

Efectos de la utilización de **desecho de polvo de perlita natural** en **hormigones autocompactantes coloreados**

VERÓNICA ARTIGAS – ENG.; MARÍA QUINTANA – ENG./PROF., INIQUI-CONICET, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA, ARGENTINA

MARÍA POSITIERI – DR./PROF.; ÁNGEL OSHIRO – ENG./PROF., CINTEMAC, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA, ARGENTINA

A B S T R A C T

Currently, the concrete industry is looking for more eco-sustainable alternatives for its products, one option is the replacement of part of the Portland cement with wastes or by-products from other industries. Particularly, the processing of perlite rock for its expansion generates natural perlite dust (PPN), a waste that affects the environment. This work proposes the incorporation of different

percentages of PPN (up to 30%) as a replacement of cement in colored self-compacting concretes (C-SCC). The rheological properties in the fresh state and the mechanical properties in the hardened state were analyzed. The results indicate that the incorporation of PPN decreases the flowability and increases the viscosity of the mix and does not affect negatively the compressive strength for replacements up to 10%.

PALAVRAS-CHAVE: SELF-COMPACTING CONCRETE, ADDITIONS, PERLITE.

1. INTRODUCCION

El proceso productivo del clinker Portland implica un elevado consumo de materias primas naturales y de energía, generando una importante cantidad de CO₂. La influencia de la industria del cemento en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero es considerable, aportando alrededor del 7% del CO₂ generado por el hombre [1]. Buscando disminuir su impacto en el medio ambiente, una de las opciones que impulsa la industria del hormigón es el reemplazo de parte del cemento Portland por adiciones naturales, residuales o subproductos industriales para obtener hormigones que sean más eco-sustentables.

Entre los requerimientos que surgen en la sociedad actual se encuentra la necesidad de contar con un entorno vivencial más agradable. Una de las maneras de lograrlo es a través de la coloración de los elementos constructivos con los que se convive a diario. Esto ha conducido a la aparición del Hormigón Coloreado (HC). Las virtudes del HC en combinación con el Hormigón Autocompactante (HAC) abren nuevos campos de aplicación al hormigón, sumando a los bene-

ficios en los aspectos estéticos las ventajas de fluidez y capacidad de llenado además de una excelente superficie de terminación. Si además se disminuye el consumo de cemento con el reemplazo de parte del mismo por un material de desecho alcanzando un buen desempeño en estado fresco y endurecido es posible potenciar aún más los beneficios de utilizar este hormigón de características especiales.

Este trabajo combina estas ideas contribuyendo al diseño de HAC-C presentando una alternativa de construcción fuera de lo tradicional, uniendo aspectos estéticos destacados y buen desempeño.

1.1 Perlita

La perlita es una roca de origen volcánico. La extracción de este material



► **Figura 1**
Depósito de PPN en Salta (Argentina)

Fonte: Propia

se incrementó en el último tiempo haciendo necesario considerar el impacto ambiental que genera su explotación. En la zona de La Puna en Salta (Argentina) se sitúan numerosos yacimientos de perlita. Durante su proceso de extracción, se genera un polvo fino considerado desecho (el PPN) que, si bien es inerte, impacta en el medioambiente al ser acumulado al aire libre y representa un problema para la población que se encuentra en zonas aledañas. En la Figura 1 se muestra un depósito de PPN.

El PPN puede ser aprovechado como adición en los hormigones ya que, debido a su composición mineralógica, la perlita es potencialmente puzolánica. En los últimos años se desarrollaron investigaciones referentes a la inclusión de perlita cruda fina en HAC cuyos resultados son alentadores, entre ellas las de El Mir y Nehme [2] y El Mir *et al.* [3]. Es por ello que en este trabajo se plantea analizar la inclusión de este material de desecho en HAC-C.

2. MATERIALES Y PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Materiales utilizados para la elaboración de los hormigones:

- Cemento Portland CPC30 (3,20 g/cm³);
- Agregado fino natural (2,61 g/cm³) y grueso (tamaño máximo 19 mm, 2,66 g/cm³);
- Pigmentos inorgánicos a base óxido de hierro rojo (4,90 g/cm³) y amarillo (4,00 g/cm³);
- Aditivo hiperplastificante a base de policarboxilato (residuo sólido 35%);
- PPN (2,64 g/cm³), de San Antonio de los Cobres. Superficie específica BET de 5,28 m²/gr. Composición química resumida en la Tabla 1.

2.2 Dosificaciones

Se elaboró un hormigón patrón de cada color y hormigones con porcentajes variables de PPN. Se utilizó el método ACI 237 R-07 para las dosificaciones, se resumen en la Tabla 2.

La relación agua/material cementante se estableció en 0,45. La dosis

► **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

Fonte: Propia

de pigmento se mantuvo fija en 6% del peso del material cementante, correspondiendo a la dosis de saturación. El aditivo hiperplastificante se incorporó como porcentaje del peso del material cementante, su dosis fue la necesaria para mantener constante la fluidez fijada en 70 ± 2cm de diámetro de extendido medido por el Slump-flow.

2.3 Ensayos en estado fresco

Ensayos especiales para valorar las propiedades en fresco del HAC:

- Slump-flow test* (IRAM 1890-1), evalúa el flujo horizontal de HAC en ausencia de obstrucciones y la resistencia a la segregación. Se mide el diámetro final (D_F), el tiempo T₅₀ y el índice de estabilidad visual (IEV);
- J-Ring* (ASTM C1621), determina la capacidad de paso del HAC. Se mide el diámetro final (D), se compara con D_F;
- V-funnel* (EFNARC [4]), determina la capacidad de llenado del hormigón.

Se mide el tiempo T_V que tarda el hormigón en pasar a través del embudo; d) *L-box* (EFNARC [4]), evalúa el flujo del hormigón y la medida en que está sujeto a bloqueo. Se mide la altura del hormigón al comienzo y al final de la caja (H₂ y H₁).

Adicionalmente, se determinó la densidad y el contenido de aire en el hormigón por el método gravimétrico (IRAM 1562) y los tiempos de fraguado (IRAM 1662).

2.4 Ensayos en estado endurecido

Se moldearon 8 probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm por cada dosificación para determinar la resistencia a compresión axial (IRAM 1546) y el módulo de elasticidad (IRAM 1865) a 28 y 90 días.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

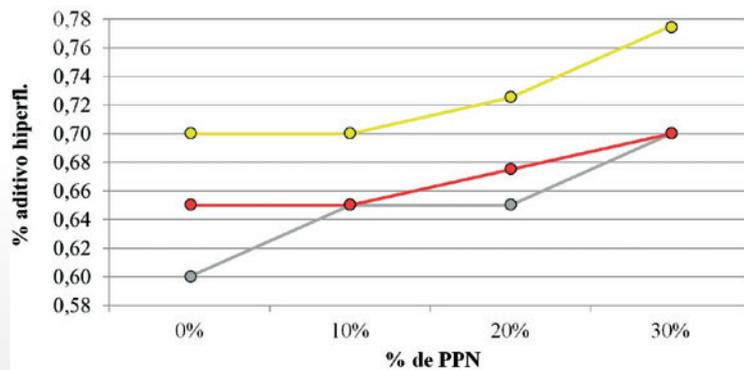
3.1 Resultados en estado fresco

En la Figura 2 se presenta la variación del porcentaje de aditivo en función de

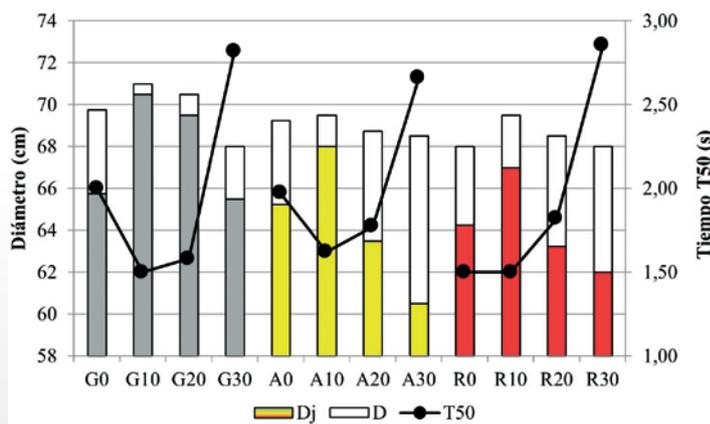
► **Tabla 2**
Dosificaciones (kg/m³)

Hormigón	Cemento	Agua	PPN	Pigmento	Ag. Fino	Ag. Grueso	Aditivo
G0	445		—	—			0,60
G10	400		45	—			0,65
G20	355		90	—			0,65
G30	310		135	—			0,70
A0	445		—	27			0,70
A10	400	200	45	27	890	851	0,70
A20	355		90	27			0,73
A30	310		135	27			0,78
R0	445		—	27			0,65
R10	400		45	27			0,65
R20	355		90	27			0,68
R30	310		135	27			0,70

Fonte: Propia



► **Figura 2**
Dosis de aditivo
Fonte: Propia



► **Figura 3**
Slump-flow y J-Ring
Fonte: Propia



► **Figura 4**
Slump-flow
Fonte: Propia

la dosis de PPN. Con el incremento del porcentaje de PPN en el hormigón se eleva levemente la dosis de aditivo requerida para mantener la fluidez; en los HAC grises la diferencia entre el patrón y el hormigón con 30% de PPN es del 17%, en los HAC-C amarillos es del 11% y en el caso de los HAC-C rojos esta diferencia es del 8%. Las partículas de pigmento amarillo presentan una forma alargada que incrementa la trabazón y disminuye la fluidez de la mezcla, lo que se pone de manifiesto en la necesidad de un aumento de la dosis de aditivo, que resulta en promedio un 12% superior comparada con el HAC gris. El mismo efecto fue observado por López [5] quien reporta un incremento en la dosis óptima de aditivo del 12,5% al incorporar 3% de pigmento amarillo en el hormigón.

La Figura 3 presenta los resultados del Slump-flow y del J-Ring. Los valores de T_{50} disminuyen ligeramente para porcentajes de PPN de 10 y 20% pero se incrementan notablemente para el 30% en los hormigones de todos los colores. La diferencia entre los diámetros de extendido con y sin el anillo japonés es mayor para los HAC-C con alto contenido de perlita.

La Figura 4 muestra el aspecto visual de algunos de los Slump-flow. Los valores de IEV obtenidos se encontraron entre 0 y 1, lo que indica que no hay segregación o es mínima.

En la Figura 5 se presentan los resultados del V-funnel y su correlación con el T_{50} ; presentan un buen ajuste con los mayores tiempos para los hormigones con 30% de PPN.

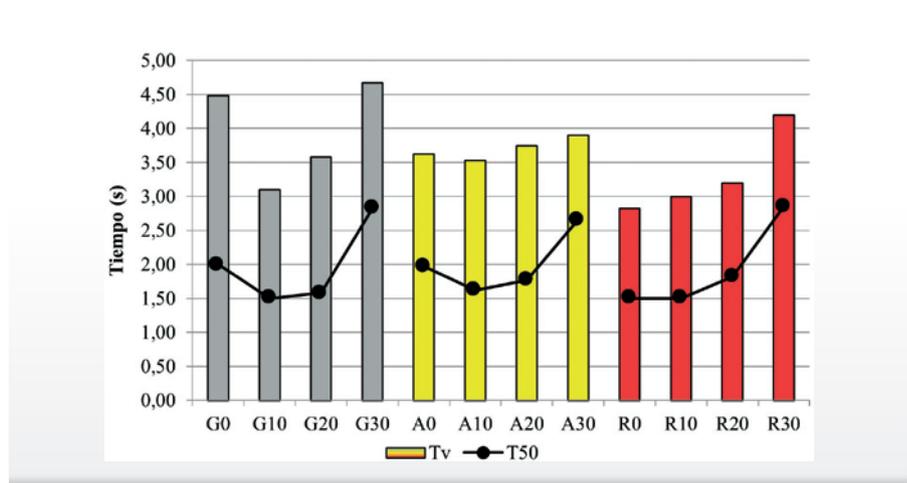
La relación de bloqueo (H_2/H_1) dada por el ensayo de L-box se mantuvo entre 0,8 y 0,9 para todos los hormigones, valores por encima del mínimo aceptable de 0,8.

De acuerdo con el EFNARC [4] todos los hormigones elaborados pertenecen a la categoría SF2 (D_f entre 66 y 75 cm), los hormigones con hasta 20% de PPN corresponden a la clase de viscosidad VS1/VF1 ($T_{50} \leq 2$ s, $T_v \leq 8$ s), mientras que los G30, A30 y R30 si bien tienen un T_v menor a 8 s su T_{50} supera ligeramente los 2 s. La clase de acuerdo a la habilidad de paso es PA2 (H_2/H_1 en L-box con tres barras es mayor o igual a 0,8), por lo que se encuentran dentro de los valores límite establecidos por las guías.

La adición de PPN hasta un 20% disminuye mínimamente la viscosidad de la mezcla de acuerdo al tiempo T_{50} , mientras que para un reemplazo por PPN del 30% se observa un marcado incremento de la viscosidad dado tanto por el T_{50} como por el T_v . Este aumento en la viscosidad genera una disminución de la capacidad de paso de la mezcla, evidenciada en mayores diferencias entre los diámetros D_f y D_j ; en los HAC-C con 30% de PPN este valor está por encima del límite de 5 cm establecido por el EFNARC [4]. Sin embargo, los resultados del L-box marcan una relación de capacidad de pasaje satisfactoria para todos los hormigones.

La Tabla 3 resume los resultados de densidad del hormigón fresco (ρ) y porcentaje de aire natural contenido en la mezcla (%A), los cuales se encuentran dentro de los límites convencionales. La incorporación de PPN disminuye levemente la densidad y aumenta el porcentaje de aire contenido en el hormigón; la diferencia de %A entre el patrón y el hormigón con 30% de PPN, tanto gris como coloreado, es de 0,8% en promedio. Este efecto también lo genera la inclusión de pigmentos, especialmente el amarillo que incorpora un promedio de 0,2% más de aire que el HAC gris con igual porcentaje de PPN.

Los tiempos de fragüe de los hormigones elaborados se muestran en la Figura 6. La incorporación de PPN



► **Figura 5**
V-funnel y T_{50}

Fonte: Propia

incrementa los tiempos en todos los casos, siendo más evidente para el final de fragüe. En los HAC grises al incorporar 30% de PPN el tiempo inicial de fragüe se incrementa un 27% y el final un 41%, para los HAC-C amarillos ambos tiempos aumentan un 21% aproximadamente y para los hormigones rojos este incremento no es tan notorio, siendo de 5% para el tiempo inicial y 14% para el final.

La inclusión de pigmentos tiene un leve efecto en los tiempos de fragüe; en los hormigones patrones el pigmento amarillo retrasa los tiempos un prome-

dio del 12% y en los rojos este valor es del 17% aproximadamente.

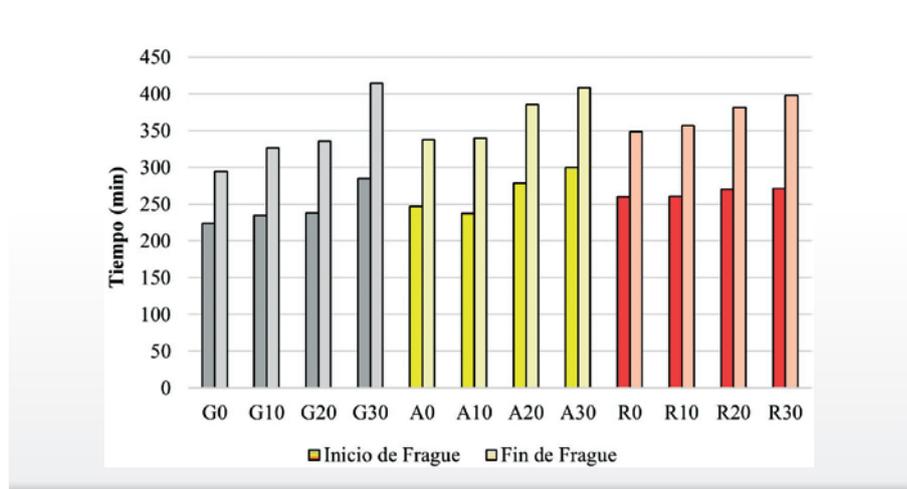
3.2 Resultados en estado endurecido

Los resultados de resistencia a compresión (promedio de 4 probetas) se muestran en la Figura 7. Los hormigones patrones presentan valores superiores a los hormigones con reemplazo de PPN, a mayor porcentaje de reemplazo de cemento menor es la resistencia alcanzada. Considerando los hormigones de todos los colores, a 28 días el reemplazo

► **Tabla 3**
Densidad y porcentaje de aire natural

Hormigón	ρ (kg/m ³)	% A
G0	2379	0,5
G10	2355	0,7
G20	2340	0,8
G30	2319	1,1
A0	2383	0,6
A10	2364	0,8
A20	2349	0,9
A30	2321	1,4
R0	2394	0,5
R10	2374	0,6
R20	2353	0,8
R30	2332	1,1

Fonte: Propia



► **Figura 6**
Tiempos de fragüe

Fonte: Propia

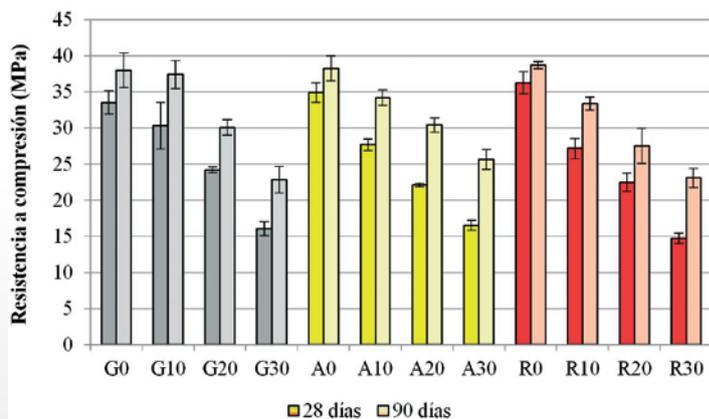


Figura 7
Resistencia a compresión a 28 y 90 días
Fuente: Propia

del 10% de PPN disminuye la resistencia a compresión un promedio del 18% respecto al patrón, un 20% de PPN reduce este valor en un 34% y para 30% de PPN alcanza una disminución del 55%.

A la edad de 90 días los hormigones con reemplazo de PPN tienen un mayor desarrollo de resistencia relativo a los 28 días; sin embargo, no superan a los hormigones patrones en ningún caso. Para los HAC el reemplazo de 10% de PPN genera un incremento de la resistencia entre ambas edades del 31% en

promedio respecto del HAC sin perlita.

En los HAC grises, el G10 alcanza a 90 días una resistencia del orden del patrón, mientras que el G20 es un 21% menor y el G30 un 40%. El HAC-C amarillo con 10% de PPN tiene una resistencia 11% menor al A0, con 20% de PPN la disminución es del 21% y con 30% de PPN alcanza el 33%. El hormigón Ro es más resistente que los R10, R20 y R30 en porcentajes del 11%, 28% y 39% respectivamente.

Si bien hay una mayor evolución de resistencia entre los 28 y 90 días en los

hormigones con incorporación de PPN, únicamente en los de color gris alcanzan el nivel del hormigón patrón para el 10% de reemplazo.

Los HAC-C patrones presentaron resistencias superiores al HAC gris patrón para ambas edades, mientras que para los HAC-C con PPN resultaron levemente por debajo de los HAC grises con PPN.

En la Tabla 4 se presentan los valores de E (promedio de 3 probetas) obtenidos a 28 y 90 días con su correspondiente desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (CV). En la Figura 8 se presentan las expresiones de E para los hormigones en estudio y para distintos reglamentos internacionales actuales. Los resultados se encuentran dentro de los valores normales con buena correlación entre resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

La línea de tendencia para E a 28 días presenta una menor pendiente en comparación con las curvas de las normas. A 90 días aumenta la pendiente y se aproxima a las dadas por las ecuaciones de las normativas. Este incremento en las pendientes entre las edades puede deberse a un mayor grado de hidratación en el hormigón que conlleva una disminución en la porosidad del mismo.

4. CONCLUSIONES

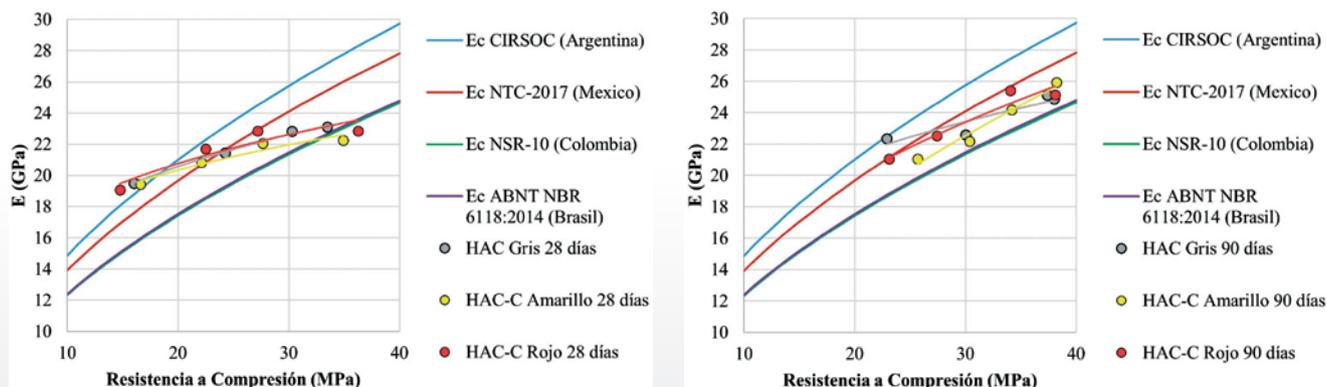
De acuerdo a los resultados pueden extraerse las siguientes consideraciones:

- Fluidez y aspecto:** El reemplazo de PPN en el HAC incrementa levemente la dosis de aditivo hiperfluidificante requerida para alcanzar una determinada fluidez, esto se debe a su mayor superficie específica y a que el reemplazo de cemento por PPN se efectúa en peso y la densidad de la perlita es menor por lo que aumenta el volumen de sólidos en la pasta y el contacto entre sus partículas. Para mantener la fluidez establecida sería necesario aumentar el contenido de agua de la mezcla o como en este caso aumentar la dosis de aditivo. La adición de pigmentos causa el mismo efecto en el hormigón, siendo más evidente en el caso del color amarillo, donde la forma de aguja de las partículas de este pigmento aumenta la demanda de agua de la mezcla o es necesario aumentar la

Tabla 4
Módulo de elasticidad

Hormigón	28 días			90 días		
	E(GPa)	σ	CV(%)	E(GPa)	σ	CV(%)
G0	23,1	0,64	2,78	24,9	0,78	3,14
G10	22,8	1,35	5,93	25,1	0,05	0,22
G20	21,4	0,31	1,43	22,6	0,52	2,29
G30	19,6	0,60	3,05	22,3	0,61	2,74
A0	22,2	0,82	3,67	26,0	0,94	3,61
A10	22,1	0,28	1,25	24,2	0,27	1,11
A20	20,9	0,50	2,40	22,1	0,40	1,81
A30	19,4	0,62	3,18	21,0	0,52	2,48
R0	22,9	0,35	1,52	25,1	0,17	0,69
R10	22,8	0,46	2,00	25,4	0,05	0,20
R20	21,7	1,01	4,68	22,5	0,33	1,47
R30	19,1	0,05	0,25	21,0	0,04	0,20

Fuente: Propia



► **Figura 8**

Curvas de correlación de E según distintos Reglamentos y para los hormigones elaborados de acuerdo al color a edades de 28 (izquierda) y 90 (derecha) días

Fonte: Propia

- dosis de aditivo. En todos los casos la observación visual fue satisfactoria.
- b) **Viscosidad plástica:** Al mantener constante el diámetro de extendido, los valores de T_{50} y T_V caracterizan directamente la viscosidad de la mezcla. La viscosidad de los hormigones con 10 y 20% de PPN es levemente menor al patrón siendo superior en aquellos con 30% de reemplazo donde se tienen mayores tiempos de T_{50} y T_V .
- c) **Capacidad de pasaje:** Con el aumento de PPN en la mezcla disminuye la capacidad de paso del hormigón, evidenciada en mayores diferencias entre D_F y D_j . Sin embargo, los hormigones grises con hasta 30% de PPN y los coloreados con hasta 20% cumplen con el límite de diferencia entre diámetros considerado aceptable para HAC. En cuanto a la relación H_2/H_1 dada por la caja en L todos los hormigones presentan una capacidad de pasaje satisfactoria.
- d) **Efecto del reemplazo de parte del cemento por perlita en otras propiedades analizadas:** Disminuye ligeramente la densidad del hormigón fresco, incrementa levemente el porcentaje de aire incorporado y retrasa los tiempos de fragüe, especialmente el tiempo final para porcentajes de reemplazo mayores al 20% y para todos los colores. En todos los casos estos efectos no se consideran relevantes para el correcto desempeño de los hormigones en estudio.
- e) **Resistencia a compresión:** El reemplazo creciente de porcentajes de PPN en los hormigones grises y coloreados disminuyó significativamente la resistencia a compresión a 28 días. La evolución de resistencia entre los 28 y 90 días creció con el mayor porcentaje de reemplazo de PPN en la mezcla; sin embargo, únicamente el HAC gris con 10% de PPN alcanzó la resistencia del patrón.
- f) **Módulo de elasticidad:** Hay una buena correlación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad para los hormigones elaborados, tanto a 28 como a 90 días, resultando una buena correlación con las curvas establecidas en varios reglamentos internacionales. Este trabajo permite vislumbrar las aptitudes del material de descarte PPN para ser incorporado en la elaboración de HAC y HAC-C, resultando factible un reemplazo de hasta 10% del cemento sin alterar negativamente las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón aunque requiriendo un ajuste en la dosis de aditivo hiperfluidificante. Es importante destacar que el aporte al desarrollo de conocimientos que busquen la utilización de materiales de desecho resulta beneficioso en términos de sustentabilidad. ☑

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Pal, "Developing Low-Clinker Ternary Blends for Indian Cement Industry", J. Inst. Eng. India Ser. A, vol. 99, pp. 433-447, May, 2018.
- [2] A. El Mir and S. G. Nehme, "Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete", J. Clean. Prod., vol. 156, pp. 507-517, Apr, 2017.
- [3] A. El Mir, S. G. Nehme and J. J. Assaad, "Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders", Heliyon, vol. 6, Jan, 2020.
- [4] EFNARC, "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", 2002.
- [5] A. López, "Diseño y Caracterización del Hormigón Autocompactante Coloreado" Ph.D. thesis, UTN-FRLP, La Plata, Arg., 2012.