Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE GLOBAL DE UMA EDIFICAÇÃO HISTÓRICA DE ALVENARIA DE TIJOLOS MACIÇOS PELO MÉTODO ULTRASSONICO

A. ALVES
Aluno de Graduação
LAER, Engenharia Civil, UVA
Sobral, Brasil
andre.eng.civ@hotmail.com

S. SANTOS
Aluno de Graduação
LAER, Engenharia Civil, UVA
Sobral, Brasil
david-santos@live.com

F. BRANDÃO
Aluno de Graduação
LAER, Engenharia Civil, UVA
Sobral, Brasil
eng.franciscobrandao@hotmail.com

E. MESQUITA
Doutorando
CONSTRUCT-LESE, FEUP
Porto, Portugal
emesquita@feup.pt

A. DIOGENES
Professora M.S.c
LAER, Engenharia Civil, UVA
Sobral, Brasil
aldeciragd@yahoo.com.br

RESUMO

Devido às incertezas em relação a segurança estrutural envolvendo edificações históricas, são necessários os estudos de fiabilidade estrutural, que consistem de várias etapas, dentre elas as caracterizações dos materias, que devem, preferivelmente, ser realizadas de formas não invasivas. Neste âmbito se encontram os ensaios não destrutivos (END). Estes métodos causam pouco ou nenhum dano à peça analisada. Dentre os END mais utilizados atualmente, podemos citar o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, que pode ser utilizado para diversos fins dentro da construção civil. De forma direta ou indireta, é possível calcular/majorar propriedades como o módulo de elasticidade, e, através desta, calcular também a própria resistência do material. Este tipo de abordagem é especialmente usado para avaliação de prédios históricos, como a Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Homens Pretos, localizada na cidade de Aracati. Esta igreja foi edificada em 1775, sendo considerado um prédio de alto valor documental devido sua importância histórica. Na cheia de 1974, esta igreja sofreu grandes danos com o precipitado alojamento de inúmeras famílias desabrigadas pela enchente, voltando a funcionar novamente somente em 1982. Desta forma, de modo a analisar as características mecânicas das alvenarias da citada edificação, o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico foi aplicado com transmissão indireta de pulsos em varias partes da alvenaria. Através dos valores de velocidade de onda ultrassônica obtidos neste estudo foi possível estimar o módulo de elasticidade da estrutura analisada.
Palavras-chave: módulo de elasticidade dinâmico, ultrassom, ensaios não destrutivos, patrimônio histórico.

ABSTRACT

Due to uncertainties regarding the structural safety involving historic buildings, the structural reliability analysis are needed. Among those kind of analysis there is the characterizations of materials, which should preferably be conducted in non-destructive ways. In this context it can be mentioned the non-destructive testing (NDT), which cause little or no damage to the piece analyzed. Among the END most widely used, it can be pointed out the ultrasonic pulse velocity test, which can be used for various purposes in construction. Directly or indirectly, it can calculate properties such as modulus of elasticity, and through this also calculate the strength of the material itself. This kind of approach is especially used for evaluation of historic buildings, such as the Church of Our Lady of the Rosary of Black Men, located in the city of Aracati, Ceará, Brazil. This church was built in 1775 and it is considered a high historical value building. In the flood of 1974, this church suffered extensive damage with the precipitate housing by many families made homeless by the flood, and this situation remained until 1982. Thus, in order to analyze the mechanical characteristics of the walls of that building, ultrasonic velocity test was applied with indirect transmission of pulses in some parts of the masonry. Through the ultrasonic wave velocity values obtained in this study it was possible to estimate the Young's modulus of the analyzed structure.
Keywords: Young's dynamic modulus, ultrasound, non-destructive testing, heritage constructions.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END) têm um papel de grande destaque no âmbito da construção civil, em especial para a caracterização tanto de estruturas antigas (avaliação da integridade estrutural) quanto de estruturas novas (controle de qualidade)[1]. Dentre as principais vantagens dos END estão o custo reduzido, a facilidade de aplicação e o fato de não causar ou causar pouca avaria à estrutura analisada, não alterando assim o desempenho desta. Em virtude dessa característica dos END, é possível o reensaio da mesma peça de uma estrutura, viabilizando o seu constante monitoramento e consequente comparativo de seu estado de conservação ao longo do tempo.

São vários os tipos de END, baseados nos mais variados princípios físicos, o que, consequentemente, produz diferentes conjuntos de informação para análise. Quando utilizados na avaliação de uma estrutura, os END são mais comumente aplicados para identificar detalhes específicos ao invés do problema geral que está sendo analisado. Assim, dependendo do parâmetro que se deseja analisar, tem-se um diferente ensaio à disposição[2].

Uma vez que se está analisando as propriedades de uma estrutura, alguns parâmetros, se conhecidos, facilitam este processo, além de serem essenciais para a fidedignidade deste. Esses parâmetros a serem verificados variam de acordo com o tipo de material utilizado. Em alvenaria de tijolo, por exemplo, os principais fatores são: (i) a sua geometria; (ii) as características da sua textura, se feita por fiadas únicas ou múltiplas, (iii) o tipo de conexão entre as fiadas, (iv) se as articulações estão vazias ou preenchidas com argamassa, (v) as características físicas, químicas e mecânicas características dos componentes (pedras, argamassa); (vi) as características da alvenaria como um material compósito [3]. Portanto, a medida que dados primários da estrutura não estão disponíveis, a aplicação de alguns END fica limitada ou tem grau de confiabilidade reduzido.

Dentre os END mais utilizados, pode-se citar o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico. Esse teste consiste na medição do tempo que uma onda mecânica demora para atravessar certo material. Suas vantagens são o custo e tempo relativamente baixos[2]. Este método é utilizado para, entre outros fins, analisar as propriedades elásticas de diferentes tipos de materiais.

Qixian e Bungey[4] analisaram o módulo de elasticidade de 3 tipos de concreto com diferentes proporções de materiais e diferentes tipos de agregado através de métodos sônicos. Os autores verificaram que as variações das propriedades do concreto, oriundas da variação do tipo e quantidade de materiais, das quais era sabido que causariam alteração no módulo de elasticidade também causaram alterações nos resultados dos ensaios sônicos de forma direta.

Em relação a alvenarias, o método de velocidade de pulso ultrassônico é o mais comum teste para avaliação destas [5], sendo útil para a sua qualificação através da morfologia da secção de parede; para detectar a presença de espaços vazios e falhas e para encontrar padrões de fissura e danos[6].

Miranda *et al*[7] analisaram uma parede (em alvenaria de pedra) de uma edificação do início do século XX na cidade do porto, Portugal. Esta parede estava com sua demolição planejada, assim ela foi removida, recortada em seis partes e transportada ao laboratório para análise. Métodos sônicos foram aplicados às amostras à medida que estas eram comprimidas verticalmente. O módulo de elasticidade foi calculado atráves de um método direto (aplicação de carga) e um indireto (método sônico). Os valores do módulo de elasticidade encontrados através dos dois métodos foram bastante similares.

Em outro estudo Miranda *et al*[8] analisaram a sensibilidade de métodos sônicos através da análise de doze painéis de alvenaria de pedra (seis irregulares e seis perfeitamente regulares). Foram feitos testes sônicas horizontais e verticais além de testes diretos (mecânicos) do módulo de elasticidade. Uma vez que os painéis tinha apenas uma camada vertical, e várias camadas horizontais, foi possível analisar os painéis em duas situações: pedras isoladas e o conjunto "pedra + junção". Através da análise dos resultados os autores perceberam que o módulo de elasticidade médio dos painéis regulares foi praticamente o mesmo encontrado através do método sônico e do método mecânico. A mesma situação ocorreu com os painéis irregulares.

Pode-se citar também o trabalho de Totoev e Nichols[9] onde foi analisado o módulo de elasticidade dos materiais constituintes de sete diferentes tipos de tijolos através de métodos mecânicos e sônicos. Através da análise dos resultados, os autores perceberam que os métodos sônicos apresentaram resultados plausíveis quando comparados ao resultado obtido através do método mecânico.

Assim, tendo em vista as vantagens de aplicação dos métodos sônicos para avaliação de alvenarias, no presente trabalho, a técnica de determinação da velocidade ultrassônica foi aplicada as alvenarias de tijolo maciço de uma edificação de interesse histórico localizada no estado do Ceará, de modo a determinar as suas características mecânicas, tendo como principal objetivo o cálculo do módulo de elasticidade global da edificação.

2. ESTRUTURA ANALISADA

A igreja de nossa senhora do rosário dos homens pretos (vide Figura 50) foi edificada pela irmandade de nossa senhora do rosário dos homens pretos em 1775, e recuperada no final do século passado até 1930. Na cheia de 1974, sofreu grandes danos com o precipitado alojamento de inúmeras famílias desabrigadas pela enchente, voltando a funcionar novamente somente em 1982.



Figura 50 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos em Aracati, estado do Ceará

A igreja tem uma área construída de aproximadamente 600 m². A parte mais alta da coberta e a torre têm alturas de 9,9 m e 22,9 m respectivamente. O piso da igreja é composto de ladrilho hidráulico sobre tijoleira (mais antiga). As paredes de alvenaria em tijolo cerâmico maciço suportam uma coberta com tesouras de madeira com caibros e terças de carnaúba e um telhado cerâmico. Nas naves laterias há lajes pré-moldadas sob a estrutura de madeira original (apoiada sobre a alvenaria).

3. METODOLOGIA

De modo a alcançar o objetivo proposto, definiu-se que o modo de avaliação da estrutura seria através do ensaio velocidade de pulso ultrassônico. Foi utilizado no presente estudo um aparelho de pulso ultrassônico PROCEQ® modelo TICO. Os transdutores utilizados tem frequência aproximada de 54 kHz. Em seguida, fez-se necessário a decisão do tipo de transmissão de pulso que seria utilizado nos ensaios. Este parâmetro é definido pela posição do transdutor receptor (R) em relação ao transdutor transmissor (T) do aparelho como pode ser visto na Figura 51.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

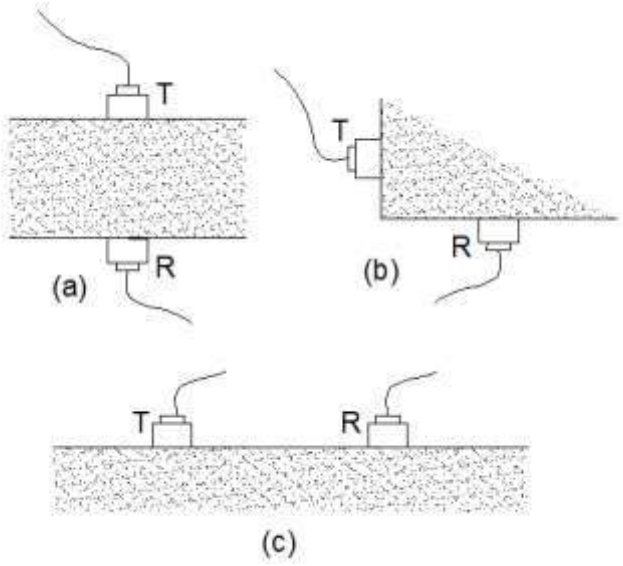

Figura 51 - Diferentes configurações de transmissão de pulso ultrassônico: (a) transmissão direta; (b) transmissão semidireta; (c) transmissão indireta

O tipo de transmissão influencia alguns parâmetros do ensaio, como o tipo de onda a ser analisada, e, consequentemente o modo de análise dos resultados[8]. Uma vez que para algumas das alvenarias a serem avaliadas não seria possível realizar a transmissão direta de pulsos, utilizou a transmissão indireta de pulsos, posicionando os dois transdutores (transmissor e receptor) na mesma face.

Após estudo prévio da geometria e arquitetura da edificação, definiu-se o modelo de trabalho, avaliando pontos estratégicos da arquitetura. Os elementos analisados foram os seguintes:

- Metade da fachada principal;
- Fachada esquerda;
- Fachada de fundo da edificação;
- Paredes da nave principal (ortogonais às fachadas laterais);
- Paredes da nave principal (paralelas às fachadas laterais);
- Dois (2) pilares do lado direito da nave principal e dois (2) pilares do lado esquerdo da nave principal

As posições direita e esquerda são relativas a um observador posicionado de frente a fachada principal da edificação. Estes elementos podem ser verificados nas Figura 52 e Figura 53.

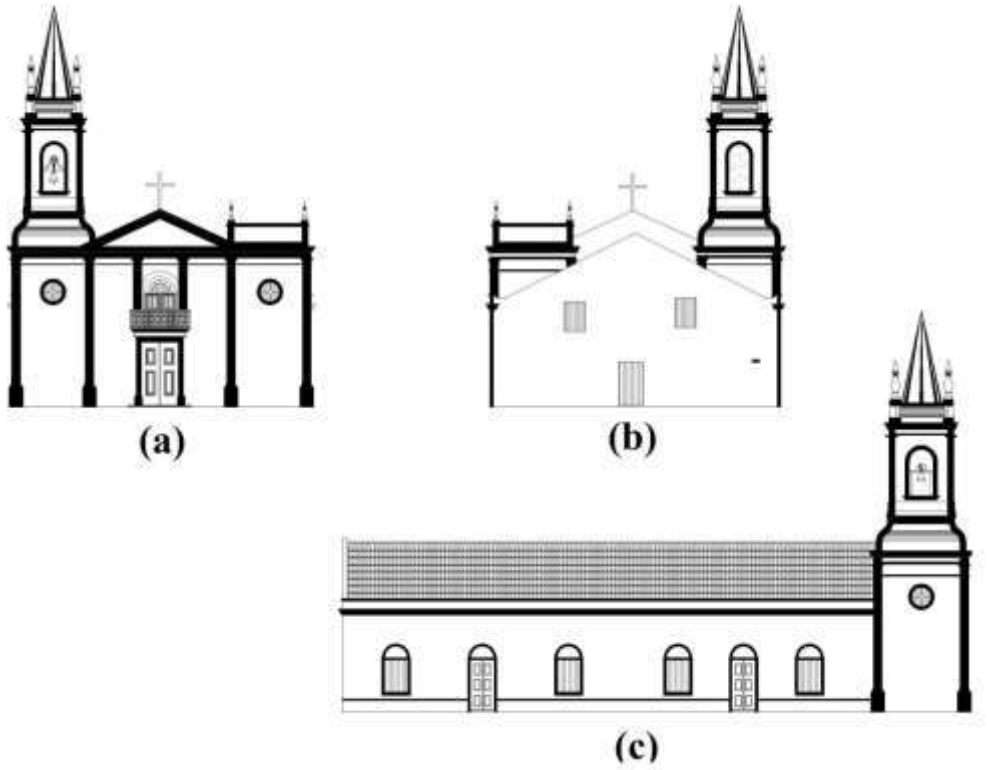

Figura 52 – Cortes das fachadas analisadas da edificação: (a) fachada principal; (b) fachada fundo; (c) fachada esquerda. Fonte: IPHAN[10]

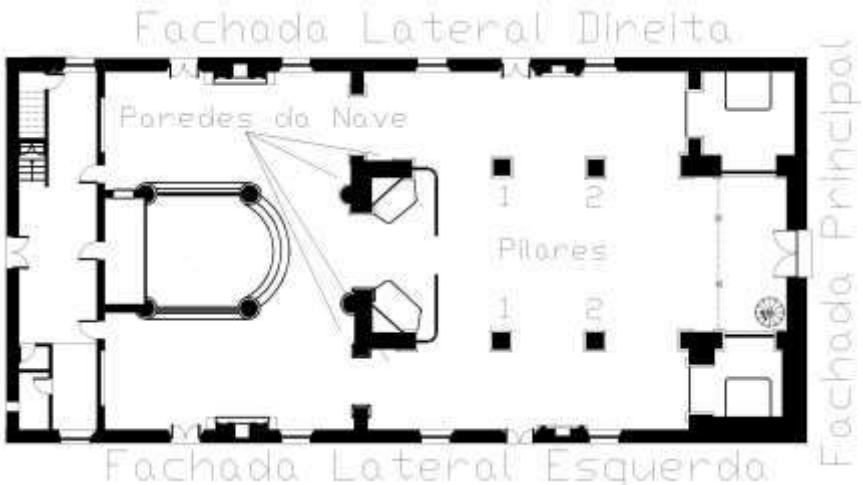

Figura 53 – Planta baixa do térreo da edificação. Fonte: IPHAN[10]

O processo de análise desses elementos foi dividido em duas fases:

Fase 1 – Avaliação linear/horizontal em uma cota (Y - altura)
1,5m para pilares e 1,3m para demais elementos

Fase 2 – Avaliação linear/horizontal em três cotas (Y - altura)
0,5m, 1,5m e 2,5m para pilares e 0,3m, 1,3m e 2,3m para demais elementos

Para cada cota foram definidos “quadrantes de avaliação”, que são medidas lineares e horizontais que demarcam a região a ser avaliada. Para cada elemento (pilares; paredes etc) a quantidade de quadrantes era definida tomando como base as dimensões dos próprios elementos. Em cada quadrante, a avaliação ultrassônica foi feita obedecendo ao modelo descrito na Figura 54.

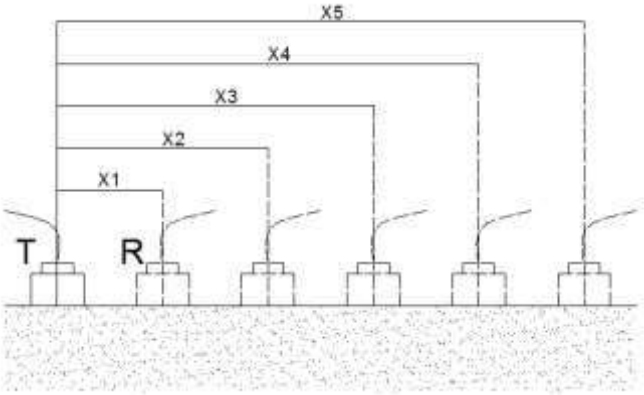

Figura 54 – Formação dos quadrantes de avaliação

Os valores de X foram definidos de tal forma a sempre formarem uma progressão aritmética de razão X1, mantendo o mesmo padrão em todos os elementos analisados, sempre que possível. Por padrão, essa razão foi fixada em 10 cm.

4. RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados são referentes apenas à Fase 1 descrita na metodologia. As velocidades foram plotadas nos gráficos das figuras Figura 55, Figura 56 e Figura 57. Cada conjunto de pontos na mesma linha vertical representa um "quadrante de avaliação", cada ponto é descrito pela legenda e representa a distância entre o transdutor transmissor e o transdutor receptor em metros. Para melhor compressão, cada conjunto de pontos usará uma nomenclatura especial de três caracteres. O primeiro caractere representa a figura (1ª, 2ª ou 3ª); o segundo representa o gráfico da figura (a, b, c ou d) e o terceiro caractere representa o conjunto de pontos na mesma linha vertical (1º, 2º, ... nº).

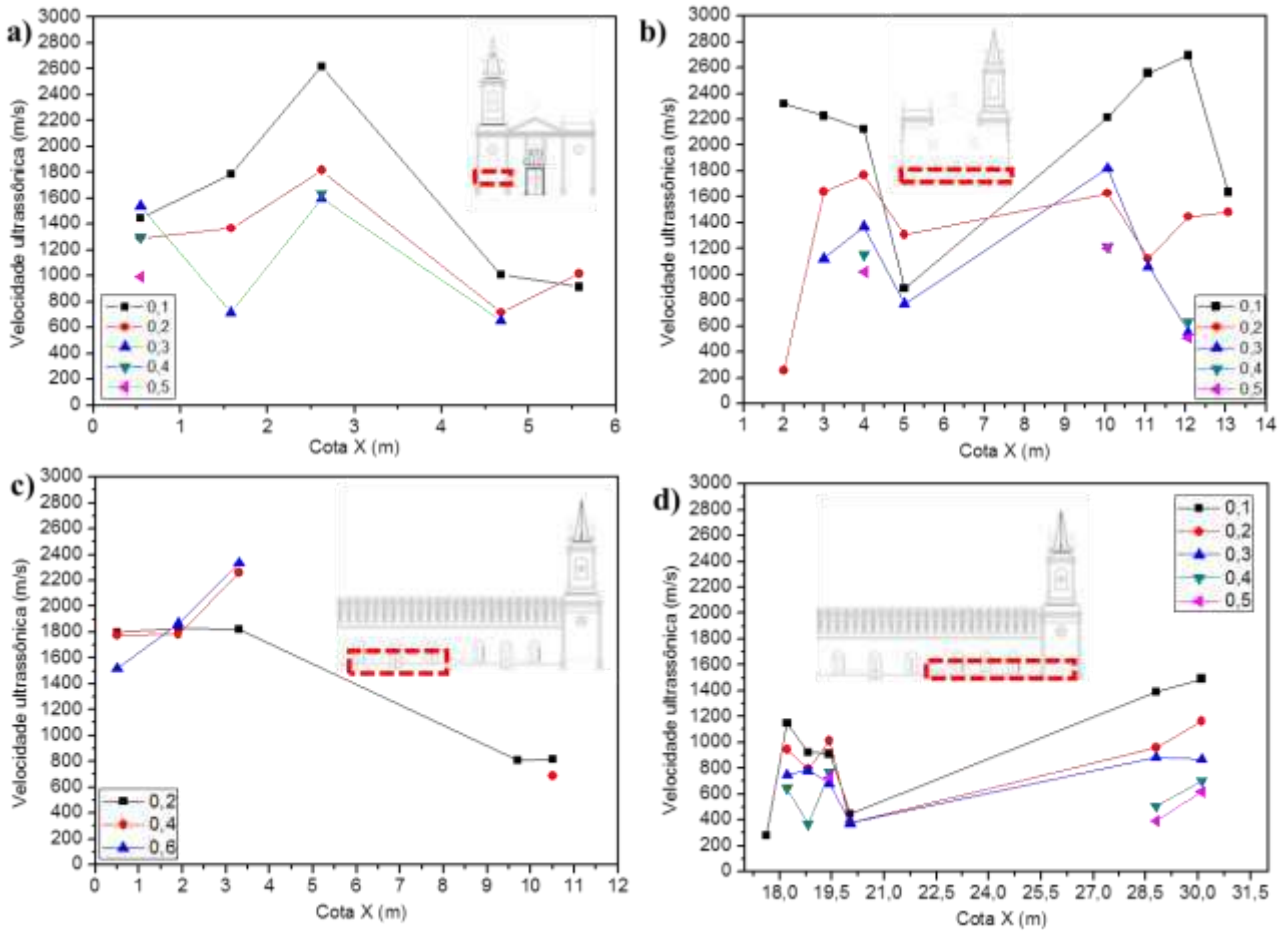

Figura 55 – velocidades ultrassônicas dos elementos externos da edificação

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Onde: (a) fachada frente; (b) fachada fundo; (c) (d) fachada lateral esquerda.

A média das velocidades ultrassônicas foi de 1319 m/s, 1420 m/s e 1031 m/s na fachada principal, fachada fundo e fachada lateral esquerda respectivamente.

Nos resultados dos gráficos da Figura 55 verifica-se que, de forma geral, as velocidades registradas no primeiro ponto (X1) de cada quadrante é ligeiramente maior que as velocidades registradas no ponto X2, que por sua vez foi maior que no ponto X3 e assim sucessivamente. Isto pode ser devido a dispersão da onda no próprio tijolo ou mesmo nas juntas da alvenaria.

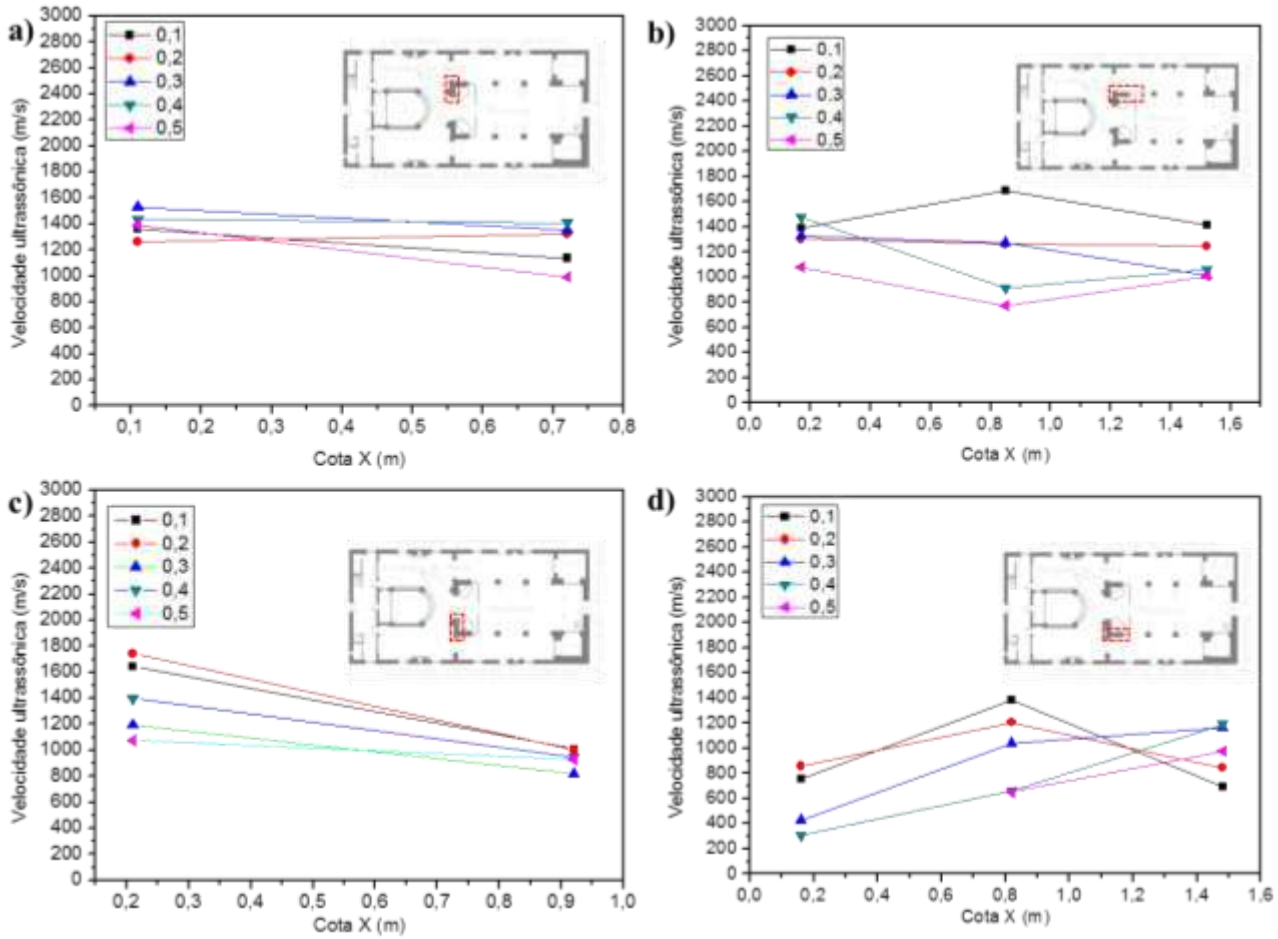

Figura 56 – velocidades ultrassônicas dos elementos internos da edificação

Onde: (a) parede direita da nave principal (ortogonal às fachadas laterais); (b) parede direita da nave principal (paralela às fachadas laterais); (c) parede esquerda da nave principal (ortogonal às fachadas laterais); (d) parede esquerda da nave principal (paralela às fachadas laterais).

A média das velocidades ultrassônicas foi de 1319 m/s, 1217 m/s, 1177 m/s e 869 m/s na parede direita ortogonal, parede direita paralela, parede esquerda ortogonal e parede esquerda paralela, respectivamente.

Ressalta-se que em certos quadrantes de avaliação alguns pontos não apresentaram resultados, ou seja, a onda transmitida por um transdutor não foi recebida pelo outro, dissipando-se no material. Isto pode ter ocorrido devido a reflexão da onda ao encontrar uma transição de material (juntas da alvenaria). Ao atingir a interface entre dois materiais distintos a onda pode ser refletida ou refratada. Ondas refletidas permanecem no material, mas se propagam numa direção diferente, com base no ângulo que elas atingem a interface de transição. Ondas refratadas propagam-se no material adjacente, mas com ângulo e velocidade diferente com base nas propriedades do novo material e o ângulo no

qual a onda foi introduzida na superfície do novo material. [11] Consequentemente, estes pontos não são considerados para o cálculo do módulo de elasticidade.

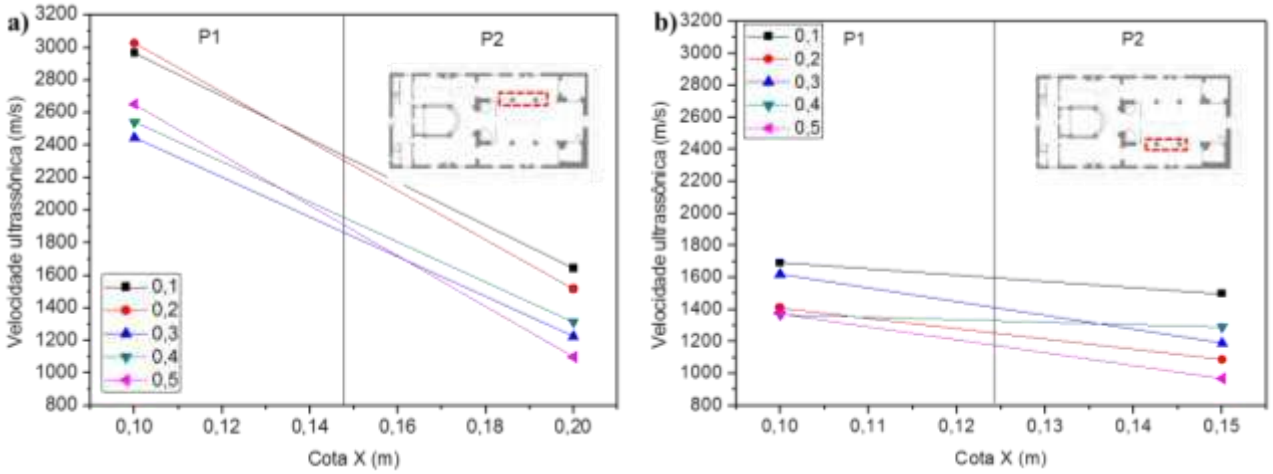

Figura 57 – velocidades ultrassônicas dos elementos internos da edificação

Onde: (a) pilares 1 e 2 – direita; (b) pilares 1 e 2 – esquerda.

A média das velocidades ultrassônicas foi de 2727 m/s, 1360 m/s, 1493 m/s e 1208 m/s no pilar direito 1, pilar direito 2, pilar esquerdo 1 e pilar esquerdo 2, respectivamente.

Todas as velocidades ultrassônicas foram agrupadas de modo a plotar a curva gaussiana na Figura 58. Através desse gráfico é possível ver a dispersão dos resultados obtidos. A média das velocidades ultrassônicas é de 1253 m/s.

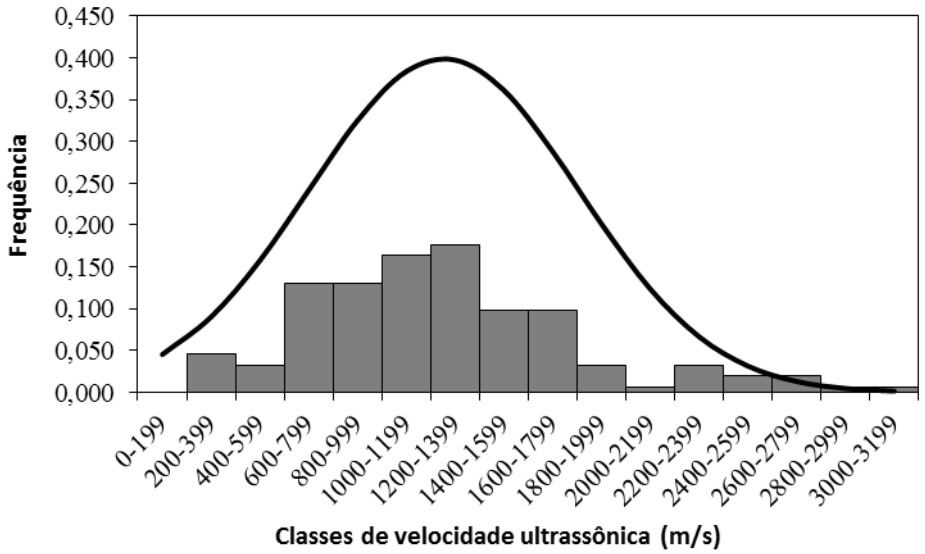

Figura 58 – curva de distribuição gaussiana das velocidades ultrassônicas (m/s)

A partir das velocidades ultrassônicas, foi possível calcular o módulo de elasticidade global da estrutura. As equações (1) e (2) apresentam a relação entre o módulo de elasticidade e a velocidades de ondas P e ondas R em meios homogéneos, elásticos e semi-infinitos, com um módulo de elasticidade E, um coeficiente de Poisson ν e massa específica ρ[8]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1-2v)(1+v)}} \quad (1)$$

$$V_R = \frac{0{,}87+1{,}12v}{1+v} * \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1}{2(1+v)}} \quad (2)$$

A relação entre V_P e V_R é dada pela equação (3):

$$\frac{V_P}{V_R} = \sqrt{\frac{2(1-v)}{(1-2v)} * \frac{(1+v)^2}{(0{,}87+1{,}12v)^2}} \quad (3)$$

As propriedades mecânicas obtidas usando estas equações são chamadas dinâmicas, porque elas são baseadas em pequenas deformações e em taxas de carregamento rápido; seus valores são frequentemente mais elevados do que as estáticas. Devido a não disponibilidade de uma relação que satisfaça materiais heterogêneos estas mesmas equações (1), (2) e (3), são aplicadas na análise da alvenaria de tijolo. A transmissão direta de pulsos é aconselhável para avaliar velocidades de onda P; ondas P se propagam principalmente ao longo da direção do impacto, causando deslocamentos longitudinais e, por conseguinte, as principais acelerações de partículas são medidas no lado oposto do impacto. A transmissão indireta de pulsos é a mais usada para acessar as velocidades das ondas R, porque este tipo de onda difunde ao longo da superfície de impacto. [8]

Logo, para o cálculo do módulo de elasticidade, a equação 2 foi utilizada. Todos os dados, após o cálculo, foram agrupados em classes e plotados no gráfico da curva gaussiana (vide Figura 59). O coeficiente de Poisson utilizado neste cálculo (0,2) foi o mesmo utilizado por Delgado[12] em seu estudo com alvenaria de tijolos maciços.

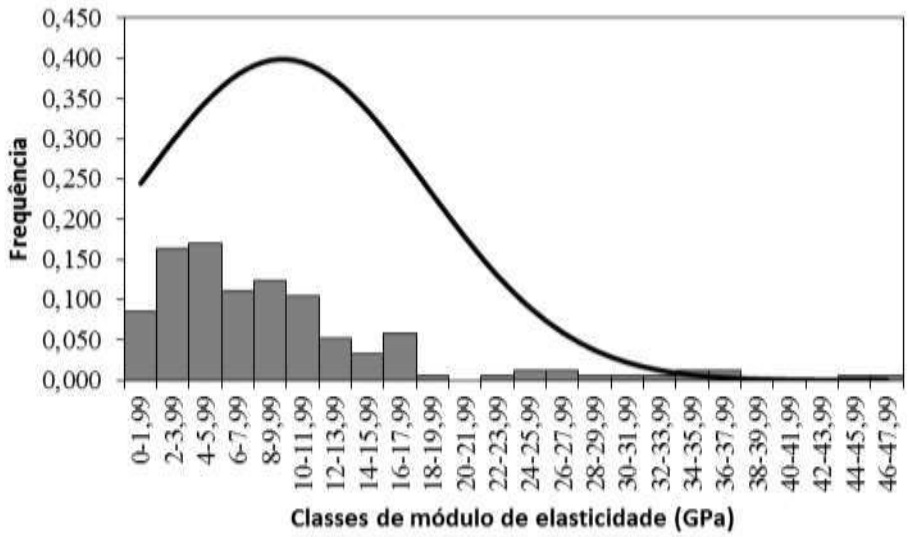

Figura 59 – curva de distribuição gaussiana das velocidades ultrassônicas (m/s)

No total, 153 amostras foram registradas, sendo 15 destas amostras (9,8%) pertencem às classes 18-19,99 a 46-47,99. Estes valores não foram considerados na média final do módulo de elasticidade da edificação, assim, o gráfico da Figura 60 apresenta os resultados com a exclusão destes valores.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

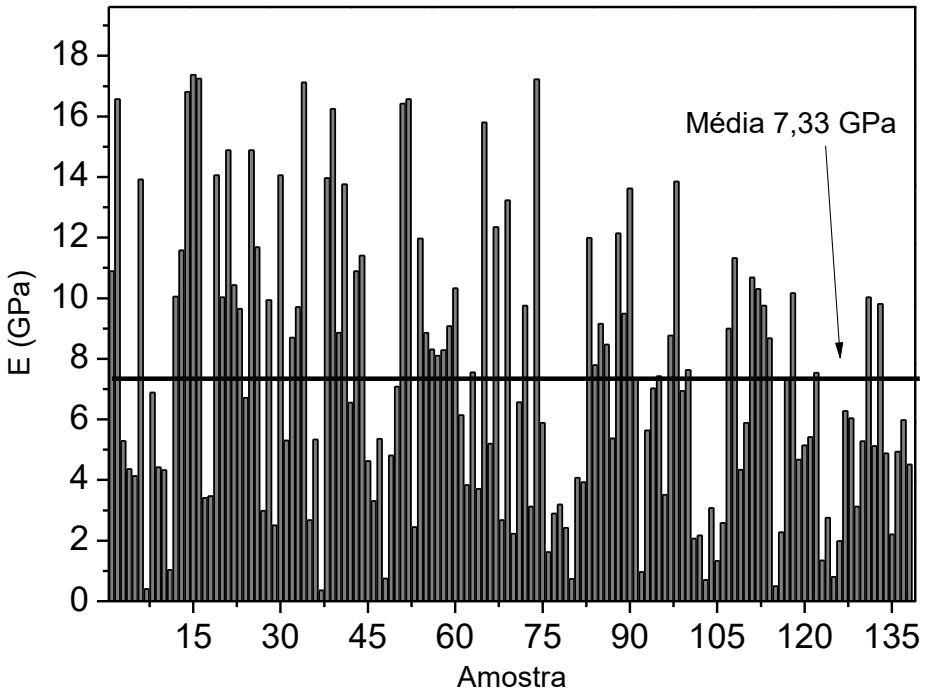

Figura 60 – módulo de elasticidade calculado

A média de todos os dados obtidos é de 7,33 GPa, valor este que será, pela presente análise, considerado como o módulo de elasticidade global da edificação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico foi aplicado em alvenarias de tijolo cerâmico em vários pontos de uma edificação de interesse histórico. Estas análises foram feitas em pontos estratégicos das fachadas e em pontos internos da edificação.

As médias das velocidades ultrassônicas de cada elemento individualmente foi proxima da média geral (1253 m/s), difererindo em aproximadamente 200 m/s para os casos mais extremos. Porém, duas médias tiveram resultados com maior variação em relação à média geral. Estes dois elementos foram parede esquerda da nave principal (paralela às fachadas laterais) (869 m/s) e a pilar direita 1 (2727 m/s). Para o caso de baixa VPU, supõe-se que houve descolamento interno do reboco, o que criou uma junta de ar facilitando a dispersão da onda. Para o caso da VPU alta, atribui-se à uma possível não-documentada aplicação de reforço, uma vez que todas as outras pilares apresentaram resultados semelhantes (1360 m/s, 1493 m/s e 1208 m/s).

O módulo de elasticidade global encontrado da edficação foi de 7,33 GPa. Este valor mostra-se bastante razoável quando comparado aos valores relativos a alvenarias de tijolo cerâmico (não necessariamente calculados pelo mesmo método) encontrados em [13], [14], [15], [16], [17] e [18].

6. AGRADECIMENTOS

Esequiel Mesquita agradece à Fundação CAPES pelo suporte financeiro no âmbito do Programa de Doutorado Pleno no Exterior, processo número 10023/13-5. Todos os autores agradecem ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e à Prefeitura Municipal de Aracati, através da Secretaria Municipal de Turismo pelo apoio necessário à realização deste trabalho.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

7. REFERÊNCIAS

[1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Vienna, 2002.

[2] D. M. McCann and M. C. Forde, "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures," *NDT E Int.*, vol. 34, no. 2, pp. 71–84, 2001.

[3] L. Binda, a. Saisi, and C. Tiraboschi, "Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries," *Constr. Build. Mater.*, vol. 14, no. 4, pp. 199–233, 2000.

[4] L. Qixian and J. H. Bungey, "Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 4, pp. 237–242, 1996.

[5] CIB Comission, *Guide for the Structural Rehabilitation of Heritage Buildings*. .

[6] L. Binda, A. Saisi, and L. Zanzi, "Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy)," *NDT E Int.*, vol. 36, no. 4, pp. 215–227, 2003.

[7] L. F. Miranda, J. Rio, J. Miranda Guedes, and A. Costa, "Sonic Impact Method - A new technique for characterization of stone masonry walls," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 27–35, 2012.

[8] L. Miranda, L. Cantini, J. Guedes, and A. Costa, "Assessment of mechanical properties of full-scale masonry panels through sonic methods. Comparison with mechanical destructive tests," *Struct. Control Heal. Monit.*, 2015.

[9] Y. Z. Totoev and J. M. Nichols, "A Comparative Experimental Study of the Modulus of Elasticity of Bricks and Masonry," in *11th International Brick and Block Masonry*, 1997.

[10] Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, "Inventário Nacional de Bens Brquitetônicos – IBA." Sobral, 2005.

[11] F. Luis and M. Francisco, "Direct Sonic and Ultrasonic Wave Velocity in Masonry under Compressive Stress," *Int. Mason. Conf. 2014*, pp. 1–12, 2014.

[12] J. L. Delgado, "Avaliação sísmica de um edifício crítico em alvenaria Engenharia Civil," 2013.

[13] F. M. C. P. Fernandes, "Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and Ground Penetrating Radar in masonry," *Univ. do Minho*, 2006.

[14] L. Binda and T. Folli, "SURVEY AND INVESTIGATION FOR THE DIAGNOSIS OF DAMAGED MASONRY STRUCTURES: THE' TORRAZZO' OF CREMONA," *Vol. 1*, pp. 237–257, 2000.

[15] I. Papayianni and M. Stefanidou, "Characteristics of bricks of Byzantine period," *12 th Int. Brick/Block Mason. Conf. Proc.*, vol. 3, pp. 1729–1736, 2000.

[16] L. Barbi, S. Briccoli Bati, G. Ranocchiai, and F. Santos, "Mechanical properties of ancient bricks: Statistical analysis of data," *Proc. 7th Int. Semin. Struct. Mason. Dev. Ctries.*, 2002.

[17] P. B. Lourenço, G. Vasconcelos, and L. Ramos, "Diagnóstico sobre as condições de estabilidade do claustro do séc XVIII - Mosteiro de Salzedas," *Rep. LEC*, vol. 31, p. 2000, 2000.

[18] S. Bati and G. Ranocchiai, "A critical review of experimental techniques for brick material," *Proc., 10th Int. Brick Block Mason. Conf*, pp. 1247–1255, 1994.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459