

Evaluación de morteros con óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado para uniones en mampostería

Evaluation of mortars with calcium oxide and hydrated calcium sulfate for masonry joints

Jinmer Bravo-Apaza ^A, Anderson Nuñez-Fernandez ^B

0000-0002-0217-7075 ^A, 0000-0002-6565-0392 ^B

(Recepción: 15/05/2024 y aceptación 25/06/2024)

Resumen— El uso de cal y yeso en morteros es crucial para el desempeño mecánico de edificaciones tradicionales. El objetivo fué evaluar la influencia del óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado en la resistencia a la compresión, el tipo de fisuración y la densidad del mortero utilizado para uniones en mampostería. Se elaboraron 21 briquetas con siete tratamientos: T1 (Testigo), T2-T4 con dosificaciones de óxido de calcio y T5-T7 con sulfato de calcio hidratado, mezclados con cemento y arena en relación de 1:5 (v/v). los resultados mostraron que la resistencia a la compresión en T5 superó a T1. Los tratamientos T1, T2 y T5 presentaron fisuración cónica en 100%. La densidad fue mayor en T4, seguido por T1 y T5. La adición de sulfato de calcio hidratado mejora la resistencia a la compresión y en cuanto a la fisuración columnar y por corte se debe a imperfecciones en los materiales. Se demostró que el sulfato de calcio hidratado aumenta la resistencia a la compresión del mortero alcanzando 144.47 kg/cm² en comparación con 139.87 kg/cm² del testigo, pero una adición excesiva reduce la resistencia. Estas dosificaciones también influyen en el tipo de fisuración, sin embargo, no afectan significativamente la densidad.

Palabras clave: Mampostería, óxido de calcio, sulfato de calcio hidratado.

Abstract— The use of lime and gypsum in mortars is crucial for the mechanical performance of traditional buildings. The objective was to evaluate the influence of calcium oxide and hydrated calcium sulfate on the compressive strength, type of cracking, and density of mortar used for masonry joints. Twenty-one briquettes were prepared with seven treatments: T1 (Control), T2-T4 with calcium oxide dosages, and T5-T7 with hydrated calcium sulfate, mixed with cement and sand in a 1:5 (v/v) ratio. The results showed that the compressive strength in T5 exceeded that of T1. Treatments T1, T2, and T5 exhibited conical cracking in 100% of samples. The density was highest in T4, followed by T1 and T5. The addition of hydrated calcium sulfate improves compressive strength, and conical and shear cracking are due to material imperfections. It was demonstrated that hydrated calcium sulfate increases the compressive strength of mortar to 144.47 kg/cm² compared to 139.87 kg/cm² for the control, but excessive addition reduces strength. These dosages also influence the type of cracking; however, they do not significantly affect density.

Keywords: Masonry, calcium oxide, hydrated calcium sulfate

1 INTRODUCCIÓN

La composición de morteros con cemento Portland y cal hidráulica afecta significativamente la resistencia a la compresión. Una mezcla con cemento Portland en proporción 1:3 alcanza resistencias de 19.2 MPa, mientras que mezclas con cal muestran resistencias menores. La adición de cal al concreto también afecta significativamente su resistencia a la compresión. Añadir entre 10-15% de cal reduce la resistencia, mientras que una adición del 5% es aceptable y económicamente beneficiosa [1].

Además, la adición de cenizas volantes al concreto incrementa su resistencia a la compresión y disminuye su permeabilidad, alcanzando la máxima resistencia con un 6% de cenizas volantes [2]. La mezcla de concreto ternario con residuos de mampostería y cal hidratada muestra comportamiento puzolánico favorable, mejorando la resistencia a compresión a largo plazo [3].

Los muros de mampostería combinada y confinada demuestran capacidad para soportar cargas sísmicas la-

A. Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, Perú. Correo electrónico: jbravo@unamba.edu.pe.

B. Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, Perú. Correo electrónico: Anuñez@unamba.edu.pe.

terales al utilizar morteros con cal y mampostería adherida [4]. Se ha propuesto un enfoque normativo para el diseño sísmico de edificaciones de mampostería confinada, basado en la resistividad y desempeño sísmico, considerando las lecciones aprendidas de terremotos anteriores [5]. Los ciclos de congelación-descongelación deterioran las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de mampostería, por ello la necesidad de buscar materiales con resistencias óptimas [6]. Los residuos de fosfoyeso mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero estructural sin cemento, incorporado escoria de alto horno granulada molida y óxido de calcio (CaO). La adición óptima mejora la resistencia a la compresión y flexión [7].

Los morteros estructurales se utilizan para unir unidades individuales de mampostería. Los morteros de cal y yeso fueron los más extendidos desde la antigüedad hasta principios del siglo XIX. Los morteros de cal prevalecieron sobre la construcción en seco cuando los constructores romanos comenzaron a experimentar con aglutinantes de alta calidad [8]. Además el mortero de revestimiento y uniones protege y sella el edificio, sufre diversos mecanismos de degradación, especialmente relacionados con el cemento [9]. Por otro lado, los morteros de cal hidráulica acumulan humedad y cuando son secados en una solución de cloruro de sodio, la acumulación de sal produce un material más denso, mejorando la resistencia a la compresión y la flexión [10]

El óxido de calcio se obtiene mediante la calcinación de piedra caliza, produciendo cal viva (CaO), que al exponerse al agua se convierte en cal apagada (hidróxido de calcio). La cal apagada es una base fuerte que puede contener hasta un 5% de óxido de magnesio y se caracteriza por endurecerse incluso en presencia de agua. El mortero de cal viva se utiliza en revestimientos y suelos, mientras que el mortero hidráulico es resistente a agentes agresivos [11]. Además en morteros pusolanicos, la cal, cal hidráulica incrementa la resistencia a la tracción [12].

El mortero para juntas de mampostería se elabora con un aglutinante como cemento o con una mezcla de cal y arena a la cual se añade cemento en el sitio de uso. La cal de construcción se clasifica según su composición química: la cal de dolomita, la cal aérea y la cal hidráulica. La cal cálcica, o cal viva, se obtiene calcinando calizas con más del 95% de carbonato cálcico (CaCO₃) a unos 900°C. La cal hidratada se produce al hidratar la cal viva con agua. La cal se usa en morteros para revestimientos y juntas de albañilería debido a su buena plasticidad, trabajabilidad y elasticidad sin sufrir contracción por humedad. Permite alta permeabilidad al vapor, evitando condensación y eflorescencias, y es un excelente aislante térmico y acústico [13].

La resistencia a la compresión es el principal indicador

de calidad del mortero, crucial para soportar cargas y resistir deformaciones. En aplicaciones como muros de carga y de contención, se usan morteros de alta resistencia a la compresión para garantizar la seguridad estructural y la integridad de los muros durante la vida útil del edificio [14]. La durabilidad de los especímenes de mortero es crucial para evaluar su resistencia a largo plazo. Se recomienda que los especímenes curados en agua no potable alcancen al menos el 90% de la durabilidad de los curados en agua potable [15].

La mampostería es un material de construcción compuesto por partes de diferentes materiales conectadas por juntas de mortero. Aunque es heterogénea, puede considerarse homogénea en muros con muchas partes macroscópicas. Las juntas de mortero actúan como superficies débiles, haciendo que el material sea ortótropo. El comportamiento no lineal del muro proviene del comportamiento no lineal de los materiales tras la deformación y del comportamiento de la interfaz de desechos bajo esfuerzo cortante [16].

El mortero es una mezcla de cemento Portland, cal, arena y agua. Añadir cal al mortero de cemento mejora su manejabilidad. Los morteros se clasifican en mortero de cal, mortero de cemento Portland, y mortero de cemento y cal. Se utiliza para unir elementos de mampostería, nivelarlos y mejorar la estética de la estructura. El mortero de cal gana resistencia lentamente, aumentando su resistencia a la compresión con el tiempo [17]. El mortero de cal puro, la mezcla de arena y áridos arcillosos también mejoran la capacidad con el mismo volumen. El mortero de cal puro también mejora la plasticidad y ductilidad y es adecuado para estructuras [18]. Así mismo el mortero de yeso proporciona mayor resistencia a la compresión y resistencia al corte diagonal en muros de mampostería [19]. Además en cuanto a la influencia de la cal en el mortero, en cuanto a su viscosidad esta dado más por la morfología de la cal que por su composición química [20].

La resistencia de adherencia del mortero es crucial para el desempeño mecánico de la mampostería de ladrillo [21]. Se debe tener en cuenta también la prolongación de la vida útil de las construcciones ya que es crucial para reducir los costos de mantenimiento y la huella de carbono en la industria de la ingeniería civil [22]

La relación de mezcla del hormigón debe corresponder a la calidad requerida (resistencia a cargas e influencias químicas y a las condiciones de instalación en el sitio. La dosificación es correcta si cumple ambos requisitos con el máximo ahorro de material [23]. El hormigón es una mezcla de productos compuesta por un aglomerante y áridos, que pueden ser gruesos o finos. Las propiedades del hormigón dependen de su composición y de sus propiedades físicas y químicas [24].

2. METODOLOGÍA

La investigación evaluó la influencia del óxido de calcio y del sulfato de calcio hidratado en las características mecánicas y físicas del mortero mediante la elaboración de 21 briquetas. Se diseñaron siete tratamientos: T1 (Testigo), T2-T4 con diferentes dosificaciones de óxido de calcio, y T5-T7 con distintas dosificaciones de sulfato de calcio hidratado, todos mezclados con cemento y arena en una relación volumen a volumen (v/v) fija de 01:05.

Tabla 01: Diseño de mezcla para morteros con adición de óxido de calcio y Sulfato de calcio hidratado.

Tratamiento	Dosificación de mezcla (v/v)		
	M1	M2	M3
T1	0.00:01:05	0.00:01:05	0.00:01:05
T2	0.25:01:05	0.25:01:05	0.25:01:05
T3	0.50:01:05	0.50:01:05	0.50:01:05
T4	0.75:01:05	0.75:01:05	0.75:01:05
T5	0.25:01:05	0.25:01:05	0.25:01:05
T6	0.50:01:05	0.50:01:05	0.50:01:05
T7	0.75:01:05	0.75:01:05	0.75:01:05

La medición de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado se realizó con probeta graduada para examinar con precisión las variables de adición de óxido de calcio: cemento: arena de 0.25-0.75:01:05 v/v y sulfato de calcio hidratado: cemento: arena de 0.25-0.75:01:05 v/v. El requerimiento de agua incrementó conforme se aumenta el volumen de óxido de calcio o sulfato de calcio hidratado en la mezcla del mortero.

2.1 PROCEDIMIENTO

Los componentes de la mezcla fueron dosificados en envases de plástico de 18 litros, utilizando una probeta graduada de PVC y una espátula para el llenado. Las proporciones de las muestras T1-T7 y sus réplicas se midieron y vertieron en un recipiente de plástico.

La mezcla se vertió en un recipiente de plástico para medir las muestras M1-M4 y sus réplicas por triplicado. Se utilizó una espátula para llenar la cubeta con cal, cemento y arena, luego se transfirió a un balde de 18 litros para la mezcladora.

El mortero se mezcló en un equipo de concreto de 0.80 HP y 125 litros a 20 rpm durante 05 minutos. Luego, se vertió en un balde de 18 litros para colocarlo en las briquetas de pvc.

El mortero se colocó en briquetas de pvc cilíndricas en tres capas, compactadas con 25 golpes de una varilla y tres golpes laterales.

Transcurrido un día, se desencofraron las briquetas utilizando un inflador para facilitar el proceso.

Posteriormente, las briquetas se curaron sometieron al curado recubrieron con agua para asegurar su hidratación adecuada.

Para determinar la resistencia a la compresión, se retira las briquetas de la cama de curado después de 28 días, se mide el diámetro con un vernier y se calcula el área transversal. Luego, se limpian las superficies de contacto, se colocan las briquetas en la prensa y se aplica una carga continua de 1.20 kN/s.



Fig. 01. Imágenes que muestra la rotura de briquetas con prensa a 1.20 kN/s

Después de aplicar la compresión, se observa el tipo de falla en la muestra. Las fallas comunes incluyen la falla cónica y la rotura de la columna, esta última puede deberse a superficies de carga convexas, falta de material, abolladuras o convexidades en las placas de carga.



Fig. 02. Imágenes que muestra la fisuración - tipo de falla en la briqueleta que se sometió a esfuerzo de compresión.

La densidad de las briquetas se determinó según la norma ASTM C62, midiendo su masa aparente tras 28 días de curado y aplicando la fórmula de densidad basada en la relación masa-volumen.

2.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de investigación consistió en briquetas cilíndricas elaboradas en el laboratorio de suelos, agregados y concreto ConChipa E.I.R.L. en Abancay, Apurímac. La muestra total incluyó 21 briquetas, se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión, con 3 muestras por tratamiento (óxido de calcio, sulfato de calcio hidratado y muestra testigo). Los resultados se analizaron estadísticamente tras la rotura de las briquetas.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Resistencia a la compresión

Tabla 02. Datos observados en laboratorio para determinar la resistencia a la compresión.

Resistencia a compresión (kg/cm ²)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
R1	139.00	125.60	124.30	121.70	145.10	136.60	132.10
R2	140.50	125.00	124.80	123.50	144.80	138.10	131.00
R3	140.10	126.50	125.30	124.00	143.50	137.50	131.70
Total	419.60	377.10	374.40	369.20	433.40	412.20	394.80
Promedio	139.87	125.70	124.80	123.07	144.47	137.40	131.60
Varianza	0.60	0.57	0.25	1.46	0.72	0.57	0.31

En la determinación de la resistencia a la compresión del mortero con diferentes tratamientos de óxido de calcio, se observó que el tratamiento T1 tuvo la mayor resistencia con un promedio de 139.877 kg/cm², seguido por T2 con 125.70 kg/cm², T3 con 124.80 kg/cm², y T4 con 123.07 kg/cm². En cuanto a los tratamientos con óxido de calcio hidratado, T5 mostró la mayor resistencia con 144.47 kg/cm² superando la muestra testigo, seguido por T6 con 137.40 kg/cm² y T7 con 131.60 kg/cm². El tratamiento T5 se destacó por su alta resistencia, lo que indica su potencial aplicación en morteros para mampostería.

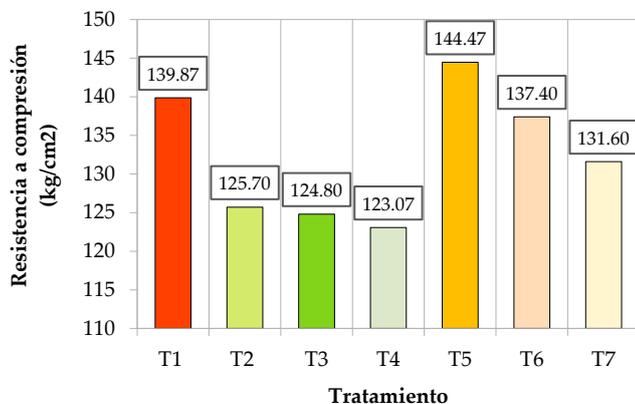


Fig. 03. Promedios de resistencia a compresión del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado para mampostería.

La figura 03 se observa que el tratamiento T5 presenta la mayor resistencia a la compresión, seguido por el tratamiento T1 (testigo), T6 y finalmente T7. La gráfica muestra una tendencia negativa, indicando que, al incrementar la dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado, la resistencia disminuye, siendo inversamente proporcionales.

Tabla 03. Análisis de varianza de promedios de resistencia a la compresión.

Origen de variaciones	SS	df	MS	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1 250.27	6.00	208.38	324.86	0.00	2.85
Dentro de los grupos	8.98	14.00	0.64			
Total	1 259.25	20.00				

La tabla 03 muestra los resultados del análisis de varianza para los promedios de la resistencia a la compresión del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio y de sulfato de calcio hidratado. El p-valor es menor a 0.05, indicando que existe una diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre las distintas dosificaciones. Para determinar cuál tratamiento tiene mayor resistencia, es necesario realizar un análisis de comparación múltiple de Tukey.

La prueba de Tukey demostro una comparación múltiple al 95% de confiabilidad de los promedios de resistencia a la compresión del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado para mampostería. Se observa una diferencia significativa entre la mayoría de los tratamientos, excepto entre T6-T1, T3-T2, T4-T2 y T4-T3, que no presentan diferencias significativas, es decir, son estadísticamente iguales. Los resultados sugieren que la muestra patrón (T1, con dosificación 0.00:01:05) tiene la mayor resistencia, mientras que los tratamientos con óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado disminuyen la resistencia a la compresión.

3.2 Fisuración - tipo de falla a compresión

Tabla 04. Tipo de falla del mortero con óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado para mampostería.

Tratamiento	Tipo de falla a la compresión			Total
	Cónica (%)	Columnar (%)	Corte (%)	
T1	100.00	0.00	0.00	100
T2	100.00	0.00	0.00	100
T3	0.00	66.67	33.33	100
T4	0.00	66.67	33.33	100
T5	100.00	0.00	0.00	100
T6	0.00	33.33	66.67	100
T7	0.00	66.67	33.33	100

La tabla 04 muestra los datos observados en el laboratorio de concreto para determinar el tipo de falla del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T1, T2, T3 y T4) y sulfato de calcio hidratado (T5, T6 y T7). Se observa que los tratamientos T1, T2 y T5 presentaron una falla cónica en el 100% de las muestras. Los tratamientos T3, T4 y T7 presentaron una falla columnar en el 66.67% de las muestras. El tratamiento T6 mostró una falla de tipo corte en el 66.67% de las muestras y una falla de tipo corte en el 33.3%.

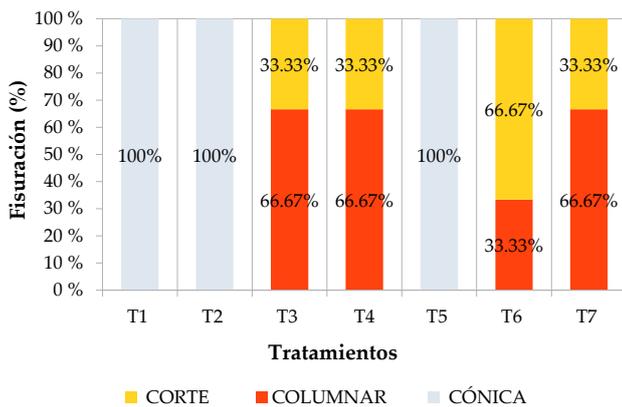


Fig. 04. Promedios del fisuración - tipo de falla del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado para uniones de mampostería.

La figura 04 presenta una representación gráfica de los promedios de fisuración y tipo de falla del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T2, T3, T4) y sulfato de calcio hidratado (T5, T6, T7) para uniones de mampostería. Se observa que los tratamientos T1, T2 y T5 presentaron únicamente fallas de tipo cónica. Los tratamientos T3, T4 y T7 mostraron fallas de tipo columnar en el 66.67% de las muestras, mientras que el tratamiento T6 tuvo fallas de tipo corte en el 66.67% de las muestras.

3.3 Densidad

Tabla 05. Datos observados en el laboratorio de concreto para la determinación de la densidad del mortero con óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado.

Densidad (kg/m ³)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
R1	1 686.28	1 676.50	1 632.82	1 679.76	1 676.50	1 671.62	1 671.62
R2	1 661.87	1 636.03	1 671.62	1 743.93	1 676.50	1 644.09	1 657.01
R3	1 665.20	1 648.60	1 642.10	1 645.20	1 648.60	1 642.10	1 645.20
Total	5 013.36	4 961.13	4 946.53	5 068.89	5 001.60	4 957.80	4 973.83
Promedio	1 671.12	1 653.71	1 648.85	1 689.63	1 667.20	1 652.60	1 657.94
Varianza	175.23	428.93	410.45	2 509.98	259.44	272.17	175.10

La tabla 05 muestra los datos de laboratorio para determinar la densidad del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T2, T3 y T4) y sulfato de calcio hidratado (T5, T6 y T7) para uniones de mampostería. Los promedios de densidad fueron: T1 - 1671.12 kg/m³, T2 - 1653.71 kg/m³, T3 - 1648.85 kg/m³, T4 - 1689.63 kg/m³, T5 - 1667.20 kg/m³, T6 - 1652.60 kg/m³ y T7 - 1657.94 kg/m³. El tratamiento T4 tuvo la mayor densidad, seguido por T1, mientras que T3 tuvo la menor densidad.

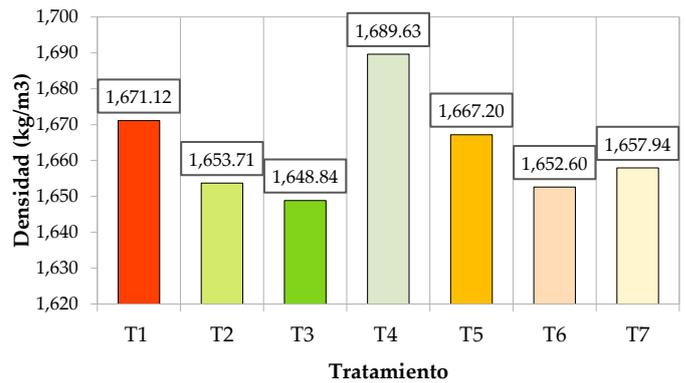


Fig. 05. Promedios de la densidad del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado para muros de mampostería.

La figura 05 muestra la representación gráfica de los promedios de densidad del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T1, T2, T3, T4) y de sulfato de calcio hidratado (T5, T6, T7) para muros de mampostería. Se observa que el tratamiento T4 tiene la mayor densidad, seguido por el tratamiento T1 y T5. Los demás tratamientos tienen densidades inferiores a la muestra patrón.

Tabla 06. Análisis de varianza de promedios de densidad.

Origen de variaciones	SS	df	MS	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	3 639.02	6.00	606.50	1.00	0.46	2.85
Dentro de los grupos	8 462.58	14.00	604.47			
Total	12 101.60	20.00				

La tabla 06 muestra los resultados del análisis de varianza para los promedios de densidad del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T2, T3, T4) y sulfato de calcio hidratado (T5, T6, T7) para muros de mampostería. El p-valor es mayor a 0.05, lo que indica que no hay una diferencia significativa en la densidad del mortero entre las diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado, es decir, estadísticamente tienen igual densidad.

4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resistencia a la compresión

La tabla 01 presenta los resultados del análisis de varianza de los promedios de resistencia a la compresión del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T1, T2, T3, T4) y sulfato de calcio hidratado (T5, T6, T7) para mampostería. El p-valor menor a 0.05 indica una diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre las diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado. Para determinar qué tratamiento tiene la mayor resistencia, se realizó un análisis de comparación múltiple de Tukey. Los resultados muestran que, a mayor concentración de óxido de calcio y sulfato de calcio en el mortero, disminuye la resistencia a la compresión. Sin embargo, el sulfato de calcio en una concentración de 0.25

mejora favorablemente la resistencia del mortero. Además, los resultados indican que la resistencia a la compresión del mortero se incrementó con el aumento de la cantidad de óxido de calcio, alcanzando su máximo con una adición del 5%. Sin embargo, cuando el porcentaje de óxido de calcio se incrementó a 6%, la resistencia a la compresión disminuyó [2]. De esto se concluye que un aumento del 1% en la resistencia a la compresión se logra con hasta un 5% de óxido de calcio, pero más allá de este punto, la resistencia disminuye en un 5% [8]. Del mismo modo se logró una resistencia máxima a la compresión de 21 kg/cm² con una dosis del 6% después de 28 días, demostrando que la resistencia a la compresión aumenta a medida que se incrementa la cantidad añadida [9]. Por otro lado, los resultados sobre la resistencia a la compresión del concreto, publicados en una relación a/c constante, mostraron que la mezcla con la mayor relación a/c tenía la mayor resistencia al envejecimiento prolongado debido al comportamiento puzolánico. Se concluyó que la resistencia a la compresión es mejor cuando la mezcla contiene una alta cantidad de escombros de mampostería en comparación con las mezclas con una gran cantidad de cal apagada [10].

4.2 Fisuración - tipo de falla del mortero

La figura 03 muestra una representación gráfica de los promedios de fisuración y tipo de falla del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T1, T2, T3, T4) y sulfato de calcio hidratado (T5, T6, T7) para uniones de mampostería. Los tratamientos T1, T2 y T5 presentaron únicamente fallas de tipo cónica. Los tratamientos T3, T4 y T7 mostraron fallas de tipo columnar en el 66.67% de las muestras, mientras que el tratamiento T6 tuvo fallas de tipo corte en el 66.67% de las muestras. Si embargo la ASTM C-39-86 [28], Las fallas típicas en el ensayo de compresión para briquetas incluyen la falla tipo cónica, que ocurre con una carga de compresión bien aplicada en un espécimen bien preparado. Sin embargo, también se observan fallas de columna debido a superficies de apoyo cóncavas, imperfecciones en los materiales o muescas en las placas de carga. La falla cilíndrica es causada por la falta de material, rugosidad de las placas de carga, mientras que la falla por cortante ocurre cuando la superficie de aplicación de carga está fuera de la tolerancia de paralelismo o el centro de la muestra está desalineado.

4.3 Densidad del mortero

La tabla 04 muestra los resultados del análisis de varianza para los promedios de densidad del mortero con diferentes dosis de óxido de calcio (T1, T2, T3, T4) y sulfato de calcio hidratado (T5, T6, T7) para muros de mampostería. El p-valor es mayor a 0.05, lo que indica que no hay una diferencia significativa en la densidad del mortero entre las diferentes dosis de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado, es decir, estadísticamente tienen la misma densidad. Según Fernández [29], La densidad real del hormigón depende principalmente de la densidad de los áridos, su granulación y el volumen involucrado en su composición. Una mayor densidad del hormigón puede indicar mejor resistencia mecánica y durabilidad, lo cual se logra con la máxima compacidad, es decir, con

menos vacíos y mayor compactación.

5 CONCLUSIONES

El estudio sobre la evaluación del óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado en morteros para uniones de mampostería ha revelado que la adición de sulfato de calcio hidratado incrementa la resistencia a la compresión del mortero, alcanzando hasta 144.47 kg/cm², en comparación con 139.87 kg/cm² del testigo. Sin embargo, una dosificación excesiva de estos materiales reduce la resistencia estructural. Además, se observó que la fisuración cónica predomina con menores dosificaciones, mientras que la fisuración columnar y por corte son más frecuentes con mayores concentraciones de óxido de calcio y sulfato de calcio hidratado. No se encontraron variaciones significativas en la densidad entre los tratamientos, indicando que la densidad no se ve sustancialmente afectada por las diferentes dosificaciones. Además, el uso controlado de sulfato de calcio hidratado puede mejorar la resistencia a la compresión de los morteros, aunque se necesitan más estudios para evaluar los efectos a largo plazo y su compatibilidad con otros materiales de construcción.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hidai Calleja García, Sulpicio Sánchez Tizapa, Alfredo Cuevas Sandoval, Alma Delia Zacaria, and Vi-tal y Manuel Ramos Segura, "Influencia de la cal en la resistencia a compresión del mortero," *Academia Journals*, vol. 13, no. 1, pp. 136-141, Mar. 2021.
- [2] S. Huaquisto Cáceres and G. Belizario Quispe, "Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento," *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, vol. 20, no. 2, pp. 255-234, Apr. 2018.
<https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- [3] Y. F. Silva Urrego, J. E. Rojas Rojas, J. A. Gamboa, M. Gordillo, and S. Delvasto Arjona, "Optimización de la resistencia a compresión usando un diseño de mezcla de vértices extremos, en concretos ternarios basados en residuo de mampostería y cal hidratada," *Revista EIA*, vol. 16, no. 31, pp. 99-113, Jan. 2019.
<https://doi.org/10.24050/reia.v16i31.1177>
- [4] Arturo Tena Colunga, Artemio Juárez Ángeles, and Víctor Hugo Salinas Vallejo, "Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales," *Ingeniería Sísmica*, vol. 76, no. 1, pp. 26-60, Mar. 2007.
<https://doi.org/10.18867/ris.76.58>
- [5] Ángel San Bartolomé and Daniel Quiun, "Propuesta normativa para el diseño sísmico de edificaciones de mampostería confinada," *SciELO*, vol. 42, no. 2, pp. 40-57, nov. 2004.
- [6] Y. Zhou, S. Zheng, L. Chen, L. Long, and L. Dong, "Mechanical properties and seismic behavior of confined masonry walls in freeze-thaw environment," *Structures*, vol. 31, pp. 647-659, jun. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.051>

- [7] Hermawan, H. S. Djayaprabha, and H.-A. Nguyen, "Utilizing phosphogypsum waste to improve the mechanical and durability performances of cement-free structural mortar containing ground granulated blast furnace slag and calcium oxide," *Journal of Building Engineering*, vol. 72, p. 106557, Aug. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106557>
- [8] P. Vitti, "Lime and Gypsum Mortars in Historic Construction," in *Encyclopedia of Archaeology (Second Edition)*, Elsevier, 2024, pp. 531-543.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90799-6.00064-1>
- [9] G. Baptista Junior et al., "Durability for coating mortars: Review of methodologies," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 30, pp. 657-671, May 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.020>
- [10] D. V. Bompa and A. Y. Elghazouli, "Mechanical properties of hydraulic lime mortars and fired clay bricks subjected to dry-wet cycles," *Constr Build Mater*, vol. 303, p. 124458, oct. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124458>
- [11] "Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería."
- [12] P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, and A. Moropoulou, "Physico-chemical study of Cretan ancient mortars," *Cem Concr Res*, vol. 33, no. 5, pp. 651-661, May 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01030-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01030-X)
- [13] "Guía práctica para los morteros con cal."
- [14] "Evaluación de resistencia a la compresión de mortero con proveta".
- [15] James K. Wight and Basile G. Rabbat, "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05)," *American Concrete Institute*, vol. 1, no. 1, pp. 308-3018, Jan. 2005.
- [16] Didier Combescure and Pierre Pegon, "Modelling of the in-plane behaviour of masonry infilled frames," *European Seismic Design Practice*, vol. 1, no. 1, pp. 621-629, oct. 1995.
<https://doi.org/10.1201/9780203756492-94>
- [17] Michael S. Mamlouk and John P. Zanievski, *Materiales Para Ingeniería Civil*, 2nd ed., vol. 1. Madrid: Pearson Educación, 2009.
- [18] P. Tian, W. Yang, J. Lu, X. Wu, and Z. Wang, "Study on the shear properties of masonry pagoda mortar and its influencing factors," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02981, jul. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02981>
- [19] A. Soleymani, M. A. Najafgholipour, and A. Johari, "An experimental study on the mechanical properties of solid clay brick masonry with traditional mortars," *Journal of Building Engineering*, vol. 58, p. 105057, oct. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105057>
- [20] Y. Sébaïbi, R. M. Dheilily, and M. Quéneudec, "A study of the viscosity of lime-cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime," *Constr Build Mater*, vol. 18, no. 9, pp. 653-660, nov. 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.028>
- [21] Z. Tang, H. Zhang, Y. Pan, L. Ke, Z. Xiang, and Z. Lai, "Experimental study on mechanical properties of basalt Fiber-Clay lime mortar and application in brick masonry," *Constr Build Mater*, vol. 398, p. 132479, Sep. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132479>
- [22] D. Bednarska, M. Koniorczyk, N. Grzelak, and M. Czyż, "A contribution to preservation of salt-laden construction materials: An effective, eco-friendly and inexpensive system of renovation plasters," *Journal of Building Engineering*, vol. 83, p. 108444, Apr. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108444>
- [23] P. Tian, W. Yang, J. Lu, X. Wu, and Z. Wang, "Study on the shear properties of masonry pagoda mortar and its influencing factors," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02981, jul. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02981>
- [24] Enrique Rivva López, *Naturaleza y materiales del concreto*, 1st ed., vol. 1. Lima: Aci Perú, 2000.