

Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar 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 Contato: templarios_pm@hotmail.com

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

Recepção: 11/08/2017 | Aceitação: 21/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

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.

Citar como: R. A. Berenguer, J. C. Mariz, Â. Just, E. C. B. Monteiro, P. Helene, R. A. Oliveira, A. M. P. Carneiro (2018), "Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar 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 Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

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

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

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

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo: No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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.

Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos ligeros con aire incorporado

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.

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais importante da construção civil na atualidade. Conforme descrito por (Helene e Andrade, 2007), mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, o concreto pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida.

O uso da técnica de paredes de concreto moldadas no local tem se tornado uma opção bastante empregada no Brasil com vistas ao suprimento do déficit habitacional, notadamente de caráter social. Ocorre que, em locais de clima quente, é necessária a discussão do desconforto térmico proporcionado a partir do uso desse tipo de material, o que pode ser minimizado com concreto de menor massa específica, obtido com a incorporação de aditivos incorporadores de ar. Essa técnica, contudo, pode levar a uma queda tanto no comportamento mecânico quanto na proteção à entrada de água e agentes agressivos ao interior da estrutura.

Destaca-se que esses sistemas são utilizados em obras no país há cerca de 30 anos e, segundo (Corsini, 2011), dividem-se basicamente em dois tipos, a depender do concreto adotado: parede de

concreto com densidade normal e paredes de concreto leve. Para a regulamentação do sistema de paredes de concreto convencional, foi publicada em 2012 a (ABNT NBR 16055, 2012). Para sistemas de paredes com concreto leve espumoso existem normas que datam de 1992 (ABNT NBR 12645 e NBR 12646, 1992), as quais estão em revisão atualmente, com discussões importantes no que se refere à melhoria no desempenho térmico, associada à natural perda de proteção da armadura dada pelo próprio concreto. Nesse sentido, a presente pesquisa avaliou, por meio de um desenvolvimento experimental, concretos com diferentes níveis de massa específica e as suas consequências nas principais propriedades mecânicas (resistência à compressão) e de qualidade da pasta (absorção de água, índice de vazios, profundidade de carbonatação etc.) para contenção da entrada de água ao interior da estrutura.

1.1 Concretos leves

Conforme apresentado por (Rossignolo, 2009), os concretos leves se caracterizam pela redução da massa específica em relação aos concretos convencionais, consequência da substituição de parte dos materiais sólidos por ar. Para (Romano, R. C. O. et. al., 2015), podem ser classificados em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos. Segundo a (NBR 8953, 2015), os concretos são classificados pela massa específica de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Classificação quanto à massa específica. Fonte: (NBR 8953, 2015).

| Nomenclatura | Massa específica seca (kg/m ³) |
|-------------------------------|--|
| Concreto leve (CL) | < 2000 |
| Concreto normal (C) | 2000 a 2800 |
| Concreto pesado ou denso (CD) | > 2800 |

A análise das massas específicas obtidas para grupos de concreto permite uma correlação com a inclusão de vazios nos mesmos. A relação entre o conteúdo de ar aprisionado intencionalmente e a massa específica é bastante direta; um aumento no volume do ar promove uma redução nos valores de massa específica, mantendo-se a mesma relação de materiais. Desta forma, a diminuição das massas específicas dos concretos é obtida através da inclusão destes vazios em seu interior.

O grupo de concretos leves, ainda assim é amplo e não caberia simplesmente classificá-los pelas suas massas específicas, tão somente. Outras características também são levadas em consideração. A forma como são produzidos, isto é, que materiais e processos são considerados na sua elaboração, a resistência mecânica, a trabalhabilidade, a retração e fluência, entre outras.

1.2 Aditivo incorporador de ar

De acordo com (Du, L. et. al., 2005; Whiting, D. A. et. al., 1999), os aditivos incorporadores de ar apresentam a função de produzir bolhas de ar, estáveis, distribuídas uniformemente dentro do concreto. Segundo (Mehta e Monteiro, 2014), os aditivos incorporadores de ar são produtos tensoativos, geralmente constituídos de sais de resinas de madeira, materiais proteicos e ácidos graxos e alguns detergentes sintéticos. Para (Kumaran, K. et. al., 2004), o ar incorporado por força do aditivo tem forma de pequenas bolhas de dimensões entre 0,01 mm e 1,00 mm, distanciam-se entre si de 0,10 mm a 0,20 mm e possuem comportamento elástico.

Segundo (Torres, D. R. et. al., 2014), o aditivo incorporado à mistura promove a redução da tensão superficial da água. Para (Fujii, A. L. et. al., 2015 e Bauer, 1994), ele atua envolvendo as bolhas de ar presentes e age também envolvendo as partículas de agregado miúdo mais finas e de cimento. O conjunto formado entre as partículas sólidas envolvidas e as bolhas de ar, também envolvidas, apresenta maior estabilidade que os grupos isoladamente. Apesar de reduzir a resistência mecânica do concreto, a incorporação de ar melhora a trabalhabilidade do mesmo, melhora o comportamento

do material durante o transporte, que é feito com menor possibilidade de segregação e diminui a exsudação.

2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A definição das proporções utilizadas foi efetuada a partir de uma adaptação do método de dosagem do Ibracon (Helene e Terzian, 1992), com o uso de amostras de concreto com 3 proporções cimento:agregado, 1:3, 1:4 e 1:5, todas com a mesma consistência (170 ± 30) mm, o que obrigou a utilização de 3 diferentes relações água/cimento, respectivamente, 0,43, 0,50 e 0,63 (Tabela 2). Também foi fixado o teor de argamassa ($\alpha\%$) de 0,65 para todas as dosagens, comumente adotado para elaboração de concretos leves.

Para cada uma dessas dosagem foram confeccionadas amostras com 4 níveis de massa específica no estado fresco, obtidas com o emprego de aditivos polifuncional (Mira 93 / Grace – densidade: $1,17\text{g/cm}^3$) e incorporador de ar (SikaAer – densidade: $1,01\text{g/cm}^3$, natureza: líquida, base: resina sintética, pH (23°C) 10-12, teor de sólidos(%): 4-6, com valores fixados, respectivamente, em 0,5% e 0,1% em relação à massa de cimento, o que totalizou 12 famílias de estudo. O incremento do teor de vazios foi obtido a partir do aumento no tempo de mistura do concreto na betoneira (entre 3 e 15 minutos), uma vez que o teor de aditivo incorporador foi mantido constante.

Tabela 2. Apresentação dos grupos e subgrupos do estudo.

| Grupo(1:m) | Subgrupo | Massa específica aproximada(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 a realização do estudo foram moldados 120 corpos de prova cilíndricos (10x20) cm de concreto, distribuídos para a realização dos ensaios de determinação da massa específica (estado fresco e endurecido), resistência à compressão (7 e 28 dias), absorção total e capilar, e profundidade de carbonatação, conforme melhor descrito na Tabela 3. Todos os ensaios foram realizados de acordo com suas respectivas normas vigentes, as quais, estão descritas na Tabela 4.

Tabela 3. Descrição da amostragem utilizada no experimento.

| Grupo | m | Subgrupo | Massa específica | Ruptura (7 e 28) dias | Absorção e Mesp Seca | Capilaridade | Carbonatação | 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 |

Tabela 4. Ensaio e Parâmetros normativos.

| ENSAIOS: | Parâmetros Normativos | Equivalências Internacionais |
|---|------------------------------|--|
| Determinação da massa específica | ABNT NBR 9778:2009 | ASTM C231/C231M:2017 ASTM C29/C29M:2017 |
| Resistências à compressão | ABNT NBR 5739:2007 | ASTM C39/C39M:2018 |
| Consumo de Cimento | ABNT NBR 12655:2015 | ASTM C1084:2010 |
| Absorção de água, índice de vazios e massa específica | ABNT NBR 9778:2009 | ASTM C29/C29M:2017 |
| Absorção capilar | ABNT NBR 9779:2012 | ASTM C1585:2013 |
| Profundidade de Carbonatação | RILEM CPC-18, 1988 | ----- |

2.1 Produção do concreto em laboratório

Para a produção dos concretos em laboratório, foram utilizados agregados secos, e mistura prévia dos agregados graúdos e miúdos, cimento do tipo CP-V ARI similar ao tipo III da (ASTM C150, 2017). Algumas das principais características dos agregados empregados estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Descrição das características físicas dos agregados usados na pesquisa.

| Características dos agregados | Agregado miúdo | Agregado graúdo |
|--|-----------------------|------------------------|
| Módulo de finura | 1,71 | 5,51 |
| Diâmetro máximo (mm) | 2,36 | 12,5 |
| Massa específica seca (g/cm ³) | 2,63 | 2,77 |
| Massa específica aparente (g/cm ³) | 2,73 | 2,72 |
| Massa unitária solta (kg/m ³) | 1.620 | 1.470 |

Logo após a mistura inicial dos materiais, foi adicionado o aditivo polifuncional junto à parte da água de amassamento (reservando aproximadamente 500ml da água da betonada para a adição do incorporador de ar). Após a mistura inicial do concreto, foram determinados os seus abatimentos e suas respectivas massas específicas. Na sequência, o aditivo incorporador foi adicionado junto com o restante da água, de acordo com a Figura 1.

Após o trabalho de produção, a massa específica fresca dos concretos foi medida até se chegar ao valor aproximado daquelas pretendidas e estipuladas inicialmente.



Figura 1. Mistura dos materiais em betoneira. Sem aditivo incorporador (a) e com aditivo incorporador (b).

3. RESULTADOS

Nas idades previstas após a moldagem e cura úmida, as amostras foram encaminhadas para ensaios diversos previstos para o estado endurecido. A Figura 2 apresenta gráfico com as massas específicas de acordo com a (ABNT NBR 9778, 2009), com suas respectivas equivalências (ASTM C231/C231M e ASTM C29/C29M, 2017), obtidas nos concretos frescos para os diferentes grupos de estudo avaliados.

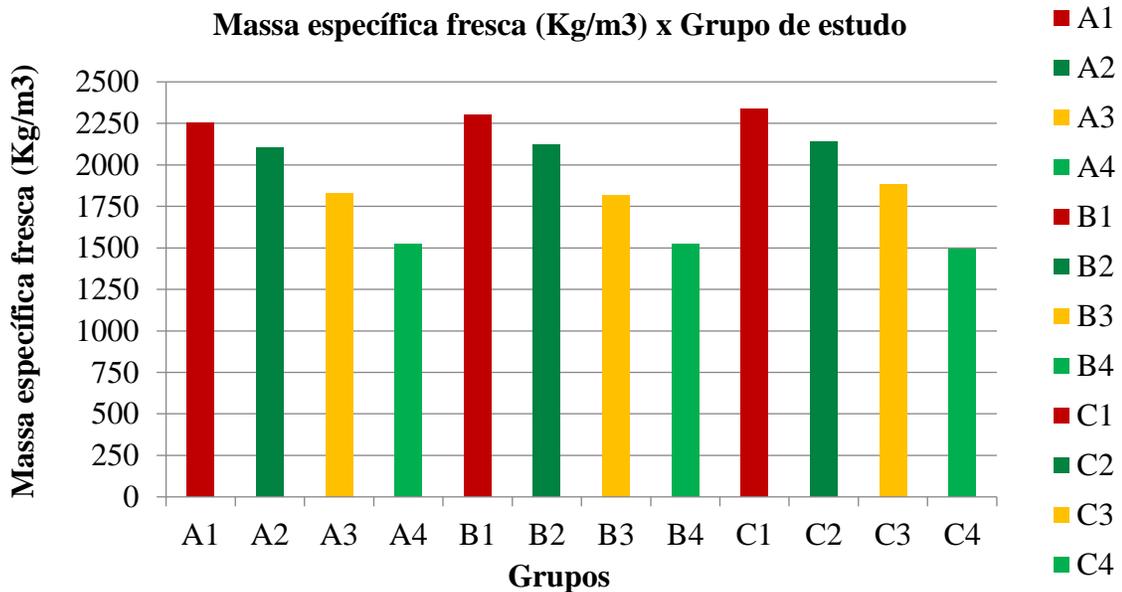


Figura 2. Gráfico massa específica x grupos do estudo

A Fig. 3 apresenta o gráfico com os teores de ar incorporado obtidos no concreto fresco para os diferentes grupos de estudo avaliados.

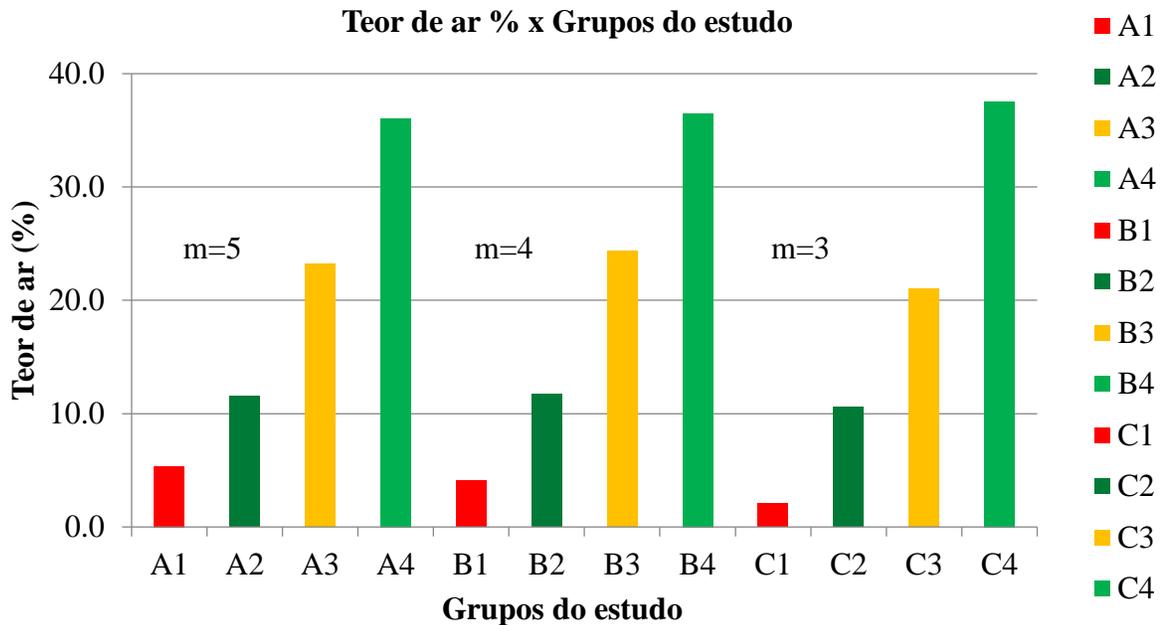


Figura 3. Gráfico do teor de ar x grupos do estudo

3.1 Relação entre massa específica no estado fresco e resistência à compressão

Na Tabela 6 são apresentados os resultados encontrados nos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias de acordo com a (ABNT NBR 5739, 2007), equivalente a (ASTM C39/C39M, 2018), comparados com a massa específica definida no objetivo inicial do trabalho. Para cada família de estudo os exemplares foram compostos por dois corpos de prova cilíndricos, sendo apresentado o maior valor do par ensaiado, considerado representativo da amostra.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de resistência média à compressão

| Grupo | Massa específica do estudo (kg/m ³) | Resistência à compressão (MPa) | |
|-----------------------|---|--------------------------------|---------|
| | | 7 dias | 28 dias |
| 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 dos dados obtidos e apresentados de resistências à compressão (Tabela 4) e das relações água-cimento (Tabela 3) para os concretos considerados no presente estudo, foram gerados os gráficos (Figuras 8, 9 e 10) para análise da influência da relação água/cimento e da resistência à compressão para cada grupo de massa específica avaliada.

A correlação existente entre a relação água/cimento e a resistência, fator determinante no estudo dos concretos e constatado pelo modelo de Abrams, é nitidamente observada para os concretos da classe convencional (massas específicas de 2300kg/m³ e 2000kg/m³). Já para os concretos da classe leve, contemplados no estudo (massas específicas de 1700kg/m³ e 1500kg/m³), a relação a/c por si só não é o único parâmetro determinante do comportamento relativo à resistência.

Uma vez que se adicionou o aditivo incorporador de ar à mistura, verificou-se visualmente uma melhora na coesão dos materiais, sem que houvesse, no entanto, variações nos valores dos abatimentos dos concretos com massas específicas de 2300, 2000 e 1700kg/m³. Já os concretos com massas específicas de 1500kg/m³ apresentaram pequenos aumentos nos valores dos abatimentos, variando entre 190mm e 210mm.

De acordo com a (ABNT NBR 12655, 2015), equivalente a (ASTM C1084, 2010), de forma geral, os consumos de cimentos dos concretos com menores massas específicas se mostram inferiores aos de maiores massas, como era esperado por (Romano, R. C. O. et. al., 2017), por conta da inclusão dos aditivos incorporadores de ar, para níveis semelhantes de consistência. Além disso, para um valor de “m” maior, estava associado consumos de cimento menores. Segue apresentado na Figura 4 o gráfico com as curvas obtidas para cada massa específica dos consumos de cimento calculados.

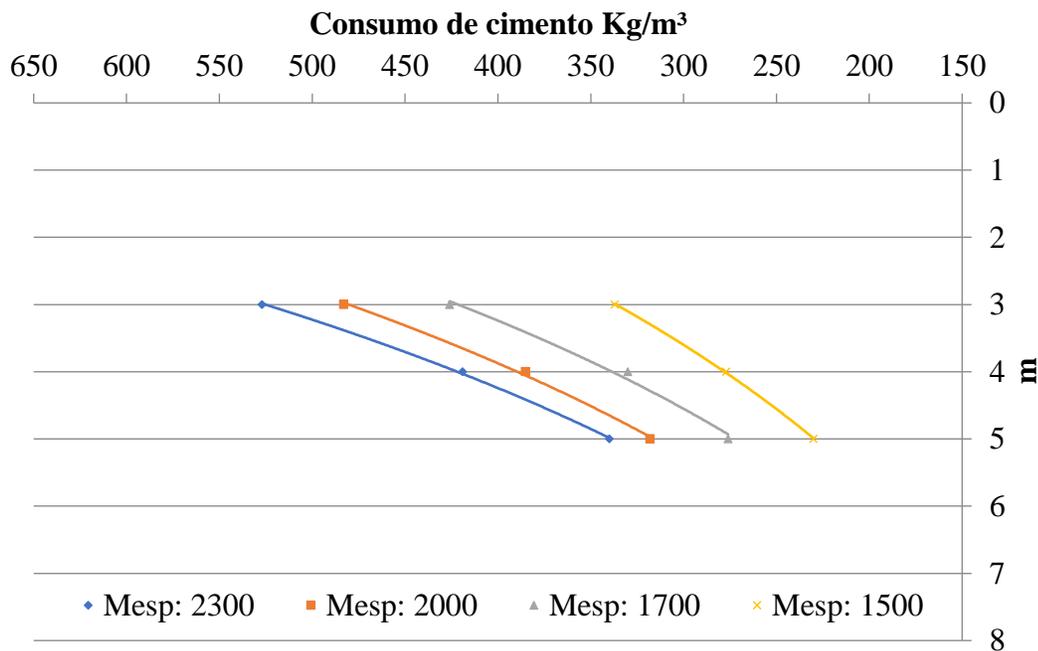


Figura 4. Consumo de cimento para as massas específicas

3.2 Relação entre massa específica fresca e absorção de água, índice de vazios e massa específica seca.

As massas específicas secas, obtidas por meio do ensaio do concreto endurecido, apresentaram variações em relação aos valores iniciais e àqueles estipulados para as faixas de massa específica do estudo. Isso se deve às diferentes perdas de água a que os concretos estão submetidos uma vez no processo de endurecimento.

Os valores obtidos nos ensaios de índices de vazios corroboram a ideia de que concretos com massas específicas menores apresentam índice de vazios maiores em sua estrutura, além de com isso, apresentarem valores maiores de absorção de água. Para visualização destas características, a Figura 5 relaciona as 3 propriedades.

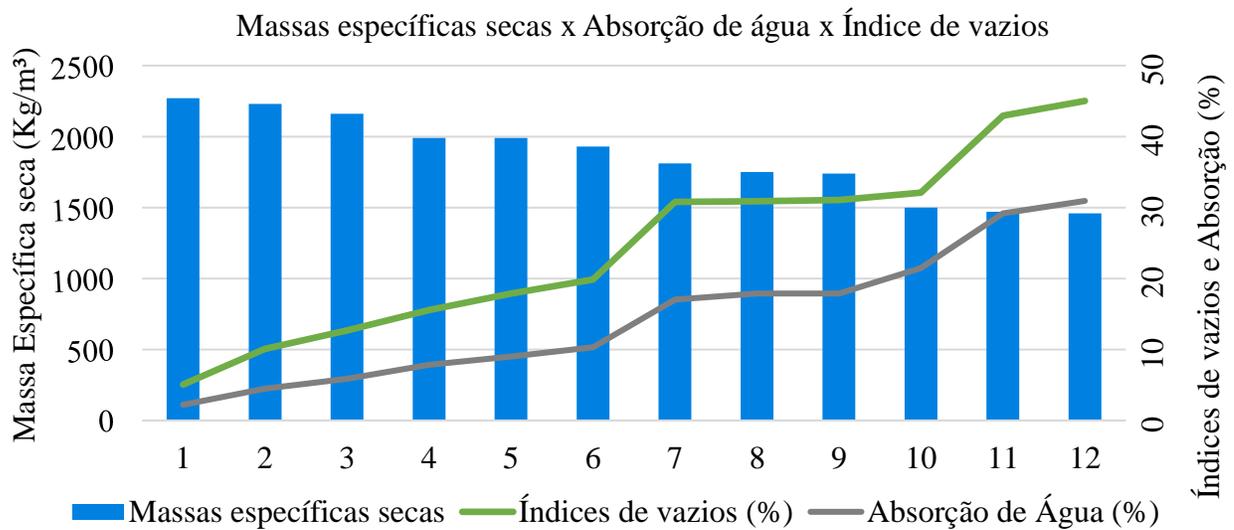


Figura 5. Relações entre massas específicas, índice de vazios e absorção de água

A Figura 6 apresenta a relação entre a massa específica e o índice de vazios para as amostras, de acordo com a NBR 9778 (2009), com norma internacional equivalente (ASTM C29/C29M, 2017).

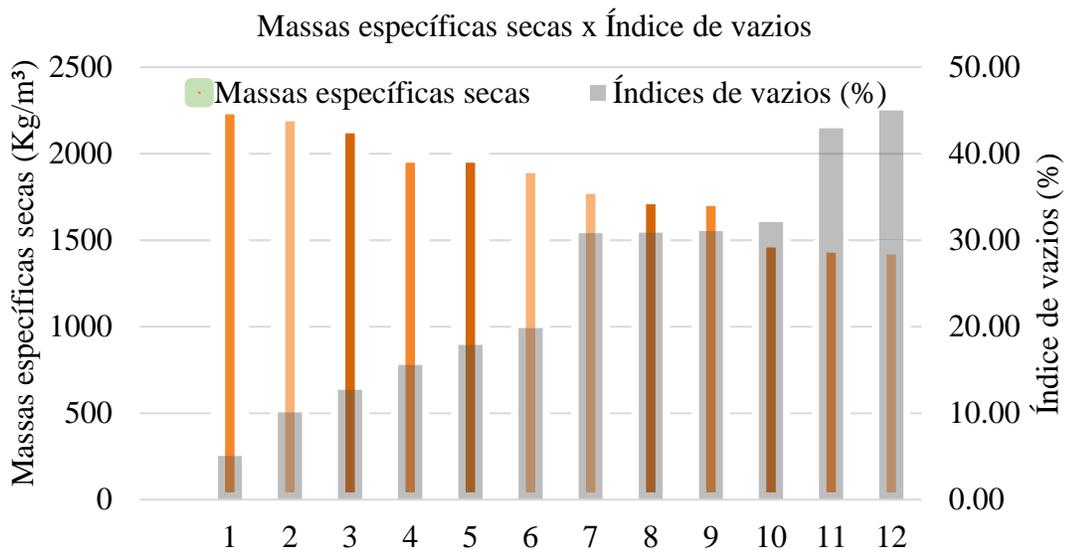


Figura 6. Relações entre massas específicas, índice de vazios.

3.3 Relação entre massa específica fresca e absorção capilar

Foi ainda objeto do estudo avaliar as taxas de absorções capilares dos concretos dosados, tendo como objetivo verificar as propriedades envolvidas e seu reflexo evidenciado na capilaridade. Para tanto, foram ensaiados os concretos das 12 dosagens presentes no estudo, de acordo com as normas (ABNT NBR 9779, 2012), equivalente a (ASTM C1585, 2013).

No caso específico da absorção capilar, a relação de maior influência observada estava associada ainda, à massa específica do concreto (obtida através da incorporação de ar) mas, além disso a relação água/cimento mostrou-se muito mais influente que nos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica seca.

A Figura 7 ilustra o gráfico obtido das propriedades consideradas, massa específica e absorção capilar para as 12 dosagens classificadas em ordem decrescente de massas específicas.

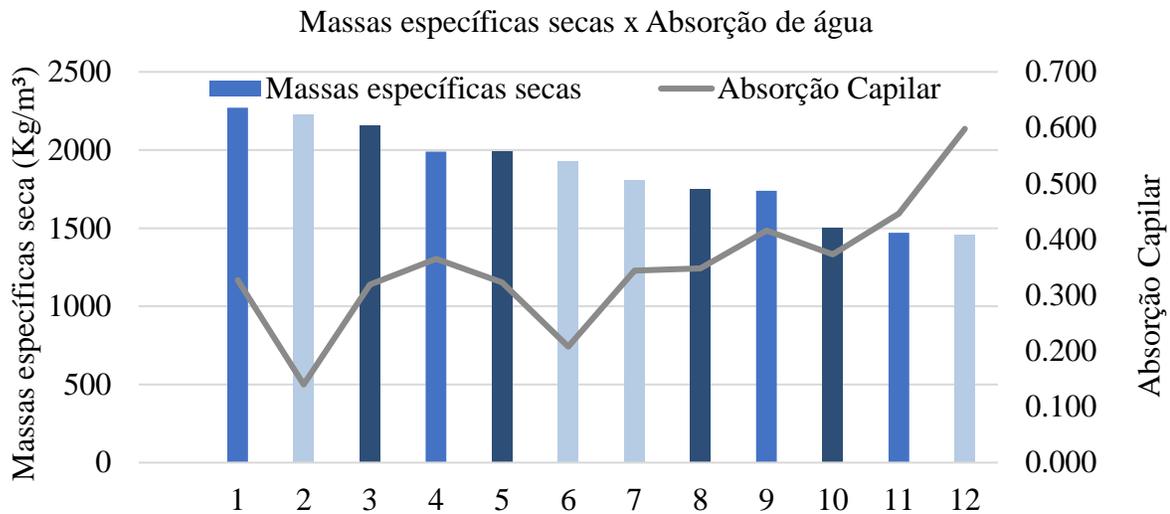


Figura 7. Relações entre massas específicas, absorção capilar

Observa-se ainda que, para os concretos sem o uso de aditivo incorporador, a absorção capilar acompanhou muito bem a variação na relação água/cimento. Para os demais concretos, houve variações nos resultados. Mesmo assim, é possível visualizar através de interpretação gráfica uma tendência da curva de absorção em crescer a medida em que os valores de massas específicas diminuem. Pode-se dizer que a variável relação a/c, tem influência sim, mas uma influência não unívoca no comportamento apresentado pelos resultados.

3.4 Relação entre massa específica seca e resistência à compressão

Avaliando a relação existente entre as massas específicas dos concretos no estado seco e os valores de resistência à compressão obtidos foram realizados os gráficos das Figuras 8, 9 e 10, evidenciando que as propriedades possuem forte correlação.

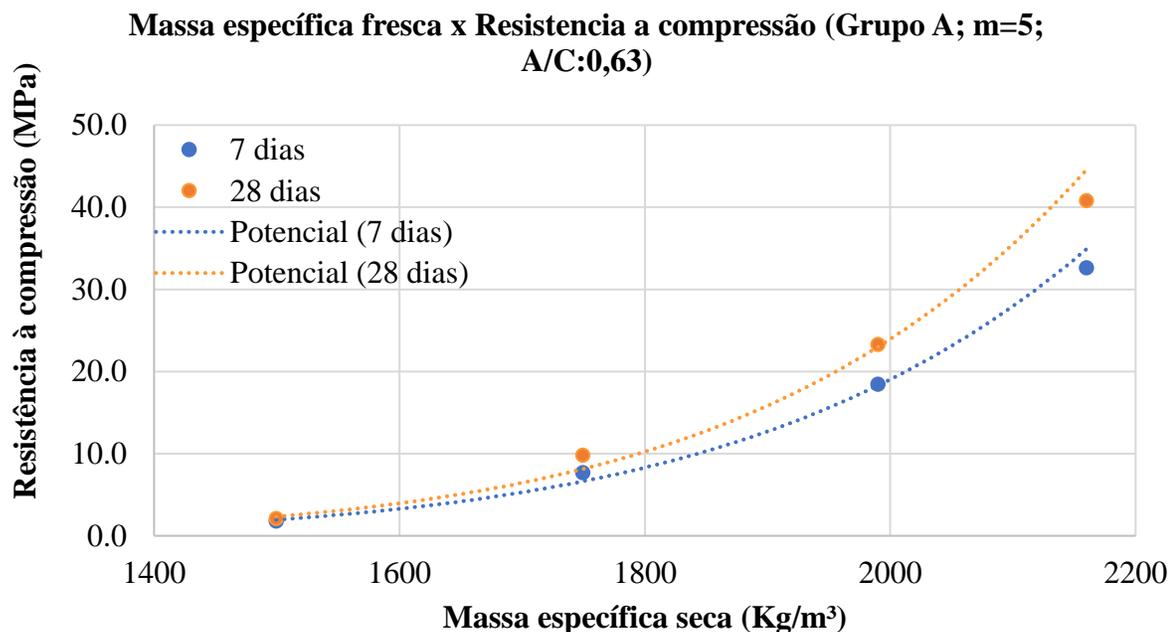


Figura 8. Resistências à compressão e massas específicas - m=5

**Massa específica fresca x Resistencia a compressão (Grupo A; m=5;
A/C:0,63)**

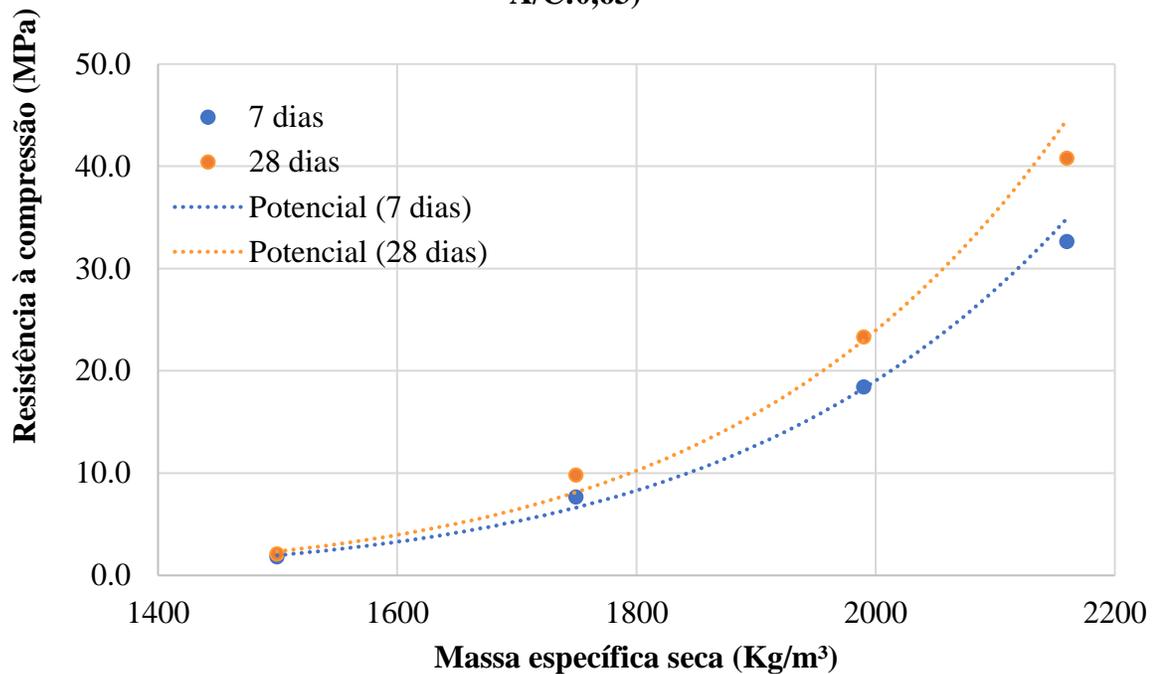


Figura 9 - Resistências à compressão e massas específicas - m=4

**Massa específica fresca x Resistencia a compressão (Grupo C; m=3;
A/C:0,43)**

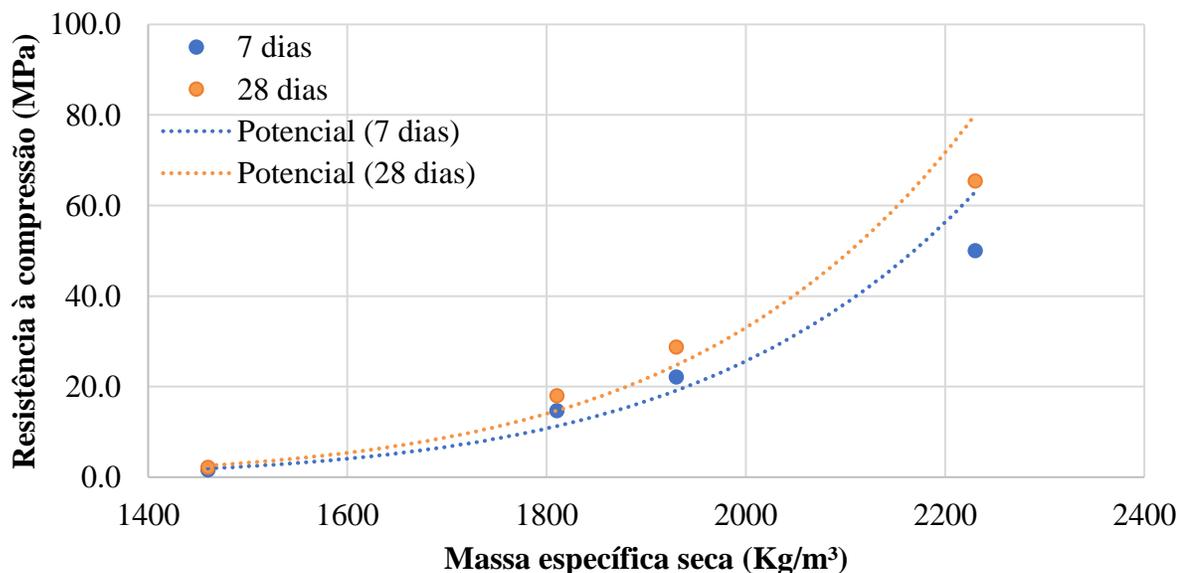


Figura 10. Resistências à compressão e massas específicas - m=3

Os resultados refletem valores de resistência à compressão maiores para maiores densidades. Pode-se observar que, com o aumento dos vazios nos concretos, acarretando em menores massas específicas, ocorre também a redução das suas resistências mecânicas. Pela (NBR 12646, 1992), valores de resistência à compressão para lotes de concretos celulares devem atender ao mínimo de 2,5MPa.

Verificou-se que para um mesmo concreto, como era previsto, o aumento da incorporação de ar promovia uma redução na massa específica, e conseqüente redução nas resistências mecânicas dos mesmos. Esta variação teve um comportamento influenciado principalmente por duas propriedades: o aumento dos vazios nos concretos e a relação água/cimento utilizada.

Constatou-se no estudo que os concretos com massas específicas próximas de 1500 kg/m³, ou seja, aqueles com maior incorporação de ar, tinham seu comportamento praticamente guiado, do ponto de vista das resistências mecânicas, pela quantidade de vazios em seu interior, ficando em um segundo plano a relação água/cimento adotada.

Os resultados apresentados, corroboram com os resultados obtidos por Teixeira Filho (1992), em seu desenvolvimento experimental, onde um dos resultados observados foi a distinção da influência da relação água/cimento quando observadas diferentes classes de massa específicas. Para concretos com massas específicas de 1100 kg/m³ e 1300 kg/m³, o aumento da relação água/cimento de 0,5 para 0,6 apresentou como resultado um aumento na resistência dos mesmos. Já para a classe de concretos com massa específica de 1700 kg/m³ e 1900 kg/m³, o mesmo aumento na relação água/cimento, de 0,5 para 0,6, apresentou como resultado valores menores de resistência à compressão.

Neste estudo isso é observado também, por exemplo, para as dosagens com massas específicas de 1500 kg/m³, onde para uma relação água/cimento de 0,63 a resistência à compressão axial é superior a uma dosagem com relação água/cimento de 0,50.

Para os resultados obtidos, se pode considerar que as mudanças na influência das relações a/c, em massa, na resistência à compressão axial se justificam pela redução de suas massas específicas e aumento dos vazios dos concretos (Teixeira Filho, 1992).

Além disso observou-se no estudo que concretos com massa específica da ordem de 1900 kg/m³ possuem propriedades mecânicas interessantes, com valores de resistência à compressão na faixa dos 20 MPa, aliadas aos benefícios possíveis da incorporação de ar, tais quais consumos reduzidos, menor peso próprio dos elementos, e melhorias no conforto térmico e acústico frente ao concreto convencional.

Em se tratando dos fenômenos de capilaridade, os concretos avaliados apresentaram aumento na absorção capilar com a diminuição das suas massas específicas.

É sabido que a permeabilidade dos concretos é um fator crucial para a durabilidade dos mesmos. Quanto mais permeável os concretos, mais suscetíveis às ações deletérias de agentes presentes no ambiente. Assim, atenção especial deve ser dada quando do uso de concretos que apresentam índices de vazios elevados e alta capilaridade, como o caso presente no estudo.

3.5 Relação entre massa específica no estado fresco e profundidade de carbonatação.

Com o intuito de avaliar os concretos estudados do ponto de vista do fenômeno de carbonatação, foram separados 12 corpos de prova, remanescentes dos ensaios de absorção total, para serem utilizados na avaliação. Uma vez que o ensaio anterior não era destrutivo, se pôde avaliar estes concretos submetidos à ação atmosférica do ambiente do laboratório, onde permaneceram por períodos de 110 dias de exposição.

Para a realização do ensaio se utilizou do procedimento descrito no (Rilem, 1988), e seguiu-se a secção dos corpos de prova de dimensões 10x20 cm, a 1/3 de uma das suas faces.

Após a secção, os corpos de prova foram aspergidos com uma solução de fenolftaleína (2%) para identificação do pH. A zona de transição onde ocorre o avanço da frente de carbonatação, por possuir pH abaixo de 9 tende a ficar incolor na presença da solução, a zona com pH superior a 9, tende a ficar com coloração violeta.

Assim, foi possível identificar a frente de carbonatação formada na observação das Figuras 10 e 11.



Figura 10. Medição da profundidade de carbonatação para massa específicas de 1500 kg/m³



Figura 11. Medição da profundidade de carbonatação para massa específica de 1700 kg/m³

Tabela 5. Valores medidos de profundidade de carbonatação

| Grupo | A/C | 1:m | Subgrupo | Massa específica (kg/m ³) | Profundidade de Carbonatação (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 |

Nesta avaliação, sob o ponto de vista da profundidade de carbonatação, verifica-se que os concretos leves possuem avanço da frente de carbonatação muito superior aos concretos convencionais. Mesmo aqueles concretos com uma relação água/cimento reduzida, no caso dos do grupo C (a/c:0,5), apresentaram, para as massas específicas menores (1500 e 1700 kg/m³) profundidades de carbonatação significativas para os 110 dias de idade do ensaio.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou as repercussões da redução na massa específica do concreto nas suas propriedades mecânicas e de durabilidade. O interesse pelo uso de concretos com incorporador de ar tem crescido bastante, sobretudo em obras de parede moldadas no local, que geralmente possuem muitas repetições. Essa solução se destaca pela tendência a um melhor comportamento térmico, quando comparado ao concreto de densidade normal, o que é imprescindível em regiões de temperaturas elevadas, como no nordeste brasileiro. Associado a isso, é esperada uma redução expressiva no consumo de cimento na medida em que se reduz a densidade do concreto, apesar da eventual compensação financeira decorrente da inclusão dos aditivos incorporadores de ar. Contudo, é fundamental que esses benefícios sejam confrontados com o eventual comprometimento à durabilidade das peças por conta da maior facilidade à entrada de agentes agressivos, notadamente os íons cloreto e o anidrido carbônico.

Os ensaios encontrados comprovaram a forte influência da redução da massa específica do concreto no seu comportamento mecânico, e principalmente de durabilidade. Percebeu-se incrementos expressivos na absorção de água (3% a 30%), índice de vazios (5% a 50%), absorção capilar (0,2 g/cm² a 0,6 g/cm²) e na profundidade de carbonatação (0 mm a 18,9 mm) na medida em que se diminui a massa específica do concreto.

Assim, os resultados apontam para a necessidade de adoção de medidas de proteção superficial do concreto para o seu emprego em regiões agressivas, a fim de permitir os benefícios (especialmente financeiros e econômicos) da técnica, sem comprometimento da sua durabilidade. E no que se refere aos agentes de proteção, é preciso também avaliar a necessidade imperativa de manutenção, a fim de assegurar o seu adequado comportamento ao longo dos anos.

5. REFERÊNCIAS

- 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)