

COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE UM ENSAIO DESTRUTIVO COM O ENSAIO DE ULTRASSOM PARA UM BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL.*

Markssuel Teixeira Marvila¹

Jonas Alexandre²

Afonso Rangel Garcez de Azevedo³

Euzébio Bernabé Zanelato⁴

Sergio Neves Monteiro⁵

Neila Gondim de Azeredo⁶

Resumo

Para avaliar a qualidade dos blocos estruturais cerâmicos um dos parâmetros mais importante é a resistência mecânica à compressão, parâmetro obtido através de um ensaio destrutivo. Nesse contexto o objetivo desse trabalho foi de encontrar uma metodologia não destrutiva para obter a resistência mecânica dos blocos estruturais. Foram confeccionados blocos queimados nas temperaturas de 800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C e ensaiados a resistência à compressão, índice de absorção de água 24 horas, densidade de massa e as medidas dimensionais, afim de verificar que atendiam as tolerâncias mínimas estabelecidas pela norma brasileira. Em seguida foram realizados ensaios de pulso ultrassônico e criadas correlações com as propriedades de resistência dos blocos. Os resultados comprovam a possibilidade da correlação proposta para a resistência à compressão.

Palavras-chave: bloco estrutural cerâmico, resistência à compressão, ultrassom.

COMPARISON OF THE RESISTANCE TO THE COMPRESSION OF A DESTRUTIVE TEST WITH THE ULTRASOUND TEST FOR A STRUCTURAL CERAMIC BLOCK.

Abstract

To evaluate the quality of the ceramic structural blocks one of the most important parameters is the mechanical resistance to compression, parameter obtained through a destructive test. The objective of this work was to find a nondestructive methodology to obtain the mechanical resistance of the structural blocks. Burned blocks were made at temperatures of 800 ° C, 850 ° C, 900 ° C, 950 ° C and 1000 ° C and the compressive strength, water absorption index 24 hours, mass density and dimensional measurements were tested to verify that they met the minimum tolerances established by the standard Brazilian. Ultrasonic pulse tests were then performed, and correlations were created with the resistance properties of the blocks. The results confirm the possibility of the proposed correlation for the compressive strength.

Keywords: ceramic structural block, compressive strength, ultrasound.

¹ Engenheiro Civil, mestre em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

² Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

⁴ Engenheiro Civil, doutorando em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

- ⁵ *Engenheiro Metalúrgico, PhD em Engenharia e Ciência dos Materiais, IME, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheira Civil, doutora em estruturas, IFF, Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Buscando diminuir os grandes problemas brasileiros de déficit habitacional, o governo federal criou diversos programas de provisão habitacional, todos usando o sistema construtivo de alvenaria estrutural [1-2]. Tal sistema, utilizando bloco cerâmicos, apresenta uma economia muito grande se comparada aos outros sistemas construtivos. Isso se deve ao fato de que, utilizando alvenaria estrutural, não é necessário o uso de vigas e pilares, já que o próprio sistema de vedação é responsável por suportar as cargas presentes na estrutura. Assim, economiza-se em tempo de execução e em materiais de construção [3-4].

Porém, como os blocos cerâmicos deixam de ter apenas a função de vedar a edificação, e passam a ter funções estruturais também, a resistência mecânica desses materiais deve estar bem determinada. Por isso, é necessário realizar o ensaio convencional normatizado pela ABNT NBR 15270-2:2017 [5] em cada conjunto de lotes produzidos na cerâmica, para se ter certeza que essa propriedade está adequada. Perde-se muito tempo e dinheiro na fabricação de tais blocos, uma vez que o ensaio normalizado é um ensaio destrutivo, onde a ruptura frágil dos corpos de prova pode ser observada pelo rompimento dos septos internos e externos. Após realização do teste, os materiais ensaiados são descartados.

Surge dessa maneira um desafio de engenharia: criar um ensaio não destrutivo para avaliar de forma precisa e confiável a resistência mecânica a compressão de blocos cerâmicos a serem usados em alvenaria estrutural, adaptando uma metodologia já desenvolvida para outros tipos de materiais de construção. Essa metodologia, já bastante difundida para avaliar o concreto, consiste em usar um ultrassom para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtida por pulsos ultrassônicos. Para o concreto, o ensaio é regido pela ABNT NBR 8802:2013 [6], porém para materiais cerâmicos não existe norma brasileira regulamentadora.

A motivação do uso desse método são os excelentes resultados já obtidos por diversos pesquisadores com os materiais mais diversificados usando a técnica não destrutiva do ultrassom. A seguir são apresentados alguns desses trabalhos, que serviram de motivação para o estudo destacado neste artigo.

O uso da metodologia do ultrassom acarretou em excelentes resultados para avaliação do comportamento estrutural de em diferentes tipos de telhas de cerâmica vermelha [7] e em vigas de concreto armado com dimensões 20 x 40 x 100 cm [8]. Na análise desses resultados, as pesquisas destacadas realizaram um estudo estatístico, mas não formularam correlações dos resultados obtidos com o ensaio convencional destrutivo para esses materiais.

Estudos que visam correlacionar os resultados experimentais para dois tipos diferentes de ensaios não destrutivos foram realizados para a estrutura de viadutos de concreto armado da região de Curitiba [9], para quatro pontes da cidade de Aracaju em concreto armado [10], e para corpos de prova cilíndricos e cúbicos de concreto armado moldados em laboratório [11]. Todos estudos citados correlacionaram os resultados obtidos pelo método do ultrassom com o método do esclerômetro, outro ensaio não destrutivo realizado através da medição da dureza do material. Sabendo esse parâmetro, os trabalhos correlacionaram os resultados obtidos com a resistência à compressão, obtendo excelentes resultados.

Dessa maneira, o uso de ensaio de ultrassom, como alternativa ao ensaio convencional de compressão em blocos cerâmicos para alvenaria estrutural, é uma alternativa com grande potencial de ser efetivamente implantada para controle da

qualidade desse material. Nesse artigo serão discutidas formas de implementar uma correlação entre os dois tipos de ensaios: destrutivo e não destrutivo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A massa argilosa utilizada para produção dos blocos estruturais foi retirada de uma jazida da cidade de Campos dos Goytacazes. A caracterização desse material é apresentada a seguir: a Figura 1 indica a distribuição granulométrica do material seguindo o procedimento da ABNT NBR 7181: 2016 [12]; a Figura 2 apresenta a análise mineralógica; a Tabela 1 apresenta as principais propriedades físicas da massa argilosa; e a Tabela 2 apresenta a caracterização química do material estudado.

Tabela 1. Propriedades Físicas da massa cerâmica empregada.

Propriedade	Valor obtido
Limite de Liquidez (LL)	68,5%
Limite de Plasticidade (LP)	33,7%
Índice de Plasticidade (IP)	34,7%
Massa Específica	2,62 g/cm ³

Tabela 2. Análise Química da massa cerâmica empregada.

Composição química	Porcentagem (%)
SiO ₂	47,31
Al ₂ O ₃	37,85
Fe ₂ O ₃	8,10
K ₂ O	2,03
SO ₃	2,20
TiO ₂	1,57
CaO	0,67
MnO	0,07

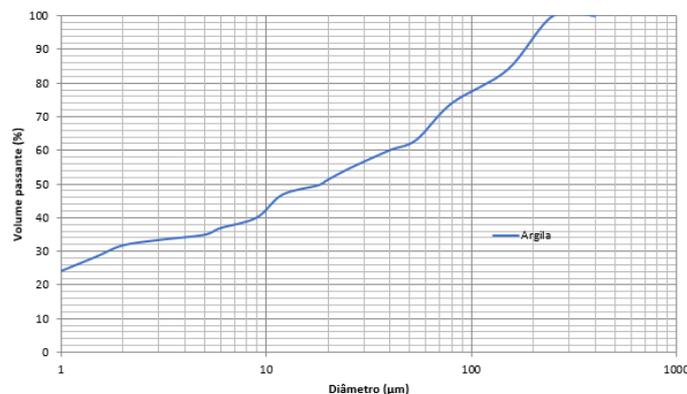


Figura 1. Distribuição Granulométrica da massa cerâmica empregada.

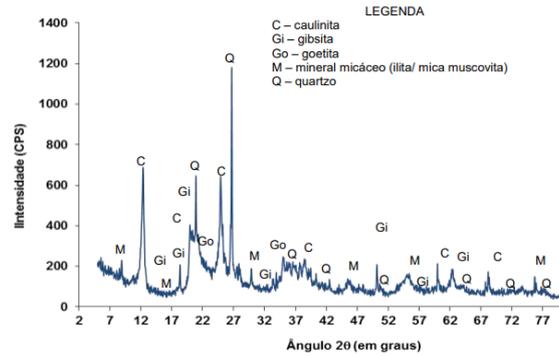


Figura 2. Caracterização Mineralógica da massa cerâmica empregada.

Com a massa argilosa descrita foi realizada a confecção de 25 blocos cerâmicos estruturais de dimensões 14x19x29 cm (largura, altura, comprimento) para cada uma das temperaturas de queima testadas (800°C, 850°C, 900°C, 950°C e 1000°C). Esse tipo de bloco é classificado como bloco cerâmico estrutural inteiro, também chamado de bloco principal, e foi conformado através de extrusão utilizando o teor de umidade entre 20% e 25%. A extrusora utilizada no processo foi uma maromba modelo MVB-16” fabricada pela Bonfanti.

O controle da temperatura de queima foi realizado através de um termopolar, que mede a temperatura interna do forno, tendo sido rigorosamente controlada, conforme Figura 3. Foi utilizado um forno modelo A900, produzido por JRicardo, com dimensões de 60mm de largura, 800mm de profundidade e 900mm de altura, podendo alcançar a temperatura de 1300°C. O processo de queima, para cada temperatura, foi realizado num tempo de 9 horas. A elevação de temperatura, dessa forma, variou entre 1,25°C a 3,00°C por minuto, o que caracteriza um processo de queima lenta [13].

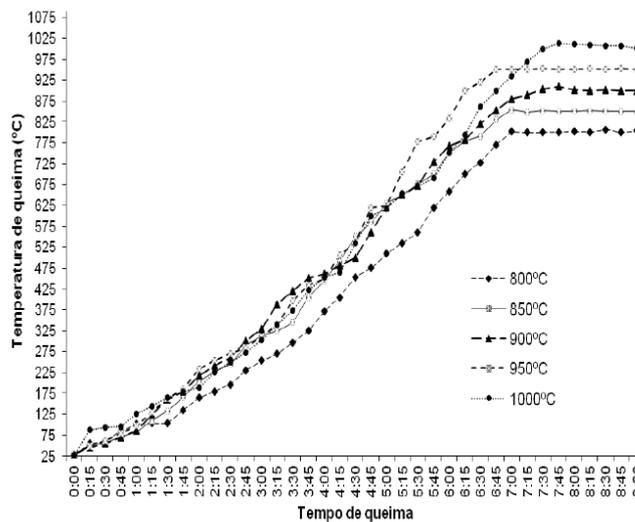


Figura 3. Controle da temperatura de queima.

Para cada bloco avaliado foram realizados os ensaios normativos com um primeiro objetivo de verificar se os blocos em estudos atendem aos limites estipulados pela ABNT NBR 15270-1:2017[14]. Os limites normativos são destacados a seguir: tolerâncias dimensionais de $\pm 3\text{mm}$; espessura dos septos internos $\geq 7\text{mm}$ e dos externos $\geq 8\text{mm}$; desvio em relação ao esquadro de 3mm; planeza das faces de

3mm; resistência à compressão ≥ 3 MPa; e índice de absorção de água após 24 h entre 8 a 22%.

As tolerâncias dimensionais foram realizadas medindo as três dimensões principais dos blocos avaliados (comprimento, largura e altura) utilizando um paquímetro de sensibilidade mínima de 0,05mm, fazendo-se as medições nos pontos intermediários do bloco cerâmico. As medidas dos septos internos e externos, o desvio em relação ao esquadro e a planeza das faces foram realizadas conforme metodologia da ABNT NBR 15270-2: 2017 [5].

Os ensaios para obtenção da resistência à compressão das unidades foram realizados conforme a ABNT NBR 15270-2:2017 [5] para os blocos cerâmicos estruturais. Esse é um tipo de ensaio destrutivo, onde a ruptura frágil dos corpos-de-prova pode ser observada pelo rompimento dos septos internos e externos. Para a realização do ensaio os blocos foram capeados com pasta de cimento com espessura máxima de três milímetros para que as faces em contato com as placas da prensa estivessem completamente planas. Na execução do ensaio os blocos foram mantidos na condição saturada e todos os corpos-de-prova foram ensaiados de modo que a carga fosse aplicada na direção do esforço que o bloco suporta durante o seu emprego, sempre perpendicular ao comprimento e na face destinada ao assentamento. Foi utilizado uma prensa Shimadzu UH-F 500 kN. Além disso, foi realizada o ensaio de absorção de água por imersão após 24 horas e de densidade dos corpos de prova, ambas seguindo o procedimento da ABNT NBR 15270-2:2017 [5].

Por fim foram realizados os ensaios de pulso ultrassônico utilizando a metodologia adaptada da norma ABNT NBR 8802: 2013 [6], que regulamenta o ensaio para corpos de prova de concreto. Para realização do ensaio foi utilizado um equipamento do tipo PortableUltrasonic Non-Destructive Digital IndicatingTester, Plus (PUNDIT LAB+) de fabricação suíça, que opera numa faixa de frequência entre 20 kHz a 500 kHz. O ensaio consiste em medir o tempo necessário para que a onda emitida se propague entre dois pontos extremos de um determinado corpo de prova. Conhecendo o comprimento L do corpo de prova é possível obter a velocidade de propagação da onda através da equação a seguir:

$$V = \frac{L}{T}$$

onde:

V= velocidade de propagação da onda em m/s;

L= dimensão do corpo de prova percorrido pelo pulso ultrassônico em m;

T= tempo em s que demora para a onda atravessar dois pontos extremos do corpo de prova analisado.

Padronizou-se a realização das medições dos pulsos ultrassônicos na maior dimensão do corpo de prova.

Para correlação dos valores obtidos na resistência à compressão com as velocidades encontradas no ensaio de pulso ultrassônico foi adotado a correlação com o módulo de elasticidade dinâmico [15,16]. Os parâmetros destacados são obtidos através das expressões destacadas a seguir:

$$E_d = (V)^2 * \rho * \frac{1 - \nu}{(1 - \nu) * (1 - 2\nu)}$$

onde:

Ed= módulo de elasticidade dinâmico em N/mm²;

V= velocidade da onda na maior direção do corpo de prova em m/s;

ρ = densidade do material em kg/m³;

ν = coeficiente de Poisson, adotado com 0,20, seguindo trabalhos pesquisados na bibliografia internacional [17-18].

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para os ensaios dimensionais, espessura dos septos, desvio do esquadro e planeza das faces são apresentados na Tabela 3. Conforme é possível observar analisando a tabela, os corpos de prova na temperatura de queima de 1000°C não atenderam aos limites normativos em relação as medidas do comprimento, largura, altura e das medidas dos septos externos, o que pode ser atribuído a retrações da massa cerâmica proveniente da queima nessa temperatura. Os demais corpos de prova avaliados mostraram-se aceitáveis aos limites estipulados pela ABNT NBR 15270-1: 2017 [14].

A Tabela 4 apresenta os valores encontrados para absorção de água após 24 horas, resistência à compressão e densidade dos blocos cerâmicos avaliados. Sobre a resistência à compressão todos os corpos de prova avaliados obtiveram valores compatíveis com os limites normativos. Na absorção de água, entretanto, os corpos de prova queimados a 800°C não atenderam aos limites normativos. Esse fato não prejudicou o objetivo proposto, uma vez que a correlação realizada foi obtida com os parâmetros de resistência à compressão. Na mesma tabela é apresentado a velocidade do pulso ultrassônico medido e do módulo de elasticidade calculado para cada temperatura.

Tabela 3. Parâmetros obtidos para análises dimensionais dos corpos de prova estudados.

Medidas Realizadas	800°C	850°C	900°C	950°C	1000°C
Comprimento (cm)	29,2 ± 0,14	29,10 ± 0,11	28,99 ± 0,18	28,91 ± 0,05	28,25 ± 0,10
Largura (cm)	13,9 ± 0,08	13,7 ± 0,09	13,7 ± 0,04	13,8 ± 0,06	13,3 ± 0,22
Altura (cm)	18,90 ± 0,08	18,85 ± 0,04	18,83 ± 0,13	18,74 ± 0,10	18,28 ± 0,07
Septos internos (mm)	8,41 ± 0,14	8,50 ± 0,13	8,45 ± 0,07	8,65 ± 0,10	8,13 ± 0,09
Septos externos (mm)	9,19 ± 0,05	9,13 ± 0,08	9,09 ± 0,11	9,24 ± 0,07	8,83 ± 0,14
Desvio de esquadro (mm)	1,22 ± 0,06	1,26 ± 0,10	1,26 ± 0,11	1,33 ± 0,12	1,40 ± 0,08
Planeza das faces (mm)	0,90 ± 0,04	1,00 ± 0,08	0,88 ± 0,07	1,07 ± 0,06	1,57 ± 0,05

Tabela 4. Propriedades tecnológicas dos corpos de prova estudados.

Propriedade avaliada	800°C	850°C	900°C	950°C	1000°C
Absorção de água (%)	22,80 ± 0,53	22,19 ± 0,84	21,92 ± 0,78	20,39 ± 0,67	17,69 ± 1,10
Resistência à compressão (MPa)	7,84 ± 1,57	6,58 ± 0,97	7,06 ± 0,98	8,83 ± 0,85	11,89 ± 1,43
Densidade (g/cm ³)	2,63 ± 0,04	2,63 ± 0,02	2,74 ± 0,04	2,70 ± 0,02	2,67 ± 0,02
V (m/s)	2,68 ± 0,15	2,51 ± 0,22	2,67 ± 0,35	2,88 ± 0,35	3,34 ± 0,34
E _d (GPa)	31,48 ± 1,01	27,62 ± 0,95	32,55 ± 1,42	37,32 ± 1,23	49,64 ± 0,9

A Figura 4 apresenta a correlação entre todos os 125 corpos de prova estudados (25 para cada temperatura) para a propriedade de resistência à compressão (eixo x) e a propriedade E_d (eixo y). Conforme observa-se pela figura destacada, para cada

temperatura, a correlação obtida entre os parâmetros propostos é linear com altos valores de regressão ($R^2 > 0,9232$).

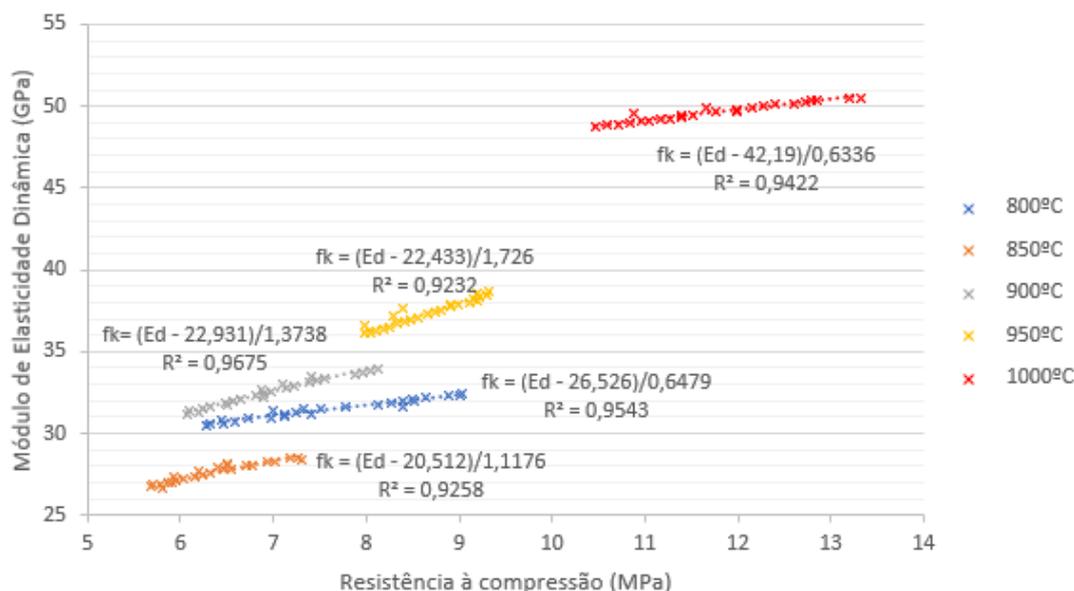


Figura 4. Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico.

A Tabela 5 apresenta os valores de resistência calculados com base no modelo proposto pelas equações contidas na Figuras 4, bem como os erros relativos. É possível perceber que a metodologia de correlação proposta apresenta valores muito satisfatórios, uma vez que o erro relativo máximo foi de 3,34%. Isso pode ser explicado da seguinte maneira: no cálculo do módulo de elasticidade utiliza-se a velocidade de propagação da onda na direção na maior direção do bloco cerâmico, que é justamente a direção em que os blocos são solicitados à compressão no ensaio prescrito pela ABNT NBR 15270-2: 2017 [5]. Além disso, a velocidade de pulso ultrassônico, que serviu como base para formulação dos modelos desse trabalho, indica uma medida da porosidade do material avaliado [19-20]. Conforme destaca Ju et al. (2017) [21], quanto mais poroso for o material, menor será a velocidade do seu pulso ultrassônico, uma vez que ao longo de uma reta de propagação a onda sofrerá mais fenômenos de reflexão e apresentará um período maior. Sabe-se que a porosidade do material influencia diretamente em sua resistência, e, portanto, a velocidade de propagação do pulso ultrassônico irá interferir diretamente na resistência do material. De maneira geral, quanto maior a velocidade de propagação da onda, menor a porosidade do material, e consequentemente maior a resistência à compressão. Essa é a justificativa que serve como base para os modelos propostos, comprovado pelos resultados obtidos.

Tabela 5. Propriedades tecnológicas dos corpos de prova estudados.

Resistência à compressão (MPa)	800°C	850°C	900°C	950°C	1000°C
Valor experimental	7,84	6,58	7,06	8,83	11,89
Correlação com módulo de elasticidade dinâmico	7,646	6,360	7,002	8,625	11,760
Erro relativo	2,47%	3,34%	0,82%	2,32%	1,10%

4 CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos para os blocos cerâmicos estruturais produzidos utilizando uma massa cerâmica extraída de uma jazida da cidade de Campos dos Goytacazes- RJ, é possível perceber que a correlação entre o ensaio de resistência à compressão convencional e o ensaio de pulso ultrassônico é possível. Destaca-se que os corpos de prova avaliados foram queimados a diferentes temperaturas e obtiveram aprovação em praticamente todos os requisitos exigidos pela ABNT NBR 15270-1: 2017 [14], com exceção da absorção de água para os blocos queimados a 800°C e as tolerâncias dimensionais para os blocos queimados a 1000°C. Essa não adequação, porém, não prejudicou a correlação realizada, uma vez que nessas temperaturas de queima os modelos propostos não apresentaram valores de erro muito elevados.

Conforme destacado no trabalho, existem diversas vantagens em avaliar a resistência à compressão dos blocos estruturais cerâmicos com o ensaio de ultrassom, uma vez que se economiza tempo e material realizando a avaliação pelo ensaio não destrutivo, como a economia de tempo e de recursos financeiros. Para realizar essa avaliação é possível aplicar as correlações propostas nessa pesquisa, dependendo da temperatura de queima utilizada, baseando-se numa relação com o módulo de elasticidade dinâmico obtidos através das velocidades de propagação das ondas ao longo da maior dimensão dos corpos de prova avaliados.

REFERÊNCIAS

- 1 H.M. Cruz, D.G. Santos, L.A. Mendes, “Causas da variabilidade do tempo de execução dos processos em diferentes sistemas construtivos”, Revista Ambiente Construído, Vol. 18, nº1, p. 49-65, 2018.
- 2 R.A. Oliveira, F.A.N. Silva, C.W.A.P. Sobrinho, A.A.C. Azevedo, “Edificações em alvenaria resistente na região metropolitana do Recife”. Ambiente Construído, v. 17, n. 2, p. 175-199, 2017.
- 3 H.A.L. Leite, A.L.M. Junior, D.L. Torres, “Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional”. Ambiente Construído, v. 16, n. 2, p. 89-107, 2016.
- 4 G.A. Parsekian, M.R.S. Corrêa, G.M. Lopes, I. Cavichioli, “Estudo teórico e experimental de paredes esbeltas de alvenaria estrutural”, Ambiente Construído, v. 16, n. 4, p. 197-213, 2016.
- 5 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15270-2. Blocos cerâmicos para Alvenaria Estrutural e de Vedação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2017.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8802. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- 7 A.P.S. Neto, P.F. Castro, “A aplicação do ultrassom para verificação da resistência de tração à flexão das telhas em cerâmica vermelha”, Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção, vol. 03, 2004.

- 8 A. Lorenzi, L.C.P.S. Filho, “Analysing Different Data Processing Strategies for Using Ultrasonic Measurements to Monitor Concrete Structures”, Journal of the Brazilian Neural Network Society, Vol. 9, pp. 216-233, 2011.
- 9 D.J. Souza, E.M. La Torre, F. Kosloski, L. Silvestro, L.B.P Leme, M.H.F. Medeiros, “Obtaining the compressive strength of the concrete of viaducts located in the Curitiba region by methods of non-destructible tests: sclerometry and ultrasound”, 18º National Meeting of Road Conservation, ENACOR, 2015.
- 10 C.H. Carvalho, M.C.S.S. Macedo, J.B.S. Junior, S. Griza, C.E.C. Andrade, A.A Santos, L.S. Barreto, L.S., “Comparative study of non-destructive ultrasound and sclerometry techniques in the evaluation of the mechanical performance of structures in reinforced concrete.”, XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción, 2013.
- 11 G. Mohamad, P.I.O. Carmo, M.J.D. Oliveira, A.L. Temp, “A combination method for evaluation of the concrete strength”, Matéria, Vol. 20, pp. 83-99, 2015.
- 12 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7181. Análise Granulométrica - Solo. Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- 13 R.P.S. Dutra, M.L.Varela, R.M. Nascimento, U.U. Gomes, A.E. Martinelli, C.A. Paskomicimas, “Comparative study of the rapid burning with the traditional burning in the properties of ceramic materials of clayey base”, Cerâmica, Vol. 55, pp. 100-105, 2009.
- 14 Associação Brasileira de Normas (ABNT). NBR 15270-1. Blocos cerâmicos para Alvenaria Estrutural e de Vedação – Recomendações gerais. Rio de Janeiro, RJ, 2017.
- 15 E. Pereira, M.H.F. Medeiros, “Ensaio de "Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil”, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, Vol. 05, 2012.
- 16 V. Estolano, S. Fucale., J.O.V. Filho, D. Gabriel, Y. Alencar, “Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto”, Revista Matéria, vol. 23, 2018.
- 17 C. Lee, D. Lee, S. Jeon, “The Influence of Excavation Damaged Zone on the Mechanical and Thermal Behavior of Cement Mortar Block around an Opening”. KSCE Journal of Civil Engineering, KSCE, Vol. 17(6), 2013.
- 18 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7181. Análise Granulométrica - Solo. Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- 19 V.G. Haach, F.C. Ramirez, “Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography”, Construction and Building Materials, Vol. 119, 2016.
- 20 V.G. Haarch, L.M. Juliani, M.R. da Roz, “Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early strength cement”, Construction and Building Materials, Vol. 96, 2015.
- 21 T. Ju, J. D. Achenbach, L. J. Jacobs, M. Guimaraes, J. Qu, “Ultrasonic nondestructive evaluation of alkali–silica reaction damage in concrete prism samples”. Materials and Structures, pp.50-60, 2017.