

Influência do aditivo espumígeno na dosagem e nas propriedades do concreto celular aerado

Influence of the foamed additive on the dosage and properties of the aerated cellular concrete

Cledson André de Oliveira Silva¹, Paulo César Correia Gomes¹,
Tânia Maria Gomes Voronkoff Carnaúba¹, Victor Bezerra Falcão¹,
Francisco de Assis Viana Binas Júnior¹

¹ Laboratório de Estruturas e Materiais – LEMA/CTEC/UFAL. CP: 57.072-970, Maceió, AL
e-mail: Cledson2@hotmail.com, paulocorreia.gomes@gmail.com, taniavoronkoff@gmail.com,
victor_falcao91@hotmail.com, binasjunior@gmail.com

RESUMO

O concreto celular aerado ou espumoso (CCE) é um concreto leve que se diferencia dos demais pela presença de espuma no interior das argamassas. Essa espuma, formada por bolhas de ar, influencia o comportamento desses concretos. Parâmetros como dosagem do aditivo, volume de bolhas geradas e outros precisam ser mais bem compreendidos e determinados, pois influenciam diretamente na formulação, trabalhabilidade, densidade e resistência do CCE. Este artigo apresenta um estudo da influência de diferentes dosagens de um aditivo espumígeno na formulação e propriedades de diferentes CCEs. A dosagem de aditivo foi avaliada em função da densidade e resistência do concreto. A geração de bolhas de ar ocorreu por meio da ação mecânica do misturador, e denominou-se o concreto de CBAM. O teor de bolhas de ar (B_{ar}) aumenta consideravelmente com o aumento da dosagem de aditivo (A_d/c) nos CBAMs até numa determinada dosagem, o mesmo ocorre com a redução da densidade de diferentes CBAMs. A resistência à compressão também é alterada consideravelmente até uma determinada dosagem de aditivo. A maior resistência à compressão, aos 28 dias, obtida foi de 19,5 MPa, que pode garantir aplicação em paredes com fins estruturais.

Palavras-chave: Concreto celular; aditivos químicos; método de dosagem; propriedades.

ABSTRACT

Aerated or foamed cellular concrete (CCE) is a lightweight concrete that differs from the others by the presence of foam inside the mortars. Air bubbles that govern the behavior of these concretes form this foam. Parameters such as dosage of the additive, volume of bubbles generated and others must be better understood and determined, as they directly influence the formulation, workability, density and resistance of the CCE. This paper presents a study of the influence of different dosages of a foam additive on the formulation and properties of different CCEs. The additive dosage was evaluated as a function of the density of the concrete. The generation of air bubbles occurred through the mechanical action of the mixer, was denominated CBAM concrete. The air bubble content (B_{ar}) increases considerably with the increase of the additive (A_d/c) dosage in the CBAMs up to a given dosage, the same occurs with the reduction of the density of different CBAMs. The compressive strength is also changed considerably to a certain additive dosage. The highest compressive strength, at 28 days, obtained was 19.5 MPa, which can guarantee application in walls with structural ends.

Keywords: Cellular concrete, chemical additives, method of dosing, properties.

1. INTRODUÇÃO

O CCE, classificado como concreto leve com massa específica aparente seca entre 400 kg/m³ e 1.900 kg/m³ [1], é obtido pelo uso de aditivo químico espumígeno que por meio da ação de equipamentos geram bolhas formando espumas que se misturam com a argamassa base, sem aditivos [2,3,4,5]. Por ser uma argamassa com bolhas de ar, GUGLIELMI [6] e FERREIRA [8] caracterizam como argamassa leve; porém, NARA-

YANAN e RAMAMURTHY [7] reconhecem como concreto leve, sendo as bolhas consideradas agregados graúdos de densidade zero.

A primeira patente do CCE surgiu em 1925 na Suécia [8], bem depois da aplicação do CEE, que ocorreu desde 1889 [9,10]. A aplicação na construção civil tem sido justificada pela industrialização no processo de produção, o que reduz o tempo de construção; pela redução da massa específica; pela contribuição ao conforto ambiental térmico e acústico, e pela resistência ao congelamento/descongelamento e ao fogo [8, 9, 4,10, 11]. Tem se apresentado como boa solução para áreas de segurança em aeroportos com pavimentos extras para aterrisagem de emergência e para remoção de metais pesados presentes em águas industriais contaminadas [11], além de painéis paredes em edificações horizontais [9,10,11]. Algumas normas [5, 12, 13, 14] já regularizam o uso do CCE em paredes para edificações térreas, sem fins estruturais.

A baixa resistência mecânica, devido à presença de bolhas de ar [10,15], tem sido um impedimento para a aplicação em elementos construtivos com fins estruturais. Para essa finalidade recomenda-se massa específica maior que 1.200 kg/m^3 [3,8], relação água/cimento (a/c) de 0,45 a 0,70 e dosagem de cimento de 300 kg/m^3 a 450 kg/m^3 [4,10,15]. Outros meios como uso de aditivos dispersantes e expansivos e a incorporação de fibras de vidro têm sido aplicados para aumento da resistência à compressão e redução da retração por secagem, respectivamente [4, 8].

Atualmente, no Brasil, um projeto de norma ABNT/CEE 185 [16], que trata sobre projeto, controle e execução de paredes de concreto celular moldado no local com aplicação para fins estruturais em paredes de edificações de vários pavimentos, encontra-se em elaboração e discussões. Essa proposta de projeto inclui concreto celular com massa específica aparente no estado fresco entre 1.400 kg/m^3 e 2.000 kg/m^3 , teor máximo de 37% de vazios, relação a/c entre 0,45 e 0,60 em massa e dosagem mínima de cimento de 350 kg/m^3 . O teor de ar no CCE pode variar de 10% a 70% [11,17], mas teores da ordem de 6% a 35%, apresenta um bom potencial para o CCE ser usado em aplicações estruturais [11]. SILVA [18] relatou que de acordo com o pré-dimensionamento proposto em normas e nesse projeto, CCE com resistência à compressão da ordem de 20,0 MPa pode ser aplicado em paredes estruturais para edifícios de até 7 pavimentos. Recomenda-se para a determinação da resistência à compressão do CCE a idade de 56 dias [8].

O método proposto de dosagem para CCE [8] relaciona a dosagem dos componentes com a massa específica aparente no estado fresco, e não com a resistência à compressão. Além disso, há muitas variáveis relacionadas com o aditivo incorporador de bolhas (tipo e dosagem de aditivo, processo de geração de bolhas de ar, diâmetro, densidade e volume de bolhas, etc.) que influenciam na produção e propriedades no estado fresco e endurecido do CCE, que não são determinadas. A obtenção do CCE depende principalmente da dosagem do espumígeno e do volume de espuma gerado [8], e da relação entre ambos, como, quanto de aditivo é necessário para gerar tanto de bolhas para alcançar uma determinada densidade e resistência? Essa resposta não é encontrada na literatura técnica. Além de que o aditivo aumenta o volume final do concreto [8].

A dosagem do aditivo espumígeno é determinada por tentativas, e depende do tipo de aditivo, tempo de mistura e volume e densidade do concreto [5]. O tempo de mistura influencia na quantidade de vazios que alteram a massa específica e resistência do CCE, e o tempo de 5 minutos após a colocação do aditivo tem sido recomendado [3]. A geração de espuma pode ser pré-formada em equipamentos geradores de bolhas, que combina a solução (aditivo + água) com ar comprimido, e em seguida introduzida na argamassa base (sem aditivo), ou formadas pela ação mecânica do misturador durante o processo de mistura da argamassa base [5]. A pré-formada, apesar de se ter um controle maior da espuma gerada, é um procedimento com uma etapa a mais e depende de outro equipamento, além do misturador, que gera mais custo, tempo e trabalho. O processo mecânico de se produzir bolhas no CCE, com agentes espumígenos, é considerado o mais econômico e apresenta menos complexidade por não haver reações químicas [19].

As diferentes variáveis de obtenção do CCE que dependem do aditivo mostram a dependência e a necessidade de melhor entendimento da influência do aditivo nas diferentes propriedades do CCE em função da dosagem do aditivo espumígeno. Nesse contexto, o estudo avalia a obtenção de CCE, propondo procedimentos de dosagem que auxiliem na determinação da dosagem do aditivo espumígeno e a influência de diferentes dosagens de aditivo nas propriedades do CCE para fins estruturais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados nas composições do concreto celular foram: cimento Portland composto CP II-F 32, de acordo com a NBR 11578 [20]; agregado miúdo (areia quartzosa) com massa específica de $2,63 \text{ g/cm}^3$,

absorção de 1,00%, diâmetro característico máximo de 4,75 mm, módulo de finura de 2,69, características determinadas de acordo com a NBR 7211 [21]; e um aditivo químico incorporador de bolhas por ação mecânica do misturador (ABAM), com as seguintes características de fábrica: estado líquido, densidade de 1,00 g/cm³, pH de 7,0 a 9,0, cor castanha e solúvel, e dosagem recomendada variando de 0,02% a 0,5%, em relação à massa de cimento (A_d/c). No estudo, a dosagem do ABAM foi determinada pelo método que será apresentado a seguir.

2.2 Formulação do concreto celular

Baseando-se no método de dosagem de Ferreira [8], adotou-se como parâmetros iniciais densidade de massa aparente do concreto no estado fresco (γ_{cf}) de 1.900,0 kg/m³, consumo de cimento (C_c) de 400,0 kg/m³, e relação $a/c = 0,5$. Esses parâmetros foram adotados com a finalidade de se obter um CCE com fins estruturais. A determinação do teor de agregado miúdo foi de acordo com a equação 1.

$$A_s = \gamma_{cf} - C_c - \left(\frac{a}{c} \times C_c \right) - \left(\frac{A_d}{c} \times C_c \right) \quad (1)$$

Segundo o método proposto, a dosagem dos componentes (C_c , a/c , A_d/c e A_s), em massa, foi determinada para alcançar a $\gamma_{cf} = 1.900,0$ kg/m³ em um volume de 1 m³ de concreto. Esse volume é alcançado somando-se os volumes: inicial (V_i), que é o volume absoluto de cada componente (cimento, areia, água e aditivo), e o de bolhas de ar (B_{ar}) incorporado pelo aditivo, que deve ser alcançado em função da dosagem do aditivo; porém, como foi abordado, não foi encontrado estudo que relacione a dosagem de aditivo com o volume de ar incorporado. Portanto, para se alcançar 1 m³ com a densidade adotada, seria necessário adicionar na composição uma dosagem de aditivo que incorporasse no volume V_i da mistura X % de B_{ar} . Porém, vem a pergunta: que dosagem de aditivo deve ser incorporada na mistura para se alcançar esse teor de ar que falta para completar o volume de 1 m³?

Portanto, nesse estudo a dosagem do ABAM (A_d/c), em resposta à pergunta, foi obtida variando a dosagem do aditivo da seguinte forma: primeiro, adotou-se como dosagem inicial 1,25 %, mais do que o dobro da dosagem máxima adotada pelo fabricante, a segunda, a metade da dosagem da primeira, e para as demais, em sequência, diminuiu-se aproximadamente pela metade a dosagem da subsequente, até se alcançar o valor de X % de B_{ar} para um volume de 1 m³ e densidade de 1900 kg/m³. Para cada dosagem foi determinado o volume de B_{ar} incorporado, equação 2.

$$B_{ar} = \frac{\Delta V}{V_f} \times 100 \quad (2)$$

Sendo, ΔV a diferença entre o volume final (V_f), do concreto produzido, e o volume inicial (V_i).

Os concretos formulados com o aditivo ABAM foram denominados de CBAM (concretos com bolhas de ar geradas por ação mecânica do misturador).

2.3 Produção e moldagem do CBAM

Para produção dos CBAMs foi utilizado um misturador de eixo vertical planetário (argamassadeira), com capacidade total de 40 L (capacidade útil de 22 L) e duas velocidades, 65 ± 5 RPM e 125 ± 10 RPM. A sequência de produção é apresentada na Figura 1.

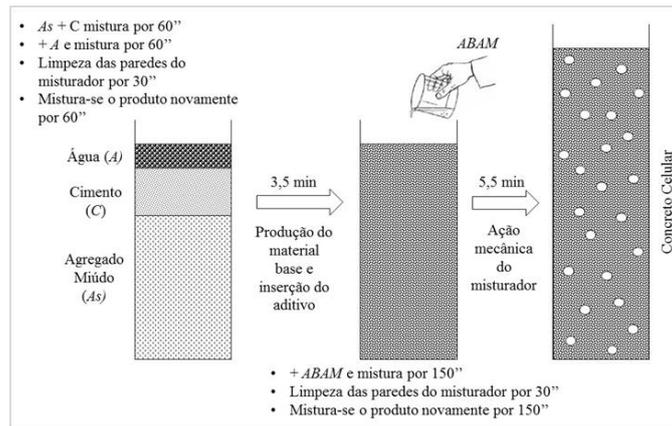


Figura 1: Processo de produção do CBAM.

Após a produção da argamassa ou material base, o tempo de mistura do CBAM, após a inserção do ABAM, foi de 5 minutos na maior velocidade [3]. A consistência (abatimento) foi determinada de acordo com a NBR NM 67 [22]. A moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm foram realizadas de acordo com a NBR 5738 [23]. O procedimento de compactação foi modificado a fim de evitar o rompimento das bolhas de ar, isto é, em cada camada dava-se em média 5 leves golpes nas laterais da fôrma até a acomodação do concreto se estabilizar.

Para cada CBAM foram moldados 6 corpos de prova e imediatamente pesados para determinação da densidade de massa aparente no estado fresco, de acordo com a NBR 12644 [12]. Após o tempo de cura, no estado endurecido a resistência à compressão (f_c) foi determinada de acordo com a NBR 5739 [24], nas idades de 7, 28 e 56 dias para cada idade, e foram ensaiados dois corpos de prova.

3. RESULTADOS

3.1 Composição e características do CBAM

Aplicando os parâmetros iniciais adotados e a metodologia de formulação do CCE, nove composições de CBAM, com diferentes dosagens de aditivo, foram determinadas, Tabela 1. O V_i dos CBAMs é de 0,820 m³. Para cada CBAM produzido o V_f e a percentagem de B_{ar} foram obtidos, Tabela 1. As denominações de cada CBAM estão em função da porcentagem de dosagem do aditivo em relação à massa do cimento, por exemplo, CBAM78, é o concreto com 0,078% de aditivo, em relação à massa do cimento.

Tabela 1: Composição e características do CBAM, com diferentes dosagens de aditivo.

CONCRETOS (kg/m ³)	AREIA (kg)	CIMENTO (kg)	ÁGUA (kg)	A_d/c (kg)	MASSA (kg)	V_f (m ³)	DENSIDADE RELATIVA (kg/m ³)	B_{ar} (%)
CBAM1250	1295,00	400,00	200,00	5,000	1900,00	1,41	1347,50	41,80
CBAM625	1297,50	400,00	200,00	2,500	1900,00	1,39	1367,00	41,00
CBAM310	1298,76	400,00	200,00	1,240	1900,00	1,34	1418,00	38,90
CBAM156	1299,38	400,00	200,00	0,624	1900,00	1,35	1407,40	39,30
CBAM78	1299,69	400,00	200,00	0,312	1900,00	1,25	1520,00	34,60
CBAM55	1299,78	400,00	200,00	0,220	1900,00	1,20	1583,33	31,70
CBAM43	1299,83	400,00	200,00	0,172	1900,00	1,18	1610,17	30,50
CBAM33	1299,87	400,00	200,00	0,132	1900,00	1,07	1775,70	23,60
CBAM17	1299,93	400,00	200,00	0,068	1900,00	1,00	1900,00	18,00

A percentagem de 0,0017% de aditivo foi o limite da dosagem do aditivo para a obtenção do CBAM com densidade relativa de 1.900 kg/m³, característica adotada na formulação do concreto.

Verifica-se nos CBAM que o teor de B_{ar} e o V_f aumentam com o aumento de A_d/c [8], e que para

altas dosagens, acima de 0,156%, o aumento desses parâmetros foi insignificante, 6% e 4%, em relação a maior dosagem de 1,25% de aditivo, respectivamente. O mesmo ocorre com as densidades que diminuíram apenas 4,4%, variando aproximadamente de 1.350,0 kg/m³ a 1.410,0 kg/m³. Isso ocorreu mesmo quando a dosagem foi o dobro da indicada pelo fabricante do aditivo, o que indica que elevar muito a dosagem de aditivo não garante CCE de mais baixa densidade.

As densidades acima de 1.500,00 kg/m³ até o limite proposto na formulação do concreto de 1.900,00 kg/m³ foram obtidas com menores dosagens de aditivo, entre 0,078% e 0,017%, respectivamente, sendo menores que 0,1%, cinco vezes menor que a dosagem máxima indicada pelo fabricante do aditivo. Nestas dosagens de aditivo, o teor de B_{ar} e o V_f no CBAM variaram de 92% e 25%, respectivamente, e a densidade diminuiu 20 %, cujos valores foram bem diferentes dos obtidos nas dosagens altas do aditivo.

A densidade relativa de 1.900 kg/m³, para 1 m³ de concreto, foi alcançada no CBAM17, quando o teor de B_{ar} foi de 18%, e o CBAM78 de densidade relativa de 1.500,00 kg/m³, com o teor de B_{ar} de 35%, limite máximo recomendado pela ABNT/CEE 185 [16] para CCE com fins estruturais. Esses CBAMs, com A_d/c entre 0,017% e 0,078%, densidades relativas entre 1.500 kg/m³ e 1.900 kg/m³ e teor de B_{ar} entre 18% a 35%, foram avaliados quanto às propriedades no estado fresco, trabalhabilidade e densidade de massa aparente; e no estado endurecido, resistência à compressão. Uma análise estatística desses CBAMs também foi realizada.

3.2 Consistência e densidade do CBAM

A consistência dos CBAMs pelo abatimento do cone de Abrams é apresentada nas Figuras 2 e 3, e a densidade de massa aparente no estado fresco e os parâmetros estatísticos são apresentados na Tabela 2. Esses parâmetros são utilizados na análise estatística aplicada.

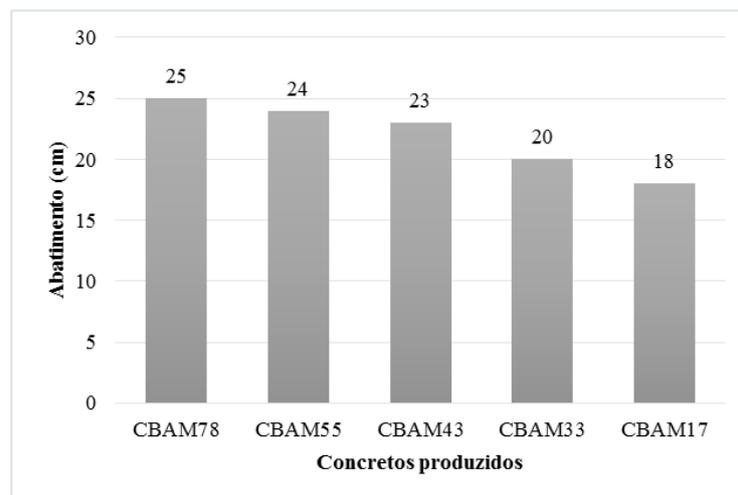


Figura 2: Consistência dos CBAMs pelo abatimento.

Verifica-se que quanto maior a dosagem do aditivo espumígeno maior é o abatimento, caracterizando um concreto mais fluido [22]. Isso está relacionado à presença de bolhas que ajudam na dispersão das partículas sólidas do concreto, o que facilita o espalhamento do concreto.

Tabela 2: Densidade da massa aparente no estado fresco (γ_{cf}) e dados estatísticos dos CBAMs.

CPs	DENSIDADE NO ESTADO FRESCO (kg/m ³)				
	CBAM78	CBAM55	CBAM43	CBAM33	CBAM17
1	1471	1516	1561	1643	1834
2	1471	1522	1573	1669	1892
3	1478	1535	1586	1726	1975
4	1484	1561	1592	1777	1987
5	1503	1567	1605	1790	2006
6	1516	1592	1605	1815	2038

Média (kg/m ³)	1487	1549	1587	1737	1955
Desvio Padrão (kg/m ³)	18,3	29,5	17,8	69,4	76,9
Variância (kg/m ³)	339,8	866,2	309,2	4814,7	5906,9
Coefficiente de variação (%)	1,251	1,905	1,122	3,996	3,930

Para uma análise mais refinada dos dados dessa propriedade, um boxplot com as informações obtidas da Tabela 2 é mostrado na Figura 3.

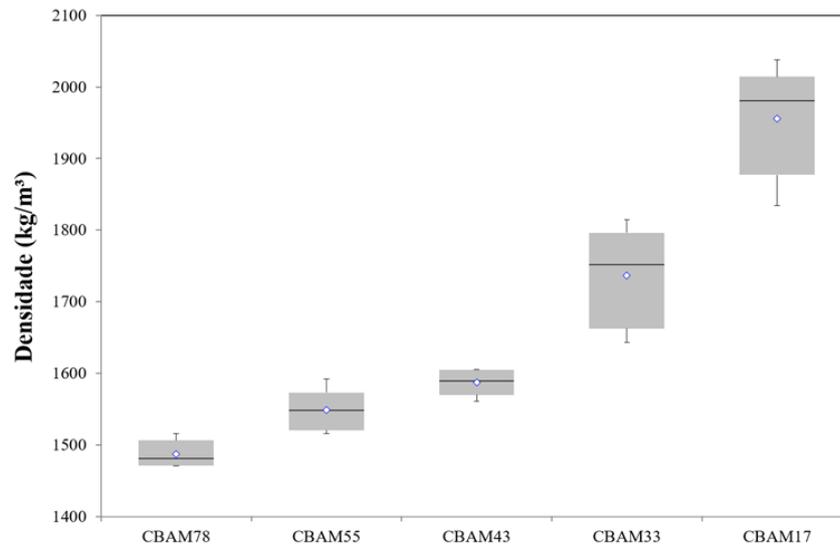


Figura 3: BoxPlot dos dados de densidade dos concretos.

Verifica-se na Tabela 2 que a densidade γ_{cf} se aproximaram das densidades relativas da Tabela 1, confirmando os dados obtidos das composições que se repetiram, o aumento da dosagem do aditivo na mistura reduziu γ_{cf} , provocando o devido aumento do teor de B_{ar} na mistura. No boxplot (Figura 3), quanto menor a dosagem de aditivo maior foi a variabilidade das densidades aparentes dos corpos de prova do mesmo concreto. Isso pode estar relacionado com uma menor quantidade de bolhas que levou a uma distribuição não uniforme das bolhas, o que pode ter prejudicado a homogeneização da mistura.

Por meio do Action Stat, sistema estatístico que conecta o R (principal linguagem de programação estatística) com o Excel, realizou-se a aplicação dos testes de Shapiro-Wilk (SW) e de Kruskal-Wallis (KW) aos dados apresentados na Tabela 2, a fim de verificar a normalidade dos valores das amostras. A hipótese nula (H_0) é de que não houve variação significativa da densidade de cada tipo de concreto. Na Figura 4 e na Tabela 3 a seguir, ilustram-se os resultados do teste de Shapiro-Wilk.

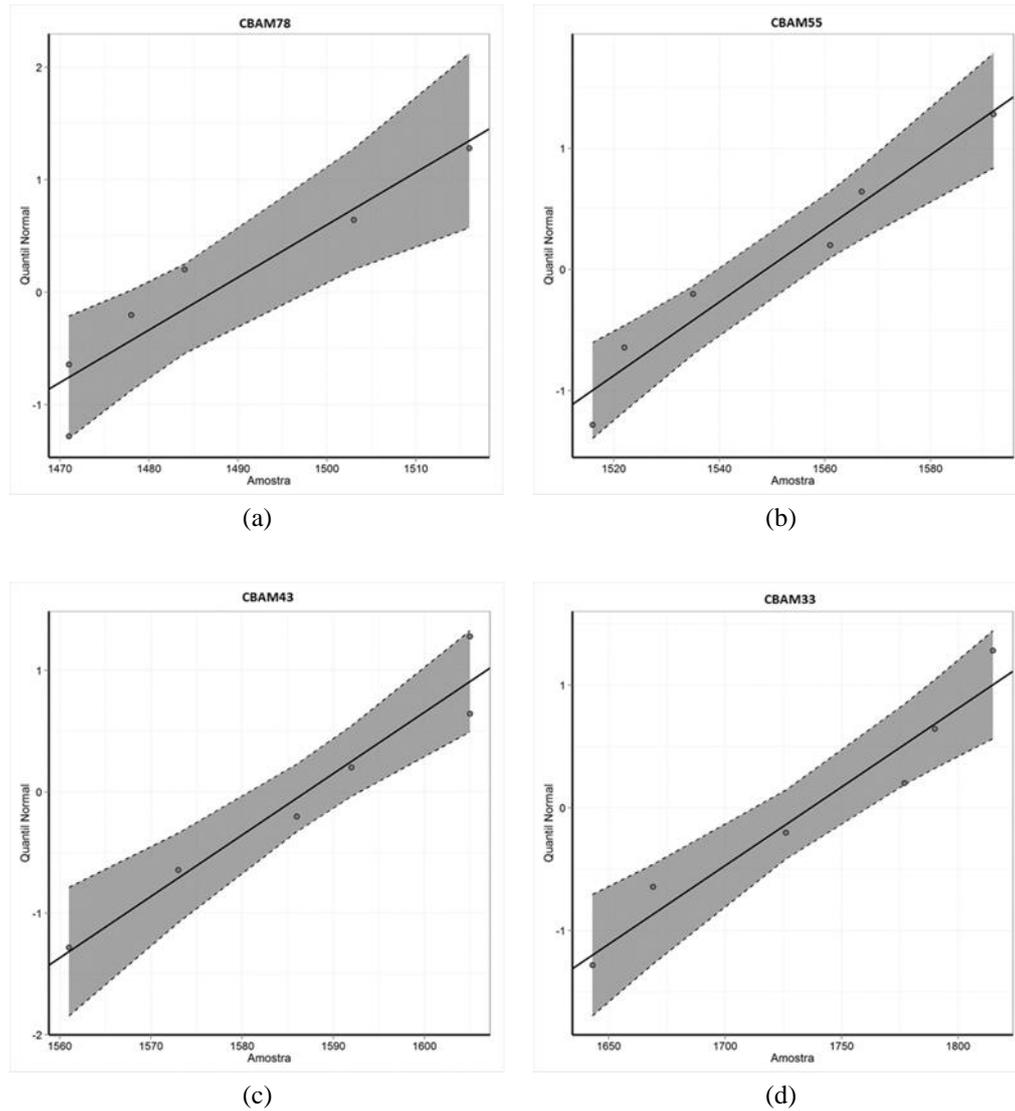


Figura 4: Teste de Shapiro-Wilk aplicado aos concretos: a) CBAM78; b) CBAM55; c) CBAM43 e d) CBAM33.

Tabela 3: Resultados estatísticos e P-valor aplicados nos resultados das densidades para verificação de normalidade.

TESTE DE NORMALIDADE			
Teste	Concreto	Estatística	P-valor
Shapiro - Wilk	CBAM78	0,87006	0,2265
	CBAM55	0,93965	0,6564
	CBAM43	0,92437	0,5374
	CBAM33	0,92294	0,5268
	CBAM17	0,91645	0,4677

A partir dos P-valores fornecidos, é possível afirmar, com nível de significância de 5%, que todos os concretos provêm de uma população normal ($P\text{-valor} < \alpha = 0,05$). Aplica-se então o teste de Kruskal-Wallis, que fornece os dados apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Resultados obtidos no teste de Kruskal-Wallis.

INFORMAÇÃO	VALOR
Kruskal-Wallis qui-quadrado	27,15344917
Graus de liberdade	4
P-valor	1,85082E-05

Tabela 5: Comparações múltiplas – FWER.

GRUPOS	DIFERENÇA OBSERVADA	ESTATÍSTICA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	P-VALOR AJUSTADO	SIGNIFICÂNCIA
CBAM17-CBAM33	6,000	4,346	3,157	8,843	4,04E-4	SIM
CBAM17-CBAM43	12,833	9,297	9,990	15,676	0	SIM
CBAM17-CBAM55	17,250	12,496	14,407	20,093	0	SIM
CBAM17-CBAM78	23,917	17,326	21,074	26,760	0	SIM
CBAM33-CBAM43	6,833	4,951	3,990	9,676	1,68E-4	SIM
CBAM33-CBAM55	11,250	8,150	8,407	14,093	0	SIM
CBAM33-CBAM78	17,917	12,979	15,074	20,760	0	SIM
CBAM43-CBAM55	4,417	3,199	1,574	7,260	3,72E-3	SIM
CBAM43-CBAM78	11,083	8,029	8,240	13,927	0	SIM
CBAM55-CBAM78	6,667	4,829	3,824	9,510	1,74E-4	SIM

Observa-se que as comparações realizadas entre os CBAMs constataram que existe diferença entre os concretos analisados, baseado no P-valor de cada grupo, que foi menor que o nível de significância estabelecido $\alpha = 0,05$. Neste sentido, a comparação entre os CBAMs avaliados é válida, já que se trata de amostras diferentes.

Na Figura 5, observa-se que a dosagem de aditivo não possui relação linear com a densidade do concreto, além de mostrar que com o aumento da porcentagem do aditivo o CCE diminui a densidade e pode-se atingir um nível máximo de incorporação de ar, ou seja, a partir de uma determinada dosagem de aditivo, mesmo que se adicione mais aditivo, o ganho na diminuição da densidade não será significativo, representando uma perda de aditivo, fato comprovado nos concretos com maiores dosagens de aditivos visto anteriormente, a menos que ocorra uma alteração no processo de mistura ou em outros fatores envolvidos na produção.

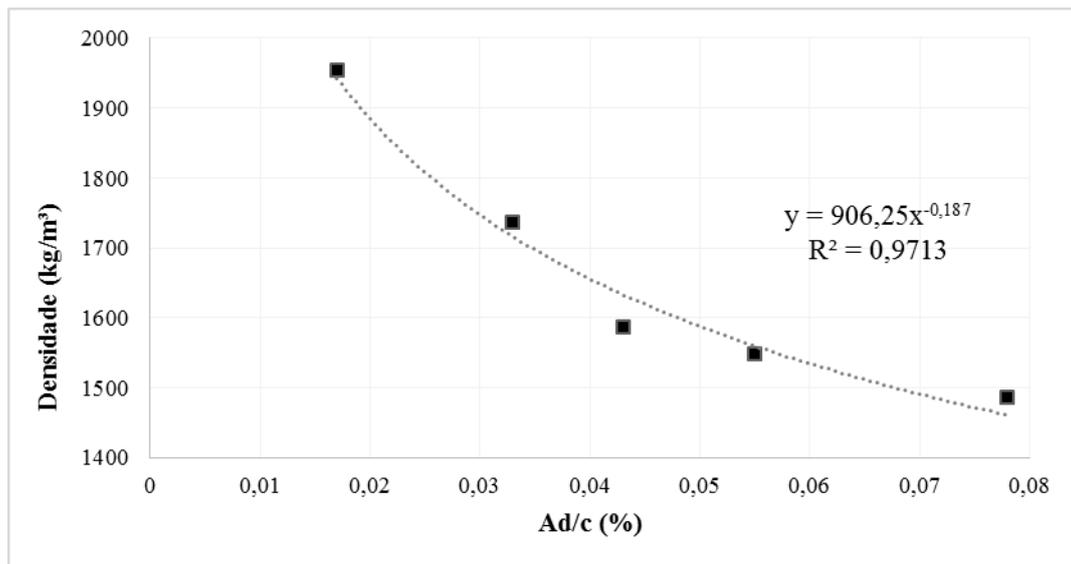


Figura 5: Curva de variação da densidade em função da dosagem de aditivo.

A Figura 6 apresenta a relação entre a densidade média dos CBAM com o seu respectivo abatimento, além de apresentar uma tendência para os dados obtidos.

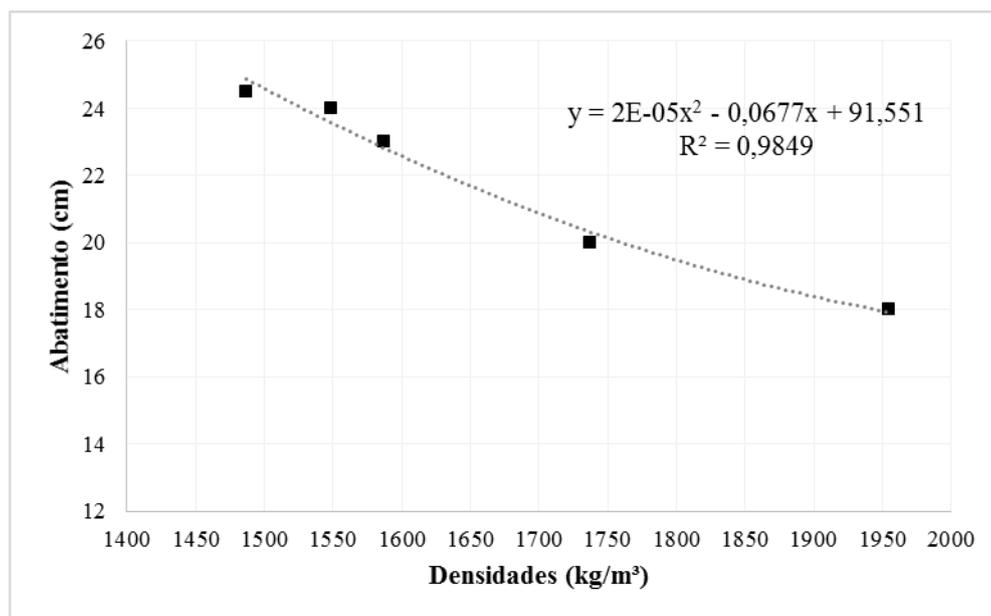


Figura 6: Relação entre a densidade média de cada CBAM com seu respectivo abatimento.

Os concretos que apresentam menor densidade no estado fresco, conseqüentemente maior dosagem de aditivo, possuem um maior abatimento. Isto é alcançado pelo maior teor de B_{ar} , que ajuda na fluidez do CCE.

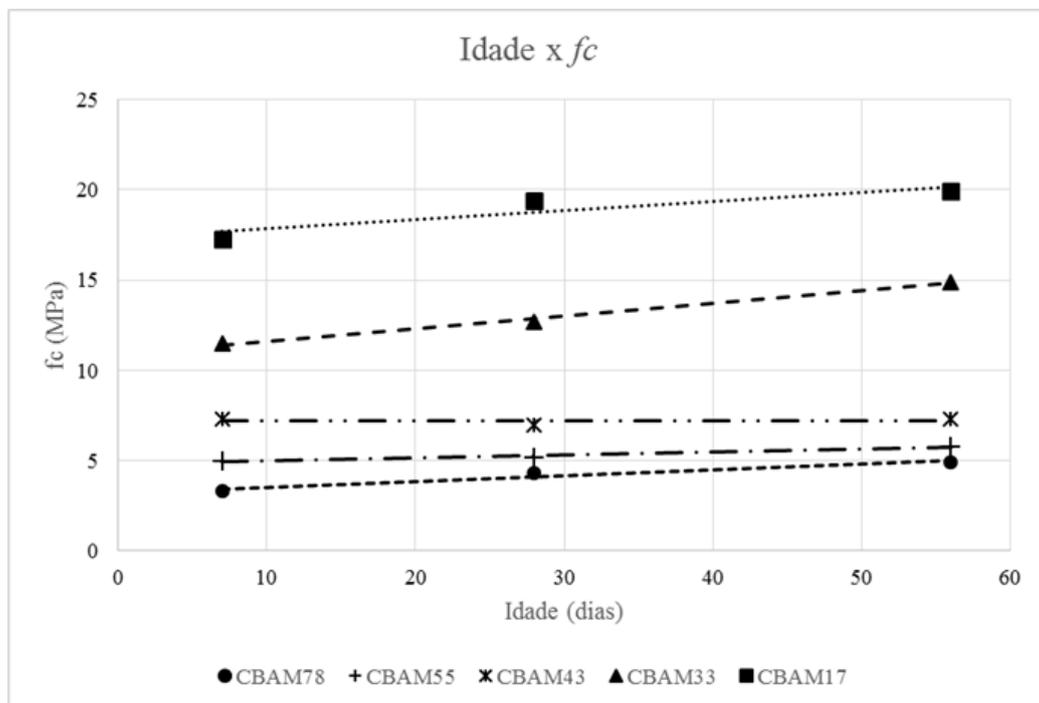
3.3 Resistência à compressão

As resistências à compressão para cada corpo de prova do CBAM foram determinadas nas idades de 7, 28 e 56 dias (Tabela 6).

Tabela 6: Resistência à compressão em diferentes idades.

Concretos	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POR IDADE CURA								
	7 dias			28 dias			56 dias		
	f_c (MPa)	Média	Desvio Padrão	f_c (MPa)	Média	Desvio Padrão	f_c (MPa)	Média	Desvio Padrão
CBAM78	3,10	3,25	0,15	3,20	4,30	1,10	5,00	4,85	0,15
	3,40			5,40			4,70		
CBAM55	4,30	5,00	0,70	4,30	5,15	0,85	5,70	5,80	0,10
	5,70			6,00			5,90		
CBAM43	7,00	7,25	0,25	6,80	6,90	0,10	7,60	7,30	0,30
	7,50			7,00			7,00		
CBAM33	7,80	11,50	3,70	11,30	12,70	1,40	13,30	14,85	1,55
	15,20			14,10			16,40		
CBAM17	15,90	17,25	1,35	21,00	19,40	1,60	22,00	19,90	2,10
	18,60			17,80			17,80		

Com base nos dados mostrados na Tabela 6, comprova-se que os CBAMs com maiores dosagens de aditivos apresentam menores resistência à compressão, pois quanto maior a incorporação de B_{ar} maior será o índice de vazios no concreto, e como a resistência é inversamente proporcional ao índice de vazios estas apresentam valores menores [8,11]. Porém, observa-se também na resistência à compressão que ao elevar as dosagens de aditivos as diferenças de resistências entre os CBAMs não são significantes. Já nas menores dosagens, os ganhos de resistências são consideráveis, uma vez que o teor de ar incorporado diminui significativamente. Isto é melhor visto nas curvas de evolução das resistências à compressão média dos CBAMs nas diferentes idades e da relação da resistência com a densidade, são apresentadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Porém, percebe-se que para estas dosagens o desvio padrão é maior em relação às misturas com maiores dosagens de aditivos. Isto pode estar relacionado a distribuição de bolhas de ar no concreto, que é prejudicada quando um baixo teor de bolhas é incorporado dificultando a uniformidade no concreto.


Figura 7: Evolução da resistência à compressão média dos CBAMs nas diferentes idades.

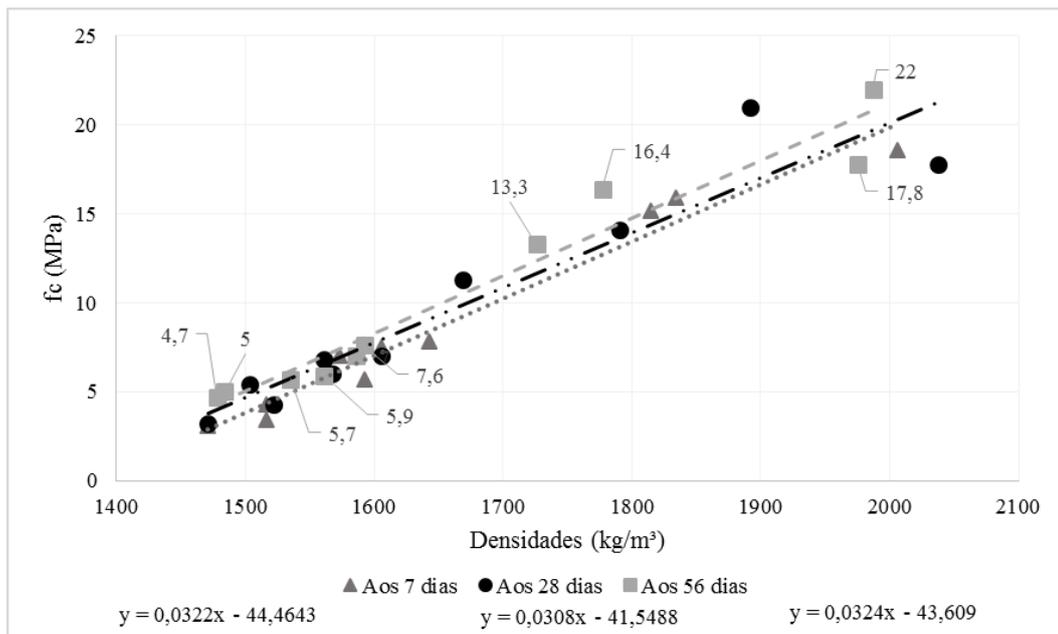


Figura 8: Relação entre densidade e resistência à compressão dos CBAM para cada idade de ensaio.

Verifica-se, na Figura 7, que nos CBAM17 e CBAM33, com menores dosagens de aditivo, o ganho de resistências ao longo das idades é maior do que nos CBAM43, CBAM55 e CBAM78 com maiores dosagens. Em suma, a variação do ganho de resistência entre as idades é inversamente proporcional à quantidade de aditivo aplicado. Os resultados mostram que nos CBAMs com os maiores teores de B_{ar} o ganho de resistência ou o aumento de resistência foram insignificantes, o que caracteriza que num determinado nível de índice de vazios o aumento da dosagem de aditivo não exerce influência.

Na Figura 8, observa-se que a relação entre resistência e densidade independe da idade de ensaio. Em qualquer idade o comportamento da relação entre densidade e resistência é direta: aumentando a densidade aumenta a resistência. Ademais, segundo as equações lineares obtidas: 7 dias: $y = 0,0322x - 44,464$ ($R^2 = 0,969$); 28 dias: $y = 0,0308x - 51,549$ ($R^2 = 0,894$); 56 dias: $y = 0,0324x - 43,609$ ($R^2 = 0,951$); é possível para esses concretos estimar a resistência à compressão (y) aos 7, 28 e 56 dias em função da densidade (x), pois os valores dos resultados das correlações das equações foram muito próximos de 1, mostrando, assim, uma boa confiabilidade nos resultados obtidos.

Conforme as recomendações do projeto de norma ABNT/CEE 185 [16], o CBAM78 não atende as especificações para CCE com fins estruturais para paredes de edificações, uma vez que o valor de resistência à compressão obtido aos 28 dias foi menor que 5 MPa, mas atende a norma NBR 12646 [13] para utilização em edificações térreas.

Os CBAM55 e CBAM43 apresentam resistência à compressão aos 28 dias de 5,2 e 7,0 MPa, respectivamente, podendo ser aplicados com fins estruturais em paredes de edificações de até dois pavimentos [16, 17]. Os CBAM33 e CBAM17 com resistência à compressão de 12,7 MPa e 19,4 MPa, aos 28 dias, respectivamente, podem ser aplicados para fins estruturais em paredes de edifícios, moldadas in loco, para edificações com mais de 5 pavimentos [16,17].

4. CONCLUSÕES

Um método de dosagem para obtenção de CCE com altas densidades foi apresentado. Diferentes CCEs, denominados de CBAM, foram obtidos variando a dosagem do aditivo espumígeno. O aumento de dosagem do aditivo (A_d/c) no concreto aumenta o teor de B_{ar} e o V_f da mistura, o que diminui a densidade relativa do concreto. Esses parâmetros só apresentaram variações significantes em teores baixos de dosagens, $A_d/c < 0,1\%$. Esse comportamento mostra que há uma dosagem de A_d/c ideal, e que além dessa dosagem o efeito do aditivo nas propriedades é mínimo.

As análises estatísticas dos diferentes CBAMs confirmaram a normalidade dos resultados das massas aparentes no estado fresco, e comprovaram a maior dispersão dos resultados nas menores dosagens de aditivos, justificadas pela não homogeneidade da composição devido o menor teor de B_{ar} .

Maiores A_d/c contribui para a dispersão das partículas sólidas do concreto, o que aumentou o espalhamento do CBAM. Porém, diminui a densidade e a resistência à compressão. Já os ganhos de resistências à compressão dos CBAMs com maiores teores de A_d/c , nas diferentes idades, praticamente não ocorreram comparados aos ganhos de resistências dos CBAMs com menores A_d/c .

No geral, a dosagem do aditivo (A_d/c) é inversamente proporcional à densidade e à resistência do CCE, e é diretamente proporcional à trabalhabilidade. O CBAM17, com a menor A_d/c , apresentou menor teor de B_{ar} (18%) e maiores densidades de massa aparente no estado fresco, 1.950 kg/m³, e resistência à compressão de 19,4 e 19,9 MPa, aos 28 e 56 dias, respectivamente, podendo ser utilizado para fins estruturais em paredes de edificações com mais de cinco pavimentos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq; CAPES; FAPEAL; UFAL; LEMA; aos projetos: PROCAD/Casadinho-2011 e UNIVERSAL 2012; a construtora FORTMIX e ao grupo de pesquisa MECOEFIGON pelo apoio ao desenvolvimento do estudo.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MAYCÁ, J., CREMONINI, R. A., RECENA, F. A., *Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE)*, Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2008.
- [2] PETRUCI, E. G. R., *Concreto de cimento Portland*, 5 ed. São Paulo, GLOBO, 1982.
- [3] FERREIRA, O. A. R., *Concretos leves: concreto celular espumoso*, Dissertação MSc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1986.
- [4] TEIXEIRA FILHO, F. J., TEZUKA, Y. *Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos*, Boletim Técnico, EPUSP, São Paulo, 1992.
- [5] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 523-1R-86: guide for cast-in-place low density cellular concrete. Detroit, 1986.
- [6] GUGLIELMI, P. O., *Investigação da porosidade e resistência mecânica de um concreto celular argiloso curado em autoclave*. Monografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [7] NARAYANAN, N., RAMAMURTHY, K. "Microstructural investigations on aerated concrete", *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 3, pp 457-464, 1999.
- [8] FERREIRA, O. A. R., *Concretos Celulares Espumosos*, Boletim Técnico, EPUSP, São Paulo, 1987.
- [9] FREITAS, I. M. Produção e propriedades físicas e mecânicas do concreto celular espumoso, Dissertação MSc., Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.
- [10] CORTEPASSI, E. M., *Desenvolvimento e avaliação de concretos celulares espumosos de alto desempenho*, Dissertação de MSc, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.
- [11] PANESAR, D. K., *Cellular Concrete Properties and the Effect of Synthetic and Protein Foaming Agents*, *Construction and Building Materials*, v. 44, pp 575-584, 2013.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 12644: concreto leve celular estrutural: determinação da densidade de massa aparente no estado fresco: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 12645: execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 12646: paredes de concreto celular espumoso moldadas no local: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- [15] MELO, G. F., *Concreto celular polimérico: influência da adição de resíduo poliéster insaturado termofixo*, Tese de D.Sc., UFRGN, Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2009.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Proposta: CEE-185:000.01-001-1: parede de concreto celular estrutural moldada no local para a construção de edificações: projeto, execução e controle-procedimento. Rio de Janeiro, 2013.
- [17] RAMAMURTHY K., NAMBIER E., RANJANIG., "A Classification of Studies on Properties os Foam Concrete", *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 6, pp 388-396, 2009.

- [18] SILVA, C. A. O., *Estudo de Dosagem e Avaliação de Concreto Leve com Fins Estruturais*, Dissertação de MSc., Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, 2015.
- [19] NARAYANAN, N., RAMAMURTHY, K., *Structure and properties of aerated concrete: a review*, Cement and Concrete Composites, v. 22, n. 5, pp 321-329, 2000.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 11578: cimento Portland composto: especificações. Rio de Janeiro, 1997.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 7221: agregados para concreto: especificações. Rio de Janeiro, 2009.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: NM 67: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 5738: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR: 8953: concretos para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.