

Evaluación de la autolimpieza de morteros de cal a partir de mezclas con dióxido de titanio (TiO₂) y metacaolín.

C. M. Lasta^{1*} , A. S. Fonseca¹ , F. Tiecher² 

*Autor de Contacto: charlesmichellasta@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.851>

Recibido: 04/07/2025 | Correcciones recibidas: 28/02/2026 | Aceptado: 13/03/2026 | Publicado: 01/05/2026

RESUMEN

Este estudio evaluó el desempeño de morteros de cal modificados con dióxido de titanio (TiO₂) y metacaolín (MK), con énfasis en la resistencia a la compresión y la capacidad autolimpiante. Se moldearon seis formulaciones distintas, que fueron ensayadas en términos de consistencia, resistencia mecánica y variación de color después de la exposición a la intemperie natural. Los resultados indicaron que el TiO₂ mejora tanto la autolimpieza como la resistencia a la compresión, con un efecto estadísticamente significativo sobre la variación de color (ΔE). La presencia de MK no tuvo un efecto inmediato sobre la resistencia. La originalidad del estudio radica en la evaluación conjunta de TiO₂ y MK en morteros de cal expuestos a diferentes microclimas. Se concluye que el TiO₂ contribuye al desempeño funcional de los morteros.

Palabras clave: mortero de cal; dióxido de titanio; fotocatalisis; materiales de construcción.

Citar como: Lasta, C. M., Fonseca, A. S., Tiecher, F. (2026), "Evaluación de la autolimpieza de morteros de cal a partir de mezclas con dióxido de titanio (TiO₂) y metacaolín", Revista ALCONPAT, 16 (2), pp. 186 – 201, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.851>

¹ Estudiante de maestría, Programa de Posgrado en Arquitectura y Urbanismo, Atitus Educação, Passo Fundo, Brasil.

² Profesora doctora, Programa de Posgrado en Arquitectura y Urbanismo, Atitus Educação, Passo Fundo, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, los autores Lasta y Fonseca contribuyeron a la realización de los ensayos, la exposición de las muestras, el registro fotográfico, la elaboración de los gráficos y la redacción del manuscrito, correspondiendo 50% a cada autor en estas actividades. El programa experimental fue diseñado y supervisado por Tiecher, quien también fue responsable del uso de los equipos de medición y ensayo. La discusión de los resultados, las conclusiones y la revisión del manuscrito fueron realizadas por los tres autores, con una contribución aproximada de 33% para cada uno.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2026.

Evaluation of self-cleaning lime mortars containing titanium dioxide (TiO₂) and metakaolin.

ABSTRACT

This study evaluated the performance of lime mortars modified with titanium dioxide (TiO₂) and metakaolin (MK), with emphasis on compressive strength and self-cleaning capacity. Six different formulations were prepared and tested for consistency, mechanical strength, and color variation after exposure to natural weathering. The results indicated that TiO₂ improved both self-cleaning performance and compressive strength, with a statistically significant effect on color variation (ΔE). The presence of MK had no immediate effect on strength within the evaluation period. The originality of the study lies in the combined assessment of TiO₂ and MK in lime mortars exposed to different microclimatic conditions. It was concluded that TiO₂ contributes to the functional performance of mortars.

Keywords: lime mortar; titanium dioxide; photocatalysis; building materials.

Evaluación de la autolimpieza de morteros de cal a partir de mezclas con dióxido de titanio (TiO₂) y metacaolín.

RESUMEN

Este estudio evaluó el desempeño de morteros de cal modificados con dióxido de titanio (TiO₂) y metacaolín (MK), con énfasis en la resistencia a la compresión y la capacidad autolimpiante. Se moldearon seis formulaciones distintas, que fueron ensayadas en términos de consistencia, resistencia mecánica y variación de color después de la exposición a la intemperie natural. Los resultados indicaron que el TiO₂ mejora tanto la autolimpieza como la resistencia a la compresión, con un efecto estadísticamente significativo sobre la variación de color (ΔE). La presencia de MK no tuvo un efecto inmediato sobre la resistencia. La originalidad del estudio radica en la evaluación conjunta de TiO₂ y MK en morteros de cal expuestos a diferentes microclimas. Se concluye que el TiO₂ contribuye al desempeño funcional de los morteros.

Palabras clave: mortero de cal; dióxido de titanio; fotocatalisis; materiales de construcción.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El mortero de cal es uno de los materiales de construcción más antiguos y ha sido ampliamente utilizado en edificaciones y restauraciones debido a su compatibilidad con materiales históricos y a su facilidad de aplicación, con pocos cambios a lo largo de los siglos. Además, el uso de cemento en restauración es desaconsejado en muchos casos debido a los daños irreversibles que puede causar a la matriz pétreo (Saeli et al., 2017). Sin embargo, el uso exclusivo de cal aérea presenta desafíos, como el largo tiempo de curado y la baja resistencia a la humedad y a los agentes atmosféricos, lo que ha motivado investigaciones sobre nuevas formulaciones más adecuadas para las restauraciones (Mattos y Gonçalves, 2019).

Una alternativa es la adición de puzolanas, ya que estos materiales mejoran las propiedades de los compuestos aglomerantes al aumentar su durabilidad y resistencia mecánica, como se ha demostrado en construcciones históricas y tradicionales, incluidos acueductos y puentes (Aggelakopoulou et al., 2011).

Con el aumento de la contaminación, especialmente en áreas urbanas, los materiales de construcción se ven más afectados y presentan signos más tempranos de deterioro, como manchas oscuras causadas por el hollín de los motores de los vehículos, lo que resulta en la pérdida del valor estético de las edificaciones (Pozo-Antonio y Dionísio, 2017). Los agentes ambientales, como la humedad y la radiación UV, también pueden comprometer la durabilidad y la apariencia de los morteros, aumentando las necesidades de mantenimiento. Además, la calidad del aire afecta directamente a la salud de las personas, por lo que es esencial desarrollar materiales autolimpiantes y reductores de contaminantes que contribuyan a disminuir las emisiones nocivas (Bhagyamma et al., 2023). Paralelamente, el uso de materiales antimicrobianos y autolimpiantes ha surgido como una estrategia prometedora para mitigar el crecimiento de microorganismos en superficies, desalentando la propagación de enfermedades en ambientes críticos (Ramadan et al., 2023).

En este contexto, el dióxido de titanio (TiO_2) se destaca como uno de los principales agentes fotocatalíticos utilizados para mejorar el desempeño de morteros y concretos. La fotocatalisis, proceso activado por la radiación solar o UV, permite que el TiO_2 degrade contaminantes y microorganismos, contribuyendo tanto a la autolimpieza como a la mejora de la calidad del aire (Bhagyamma et al., 2023). Además, el TiO_2 es valorado por su estabilidad química, biocompatibilidad y bajo costo, lo que lo convierte en un material prometedor para aplicaciones orientadas a reducir la contaminación ambiental y los costos de mantenimiento (Saeli et al., 2017; Gutiérrez et al., 2020). Cuando se añade a los morteros, el TiO_2 también mejora la resistencia mecánica y la durabilidad, especialmente en ambientes agresivos, como aguas salinas y ácidas (Daniyal et al., 2019). Estos avances indican que el TiO_2 puede ser un componente importante en la formulación de materiales de construcción más sostenibles y eficientes.

Otro aditivo destacado es el metacaolín (MK), una puzolana conocida por su capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio, formando compuestos que aumentan la resistencia mecánica y la durabilidad de concretos y morteros, además de contribuir a prácticas constructivas más sostenibles debido a las menores emisiones de CO_2 asociadas a su producción en comparación con el cemento Portland, por ejemplo (Mattos y Gonçalves, 2019). Asimismo, estudios han demostrado que la incorporación de MK en mezclas que contienen TiO_2 puede mejorar el desempeño fotocatalítico a largo plazo (Lara et al., 2023). Por lo tanto, el metacaolín no solo mejora la estructura física del mortero, sino que también potencia los efectos autolimpiantes y de purificación del aire proporcionados por el TiO_2 , constituyéndose en un componente prometedor para el desarrollo de materiales más eficientes y sostenibles.

Este estudio evalúa el comportamiento autolimpiante de morteros de cal modificados con dióxido de titanio (TiO_2) y metacaolín (MK), con énfasis en los efectos de cada aditivo sobre las propiedades funcionales y estéticas de los morteros. La investigación aporta datos comparativos

sobre la eficacia de estas mezclas, destacando su potencial para mejorar la durabilidad y reducir las necesidades de mantenimiento en aplicaciones expuestas a agentes contaminantes.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de morteros de cal que contienen metacaolín (MK) y dióxido de titanio (TiO₂) en términos de capacidad autolimpiante y resistencia a la compresión. Para ello, se prepararon seis composiciones de mortero con diferentes contenidos de TiO₂ y MK, como se describe a continuación.

2.1 Materiales

Para el desarrollo del programa experimental de esta investigación, se produjeron morteros de arena y cal sin adición de TiO₂ y con adiciones de 5% y 10% de TiO₂, en relación con la masa de cal. También se evaluó la incorporación de metacaolín en las mezclas, en contenidos de 5% y 10%. Las composiciones analizadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Composiciones de los morteros.

Identificación del mortero	Dosificación utilizada				Relación A/C
	Cal	MK	Arena	TiO ₂	
A01	1	-	4	-	0,9
A02	1	-	4	0,05	0,9
A03	1	-	4	0,10	0,9
A04	0,85	0,15	4	-	0,9
A05	0,85	0,15	4	0,05	0,9
A06	0,85	0,15	4	0,10	0,9

La Figura 1 muestra el aspecto de cada una de las mezclas en estado fresco. Los morteros adquirieron una tonalidad visiblemente más blanca a medida que aumentó el contenido de TiO₂.

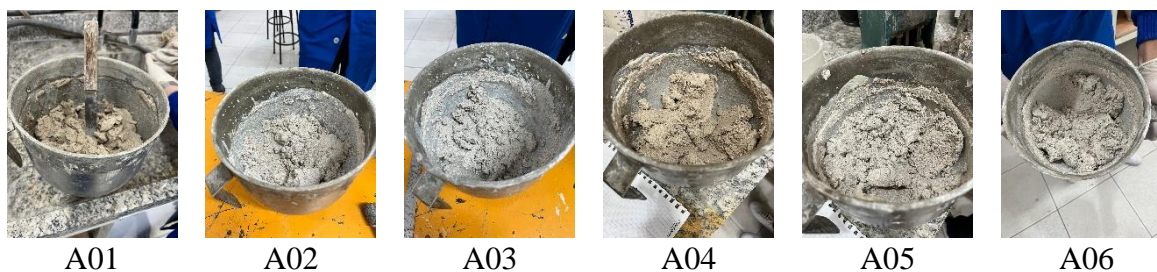


Figura 1. Mezclas en estado fresco.

2.2 Preparación de los morteros y moldeo de los especímenes.

El proceso de mezclado se realizó con una mezcladora de mortero de banco, respetando siempre la misma secuencia de mezcla, de acuerdo con lo indicado en la NBR 7215 (ABNT, 1996).

Después del mezclado, se realizó el ensayo de consistencia de acuerdo con la NBR 13276 (ABNT, 2016), con el fin de evaluar la trabajabilidad y la fluidez de los morteros a partir de la medición de su extensión.

A continuación, se moldearon especímenes de 4 × 4 × 4 cm para la evaluación de la resistencia a la compresión. Para este ensayo se prepararon seis especímenes para cada tipo de mortero.

La evaluación de la autolimpieza se realizó mediante placas de mortero de $10 \times 10 \times 2.5$ cm, habiéndose moldeado una placa por cada dosificación, para un total de seis placas. Se reconoce que este enfoque, aunque proporciona datos cuantitativos sobre la variación de color, presenta limitaciones en cuanto a la representatividad estadística por utilizar una sola muestra por formulación. Los resultados deben interpretarse considerando esta limitación metodológica. El proceso de mezclado y moldeo siguió las siguientes etapas:

1. Los especímenes se moldearon en dos capas, y cada capa se compactó con 20 golpes utilizando un pisón manual, garantizando una buena distribución del material;
2. Después del moldeo, los especímenes fueron curados durante 28 días en un ambiente con temperatura y humedad controladas.

2.3 Métodos de evaluación.

2.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión se evaluó de acuerdo con los procedimientos descritos en la NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando una prensa hidráulica de la marca *Emic*, con capacidad de carga de 220 kN.

2.3.2 Evaluación de la autolimpieza.

Para la evaluación de la autolimpieza, los morteros fueron expuestos a la intemperie natural, orientados hacia el este, en las ciudades de Canoas (muestras con $MK + TiO_2$) y Montauri (muestras solo con TiO_2), ambas en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil, pero con microclimas diferentes en relación con la contaminación ambiental. La distribución de las muestras entre los dos lugares se definió priorizando la evaluación de diferentes formulaciones en condiciones climáticas distintas, con el fin de maximizar la diversidad de ambientes de exposición con el número disponible de muestras. Canoas es un municipio con 347,657 habitantes (IBGE, 2022 (01)), perteneciente a la región metropolitana del estado, por lo que presenta mayores niveles de contaminación atmosférica. Montauri es un municipio con 1,499 habitantes (IBGE, 2022 (02)), ubicado aproximadamente a 200 km de Porto Alegre, y su microclima se asemeja al de una zona rural (Figura 2).

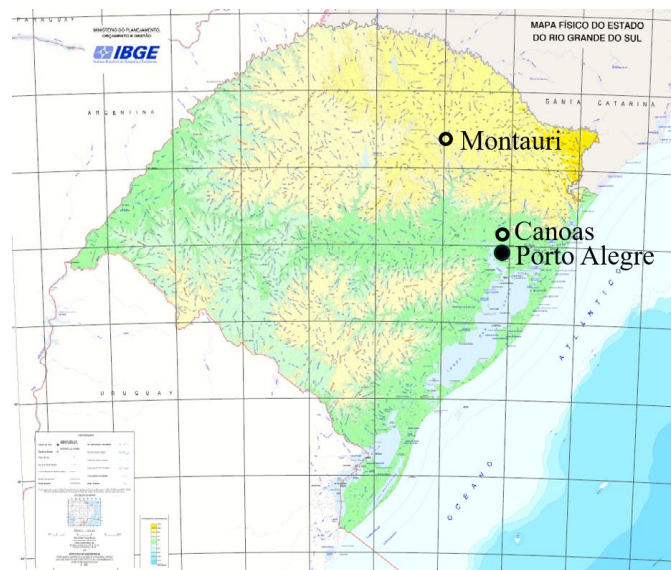


Figura 2. Ciudades donde se expusieron las muestras
Fuente: IBGE, 2010

Antes de la exposición a los respectivos microclimas, las muestras recibieron los siguientes agentes manchantes, como se muestra en la Figura 3:

- Vino tinto (1);
- Aceite de oliva (2);
- Ceniza de carbón (3);
- Óxido/herrumbre (esponja de acero humedecida) (4).
-

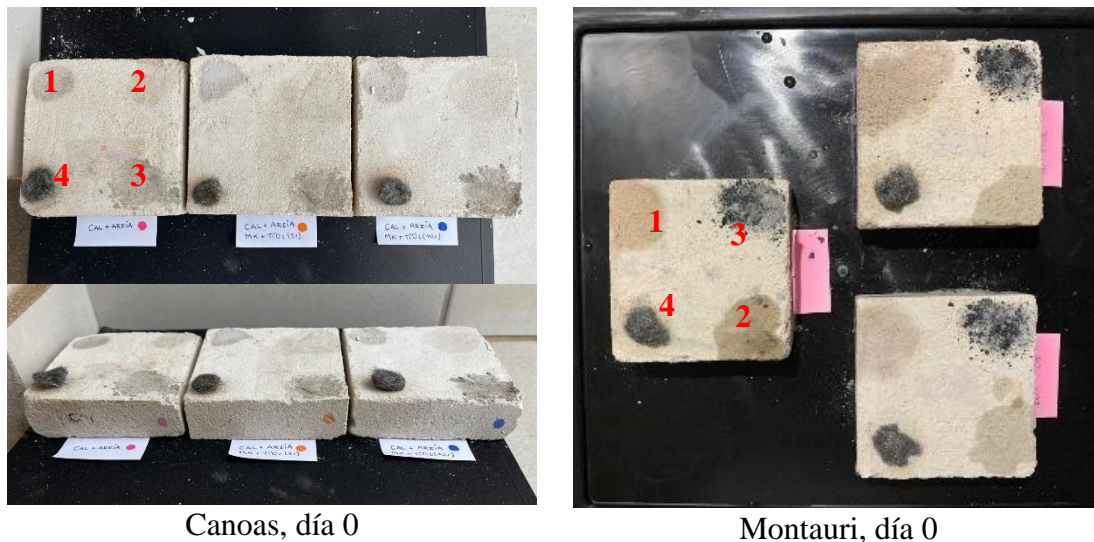


Figura 3. Manchado de las muestras.

La exposición climática tuvo una duración de 50 días, y las muestras fueron monitoreadas semanalmente mediante registro fotográfico. Después de ese período, se realizó la evaluación del color mediante un espectrofotómetro portátil, modelo CM-500d, de la marca *Minolta*. El espectrofotómetro se utilizó para la caracterización colorimétrica, mediante la lectura de las muestras y con ayuda del software *Cyberchrome OnColor* (Austria, 2015), que detecta y compila cuantitativamente los datos generados para su posterior análisis e interpretación.

La lectura de la variación de color (suciedad) de las muestras de este estudio se realizó siguiendo el sistema *Lab**, que se basa en una escala que considera que los colores son combinaciones de tres tipos de receptores cromáticos: rojo, amarillo y azul. En esta escala, los resultados obtenidos en el espectrofotómetro indican:

- L^* : luminosidad
- a^* : coordenada rojo/verde
- b^* : coordenada amarillo/azul

3. RESULTADOS

3.1 Evaluación de la consistencia de las mezclas

Las Figuras 4 y 5 presentan los valores medios de extensión medidos para los morteros en el ensayo de consistencia; también pueden observarse los aspectos de las mezclas antes y después del ensayo.

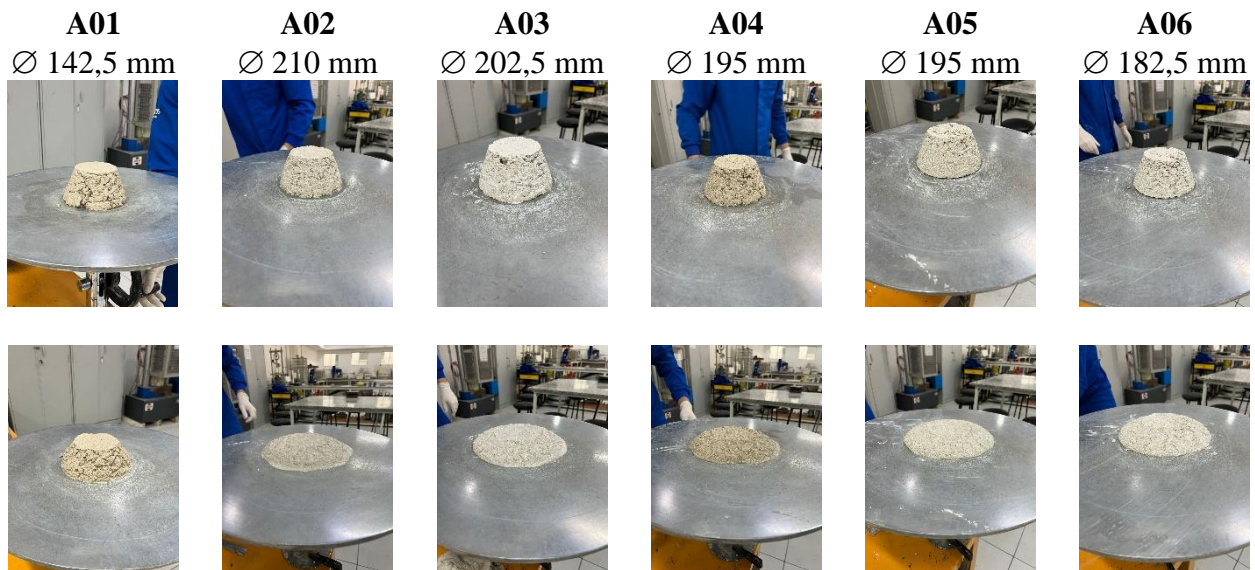


Figura 4. Ensayo de consistencia.

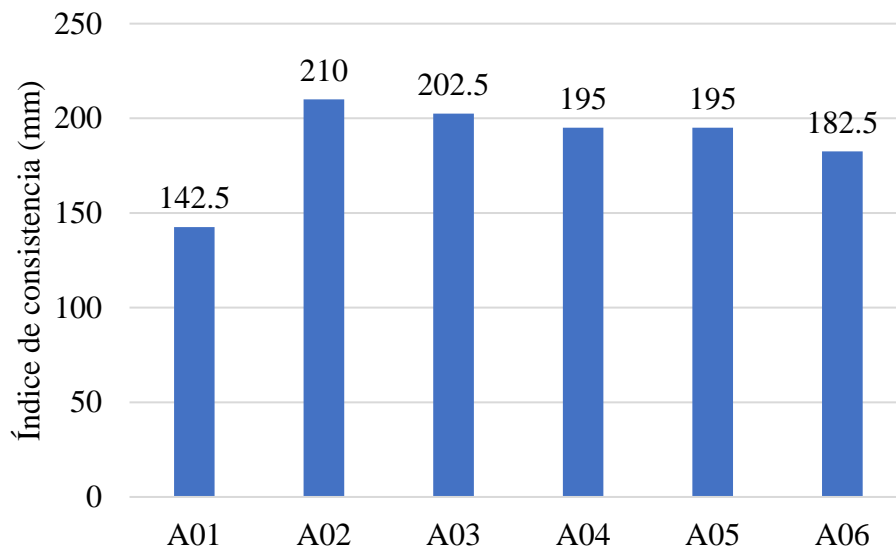


Figura 5. Resultados del ensayo de consistencia.

En general, se observó poca variabilidad en el índice de consistencia entre los diferentes morteros. Sin embargo, como la relación agua/aglomerante (a/c) se mantuvo fija, la adición de MK y TiO₂ condujo a una reducción de este parámetro.

3.2 Resistencia a la compresión.

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó a los 28 días, y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2 y la Figura 6. Se observa que las resistencias a la compresión fueron, en promedio, mayores en los morteros 01, 02 y 03 que en los morteros 04, 05 y 06. En las mezclas 01, 02 y 03 se utilizó una mayor cantidad de cal que en las demás muestras. Aunque el metacaolín mejora las propiedades mecánicas, su efecto puzolánico se vuelve más evidente a edades más avanzadas, particularmente después de los 28 días (Cruz et al., 2019). Por ello, futuros estudios deberían incluir evaluaciones a edades más avanzadas para comprender mejor la contribución conjunta del metacaolín y el TiO₂ a las propiedades de los morteros. Mattos y Gonçalves (2019),

por ejemplo, demostraron que el MK contribuyó a mejorar la resistencia a la compresión de morteros de cal solo a los 180 días.

Tabla 2. Resistencia a la compresión.

Mezcla	Tensión media (MPa)	Desviación estándar
A01	0,31	0,023
A02	0,32	0,039
A03	0,30	0,013
A04	0,26	0,025
A05	0,24	0,031
A06	0,29	0,021

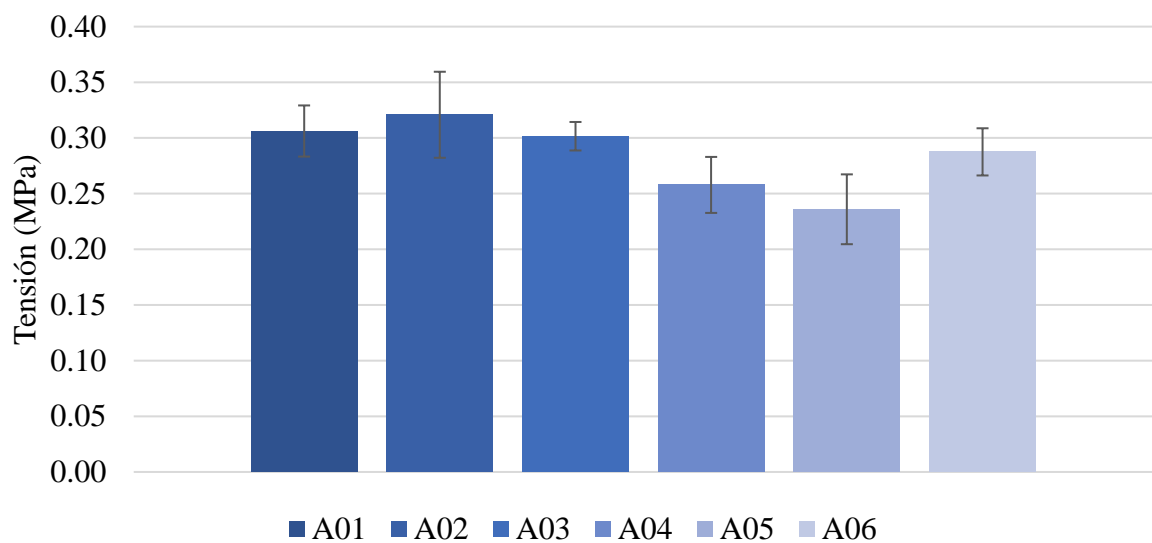


Figura 6. Resistencia a la compresión de las muestras

Los resultados indican que los valores de resistencia obtenidos fueron bajos, lo cual era esperable considerando los aglomerantes empleados. La cal es un aglomerante con menor potencial de desarrollo de resistencia; en el estudio de Mattos y Gonçalves (2019), los autores obtuvieron resistencias similares para morteros de cal y MK a los 28 días, del orden de 0.4 MPa.

Según Hatori et al. (2023), el TiO_2 también mejora la resistencia mecánica de los morteros cuando se incorpora. En el presente estudio, la resistencia a la compresión del mortero 02 fue mayor que la del mortero 01 con la sola inclusión de 5% de TiO_2 ; sin embargo, no se observó un aumento de resistencia en los morteros con 10% de TiO_2 (mortero 03). De acuerdo con Bersch (2021), este comportamiento puede explicarse por la elevada cohesión del material debido a la presencia de finos, que posiblemente atrapan vacíos. Un resultado similar se observó en las muestras con adición de MK.

3.3 Evaluación de la autolimpieza

Durante el período de exposición de los morteros se realizó un seguimiento fotográfico semanal, el cual se presenta en la Figura 7.



Canoas, día 01



Montauri, día 01



Canoas, día 08



Montauri, día 08



Canoas, día 15



Montauri, día 15



Canoas, día 22



Montauri, día 22



Canoas, día 29



Montauri, día 29



Canoas, día 36



Montauri, día 36



Canoas, día 43



Montauri, día 43



Canoas, día 50



Montauri, día 50

Figura 7. Seguimiento fotográfico de las muestras manchadas

Como se observa en la Figura 7, todas las muestras presentaron algún grado de autolimpieza a lo largo del período de exposición. Aunque la inspección visual puede sugerir que las muestras de referencia (A01 y A04) presentaron menor alteración de color, es importante considerar los datos de variación de color (ΔE) presentados en la Figura 9. El análisis colorimétrico detecta diferencias que no son perceptibles visualmente, y los resultados indican que los morteros con TiO_2 tendieron a volver a un color más próximo al original. Este efecto fotocatalítico tiende a intensificarse con el tiempo de exposición, lo que sugiere que el beneficio de la autolimpieza puede hacerse más

evidente a largo plazo. El análisis estadístico (ANOVA), presentado en la Figura 10, confirma la influencia del TiO₂ sobre la variación de color. En cuanto a los agentes manchantes utilizados, en general se observó una mayor reducción de la suciedad provocada por el vino tinto y el aceite de oliva, mientras que persistieron residuos más marcados de ceniza de carbón y herrumbre. La mancha de herrumbre fue la que presentó mayor dificultad de autolimpieza, dejando una marca más evidente que los demás productos aplicados.

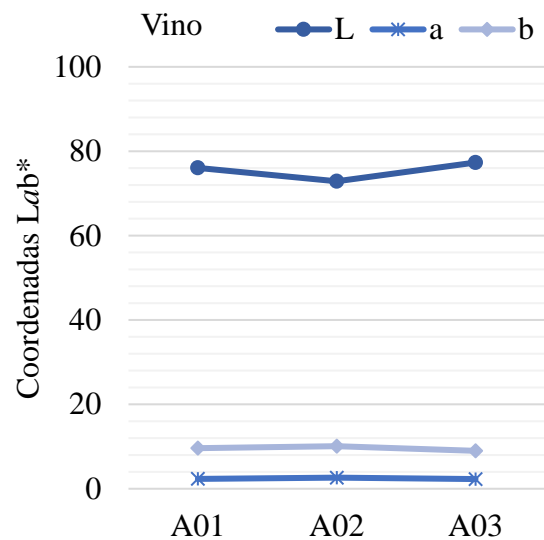
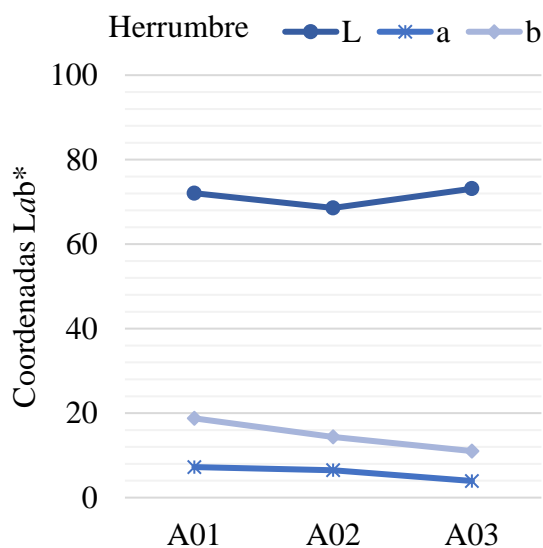
Después del período de exposición, se realizaron mediciones de la variación de color con el uso del espectrofotómetro en los cuatro puntos donde ocurrió el manchado en los especímenes. El equipo realiza tres mediciones por punto, y los resultados aquí presentados corresponden al promedio de esas tres mediciones (Tablas 3 y 4), realizadas en los lugares identificados como más representativos de cada mancha. La Figura 8 presenta los valores medios de los resultados del sistema Lab*, separados entre las muestras A01 a A03 y A04 a A06, de modo que sea posible seguir la evolución de la autolimpieza de cada dosificación al añadirse diferentes cantidades de TiO₂. La presentación gráfica de estos resultados ofrece una visualización más clara de las tendencias y comparaciones entre los agentes manchantes.

Tabla 3. Coordenadas del sistema Lab* de los especímenes expuestos en Montauri.

Muestra	Herrumbre			Vino			Aceite			Carbón		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
A01	72,05	7,23	18,77	76,05	2,34	9,62	73,67	2,24	11,44	68,73	1,53	6,34
A02	68,57	6,49	14,37	72,87	2,63	10,08	75,27	3,07	11,64	61,40	1,21	4,46
A03	73,12	3,94	11,02	77,32	2,29	8,98	76,72	2,44	10,03	69,70	1,07	4,61

Tabla 4. Coordenadas del sistema Lab* de los especímenes expuestos en Canoas.

Muestra	Herrumbre			Vino			Aceite			Carbón		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
A04	73,18	2,88	12,24	75,74	2,72	10,95	76,64	2,82	10,80	73,07	2,44	10,62
A05	70,37	8,11	20,94	65,26	2,10	8,62	77,83	2,01	9,13	80,29	1,68	7,88
A06	74,14	5,29	14,80	77,16	1,49	7,74	74,60	1,51	7,28	79,03	1,75	7,89



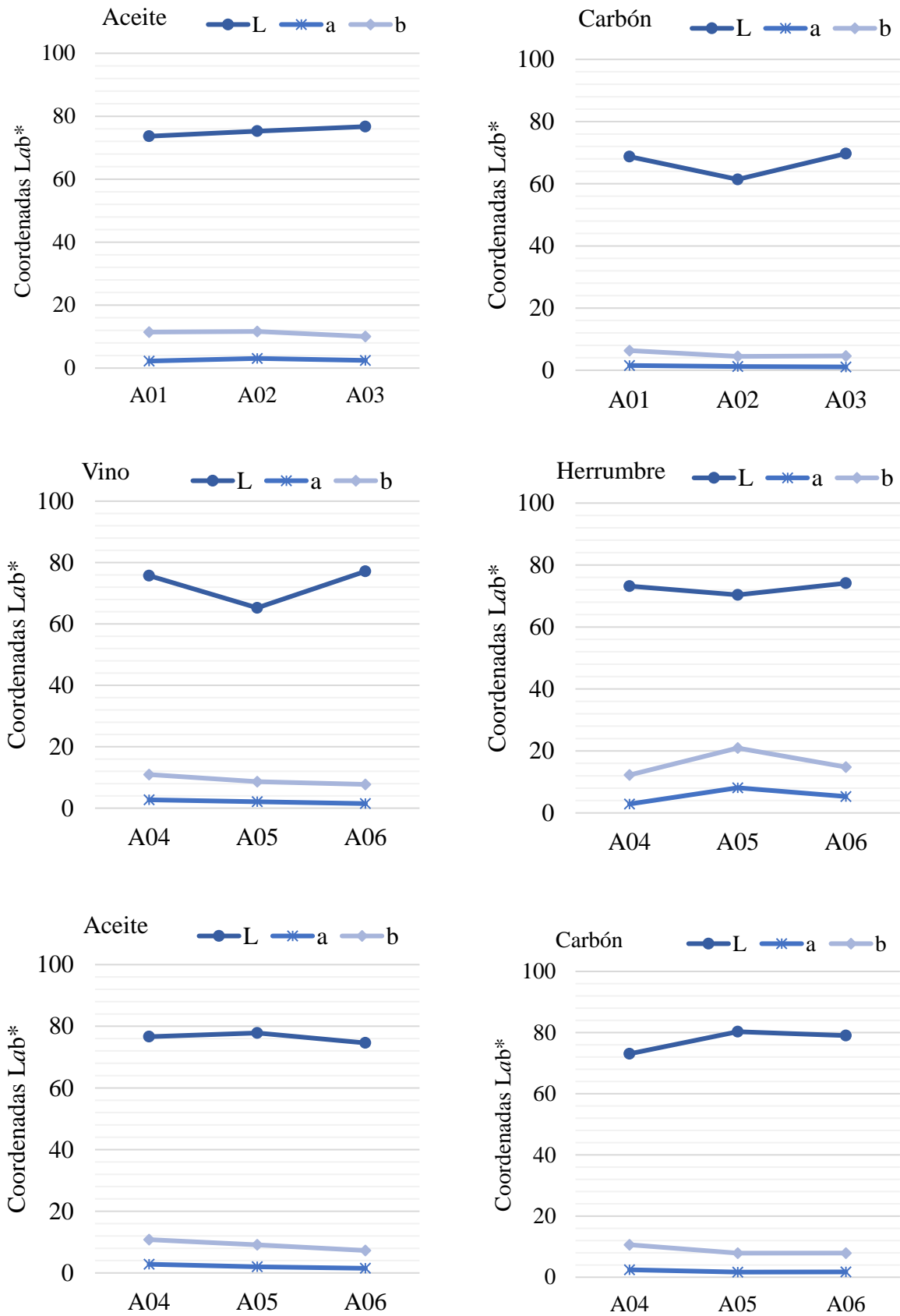


Figura 8. Resultados del sistema Lab*.

La Figura 8 muestra que, en general, los resultados presentaron valores relativamente similares entre sí. En relación con L*, por ejemplo, que mide la escala de luminosidad entre el blanco y el negro, se observó una tendencia hacia el blanco en los morteros con TiO₂.

Para analizar la diferencia de color entre los morteros según la cantidad de TiO₂, se evaluaron los valores medios de variación de color (ΔE), comparándolos con su mortero de referencia sin TiO₂; es decir, los valores de A02 y A03 se evaluaron en relación con A01, y el mismo procedimiento se aplicó a A05 y A06 en comparación con A04 (Figura 9).

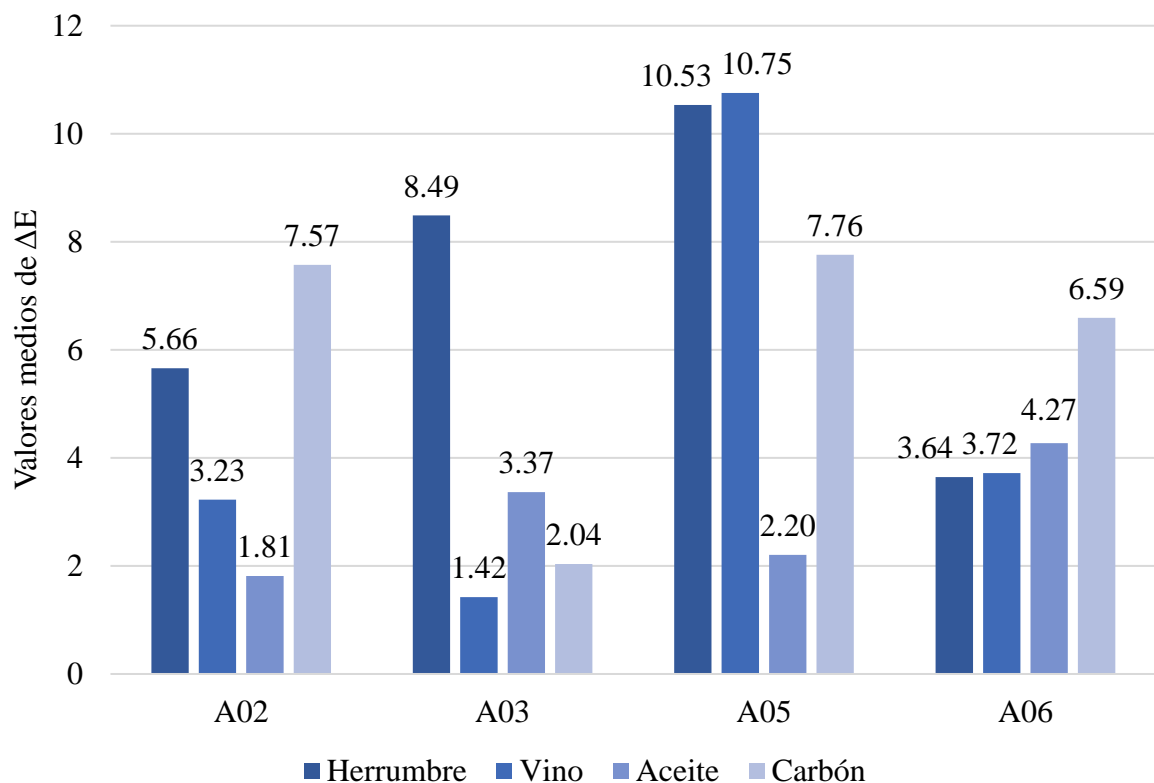


Figura 9. Variación de color (ΔE).

Considerando los ocho escenarios evaluados, puede observarse una mayor tendencia hacia el blanco a medida que aumenta la cantidad de TiO₂; en otras palabras, los morteros se volvieron más similares a la muestra de referencia sin adición de TiO₂.

La Tabla 5 y la Figura 10 presentan el análisis de varianza (ANOVA) para la influencia del contenido de TiO₂ y del tipo de mancha sobre las muestras.

Tabla 5. Análisis de varianza (ANOVA).

Efecto	SS	Grados de libertad	MS	F	p
TiO ₂	102,2103	2	51,1052	6,24599	0,023229
Mancha	19,1208	3	6,3736	0,77897	0,538002
TiO ₂ *mancha	29,8537	6	4,9756	0,60811	0,719443
Error	65,4566	8	8,1821	-	-

SS=Suma de cuadrados; MS=Cuadrados medios; F=Estadístico F; p=Probabilidad.

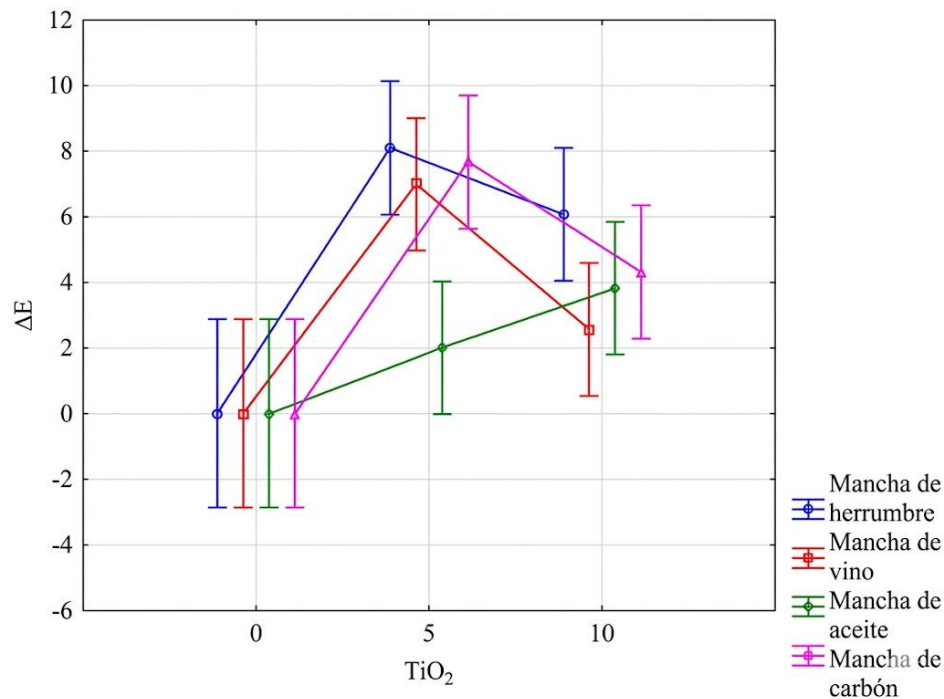


Figura 10. ANOVA para el efecto de la interacción entre el contenido de TiO₂ y el tipo de mancha.

Se aplicó un análisis factorial de varianza (Two-Way ANOVA) para evaluar los efectos del TiO₂ y del tipo de mancha sobre la variación de color (ΔE) después de la exposición a la intemperie natural. Los resultados mostraron que solo la presencia de TiO₂ tuvo un efecto estadísticamente significativo ($p = 0.0232$), mientras que el tipo de mancha ($p = 0.5380$) y la interacción entre TiO₂ y mancha ($p = 0.7194$) no fueron significativos. Estos resultados indican que la variación de color estuvo gobernada por el contenido de TiO₂, independientemente del agente manchante. El gráfico de interacción (Figura 10) respalda esta interpretación, mostrando un aumento marcado de ΔE entre 0% y 5% de TiO₂, con un comportamiento similar entre los diferentes tipos de mancha y sin cruces pronunciados entre las curvas.

En cuanto al efecto del microclima de exposición, ambos ambientes fueron subtropicales y presentaron variaciones estacionales marcadas, aunque con diferentes niveles de contaminación. Canoas fue más contaminada por estar ubicada en la región metropolitana, mientras que Montauri fue menos contaminada por ser rural. Esto fue evidente en el análisis visual (Figura 7), que mostró una autolimpieza más rápida y con menos residuos en Montauri.

En este estudio, las muestras comenzaron a exponerse a los 28 días de edad, reconociéndose que el proceso de curado continúa durante la exposición a los ambientes de ensayo. Por ello, futuros estudios deberían evaluar edades más avanzadas para verificar si el efecto catalítico del TiO₂ se vuelve más eficiente.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indican que la resistencia a la compresión de los especímenes fue mayor en los morteros con mayor contenido de cal. Por lo tanto, los efectos asociados a la presencia de metacaolín no pudieron observarse dentro del período de evaluación de resistencia adoptado en esta investigación (28 días).

La adición de TiO₂ mejoró la resistencia mecánica a la compresión, especialmente en las muestras sin MK, y también mejoró el desempeño autolimpiante, como fue confirmado por el análisis de

varianza de los resultados de variación de color (ΔE). Por otro lado, el tipo de mancha no afectó significativamente los resultados, lo que indica que el desempeño autolimpiante está más estrechamente relacionado con la composición del material que con el agente de suciedad.

Se observó poca variación en el índice de consistencia entre las mezclas; sin embargo, se identificó una disminución de este parámetro cuando se añadieron metacaolín y TiO_2 .

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con el apoyo de la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. REFERENCIAS

- Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2011), *Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries*. Applied Clay Science. v. 53, n. 1, p. 15-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (1996). *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2005), *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- Austria, G. C. (2015), “*Argamassa autolimpante para revestimento de fachadas: o efeito das propriedades fotocatalíticas do dióxido de titânio (TiO_2)*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 173.
- Bersch, J. D. (2021), “*Atividades fotocatalítica e autolimpeza de argamassas pigmentadas contendo dióxido de titânio (TiO_2)*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 325.
- Bhagyamma, G., Panchangam, S. C., Rao H, S. (2023), *Development of self-cleaning cement mortar exposed to indoor and outdoor environment*. Materials Today: Proceedings. p. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.215>.
- Cruz, J. S., Oliveira, F. M. C., Carneiro, A. M. P. (2019). “*A relação entre a resistência mecânica à compressão, o coeficiente de capilaridade, e a variação de massa das argamassas mistas de cal e metacaolím*” em: XIII Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, Goiânia (Brasil), pp. 812-821.
- Daniyal, M., Akhtar, S., Azam, A. (2019), *Effect of nano- TiO_2 on the properties of cementitious composites under different exposure environments*. Journal Of Materials Research and Technology. v. 8, n. 6, p. 6158-6172. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.010>.
- Gutiérrez, R. M., Villaquirán-Caicedo, M. A., Guzmán-Aponte, L. A. (2020), *Alkali-activated metakaolin mortars using glass waste as fine aggregate: mechanical and photocatalytic properties*. Construction And Building Materials. v. 235, p. 117510. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117510>.
- Hatori, A., Giordani, C., Casarin, R. P., Guerra, F. L., Masuero, A. B. (2023). “*Avaliação das propriedades mecânicas e de absorção de água de argamassas com adição de dióxido de titânio*” em: XIV Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, João Pessoa (Brasil), pp. 1-9.
- IBGE (1). Cidades e estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/canoas.html>. 2022. Acesso em: 02 dez. 2024.

- IBGE (2). Cidades e estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/montauri.html>. 2022. Acesso em: 02 dez. 2024.
- IBGE. Mapas físicos dos estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-estaduais/15977-mapas-fisicos-dos-estados.html?edicao=16197&t=downloads>. 2010. Acesso em: 01 dez. 2024.
- Lara, R. C., Xavier, G. C.; Canela, M. C., Carvalho, J. A., Alexandre, J., Azevedo, A. R. G. (2023), *Characterization and photocatalytic performance of cement mortars with incorporation of TiO₂ and mineral admixtures*. Environmental Science and Pollution Research. v. 30, n. 42, p. 95537-95549. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29084-6>.
- Mattos, F. C., Gonçalves, M. R. F. (2019), *Argamassas de cal e metacaolím: influência das condições de cura*. Matéria (Rio de Janeiro). v. 24, n. 4, p. 1-10. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0857>.
- Pozo-Antonio, J. S., Dionísio, A. (2017), *Self-cleaning property of mortars with TiO₂ addition using real diesel exhaust soot*. Journal Of Cleaner Production. v. 161, p. 850-859. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.202>.
- Ramadan, M., Kohail, M., Abadel, A. A., Alharbi, Y. R., Soliman, A. M., Mohsen, A. (2023), *Exploration of mechanical performance, porous structure, and self-cleaning behavior for hydrothermally cured sustainable cementitious composites containing de-aluminated metakaolin waste and TiO₂ nanoparticles*. Journal Of Materials Research and Technology. v. 25, p. 3998-4019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.224>.
- Saeli, M., Tobaldi, D. M., Rozman, N.; Skapin, A. S., Labrincha, J. A., Pullar, R. C. (2017), *Photocatalytic nano-composite architectural lime mortar for degradation of urban pollutants under solar and visible (interior) light*. Construction And Building Materials. v. 152, p. 206-213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.167>.