

Estudio de factibilidad técnica del uso de lodo residual de marmolería en mezclas cementicias

F. P. Weinsziehr^a, C. J. Zega^{a,b*}, S. A. Marfil^c y F. Locati^{b,d}

^aLaboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CICpBA), CP 1900, La Plata, Argentina, hormigones@lemit.gov.ar, cj.zega@conicet.gov.ar

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CP 1425, CABA, Argentina,

^cDepartamento de Geología – Universidad Nacional del Sur (UNS), CGAMA (CIC-UNS), CP 8000, Bahía Blanca, Argentina, smarfil@uns.edu.ar

^dCentro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA, CONICET – UNC), Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba (FI-UCC), CP 5000, Córdoba, Argentina, flocati@unc.edu.ar

Recibido: 15 de julio de 2026

Aceptado: 24 de septiembre de 2026

RESUMEN

Este estudio explora la valorización preliminar de un lodo residual generado en el corte y pulido de rocas ornamentales como material cementicio suplementario, luego de aplicar un proceso de secado y disgregación. La investigación evalúa la factibilidad técnica de sustituir parcialmente el cemento pórtland por este residuo mineral en la elaboración de pastas y morteros, analizando sus propiedades en estado fresco y endurecido. Se examinan diversos niveles de reemplazo para determinar cómo la finura y la naturaleza inerte del residuo afectan la reología, los tiempos de fraguado y la evolución de la resistencia mecánica a distintas edades. El material en estudio muestra características compatibles con rocas de composición granítica, afectando ligeramente los tiempos de fraguado y la fluidez de las mezclas en estado fresco. Se identifica un rango de sustitución óptimo que permite reducir el contenido de cemento sin comprometer las prestaciones estructurales. El lodo de procesamiento de rocas ornamentales resulta entonces un material viable para el desarrollo de materiales eco-eficientes de base cementicia, al mismo tiempo que ofrece una solución sostenible para la disposición final de este residuo.

PALABRAS CLAVE: Lodo de marmolería, material cementicio suplementario, mortero, propiedades mecánicas, sostenibilidad

ABSTRACT

This research explores the preliminary valorization of residual sludge from the cutting and polishing of ornamental rocks as supplementary cementitious material after drying and disintegration. The study assesses the technical feasibility of partially replacing Portland cement with this mineral waste in the production of pastes and mortars, analyzing properties in the fresh and hardened states. Various replacement levels are examined to determine how the high fineness and inert character of the residue affect the rheology, the setting time, and the mechanical strength development at different ages. The material under study shows characteristics compatible with rocks of granitic composition, slightly affecting the setting times and the fluidity of the mixtures in the fresh state. An optimal replacement range is identified, allowing cement content to be reduced without compromising structural performance. Ornamental stone processing sludge therefore emerges as a viable material for eco-efficient cement-based materials and a sustainable solution for waste disposal.

KEYWORDS: Stone processing sludge, supplementary cementitious material, mortar, mechanical properties, sustainability

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Weinsziehr, F. P., Zega, C. J., Marfil, S.A., y Locati, F. (2027). Estudio de factibilidad técnica del uso de lodo residual de marmolería en mezclas cementicias. *Revista Hormigón*, 71, en prensa. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/6rffq3ekj>

1. Introducción

En el contexto actual de la industria de la construcción, la sostenibilidad se ha transformado en un pilar fundamental para el desarrollo de nuevos materiales. Es ampliamente reconocido que la fabricación de clínker es responsable de una parte significativa de las emisiones globales de CO₂, producto tanto del consumo energético como de la descarbonatación de las materias primas durante la calcinación [1,2]. Es por ello que, en base a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2030 [3], resulta imperativo implementar prácticas que reduzcan el impacto ambiental asociado a la producción de cemento pórtland.

La incorporación de diversos materiales cementicios suplementarios (MCS), como contribución a dicho beneficio ambiental, ha sido objeto de variadas investigaciones que destacan su capacidad para modificar las propiedades de las mezclas [4-6]. No obstante, el uso de polvos minerales provenientes de residuos industriales específicos requiere un análisis detallado, ya que factores tales como la distribución de tamaño de partícula y la superficie específica pueden alterar significativamente las propiedades de las mezclas en las que se empleen [7].

En este sentido, el corte y pulido de rocas ornamentales genera un lodo residual que termina convirtiéndose en un residuo pulverulento fino. No se han encontrado datos oficiales a nivel nacional sobre los volúmenes de residuo generado por el sector. A nivel internacional los volúmenes generados en el procesamiento de rocas pueden alcanzar las 700.000 tn/año [8]. Este material es habitualmente descartado como un residuo sólido, representando un desafío logístico y ambiental para las plantas de procesamiento [9,10]. Sin embargo, su origen mineralógico y su elevada finura lo posicionan como un candidato óptimo para ser valorizado dentro de la economía circular de la construcción.

A diferencia de otros residuos, que requieren procesos de molienda intensivos para alcanzar

una finura adecuada [11,12], el polvo de marmolería suele presentar un diámetro de partícula que facilita su inclusión directa como sustituto parcial del cemento [13,14]. Al tratarse de un material mayoritariamente inerte y con partículas de tamaño reducido, puede actuar como filler dentro de las matrices cementicias, favoreciendo el empaquetamiento granular de la mezcla, reduciendo la porosidad y mejorando la interfase entre los componentes [15,16]. Evaluar su desempeño en pastas y morteros es el primer paso para determinar su viabilidad técnica en aplicaciones estructurales o de infraestructura.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar preliminarmente la factibilidad técnica del uso de polvo proveniente del lodo residual del corte y pulido de rocas ornamentales como reemplazo parcial del cemento pórtland. Para ello, se realizó la caracterización física del material y se analizó su impacto en la consistencia de las mezclas en estado fresco, así como en la evolución de la resistencia a la compresión.

2. Experiencias

2.1 Materiales y métodos

Se empleó cemento pórtland normal (CP), arena silíceo natural (densidad: 2,65 g/cm³, absorción: 0,3 %, módulo de finura: 1,85) y polvo de marmolería (PM) obtenido del lodo residual que se genera debido al corte de rocas, provisto por una marmolería de la ciudad de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires). Cabe señalar que en la elaboración de los morteros no se utilizó arena normalizada [21] debido a que no hay disponible. En su reemplazo se empleó la arena silíceo natural mencionada. El volumen de lodo generado por dicha marmolería es de aproximadamente 25 a 30 m³ por mes, equivalente a unas 45 tn de lodo semiseco. Debido a que el proceso de corte utiliza una cortadora de hilo diamantado (o telar de hilo), cuyo elemento de corte es un

cable de acero con "perlas" de diamante industrial incrustadas, se inyecta agua constantemente para refrigerar el cable y arrastrar el polvo, generando un residuo líquido. Para permitir la reutilización del agua, el residuo líquido es transportado a tanques de sedimentación o decantación. Por gravedad, el material sólido se deposita en el fondo, formándose un lodo grisáceo o blanquecino comúnmente llamado lodo de mármol o *slurry*, mientras que el agua limpia permite ser bombeada e incorporada nuevamente en el circuito.

A partir de una muestra del lodo (Figura 1a), se procedió a secarla en estufa a 105 °C durante 24 horas para eliminar el contenido de humedad, hecho que originó la formación de terrones compactos (Figura 1b). Debido a ello, el material seco se sometió a un proceso de disgregación mecánica mediante un molino de bolas, durante 10 minutos, empleando una relación 1:2 de material con respecto a los cylpebs (Figura 1c). Se consideró que el tiempo transcurrido en la disgregación del material está lejos de producir modificación alguna en las características y tamaño de las partículas del polvo obtenido.

La caracterización del material en estudio consistió en la evaluación de su composición mineralógica, empleando un microscopio petrográfico Leica DM 750 P y un difractómetro de rayos X, Rigaku D Max III-C, operado a

35 kV y 15 mA, con radiación de CuK α (longitud de onda de 0,154060 nm) y monocromador de grafito en el haz secundario para eliminar la radiación CuK β . Los difractogramas fueron registrados en un rango entre 3° y 60° 2 θ , con un paso de 0,04° 2 θ y un tiempo de conteo de un segundo por paso. La composición química se determinó por fluorescencia de rayos X (FRX), en el Instituto de Geología y Minería de la UNJu. Se utilizó un espectrofotómetro dispersivo en longitudes de onda, con un tubo de anticátodo de Rh, Rigaku, modelo RIX2000, con una potencia del tubo de 3 Kw, con los siguientes cristales analizadores: LiF, PET, TAP, Ge y ADP. Además, se determinó la densidad, empleando kerosene anhidro y el volumenómetro de Le Chatelier, el contenido de material que pasa los tamices IRAM 75 μ m [17] y 45 μ m [18] (vía húmeda) y la distribución de tamaño de partículas mediante un difractómetro láser HORIBA LA-950V2, operado en un rango de medición de 0,01 μ m a 3000 μ m, con un índice de refracción de 1,54.

Se elaboraron pastas con distintos contenidos de PM como reemplazo del cemento. En estado fresco, se evaluó la fluidez inmediatamente luego del mezclado mediante la valoración del extendido en el ensayo de *minislump* (dimensiones del cono: 57 mm de altura, 38 mm de base mayor y 19 mm de base

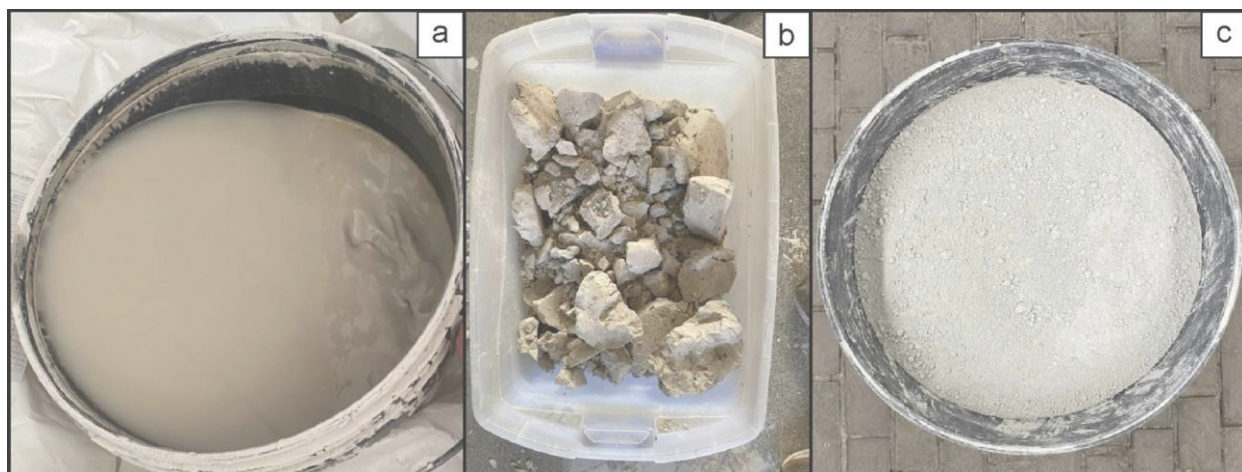


Figura 1. Proceso de tratamiento aplicado al lodo residual: a) lodo recuperado; b) terrones luego del proceso de secado; c) PM luego del proceso de disgregación.

menor), y el tiempo de fraguado [19] (IRAM 1619) en el cual las lecturas se realizaron cada 5 minutos al aproximarse el inicio y fin del fraguado. A nivel de mortero, se elaboraron empleando los mismos tenores de sustitución de CP por PM de las pastas, se moldearon y curaron según lo indicado en la norma IRAM 1622 [20]. Sobre los morteros en estado fresco se evaluó la influencia del contenido de PM sobre la fluidez mediante el ensayo de extendido en la mesa de fluidez [22] (ASTM C1437). Posteriormente, se moldearon probetas prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm para la determinación de la resistencia a compresión a edades de 2, 28 y 90 días.

2.2 Resultados y discusión

El material fue analizado con microscopio óptico sobre grano suelto para observar la morfología y composición. En la Figura 2a y 2b (visto con luz paralela y nicoles cruzados respectivamente) se observa que está constituido principalmente por cuarzo y feldespatos (levemente argilizados), con cantidades subordinadas de micas (principalmente biotita). Las partículas son irregulares (angulosas a subredondeadas) y el tamaño máximo es inferior a 100 μm .

Debido al reducido tamaño de grano se recurrió a difracción de rayos X (DRX) para la determinación de la composición mineralógica del PM. Los resultados se muestran en la Figura 3. Se identificaron cuarzo y feldespatos (plagioclasa y feldespato potásico) como fases predominantes, con micas subordinadas (biotita). Además, se observaron reflexiones de muy baja intensidad en 3,03 Å; 2,25 Å; 1,87 Å y 3,85 Å correspondientes a calcita.

Del análisis de los resultados de la composición mineralógica se concluye que los PM provienen mayoritariamente de la trituración de rocas de composición granítica y muy escasa cantidad de rocas calcáreas.

Los resultados de las propiedades físicas y la composición química se presentan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

El PM presentó una densidad acorde con la mayoría de las rocas que usualmente se procesan en la industria de la cual se obtuvo el material, siendo compatible con rocas graníticas. Con relación a la finura, los retenidos en los tamices de 75 μm y 45 μm para el PM resultaron algo superior (en el tamiz de 75 μm) e inferior (en el tamiz de 45 μm) en comparación con los valores obtenidos para el

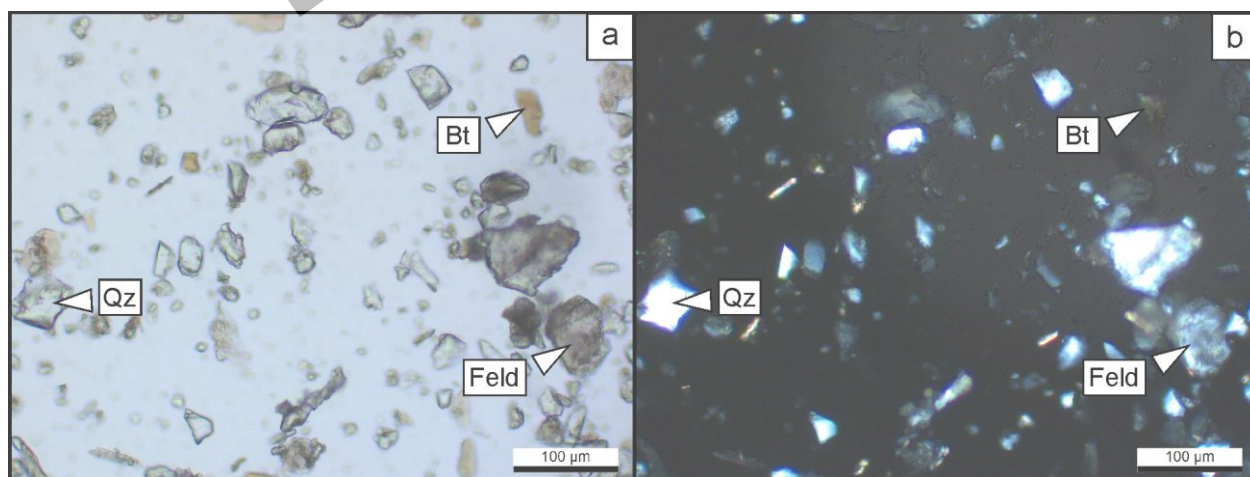


Figura 2. PM visto con microscopio óptico. a) con luz paralela. b) con nicoles cruzados. Bt: biotita, Feld: feldespato, Qz: cuarzo.

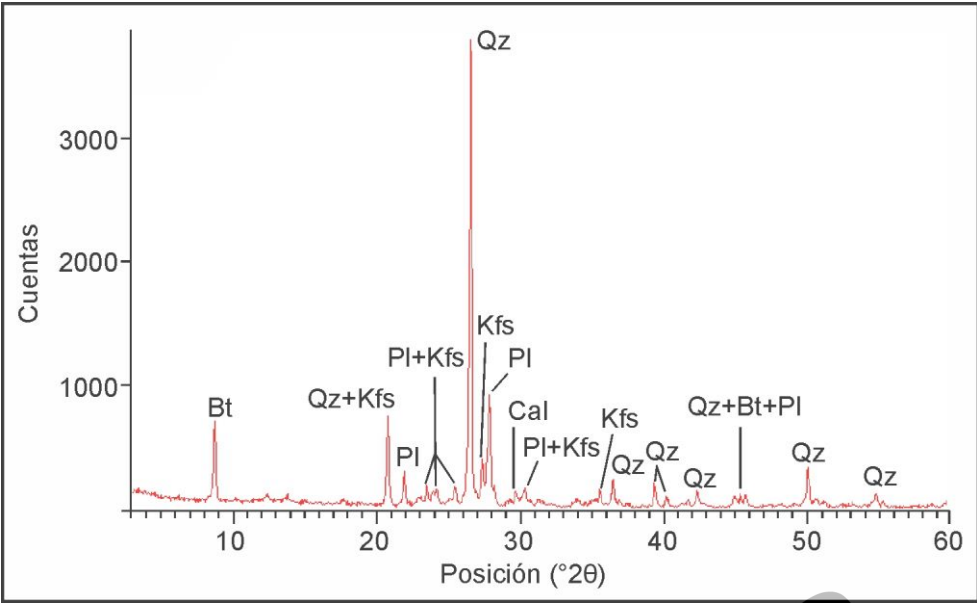


Figura 3. Difractograma del PM. Bt: biotita, Cal: calcita, Kfs: feldespato potásico, PI: plagioclasa, Qz: cuarzo.

Tabla 1. Propiedades físicas del CP y PM.

Propiedades físicas	CP	PM
Densidad (g/cm ³)	3,08	2,67
Retenido tamiz 75 µm (%)	1	6
Retenido tamiz 45 µm (%)	16	8
Superficie específica Blaine (m ² /kg)	320	600

Tabla 2. Composición química del CP y PM.

Composición química	CP	PM
SiO ₂ (%)	22,45	68,85
TiO ₂ (%)	0,25	0,42
Al ₂ O ₃ (%)	3,79	14,51
Fe ₂ O ₃ (%)	3,15	3,53
MnO (%)	0,15	0,08
MgO (%)	4,45	1,24
CaO (%)	63,22	1,89
Na ₂ O (%)	1,18	3,70
K ₂ O (%)	0,66	3,42
P ₂ O ₅ (%)	0,25	0,13
RI (%)	2,55	83,65
PxC (%)	3,15	1,50

PxC: pérdida por calcinación
RI: residuo insoluble

cemento empleado, mientras que la superficie específica Blaine resultó muy superior en el PM (del orden del 90 % superior a la del cemento). La composición química también es consistente con los tipos de roca que procesa la industria en cuestión (principalmente graníticas), caracterizadas por elevado contenido de sílice, alúmina, y álcalis (Na₂O y K₂O).

En la Figura 4 se muestra las curvas de distribución de tamaño de partículas del PM y del CP. Se puede observar que el PM presentó una finura algo mayor a la del cemento, adquiriendo los parámetros d₁₀, d₅₀ y d₉₀ (tamaño de partícula para porcentajes acumulados del 10 %, 50 % y 90 %, respectivamente) valores de 4,85 µm, 13,50 µm y 54,63 µm en el caso del PM y de 5,30 µm, 19,06 µm y 54,84 µm en el caso del CP. En dicha figura se puede apreciar que las distribuciones de tamaño de partículas del PM y CP se entrecruzan, evidenciando una finura algo mayor en el caso del PM. Estos resultados confirman su finura evidenciada en los otros ensayos, con un tamaño de partículas comparable al de un limo o filler industrial [23,24].

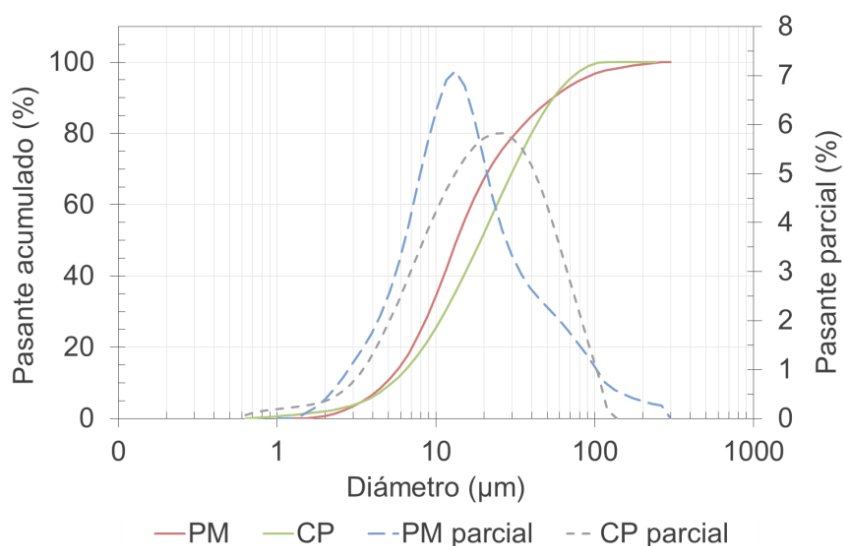


Figura 4. Distribución de tamaño de partículas.

Se elaboraron pastas empleando el PM como reemplazo parcial, en peso del cemento, en 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, denominadas PPM5, PPM10, PPM15, PPM20, respectivamente. Asimismo, se elaboró una pasta íntegramente con CP (PPM0) la cual se utilizó como patrón. En la Tabla 3 se presentan las proporciones de las pastas elaboradas.

En la Figura 5 se muestra el aspecto de cada una de las pastas luego del ensayo de extendido, apreciándose un aumento de la consistencia al aumentar el contenido de PM, sin segregación en ninguna de ellas. Los

valores del extendido final en cada pasta se presentan en la Figura 6. Puede observarse una relación inversamente proporcional entre el extendido y el porcentaje de PM utilizado, produciéndose una disminución de la fluidez del 5 % para la pasta con el menor porcentaje de sustitución, llegando a ser del 30 % al emplear 20 % de PM. La menor fluidez de las mezclas con PM podría atribuirse a la mayor finura Blaine que presentó el PM en comparación al CP. La mayor superficie específica del PM demandó más agua para la lubricación de las partículas, quedando menor disponibilidad para la movilidad de la mezcla.

Tabla 3. Proporciones de las mezclas (g).

Materiales	PPM0	PPM5	PPM10	PPM15	PPM20
Cemento	1900	1805	1710	1615	1520
PM	0	95	190	285	380
Agua	950	950	950	950	950

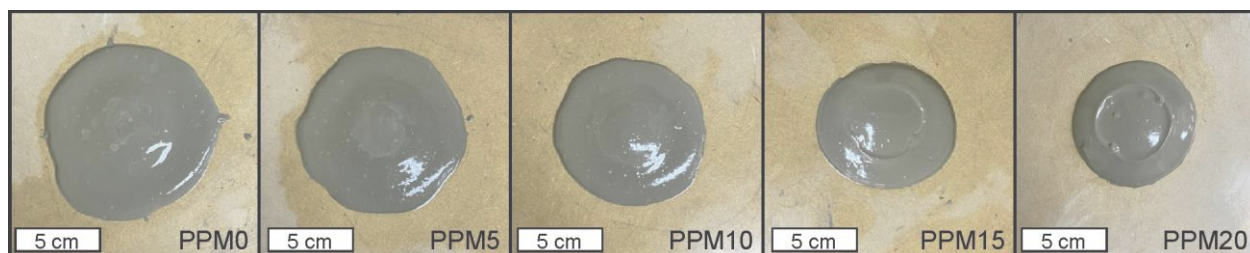


Figura 5. Aspecto de las pastas en el ensayo de extendido.

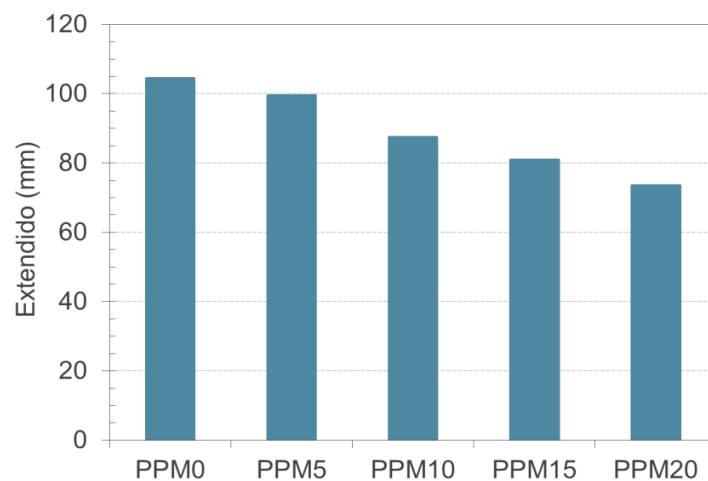


Figura 6. Extendido de las pastas en función del contenido de PM.

Resultados similares fueron reportados por otros autores empleando diferentes tipos de fillers en mezclas cementicias [25-27].

Para la evaluación de los tiempos de fraguado se siguió el procedimiento indicado en la Norma IRAM 1619 [19], para lo cual se determinó previamente la demanda de agua para la obtención de la consistencia normal para cada porcentaje de PM en estudio. En la Tabla 4 se presentan los valores obtenidos de la demanda de agua.

En la Figura 7 se observan los tiempos de fraguado inicial y final para cada porcentaje de PM. Se advierte un incremento progresivo en el tiempo de fraguado inicial con el contenido de PM, principalmente para el menor porcentaje de sustitución. La mezcla PPM0 comenzó a fraguar a los 145 minutos. A medida que se incrementó el porcentaje de PM, ese tiempo subió escalonadamente:

165 min (PPM5), 170 min (PPM10), alcanzando un pico de 175 min (PPM15), y descendiendo levemente para la pasta PPM20 (170 min), aunque dichas variaciones pudieron observarse debido a que el tiempo entre lecturas fue de 5 minutos (la norma indica cada 15 minutos). Estos resultados son consistentes con lo reportado en la bibliografía respecto al efecto de los MCS o residuos industriales [28-30], retardando la velocidad de hidratación inicial del cemento, ya sea diluyendo el contenido del mismo o interfiriendo químicamente en las primeras reacciones de los aluminatos. Por el contrario, el tiempo total para que la mezcla termine de fraguar no mostró una tendencia definida. Para las sustituciones más bajas, el tiempo de fraguado final tiende a disminuir hasta reemplazos del 10 % (pasando de 225 min para la PPM0 a 210 min), y la tendencia se revierte para los reemplazos mayores. En este caso también se observó que las diferencias en los tiempos de fraguado final se encontraron dentro del rango de 15 minutos indicado en la norma, por lo que dichas diferencias podrían considerarse despreciables. El efecto del PM sobre los tiempos de fraguado muestra una prevalencia del efecto dilución, incrementando el tiempo de fraguado inicial, pero al mismo tiempo se puede atribuir algún efecto filler, manifestado por una leve aceleración del tiempo final de fraguado para bajos porcentajes de sustitución.

Tabla 4. Demanda de agua en función del contenido de PM.

Pasta	Demanda de agua (%)
PPM0	27,3
PPM5	28,0
PPM10	28,6
PPM15	29,6
PPM20	30,3

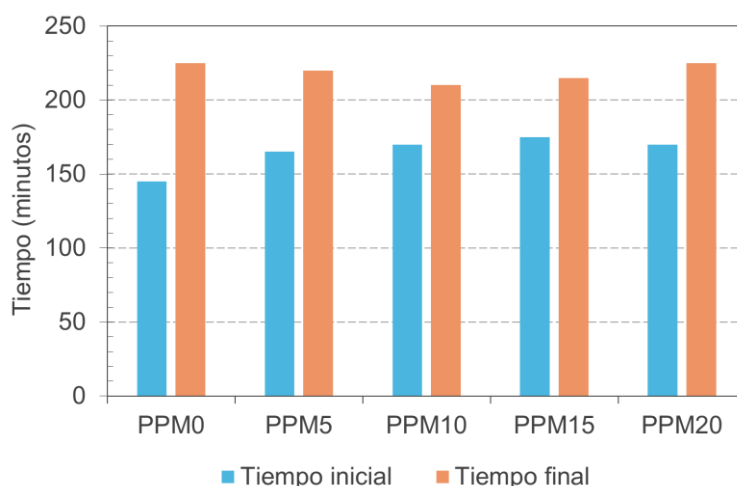


Figura 7. Tiempo de fraguado inicial y final de las pastas en función del contenido de PM.

En la Tabla 5 se presentan las proporciones de los morteros elaborados.

En la Figura 8 se muestra la fluidez en estado fresco evaluada en los diferentes morteros. Se puede observar un comportamiento diferente con respecto a las pastas. La incorporación de PM en los morteros generó un leve incremento de la fluidez, alcanzando un máximo de 107 % en la muestra MPM20. Sin embargo, dicha tendencia no es lineal con el contenido de PM, encontrándose dentro del rango de variabilidad del ensayo. Debido a que el residuo presentó una granulometría algo más fina que el cemento (ver Figura 4), las partículas se introducirían en los vacíos existentes entre los granos de arena y cemento. Esto provocaría el desplazamiento del agua atrapada en el espacio intergranular hacia la fase fluida, mejorando la trabajabilidad global de la mezcla fresca, en concordancia con los modelos reológicos de la literatura [4,31]. Es necesario realizar estudios específicos sobre estos aspectos, evaluando por ejemplo el empaquetamiento granular, a fin de validar o rechazar esta hipótesis.

En la Figura 9 se presentan los valores de resistencia a compresión a las edades de 2, 28 y 90 días. Los resultados obtenidos mostraron un comportamiento eficiente de la matriz cementicia para bajos porcentajes de sustitución del cemento por PM. A la edad de

2 días, los morteros con bajo porcentaje de reemplazo de CP por PM mostraron un comportamiento equivalente al de referencia (MPM0). El mortero MPM5 presentó una diferencia despreciable (inferior al 1 %) con relación a MPM0, lo que sugiere que, para dosificaciones de hasta un 5 %, el material incorporado no interfirió negativamente en la cinética inicial de hidratación del cemento, actuando potencialmente como un agente de empaquetamiento (filler). Este comportamiento es coincidente con el leve aceleramiento en el tiempo de fraguado final, donde el efecto filler prevalece por sobre el efecto dilución. Sin embargo, a medida que el porcentaje de sustitución se incrementa hacia el 15 % (MPM15) y 20 % (MPM20), se registra una caída máxima del orden del 19 % en la resistencia a la compresión respecto a la del patrón. Esta disminución temprana para los mayores porcentajes de sustitución se atribuye principalmente al efecto dilución del cemento, donde la reducción del volumen de aglomerante activo restringe la disponibilidad inicial de silicatos de calcio de hidratación rápida (C_3S), limitando la formación de la matriz de gel C-S-H en las primeras horas [32].

A la edad de 28 días, el MPM5 equipara la resistencia del MPM0 superando los 32 MPa. Este comportamiento se asocia a una actividad combinada: por un lado, al efecto físico de nucleación observado a edad temprana y, por

otro lado, a un posible refinamiento de la estructura de poros que compensaría la dilución del cemento. En el caso del mortero MPM10, la resistencia experimentó una leve disminución (5,2 %), alcanzando 30,6 MPa,

manteniéndose en rangos estructuralmente aceptables. Al incrementarse la tasa de sustitución, la caída en la resistencia alcanza reducciones del 12,5 % y 14,7 % para los morteros MPM15 y MPM20, respectivamente.

Tabla 5 . Proporciones de los morteros (g).

Materiales	MPM0	MPM5	MPM10	MPM15	MPM20
Agua	635	635	635	635	635
Cemento	1270	1207	1143	1080	1016
Arena sílicea	3800	3800	3800	3800	3800
PM	0	63,5	127	190,5	254

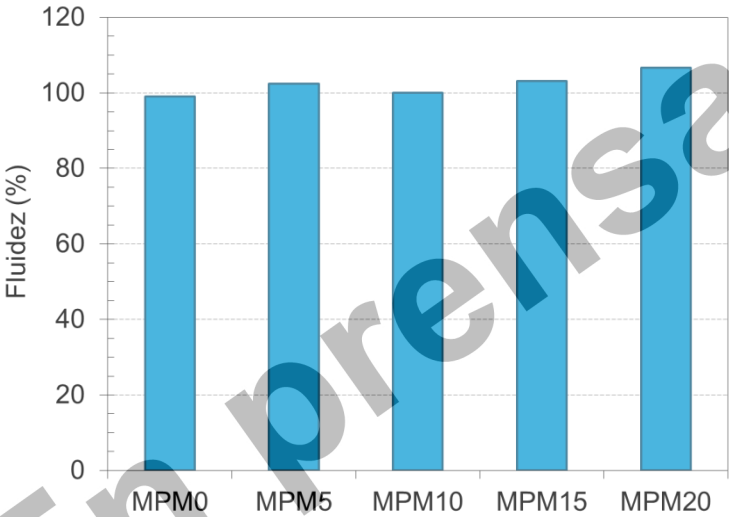


Figura 8. Extendido de morteros.

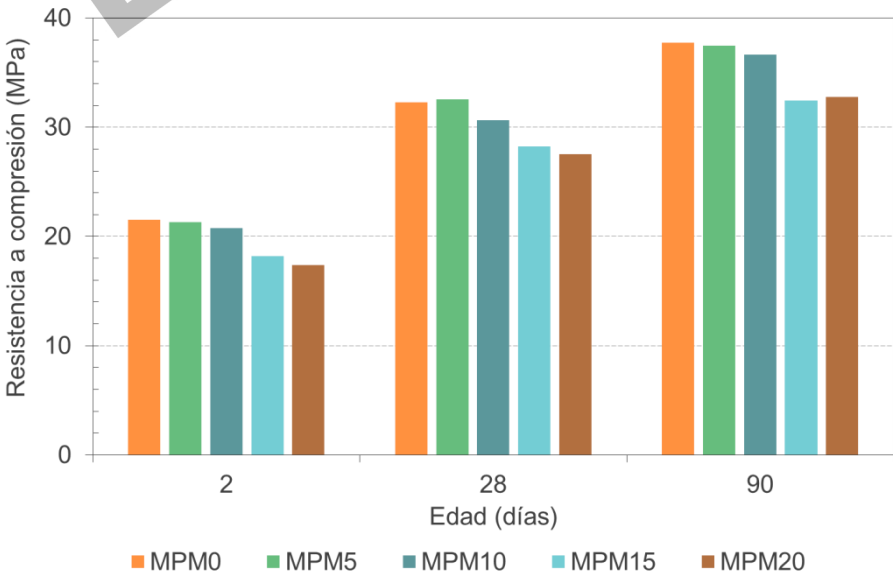


Figura 9. Resistencia a la compresión a las edades de 2, 28 y 90 días.

Esto demuestra que la dilución del cemento a tales niveles supera las capacidades de densificación y ganancia de resistencia debidas al efecto de nucleación al actuar como filler.

La resistencia a la compresión a los 90 días mostró un desempeño similar al descripto para las edades anteriores, presentando en todos los casos una evolución de la misma.

Considerando las resistencias de cada mortero adicionado con el PM relativas al mortero de referencia, a cada una de las edades evaluadas, las disminuciones de resistencia hasta contenidos del PM del 10 % resultaron acotadas (~5 %), produciéndose una brecha más importante para los mayores contenidos de sustitución. Además, para el mortero con mayor porcentaje de sustitución (MPM20), mientras que para 2 días la resistencia relativa alcanzó el 80 % del mortero de referencia (MPM0), a 28 días superó el 85 % de la correspondiente al mismo y a 90 días alcanzó el 87 % de la equivalente en MPM0.

3. Conclusiones

De los estudios preliminares llevados a cabo sobre la evaluación de las características del PM obtenido a partir de lodo recuperado del corte de piedras ornamentales, y de su utilización como sustituto parcial del cemento en pastas y morteros, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El PM, tras un proceso de secado y disgregación, resulta en un material de elevada finura, superior a la del cemento empleado, y presenta características similares a las de un filler industrial, sin necesidad de molienda adicional intensiva.
- Por su composición mineralógica (cuarzo y feldespatos predominantes, con cantidades subordinadas de micas y muy escasa calcita), el PM proviene principalmente del corte y pulido de rocas de composición granítica y muy escasas rocas calcáreas.

- Al emplearlo como sustituto parcial del cemento pórtland en la elaboración de pastas, las mismas evidencian una pérdida de fluidez debido a su elevada finura, alcanzando una disminución en el extendido del 30 % al emplear 20 % de PM. El tiempo de fraguado inicial se incrementa con el contenido de PM, en mayor medida para bajos porcentajes de sustitución, mientras que el tiempo de fraguado final disminuyó levemente (hasta 15 min) hasta reemplazos del 10 %.

- En sistemas cementicios con agregados finos (morteros), el PM mejoró levemente la fluidez al incrementarse el porcentaje de empleo, debido fundamentalmente a su granulometría más fina que la del cemento, alcanzando un 107 % de incremento del extendido para el máximo porcentaje de sustitución evaluado (20 %).

- El desarrollo de la resistencia a compresión de morteros con contenidos variables de PM, hasta la edad de 90 días, presenta un comportamiento similar al del mortero patrón para reemplazos de hasta el 10 % del cemento por el material en estudio. Para porcentajes de sustitución mayores la resistencia disminuyó a todas las edades, alcanzando una reducción del orden del 13 % a la edad de 90 días al emplear 20 % del PM.

- Se identifica un límite técnico de reemplazo en torno al 10 %, a partir del cual el efecto dilución penaliza de forma significativa el desarrollo resistente de la matriz. Sin embargo, las mezclas con mayores sustituciones (15 % y 20 %) muestran una cinética de ganancia resistente, sugiriendo que el material adicionado podría contribuir positivamente a la madurez tardía del sistema cementicio. En tal sentido, serían necesarios estudios más avanzados que permitan verificar dicha hipótesis.

- El uso del lodo de marmolería en forma de polvo, como sustituto parcial del cemento pórtland en la elaboración de pastas y morteros permitiría una reducción directa de la huella de carbono asociada al consumo de cemento, resolviendo simultáneamente un problema de disposición de desechos en las plantas de procesamiento de rocas ornamentales

Agradecimientos

Los autores agradecen a la marmolería del Grupo Guasch SRL por proveer el material para el estudio, al LEMIT (CICpBA), al CITERRA (CONICET-UNC), a la Facultad de Ingeniería (UCC), al CGAMA (CIC-UNS) y al Departamento de Geología de la UNS, por el apoyo brindado.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue financiado parcialmente con el PGI 24/H163, SECyT-UNS.

Contribución de autoría

F.P. Weinsziehr: metodología, análisis formal, investigación, redacción-original-borrador, visualización

C.J. Zega: conceptualización, metodología, análisis formal, recursos, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición, visualización

S.A. Marfil: conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, recursos, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición, visualización

F. Locati: metodología, investigación, redacción-original-borrador, redacción-revisión-edición, visualización

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] International Energy Agency (IEA), & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2018). *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. IEA/WBCSD.
- [2] Andrew, R. M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018. *Earth System Science Data*, 11(4), 1675–1710. <https://doi.org/gh57fi>
- [3] Organización de las Naciones Unidas (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (Res. A/RES/70/1). Naciones Unidas. <https://documents.un.org/>
- [4] Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [5] Juenger, M., y Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. <https://doi.org/f7w7qv>
- [6] Villagrán-Zaccardi, Y., Gruyaert, E., Alderete, N., y De Belie, N. (2016). Influence of particle size distribution of slag, limestone and fly ash on early hydration of cement assessed by isothermal calorimetry. En O. M. Jensen, K. Kovler, y N. De Belie (Eds.), *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Concrete with Supplementary Cementitious Materials* (pp. 31–40). RILEM.
- [7] Xu, X., Zhao, Y., Gu, X., Zhu, Z., Wang, F., y Zhang, Z. (2023). Effect of particle size and morphology of siliceous supplementary cementitious material on the hydration and autogenous shrinkage of blended cement. *Materials*, 16, Artículo 1638. <https://doi.org/rqwg>
- [8] Al-Joulani, N. (2008) Soil contamination in Hebron District due to stone cutting industry. *Jordan Journal of Applied Science: Natural Sciences Series*, 10(1): 37–50.
- [9] Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., y Bhunia, D. (2017). A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *Journal of Building Engineering*, 13, 87–95. <https://doi.org/ghhxt2>
- [10] Venturoti, G. P., Boldrini-França, J., Kiffer, W. P., Francisco, A. P., Gomes, A. S., y Gomes, L. C. (2019). Toxic effects of ornamental stone processing waste effluents on *Geophagus brasiliensis* (Teleostei: Cichlidae). *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 72, Artículo 103268. <https://doi.org/gvtqcd>
- [11] Akintayo, B. D., Babatunde, O. M., Akintayo, D. C., y Olanrewaju, O. A. (2025). Transforming Industrial waste into low-carbon cement: a multi-criteria assessment of supplementary cementitious materials for sustainable concrete design. *Recycling*, 10, Artículo 211. <https://doi.org/rqwh>

- [12] Rametta, B. C. D., Pereira, V. M., Bergerman, M. G., Tavares, L. M., y Ângulo, S. C. (2026). Recovery of fine hydrated cement from the cementitious waste for circular cement production by selective grinding. *Minerals*, 16, Artículo 204. <https://doi.org/rqwj>
- [13] Nayak, S. K., Satapathy, A., y Mantry, S. (2022). Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review. *Journal of Building Engineering*, 46, Artículo 103742, <https://doi.org/rqwk>
- [14] Li, Z., Zhao, Z., Ma, F., Di, W., Cao, X., He, Z., y Guan, B. (2024). Feasibility study of replacing part of cement by igneous rock powder as cementitious material: based on mortar macroscopic properties and microstructure. *Frontier in Materials*. 11, Artículo 1413907. <https://doi.org/rqwm>
- [15] Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Menéndez, G., y Carrasco, M. F. (2015). Hydration and properties of ternary cement with calcareous filler and slag. *ALCONPAT Journal*, 5(2), 84–96.
- [16] Bentz, D. P., Ferraris, C. F., Jones, S. Z., Lootens, D., y Zunino, F. (2017). Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance. *Cement and Concrete Composites*, 78, 43–56. <https://doi.org/gg25jh>
- [17] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004). *Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 µm, por lavado* (IRAM 1540). <https://www.iram.org.ar/>
- [18] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2018). *Puzolanas y cenizas volantes silíceas. Parte 1 - Métodos de ensayo físicos* (IRAM 1654-1). <https://www.iram.org.ar/>
- [19] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2006). *Cemento. Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado* (IRAM 1619). <https://www.iram.org.ar/>
- [20] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2006). *Cemento pórtland. Determinación de resistencias mecánicas* (IRAM1622). <https://www.iram.org.ar/>
- [21] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2011). *Arena normalizada IRAM 1633* (IRAM 1633). <https://www.iram.org.ar/>
- [22] American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar* (ASTM C1437). <https://www.astm.org/>
- [23] Kim, Y. J., Leeuwen, R. V., Cho, B. Y., Sriraman, V., y Torres, A. (2018). Evaluation of the efficiency of limestone powder in concrete and the effects on the environment. *Sustainability*, 10(2), 550. <https://doi.org/qc45mj>
- [24] Zhang, M., Yang, Y., Wu, Y., Yu, J., Pang, H., y Lv, H. (2025). Effect of limestone powder fineness on the physical and mechanical performance of concrete. *Materials*, 18, 835. <https://doi.org/hckccv>
- [25] Di Salvo Barsi, A., Trezza, M. A., y Irassar, E. F. (2019). Comparison of dolostone and limestone as filler in blended cements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 243–253. <https://doi.org/rqwn>
- [26] García Ramírez, E. W. y Guerrero García, A. E. (2020). *Uso de residuo de conchas de abanico como filler para la elaboración de concreto sostenible* [Tesis de grado. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería]. Repositorio Institucional PIRHUA. <https://hdl.handle.net/11042/4477>
- [27] Coronel, R., Muñoz, S., y Rodríguez, E. (2021). Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en las propiedades del concreto. *Revista INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 8(21), 45–60. <https://doi.org/rqwq>
- [28] Kosmatka, S. H., y Wilson, M. L. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures* (15th ed.). Portland Cement Association (PCA).
- [29] Romero, L. M. B., Bahrami, A., y Awoyera, P. O. (2024). Exploring effects of supplementary cementitious materials on setting time, strength, and microscale properties of mortar. *Discover Applied Sciences*, 6, Artículo 583. <https://doi.org/q8p4f4>
- [30] Ambrose, E. E., Ogirigbo, O. R., Bello, T. B., y Akpando, S. U. (2026). Compressive strength, density, and setting time of concrete blended with rice husk ash. *Engineering Proceedings*, 124(1), Artículo 1. <https://doi.org/rqwq>
- [31] de Larrard, F. (1999). Concrete mixture proportioning. Concrete mixture proportioning: a scientific approach. En A. Bentur, y S. Mindess (Eds.), *Modern Concrete Technology Series*. E&FN SPON.
- [32] Irassar, E. (2009). Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - a review. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 241–254. <https://doi.org/d399kw>