

Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos aligerados con aire incorporado

R. A. Berenguer^{1*} , J. C. Mariz³ , Â. Just^{2,3} , E. C. B. Monteiro^{2,3} , P. Helene⁴ , R. A. Oliveira^{1,2} , A. M. P. Carneiro¹ 

*Autor de Contacto: templarios_pm@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.194>

Recepción: 11/08/2017 | Aceptación: 21/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

En el presente estudio busca discutir o efectuar dos incorporadores de comportamiento no mecánico y durabilidad de elementos de hormigón moldeado no locales. El experimento fue desarrollado con un conjunto de muestras con 4 masas específicas diferentes (1500 kg / m³, 1700kg / m³, 2000kg / m³ y 2300kg / m³) y 3 relaciones agua / alimento (0,63 - 1: 5, 0,50 - 1: 4, 0,43 - 1: 3), pruebas para determinar la resistencia a la compresión, absorción de agua, velocidad de profundidad y profundidad de la carbonatación. Los resultados obtenidos no son expresivos, no se comportan como indicadores de protección de armadura (absorción de agua y carbonatación), o que confirme la necesidad de usar suavizantes de agua adicionales para la estructura (tintas de protección, barras de acero inoxidable) debido a la pérdida prematura. Da durabilidad a lo largo de su vida útil.

Palabras clave: concreto ligero y aire incorporado; pared de concreto; resistencia a la compresión; capilaridad; absorción.

Citar como: R. A. Berenguer, J. C. Mariz, Â. Just, E. C. B. Monteiro, P. Helene, R. A. Oliveira, A. M. P. Carneiro (2018), "Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos aligerados con aire incorporado", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 178 - 193, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.194>

¹ Departamento de Engenharia Civil-Estruturas e Materiales, Universidad Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, Universidad Católica de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

³ Departamento de Engenharia Civil, Universidad de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

⁴ Ph.D.-Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Rua Visconde em Ouro Negro, Sao Paulo, Brasil

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.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Comparative assessment of the mechanical behaviour of aerated lightweight concrete

ABSTRACT

The present study aims to discuss the effect of air entrainment on the mechanical behavior and durability of molded concrete elements. The experiment was carried out using samples with 4 different masses (1500 kg/m³, 1700 kg/m³, 2000 kg/m³, and 2300 kg/m³) and 3 water/cement ratios (0.63-1:5, 0.50-1:4, 0.43-1:3) that were tested to determine compressive strength, water absorption, void index, and carbonation depth. The results showed significant decreases in performance and in the protection indicators of the armature (water absorption and carbonation), confirming the need for additional mitigation for the structure (protective paints, stainless steel bars), under penalty of premature loss of durability over its lifetime.

Keywords: lightweight concrete and incorporated air; concrete wall; compressive strength; capillarity; absorption.

Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado

RESUMO

O presente estudo visa discutir o efeito dos incorporadores de ar no comportamento mecânico e de durabilidade de elementos de concreto moldados no local. O experimento foi desenvolvido com a confecção de amostras com 4 diferentes massas específicas (1500kg/m³, 1700kg/m³, 2000kg/m³ e 2300kg/m³) e 3 relações água/cimento (0,63 – 1:5, 0,50 – 1:4, 0,43 – 1:3), ensaiados para determinação da resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e profundidade de carbonatação. Os resultados obtidos apontaram quedas expressivas no comportamento e indicadores de proteção da armadura (absorção de água e carbonatação), o que confirma a necessidade de utilização de meios adicionais mitigadores para a estrutura (pinturas protetoras, barras inoxidáveis), sob pena da perda prematura da durabilidade ao longo da sua vida útil.

Palavras-chave: concreto leve e ar incorporado; parede de concreto; resistência à compressão; capilaridade; absorção.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto de cemento Portland es el material estructural más importante de la construcción civil en la actualidad. Conforme lo descrito por (Helene y Andrade, 2007), aun siendo lo más reciente de los materiales de construcción de estructuras el concreto puede ser considerado como uno de los descubrimientos más interesantes de la historia del desarrollo de la humanidad y su calidad de vida. El uso de la técnica de paredes de concreto vaciadas en sitio se ha tornado una opción bastante usada en Brasil con vistas a suplir el déficit habitacional, muy notorio de carácter social. Ocurre que en locales de clima caliente es necesaria la discusión de la incomodidad térmica proporcionada a partir del uso de ese tipo de material, lo que puede ser minimizado con el concreto de menor peso específico, obtenido con la incorporación de aditivos incorporadores de aire. Esa técnica, puede llevar a una caída tanto en el comportamiento mecánico como en la protección de la entrada de agua y agentes agresivos al interior de la estructura.

Se de estaca que esos sistemas son utilizados en obras, en el país hay cerca de 30 años y según (Corsini, 2011), se divide básicamente en dos tipos que va a depender del concreto adoptado: pared de concreto con densidad normal y paredes de concreto liviano. Para la regulación del sistema de paredes de concreto convencional fue publicada en 2012 la (ABNT NBR 16055, 2012).

Para sistemas de paredes con concreto liviano espumoso existen normas que datan de 1992 (ABNT NBR 12645 y NBR 12646, 1992), las cuales están en revisión actualmente, con discusiones importantes en lo que se refiere a la mejoría del desempeño térmico asociado a la natural pérdida de protección de la armadura dada por el propio concreto. En ese sentido, la presente pesquisa evaluó por medio de un desarrollo experimental, concretos con diferentes niveles de peso específico y sus consecuencias en las principales propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) y de calidad de la pasta (absorción de agua, índice de vacíos, profundidad de carbonatación etc.) para contención de la entrada de agua al interior de la estructura.

1.1 Concretos aligerados

Conforme lo presentado por (Rossignolo, 2009), los concretos aligerados se caracterizan por la reducción del peso específico en relación con los concretos convencionales consecuencias de la sustitución de parte de los materiales sólidos por aire. Para (Romano, R. C. O. et. al., 2015), pueden ser clasificados en concreto con agregados aligerados, concreto celular y concreto sin finos. Según la (NBR 8953, 2015, los concretos son clasificados por el peso específico de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación en cuanto al peso específico. Fuente: (NBR 8953, 2015).

Nomenclatura	Peso específico seca (kg/m ³)
Concreto liviano (CL)	< 2000
Concreto normal (C)	2000 a 2800
Concreto pesado o denso (CD)	> 2800

El análisis de los pesos específicos obtenidas para grupos de concreto permite una correlación con la inclusión de vacíos en los mismos. La relación entre el contenido de aire aprisionado intencionalmente y el peso específico es bastante directa; un aumento en el volumen de aire promueve una reducción en los valores de peso específico, manteniéndose la misma relación de materiales. De esta forma, con la disminución de los pesos específicos de los concretos es obtenida a través de la inclusión de estos vacíos es su interior.

El grupo de concretos aligerados, es así de amplio y no corresponde simplemente clasificarlos por sus pesos específicos solamente. Otras características también son tomadas en consideración. La forma como son producidos, esto es que materiales y procesos son considerados en su elaboración la resistencia mecánica, la trabajabilidad, la retracción y fluencia, entre otras.

1.2 Aditivo incorporador de aire

De acuerdo con (Du, L. et. al., 2005; Whiting, D. A. et. al., 1999), los aditivos incorporadores de aire presentan la función de producir burbujas de aire, estables, distribuidas uniformemente dentro del concreto. Según (Mehta y Monteiro, 2014), los aditivos incorporadores de aire son productos tensoactivos, generalmente constituidos de sales de resinas de madera, materiales proteicos y ácidos grasos y algunos detergentes sintéticos. Para (Kumaran, K. et. al., 2004), el aire incorporado por fuerza del aditivo tiene forma de pequeñas burbujas de dimensiones entre 0,01 mm y 1,00 mm, se distancian entre sí de 0,10 mm a 0,20 mm y poseen comportamiento elástico.

Según (Torres, D. R. et. al., 2014), el aditivo incorporado a la mezcla promueve la reducción de la tensión superficial del agua. Para (Fujii, A. L. et. al., 2015 e Bauer, 1994), este actúa envolviendo las burbujas de aire presentes y actúa también envolviendo las partículas de agregado fino y de cemento. El conjunto formado entre las partículas sólidas involucradas y las burbujas de aire, también involucradas, presenta mayor estabilidad que los grupos aisladamente. A pesar de reducir la resistencia mecánica del concreto, la incorporación de aire mejora la trabajabilidad de este,

mejora el comportamiento del material durante el transporte, que es hecho con menor posibilidad de segregación y disminuye la exudación.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La definición de las proporciones utilizadas fue efectuada a partir de una adaptación del método de dosificación del Ibracon (Helene y Terzian, 1992), con el uso de muestras de concreto con 3 proporciones cemento: agregado, 1:3, 1:4 y 1:5, todas con la misma consistencia (170 ± 30) mm, lo que obligó al uso de 3 diferentes relaciones agua/cemento, respectivamente, 0,43, 0,50 y 0,63 (Tabla 2). También se ha fijado el contenido de mortero ($\alpha\%$) de 0,65 para todas las dosis, comúnmente adoptado para la elaboración de concretos aligerados.

Para cada una de esas dosificaciones fueron confeccionadas muestras con 4 niveles de peso específico en estado fresco, obtenidas con el uso de aditivos polifuncionales (Mira 93 / Grace – densidad: $1,17\text{g/cm}^3$) e incorporador de aire (SikaAer – densidad: $1,01\text{g/cm}^3$, naturaleza: líquida, base: resina sintética, pH (23°C) 10-12, concentración de sólidos(%): 4-6, con valores fijados, respectivamente, en 0,5% e 0,1% en relación al peso de cemento, lo que totalizó 12 familias de estudio. El incremento de la cantidad de vacíos fue obtenido a partir del aumento del tiempo de mezcla del concreto en la hormigonera (entre 3 y 15 minutos), una vez que la cantidad de aditivo incorporador fue mantenido constante.

Tabla 2. Presentación de los grupos y subgrupos del estudio.

Grupo(1:m)	Subgrupo	Peso específico aproximado(kg/m^3)
A (1:5) a/c=0,63	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500
B (1:4) a/c=0,50	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500
C (1:3) a/c=0,43	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500

Para la realización del estudio fueron vaciados 120 probetas cilíndricas (10x20) cm de concreto, distribuidos para la realización de los ensayos de determinación del peso específico (estado fresco y endurecido), resistencia a la compresión (7 y 28 días), absorción total y capilar y profundidad de carbonatación, conforme lo descrito en la Tabla 3. Todos los ensayos fueron realizados de acuerdo con sus respectivas normas vigentes las cuales están descritas en la Tabla 4.

Tabla 3. Descripción de la muestra utilizada en el experimento.

Grupo	m	Subgrupo	Peso específico	Ruptura (7 e 28) días	Absorción y Pesp Seca	Capilaridad	Carbonatación	Total de CPs
A	1:5	1	2300	4	2	3	1	10
		2	2000	4	2	3	1	10
		3	1700	4	2	3	1	10

		4	1400	4	2	3	1	10
B	1:4	1	2300	4	2	3	1	10
		2	2000	4	2	3	1	10
		3	1700	4	2	3	1	10
		4	1400	4	2	3	1	10
C	1:3	1	2300	4	2	3	1	10
		2	2000	4	2	3	1	10
		3	1700	4	2	3	1	10
		4	1400	4	2	3	1	10
Total CPs		-		48	24	36	12	120

Tabla 4. Ensayos y Parámetros normativos.

ENSAYOS:	Parámetros Normativos	Equivalencias Internacionales
Determinación de peso específico	ABNT NBR 9778:2009	ASTM C231/C231M:2017 ASTM C29/C29M:2017
Resistencias a compresión	ABNT NBR 5739:2007	ASTM C39/C39M:2018
Consumo de Cemento	ABNT NBR 12655:2015	ASTM C1084:2010
Absorción de agua, índice de vacíos y peso específico	ABNT NBR 9778:2009	ASTM C29/C29M:2017
Absorción capilar	ABNT NBR 9779:2012	ASTM C1585:2013
Profundidad de Carbonatación	RILEM CPC-18, 1988	-----

2.1 Producción del concreto en laboratorio

Para la producción de los concretos en laboratorio, fueron utilizados agregados secos, y mezcla previa de los agregados gruesos y finos, cemento tipo CP-V ARI similar al tipo III de la (ASTM C150, 2017). Algunas de las principales características de los agregados usados están descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Descripción de las características físicas de los agregados usados en la investigación.

Características de los agregados	Agregado fino	Agregado grueso
Módulo de finura	1,71	5,51
Diámetro máximo (mm)	2,36	12,5
Peso específico seco (g/cm ³)	2,63	2,77
Peso específico aparente (g/cm ³)	2,73	2,72
Peso específico suelta (kg/m ³)	1.620	1.470

Luego y posterior a la mezcla inicial de los materiales, fue adicionado el aditivo polifuncional junto a la parte del agua de amasado (reservando aproximadamente 500ml de agua de la mezcla para la adición del incorporador de aire). Posterior a la mezcla inicial del concreto, fueron determinados sus asentamientos y sus respectivos Pesos específico. Seguidamente el aditivo incorporador fue adicionado junto con el restante de agua, de acuerdo con la Figura 1.

Posterior al trabajo de producción, el peso específico fresco de los concretos fue medida hasta se llegar al valor aproximado de aquellas pretendidas y estipuladas inicialmente.



Figura 1. Mezcla de los materiales en hormigonera. Sin aditivo incorporador (a) y con aditivo incorporador (b).

3. RESULTADOS

En edades previstas posterior al vaciado y curado húmedo, las muestras fueron encaminadas para ensayos diversos previstos para el estado endurecido. La Figura 2 presenta gráfico con los pesos específicos de acuerdo con la (ABNT NBR 9778, 2009), y sus respectivas equivalencias (ASTM C231/C231M y ASTM C29/C29M, 2017), obtenidas en los concretos frescos para los diferentes grupos de estudio evaluados.

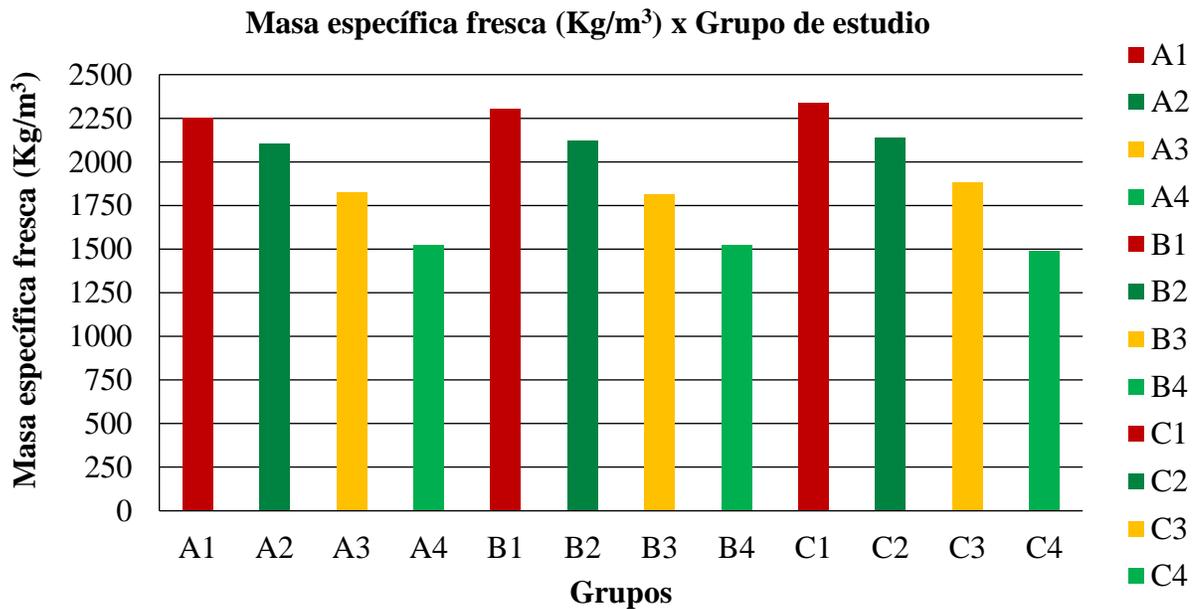


Figura 2. Gráfico peso específico x grupos del estudio

La Fig. 3 presenta el gráfico como las concentraciones de aire incorporado obtenidos en el concreto fresco para los diferentes grupos de estudio evaluados.

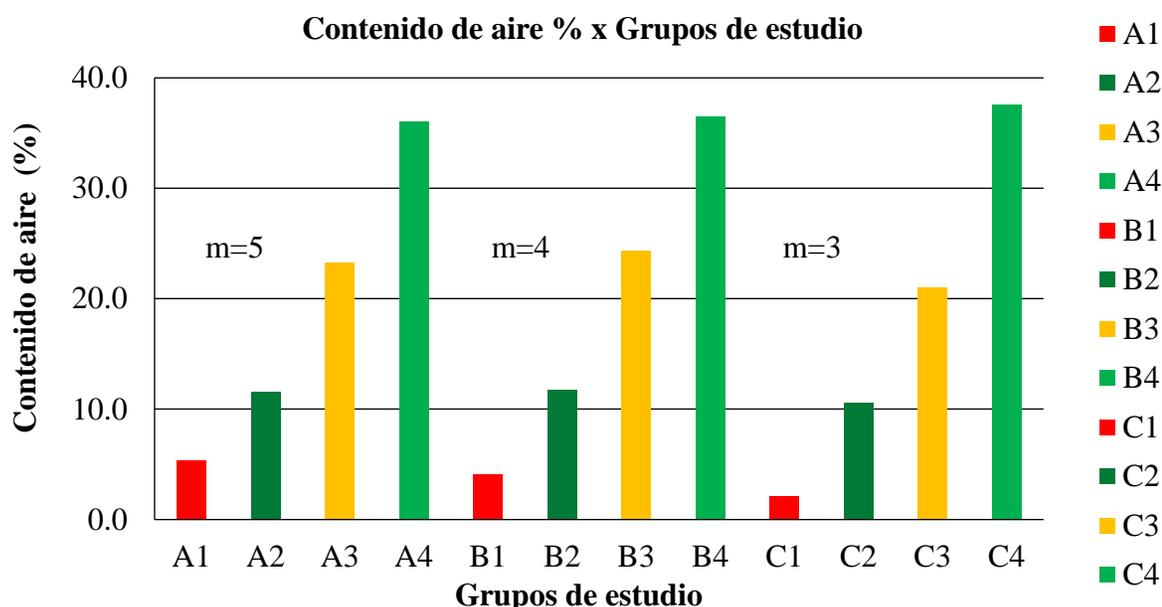


Figura 3. Gráfico de contenido de aire x grupos de estudio

3.1 Relación entre peso específico en estado fresco y resistencia a la compresión

En la Tabla 6 son presentados los resultados encontrados en los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días y 28 días de acuerdo con la (ABNT NBR 5739, 2007), equivalente a (ASTM C39/C39M, 2018), comparados con el peso específico definido en el objetivo inicial del trabajo. Para cada familia de estudio los ejemplares fueron compuestos por dos probetas cilíndricas, siendo presentado el mayor valor del par ensayado, considerado representativo de la muestra.

Tabla 6. Resultados de los ensayos de resistencia promedio a la compresión

Grupo	Peso específico del estudio (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)	
		7 días	28 días
A (1:5) a/c = 0,63	2300	32,6	40,8
	2000	18,4	23,3
	1700	7,7	9,8
	1500	1,8	2,1
B (1:4) a/c = 0,50	2300	43,2	54,6
	2000	20,7	29,2
	1700	7,6	11,0
	1500	1,1	1,8
C (1:3) a/c = 0,43	2300	50,0	65,4
	2000	22,1	28,7
	1700	14,7	18,0
	1500	1,6	2,2

A partir de los datos obtenidos y presentados de resistencias a la compresión (Tabla 4) y de las relaciones agua-cemento (Tabla 3) para los concretos considerados en el presente estudio, fueron generados los gráficos (Figuras 8, 9 y 10) para el análisis de la influencia de la relación agua/cemento y de la resistencia a la compresión para cada grupo de Peso específico evaluado.

La correlación existente entre la relación agua/cemento y la resistencia, factor determinante en el estudio de los concretos se constató por el modelo de Abrams, es nítidamente notorio para los concretos de clase convencional (pesos específicos de 2300kg/m³ y 2000kg/m³). Para los concretos de clase liviano, contemplados en el estudio (pesos específicos de 1700kg/m³ y 1500kg/m³) la relación a/c por sí sola no es el único parámetro determinante del comportamiento relativo a la resistencia.

Una vez que se adicionó el aditivo incorporador de aire a la mezcla, se verificó visualmente una mejora de la cohesión de los materiales, sin que hubiese habido variaciones en los valores de los asentamientos en concretos con pesos específicos de 2300, 2000 y 1700kg/m³. Ahora los concretos con pesos específicos de 1500kg/m³ presentaron pequeños aumentos en los valores de los asentamientos, variando entre 190mm y 210mm.

De acuerdo con la (ABNT NBR 12655, 2015), equivalente a (ASTM C1084, 2010), de forma general, los consumos de cementos en concretos con menores pesos específicos se muestran inferiores a los de mayores pesos, como era esperado por (Romano, R. C. O. et. al., 2017), ya que la inclusión de los aditivos incorporadores de aire, para niveles semejantes de consistencia. Además de eso para un valor de “m” mayor, estaba asociado a consumos de cemento menores. Sigue presentado en la Figura 4 el gráfico con las curvas obtenidas para cada peso específico de los consumos de cemento calculados.

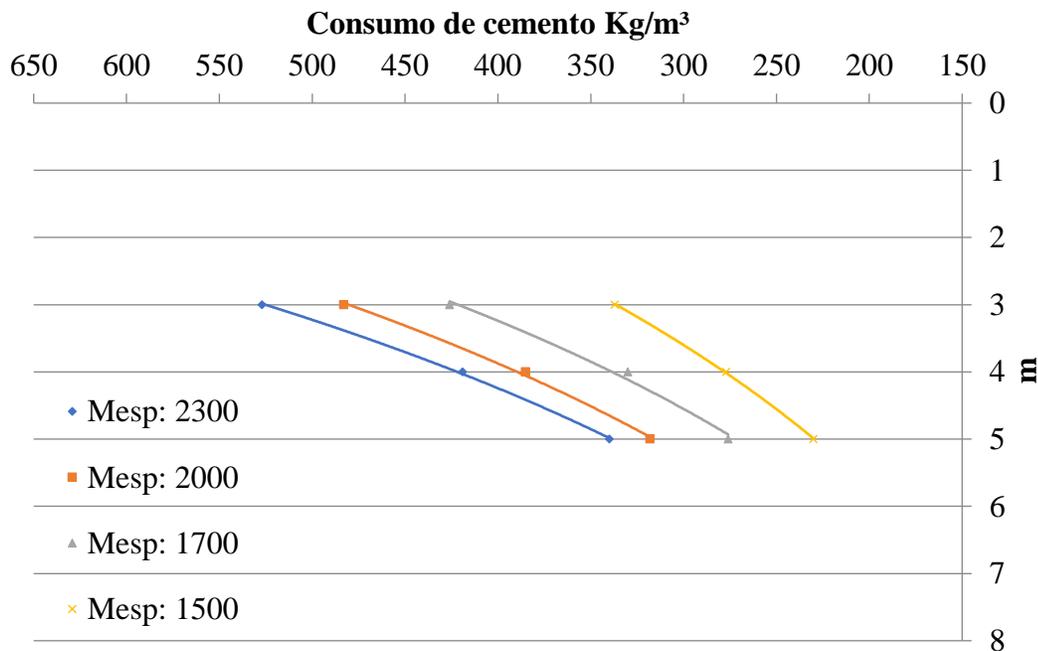


Figura 4. Consumo de cemento para los pesos específicos

3.2 Relación entre peso específico fresco y absorción de agua, índice de vacíos y peso específico seco.

Los pesos específicos secos, obtenidos por medio del ensayo del concreto endurecido, presentaron variaciones en relación con los valores iniciales de aquellos estipulados para los parámetros de peso específico del estudio. Eso se debe a las diferentes pérdidas de agua a que los concretos están sometidas una vez en el proceso de endurecimiento.

Los valores obtenidos en los ensayos de índices de vacíos corroboran la idea de que los concretos con pesos específicos menores presentan índice de vacíos mayores en su estructura, además de eso, presentaron valores mayores de absorción de agua. Para la visualización de estas características, la Figura 5 relaciona las 3 propiedades.

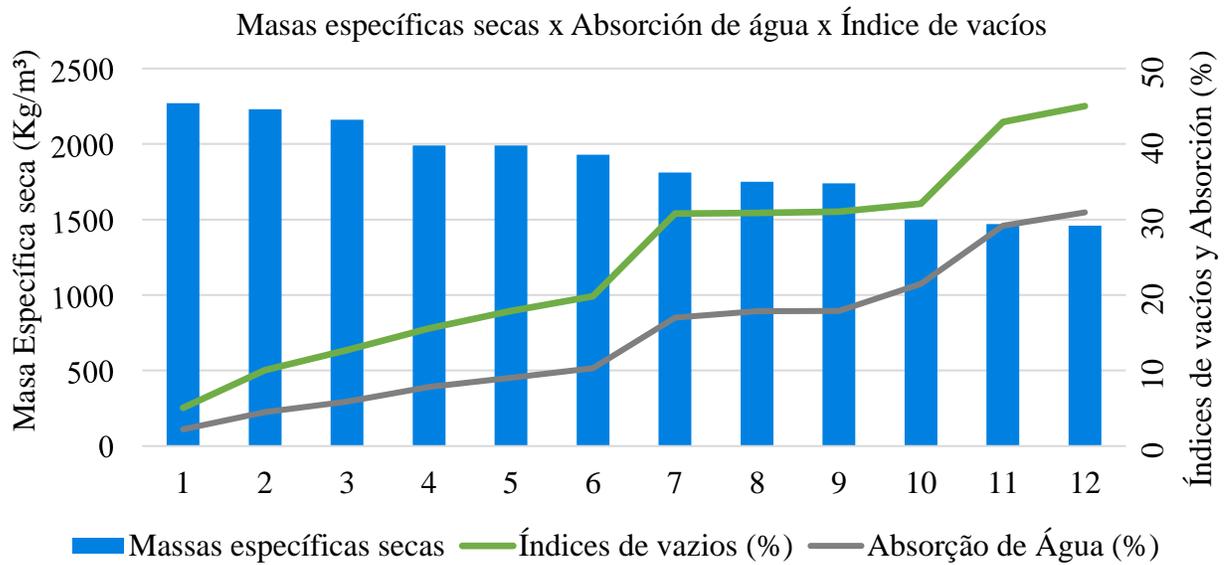


Figura 5. Relaciones entre pesos específicos, índice de vacíos y absorción de agua

La Figura 6 presenta la relación entre el peso específico y el índice de vacíos para las muestras, de acuerdo con la NBR 9778 (2009), con la norma internacional equivalente (ASTM C29/C29M, 2017).

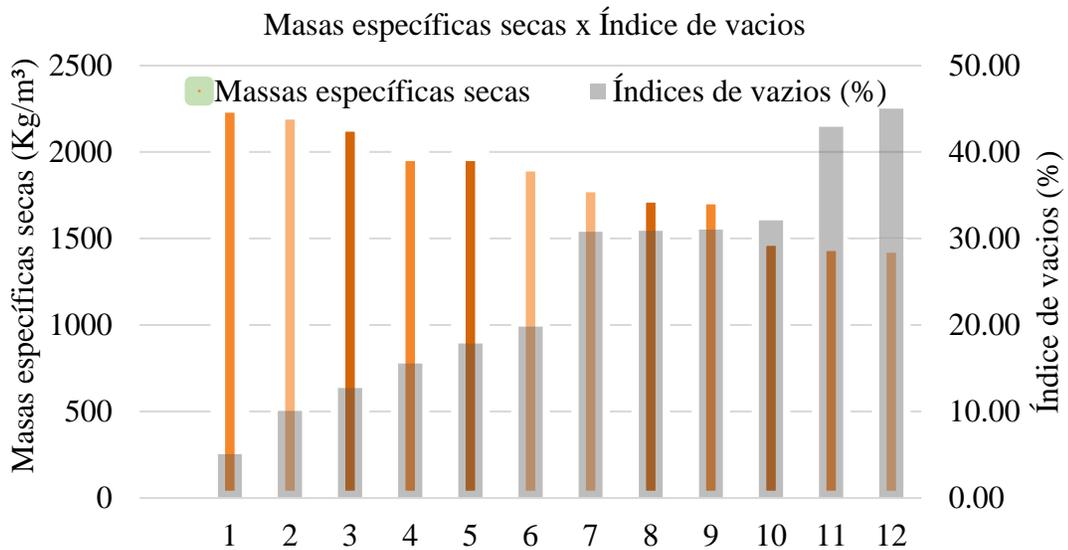


Figura 6. Relaciones entre pesos específicos, índice de vacíos.

3.3 Relación entre peso específico fresco y absorción capilar

Fue objeto del estudio evaluar las tasas de absorciones capilares de los concretos dosificados, teniendo como objetivo verificar las propiedades involucradas y su reflejo evidenciado en la capilaridad. Por tanto, fueron ensayados los concretos de las 12 dosis presentes en el estudio de acuerdo con las normas (ABNT NBR 9779, 2012), equivalente a (ASTM C1585, 2013).

En el caso específico de la absorción capilar la relación de mayor influencia observada estaba asociado al peso específico del concreto (obtenida a través de la incorporación de aire), además de eso la relación agua/cemento se mostró más influyente que en los ensayos de absorción, índice de vacíos y peso específico seca.

La Figura 7 ilustra el gráfico obtenido de las propiedades consideradas, peso específico y absorción capilar para las 12 dosis clasificadas en orden decreciente de pesos específicos.

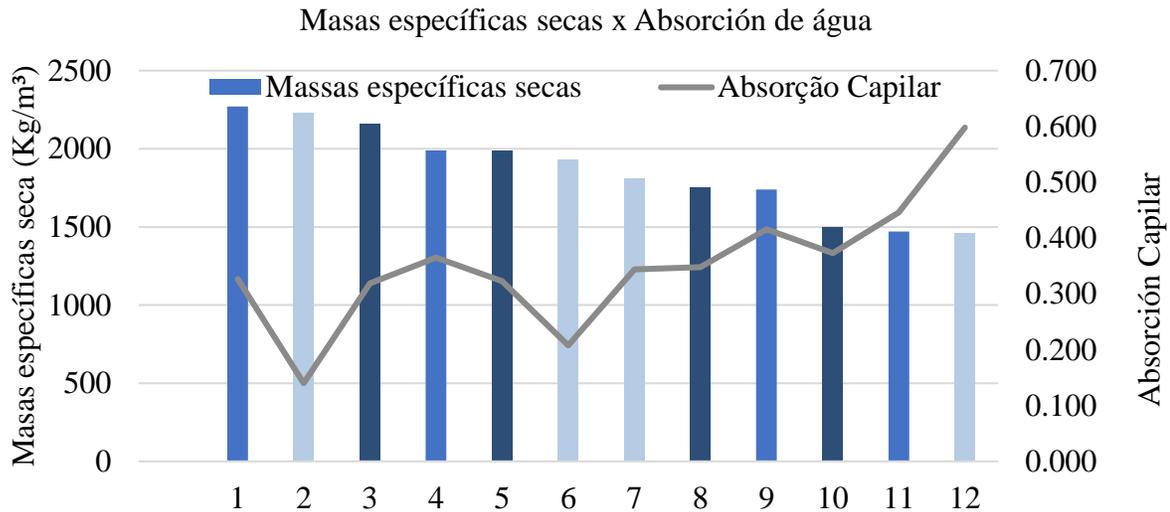


Figura 7. Relaciones entre pesos específicos, absorción capilar

Además, se observa que para los concretos sin uso de aditivo incorporador la absorción capilar acompañó muy bien la variación en la relación agua/cemento. Para los demás concretos, hubo variaciones en los resultados. Sin embargo, es posible visualizar a través de la interpretación gráfica una tendencia de la curva de absorción en crecer a medida en que los valores de pesos específicos disminuyen. Puede decirse que la variable relación a/c, si tiene influencia, pero una influencia no unívoca en el comportamiento presentado por los resultados.

3.4 Relación entre masa específico seco y resistencia a compresión

Evaluando la relación existente entre los pesos específicos de los concretos en estado seco y los valores de resistencia a la compresión obtenidos fueron realizados en los gráficos de las Figuras 8, 9 y 10, evidenciando que las propiedades poseen fuerte correlación.

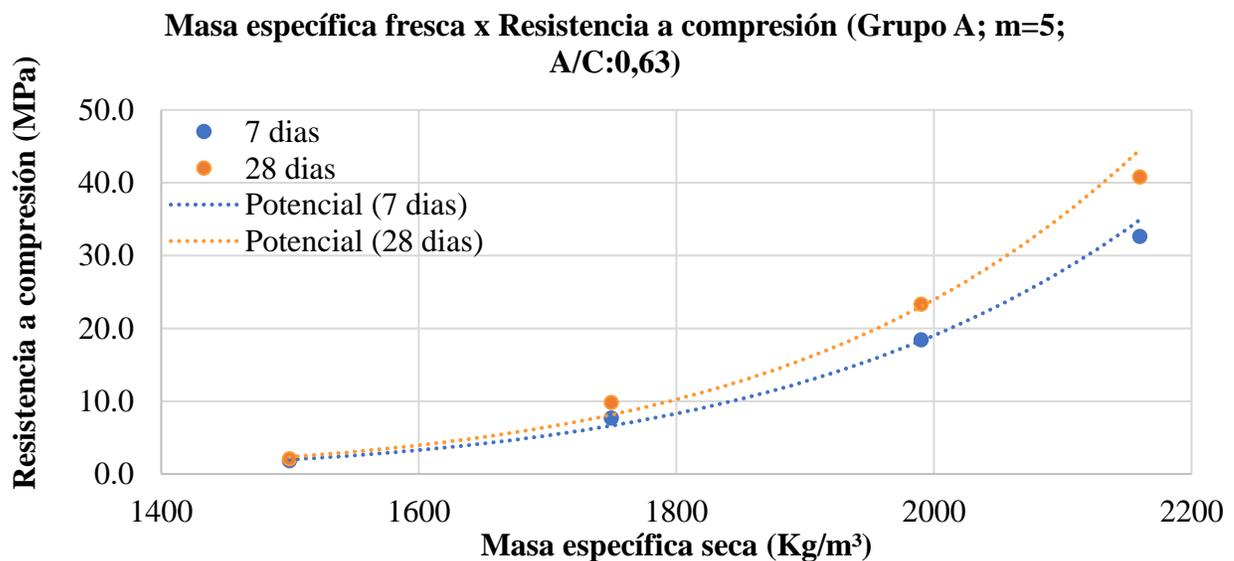


Figura 8. Resistencia a la compresión y masas específica - m=5

Masa específica fresca x Resistencia a la compresión (Grupo A; m=5; A/C:0,63)

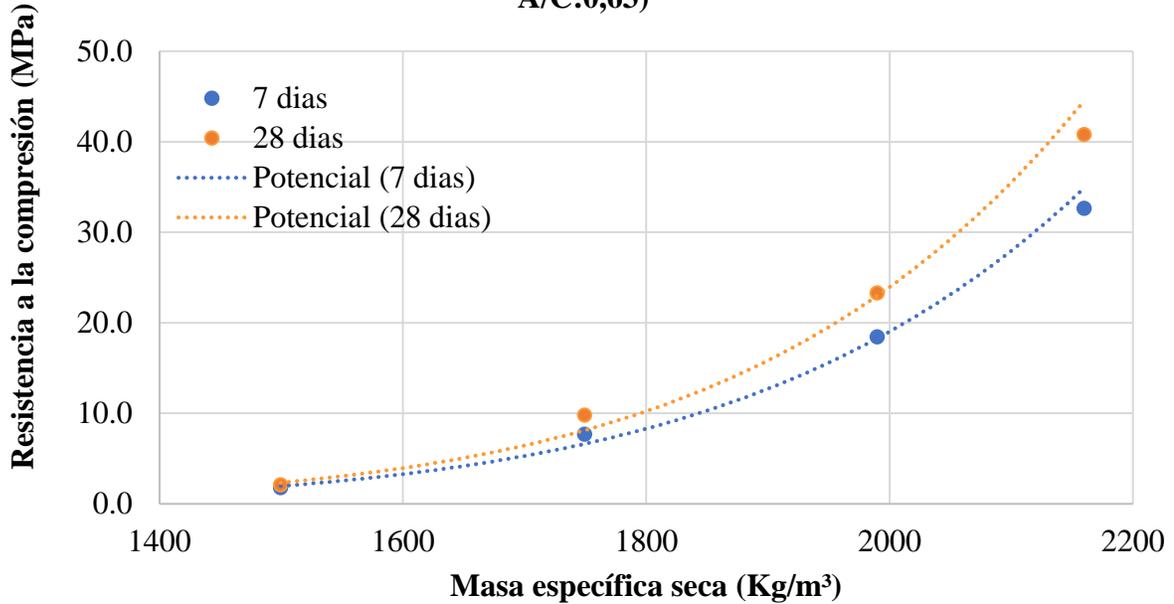


Figura 9 - Resistencias a la compresión y pesos específicos - m=4

Masa específica fresca x Resistencia a compresión (Grupo C; m=3; A/C:0,43)

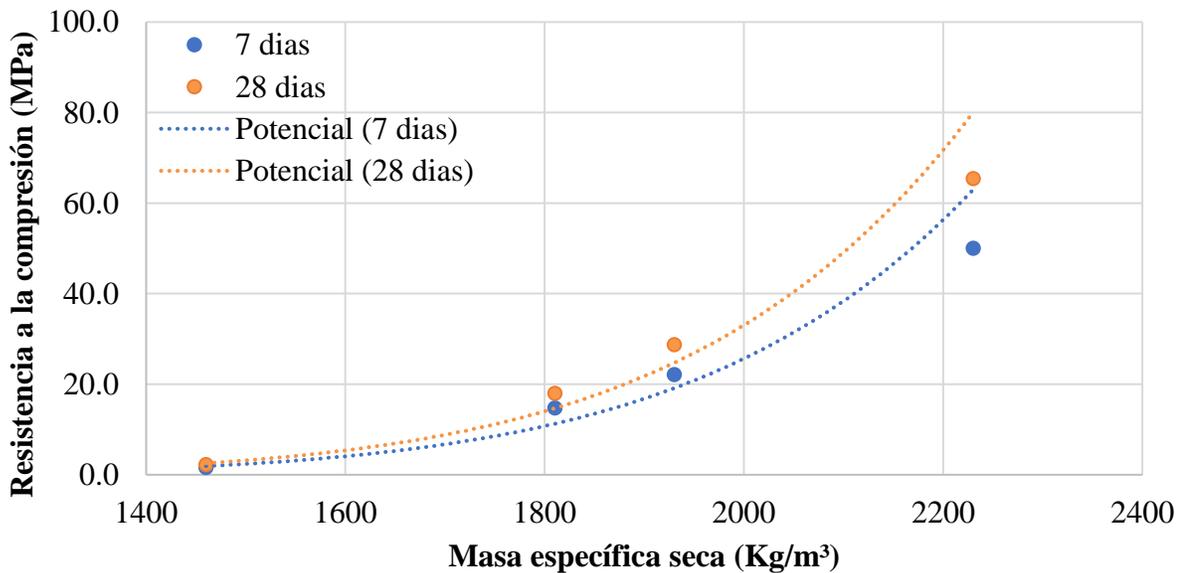


Figura 10. Resistencias a la compresión y pesos específicos - m=3

Los resultados reflejan valores de resistencia a la compresión mayores para mayores densidades. Se puede observar que, con el aumento de los vacíos en concretos, acarrear en menores pesos específicos, ocurre también la reducción de sus resistencias mecánicas. Por la (NBR 12646, 1992), valores de resistencia a la compresión para lotes de concretos celulares deben atender al mínimo de 2,5MPa.

Se verificó que para un mismo concreto, como era previsto el aumento de la incorporación de aire promovía una reducción en el específico y en consecuencia la reducción de las resistencias

mecánicas de los mismos. Esta variación tuvo un comportamiento influenciado principalmente por dos propiedades: el aumento de los vacíos en los concretos y la relación agua/cemento utilizada. Se constató en el estudio que los concretos con pesos específicos cercanos de 1500 kg/m³, es decir, aquellos con mayor incorporación de aire, tenían su comportamiento prácticamente guiado, del punto de vista de las resistencias mecánicas, por la cantidad de vacíos en su interior, quedando en un segundo plano la relación agua/cemento adoptada.

Los resultados presentados corroboran con los resultados obtenidos por Teixeira Filho (1992), en su desarrollo experimental, donde uno de los resultados observados fue la distinción de la influencia de la relación agua/cemento cuando son observadas diferentes clases de peso específico. Para concretos con pesos específicos de 1100 kg/m³ y 1300 kg/m³, el aumento de la relación agua/cemento de 0,5 para 0,6 presentó como resultado un aumento en la resistencia de estos. Ya para la clase de concretos con peso específico de 1700 kg/m³ y 1900 kg/m³, el mismo aumento en la relación agua/cemento de 0,5 para 0,6, presentó como resultado valores menores de resistencia a la compresión.

En este estudio es observado también, por ejemplo, para las dosis con pesos específicos de 1500 kg/m³, donde para una relación agua/cemento de 0,63 la resistencia a la compresión axial es superior a una dosificación con relación agua/cemento de 0,50.

Para los resultados obtenidos, se puede considerar que los cambios en la influencia de las relaciones a/c, en peso en la resistencia a la compresión axial se justifican por la reducción de SUS pesos específicos y aumento de los vacíos de los concretos (Teixeira Filho, 1992).

Además de eso se observó en el estudio que concretos con peso específico en el orden de 1900 kg/m³ poseen propiedades mecánicas interesantes, con valores de resistencia a la compresión en el rango de los 20 MPa, aliadas a los beneficios posibles de la incorporación de aire, tales consumos reducidos menor peso propio de los elementos y mejorías en el confort térmico y acústico frente al concreto convencional.

Tratándose de los fenómenos de capilaridad, los concretos evaluados presentaron aumento en la absorción capilar con la disminución de SUS pesos específicos.

Es sabido que la permeabilidad de los concretos es un factor crucial para la durabilidad de estos. Cuanto más permeable los concretos, más susceptibles a las acciones deletéreas de agentes presentes en el ambiente. Así que atención especial debe ser dada cuando el uso de concretos que presentan índices de vacíos elevados y alta capilaridad, como el caso presente de este estudio.

3.5 Relación entre peso específico en estado fresco y profundidad de carbonatación.

Con la intención de evaluar los concretos estudiados desde el punto de vista del fenómeno de carbonatación, fueron separadas 12 probetas, restantes de los ensayos de absorción total, para ser utilizados en la evaluación. Una vez que el ensayo anterior no era destructivo, se puede evaluar estos concretos sometidos a la acción atmosférica del ambiente del laboratorio, donde permanecieron por períodos de 110 días de exposición.

Para la realización del ensayo se utilizó el procedimiento descrito en (Rilem, 1988), y se siguió la sección de las probetas de dimensiones 10x20 cm, a 1/3 de una de sus caras.

Posterior a la sección, las probetas fueron rociadas con una solución de fenolftaleína (2%) para identificación del pH. La zona de transición donde ocurre el avance del frente de carbonatación, por poseer pH abajo de 9 tiende a quedar incoloro en presencia de la solución la zona con pH superior a 9, tiene a quedar con coloración violeta.

Así, fue posible identificar el frente de carbonatación formado y se observa en las Figuras 10 y 11.



Figura 10. Medición de la profundidad de carbonatación para peso específico de 1500 kg/m³



Figura 11. Medición de la profundidad de carbonatación para peso específico de 1700 kg/m³

Tabla 5. Valores medidos de profundidad de carbonatación

Grupo	A/C	1:m	Subgrupo	Peso específico (kg/m ³)	Profundidad de Carbonatación (mm)
A	0,63	1:5	1	2300	0,97
			2	2000	1,87
			3	1700	3,54
			4	1500	18,75
B	0,5	1:4	1	2300	0
			2	2000	1,27
			3	1700	1,59
			4	1500	18,92
C	0,43	1:3	1	2300	0
			2	2000	0,84
			3	1700	1,6
			4	1500	10,68

En esta evaluación, desde el punto de vista de profundidad de carbonatación, se verifica que los concretos aligerados poseen avance de frente de carbonatación muy superior a los concretos convencionales. Aunque aquellos concretos con una relación agua/cemento reducida, en el caso de los del grupo C (a/c:0,5), presentaron, para los pesos específicos menores (1500 y 1700 kg/m³) profundidades de carbonatación significativas para os 110 días de edad del ensayo.

4. CONCLUSIÓN

El presente estudio evaluó las repercusiones de la reducción del peso específico del concreto en las propiedades mecánicas y de durabilidad. El interés por el uso de concretos con incorporador de aire ha crecido bastante, sobre todo en obras de pared vaciadas en el local, que generalmente poseen muchas repeticiones. Esa solución se destaca por la tendencia a un mejor comportamiento térmico, cuando es comparado al concreto de densidad normal, lo que es imprescindible en regiones de temperaturas elevadas, como el noreste brasileño. Asociado a eso es esperada una reducción expresiva del consumo de cemento en la medida que se reduce la densidad del concreto, a pesar de la eventual compensación financiera que resulta de la inclusión de los aditivos incorporadores de aire. Por ello es fundamental que esos beneficios sean confrontados como el eventual comprometimiento de la durabilidad de las piezas por cuenta de la mayor facilidad a la entrada de agentes agresivos es muy notorio para los iones cloruro y el anhídrido carbónico.

Los ensayos encontrados comprobaron la fuerte influencia de la reducción del peso específico del concreto en su comportamiento mecánico y principalmente de durabilidad. Se percibe incrementos expresivos de la absorción de agua (3% a 30%), índice de vacíos (5% a 50%), absorción capilar ($0,2 \text{ g/cm}^2$ a $0,6 \text{ g/cm}^2$) y en la profundidad de carbonatación (0 mm a 18,9 mm) en la medida en que se disminuye el peso específico del concreto.

Así, los resultados apuntan para la necesidad de adoptar de medidas de protección superficial del concreto para su uso en regiones agresivas, a fin de permitir los beneficios (especialmente financieros y económicos) de la técnica, sin comprometimiento de su durabilidad. En lo que se refiere a los agentes de protección, es preciso también evaluar la necesidad imperativa de mantenimiento, a fin de asegurar su adecuado comportamiento a lo largo de los años.

5. REFERENCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), *NBR 12645: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 16055: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), *NBR 12646 - Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local - Especificação*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM International. (2017). *ASTM C150/C150M-17 Standard Specification for Portland Cement*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-17
- ASTM International. (2013). *ASTM C1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1585-13>

- ASTM International. (2010). *ASTM C1084-10 Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1084-10>
- ASTM International. (2017). *ASTM C231/C231M-17a Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0231_C0231M-17A
- ASTM International. (2018). *ASTM C39/C39M-18 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18
- ASTM International. (2017). *ASTM C29/C29M-17a Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-17A
- Bauer, L. A. F. (1994), *Materiais de Construção*: 5.ed. Rio de Janeiro: ABDR Afiliada, v.1.f
- Corsini, R. (2011) *Paredes normatizadas. Norma inédita para paredes de concreto moldadas in loco entra em vigor e promete impulsionar uso da tecnologia em edificações*. In: Revista Técnica, No. 183. Dezembro de 2011. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/183/paredes-normatizadas-norma-inedita-para-paredes-de-concreto-moldadas-287955-1.aspx>>
- Du, L., Folliard, J. K. (2005), *Mechanisms of air entrainment in concrete*. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 8, p. 1463-1471. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>
- Fujii, A. L., Torres, D. R., Romano, R. C. O., Cincotto, M. A., Pileggi, R. G. (2015), *Impact of superplasticizer on the hardening of slag Portland cement blended with red mud*. Construction & Building Materials, v. 101, p. 432-439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.057>
- Helene, P., Andrade, T. (2007), *Concreto de cimento Portland*. In: Isaia, Geraldo Cechella. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON. V2, Cap. 27, p. 905 -944.
- Kumaran, K., Lackey, J., Normandin, N., Van Reenen, D., Tariku, F. (2004), "*Heat, Air and Moisture Transport Properties of Several North American Bricks and Mortar Mixes*", Journal of Testing and Evaluation, v. 32, n. 5, pp. 383-389. <https://doi.org/10.1520/JTE12079>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2014), *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2ª ed. IBRACON. p. 313.
- Helene, P., Terzian P. (1992), *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*, São Paulo, SP, Ed. Pini.
- RILEM TC (1994). *CPC 18 Measurement of hardened concrete carbonation depth, 1988*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. e-ISBN: 2351580117, Publisher: E & FN SPON, Pages: 56 – 58, RILEM.
- Rossignolo, J. A. (2009), *Concreto Leve Estrutural. Produção, Propriedades Microestrutura e Aplicações*. São Paulo: Editora Pini.
- Romano, R. C. O., Torres, D. R., Pileggi, R. G. (2015), *Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars*. Construction & Building Materials, v. 82, p. 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.067>
- Romano, R. C. O., Maciel, M. H., Cincotto, M. A., Pileggi, R. G. (2017), *Monitoring of hardening of Portland cement suspension by Vicat test, oscillatory rheometry, and isothermal calorimetry*. APPLIED RHEOLOGY, v. 27, p. 36006. <http://doi.org/10.3933/ApplRheol-27-36006>
- Teixeira Filho, F. J., Tezuka, Y. (1992), *Considerações Sobre Algumas propriedades dos Concretos Celulares Espumosos*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo. EPUSP.
- Torres, D. R., Fujii, A. L., Romano, R. C. O., Pileggi, R. G. (2014), *Impacto da rota de incorporação de ar nas propriedades de materiais cimentícios*. Ambiente Construído (Online), v. 14, p. 141-152. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000200010>

Whiting, D. A., Saak, A. W., Jennings, H. M. (1999), *The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste*. Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 9, September 1999, Pages 1491-1496. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00124-6)