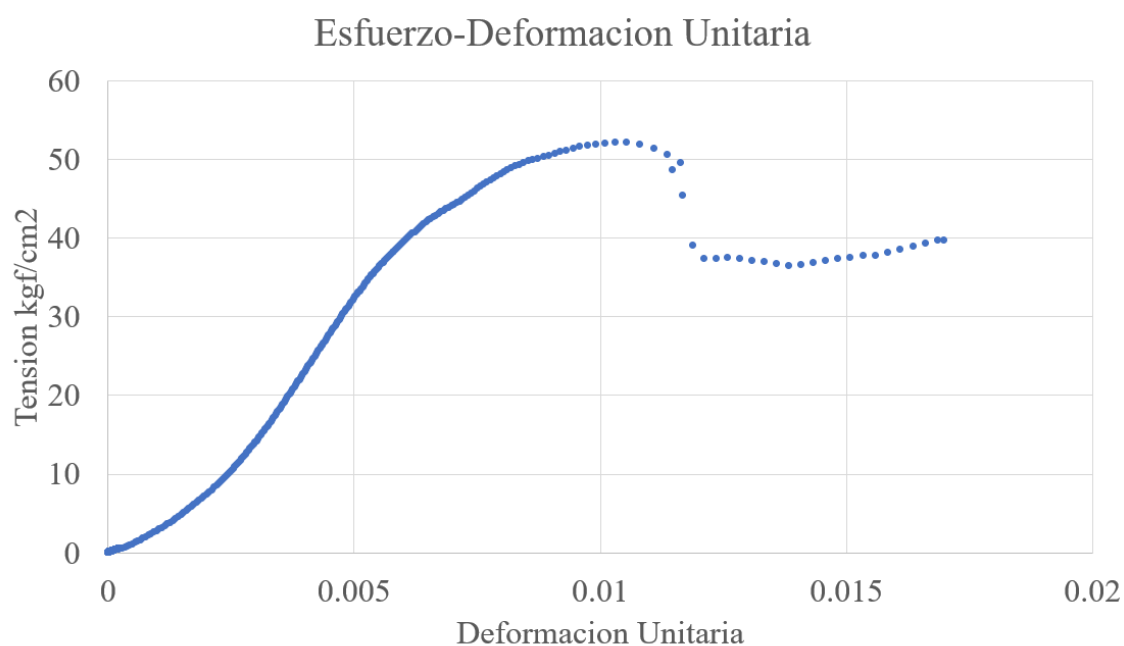
Nombre Parametros	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	4350	52.2
Media	4350	52.2
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



*Nota: Representación del comportamiento mecánico del cilindro M3 con una concentración del 10% de cal viva, curado durante 28 días. La curva muestra un aumento continuo de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 4350 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 2.059 mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 54**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria 10% de cal viva, 28 días*



*Nota: La curva muestra un incremento gradual del esfuerzo hasta un pico, seguido de una caída abrupta y una posterior fase de meseta o endurecimiento por deformación, donde el esfuerzo se mantiene relativamente constante o aumenta ligeramente con el incremento de la deformación, alcanzo una tensión máxima de 52.2 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.00102 Fuente: (Elaborado por autor).*

Como se observa en las figuras 49, 51 y 53, el hormigón evaluado presenta un desempeño claramente deficiente en términos de resistencia a la compresión. La adición de cal viva en una concentración del 10 % resultó particularmente perjudicial para la integridad del material, ya que no se alcanzó el valor de diseño estipulado de 210 kgf/cm<sup>2</sup>. En su lugar, la resistencia máxima registrada fue de apenas 52.2 kgf/cm<sup>2</sup>, un valor considerablemente bajo que compromete su aplicación estructural.

Si bien esta tendencia es coherente con lo reportado por Wang et al. (2025), quienes evidencian una disminución progresiva de la resistencia a compresión con el

aumento del contenido de cal viva en agregados artificiales, la magnitud de la caída observada en el presente estudio resulta incluso más drástica. En dicho trabajo, la mezcla con 10 % de cal (Q10) todavía mantenía resistencias cercanas a los 16 MPa (aproximadamente 163 kgf/cm<sup>2</sup>), muy por encima del valor registrado aquí.

Este contraste podría atribuirse a diferencias en los métodos de curado, granulometría de los materiales, o a una mayor porosidad inducida por el proceso de apagado de la cal en las condiciones particulares del presente ensayo. A pesar de ello, los resultados obtenidos son válidos en la medida en que reproducen la tendencia general previamente establecida: un exceso de cal viva reduce la cohesión interna del hormigón, deteriorando sus propiedades mecánicas y su capacidad de carga.

De igual manera, las placas demostraron ser frágiles y porosas. Aunque se mantuvieron sumergidas en agua y, a pesar del aumento del 5% al 10% de cal viva, no desarrollaron las capacidades de autoreparación deseadas, similar a las placas con 5% de cal viva. Se realizó un registro fotográfico de su evolución durante 28 días, sin evidencia de mejoras significativas en las grietas, lo que indica que esta formulación no logró las características auto-reparativas esperadas.

**Figura 55**

*Placa M1 con 10% de cal viva – Estado inicial  
previo al curado*



**Figura 56**

*Placa M2 con 10% de cal viva – Estado inicial  
previo al curado*



*Nota: La placa M1 presenta una fisura principal visible desde el momento inicial. Su superficie muestra signos de porosidad moderada, indicando una posible fragilidad estructural que puede influir en el comportamiento del material durante el proceso de curado Fuente: (Elaborado por autor).*

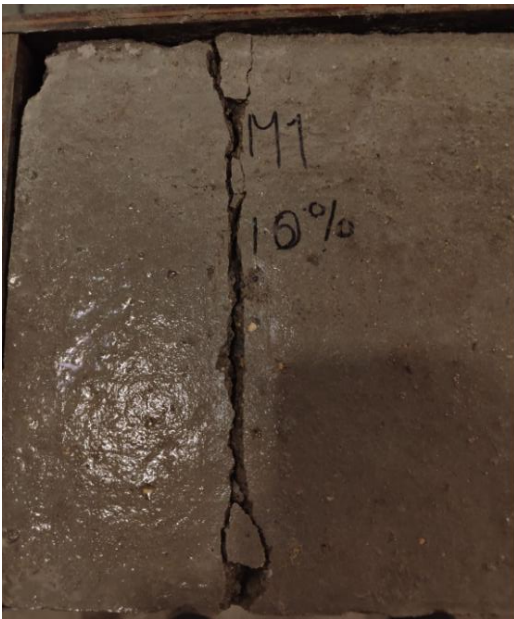
*Nota: La placa M2 evidencia múltiples fisuras y una fractura más pronunciada en comparación con M1. Estas condiciones iniciales reflejan una menor cohesión del material, lo que podría afectar negativamente su capacidad para activar procesos de autoreparación bajo inmersión Fuente: (Elaborado por autor).*

Las condiciones iniciales de las placas con un 10% de cal viva ya presentaban múltiples grietas y mostraban una notable inestabilidad estructural, además de ser extremadamente frágiles, se decidió inducir más agrietamientos en ellas. Se optó por observar la evolución de las grietas existentes durante el periodo de prueba. Esta decisión permite evaluar si la formulación presenta alguna capacidad de autoreparación

natural en sus grietas iniciales, sin someter el material a un estrés adicional que podría comprometer aún más su integridad.

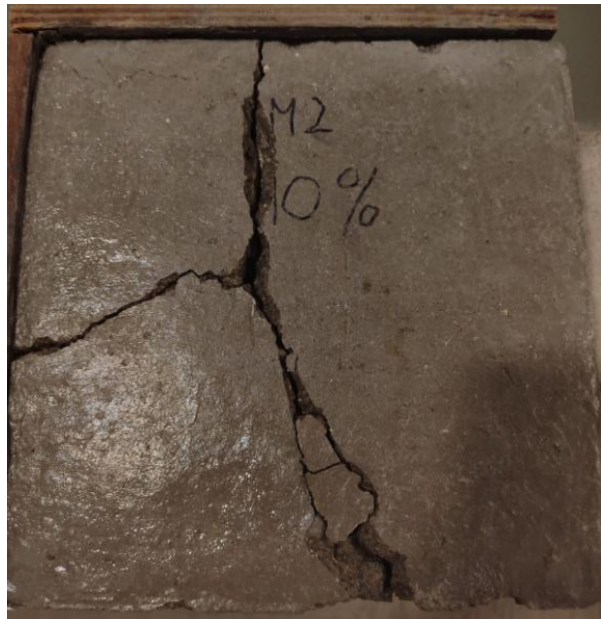
**Figura 57**

*Placa M1 con 10% de cal viva 7 días bajo el agua*



**Figura 58**

*Placa M2 con 10% de cal viva 7 días bajo el agua*



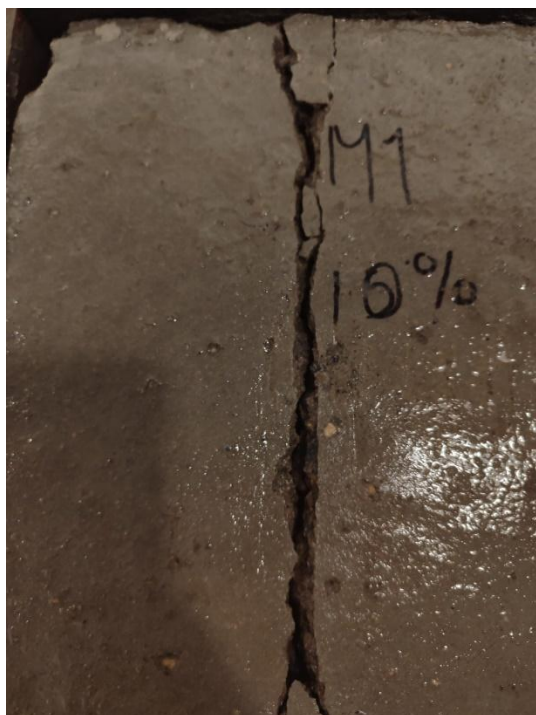
*Nota: A los 7 días de curado bajo agua, la placa M1 no presenta evidencia de procesos de autoreparación. Las fisuras iniciales se mantienen sin modificaciones visibles, lo cual sugiere que la concentración de cal viva no ha inducido una respuesta química apreciable en esta etapa temprana Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: La placa M2 conserva las grietas observadas en el estado inicial, sin signos de sellado o deposición de nuevos compuestos. La falta de reacción autoreparante a corto plazo pone en duda la eficacia del 10% de cal viva bajo condiciones estándar de curado Fuente: (Elaborado por autor).*

Durante los primeros 7 días, no se observó ninguna mejoría en las placas, tanto en las grietas mayores como en las menores. Esto indica que, al menos en sus primeras edades, el comportamiento de las placas con 10% de cal viva no difiere de lo observado previamente en las placas con 5% de cal viva. Este resultado sugiere que la capacidad de autoreparación, si es que existe, no se activa en los primeros días de curado bajo agua y que la mayor concentración de cal viva no generó una mejora inicial en la reparación de las grietas.

**Figura 59**

*Placa M1 con 10% de cal viva 14 días  
bajo el agua*



**Figura 60**

*Placa M2 con 10% de cal viva 14 días  
bajo el agua*



*Nota: A los 14 días de curado, no se observan mejoras significativas en la*

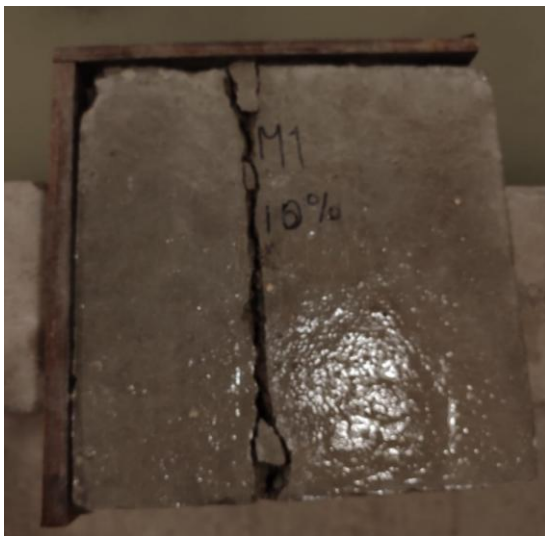
*Nota: Las grietas iniciales se mantienen abiertas y sin evidencia de formación de*

*fisura principal de la placa M1. La nuevos compuestos minerales. La ausencia de sellado visible indica que, morfología de las fisuras sugiere un incluso con el incremento del tiempo de comportamiento frágil continuo, y la cal exposición al agua, el proceso de viva en este porcentaje no ha propiciado autoreparación no se activa de manera el inicio de un mecanismo de efectiva con esta concentración de cal autorreparación apreciable Fuente: viva Fuente: (Elaborado por autor). (Elaborado por autor).*

Al igual que en los días previos y siguiendo la misma línea de evolución, las placas no muestran ninguna mejoría en sus grietas a los 14 días. Estos resultados sugieren que, incluso con un tiempo adicional de curado, no se activa ningún proceso de autoreparación significativo en esta formulación, manteniéndose el comportamiento observado en etapas tempranas.

**Figura 61**

*Placa M1 con 10% de cal viva – 21 días  
bajo el agua*



**Figura 62**

*Placa M2 con 10% de cal viva – 21 días  
bajo el agua*



*Nota: La fisura longitudinal permanece abierta y sin evidencias visibles de sellado o acumulación de productos derivados de la hidratación de la cal viva. La superficie continúa presentando porosidad y reflejos de humedad, lo que indica que no se ha producido un proceso de autoreparación efectivo tras 21 días de curado Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: Las grietas en la placa M2 mantienen su apertura inicial, y no se identifica formación de depósitos minerales que sugieran una reacción química activa en las fisuras. Esto refuerza la tendencia observada en ensayos anteriores respecto a la baja eficacia de la cal viva al 10% en promover la autoreparación en este tipo de formulación Fuente: (Elaborado por autor).*

De igual forma, a los 21 días, las placas no presentaron una evolución adecuada, ya que no se activó ninguna forma de autoreparación. Esto confirma que, aun con un periodo prolongado de curado, la formulación no demuestra capacidad de cerrar o reducir sus grietas de manera autónoma, evidenciando la ausencia de las propiedades de autoreparación esperadas en esta mezcla.

**Figura 63**

*Placa M1 con 10% de cal viva – 28 días  
bajo el agua*

**Figura 64**

*Placa M2 con 10% de cal viva – 28 días  
bajo el agua*



*Nota: Tras 28 días de curado, la fisura principal de la placa M1 persiste sin evidencias visibles de cierre o relleno mineral. La superficie continúa mostrando alta porosidad y una textura ligeramente brillante, posiblemente por saturación de agua, sin signos aparentes de formación de compuestos cicatrizantes derivados de la cal viva*  
*Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: Al igual que en ensayos previos, la placa M2 no evidencia mejora estructural significativa. Las fisuras continúan abiertas y no presentan señales de sellado espontáneo. La distribución de grietas y el comportamiento de la superficie sugieren que esta concentración de cal viva no genera condiciones adecuadas para activar procesos de autoreparación visibles a simple vista*  
*Fuente: (Elaborado por autor).*

Siguiendo la misma tendencia observada en las etapas anteriores, las placas con una concentración del 10% de cal viva no mostraron ninguna excepción a los 28 días de curado. Tanto las grietas pequeñas como las grandes permanecieron sin cambios visibles. Estos resultados indican que, incluso con el tiempo de curado completo, no se observaron mejoras en la integridad del material ni evidencia de propiedades de autoreparación en esta formulación.

### 3.18 Elaboración de cilindros y placas en concentración de 15 % de cal viva

Pasados algunos días, se procedió a elaborar las muestras con una concentración del 15% de cal viva, que representará el nivel máximo de reemplazo en este proceso experimental. Esta formulación permitirá evaluar el efecto de una mayor proporción de cal viva en las propiedades del hormigón, en comparación con las concentraciones de 5% y 10% previamente analizadas.

Al igual que en los casos anteriores, se toma una muestra de humedad correspondiente al día de preparación de la mezcla. Los valores de humedad obtenidos se presentan en la Tabla 25, proporcionando una referencia crucial para realizar las correcciones de agua necesarias en la formulación con un 15% de cal viva.

**Tabla 25**

*Corrección de humedad cilindros 15%*

AGREGADO GRUESO		
Porcentaje de humedad	0.41	%
Porcentaje de absorción	1.27	%
WG	6.15093337	kg
AGREGADO FINO		
Porcentaje de humedad	2.65	%
Porcentaje de absorción	4.43	%
WS	14.5579564	kg

*Nota: Los valores se tomaron en un día distinto a los segundos ensayos Fuente:*

*(Elaborado por autor).*

En el segundo ensayo, que incorpora un 15% de cal viva en el hormigón, se determinó que, al igual que en los ensayos anteriores, es necesario aumentar la cantidad de agua en la mezcla. Esta corrección de humedad responde a la absorción adicional que

la cal viva induce en los materiales, afectando significativamente la retención de agua en la mezcla y, por lo tanto, requiriendo ajustes para mantener la relación agua-conglomerante adecuada.

La cantidad de agua adicional necesaria, calculada a partir de las mediciones de humedad, se encuentra detallada en la tabla 26.

**Tabla 26**

*Corrección de cantidad de agua hormigón 15%*

Ww	208.14	kg
AGUA	-20.71	kg

*Nota: Se aumenta 20.71 kg de la cantidad original de agua Fuente: (Elaborado por autor).*

De manera en la cual determinamos que los pesos por m<sup>3</sup> de hormigón serán los siguientes.

**Tabla 27**

*Materiales saturados 15%*

MATERIALES SATURADOS		
AGUA	249.56	kg
CEMENTO	479.77	kg
GRAVA	700.10	kg
ARENA	768.61	kg
SUMA		
COMPONENTES	2198.04	kg

*Nota: Se aumenta el agua Fuente: (Elaborado por autor).*

En el tercer lote de cilindros, se mantuvo la cantidad de 6 cilindros, de forma consistente con el primer lote. De manera similar a lo indicado en la Tabla 17, el volumen de 0.01445133 m<sup>3</sup> se conservó y se ajustó en función de los datos recalculados

que se presentan en la Tabla 27. Los valores finales ajustados se detallan de manera clara en la Tabla 28, asegurando que los materiales sean dosificados de forma precisa para este lote con un 15% de cal viva.

**Tabla 28**

*Cantidad por todos los cilindros 15%*

AGUA	3.654	kg
CEMENTO	6.933	kg
GRAVA	10.094	kg
ARENA	11.084	kg
SUMA COMPONENTES	31.765	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: El volumen cambia con todas las pruebas y las placas se manejan de forma distinta*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

A continuación, la tabla 29, se procede con el reemplazo del 20% del cemento por ceniza volcánica, al igual que en los ensayos anteriores, y se incorpora un 15% de cal viva, calculado sobre la masa total del hormigón.

**Tabla 29**

*Dosificación con 15% de cal viva*

CONCENTRACION DEL 15%		
AGUA	6.30	kg
CEMENTO	9.68	kg
CENIZA	2.42	kg
GRAVA	17.67	kg
ARENA	19.39	kg
CAL VIVA	8.68	kg
SUMA COMPONENTES	64.14	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: La cal viva suma 8.68 kg a la mezcla mientras que la ceniza suma 2.42 kg como reemplazo del cemento Fuente: (Elaborado por autor).*

Aunque la formulación con 15% de cal viva presentó una mayor estabilidad en comparación con la del 10%, también exhibió fragilidad y porosidad. Esta condición resultó en la pérdida de la mitad de las probetas durante su manipulación, dejando únicamente tres muestras viables para la realización de los ensayos de compresión. De manera similar al ensayo anterior, para la mezcla con una concentración del 15% de cal viva se empleó una concreteira. El procedimiento siguió los pasos tradicionales del hormigón convencional: primero, se mezclaron los agregados fino y grueso; posteriormente, se incorporaron la cal viva, la ceniza volcánica y el cemento. Finalmente, se añadió el agua para iniciar el mezclado, asegurando una distribución homogénea de los componentes en la mezcla.

Durante el proceso de mezclado, la temperatura del hormigón alcanzó los 37.5 °C, lo cual se atribuye a la alta concentración de cal viva (15%) en la mezcla. Este incremento de temperatura es consistente con las reacciones exotérmicas generadas por la hidratación de la cal viva.

**Figura 65**

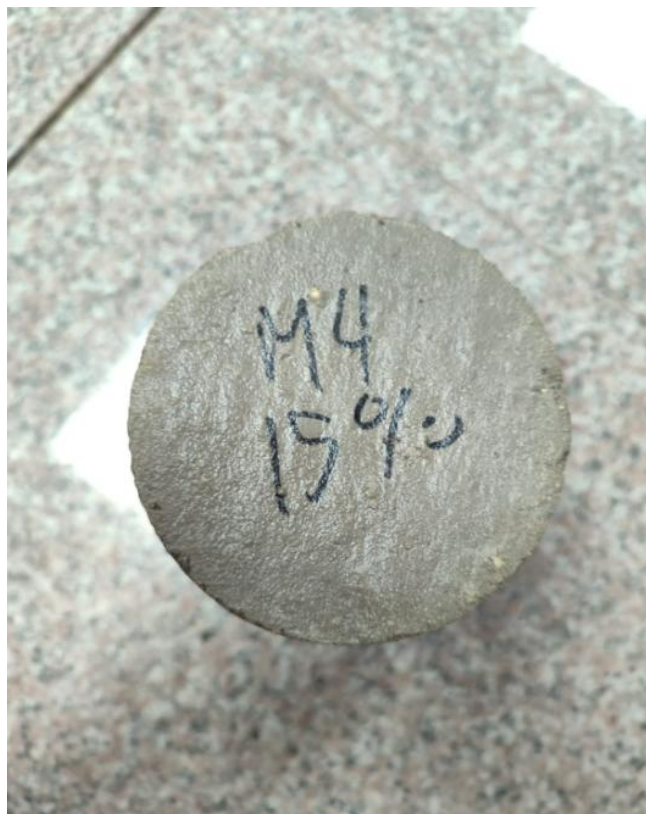
*Temperatura del hormigón con 15% de cal viva*



*Nota: La medición de temperatura durante la mezcla indicó un incremento significativo, alcanzando los 37.9 °C, lo que se atribuye a la reacción exotérmica de la cal viva al entrar en contacto con el agua. Esta elevada temperatura inicial podría incidir en las propiedades del*

**Figura 66**

*Cilindro de hormigón M4 – 15% cal viva (vista superior)*



*Nota: La superficie presenta una textura rugosa y agrietada, con evidencias de inestabilidad del material. Este comportamiento confirma los efectos negativos del exceso de cal viva en la integridad estructural del hormigón, especialmente en proporciones superiores al 10%*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

*fraguado y el desarrollo de la microestructura del hormigón Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 67**

*Cilindro M4 15% – vista lateral*



*Nota: A pesar del aspecto exterior aparentemente compacto, se observan pequeñas fisuras superficiales y porosidad irregular. Esto refleja una estructura interna debilitada, posiblemente asociada al alto contenido de cal viva, que puede interferir en*

*la cohesión de la matriz del hormigón Fuente:*

*(Elaborado por autor).*

A diferencia del ensayo con 10% de cal viva y, en cierta medida, del realizado con 5% de cal viva, los resultados obtenidos en este caso se acercan más a los valores iniciales de diseño. Este hormigón mostró ser frágil, aunque no en la misma proporción que el hormigón con 10% de cal viva. En términos generales, este hormigón presentó un comportamiento más estable, aunque sigue siendo poroso y exhibe leves fisuras.

Tal como se observa en la ilustración 54, existen puntos localizados donde el hormigón muestra una expansión en su base, lo cual podría constituir una fuente importante de inestabilidad como material. Este comportamiento sugiere que, aunque la alta concentración de cal viva afecta negativamente las propiedades globales del hormigón.

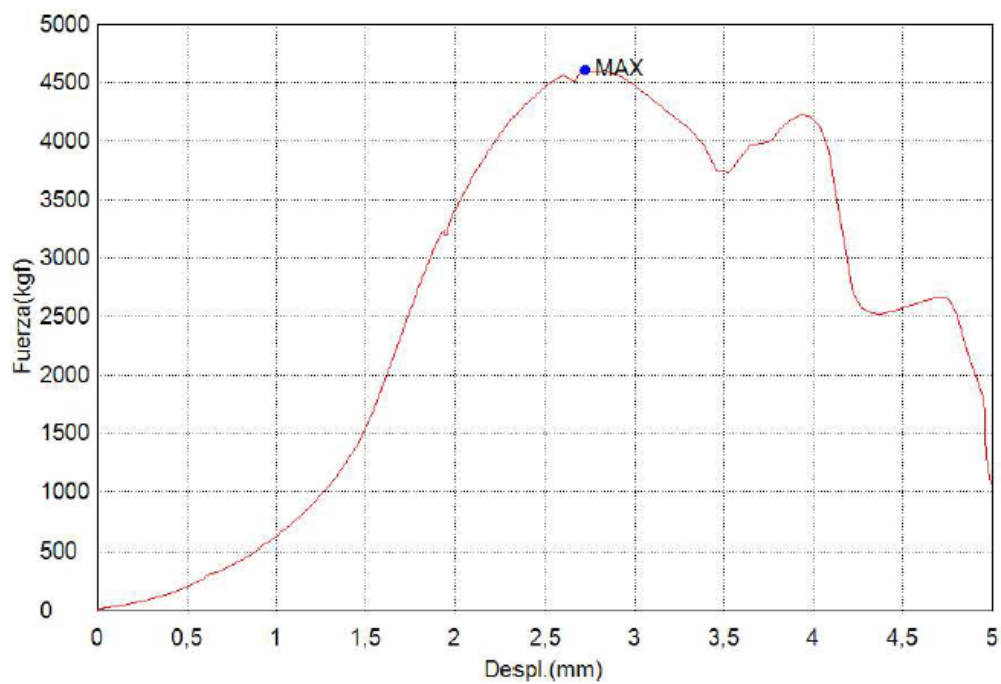
Al igual que en los ensayos previos, las muestras de hormigón con 15% de cal viva fueron sometidas a un proceso de curado bajo agua durante 28 días. Este procedimiento se llevó a cabo para garantizar las condiciones adecuadas para la hidratación del cemento y la reacción de la cal viva.

Posteriormente, se realizaron los ensayos de compresión utilizando el equipo de pruebas Shimadzu, siguiendo el mismo protocolo empleado en los ensayos anteriores. Este análisis permitió evaluar la resistencia a la compresión del hormigón y determinar su desempeño estructural bajo la influencia de la alta concentración de cal viva en la mezcla.

**Figura 68**

*Gráfica carga-desplazamiento 15% de cal viva, 7 días.*

Nombre Parametros Unidad	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max_Tension Calc. at Entire Areas kgf/cm2
1_1	4610	56,4
Media	4610	56,4
Desviacion Estandar	-.-	-.-
Rango	0,00000	0,00000

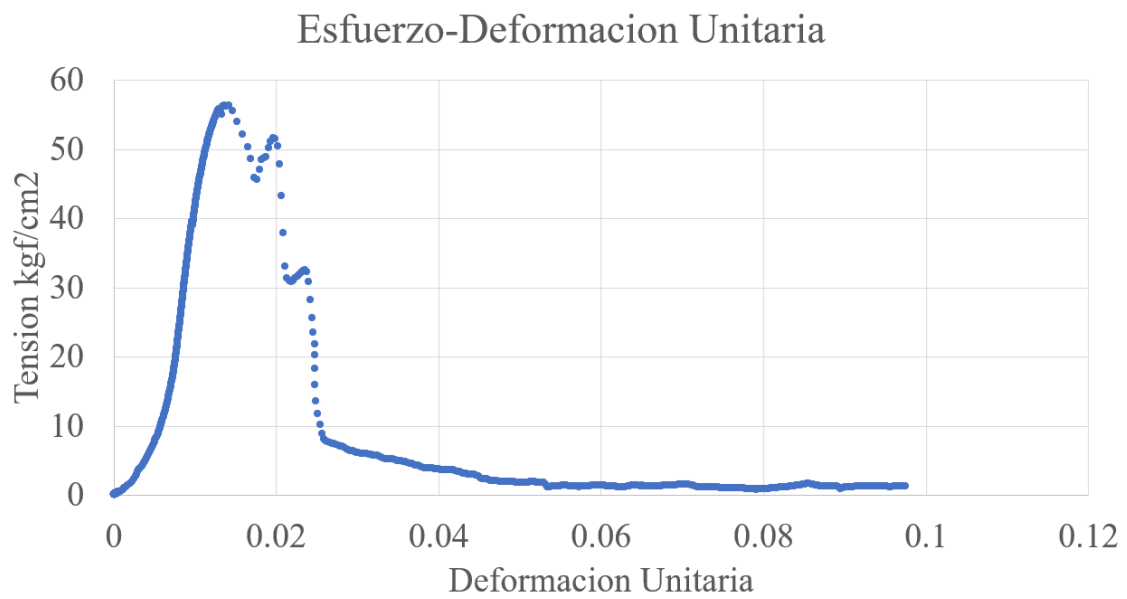


*Nota: La curva muestra un aumento continuo de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 4610 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 2.059 mm*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 69**

*Gráfica carga-desplazamiento 15% de cal viva, 7 días.*



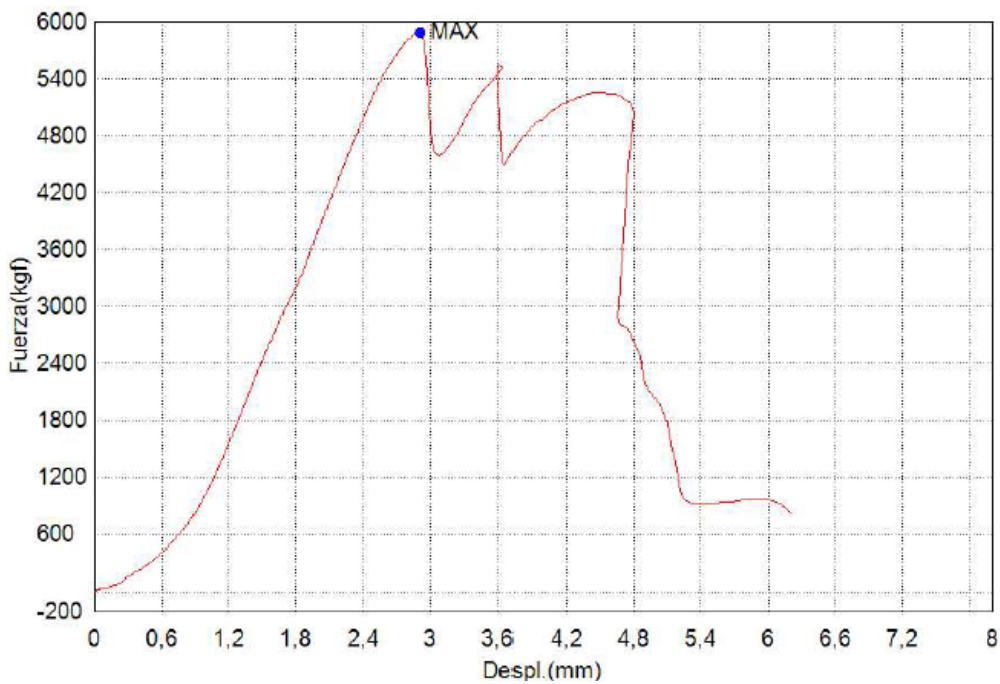
*Nota: La curva muestra un rápido incremento inicial del esfuerzo hasta un pico pronunciado, seguido de una caída abrupta y una posterior fase de bajo esfuerzo, alcanzo una tensión máxima de 56.4 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.0013606*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 70**

*Gráfica carga-desplazamiento 15%, 14 días*

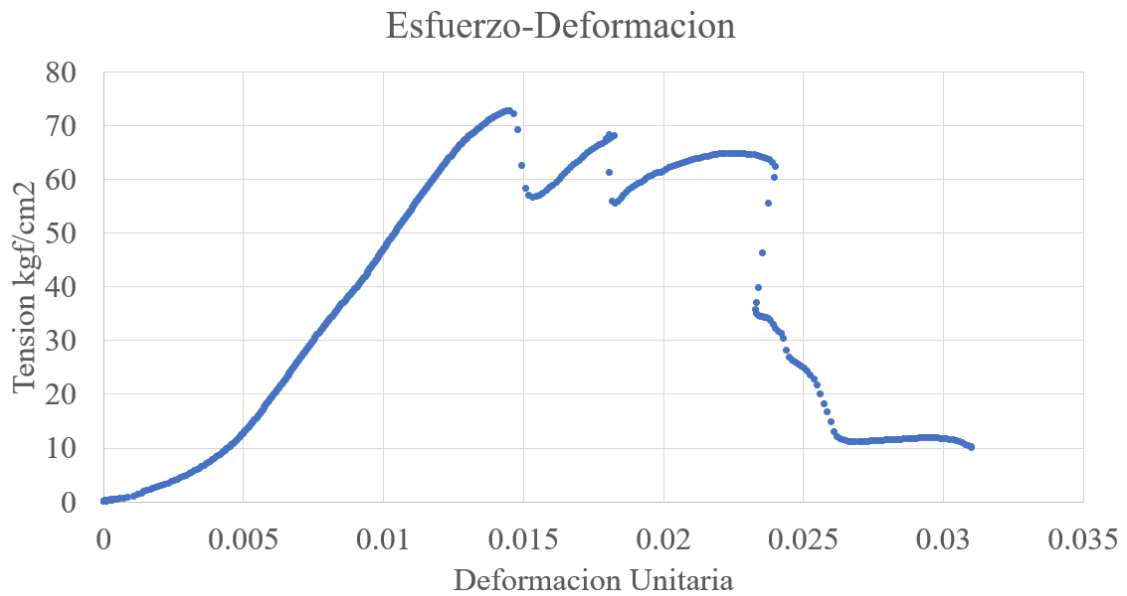
Nombre Parametros	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	5890	72,8
Media	5890	72,8
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



*Nota: La curva muestra un aumento continuo de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 5890 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 2.90 mm Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 71**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria 15%, 14 días*

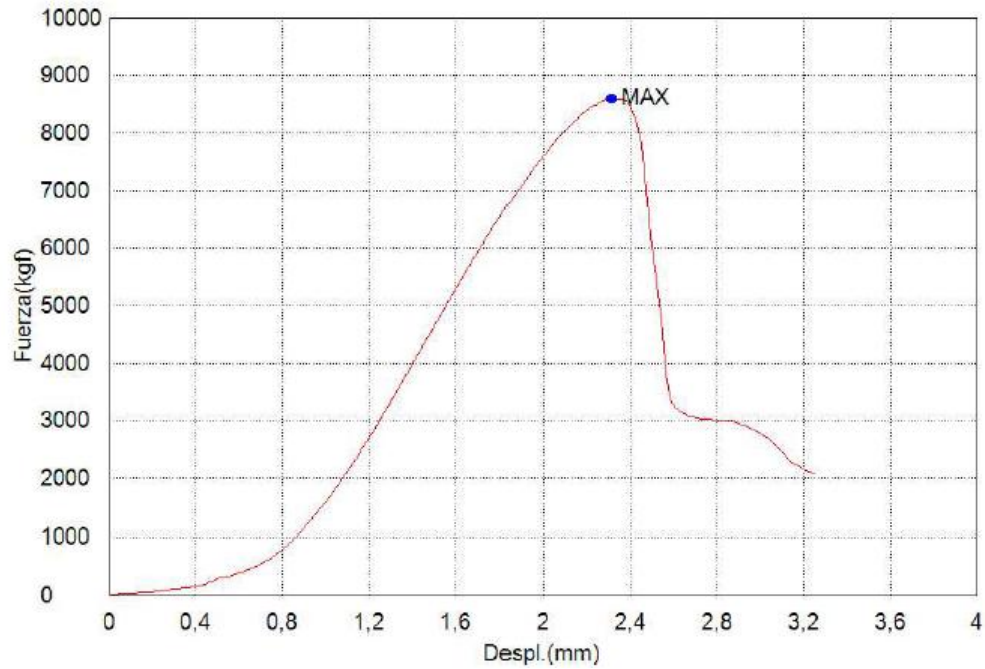


*Nota: La curva muestra un incremento inicial del esfuerzo hasta un pico, seguido de una caída y posteriores fluctuaciones o nuevos aumentos de esfuerzo, alcanzo una tensión máxima de 72.8 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.00145 Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 72**

Gráfica carga-desplazamiento 15%, 28 días.

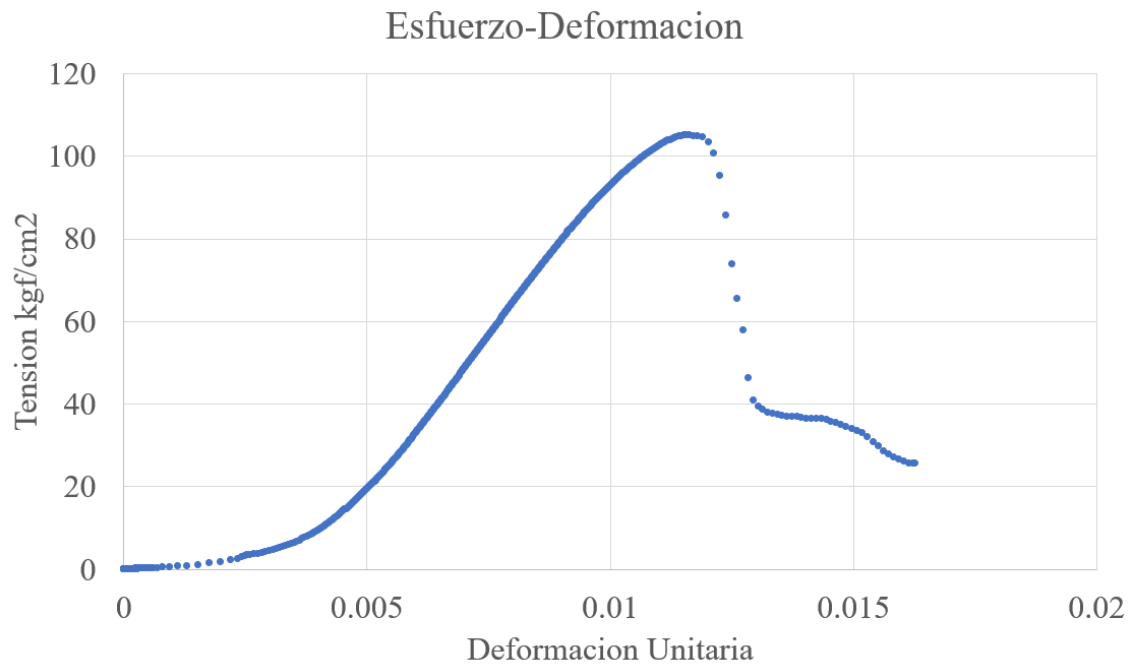
Nombre Parametros	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf	kgf/cm2
1_1	8600	105
Media	8600	105
Desviacion Estandar	--	--
Rango	0,00000	0,00000



*Nota:* La curva muestra un aumento continuo de la fuerza hasta alcanzar un punto máximo de 8600 kgf, seguido de un desplazamiento de aproximado de 2.90 mm Fuente: (Elaborado por autor).

**Figura 73**

*Gráfica esfuerzo-deformacion unitaria 15%, 28 días*



*Nota: La curva muestra un incremento progresivo del esfuerzo hasta alcanzar un pico, seguido de una caída abrupta, alcanzo una tensión máxima de 105 kgf/cm<sup>2</sup>, seguido de una deformación unitaria de 0.00115 Fuente: (Elaborado por autor).*

Según se observa en las figuras 68, 70 y 72, el hormigón modificado con un 15 % de cal viva alcanzó una resistencia máxima a compresión de 105 kgf/cm<sup>2</sup> a los 28 días de curado. Este valor representa aproximadamente el 50 % de la resistencia de diseño establecida en 210 kgf/cm<sup>2</sup>, lo que indica un desempeño significativamente inferior al esperado.

Aunque el número limitado de muestras analizadas no permite establecer conclusiones estadísticas sólidas, los datos disponibles permiten identificar una clara tendencia: concentraciones elevadas de cal viva parecen afectar negativamente el desarrollo de la resistencia mecánica del hormigón. Esta pérdida de desempeño podría estar relacionada con una mayor porosidad o una interferencia en la hidratación

eficiente del cemento, como también se ha observado en investigaciones previas como la de (Wang et al., 2025).

A continuación, se presentan las placas elaboradas con una concentración del 15% de cal viva, las cuales fueron deliberadamente agrietadas para observar la evolución de sus grietas durante el período de curado. Este análisis se realizó con el objetivo de evaluar las propiedades de autoreparación del hormigón bajo estas condiciones específicas.

Se documentó su comportamiento mediante un registro fotográfico detallado en diferentes intervalos de tiempo, permitiendo analizar si las grietas presentaron algún tipo de mejora o cerramiento debido a los procesos químicos y físicos inducidos por la cal viva y la interacción con el agua de curado.

**Figura 74**

*Placa M1 con 15% de cal viva en estado inicial (vista frontal)*



**Figura 75**

*Placa M2 con 15% de cal viva en estado inicial (vista frontal)*



*Nota: Se observa una fisura longitudinal central en la cara superior de la placa, lo cual evidencia una fragilidad estructural incluso antes del curado. La superficie muestra una textura poco cohesiva Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: La placa presenta un patrón de microfisuras distribuidas irregularmente, con evidencias de baja resistencia superficial. El agrietamiento anticipado indica un alto grado de porosidad Fuente: (Elaborado por autor).*

**Figura 76**

*Placa M1 con 15% de cal viva en estado inicial (vista posterior)*



**Figura 77**

*Placa M2 con 15% de cal viva en estado inicial (vista posterior)*



*Nota: En la parte trasera se puede identificar una grieta principal bien definida, lo que confirma que las fisuras atraviesan todo el espesor del material, comprometiendo su integridad Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: La parte trasera revela fisuras más difusas, pero igualmente presentes. La textura muestra un material de baja compacidad, compatible con una mezcla poco trabajable y alta concentración de cal viva Fuente: (Elaborado por autor).*

En las condiciones iniciales, las placas elaboradas con una concentración del 15% de cal viva ya presentaban grietas, aunque en menor cantidad y severidad que las observadas en las placas con una concentración del 10% de cal viva. Además, estas placas no eran tan frágiles como las del ensayo anterior, lo que sugiere una ligera mejora en la estabilidad superficial.

Sin embargo, al analizar su estructura en mayor detalle, se constató que su integridad es principalmente superficial. Este comportamiento indica que, aunque el incremento en la concentración de cal viva puede contribuir a una mayor cohesión superficial, no logra subsanar las debilidades estructurales internas del material, lo que limita su desempeño general.

Estas placas, en particular, presentan sus grietas principalmente en las partes posteriores, lo que permitirá observar su evolución con mayor detalle en los días siguientes. En este caso, es especialmente notable la presencia de cal en las grietas y la alta porosidad del material. Estas características sugieren que la cal se ha acumulado en ciertas áreas críticas, lo que podría influir en el comportamiento del hormigón con el paso del tiempo. Sin embargo, la porosidad general del material plantea dudas sobre su integridad estructural y su posible potencial para desarrollar propiedades autoreparadoras.

**Figura 78**

*Placa M1 con 15% de cal viva a los 7 días bajo agua*



**Figura 79**

*Placa M2 con 15% de cal viva a los 7 días bajo agua*



*Nota: La placa presenta una fisura longitudinal pronunciada en la zona central. No se observan signos visibles de cierre de grietas ni formación de material cicatrizante. La textura sigue siendo porosa y de baja cohesión Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: Se aprecian múltiples fisuras de diferente orientación, sin evidencias claras de proceso de autoreparación. La superficie muestra ligera eflorescencia, pero no asociada a un sellado efectivo Fuente: (Elaborado por autor).*

A los 7 días, las placas con una concentración de 15% de cal viva no presentan ninguna mejora significativa en sus grietas. En estas etapas tempranas, el comportamiento observado no difiere de las placas con concentraciones de 5% y 10% de cal viva. Este resultado refuerza la hipótesis de que, incluso a los 28 días, es poco

probable que se produzcan cambios significativos o mejoras en las propiedades auto reparadoras de estas mezclas.

**Figura 80**

*Placa M1 con 15% de cal viva a los 14 días bajo agua*



**Figura 81**

*Placa M2 con 15% de cal viva a los 14 días bajo agua*



*Nota: La fisura principal se mantiene abierta, con ramificaciones secundarias evidentes. No se observan indicios de sellado interno. La superficie presenta humedad y zonas ligeramente blanquecinas, aunque sin consolidación aparente del material Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: Se conserva la fisura longitudinal identificada en días anteriores. No hay signos de progresiva autocuración. La placa mantiene una apariencia porosa y sin adherencias superficiales nuevas que indiquen procesos de cicatrización mineral Fuente: (Elaborado por autor).*

A los 14 días, las placas con una concentración del 15% de cal viva no muestran mejoras significativas en sus cualidades autoreparadoras, siguiendo la tendencia observada en las mezclas anteriores con menores concentraciones de cal.

**Figura 82**

*Placa M1 con 15% de cal viva a los 21 días bajo agua*



**Figura 83**

*Placa M2 con 15% de cal viva a los 21 días bajo agua*



*Nota: Se mantiene la fisura principal sin evidencia clara de cierre. Aunque la superficie presenta zonas con leve eflorescencia blanquecina, no se detecta material de cicatrización que sugiera un proceso de autoreparación activo. El patrón de fisuración permanece constante*  
*Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: La fisura vertical continúa visible y sin señales de sellado mineral. La textura superficial sigue siendo porosa, con bordes de fisura bien definidos. No se observan acumulaciones de productos minerales que indiquen procesos de autoreparación similares a los descritos en la bibliografía*  
*Fuente: (Elaborado por autor).*

A los 21 días, las placas con una concentración del 15% de cal viva continúan sin mostrar ningún indicio de cerrar sus grietas, a pesar del tiempo prolongado bajo

agua y la elevada concentración de cal en la mezcla. Este resultado confirma que, incluso en condiciones favorables de curado, las propiedades autoreparadoras esperadas no se manifiestan.

**Figura 84**

*Placa M1 con 15% de cal viva a los 28 días bajo agua*



**Figura 85**

*Placa M2 con 15% de cal viva a los 28 días bajo agua*



*Nota: Se observa que las fisuras se mantienen sin cambios sustanciales respecto a días anteriores. No se evidencian signos visibles de autoreparación ni depósitos minerales asociados al cierre de grietas. La placa conserva una apariencia frágil y porosa Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: Las grietas principales continúan abiertas y sin evidencia clara de cicatrización superficial. El material muestra una textura similar a la etapa inicial, confirmando que, incluso con una alta concentración de cal viva, no se generaron procesos de autoreparación notables Fuente: (Elaborado por autor).*

Tal como se observa en la última muestra, la placa con una concentración del 15% de cal viva no presenta ningún cambio significativo tras 28 días de curado bajo agua. Las grietas visibles permanecen prácticamente inalteradas, sin señales de cierre o mejoría en su estructura. Esto refuerza la conclusión de que estas muestras no manifiestan las propiedades autoreparadoras esperadas. Además, su estado inicial y posterior destacan por la porosidad y la falta de cohesión que comprometen las características deseadas en este tipo de hormigón.

### **3.19 Elaboración y Evaluación de Placas Adicionales para Análisis Complementario**

Las pruebas realizadas con las placas resultaron infructuosas, no cumpliendo con las expectativas planteadas inicialmente en esta investigación. Cabe destacar que estas placas fueron elaboradas utilizando los métodos convencionales empleados en la fabricación moderna del hormigón. Sin embargo, considerando la posibilidad de obtener resultados más alineados con las propiedades esperadas del hormigón romano, se ha decidido implementar nuevas técnicas de fundición. Estas técnicas están orientadas a maximizar el desarrollo de temperatura generado por la reacción de la cal viva, buscando replicar de manera más fiel las condiciones de fabricación del hormigón romano y, con ello, explorar su capacidad para manifestar las características deseadas, como la durabilidad y la autoreparación.

Para este último ensayo, se fabricó una única placa por cada concentración de cal viva, es decir, 5%, 10% y 15%. Este procedimiento fue inspirado en las técnicas descritas por Cliveden Conservation (Conservation, 2019), donde se destaca que para lograr un desarrollo óptimo de la temperatura de la cal viva, es fundamental iniciar el proceso mezclándola exclusivamente con agua. Durante esta etapa inicial, se permite que la cal viva reaccione con el agua antes de incorporar los demás ingredientes. Una

vez formada la pasta resultante de esta reacción, se procede a integrarla con el resto de los componentes de la mezcla.

Este procedimiento fue de gran utilidad para desarrollar la temperatura necesaria en la reacción de la cal viva con el agua. En este caso, se registraron incrementos significativos en la temperatura alcanzada durante el proceso, que varió de 50.5 °C para una concentración de 5% de cal viva, 70.3 °C para una concentración de 10%, y finalmente 88.9 °C para la concentración de 15%. Este comportamiento reafirma la importancia de este método para maximizar las propiedades químicas de la cal viva.

Dado que este ensayo fue realizado al final del proceso experimental, y considerando la limitada disponibilidad de materiales restantes, se destinó una única placa para cada concentración de cal viva. Al igual que en los ensayos anteriores, se tomó una muestra de humedad específica del día para ajustar la formulación.

**Figura 86**

*Temperatura de mezcla de placa con 5% de cal viva*



**Figura 87**

*Temperatura de mezcla de placa con 10% de cal viva*



*Nota: Se registra una temperatura de 50.5 °C durante la reacción inicial entre la cal viva y el agua. Este incremento térmico moderado es coherente con la menor proporción de cal viva en la mezcla Fuente: (Elaborado por autor).*

*Nota: Se evidencia una temperatura de 70.3 °C, resultado de una mayor proporción de cal viva, lo que indica una reacción exotérmica más pronunciada. Este comportamiento favorece, en teoría, el desarrollo de microestructuras que podrían facilitar la autoreparación Fuente: (Elaborado por autor).*

### **Figura 88**

*Temperatura de mezcla de placa con 15% de cal viva*



*Nota: La temperatura alcanza un máximo de 88.9 °C, siendo la más alta de los tres ensayos. Este comportamiento sugiere un mayor potencial de activación química, aunque no necesariamente una mejora en la estabilidad del material final Fuente: (Elaborado por autor).*

Los porcentajes de humedad obtenidos en los días correspondientes a este último ensayo fueron los siguientes:

**Tabla 30**

*Corrección de humedad placas 5%,10% y 15%*

AGREGADO GRUESO		
Porcentaje de humedad	0.64	%
Porcentaje de absorción	1.27	%
WG	4.50591631	kg

AGREGADO FINO		
Porcentaje de humedad	2.72	%
Porcentaje de absorción	4.43	%
WS	13.9854525	kg

*Nota: Las placas son elaboradas al mismo tiempo Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 31**

*Corrección de cantidad de agua placas 5%,10% y 15%*

Ww	210.36	kg
AGUA	-18.49	kg

*Nota: Se debe añadir 18.49kg de agua Fuente: (Elaborado por autor).*

La humedad registrada el día del ensayo mostró apenas variaciones mínimas en comparación con los ensayos anteriores. Esto indica que las condiciones ambientales se mantuvieron relativamente constantes a lo largo de todos los procedimientos, lo que permite atribuir los resultados obtenidos principalmente a las características intrínsecas de las mezclas y no a cambios significativos en el entorno.

**Tabla 32***Materiales secos 5%,10% y 15%*

MATERIAL SECO		
AGUA	247.34	kg
CEMENTO	479.77	kg
agua	228.85	kg
GRAVA	706.26	kg
ARENA	783.17	kg
SUMA COMPONENTES	2198.04	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: Estas son las cantidades por m<sup>3</sup> en material seco Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 33***Materiales saturados 5%,10% y 15%*

MATERIALES SATURADOS		
AGUA	247.34	kg
CEMENTO	479.77	kg
GRAVA	701.75	kg
ARENA	769.18	kg
SUMA COMPONENTES	2198.04	kg

*Nota: la densidad es la misma que en los materiales secos, pero varían las cantidades de arena y grava Fuente: (Elaborado por autor).*

A continuación, se presentan las dosificaciones utilizadas para la elaboración de una sola placa en cada una de las concentraciones de cal viva: 5%, 10% y 15%. Estas dosificaciones se ajustaron considerando los valores de humedad del día.

**Tabla 34***Dosifiacion placas 5%, 10% y 15%*

Cantidad	1	uni
Lado	25	cm

Altura	4	cm
Área	625.00	cm <sup>2</sup>
Volumen	2500.00	cm <sup>3</sup>
Volumen total	2500	cm <sup>3</sup>
Volumen + 15%	2875	cm <sup>3</sup>
Volumen + 15%	0.002875	m <sup>3</sup>

*Nota: la densidad es la misma que en los materiales secos, pero varían las cantidades de arena y grava Fuente: (Elaborado por autor).*

El volumen de cada placa fue de 0.002875 m<sup>3</sup>, como se detalla en la tabla 34. Este volumen se utilizó como base para calcular las dosificaciones de los materiales necesarios en cada concentración de cal viva: 5%, 10% y 15%.

Con el volumen de 0.002875 m<sup>3</sup>, indicado en la tabla 34, y las cantidades de materiales por metro cúbico descritas en la tabla 33, se calcularon las cantidades específicas de materiales necesarias para cada placa. Los resultados correspondientes para las diferentes concentraciones de cal viva (5%, 10% y 15%) se presentan en las tablas 35, 36 y 37, respectivamente. Estas tablas detallan las proporciones ajustadas para cada mezcla.

**Tabla 35**

*Dosificación placa con 5% de cal viva*

CONCENTRACION DEL 5%		
AGUA	0.71	kg
CEMENTO	1.10	kg
CENIZA	0.28	kg
GRAVA	2.02	kg
ARENA	2.21	kg
CAL VIVA	0.33	kg
SUMA COMPONENTES	6.65	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: la densidad es la misma que en los materiales secos, pero varían las cantidades de arena y grava Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 36**

*Dosificación placa con 10% de cal viva*

CONCENTRACION DEL 10%		
AGUA	0.71	kg
CEMENTO	1.10	kg
CENIZA	0.28	kg
GRAVA	2.02	kg
ARENA	2.21	kg
CAL VIVA	0.66	kg
SUMA COMPONENTES	6.98	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: la densidad es la misma que en los materiales secos, pero varían las cantidades de arena y grava Fuente: (Elaborado por autor).*

**Tabla 37**

*Dosificación placa con 15% de cal viva*

CONCENTRACION DEL 15%		
AGUA	0.71	kg
CEMENTO	1.10	kg
CENIZA	0.28	kg
GRAVA	2.02	kg
ARENA	2.21	kg
CAL VIVA	0.99	kg
SUMA COMPONENTES	7.31	kg/m <sup>3</sup>

*Nota: la densidad es la misma que en los materiales secos, pero varían las cantidades de arena y grava Fuente: (Elaborado por autor).*

Los resultados obtenidos de las placas elaboradas mediante este método modificado demostraron un desempeño levemente superior en comparación con las placas fabricadas de manera convencional. Aunque estas placas seguían presentando ciertos niveles de inestabilidad, además de una coloración blanquecina mayor, mostraban una mayor cohesión y resistencia inicial. Este comportamiento se atribuye al desarrollo de temperaturas más altas durante la reacción de la cal viva con el agua en la

etapa preliminar de mezclado, lo que permitió una mejor integración de los componentes.

Los estados iniciales de estas placas se presentan en las figuras 89, 90 y 91. En este ensayo, se prestó especial atención a las microfisuras introducidas manualmente. Como se observa en la ilustración 76, correspondiente a la placa con una concentración del 15% de cal viva, estas fisuras no fueron de gran magnitud, lo que permitió un análisis más detallado de las propiedades de cohesión y potencial autoreparación del material.

**Figura 89**

**Figura 90**

*Estado inicial de la placa con 5% de cal viva*

*Estado inicial de la placa con 10% de cal viva*



*Nota: Se observan microfisuras superficiales distribuidas de manera aleatoria, Estas grietas representan el punto de partida para evaluar un*

*Nota: La placa presenta fisuras más definidas y profundas que las del 5%*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

*posible proceso de autoreparación tras el curado en agua Fuente: (Elaborado por autor).*

### **Figura 91**

Estado inicial de la placa con 15% de cal viva



*Nota: Aunque superficialmente la placa parece más homogénea, se evidencian microfisuras dispersas. La menor cantidad de fisuras visibles no garantiza mayor estabilidad estructural, ya que podrían estar limitadas a la superficie y no representar el estado interno del material*

*Fuente: (Elaborado por autor).*

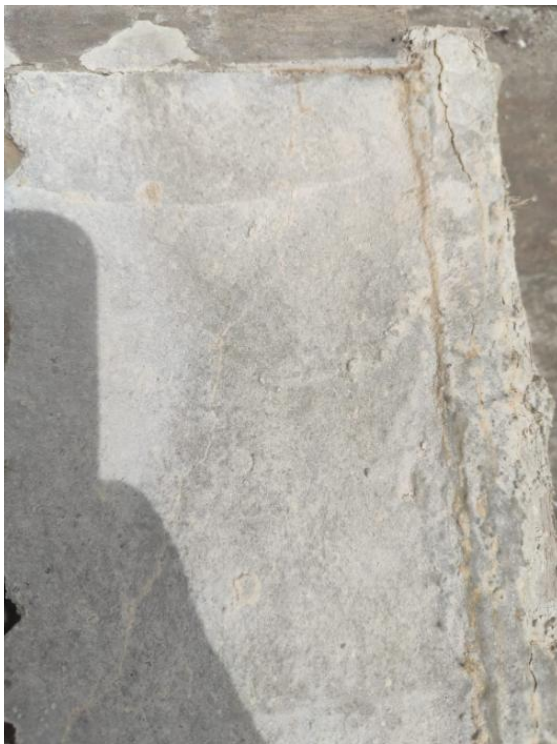
Desde el momento en que las placas fueron sometidas al proceso de curado bajo agua hasta el final del periodo de prueba de 28 días, se realizó un registro detallado de su estado inicial y final. Si bien se observó una ligera mejora en la estabilidad estructural de las placas, los resultados revelaron que, al igual que en los ensayos previos, las

muestras continuaron mostrando porosidad y fisuras. Además, la evidencia de mejoras significativas en propiedades autoreparantes fue limitada, lo que refuerza la conclusión de que tanto la composición como las técnicas empleadas requieren ajustes adicionales para emular las propiedades distintivas del hormigón romano.

No obstante, las observaciones realizadas en estas placas de las figuras 92, 92 y 93 revelaron un fenómeno particular; si bien era visualmente similar al proceso de autorreparación, que se manifestó con características propias cuya naturaleza no se puede asegurar que corresponda al mismo mecanismo descrito en el trabajo original (Seymour et al., 2023), con la formación de una capa superficial de apariencia blanquecina y amarillenta, reminiscentes de la cal.

**Figura 92**

*Placa con 5% de cal viva después de 28 días de curado*



**Figura 93**

*Placa con 10% de cal viva después de 28 días de curado*



*Nota: Se observa una ligera consolidación superficial, con un patrón blanquecino tipo eflorescencia, lo cual podría asociarse a la recristalización de compuestos derivados de la cal viva. Las microgrietas más superficiales presentan signos parciales de sellado* *Nota: Las fisuras finas expuestas al agua muestran una aparente deposición mineral amarillenta en sus bordes, lo cual sugiere un posible fenómeno de autoreparación. A pesar de ello, la cicatrización no es completa ni* *Fuente: homogénea en toda la superficie*  
*(Elaborado por autor).* *(Elaborado por autor).*

#### **Figura 94**

*Placa con 15% de cal viva después de 28 días de curado*



*Nota: Las fisuras finas expuestas al agua muestran una aparente deposición mineral amarillenta en sus bordes, lo cual sugiere un posible fenómeno de autoreparación Fuente: (Elaborado por autor).*

Las figuras 92, 93 y 94 muestran evidencia de un proceso de autoreparación similar a cicatrices en las placas. Aunque esta autoreparación no es uniforme ni completa, los resultados son más cercanos a lo esperado en comparación con los ensayos anteriores. Las fisuras más pequeñas y expuestas al agua presentan una leve mejora, que parece estar relacionada con la interacción de la cal viva y el agua, generando depósitos superficiales de color blanco amarillento. Estos resultados, aunque prometedores, subrayan la necesidad de realizar análisis químicos detallados para confirmar la naturaleza de este fenómeno y evaluar si realmente emula las propiedades del hormigón romano.

Este fenómeno sugiere que las grietas más pequeñas y accesibles al agua tienen mayor potencial de sellado, aunque de manera limitada. Sin embargo, las grietas de mayor tamaño no mostraron mejoras significativas, lo que reafirma que, aunque este método modificado parece estimular ciertas reacciones superficiales, no es suficiente para garantizar una autoreparación completa o profunda en el material.

Como se observa en las últimas figuras, se evidenció que algunas de las grietas pequeñas lograron sellarse parcialmente, principalmente aquellas que estaban más expuestas al agua durante el proceso de curado. Además, la superficie de las placas presentó una capa amarillenta, posiblemente formada por residuos de la cal viva reaccionada, lo que indica una ligera actividad química en la mezcla.

Este fenómeno sugiere que las grietas más pequeñas y accesibles al agua tienen mayor potencial de sellado, aunque de manera limitada. Sin embargo, las grietas de mayor tamaño no mostraron mejoras significativas, lo que reafirma que, aunque este método modificado parece estimular ciertas reacciones superficiales, no es suficiente para garantizar una autoreparación completa o profunda en el material.

### **3.20 Resultados del estudio**

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con hormigón modificado mediante la incorporación de ceniza volcánica y cal viva en distintas concentraciones (5%, 10% y 15%). Los análisis se orientan al cumplimiento de los objetivos principales del estudio: evaluar el comportamiento mecánico del material mediante ensayos de compresión y examinar visualmente la presencia de mecanismos de autoreparación a través del seguimiento fotográfico de las placas.

### **3.21 Comportamiento mecánico del hormigón**

Los ensayos iniciales se centraron en evaluar la resistencia a la compresión de cilindros de hormigón modificados con diferentes concentraciones de cal viva. En el caso de la mezcla con un 5 % de cal, los resultados fueron particularmente alentadores: los especímenes curados durante 28 días superaron la resistencia de diseño establecida en 210 kgf/cm<sup>2</sup>. Algunos cilindros alcanzaron valores de 251 kgf/cm<sup>2</sup> y 245 kgf/cm<sup>2</sup>, lo que representa incrementos del 19.52 % y 16.66 % respecto al valor objetivo, respectivamente. Este desempeño sugiere un posible fortalecimiento del material, probablemente relacionado con la interacción de la cal viva con la ceniza volcánica presente en la mezcla, que pudo haber actuado como una puzolana reactiva, favoreciendo la formación de compuestos cementantes adicionales.

No obstante, a pesar de este aumento en la resistencia mecánica, los especímenes presentaron una estructura interna visiblemente porosa e inestable. Este hallazgo pone de relieve que alcanzar altos valores de resistencia no garantiza, por sí solo, una adecuada durabilidad estructural, siendo igualmente crucial optimizar la cohesión interna del hormigón para asegurar su desempeño a largo plazo.

Con el incremento de la concentración de cal viva al 10 % y 15 %, se observó una disminución significativa en la resistencia a la compresión. En el caso del 10 %, las muestras apenas alcanzaron 52.2 kgf/cm<sup>2</sup>, equivalente al 23.72 % de la resistencia esperada, mientras que con 15 % se logró un máximo de 105 kgf/cm<sup>2</sup>, correspondiente al 50 % del valor objetivo. Estos resultados reflejan un efecto negativo claro asociado a elevadas proporciones de cal viva, posiblemente debido a la generación excesiva de porosidad, una hidratación incompleta o desbalanceada del sistema cementante, y la interferencia con el desarrollo normal de las fases hidráulicas responsables de la resistencia.

En conjunto, estos datos coinciden con lo reportado por (Wang et al., 2025), quienes observaron una tendencia descendente en la resistencia a compresión al aumentar el contenido de cal viva en agregados artificiales. Sin embargo, los valores obtenidos en el presente estudio son aún más bajos, lo que sugiere que, bajo las condiciones experimentales aplicadas, la adición excesiva de cal puede tener un impacto más severo sobre la integridad estructural del material.

### **3.22 Evaluación de la posible capacidad de autoreparación**

Paralelamente, se realizaron pruebas con placas de hormigón que fueron sumergidas en agua por 28 días para evaluar su posible capacidad de autoreparación. En el primer ciclo de ensayos, las placas elaboradas mediante un método convencional no presentaron signos visibles de cicatrización en las fisuras, independientemente de la concentración de cal viva utilizada. Las grietas permanecieron abiertas durante todo el proceso de observación, sin evidencia de depósitos minerales ni alteraciones en su superficie.

No obstante, al aplicar una segunda metodología de mezclado, basada en una reacción inicial de la cal viva con el agua antes de incorporar los agregados y el cemento, se obtuvieron resultados más alentadores. Esta modificación permitió el desarrollo de temperaturas internas más elevadas (hasta 88.9 °C en la mezcla con 15% de cal viva), lo cual favoreció la activación de procesos químicos distintos. En estas condiciones, algunas placas desarrollaron una capa superficial de color hueso en las microfisuras expuestas al agua, visible en las figuras 92, 93 y 94.

Aunque la cicatrización observada no fue uniforme ni completa, estos hallazgos sugieren un posible fenómeno de autoreparación incipiente, análogo al comportamiento documentado en hormigones romanos. La presencia de este material en grietas pequeñas y expuestas sugiere que el proceso de formación puede estar influido tanto por la

humedad continua como por la activación térmica inicial de la cal viva. Sin embargo, dado que no se cuenta con los medios técnicos necesarios para realizar análisis químicos concluyentes, no se puede afirmar con certeza si este comportamiento corresponde al mismo mecanismo de sanación observado en materiales históricos.

### **3.23 Consideraciones finales**

Los resultados de este estudio permiten concluir que la resistencia a la compresión del hormigón puede mejorar con la incorporación de pequeñas cantidades de cal viva alrededor del 5 % en combinación con ceniza volcánica. Sin embargo, esta mejora se revierte drásticamente cuando las concentraciones de cal viva se incrementan al 10 % y 15 %. Esta tendencia es coherente con lo reportado por (Wang et al., 2025)), cuyas muestras con 10 % de cal viva alcanzaron resistencias promedio cercanas a los 17.5 MPa, mientras que aquellas con 15 % descendieron a aproximadamente 14.7 MPa. Tales resultados coinciden con las observaciones de este estudio, en el que también se evidenció una pérdida significativa de capacidad mecánica en proporciones elevadas de cal.

Por otro lado, el fenómeno de autoreparación se manifestó únicamente de manera limitada y bajo condiciones específicas, en particular cuando se modificó la técnica de mezclado mediante la hidratación previa de la cal viva. Este comportamiento sugiere que las condiciones de elaboración, incluyendo el orden de incorporación de los materiales y la activación térmica durante la mezcla, desempeñan un papel clave en la activación de mecanismos de sanación autógena.

Aunque los resultados obtenidos no permiten replicar por completo las propiedades del hormigón romano, sí constituyen un avance significativo en la comprensión de los factores que inciden en su comportamiento. En especial, destacan la necesidad de controlar con precisión tanto las proporciones de cal y puzolana como el

método de elaboración para lograr un balance adecuado entre resistencia estructural y capacidad de autoreparación.

## **4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 Conclusiones**

En el presente capítulo se exponen las conclusiones derivadas del estudio experimental realizado sobre el comportamiento del hormigón modificado con cal viva y ceniza volcánica. Las observaciones obtenidas a partir de los ensayos de compresión y de la evaluación visual del fenómeno de autoreparación permiten establecer criterios fundamentales acerca de la efectividad de los materiales y métodos empleados, así como su posible aplicación en la replicación de propiedades observadas en el hormigón romano.

Si bien el alcance de este estudio es de carácter exploratorio y sus resultados, debido al número limitado de muestras, no son estadísticamente generalizables, los hallazgos obtenidos sientan una base fundamental. Este trabajo establece pautas metodológicas claras y aporta evidencia preliminar sobre la influencia de la cal viva y la activación térmica, sirviendo, así como un punto de partida validado para futuras investigaciones que busquen optimizar y escalar estas técnicas en el campo de los hormigones sostenibles.

La aplicación del método de Fuller-Thompson demostró ser eficaz para lograr una distribución óptima de agregados en la mezcla, lo que favoreció la trabajabilidad y cohesión inicial del hormigón, incluso tras la incorporación de adiciones como cal viva y ceniza volcánica. Esta metodología permitió mantener una consistencia plástica adecuada para obras convencionales, conforme a los ensayos de asentamiento realizados.

La sustitución parcial del cemento por un 20% de ceniza volcánica, junto con adiciones de cal viva al 5%, 10% y 15%, tuvo efectos diversos sobre la resistencia a compresión. Las muestras con 5% de cal viva alcanzaron una resistencia superior al valor de diseño (210 kgf/cm<sup>2</sup>), mostrando una formulación prometedora. Sin embargo, las concentraciones de 10% y 15% evidenciaron una disminución significativa en la resistencia acompañada de mayor porosidad y fragilidad estructural, lo que limita su aplicación estructural.

A pesar de los diversos inconvenientes presentados durante el desarrollo experimental, las muestras con una concentración del 5% de cal viva resultaron ser las más estables y consistentes, pese a estos buenos resultados no puede ser concluyente, debido a la baja cantidad de muestras, para un análisis estadístico profundo. Estas lograron superar la resistencia a compresión inicialmente planteada de 210 kgf/cm<sup>2</sup>, llegando a 245 kgf/cm<sup>2</sup> y 251 kgf/cm<sup>2</sup> consolidándose como la formulación más prometedora dentro de las variantes evaluadas.

Aunque los resultados son alentadores para ciertas formulaciones, no pueden considerarse concluyentes debido al número limitado de muestras.

El fenómeno de autoreparación no se manifestó en las placas elaboradas mediante el método convencional, lo cual indica que la sola presencia de cal viva no activa este mecanismo. En cambio, al modificar la técnica de mezclado mediante hidratación previa de la cal viva, se observó un sellado parcial de fisuras superficiales tras el curado en agua, especialmente en placas con 5% de cal. Estos resultados sugieren que la activación térmica inicial es un factor determinante en la manifestación de propiedades autoreparantes.

Aunque las muestras con una concentración del 10% de cal viva fueron elaboradas bajo el mismo régimen de preparación y curado que las de 5%, presentaron

un comportamiento significativamente más deficiente. Estas se caracterizaron por ser más frágiles y porosas, además de tal vez evidenciar una resistencia a compresión considerablemente baja, lo que compromete su viabilidad como material estructural.

Las temperaturas alcanzadas durante la mezcla convencional no superaron los 38 °C, valor insuficiente según la literatura para inducir reacciones autógenas de curado. La modificación del proceso mediante hidratación controlada logró un desarrollo térmico más adecuado, replicando en parte las condiciones observadas en el hormigón romano. Aun así, el fenómeno de autoreparación fue limitado y no homogéneo, lo que indica que el procedimiento debe seguir optimizándose.

Las placas iniciales, elaboradas mediante el método convencional, demostraron que el material se mantuvo inerte durante el periodo de observación. No se evidenció ninguna reacción visible que indicara un proceso de autoreparación. Además, estas placas acentuaron aún más la porosidad del hormigón, lo cual compromete su integridad estructural y reafirma la necesidad de modificar el procedimiento de mezclado para favorecer un mejor comportamiento del material.

Tal como se observa en las figuras 89, 90 y 91, las muestras inicialmente fisuradas con concentraciones de 5%, 10% y 15% de cal viva, respectivamente, presentaban grietas superficiales y microfisuras leves al momento de su fabricación. Transcurridos los 28 días de curado bajo agua, se procedió a evaluar visualmente el proceso de sellado de estas fisuras.

El uso combinado de cal viva y ceniza volcánica representa una alternativa sostenible frente al uso exclusivo de cemento Portland, contribuyendo a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y al aprovechamiento de recursos naturales disponibles localmente. Sin embargo, para que estas formulaciones se integren de manera efectiva en la industria de la construcción moderna, es necesario continuar investigando en aspectos

como la optimización del diseño de mezcla, el control térmico en obra, el curado homogéneo y la caracterización mineralógica de los productos formados.

La necesidad de alcanzar altas temperaturas durante la mezcla representa un desafío técnico importante. En contextos de obra real, controlar y mantener estas condiciones térmicas durante el transporte y colocación del hormigón puede resultar inviable sin el desarrollo de tecnologías auxiliares. Esto limita la aplicabilidad práctica de las formulaciones, especialmente en proyectos a gran escala.

Los resultados revelaron que sí se produjo un fenómeno de autoreparación, especialmente en las fisuras más pequeñas y expuestas al ambiente húmedo. Sin embargo, este sellado no fue ni total ni uniforme, como se aprecia en las figuras 92, 93 y 94, lo que sugiere que, si bien la técnica empleada favorece la activación parcial de propiedades autoreparantes, aún requiere ajustes y una mayor masa estadística para alcanzar una eficacia completa, además de una certeza absoluta en estos resultados.

En las muestras finales no se realizaron variaciones en la formulación base del hormigón, manteniéndose los mismos porcentajes de materiales conforme al diseño original basado en el método de Fuller. Esto permite concluir que dicha metodología resulta efectiva para garantizar una adecuada proporción de agregados, incluso cuando se incorporan aditivos como la cal viva y la ceniza volcánica. No obstante, los resultados más favorables observados en las muestras finales estuvieron estrechamente relacionados con el desarrollo de altas temperaturas durante el proceso inicial de mezcla-producto de la reacción exotérmica de la cal viva con el agua, lo cual sugiere que este factor es crucial para activar las propiedades deseadas de autoreparación y mejorar el desempeño estructural del material.

La necesidad de alcanzar altas temperaturas durante el proceso de mezclado - requisito clave para activar las propiedades de autoreparación observadas en el

hormigón modificado representa una importante desventaja en términos de aplicabilidad práctica. Este requerimiento térmico podría limitar la viabilidad del uso de este tipo de mezcla en proyectos de gran escala, especialmente en contextos donde el control de temperatura es difícil de mantener de forma homogénea. Además, el transporte del hormigón desde la planta de mezcla hasta el lugar de colocación supondría un desafío logístico adicional, ya que la pérdida de calor durante el trayecto podría afectar negativamente el desarrollo de las propiedades esperadas del material.

Considerando todos los hallazgos, se concluye que aún se requiere una mayor profundización e investigación para que este tipo de formulaciones sean verdaderamente prácticas y funcionales dentro del ámbito de la construcción moderna. Si bien el uso de cal viva y ceniza volcánica representa una alternativa económica y más sostenible frente al uso exclusivo de cemento Portland, su implementación a gran escala enfrenta importantes desafíos técnicos y logísticos. El posible aumento en la resistencia a compresión y la posible capacidad de autoreparación que estas mezclas han demostrado en ciertos contextos controlados, resultan ser propiedades con un potencial significativo. No obstante, dichas ventajas no pueden ser aprovechadas plenamente sin un trabajo complementario que permita superar las limitaciones actuales, como el control térmico en obra, la porosidad del material y la homogeneidad del curado. Por tanto, es imprescindible continuar desarrollando estrategias y adaptaciones que permitan incorporar estas formulaciones en entornos reales de construcción.

#### **4.2 Recomendaciones**

Es fundamental realizar una mayor cantidad de ensayos a un mínimo de 3 por cada concentración de cal viva para obtener resultados estadísticamente significativos

Se sugiere experimentar con diferentes tiempos y condiciones de apagado previo de la cal viva, tanto en seco como en húmedo, y evaluar su impacto en la temperatura alcanzada y en la microestructura final del hormigón.

Se recomienda realizar caracterización de las muestras mediante técnicas como difracción de rayos X (XRD), espectroscopía infrarroja (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis termogravimétrico (TGA). Estos métodos permitirán identificar los productos de hidratación y verificar la formación de compuestos responsables de la autoreparación.

Dado que el desarrollo de temperatura es un factor crítico para la activación de mecanismos de autoreparación, se recomienda investigar métodos de activación adicionales, como el uso de calor externo controlado durante la mezcla o curado, o incluso el diseño de mezclas autoactivadas químicamente.

Además de la ceniza volcánica utilizada, se podrían explorar otras puzolanas naturales o artificiales (como meta caolín, escoria granulada de alto horno, o ceniza volante de distinta granulometría) para comparar su reactividad y sinergia con la cal viva.

Se recomienda llevar a cabo ensayos de absorción capilar, penetración de cloruros, carbonatación acelerada y ciclos de congelamiento-descongelamiento para evaluar el comportamiento a largo plazo del hormigón modificado.

Para validar la aplicabilidad práctica, sería útil realizar mezclas y curado en condiciones ambientales reales (no solo en laboratorio), considerando variables como pérdida de calor durante el transporte, evaporación de agua y tiempos de fraguado prolongados.

Más allá de cilindros y placas, se sugiere aplicar estas formulaciones en vigas o bloques estructurales sometidos a cargas, para evaluar su desempeño real en condiciones de servicio.

En caso de avanzar en el desarrollo de este tipo de hormigones, se debería redactar una guía técnica que incluya recomendaciones específicas sobre mezcla, manejo, curado, transporte y temperatura mínima para garantizar propiedades de autoreparación.

## 5 ANEXOS

### 5.1 Bibliografía

Arbeláez Pérez, Ó. F., Delgado Varela, K. A., & Castañeda Mena, J. D. (2023). Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 62(6), 443-451.

<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2022.08.001>

ASTM International. (2020). *ASTM C150/C150M-20: Standard Specification for Portland Cement*. [https://doi.org/10.1520/C0150\\_C0150M-20](https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-20)

ASTM, S. (2012). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. *C127-12*.

Bonilla, G., & Sirit, Y. (s. f.). Diseño experimental para ingenieros civiles. *Revista Arbitrada*. <https://www.ucab.edu.ve/>

Bukowiecki, E. (2010). La taille des briques de parement dans l'opus testaceum à Rome. *Arqueología de la construcción: II, Los procesos constructivos en el mundo romano: Italia y provincias orientales:(Certosa di Pontignano, Siena, 13-15 de noviembre de 2008)*, 143-151.

Cañas, J. (2024). *DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO*. UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA, San Salvador. Recuperado el.

Carles, R. (2014). *El hormigón: Breve reseña histórica de un material milenario*. Omnia Publisher.  
<https://www.omniascience.com/books/index.php/monographs/catalog/download/77/311/491-1?inline=1>

Conservation, C. (2019, octubre). *Mixing Different Types of Lime – Making a Hot Mix Mortar*. <https://uselimemortar.com/workmanship/mixing-hot-mix/>

Copsey, N. (2016). Ocultos a plena vista: Morteros de cal mezclados en caliente. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, 29, 118-131.  
<https://doi.org/10.4995/loggia.2016.5149>

Copsey, N. (2019). Traditional hot mixed lime mortars for conservation and repair. *Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation*, 8(1), 9-30.

Forster, A. (2004). Hot-Lime Mortars: A Current Perspective. *Journal of Architectural Conservation*, 10(3), 7-27.  
<https://doi.org/10.1080/13556207.2004.10784923>

González Sánchez, J. F., Navarro Blasco, I., & Álvarez Galindo, J. I. (2021). *Desarrollo de nuevos morteros de restauración de cal con aditivos* [Tesis doctoral, Universidad de Navarra]. <https://hdl.handle.net/10171/60878>

Historic Scotland. (2015, abril). *Hot-Mixed Lime Mortars*. Historic Scotland.  
<https://www.historicenvironment.scot/archives-and-research/publications/publication/?publicationid=d49812ea-b515-4b33-a96c-a59500a5ef36>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011, septiembre). *NTE INEN 872:2011. Áridos para hormigón. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). <https://apps.normalizacion.gob.ec/descarga/>

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2011). *NTE INEN 2380:2011. Hormigón. Determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

Jackson, M., Oleson, J., Moon, J., Zhang, Y., Chen, H., & Gudmundsson, M. (2018). Extreme durability in ancient Roman concretes. *American Ceramic Society Bulletin*, 97, 22-28.

Lizarazo, J. S. (2018). Economía Ecológica y la construcción epistemológica de una ciencia revolucionaria para la sostenibilidad y la transformación del mundo. *Gestión y Ambiente*, 21(1supl), 13-34. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1supl.72122>

Matallana Rodríguez, R. (2014). *El Concreto: Fundamentos y Nuevas Tecnologías*. Corona, Constructora Conconcreto.

Orlando, G. B. (1987). *Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/47282>

Pavía, S., Veiga, M., Hughes, J., Pesce, G., Valek, J., Alvarez, J., Faria, P., & Padovnik, A. (2023). RILEM TC 277-LHS report: How hot are hot-lime-mixed mortars? A review. *Materials and Structures*, 56. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02157-1>

Seymour, L. M., Maragh, J., Sabatini, P., Tommaso, M. D., Weaver, J. C., & Masic, A. (2023). Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Science Advances*, 9(1), eadd1602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add1602>

Wang, D., Shen, X., Wang, Z., Zhang, X., & Chen, X.-F. (2025). Effect of Quicklime Substitution for Cement on the Physical and Mechanical Properties of Autoclaved Fly Ash Aggregates via Hydrothermal Synthesis. *Materials*, 18(3), 707. <https://doi.org/10.3390/ma18030707>

Williams, R. J. J. (2013). Materiales autorreparables basados en polímeros entrecruzados. *Ciencia e Investigación*, 63(2), 23-35.

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Angelo Rafael Morocho Minchala portador de la cédula de ciudadanía N.º 0106516735. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis de la Implementación de Técnicas de Cemento Romano (Hot Mixing) en hormigón moderno: Un Estudio sobre la Autoreparación” 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, 11 de julio de 2025

  
F: .....  
Angelo Rafael Morocho Minchala  
0106516735