

Durabilidad de hormigones autocompactantes **con adición de polvo de perlita natural**

VERÓNICA ARTIGAS - INGENIERA (veronicaartigas6@gmail.com);

MARÍA V. QUINTANA - DOCTORA PROFESORA (quintanamvirginia@gmail.com) | INIQUI-CONICET, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA, SALTA, ARGENTINA

MARÍA J. POSITIERI - DOCTORA PROFESORA (mpositieri@gmail.com) | CINTEMAC, FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, ARGENTINA

RESUMEN

LA SOCIEDAD ACTUAL TIENDE A GENERAR PRODUCTOS ECO-SUSTENTABLES Y LA INDUSTRIA DEL HORMIGÓN NO ES AJENA A ESTA TENDENCIA. UNA OPCIÓN PARA LOGRARLO ES PRODUCIR HORMIGONES MÁS SUSTENTABLES MEDIANTE EL REEMPLAZO DE PARTE DEL CEMENTO PORTLAND POR MATERIALES MENOS CONTAMINANTES, COMO PUEDEN SER LOS DESECHOS GENERADOS POR OTRAS INDUSTRIAS. EN ESA LÍNEA ENCONTRAMOS AL POLVO DE PERLITA NATURAL (PPN), DESECHO GENERADO DURANTE EL PROCESAMIENTO DE ROCA DE PERLITA. ESTE TRABAJO PLANTEA LA INCORPORACIÓN DE PORCENTAJES CRECIENTES DE PPN (HASTA 30%) COMO REEMPLAZO DEL CEMENTO EN HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES (HAC). SE CARACTERIZÓ EL PPN Y SE REALIZARON EN-SAYOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO SOBRE EL HORMIGÓN PARA ANALIZAR LA INFLUENCIA DE ESTE RESIDUO EN ATRIBUTOS COMO SER FLUIDEZ, RESISTENCIA A COMPRESIÓN AXIAL Y PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE LOS HAC, DIRECTAMENTE VINCULADAS CON SU DURABILIDAD. LOS RESULTADOS PERMITEN AFIRMAR QUE ES FACTIBLE REEMPLAZAR HASTA 10% DE CEMENTO PORTLAND EN LOS HAC SIN ALTERAR SIGNIFICATIVAMENTE LAS PROPIEDADES ANALIZADAS.

PALABRAS CLAVES: HAC, PERLITA, DURABILIDAD.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, el Cemento Portland es el material más utilizado, dado que abarca un amplio rango de propiedades y posibilidades de uso, siendo a su vez un material económico. La producción mundial anual de cemento ronda los 10.000 millones de toneladas, haciendo que este sea el material artificial más utilizado por la humanidad (Bonnet,

y otros, 2019) y el hormigón, elaborado a partir del cemento, es un material ampliamente consumido en todo el mundo y los nuevos avances en materia de construcción, impulsan aún más su utilización.

Por otro lado, la industria cementera se encuentra ante diversos retos que incluyen además de la constante elevación en la demanda de cementos y hormigones, el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, la escasez de materias primas, crecientes problemas medioambientales relacionadas con el cambio climático, y una economía mundial en situación crítica. Cada tonelada producida de Cemento Portland Ordinario (CPO) libera en promedio una cantidad similar de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, representando aproximadamente el 7% de todas las emisiones de carbono causadas por actividades humanas (Pal, 2018).

Los compuestos ambientalmente sostenibles se estudian cada vez más y se utilizan en la práctica para reducir las emisiones de los procesos industriales y, por lo tanto, el deterioro gradual del medio ambiente. En este sentido, la sustitución de materia prima juega un papel fundamental en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en cualquier industria, lo que da como resultado productos más sostenibles y con menos emisiones de carbono (Mishra, Sarsaiya, & Gupta, 2022). Además, dadas todas las implicaciones ambientales de la industria de la construcción, el interés por los materiales de construcción alternativos ha ido creciendo continuamente en las últimas décadas. En este marco, que

cobra importancia el desarrollo de hormigones sustentables que, además de cumplir con los requerimientos como material estructural, también resulten más amigables con el ambiente (Raggioti, 2015).

Siguiendo esta línea, la utilización de residuos de otras industrias como reemplazo de parte del cemento en la elaboración de hormigones se constituye en un objetivo de desarrollo sostenible. Esta investigación evalúa los efectos de la adición de polvo de perlita natural en la durabilidad de HAC; para ello se plantea el reemplazo de parte del cemento Portland por este material de descarte. De esta forma se busca disminuir el consumo de clínker de cemento, minimizar la emisión de dióxido de carbono y contribuir al ahorro energético, todo esto sin afectar negativamente las propiedades durables del hormigón.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La perlita es una roca de origen volcánico con la capacidad sobresaliente de expandirse alcanzando hasta 20 veces su volumen original cuando es sometida a la acción del calor. Al expandirse, la perlita adquiere propiedades que la hacen muy atractiva para diversas industrias; por ejemplo, es muy utilizada en la construcción por ser un excelente aislante térmico y acústico.

La composición de la perlita, principalmente formada por sílice y alúmina, la convierte en un material con potencial puzolánico. El empleo de materiales puzolánicos en los hormigones es beneficioso no sólo para el medioambiente, sino también en términos de durabilidad

y economía de las estructuras (Metha, 1998). En los últimos años, se han llevado a cabo estudios del PPN en HAC como los realizados por Abdulkader y Salem (2017), Karen y otros (2018), Esfandiari & Loghmani (2019) y Abdulkader y otros (2020); los resultados positivos alientan su utilización en estos hormigones llevando a una disminución del consumo de cemento y consecuentemente a contribuir con la sustentabilidad ambiental.

Los yacimientos de perlita se encuentran distribuidos por el mundo; particularmente en la zona de la Puna (Salta, Argentina) existen numerosos yacimientos donde la perlita es extraída por métodos a cielo abierto y posteriormente procesada. Se emplean medios mecánicos para llevar las rocas de perlita a un tamaño menor y así poder transportarlas para continuar su procesamiento. Durante la molienda del material se origina una parte de finos que es considerada desecho y es acumulada al aire libre, formando montículos como los que se aprecian en la Figura 1. El polvo desecharo representa un problema para los habitantes de la zona debido a la dispersión de las partículas producida por los fuertes vientos (Artigas, y otros, 2016). Se estima que el 20% de la perlita extraída se convierte en desecho, esto representa cerca de 19 toneladas por día.

3. METODOLOGÍA

3.1 Materiales

El Cemento Portland CPC30 utilizado tiene una densidad de 3,20 g/cm³, el agregado fino natural 2,61 g/cm³, el agregado grueso tamaño máximo 19 mm y densidad 2,66 g/cm³ y el aditivo hiperplastificante a base de policarboxilato presenta un residuo sólido de 35%.

El Polvo de Perlita Natural (PPN) que se utilizó es el proveniente de San Antonio de los Cobres, Salta, Argentina. La densidad es de 2,64 g/cm³ y la superficie específica BET de 5.28 m²/gr. La distribución granulométrica del material, obtenida por difracción laser, muestra que el 90% de las partículas tiene un tamaño inferior a 75 µm. La composición química del PPN está resumida en la Tabla 1 (Artigas *et al.*, 2022), donde se aprecia su elevado contenido de sílice y alúmina.

TABLA 1
COMPOSICIÓN QUÍMICA PPN

Compuesto	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Sulfato	O ₂	H ₂ O
%	30-36	6-8	0-1	0-1	0-1	2.5-5	2-4	exenta	44.5-47.5	3-5

FUENTE: ARTIGAS *et al.* (2022)

3.2 Dosificación

Para analizar la influencia de la utilización de PPN en la durabilidad del hormigón se planteó la elaboración de mezclas con adición de PPN en reemplazo de parte del cemento en HAC. Partiendo de un hormigón patrón (G0), se reemplazó perlita finamente molida en porcentajes del 10, 20 y 30% del peso de cemento (G10, G20 y G30 respectivamente). Se utilizó el método ACI 237 R-07 para las dosificaciones que se resumen en la Tabla 2.

La relación agua/material cementante se mantuvo constante en 0,45. El aditivo hiperfluidificante se incorporó como porcentaje del peso del material cementante, la dosis de aditivo resultó la necesaria para alcanzar una fluidez de $D_F = 70 \pm 2$ cm de diámetro de extensión medido por el Slump-flow.

3.3 Ensayos

Con el fin de estudiar la durabilidad de los hormigones elaborados se llevaron a cabo ensayos en estado fresco y se elaboraron probetas destinadas a los ensayos en estado

endurecido. Se moldearon 15 probetas cilíndricas de 10 x 20 cm para los ensayos de compresión, absorción e índice de vacíos y succión capilar y 3 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para los ensayos a penetración de agua a presión.

Los ensayos realizados sobre los hormigones son los que se describen a continuación:

En estado fresco:

► **Slump-flow:** Ensayo que permite evaluar la fluidez del hormigón (horizontalmente y en ausencia de obstrucciones) y la resistencia a la segregación de la mezcla. El ensayo se rige por la Norma IRAM 1890-1 y consiste en medir los parámetros diámetro final (D_F), tiempo T50 e índice de estabilidad visual (IEV).



FIGURA 1
DESECHOS DE FINOS DE PERLITA ACUMULADOS AL AIRE LIBRE

FUENTE: ARTIGAS Y OTROS (2021)

TABLA 2
DOSIFICACIONES (KG/M³)

Hormigón	Cemento	Agua	PPN	Ag. Fino	Ag. Grueso	Aditivo
G0	445		—			0,60
G10	400		45			0,65
G20	355	200	90	890	851	0,65
G30	310		135			0,70

FUENTE: PROPIA

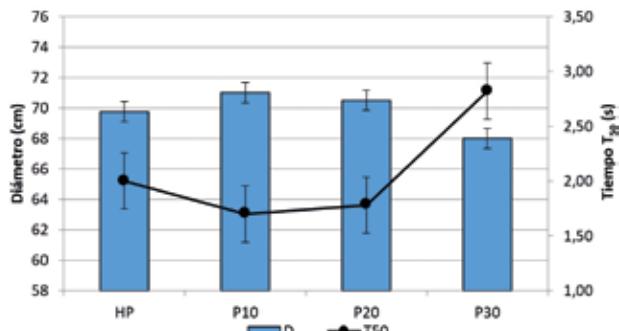


FIGURA 2

DIÁMETROS DE EXTENDIDO D_F Y TIEMPOS T_{50} PARA HORMIGONES CON DISTINTOS PORCENTAJE DE PPN

En estado endurecido:

► **Resistencia a compresión:** La resistencia a la compresión axial del hormigón se determinó siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1546 (2013). Las probetas se mantuvieron sumergidas en pileta de curado hasta horas antes del ensayo, luego fueron extraídas para la medición de sus dimensiones y mantenidas en ambiente de laboratorio hasta el momento del ensayo.

► **Absorción e índice de vacíos:** La absorción de agua y la porosidad del hormigón son factores que afectan su resistencia y durabilidad. Para la determinación de la absorción de agua por inmersión, la densidad y el índice de vacíos de los hormigones se procedió de acuerdo a lo estipulado en la Norma ASTM C642-97. Los ensayos se realizaron sobre las probetas con 90 días de edad para tener una mejor consideración del efecto puzolánico del PPN.

► **Succión capilar:** La capacidad y la velocidad de succión capilar del hormigón son parámetros directamente relacionados con la durabilidad del mismo. Como se describe en la norma IRAM 1871 (2004), el ensayo consiste en registrar el incremento de masa de una muestra de hormigón que se encuentra en contacto con el agua en una de sus bases. Se realizó el ensayo a las edades de 28, 90 y 180 días para apreciar la evolución de los resultados con el tiempo y el efecto de la adición de PPN.

► **Penetración de agua a presión:** El ensayo consiste en aplicar agua bajo presión sobre la superficie del hormigón endurecido y posteriormente dividir la probeta en dos partes por rotura para medir la profundidad de penetración

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los principales resultados obtenidos en los ensayos realizados.

4.1 Slump-flow

En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos de los parámetros D_F y T_{50} de los hormigones en estudio con sus barras de error correspondientes. Del análisis de los mismo se observa que, dentro de los límites fijados para el D_F , (entre 68 y 72 cm) a menor diámetro mayor es el T_{50} . También, que el valor de T_{50} varía entre 1, 5 y 3 segundos, disminuye ligeramente para porcentajes de PPN de 10 y 20% respecto del patrón, pero se incrementa notablemente para el 30% de adición.

De acuerdo a las guías del EFNARC (2005) los HAC con D_F entre 66 y 75 cm son de aplicación para la mayoría de las estructuras, por lo tanto los HAC elaborados para este trabajo están dentro de esta clasificación.

Para todos los porcentajes de reemplazo de cemento por PPN, si se mantiene constante la cantidad de aditivo, a medida que aumenta la dosis de sustitución disminuye el extendido, haciendo visible la influencia de la adición en la consistencia de las mezclas en estado fresco. Este efecto se debe a que el PPN tiene una densidad menor a la del cemento y, como el reemplazo por la adición se realiza en peso, el volumen de perlita a incorporar es mayor y, consecuentemente, también el volumen de sólidos en la pasta y el contacto entre ellos es mayor para un mismo contenido de agua. Por otro lado, la mayor superficie específica de las partículas de PPN con respecto a las de cemento contribuyen a que la absorción de agua sea mayor y aumente la dosis de aditivo requerida para mantener el diámetro de extendido.

Abdulkader y Salem (2017) encuentran que el efecto observado de aumento en la demanda de aditivo hiperfluidificante en los HAC con PPN puede explicarse por la capacidad de absorción de agua de la adición, que aumenta la demanda de agua y, por lo tanto, afecta la trabajabilidad de la mezcla. En conjunción con lo expuesto, para Esfandiari y Loghmani (2019) a mayor sustitución de cemento por PPN, más agua y superplastificante es necesario para alcanzar el flujo de asentamiento adecuado, debido a la gran área superficial y la gran cantidad de poros en la estructura de la perlita, lo que aumenta la demanda de agua.

De la apreciación visual de los extendidos durante el ensayo de escorrimiento (Figura 3) se observa que todas las mezclas son bastante homogéneas. Hay muy pocos o nulos indicios de segregación ya que no se concentra agregado grueso en la parte central ni hay un halo significativo de pasta en el borde del extendido. Los hormigones G0 y G10 presentan un IEV igual a 1, mientras que los G20 y G30 tienen un IEV de 0, lo cual demuestra un leve incremento de la cohesión con la incorporación del PPN.

Del análisis de los resultados en estado fresco puede decirse que el reemplazo de hasta 20% de cemento por PPN en los HAC no afecta significativamente su fluidez, considerando la incorporación de dosis levemente superiores de aditivo hiperfluidificante. Al incorporar 30% de PPN se obtienen valores de D_F y T_{50} similares a los obtenidos en el hormigón patrón, sin embargo, se requiere una dosis



FIGURA 3

ENSAYO DE SLUMP-FLOW

FUENTE: PROPIA

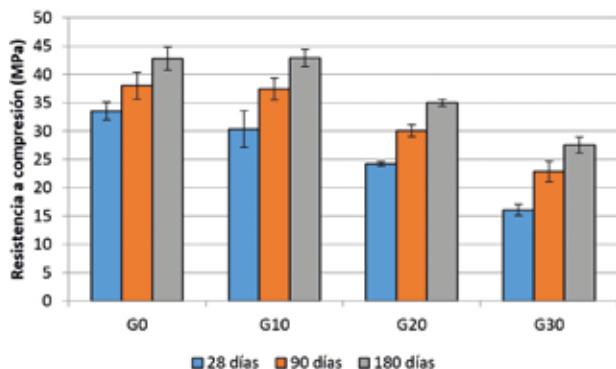


FIGURA 4

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS HAC A 28, 90 Y 180 DÍAS

FUENTE: PROPIA

de aditivo considerablemente superior, un 17% aproximadamente.

4.2 Resistencia a compresión

En la Figura 4 se presentan los resultados de resistencia a compresión de los HAC en estudio a las edades de 28, 90 y 180 días, con sus barras de error correspondientes.

Del análisis de la evolución de la resistencia a compresión en los hormigones, se destacan tres aspectos importantes:

- A la edad de 28 días, el hormigón G0 es clase resistente H30, el G10 es H25, el G20 es H20 y el G30 es H15. A los 90 días, los hormigones G0 y G10 se posicionan dentro de la clase resistente H35, el G20 en la H25 y el G30 en la H20. A los 180 días, el G0 y el G10 alcanzan la clase resistente H40, mientras que el G20 la H30 y el G30 la H25.
- A la edad de 90 días el HAC con 10% de PPN alcanza prácticamente la misma resistencia que el HAC patrón a la misma edad.
- La resistencia a compresión del HAC con 20% de PPN a los 180 días supera la resistencia del hormigón de referencia a 28 días.
- Hay una mayor evolución de resistencia entre los 28 y 90 días en todos los hormigones con perlita en comparación con el hormigón patrón.

Por lo mencionado se aprecia el efecto puzolánico causado por el PPN, incrementando la resistencia a edades avanzadas

4.3 Absorción, densidad y porosidad

Los resultados de absorción después de inmersión y después de inmersión y ebullición obtenidos para los hormigones en estudio se resumen en la Figura 5 junto

con sus barras de error correspondientes, cada valor corresponde al promedio de tres probetas ensayadas.

Los porcentajes de absorción después de inmersión de los hormigones elaborados son relativamente altos, se encuentran en el

rango de 5,1% a 5,8%. Después de la inmersión y ebullición, los valores de absorción descienden, posicionándose entre 3,4% y 4,3%. La incorporación de PPN disminuye la absorción después de inmersión respecto al patrón, alcanzando una disminución máxima del 13% para el G20. La absorción después de la inmersión y ebullición es un 20% menor en el G30 respecto del G0.

La capacidad de absorción de agua por parte del hormigón depende de múltiples factores, el reemplazo de parte del cemento por PPN origina efectos que se contraponen y pueden modificar la absorción, disminuyéndola como es el caso de los HAC en estudio. La incorporación de perlita en el hormigón genera productos de hidratación que contribuyen a refinar los poros del material, disminuyendo el volumen de poros accesibles y, consecuentemente, la capacidad de absorción del conjunto. Por otro lado, como indica Najimi *et al.* (2012), la absorción de agua del hormigón se ve influenciada por la absorción de agua de cada uno de los materiales empleados

en su fabricación y, especialmente, por la pasta que se encuentra en la superficie del mismo. En este sentido, la perlita al ser un material con mayor capacidad absorbente en relación al cemento podría incrementar los valores de esta propiedad en el hormigón. En este caso, la reducción de la capacidad de absorción debida al refinamiento de los poros del hormigón tiene mayor relevancia que el aumento de la capacidad de absorción que podría generar la perlita debido a su mayor capacidad absorbente.

En la Figura 5 también se presentan los resultados de densidades D_s y D_{sss} y volumen de vacíos, cada valor corresponde al promedio de tres probetas ensayadas. Las densidades D_s y D_{sss} tuvieron una variación prácticamente imperceptible con la adición de PPN en el hormigón (inferior al 2% respecto al patrón). Las densidades aumentan probablemente debido a los productos de hidratación de la perlita, que llenan los poros de la estructura.

En cuanto al volumen de vacíos se observa una disminución de este valor con la incorporación de mayores cantidades de perlita, alcanzando un valor máximo del 19% para el G30. Da Silva y de Brito (2015) destacan que este ensayo tiene ciertas limitaciones, ya que mide únicamente el volumen de poros accesibles (porosidad abierta), pero no es representativo de la porosidad absoluta del hormigón, debido a que no tiene en cuenta los poros cerrados.

4.4 Succión capilar

La Figura 6 presenta la capacidad de

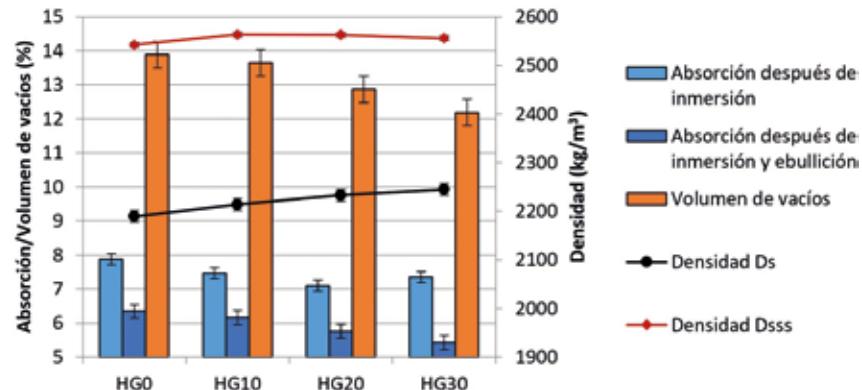


FIGURA 5

ABSORCIÓN, DENSIDAD Y VOLUMEN DE VACÍOS DE LOS HAC

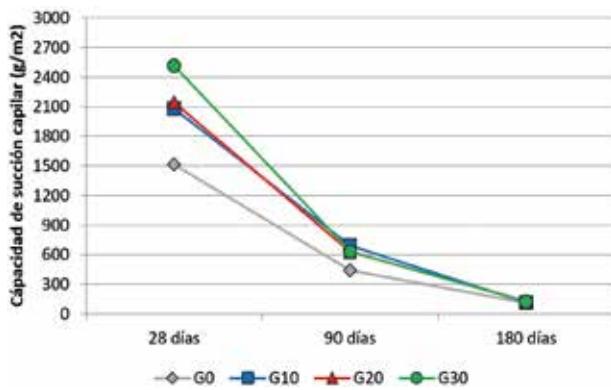


FIGURA 6
CAPACIDAD DE SUCCIÓN A CAPILAR POR CONTENIDO DE PPN
EN EL HORMIGÓN A 28, 90 Y 180 DÍAS

succión capilar de los hormigones elaborados para las edades de ensayo de 28, 90 y 180 días. Cada valor representa el promedio de tres probetas ensayadas.

En todos los casos, los valores de capacidad de succión capilar disminuyen con el paso del tiempo, efecto de la evolución en la hidratación del cemento y de la perlita. A los 28 días los resultados se encuentran entre 1517 y 2516 g/m², mientras que a los 180 días disminuyen considerablemente, hallándose entre 110 y 128 g/m².

La incorporación de PPN incrementa la capacidad de succión capilar del hormigón principalmente a los 28 y 90 días, a estas edades se presentan las mayores diferencias con el hormigón de referencia G0. A los 180 días, todos los valores se aproximan, la diferencia máxima es del 16% y la succión capilar medida en el G10 es apenas 5% mayor que la del patrón.

El incremento de la capacidad de

men de pasta reemplazado con el obtenido con el reemplazo es superior al del patrón. La pasta resulta ser más porosa que los agregados, consecuentemente se produce una mayor absorción de agua en los hormigones con mayores dosis de PPN.

Las velocidades de succión capilar alcanzadas por los hormigones en estudio se muestran en la Figura 7 y también los coeficientes de correlación lineales considerados para el cálculo. Del análisis de los resultados se observa que las velocidades de succión capilar a 28 y 90 días calculadas para todos los hormigones son elevadas, mientras que a 180 días estos valores disminuyen considerablemente, presentando velocidades por debajo del límite de 4 g/m²·s^{1/2} fijado por Reglamento CIRSOC 201 (2005). Además, las curvas de succión capilar obtenidas se ajustan bien a líneas de tendencia con aproximación lineal, brindando altos coeficientes de correlación, por encima de 0,9727.

Los HAC alcanzan velocidades de succión capilar rela-

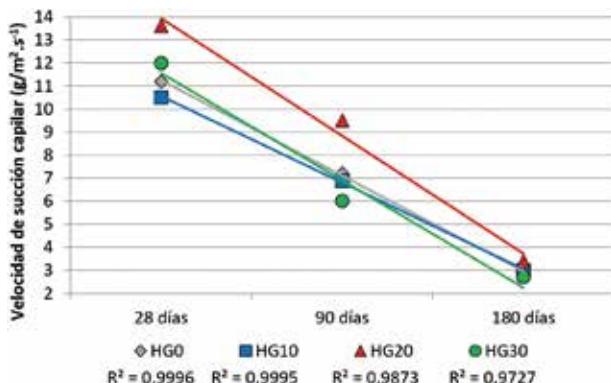


FIGURA 7
VELOCIDAD DE SUCCIÓN A CAPILAR POR CONTENIDO DE PPN
EN EL HORMIGÓN A 28, 90 Y 180 DÍAS

succión capilar con la incorporación de PPN puede deberse al aumento del porcentaje de volumen de pasta en la mezcla. El reemplazo de cemento por perlita se realiza en peso y, como la densidad de la perlita es inferior a la del cemento, el volumen obtenido con el reemplazo es superior al del patrón. La pasta resulta ser más porosa que los agregados, consecuentemente se produce una mayor absorción de agua en los hormigones con mayores dosis de PPN.

De acuerdo con el Reglamento CIRSOC 201:2005, "los hormigones destinados a estructuras que contengan o conduzcan agua, y que requieran muy baja permeabilidad, deben tener una penetración de agua máxima igual o menor que 50 mm, y una penetración de agua media igual o menor que 30 mm". Considerando los límites reglamentarios impuestos para estos casos extremos, los valores de penetración de agua a presión alcanzados por los hormigones en estudio caen por debajo de lo estipulado tanto para la profundidad media como para la máxima.

Se ve una marcada disminución en la profundidad de penetración con la incorporación de 10% de PPN respecto del patrón, alcanzando una disminución del 34%

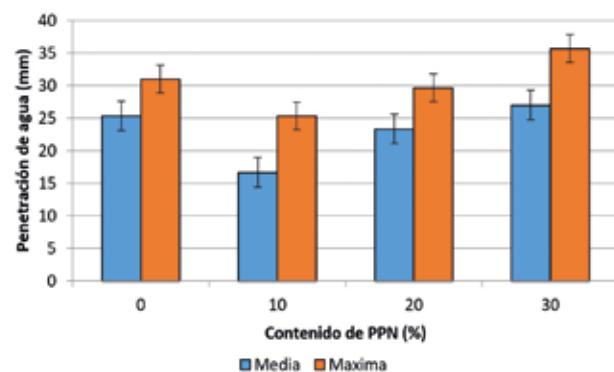


FIGURA 8
PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN POR CONTENIDO DE PPN
EN EL HORMIGÓN

tivamente similares a todas las edades, a 180 días la diferencia del G10 con el HAC patrón es de solo 3% y la del G30 resulta un 7% menor.

Se aprecia una disminución de la velocidad de succión capilar entre los 90 y 180 días para los hormigones con perlita, lo cual se debe al efecto puzolánico de este material que genera un refinamiento de la estructura de poros del hormigón, dificultando así el paso del agua.

4.5 Penetración de agua a presión

Los valores de profundidad media y máxima de penetración de agua a presión se presentan en la Figura 8 con sus barras de error correspondientes, cada valor resulta del promedio de tres probetas ensayadas.

De acuerdo con el Reglamento CIRSOC 201:2005, "los hormigones destinados a estructuras que contengan o conduzcan agua, y que requieran muy baja permeabilidad, deben tener una penetración de agua máxima igual o menor que 50 mm, y una penetración de agua media igual o menor que 30 mm". Considerando los límites reglamentarios impuestos para estos casos extremos, los valores de penetración de agua a presión alcanzados por los hormigones en estudio caen por debajo de lo estipulado tanto para la profundidad media como para la máxima.

Se ve una marcada disminución en la profundidad de penetración con la incorporación de 10% de PPN respecto del patrón, alcanzando una disminución del 34%

en la profundidad media. El HAC G20 presenta valores levemente por debajo del G0, mientras que en el G30 las profundidades medias y máximas son mayores, en un 7% y 15% respectivamente.

Najimi *et al.* (2012) indica que la penetración de agua está ligada a la microestructura, entonces la actividad puzolánica y el consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dados por la incorporación de PPN disminuyen el volumen de poros del hormigón. Este efecto se observa en los HAC con hasta 20% de perlita donde se reduce la profundidad de penetración de agua con respecto al patrón.

4.6 Relación entre las propiedades de transporte

En los esquemas de la Figura 9 se aprecia la relación entre los resultados de las distintas propiedades de transporte medidas sobre los hormigones en estudio: absorción, velocidad de succión capilar y penetración media de agua a presión. Los valores de velocidad de succión capilar corresponden a los ensayos realizados a 90 días.

Se aprecia claramente como los valores máximos y mínimos correspondientes a absorción y penetración de agua a presión no son coincidentes. Por ejemplo, mientras el G0 presenta la mayor absorción de la serie, el G30 alcanza el valor de penetración de agua a presión más elevado. Para Najimi *et al.* (2012) este efecto puede deberse a las diferencias en cuanto al origen y el proceso de medición de los ensayos. La penetración de agua a presión está relacionada con la microestructura del hormigón; por su parte, la absorción depende en mayor medida de los materiales empleados en la elaboración del hormigón. La incorporación de PPN produce un refinamiento de poros en el hormigón que lleva a la disminución de la penetración de agua a presión; paralelamente, la adición de este material que posee una mayor capacidad absorbente, aumenta la absorción del conjunto.

De acuerdo con Taus (2010), hormigones que presenten valores similares de porosidad y/o absorción, pueden ostentar velocidades de succión capilar muy desiguales. Lo mencionado por la autora se pone de manifiesto en el caso particular de los HAC G20 y G30, donde se obtienen valores de absorción similares; sin embargo,

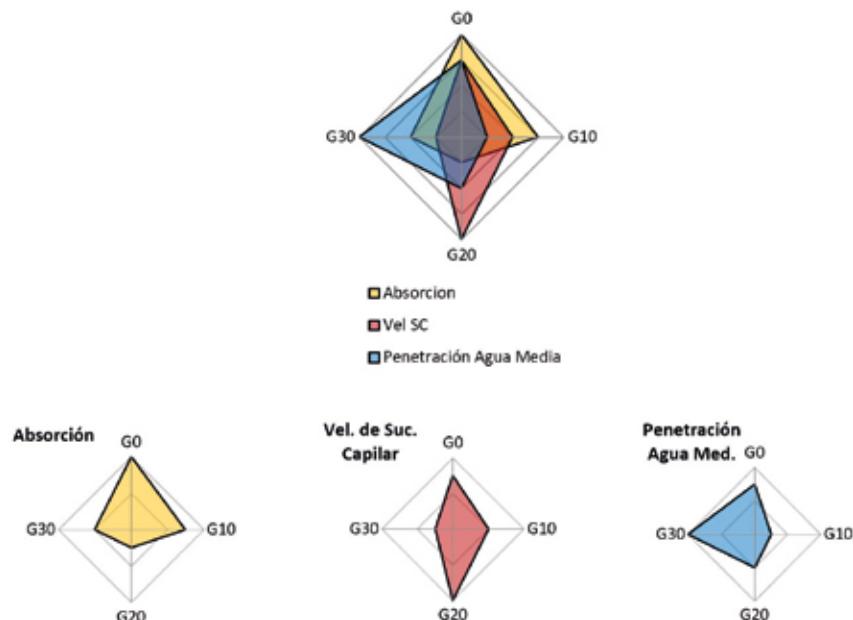


FIGURA 9

RELACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE LAS DISTINTAS PROPIEDADES DE TRANSPORTE MEDIDAS

las velocidades de succión capilar son muy diferentes. Incorporar PPN hasta una dosis de 20% genera una estructura de poros más fina por la que el ingreso de agua por capilaridad resulta más rápido. Para el hormigón gris con 30% de PPN, el efecto dilución toma más relevancia que el desarrollo de productos de hidratación por efecto puzolánico, generando una estructura con poros más gruesos, a través de la cual mermará la velocidad de succión capilar.

5. CONCLUSIONES

El reemplazo de parte del cemento Portland por polvo de perlita natural, considerado material de descarte, produce un aumento de la absorción de agua de la mezcla, que se traduce en una pérdida de trabajabilidad de la misma; sin embargo, este efecto puede contrarrestarse con un leve incremento de la cantidad de aditivo hiperfluidificante.

Con respecto a los efectos que se producen en las propiedades en estado endurecido, la resistencia a compresión a edades tempranas (28 días) de los HAC disminuye con el reemplazo de mayores proporciones de cemento por PPN. Sin embargo, esta tendencia se revierte a edades avanzadas (90 y 180 días), donde se observa un mayor desarrollo de resistencia en los hormigones con perlita. El reemplazo de hasta 10% de cemento por PPN no afecta significativamente la resistencia a

compresión del hormigón a ninguna edad.

No hay una tendencia clara en la variación de la absorción, la velocidad de succión capilar y la penetración de agua a presión medidas en los HAC con distintas proporciones de PPN en reemplazo del cemento, aunque se observa una mejora en las propiedades de transporte al reemplazar 10% de cemento por PPN. Por lo tanto, desde el punto de vista de la durabilidad del hormigón, es factible el reemplazo de hasta el 10% de cemento por PPN sin afectar negativamente las propiedades del material tanto en estado fresco como endurecido para las propiedades analizadas.

La posibilidad de empleo de los finos de perlita impactaría positivamente en lo que se refiere a la sustentabilidad del ambiente, utilizando un material de descarte que actualmente es un contaminante, disminuyendo la emisión de dióxido de carbono y el consumo de materias primas y energía asociadas al consumo de cemento Portland.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al LEMIT, particularmente a Alejandro Pittori, Técnico Asociado LEMIT-CICPBA, y a Leandro Carrizo, Profesional LEMIT-CICPBA, por la realización de los ensayos de penetración de agua a presión para este trabajo. Este trabajo fue parcialmente subsidiado por el CIUNSA y por el CONICET. ☰

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abdulkader, E., & Salem, G. (2017). Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production* 156, 507-517.
- [2] Abdulkader, E., Nehme, S., & Assaad, J. (2020). Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders. *Heliyon* 6.
- [3] Artigas, V., Cortez, F., Burgos, L., Cardozo, H., & Sastre, M. (2016). Diseño de pastas autocompactantes con adición de finos de perlita. VII Congreso Internacional 21^a Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- [4] Artigas, V., Positieri, M., Quintana, M., & Oshiro, A. (2021). Influencia de finos de perlita en hormigones. *Revista Tecnología y Ciencia* 41, 18-33.
- [5] Bonnet, C., Carcanague, S., Hache, E., Jabberi, A., Seck, G. S., & Simoën, M. (2019). The impact of future generation on cement demand: An assessment based on climate scenarios.
- [6] da Silva, P., & de Brito, J. (2015). Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *Construction and Building Materials* Vol. 86, 101-112.
- [7] Esfandiari, J., & Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement* 147.
- [8] Kerein, S., Joshaghani, A., Ramezanianpour, A., Isapour, S., & Karakouzian, M. (2018). Effects of the mechanical milling method on transport properties of self-compacting concrete containing perlite powder as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials* 172, 677-684.
- [9] Metha, P. (1998). Role of pozzolanic and cementitious materials in sustainable development of the concrete industry. 6th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete (págs. 1-25). Farmington Hills: MI: V.M. Malhotra.
- [10] Mishra, U. C., Sarsaiya, S., & Gupta, A. (2022). A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 18440-18451.
- [11] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., & Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials* Vol. 35, 1023-1033.
- [12] Pal, A. (2018). Developing Low-Clinker Ternary Blends for Indian Cement Industry. *J. Inst. Eng. India Ser. A*.
- [13] Raggiotti, B. B. (2015). Hormigones con adiciones activas: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad. Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba.
- [14] Taus, V. (2010). Análisis de la succión capilar en hormigones: Influencia de distintos parámetros de ensayo. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires: Tesis Magister.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE

Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibra



Elaborada pelo CT 303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais Não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, a *Prática Recomendada* é um trabalho pioneiro no Brasil, que traz as diretrizes para o desenvolvimento do projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras.

Baseada no *fib Model Code 2010*, a *Prática Recomendada* estabelece os requisitos mínimos de desempenho mecânico do CRF para substituição parcial ou total das armaduras convencionais nos elementos estruturais e indica os ensaios para a avaliação do comportamento mecânico do CRF.

Patrocínio



DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-26-8

Edição: 1^a edição

Acabamento: Digital

Formato: Eletrônico

Ano da publicação: 2016

Páginas: 39

Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Aquisição

www.ibracion.org.br
(loja virtual)