

DESENVOLVIMENTO DE BLOCO CELULAR CERÂMICO USANDO PÓ DE ALUMÍNIO COMO AGENTE GERADOR DE POROS

Fábio Rosso¹Vitor de Souza Nandi¹Alexandre Zaccaron²Oscar Rubem Klegues Montedo²Rui Miguel Teixeira Novais³João António Labrincha Batista³

Resumo

A busca por materiais isolantes leves vem sendo amplamente realizada por engenheiros e arquitetos, tornando importante o desenvolvimento de novas tecnologias, para que apresente ao mercado um produto que atenda às necessidades estruturais e econômicas que o setor da construção civil necessita. O emprego de aeração para geração de poros é uma alternativa conhecida. Este estudo tem como objetivo desenvolver um bloco cerâmico celular de baixa densidade, baixa condutividade térmica e adequada resistência mecânica. A aeração da massa de cerâmica vermelha foi feita através da adição de pó de alumínio e óxido de cálcio. As propriedades físicas estudadas (massa específica, porosidade total, resistência a altas temperaturas, resistência mecânica à compressão e condutividade térmica) foram comparadas com produtos já utilizados na construção civil. Os testes apresentaram excelentes resultados, mostrando que é possível criar poros em uma massa de cerâmica vermelha sem adição de matéria orgânica e os poros obtidos, com formato regular, aumentam o desempenho técnico do material.

Palavras-chave: Bloco cerâmico; Cerâmica vermelha de baixa densidade; Cerâmica de alta porosidade; Isolamento térmico.

DEVELOPMENT OF A CELLULAR CERAMIC BLOCK USING ALUMINUM POWDER AS PORE-GENERATING AGENT

Abstract

The search for light materials with thermal insulation has been widely performed by engineers and architects, making it important to develop new technologies, to present to the market a product that meets the structural and economic needs of the civil sector. This study aims the development of a ceramic cell block exhibiting low density, good thermal insulation, possessing the refractory properties of ceramics and high strength. Aeration of the ceramic mass was made by adding aluminum powder and calcium oxide. The studied physical properties were compared with products already used in construction. The density, porosity, high temperature resistance, compressive strength and thermal conductivity were examined. The tests showed excellent results, proving that it is possible to create pores in the red ceramic without adding organic matter and obtained pores with regular format, increases the technical performance of the material.

Keywords: Ceramic block; Low density red ceramic; High porosity ceramic; Thermal insulation.

I INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, o processo de industrialização e urbanização resultou na construção de milhões de novas casas residenciais anualmente em todo o mundo. A Agência Internacional da Energia (*International Energy Agency – IEA*)

e a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (*Organization for Economic Cooperation and Development – OECD*) previram, no seu estudo comum, que a procura por energia no setor da habitação aumentará 60%

¹Departamento de Engenharia Cerâmica, Centro Universitário Barriga Verde – UNIBAVE, Cocal do Sul, SC, Brasil.

²Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais – PPGCEM, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil. E-mail: alexandrezaccaron@hotmail.com

³Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Aveiro Institute of Materials – CICECO, Universidade de Aveiro – UA, Aveiro, Portugal.



até 2050, mais do que nos setores dos transportes ou da indústria. Aparentemente, uma solução razoável para esse enorme aumento projetado de demanda de energia não pode residir em cortar as atividades de construção, mas sim em diminuir o consumo de energia e melhorar a eficiência energética das estruturas de construção [1,2].

Economizar energia é mais barato do que fornecê-la. Nesse ponto, inserem-se arquitetos e engenheiros, cujos projetos devem ser concebidos de modo a possibilitar a construção de edifícios que proporcionem, simultaneamente, economia de energia e conforto ao usuário. É possível reduzir em 30% o consumo de energia em prédios já construídos e em até 50% em novas construções com o isolamento térmico ou proteção solar de paredes, janelas e telhados. Esses sistemas construtivos devem ser estudados com o objetivo de se evitar aquecimento excessivo no interior dos ambientes, mantendo-se o conforto térmico [3].

A cota atual de energia necessária para aquecimento e refrigeração de edifícios é de 40% da energia total consumida. A elevada quantidade de energia necessária para aquecimento e ventilação tem um impacto negativo no ambiente, especialmente em termos de emissões de CO₂ e de exploração de recursos materiais não renováveis (combustíveis fósseis). Melhorar o desempenho energético dos edifícios é um dos principais temas contemporâneos em todo o mundo. Na Europa, a proteção térmica dos edifícios é regulada pela Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu; já no Brasil, a Norma de Desempenho ABNT NBR 15575 é atual e aponta diretrizes para todo o ambiente construtivo, inclusive referente ao isolamento térmico. Uma das formas de se melhorar o desempenho energético dos edifícios descritos nestas normas e diretrizes é a melhoria das propriedades térmicas de vedações de edifícios [4-7].

Na Europa existe uma constante preocupação com o isolamento térmico, uma vez que no inverno há um aumento de patologias associadas à baixa temperatura e um número grande de mortalidade devido a esse problema. Países como a Polônia, consomem cerca de 80% da energia final da construção civil para aquecimento de edifícios. Alguns estudos prevêem colapso generalizado da infraestrutura existente, por razão do aumento do consumo energético para a geração de conforto térmico, causando, além disso, um impacto nas mudanças climáticas [8-10].

No que tange os materiais de construção e as técnicas construtivas, já se apresentam alternativas para a redução do consumo de energia e de estruturas, mas ainda de forma muito tímida. A escolha do sistema de vedação não contribui somente na redução de energia elétrica através do quesito climatização, reduz consideravelmente o consumo de estruturas e fundações da construção, chegando a valores que ultrapassam os 7% de redução [11].

A vedação dos edifícios de alvenaria (construídos como estruturas simples) pode ser melhorada por vários meios. A condutividade térmica do material dos blocos de construção pode ser reduzida, sua geometria (tanto interna quanto externa) e espessura podem ser modificadas ou podem

ter isolamento térmico incorporado no interior (isolamento térmico integrado). No que se refere aos blocos de alvenaria de cerâmica, parece que esta é a forma mais promissora e melhoria das propriedades de isolamento térmico da alvenaria sem a necessidade de aumentar excessivamente a sua espessura [7].

Em um sistema construtivo, o coeficiente de condutividade térmica (k) depende, principalmente, do material, de sua espessura e da diferença de temperatura entre suas faces. Em materiais porosos, a condutividade depende da composição, da quantidade de matéria sólida, da distribuição, geometria e dimensões dos poros, do teor de umidade e do tipo de gás aprisionado [12,13].

Materiais com porosidade celular homogênea exibem melhores características isolantes do que outros materiais com mesma densidade. As cerâmicas porosas podem apresentar certas propriedades, como baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta área superficial e alta permeabilidade. Outra grande vantagem é sua resistência ao fogo, conferida por sua composição completamente inorgânica [12,14].

Dentro deste contexto, este estudo tem como objetivo desenvolver e caracterizar um novo produto para fabricação de cerâmica vermelha porosa, baseado na aeração de uma suspensão cerâmica contendo um agente espumante à base de alumínio e óxido de cálcio, para posteriormente ser seca e sinterizada. A função destes agentes é reagir para a liberação de um gás, o qual fica confinado no material na forma de bolhas gasosas, resultando em uma estrutura celular. Os poros regulares proporcionarão ao material maior resistência mecânica e menor condutividade térmica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Materiais Cerâmicos Cocal do Sul, LaMaCC, localizado no município de Cocal do Sul/SC. A massa de cerâmica vermelha utilizada foi fornecida pela Cerâmica Galatto (Cocal do Sul/SC) sendo coletada na linha de produção de blocos de vedação. Os regentes utilizados para a aeração foram o Óxido de Cálcio cedido pela empresa Esmalglass do Brasil e o pó de alumínio da Stanlux Flake CL4010®, da empresa Aldoro.

A Espectrofotometria por Fluorescência de Raios X (FRX) (marca Philips, modelo PW 2400) foi utilizada para analisar a constituição química da massa.

Foram feitas quatro composições, as quais diferem apenas no percentual do pó de alumínio e do óxido de cálcio (Tabela 1). As quantidades de pó de alumínio foram baseadas nos percentuais que são utilizados na produção de blocos de concreto celular. O óxido de cálcio foi estimado através reação entre os reagentes para a formação do aluminato de cálcio, considerando reações completas e saturadas de CaO. Uma reação química entre o pó de alumínio e a cal aumenta o volume formando células cheias com ar [15-18].

Tabela 1. Tabela de Formulações

Material	Formulações (%massa)			
	A	B	C	D
Massa Cerâmica	95,10	98,10	96,75	94,75
Pó de Alumínio	0,40	0,40	0,25	0,25
Óxido de Cálcio	4,50	1,50	3,00	5,00

As formulações foram preparadas com a massa de cerâmica vermelha em condição de pasta e homogeneizadas em um misturador tipo planetário, com uma umidade de aproximadamente 54%.

Posteriormente, a mistura foi depositada em matrizes plásticas com formato 200 mm × 200 mm × 50 mm. A massa repousou durante 1h, para a completa reação do alumínio e do óxido de cálcio, momento em que ocorreu a aeração da massa.

Após a estabilização da reação, a massa foi seca em estufa a 65 ± 5 °C durante 24h. Após secos, os corpos de prova foram sinterizados em um forno elétrico, tipo mufla, com o controlador de temperatura Novus NI 100, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e patamar de 60 min a 950 °C.

Para a realização dos testes comparativos, foram coletadas amostras de produtos usualmente utilizados na construção civil, blocos cerâmicos de vedação e bloco de concreto celular, todos obtidos de forma comercial em lojas de materiais de construção, sem seleção de marca. Estes, juntamente com os corpos de prova da massa em teste, foram cortados com disco de corte diamantado, nas dimensões de 50 mm × 65 mm × 115 mm.

A visualização dos formatos dos poros foi realizada com o microscópio óptico Olympus, modelo SZX12, com aumento de 2x e 10x.

Com a finalidade de comparar o peso que os produtos estudados teriam em uma parede, foi elaborado o cálculo da densidade aparente (ρ) das amostras, conforme Equação 1. Para o cálculo, as peças foram submetidas à secagem em estufa a 80 ± 5 °C, até que atingissem massa constante. Após a secagem dos blocos, suas massas (M) foram determinadas com o auxílio de uma balança da marca Marte modelo AD 5002 pesagem máxima 5000 g (precisão 0,01 g), e suas dimensões, com um paquímetro digital da marca Digmess com precisão de 0,01 mm. As dimensões foram utilizadas para determinação do volume através da Equação 2. Para os blocos cerâmicos de vedação utilizaram-se as medidas externas dos blocos, sendo considerado o volume da área vazada.

$$\rho_{ap} = M / V \text{ (g / cm}^3\text{)} \quad (1)$$

$$V = b.L.h \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2)$$

$$\rho_{rel} = \rho_{ap} / \rho_{sol} \text{ (g / cm}^3\text{)} \quad (3)$$

$$\text{Porosidade total} = (1 - \rho_{rel}) * 100 \text{ (\%)} \quad (4)$$

Outra característica estrutural importante de um sólido celular é a sua densidade relativa (ρ_{rel}), a qual é calculada pela razão entre a densidade aparente do material celular (ρ_{ap}) e a densidade do sólido que o compõe (ρ_{sol}) conforme Equação 3. A fração de poros existente no material é a sua porosidade total, que pode ser obtida pela Equação 4.

A medida da densidade do material que compõe a matriz dos corpos de prova (ρ_{sol}) foi realizada por picnometria a gás hélio, Quantachrome modelo Ultrapyc 1200e. Para a realização desta análise, foram utilizadas amostras na forma de pó, obtidas através da moagem a seco, com o auxílio de um pistilo, de pedaços de corpos de prova representativos das peças testadas.

Na determinação da resistência à compressão, utilizaram-se oito corpos de prova de cada composição, capeados com argamassa de 3 mm de espessura, a fim de obter superfícies planas para a completa distribuição da carga aplicada sobre as peças. As peças foram secas em estufa a 80 ± 5 °C até peso constante e em seguida encaminhadas a máquina Emic, modelo DL20000, (Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – LABCER, em Morro da Fumaça/SC). O valor final foi obtido através da média aritmética de todas as medidas registradas.

Para analisar o comportamento dos elementos testados em temperatura elevada, simulando um incêndio, as peças foram submetidas a permanecerem no forno mufla, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e patamar de 180 min a 800 °C, com o intuito de analisar o comprometimento das suas características físicas.

A condutividade térmica dos corpos de provas (40 mm × 30 mm × 100 mm) foi medida à temperatura ambiente utilizando um medidor de fluxo de calor de acordo com a norma ASTM C518-04 [19].

Para o teste aplicado de condutividade térmica, desenvolveu-se um aparato para fazer uma avaliação comparativa. Foi removida a porta do forno mufla, e os corpos de provas, a serem testados, foram assentados na abertura da porta conforme Figura 1. As peças permaneceram, entre si, separadas por lâ de vidro para não entrarem em contato uma com as outras. A sala onde foi realizado o teste permaneceu fechada com temperatura de 25 °C, evitando correntes de ar que pudessem interferir na temperatura das superfícies testadas.

Foram realizados os testes com duas temperaturas internas diferentes, 70 °C, e 800 °C sendo que o forno permaneceu na mesma temperatura interna até o momento da estabilização da temperatura externa, realizado as leituras de temperatura nos intervalos de uma hora até à estabilização. Utilizou-se um termômetro digital infravermelho com mira laser da marca Caution com leitura de 50 a 900 °C.

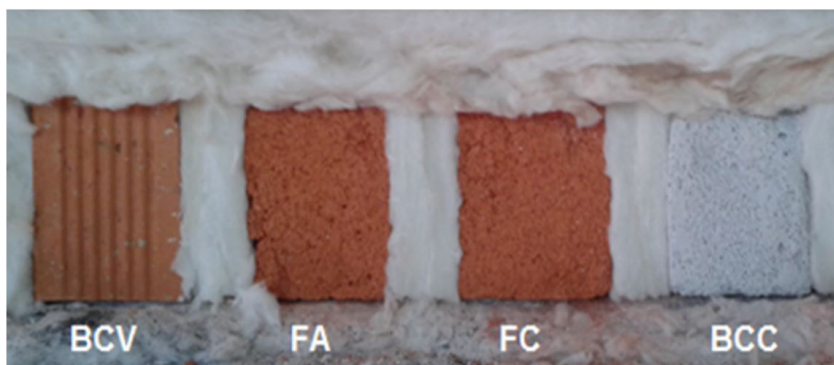


Figura 1. Teste de condutividade térmica: BCV = Bloco cerâmico de vedação; FA = Formulação A; FC = Formulação C; BCC = Bloco de concreto celular. [[Q1: Q1]]

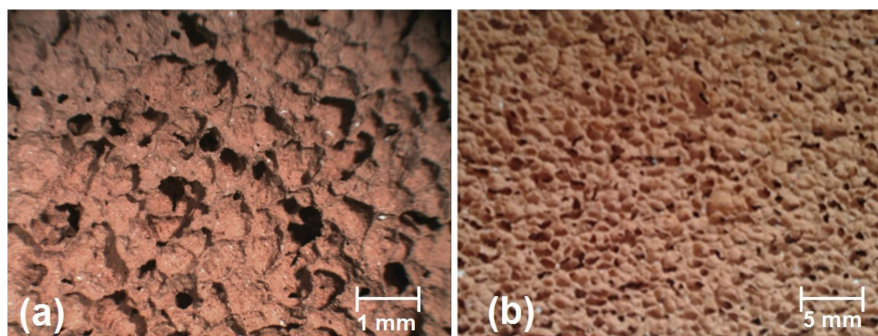


Figura 2. Imagem dos poros. (a) aumento em 10x; (b) aumento em 2x.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As fórmulas B e D não apresentaram resistência para o manuseio após a secagem. Devido ao baixo percentual de CaO, a massa da Prova B não teve aumento da viscosidade durante a reação de aeriação, ocorrendo a coalescência do gás H_2 , formando poros grandes e frágeis, comprometendo a resistência a cru das peças. Na Prova D, devido ao baixo percentual de pó de Alumínio e a alta quantidade de CaO, durante a hidratação, formação CaOH, a massa endureceu e no momento da liberação do gás hidrogênio não havia plasticidade para a formação dos poros, gerando poros pequenos e frágeis.

Pode-se observar, na análise química da massa de cerâmica vermelha (Tabela 2), a presença em maiores concentrações dos óxidos de sílica (SiO_2) aproximadamente 65% e Alumina (Al_2O_3) aproximadamente 17%, correspondendo juntas aproximadamente 80% do total.

A análise da composição química apresentou a presença de CaO na massa, mas devido ao seu baixo percentual, fez-se necessário a adição do elemento para a reação com o pó de alumínio.

As fórmulas A e C apresentaram boa formação dos poros e resistência mecânica ao manuseio, seguindo para etapa de sinterização e testes. As peças obtidas apresentaram uma boa distribuição dos poros com formatos arredondados e bem definidos da formulação C, conforme pode ser observado na imagem, da Figura 2, obtida por microscopia ótica.

Tabela 2. Análise química da massa cerâmica

Elementos	Teor (%)
SiO_2	65,20
Al_2O_3	17,06
CaO	0,19
Fe_2O_3	6,22
K_2O	2,97
MgO	1,17
Na_2O	1,13
P_2O_5	0,12
TiO_2	0,87
Perda ao fogo	5,82

No teste de resistência a elevadas temperaturas, simulando incêndio, as amostras do bloco de vedação cerâmico e a cerâmica porosa testada, não apresentaram mudanças nas suas características físicas. Já os blocos de cimento celular ficaram frágeis comprometendo sua aplicação, não apresentando resistência ao manuseio para a realização de testes de compressão. Testes em concretos mostraram que o comportamento à compressão do concreto é profundamente afetado a temperaturas variando de 100 a 800 °C, devido à completa dessecação do sistema, com a decomposição dos produtos de hidratação e com a destruição da estrutura [13].

Conforme Minotto e Vargas [11], o bloco concreto celular (BCC) possui em torno de 30% a menos de massa, em mesmo volume, que o bloco de cerâmica vermelha (BCV), conforme comprovado na Figura 3.

Ao compararmos os resultados obtidos das massas desenvolvidas, observa-se que a Prova A possui mesma densidade aparente que o BCC, e a Prova C apresenta aproximadamente 20% menos. Comparando a Prova C com o BCV, esse valor chega a 50%. Com esses valores é possível ter uma redução em estruturas de construções civil superior aos 7% que o bloco de concreto celular promove.

A redução da densidade aparente dos blocos testado está diretamente relacionada com o aumento do número de poros, conforme Figura 4, a porosidade da Prova A também se equivale a do BCC, ambas na faixa de 80%, sendo que a Prova C apresentou maior porosidade.

Os materiais com porosidade celular homogênea exibem melhores características isolantes do que materiais com mesma densidade e característica heterogêneas [14]. Essa afirmação pode ser observada na relação de densidade e condutividade das peças porosas e do BCV, que mesmo sendo na faixa de 50% de densidade os valores de condutividade térmica, compreende um terço nas peças porosas, conforme Figura 5.

Entre o BCC e a Prova A temos porosidades muito próximas, conforme a literatura [3] o cimento tem um valor de k maior que a cerâmica, logo, apesar de terem porosidades semelhantes, a condutividade térmica de uma cerâmica porosa será menor que a de um bloco de concreto celular de mesma porosidade.

A relação de porosidade da Prova A e C comprova que, com o aumento de poros, de mesmo formato e em materiais iguais, tem-se uma diminuição da condutividade térmica. E conforme observado em outros estudos, o aumento da densidade ocasiona o aumento da condutividade térmica [20].

Outro fator importante a se observar é que a condutividade térmica das paredes de alvenaria é influenciada diretamente pela espessura das juntas de argamassa, pelo volume ocupado pela argamassa e pela condutividade térmica da argamassa [21].

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados obtidos no teste de transferência de calor simulando uma edificação que absorve energia térmica do meio externo através dos mecanismos de radiação e convecção e transfere ao meio interno por condução.

A temperatura interna de sua face aquecida eleva-se em relação à temperatura inicial e, como a temperatura da face interna, não aquecida é menor, ocorrerá um fluxo de calor por condução na direção desta última.

Em ambas as temperaturas testadas, as Provas A e C apresentaram menor transferência de calor, mas mantiveram-se próximas dos valores obtidos no bloco de concreto celular e apresentaram menor transferência de calor quando comparado com o bloco de vedação cerâmico, comprovando os resultados obtidos de condutividade térmica.

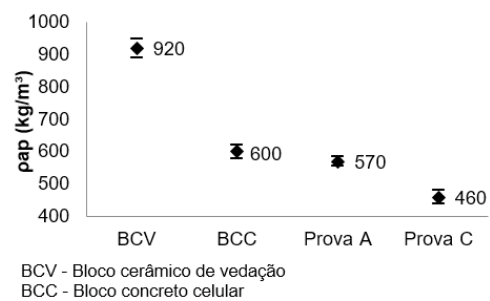


Figura 3. Gráfico das densidades aparentes.

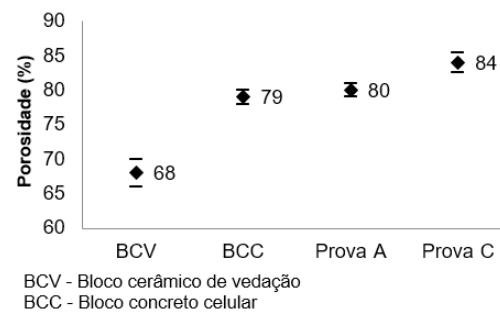


Figura 4. Gráfico do percentual de porosidade.

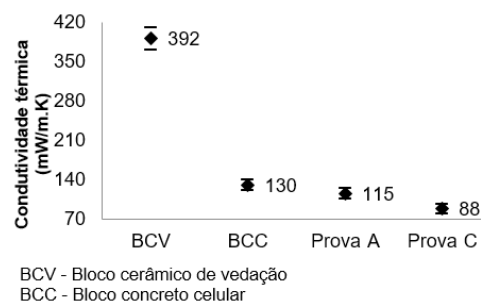


Figura 5. Gráfico de condutividade térmica.

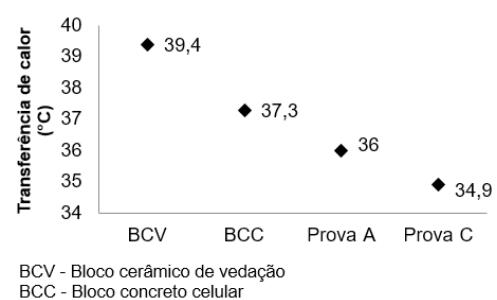


Figura 6. Transferência de calor – Temperatura face aquecida de 70 °C.

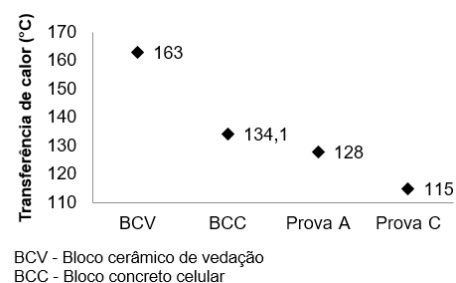


Figura 7. Transferência de calor – Temperatura face aquecida de 80 °C.

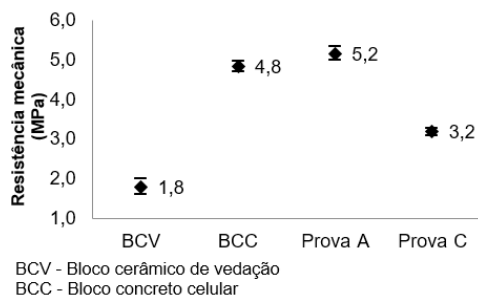


Figura 8. Gráfico da resistência mecânica à compressão.

As propriedades de isolamento são obtidas com a diminuição da resistência mecânica do material [22]. Quando se compara a Prova A com a C (Figura 8), nota-se que isso ocorre dentro da mesma tipologia de material, porém, quando se relaciona com diferentes materiais, pode-se ter maior porosidade e maior resistência mecânica, a exemplo a Prova A que possui mesma densidade do BCC, mas apresenta maior resistência mecânica.

Nota-se que as peças porosas apresentaram maior resistência mecânica que o bloco cerâmico de vedação, mesmo possuindo maior porosidade. As fases heterogêneas do BCV, fase sólida e vazada, diminuem a sua resistência, sendo que a fase homogênea das peças porosas gera produtos com propriedades distintas, a exemplo, a alta porosidade e boa resistência mecânica a compressão. Os resultados obtidos comprovam a literatura [23] onde é relatado que uma macroestrutura celular constituída de poros com geometria aproximadamente esférica, paredes densas e com microestrutura homogênea tendem a melhorar as propriedades mecânicas destes materiais, já que os poros com formato esférico apresentam uma geometria que minimiza a concentração de tensões mecânicas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir a partir desse estudo que é possível criar poros em massas cerâmicas sem adição de matéria orgânica, obtendo-se poros esféricos e uniformes, condição esta que auxilia no desempenho do material.

Utilizar blocos de baixa densidade como componente de vedação apresenta economia estrutural e energética. A utilização dos blocos de concreto celular busca atender essa necessidade, não atendida por outros materiais. Porém, o presente estudo mostra a possibilidade de produzir blocos de baixa densidade de cerâmica, apresentando vantagens sobre o BCC.

A carga sobre a estrutura pode ser reduzida à metade quando comparada com o bloco cerâmico vedação.

O bloco celular cerâmico apresentou resistência à compressão superior (5,17 MPa) comparado ao bloco cerâmico comercial (1,8 MPa), devido a porosidade esférica e regular.

Outra grande vantagem do bloco celular cerâmico é o isolamento térmico. Apesar dos testes apresentarem resultados próximos ao do bloco de concreto celular, o bloco cerâmico celular tem a vantagem de ser feito de cerâmica, ou seja, resistir a altas temperaturas sem sofrer alterações físicas destrutivas, mantendo suas propriedades em casos de incêndios ou em outras aplicações que exija resistência a altas temperaturas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES e a todas as empresas que colaboraram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 International Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. Energy technology perspectives 2010: scenarios and strategies to 2050. Paris: IEA; 2010. 710 p.
- 2 Kočí J, Maděra J, Jerman M, Černý R. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes. *Energy and Building*. 2015;99:61-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.017>.
- 3 Lamberts R, Dutra L, Pereira FOR. Eficiência energética na Arquitetura. 2. ed. São Paulo: P.W. Editores; 2014.
- 4 Kalnæs SE, Jelle BP. Vacuum insulation panel products: a state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy*. 2014;116(7465):355-375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.032>.
- 5 European Union. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*. 2010 June 18. p. 13-35.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-1:2013: edificações habitacionais: desempenho parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT; 2013. 60 p.
- 7 Zach J, Novák V. Study of the use of vacuum insulation as integrated thermal insulation in ceramic masonry blocks. *Procedia Engineering*. 2016;151:206-213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.391>.

- 8 Magalhães SMC, Leal VMS, Horta IM. Predicting and characterizing indoor temperatures in residential buildings: Results from a monitoring campaign in Northern Portugal. *Energy and Building*. 2016;119:293-308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.064>.
- 9 Dylewski R, Adamczyk J. The environmental impacts of thermal insulation of buildings including the categories of damage: a Polish case study. *Journal of Cleaner Production*. 2016;137:878-887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.172>.
- 10 Perreault P, Shur Y. Seasonal thermal insulation to mitigate climate change impacts on foundations in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2016;132:7-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.008>.
- 11 Minotto FL, Vargas A. Análise da influência de diferentes sistemas de vedação vertical no custo final de uma estrutura em concreto armado. Criciúma: UNESCO; 2011. p. 1-12.
- 12 Incropera FP, Dewitt DP. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. New York: Wiley; 2002. 997 p.
- 13 Aktusu M, Sato NMN. *Tecnologia de edificações*. 1. ed. São Paulo: Pini; 1988. Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção; p. 519-522.
- 14 Silva LCF, Mendes JUL, Ladchumananandasivam R. Análise das propriedades mecânicas e térmicas de tijolos solocimento com e sem adição do pó da fibra. In: *Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*; 2000; Natal. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2000. p. 1-6.
- 15 Schoon J, De Buysser K, Van Driessche I, De Belie N. Feasibility study on the use of cellular concrete as alternative raw material for Portland clinker production. *Construction & Building Materials*. 2013;48:725-733. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.083>.
- 16 Panesar DK. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction & Building Materials*. 2013;44:575-584. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024>.
- 17 Al-Mudhaf HA, Attiogbe EK. Performance of autoclaved aerated-concrete masonry walls in Kuwait. *Materials and Structures*. 1996;29(7):448-452. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02485996>.
- 18 Ropelewski L, Neufeld RD. Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete. *Journal of Energy Engineering*. 1999;125(2):59-75. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(1999\)125:2\(59\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(1999)125:2(59)).
- 19 American Society for Testing and Materials. ASTM C518-04: standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. West Conshohocken: ASTM International; 2004. p. 15. <http://dx.doi.org/10.1520/C0518-04>.
- 20 Walczak P, Szymanski P, Rózycka A. Autoclaved aerated concrete based on fly ash in density 350kg/m³ as an environmentally friendly material for energy: efficient constructions. *Procedia Engineering*. 2015;122:39-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.005>.
- 21 Pruteanu M, Vasilache M. Thermal conductivity determination for autoclaved aerated concrete elements used in enclosure masonry walls. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iași*. 2013;LIX-LXIII(6):33-42.
- 22 Scheffler M, Colombo P. *Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2005. <http://dx.doi.org/10.1002/3527606696>.
- 23 Ortega FS, Paiva AEM, Rodrigues JA, Pandolfelli VC. Propriedades mecânicas de espumas cerâmicas produzidas via “gelcasting”. *Cerâmica*. 2003;49(309):1-5. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132003000100002>.

Recebido em: 3 Mar. 2017

Aceito em: 8 Dez. 2017