

SUBMETIDO 20/05/2022

APROVADO 21/09/2022

PUBLICADO ON-LINE 13/10/2022


PUBLICADO 10/04/2024


EDITOR ASSOCIADO
Andre Luis Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id6925>

ARTIGO ORIGINAL

Furos em blocos cerâmicos para fins estruturais: estudo de características estáticas e dinâmicas através de experimentos e modelos numéricos

 Orlando Matheus de Lima Almeida ^{[1]*}

 Orlando Gabriel de Lima Almeida ^[2]

 Arlan de Araújo Melo ^[3]

 Hidelbrando José Farkat Diógenes ^[4]

[1] orlandomlmeida@gmail.com

[2] orlandogabriel96@gmail.com

[3] arlan.melo@academico.ufpb.br

[4] hjfd@academico.ufpb.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

RESUMO: A alvenaria estrutural possui elevada relevância no mercado da construção e alto emprego em decorrência da competitividade do sistema em pequenas e médias construções. O bloco cerâmico possui papel fundamental no sistema de alvenaria estrutural, responsável direto pela segurança estrutural e cuja integridade e capacidade resistiva devem ser preservadas com o intuito de proteger também o sistema. Todavia, alterações nos blocos cerâmicos realizadas pelos próprios usuários são comuns; a execução de furos nas paredes estruturais, por exemplo, para o emprego de chumbadores, pode – em casos extremos – comprometer a segurança estrutural. Este trabalho, então, analisa os efeitos nas propriedades estáticas e dinâmicas de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural em decorrência de perfurações não concebidas em projeto. Para tanto, levou-se em conta ensaios de compressão axial, técnica de excitação por impulso (IET) junto à elaboração de um modelo numérico dos blocos. Foram avaliadas as alterações na resistência à compressão e nas frequências naturais dos blocos cerâmicos, observando-se não apenas as modificações que de fato ocorreram, mas também o seu nível de influência nas características do bloco. Observaram-se, em alguns casos, variações da ordem de 14% na segunda frequência de maior relevância, além de alterações em modos de ruptura a partir das perfurações realizadas e claras mudanças na distribuição de esforços no modelo numérico, com aumento de mais de 42% das tensões em alguns elementos. Apesar de algumas alterações no comportamento dos blocos, as perfurações não aparentam ser determinantes para suas propriedades estáticas e dinâmicas; as resistências máximas sofreram pouca variação e as frequências de interesse variam, em sua maioria, menos que 6%.

Palavras-chave: aberturas para fins estruturais; edifícios de alvenaria; método dos elementos finitos; modelo numérico; resposta acústica.

Holes in ceramic blocks for structural purposes: an experimental

*Autor para correspondência.

and numerical study of static and dynamic characteristics

ABSTRACT: Structural masonry has high relevance in the construction market and has high employment due to the system's competitiveness in small and medium-sized constructions. The ceramic unit has a fundamental role in the structural masonry system, directly responsible for structural safety, and whose integrity and resistive capacity must be preserved to protect the system as well. However, alterations in the ceramic blocks carried out by the users themselves are common; the drilling of holes in the structural walls, for example, for the use of anchor bolts, can – in extreme cases – compromise structural safety. This work analyzes the effects on the static and dynamic properties of ceramic units for structural masonry due to perforations not conceived in the original project. For that, axial compression tests and impulse excitation technique (IET) were taken into account, in addition to the elaboration of a numerical model of the units. The alterations in the compressive strength and the natural frequencies of the ceramic blocks were evaluated, observing the changes that occurred and their level of influence on the characteristics of the block. In some cases, a difference of 14% was observed in the second most relevant frequency, in addition to changes in failure modes from the perforations performed and evident changes in the distribution of stresses in the numerical model with an increase of more than 42% of the tensions in some elements. Despite some changes in the units' behavior, the perforations do not seem decisive for their static or dynamic properties; the maximum strengths suffered slight variation, and the frequencies of interest vary, mostly, by less than 6%.

Keywords: acoustic response; finite element method; masonry; numerical model; openings for structural purposes.

1 Introdução

O sistema construtivo em alvenaria estrutural é um dos mais utilizados no Brasil, haja vista sua grande capacidade competitiva em relação aos aspectos econômicos, bem como no que se refere ao tempo de construção, principalmente para construções de pequeno e médio porte. Assim, a alvenaria estrutural se destaca por ser um sistema mais barato e de rápida execução.

Entretanto, esse sistema apresenta um certo grau de dificuldade para as adaptações pós-ocupação, justamente em função de suas paredes serem elemento fundamental de sua estrutura. Esse fator dificulta modificações no *layout* do imóvel e acaba por impactar o conforto e a identificação dos usuários com seu lar.

Atualmente projetistas têm preocupação em dar margem para alterações no projeto arquitetônico. Contudo, o sistema ainda é pouco flexível e observa-se que os moradores fazem diversas alterações nas paredes, muitas vezes sem nem mesmo ter conhecimento acerca do sistema estrutural utilizado. Essas modificações vão desde perfurações à demolição de paredes.

Dessa forma, é necessário avaliar qual a influência de modificações nas paredes das edificações – como a perfuração para fixação de quadros e armários – sobre a resistência mecânica do sistema estrutural, de modo que seja possível compreender os impactos dessas alterações estruturais, bem como os riscos associados a essas práticas.

Nesse contexto, o presente trabalho dedicou-se a estudar a influência das perfurações por brocas de pequeno diâmetro (10 mm) sobre a resistência à compressão de blocos cerâmicos para fins estruturais, avaliando as variações nas suas características estáticas e dinâmicas.

Além disso, foram realizadas simulações numéricas dos blocos cerâmicos, com intuito de verificar os resultados obtidos experimentalmente, bem como prover um modelo capaz de reproduzir de maneira satisfatória o comportamento dos blocos perfurados em futuras análises similares, permitindo a realização de estimativas e predições.

Portanto, o restante deste trabalho é composto, nesta ordem, pelo referencial teórico para melhor entendimento do tema (seção 2), seguido do método da pesquisa (composto pelo programa experimental e pelo modelo numérico – seção 3), resultados e discussões (seção 4) e, por fim, as considerações finais (seção 5).

2 Referencial teórico

A alvenaria estrutural possui diversas vantagens em comparação aos demais sistemas construtivos, visto que os blocos cerâmicos geralmente apresentam propriedades físicas e isolamento termoacústico de boa qualidade, além do fato de se tratar de um material de fácil manuseio e armazenagem (Roman; Mutti, 1999).

Esse sistema estrutural pode ser considerado à frente de outros, uma vez que une estrutura e vedação de uma edificação simultaneamente, o que torna o uso de material civil mais racional (Zanoto; Rotter; Campos, 2021), além de possibilitar a execução de maneira mais rápida e em um menor número de etapas construtivas (Medeiros, 2018).

Esses são alguns dos motivos pelos quais houve um significativo aumento no uso da alvenaria estrutural no Brasil nas últimas três décadas, sendo seu emprego muito interessante como uma alternativa para diminuição do déficit habitacional (Santos, 2007).

Devido ao fato de sua estrutura ser formada por blocos conectados entre si por meio do uso de argamassas, a ocorrência de variações em características de algum desses componentes possui grande influência na resistência da alvenaria estrutural (Pinheiro, 2009), sendo os blocos significativamente responsáveis pela resistência das paredes em alvenaria estrutural, possuindo papel preponderante quando comparados com as argamassas (Freitas, 2008).

Ainda, cabe salientar que, por precaução, indica-se que rasgos verticais ou horizontais não sejam admitidos em paredes de alvenaria estrutural de maneira alguma (Parsekian; Furlan Junior, 2003 *apud* Machado, 2015), visto que podem afetar a integridade estrutural do sistema.

Assim, conhecer as propriedades mecânicas dos materiais isolados, bem como sua interação no sistema de interesse, torna possível a melhor compreensão e a maximização da capacidade resistente do sistema (Mohamad; Lourenço; Roman, 2008).

Nesse sentido, foram identificados estudos acerca de aberturas em alvenarias, nos quais, de modo geral, observou-se concentração de tensões no entorno das aberturas e diferentes modos de ruptura em função dos furos (Grillanda *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2021). A partir da observação dessas alterações no comportamento das

paredes de alvenaria, entende-se que a execução de perfurações nos próprios blocos pode também ter influência em suas propriedades.

Ainda não foram verificados trabalhos sobre a perfuração dos blocos, todavia, há estudos dos efeitos das perfurações em outros elementos estruturais também submetidos, majoritariamente, a esforços de flexo-compressão. De acordo com Souza, Sarmanho e Oliveira (2022), a introdução de perfurações de diferentes tamanhos em pilares de aço foi responsável pela diminuição de sua resistência, sendo que, quanto maior a perfuração, maior a diminuição da capacidade resistente dos pilares. Também, a introdução de perfurações em pilares de concreto armado diminui a sua capacidade resistente proporcionalmente à perda de seção transversal destes (Son; Pilakoutas; Neocleous, 2006). Portanto, considera-se pertinente a investigação dos efeitos das perfurações nos blocos de alvenaria estrutural.

Nesse contexto, procedimentos de análises dinâmicas têm sido cada vez mais relevantes para a obtenção de propriedades mecânicas estruturais, em virtude, entre outros fatores, do aumento de projetos estruturais de elevada altura, o que torna os efeitos dinâmicos gerados por cargas de vento mais significativos (Diógenes, 2010).

Entre os vários tipos de análises dinâmicas presentes na literatura, destacam-se os ensaios não destrutivos, sendo esses capazes de determinar informações referentes aos mecanismos sem danificá-los, o que torna esses ensaios bastante interessantes em diversas situações. Dessa forma, para obtenção de dados de características dos blocos cerâmicos, os ensaios não destrutivos podem ser utilizados para estimar deterioração e propriedades mecânicas de uma estrutura (Soares, 2013). Nesse contexto, a técnica de excitação por impulso (IET) é uma alternativa interessante, por ser um ensaio não destrutivo capaz de determinar propriedades mecânicas e resistivas de um sistema, por meio da excitação mecânica de um corpo de prova e captação de sua resposta acústica (Diógenes *et al.*, 2011). Como exemplo de aplicação dessa técnica tem-se a determinação de módulos de elasticidade e resistência à compressão do concreto, obtidos por meio da manipulação das frequências captadas na resposta acústica à excitação mecânica de um prisma de concreto, utilizando-se como ferramenta, entre outras, as equações de Pickett (Pereira *et al.*, 2012).

Ademais, com o desenvolvimento tecnológico crescente, uma alternativa amplamente difundida para a análise de estruturas é o método dos elementos finitos, bem como inclinado a se tornar cada vez mais confiável, inclusive para problemas de maior complexidade, cuja solução seria muito mais custosa caso aplicados modelos tradicionais (Vilela; Mascia; Donadon, 2021). Neste trabalho, portanto, são observadas condições dinâmicas e estáticas dos blocos cerâmicos, por meio de experimentos destrutivos e não destrutivos e com o desenvolvimento de um modelo numérico em elementos finitos.

3 Método da pesquisa

O trabalho experimental teve duas frentes de ensaios: aqueles de caracterização dos blocos cerâmicos, tendo em vista as normas técnicas NBR 15270-1 e NBR 15270-2, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2017a, 2017b); e os ensaios pela IET, realizados com o auxílio do Sonelastic® (2019). Ressalta-se que cada uma dessas frentes teve como finalidade a aquisição de dados dos blocos íntegros e perfurados de modo que fosse possível a comparação entre os resultados obtidos.

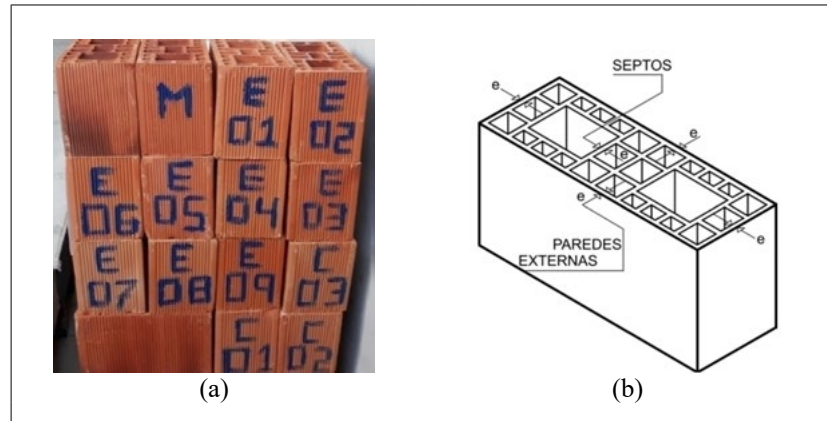
Assim, foram utilizados 12 blocos cerâmicos para fins estruturais, de 14 cm × 19 cm × 29 cm. Cabe notar que três blocos foram utilizados como amostras

controle (contraprova) e os nove demais foram divididos em grupos com diferentes perfurações a serem estudadas.

Os blocos cerâmicos em estudo foram numerados da seguinte maneira (Figura 1a): para os blocos que seriam perfurados, utilizou-se a nomenclatura compreendida pelos termos de E01 a E09 (bloco experimental 01 a bloco experimental 09); já para os 3 blocos utilizados para controle do experimento, utilizou-se C01 a C03 (bloco para controle 01 a bloco para controle 03). Ainda, a Figura 1b indica a geometria e os termos normativos para as paredes que compõem os blocos cerâmicos.

Figura 1 ▶

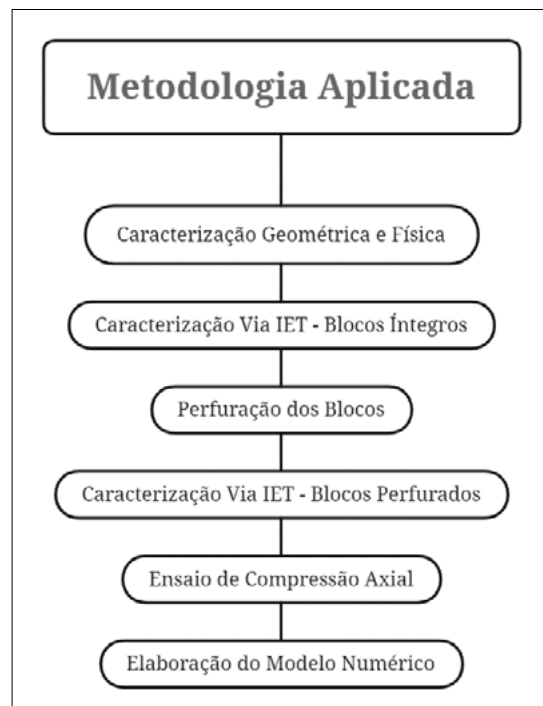
- (a) Identificação dos blocos.
 - (b) Característica dos blocos.
- Fonte: (a) Almeida (2019).
(b) adaptada de ABNT (2017b)



Com a devida divisão dos blocos como na Figura 1a, deu-se início aos ensaios de caracterização dos blocos. De maneira geral, o procedimento adotado inicia com a caracterização geométrica e física, necessárias para as demais atividades; em seguida são realizados os ensaios dinâmicos não destrutivos com os blocos íntegros. Após os ensaios por IET, os blocos são perfurados e a caracterização dinâmica é realizada novamente. Por fim, os blocos são ensaiados à compressão axial e o modelo numérico é construído. Resumidamente, a metodologia geral pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 ▶

- Metodologia.
- Fonte: elaborado pelos autores (2022)



As caracterizações geométricas e físicas se deram de acordo com a NBR 15270-2 (ABNT, 2017b); para os referidos ensaios foram adotados três blocos como amostra dos blocos recebidos. O grupo (E02, E05 e C03) foi aleatoriamente escolhido entre os 12 blocos de mesma fornada.

Na caracterização geométrica foram realizadas as medições das dimensões efetivas: comprimento (C), largura (L), altura (H), espessura dos septos e paredes externas bem como os ensaios de desvio em relação ao esquadro (D) e planeza das faces (F). As medições das dimensões geométricas possuem relação direta com a área bruta média (A_{bm}) da seção transversal dos blocos que, por sua vez, ainda será utilizada para determinação da resistência à compressão (f_b). Dessa forma, foram executados os ensaios como especificado na NBR 15270-2 (ABNT, 2017b).

Com os ensaios de caracterização geométrica realizados, deu-se início aos ensaios físicos. Assim, o ensaio físico exigido por norma é o índice de absorção d'água (AA), que também foi desenvolvido de acordo com a ABNT (2017b). Desse modo, após o aquecimento dos blocos cerâmicos em estufa para promover a vaporização da água, foram realizadas as medidas necessárias para a determinação da massa seca (m_s) dos blocos. Em seguida, obteve-se a massa úmida (m_u) após submersão dos blocos em água.

Posteriormente, os blocos ainda íntegros foram ensaiados pela IET e, após a obtenção das frequências naturais dos blocos cerâmicos, deu-se início às perfurações. Aqui, para tornar mais claros os ensaios dinâmicos, serão abordadas as perfurações e suas geometrias e em seguida serão explicados os ensaios via IET. Dessa forma, as perfurações – executadas com furadeira na função “martetele” – ocorreram de três maneiras distintas, cada uma representando uma diferente situação usual, de modo a simular furos realizados usualmente para a instalação de redes e armários.

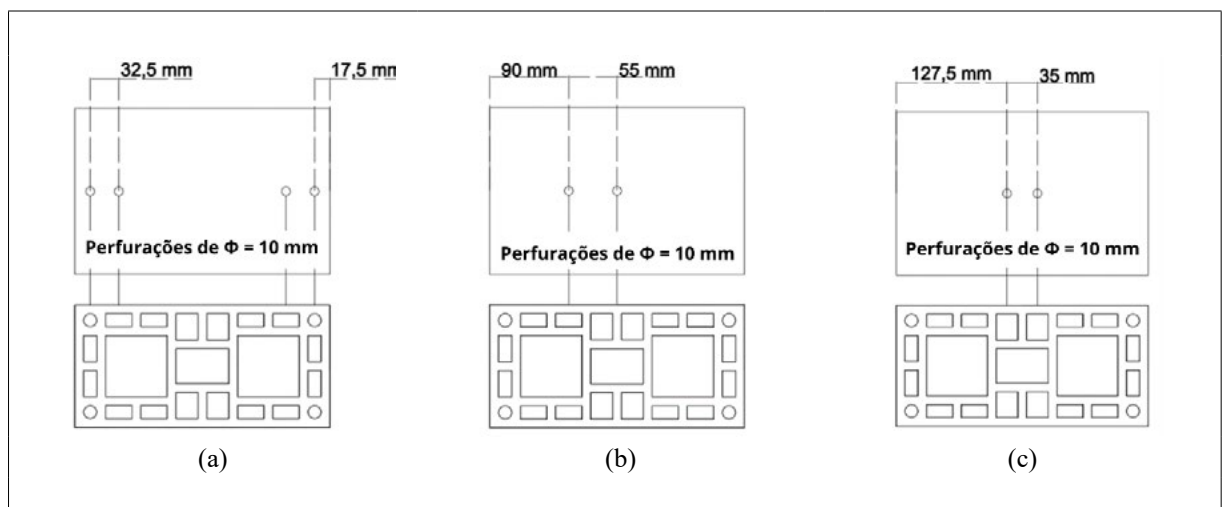
A primeira geometria (tipo 01), que compreende os blocos E01, E02 e E03, foi realizada com quatro furos de 10 mm de diâmetro e está apresentada na Figura 3a, com perfurações simétricas em relação ao eixo vertical do bloco. A segunda geometria (tipo 02), Figura 3b, compreende os blocos E04, E05 e E06. Esta foi realizada com dois furos de 10 mm de diâmetro cada, com o primeiro furo atravessando o septo central do bloco e o segundo perfurando o segundo vazamento vizinho a ele. A última geometria (tipo 03), Figura 3c, por sua vez, corresponde aos blocos E07, E08 e E09. Possui dois furos de 10 mm de diâmetro, com cada furo atravessando o vazamento vizinho ao septo central do bloco cerâmico.

Figura 3 ▼

Tipo de Perfuração:

- (a) Representação do tipo 01;
- (b) Representação do tipo 02;
- (c) Representação do tipo 03.

Fonte: dados da pesquisa (2019)



Desse modo, realizados os furos nos blocos cerâmicos para cada tipo de configuração, foi possível executar o processo de aquisição das frequências naturais novamente, agora com os blocos perfurados. É possível observar a divisão de ensaios via IET no Quadro 1.

Quadro 1 ▶
Divisão dos blocos cerâmicos.
Fonte: dados da pesquisa (2019)

Divisão dos blocos		
Tipo 01	E01, E02 e E03	Blocos ensaiados por IET antes e depois das perfurações.
Tipo 02	E04, E05 e E06	
Tipo 03	E07, E08 e E09	
Controle	C01, C02 e C03	Blocos ensaiados por IET apenas uma vez (não perfurados).

Para a aquisição das frequências naturais dos blocos (Figura 4b), os ensaios via IET – com o auxílio do programa computacional Sonelastic® – foram realizados em ambiente controlado, como observado no ensaio longitudinal na Figura 4a.

Figura 4 ▶
Ensaio dinâmico:
(a) Ensaio utilizando a IET via Sonelastic®.
(b) Exemplo de gráfico amplitude versus frequência.
Fonte: (a) Almeida (2019). (b) dados da pesquisa (2019)

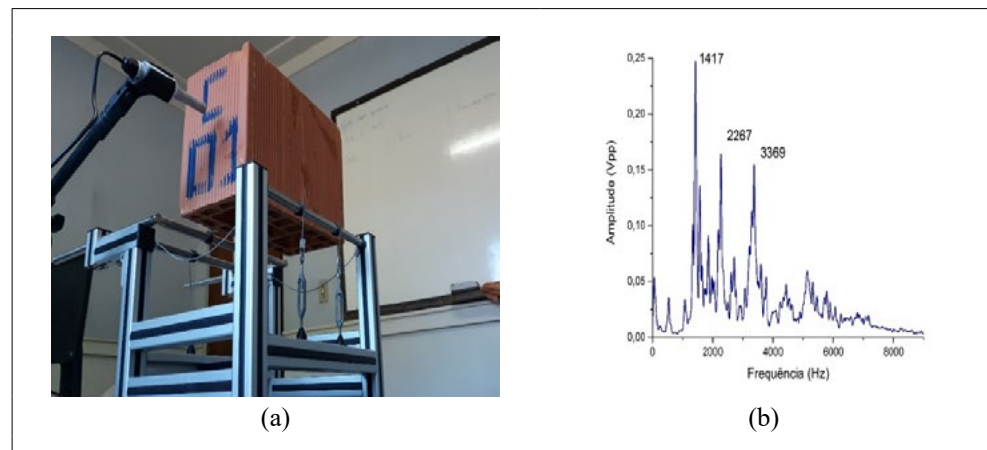
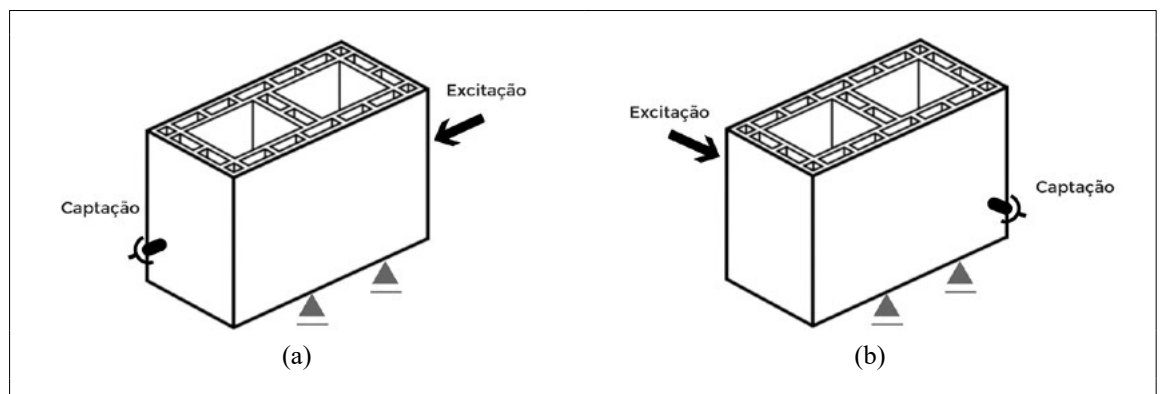


Figura 5 ▼
Modos de aquisição do Sonelastic®: (a) Longitudinal; (b) Transversal.
Fonte: adaptada de ABNT (2017a)

O Sonelastic® é um programa que possui como princípio de funcionamento a captação e o tratamento do áudio emitido por um objeto a partir de uma excitação a ele aplicada, e cujos dados de saída variam desde módulos de elasticidade até espectros de frequência, como no caso deste estudo. Cabe observar que, para cada bloco em estudo, foram realizados três ensaios para captação longitudinal e mais três para a aquisição transversal das frequências características do bloco. As Figuras 5a e 5b representam os modos de aquisição longitudinal e transversal, respectivamente.



Assim, foram realizados 6 ensaios para cada um dos 12 blocos íntegros e mais 6 para cada um dos 9 blocos perfurados, com o total de 126 ensaios. Contudo, foram avaliados, nos ensaios dinâmicos, apenas os 9 blocos separados para o experimento – os blocos para controle passaram por um processo de avaliação dos espectros apenas para confirmar que suas propriedades estavam nos moldes dos demais blocos. Dessa forma, podemos descrever, para a avaliação das alterações em propriedades de natureza dinâmica, os grupos: blocos íntegros (modo longitudinal e modo transversal) e blocos perfurados (modo longitudinal e modo transversal).

Portanto, cada um dos 9 blocos cerâmicos possui, ao todo, 12 funções frequência versus amplitude, 6 para a direção longitudinal – 3 para os blocos íntegros mais 3 para aqueles perfurados – e outras 6 para a direção transversal – novamente 3 para os blocos cerâmicos íntegros e 3 para os perfurados. Todos os dados obtidos nos ensaios referidos foram exportados para um programa computacional gráfico, no qual os resultados dos ensaios puderam ser representados em espectros referentes às funções de frequência versus amplitude.

Para a avaliação das propriedades dinâmicas, contudo, é necessário que esses dados sejam compilados, de modo a tornar mais clara e objetiva a análise dos resultados. Então, os ensaios para cada tipo de bloco foram agrupados e obteve-se a média dos espectros, ou seja, das funções de cada ensaio. Dessa maneira, os dados iniciais foram reduzidos a um terço para a análise, de modo que se realizou a média dos três ensaios de cada bloco e depois a média de todos os blocos de cada grupo. Então, obteve-se um espectro longitudinal e um espectro transversal para cada um dos grupos de blocos (íntegros, tipo 01, tipo 02 e tipo 03).

Com os resultados de todos os ensaios pela IET em mãos, foi possível prosseguir para os ensaios estáticos. Para estes foi adotado o seguinte procedimento: inicialmente foi realizado o capeamento dos blocos para que eles estivessem nivelados à prensa e de modo que as cargas máximas aplicadas correspondessem àquelas a que os blocos de fato resistem. Assim, ambas as faces de contato do bloco com a máquina foram capeadas utilizando uma camada de argamassa simples. Todos os ensaios foram realizados no mesmo dia e de maneira contínua, de modo que variáveis como a diferença de umidade, por exemplo, não influenciaram nos ensaios. Ademais, todas as resistências à compressão individual (f_b) foram encontradas utilizando as cargas máximas suportadas por cada bloco bem como médias das áreas brutas; os valores são importantes para a determinação da resistência à compressão característica (f_{bk}). Portanto, o f_{bk} foi calculado de acordo com a ABNT (2017a).

Após a execução dos ensaios de compressão axial, foi realizada a modelagem numérica dos blocos cerâmicos. Para tanto, foram utilizados modelos numéricos para o grupo de controle bem como para cada tipo de perfuração através do software computacional Abaqus®. Realizou-se uma análise estática linear a partir de um modelo *Standard & Explicit* do software.

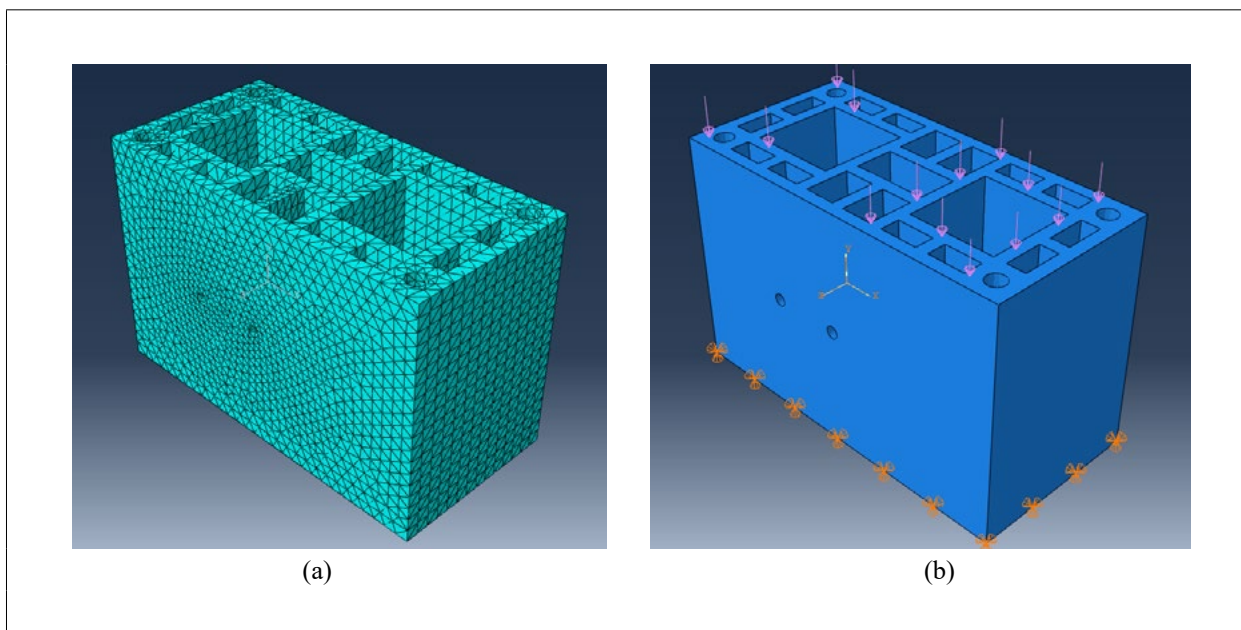
Para o material cerâmico, foram adotadas propriedades elásticas, com o módulo de elasticidade equivalente a 4,13 GPa e o coeficiente de *Poisson* de 0,15, a partir do que determina a NBR 16868-1 ABNT (2020); também se utilizou a densidade do material de 1685 kg/m³, obtida a partir dos ensaios geométricos e físicos. Ainda, para a malha, foram utilizados elementos de tipo Tetraédricos de ordem geométrica quadrática do tipo C3D10; os elementos foram particionados com dimensão global de 0,01 m – com exceção das perfurações, em cujos bordos foram fixados oito nós. Dessa forma, entendeu-se que a malha adotada pôde representar a geometria do bloco de modo satisfatório sem empregar um custo computacional excessivo, levando a uma diferença mínima em relação aos dados obtidos experimentalmente.

Figura 6 ▼

Modelo numérico:
(a) malha da modelagem;
(b) condições de contorno.

Fonte: dados da pesquisa (2022)

No que diz respeito às condições de contorno, o bloco foi considerado em uma situação de ensaio de compressão axial, ou seja, sua face inferior (base) teve os deslocamentos translacionais restritos e a carga total de 337 kN (média das cargas de ruptura dos ensaios) foi aplicada de modo distribuído em sua face superior. Para o passo de carga, foram utilizados incremento inicial de 0,001, incremento máximo de 0,01 e incremento mínimo de $1,0 \times 10^{-7}$. A malha adotada no modelo e as condições de ensaio utilizadas podem ser observadas nas Figuras 6a e 6b, respectivamente.



4 Resultados e discussões

Esta sessão subdividir-se-á de acordo com os ensaios realizados, propiciando uma análise específica para cada parâmetro em discussão. Posteriormente, a análise se dará também em torno dos ensaios de maneira geral.

4.1 Caracterização geométrica e física

Na caracterização geométrica, como visto anteriormente, foram computados os valores correspondentes a medidas de dimensões dos blocos cerâmicos. Para os ensaios geométricos e físicos, foi adotada uma metodologia de ensaio por amostra de blocos, assim sendo, foram realizados os procedimentos descritos, e todas as medidas estiveram dentro do que prevê a ABNT (2017a). Todos os coeficientes de variação foram inferiores a 10%, com exceção do desvio em relação ao esquadro (D) e da planeza das faces (F), cujos valores foram 28% e 37%, respectivamente.

Quanto à caracterização de propriedades físicas dos blocos cerâmicos, o índice de absorção d'água teve coeficiente de variação de 6,32% e seu valor médio foi de 12,3%, dentro do estabelecido pela ABNT (2017a). Portanto, os blocos estão em consonância com o esperado no que diz respeito aos ensaios geométricos e físicos obrigatórios para blocos cerâmicos estruturais.

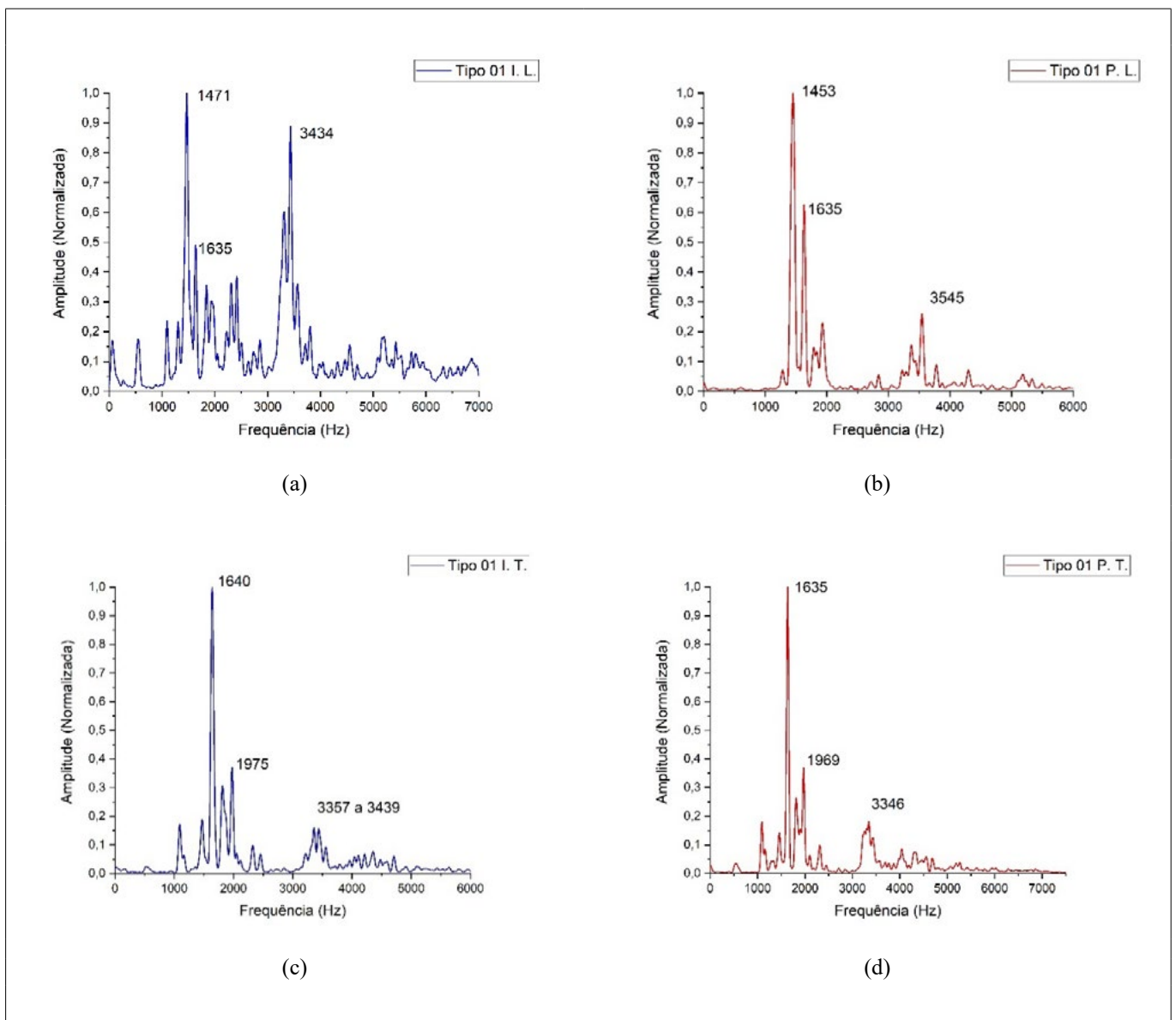
4.2 Caracterização dinâmica

Figura 7 ▼

- Espectro médio dos blocos de tipo 01:
 (a) Longitudinal íntegro;
 (b) Longitudinal perfurado;
 (c) Transversal íntegro;
 (d) Transversal perfurado.
 Fonte: Almeida (2019)

Para a avaliação do caráter dinâmico, como visto anteriormente, foi realizada a comparação dos espectros longitudinais e transversais de cada tipo de perfuração executada com seus espectros anteriores às perfurações. Assim, foi possível visualizar os efeitos que os furos horizontais introduzidos nos blocos cerâmicos promoveram em suas frequências ressonantes.

Ainda, para os blocos do tipo 01 é possível observar, nas Figuras 7a e 7b, os espectros na direção longitudinal, bem como, nas Figuras 7c e 7d, os espectros na direção transversal.



Nota-se que as frequências de maior amplitude na direção longitudinal tiveram uma defasagem muito pequena: a diferença mais considerável foi de 111 Hz no terceiro pico, o que representa 3,23% de seu valor total. Para a direção transversal houve também boa proximidade nos valores de picos dos espectros: a maior defasagem não

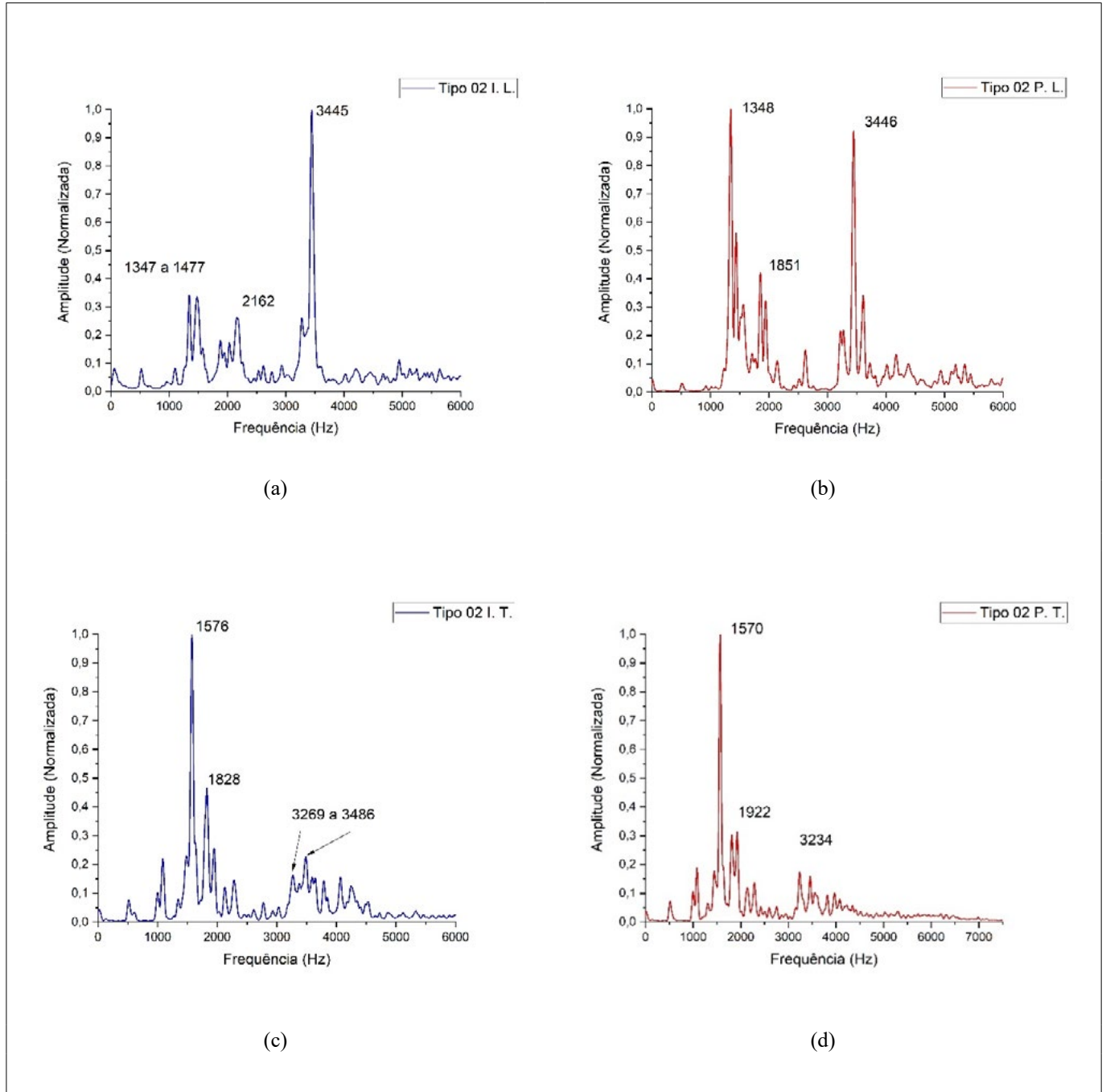
Figura 8 ▼

- Espectro médio dos blocos de tipo 02:
 (a) Longitudinal íntegro;
 (b) Longitudinal perfurado;
 (c) Transversal íntegro;
 (d) Transversal perfurado.

Fonte: Almeida (2019)

chegou a 2% do valor da frequência. Portanto, para os blocos com perfurações do tipo 01, entende-se que as alterações provocadas foram sutis.

Com relação ao próximo grupo, os espectros correspondentes à direção longitudinal dos blocos de tipo 02 pré e pós perfuração são observados nas Figuras 8a e 8b; da mesma forma, para a direção transversal, tem-se as Figuras 8c e 8d.



Na comparação dos espectros longitudinais e transversais, nota-se que os valores do primeiro e do terceiro picos foram quase idênticos antes e depois da perfuração. Os valores relativos ao segundo pico, no entanto, estão distantes na direção longitudinal, 311 Hz, valor correspondente a 14% da segunda frequência de pico inicial,

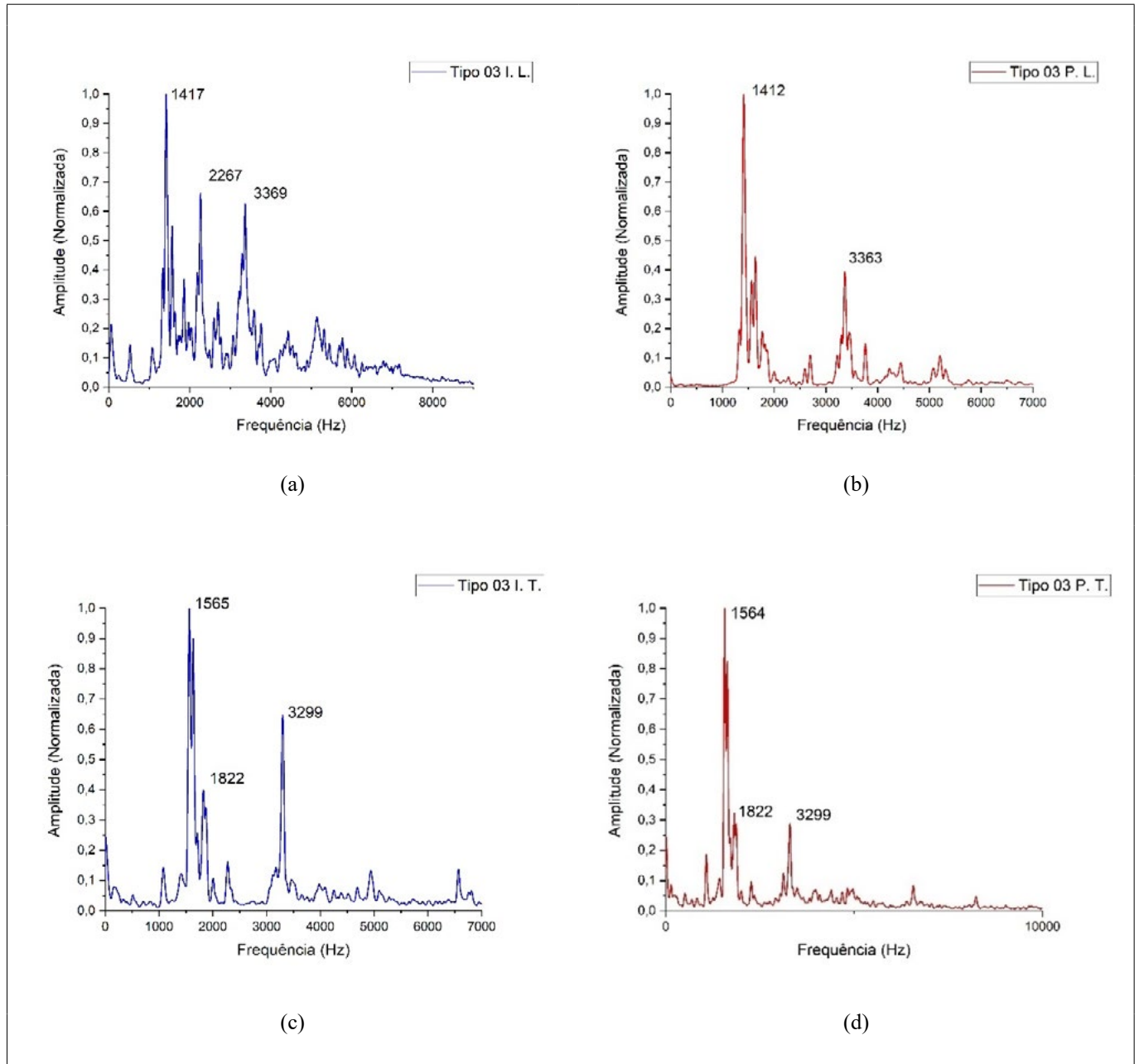
Figura 9 ▼

- Espectro médio dos blocos de tipo 03:
 (a) Longitudinal íntegro;
 (b) Longitudinal perfurado;
 (c) Transversal íntegro;
 (d) Transversal perfurado.

Fonte: Almeida (2019)

e, na direção transversal, 94 Hz, 5,1% do segundo pico. Dessa forma, entende-se que houve alteração no segundo valor de frequências de interesse.

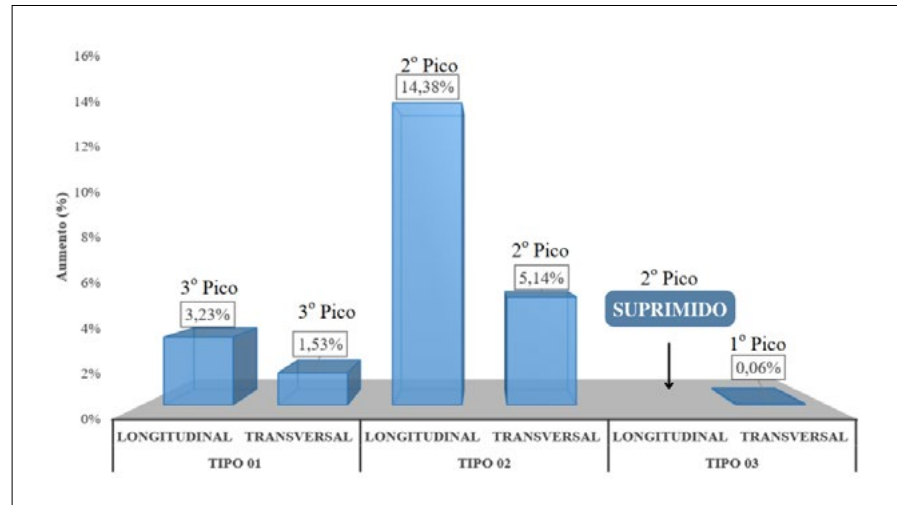
Ademais, para a análise dos blocos de tipo 03, pode-se observar os espectros dos blocos cerâmicos, antes e após a execução dos furos, na Figura 9.



Os espectros longitudinais do tipo 03 possuem um comportamento semelhante em relação às primeiras e terceiras frequências, contudo há uma diferença notória: após a perfuração, o espectro não apresenta um pico intermediário (segunda frequência). Por sua vez, a direção transversal demonstra evidente semelhança das frequências de maior pico antes e após a execução dos furos, uma vez que os segundos e terceiros picos foram

exatamente os mesmos e a diferença que houve no primeiro foi de apenas 1 Hz, ou 0,06%. Um resumo das maiores variações observadas é fornecido na Figura 10.

Figura 10 ►
Variações máximas.
Fonte: dados da pesquisa (2022)

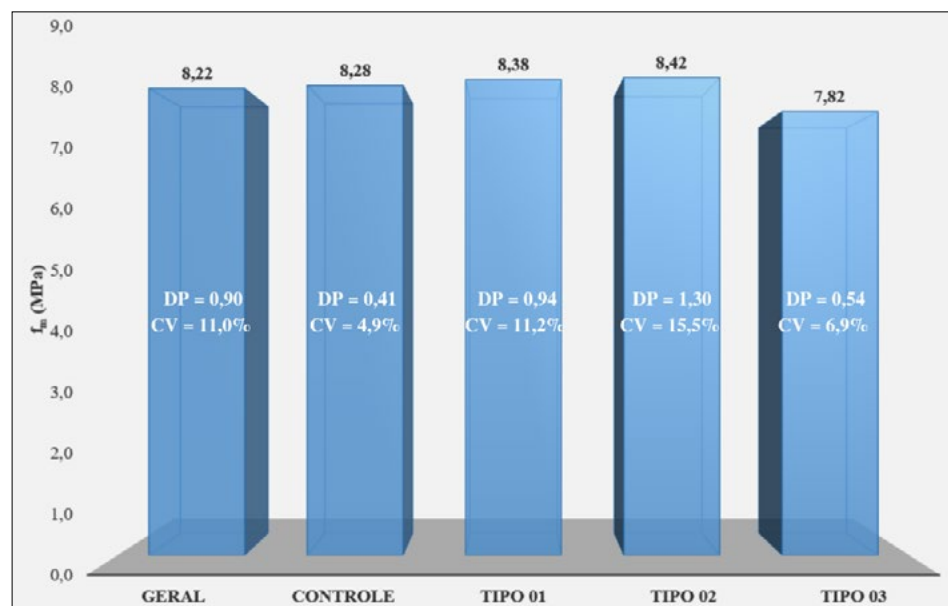


Portanto, apesar de haver muita semelhança nos espectros analisados antes e depois da execução dos furos horizontais nos blocos cerâmicos, observou-se alterações no tipo 02 e no tipo 03.

4.3 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica se deu por meio do ensaio de compressão axial dos blocos cerâmicos; nesse ensaio estabeleceu-se um valor de $A_{bm} = 409,6 \text{ cm}^2$ a partir da multiplicação dos valores de largura e comprimento médios; assim foram obtidas as tensões máximas resistidas por cada grupo. Ainda, foi adicionado um conjunto geral, no qual foram avaliados todos os blocos em um só conjunto, e sua média também foi computada. É possível observar os resultados dos ensaios na Figura 11.

Figura 11 ►
Tensões máximas: ensaio de compressão axial.
Fonte: dados da pesquisa (2022)



Legenda: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

A partir dos dados observados, entende-se que os valores das resistências não sugerem que as perfurações sejam determinantes para a resistência à compressão dos blocos, em primeira análise. É necessário, contudo, fazer um contraponto, para que sejam analisadas as rupturas dos blocos de cada tipo, uma vez que se notou fissuras passando pelas perfurações realizadas.

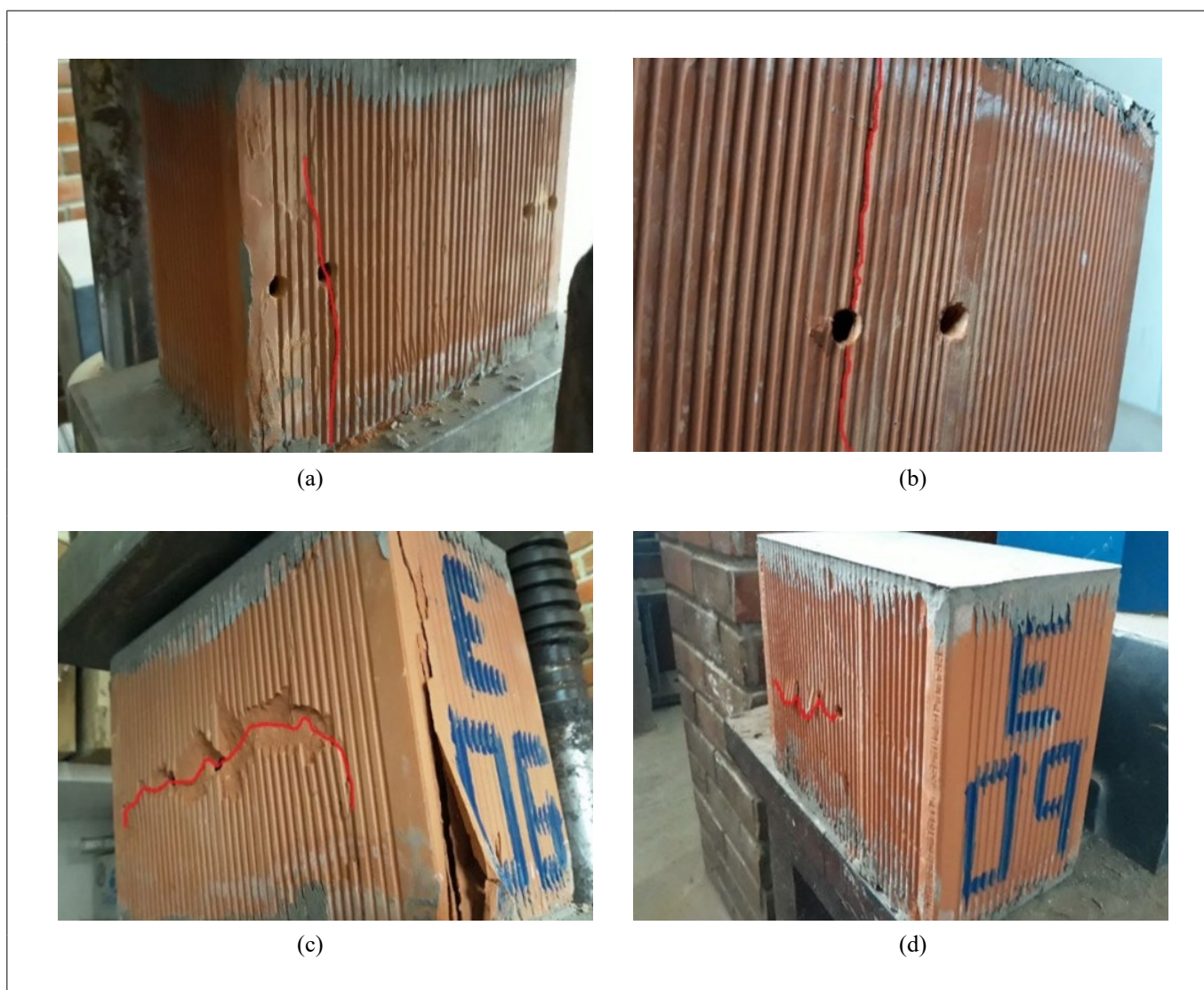
Figura 12 ▼

Modos de ruptura:

- (a) E02 (tipo 01);
- (b) E05 (tipo 02);
- (c) E06 (tipo 02);
- (d) E09 (tipo 03).

Fonte: Almeida (2019)

Nos blocos do tipo 01, foram observadas fissuras verticais passando pelas perfurações em dois dos três blocos desse grupo, como na Figura 12a. Nos blocos do tipo 02, surgiram fissuras verticais no bloco E05, como ilustrado na Figura 12b; ainda, notou-se fissuras na direção horizontal no bloco E06, como é possível observar na Figura 12c. Os blocos do tipo 03 apresentaram fissuras próximas aos bordos dos blocos, como os blocos íntegros fissuram de maneira geral. Contudo, o bloco E09 rompeu de forma muito similar ao E06, como podemos observar na Figura 12d.



Ainda, por norma, esses valores obtidos nos ensaios não correspondem à resistência característica dos blocos (f_{bk}). Para seu cálculo, a norma considera um número mínimo de seis blocos, de modo que as resistências características para cada tipo de bloco cerâmico não estão contempladas. Dessa forma, tomou-se como

Tabela 1 ▼
Resistência característica dos blocos cerâmicos.
Fonte: Almeida (2019)

base para cálculo os 12 blocos em estudo, apenas para ter um parâmetro de como se relacionam as resistências individuais em relação à resistência característica dos blocos. Os valores obtidos estão resumidos na Tabela 1.

Grupo	f_{bm} (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação	$f_{bk,Est}$ (MPa)	\emptyset	f_{b1} (MPa)	f_{bk} (MPa)	Conformidade
Geral	8,22	0,90	10,98%	6,82	0,98	6,88	6,88	OK ($f_{bk} \geq 4$ MPa)

Portanto, para os ensaios mecânicos, o que é possível observar é que os valores das resistências à compressão dos blocos cerâmicos perfurados não tiveram grandes variações em relação aos blocos de controle, com o adendo de que algumas fissuras perpassaram as perfurações introduzidas, com alteração dos modos de ruptura.

4.4 Modelo numérico

Para a análise do modelo numérico, inicialmente, foram observadas as deformações relativas à carga aplicada. De acordo com o European Committee for Standardization (CEN/CENELEC, 2005), a deformação de ruptura para blocos cerâmicos é de 0,35%, valor próximo aos obtidos pelos modelos. Ainda, para a validação do modelo numérico, foram calculadas as deformações para os experimentos a partir do módulo de elasticidade, calculado segundo a ABNT (2020), e de suas tensões de ruptura; a diferença entre as deformações do modelo e as dos experimentos foi inferior a 5%. Além disso, foram observadas alterações significativas nas tensões máximas concentradas no centroide dos elementos nas regiões próximas às perfurações, o que indica que as mudanças na geometria provocaram maior concentração de tensões. As tensões e deformações do modelo numérico e a comparação com os dados experimentais estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 ▼
Tensões máximas e deformações.
Fonte: dados da pesquisa (2022)

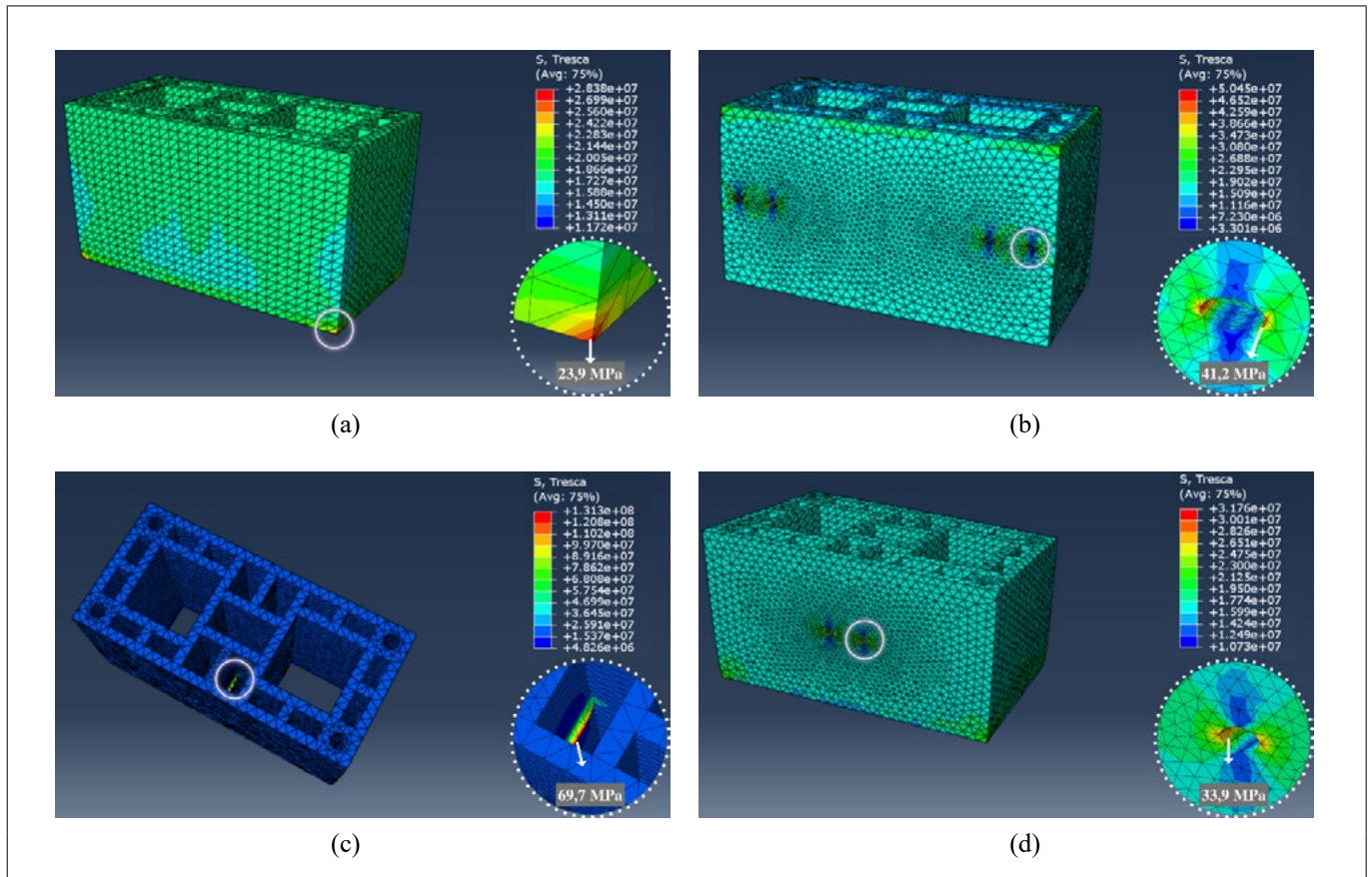
Tensões e deformações					
Grupo	Deformação experimental	Deformação - modelo numérico	Aumento da deformação - modelo numérico	Tensão máxima na área líquida - modelo numérico (Mpa)	Aumento da tensão máxima - modelo numérico
Controle	0,436%	0,419%	-	23,9	-
Tipo 01	0,441%	0,421%	0,56%	41,2	73%
Tipo 02	0,443%	0,422%	0,72%	69,7	192%
Tipo 03	0,411%	0,418%	-0,31%	33,9	42%

Observa-se que, embora as tensões experimentais estejam em torno de 8 Mpa, estas são calculadas com base na área bruta do bloco; caso fossem relacionadas à área líquida, compatível com a tensão no material, estariam em

Figura 13 ▼
Concentração de tensões:
(a) Controle; (b) Tipo 01;
(c) Tipo 02; (d) Tipo 03.

Fonte: dados da pesquisa (2022)

torno de 19 Mpa. Ademais, nos blocos perfurados há uma maior concentração de tensão, como é possível observar na Figura 13; essa modificação na distribuição dos esforços no bloco cerâmico pode justificar os modos de ruptura dos ensaios, que passavam pelas perfurações.



5 Considerações finais

Após a campanha experimental, o desenvolvimento do modelo numérico e a análise dos dados obtidos, entende-se que foi possível caracterizar os blocos quanto a suas propriedades dinâmicas e estáticas e que o modelo numérico pode ser considerado compatível com as características dos blocos nos ensaios. A partir desse conjunto de dados, avaliou-se os efeitos das perfurações nos blocos cerâmicos.

As perfurações nos três tipos de geometrias não aparentam ser determinantes para a alteração de propriedades dos blocos. Para as características estáticas, os tipos 01 e 02 resistiram mais que o grupo de controle, e o tipo 03 teve uma diminuição de apenas 5,5% na resistência média. As propriedades dinâmicas também sofreram poucas mudanças pela semelhança dos espectros, em que a maioria das frequências de interesse variaram menos que 6%.

Contudo, houve alterações; essas mudanças ficaram claras para as propriedades estáticas, em que as fissurações por vezes se deram em torno dos orifícios introduzidos nos blocos cerâmicos. Também se notou mudanças nas características dinâmicas: o pico intermediário do tipo 02 teve uma variação de 14%, e o mesmo pico foi suprimido

no tipo 03. Além disso, é notória a variação da distribuição de tensões nos blocos perfurados, observada no modelo numérico: o aumento da tensão máxima no bloco vai de 42% a 192% no caso mais crítico, o que corrobora os modos de ruptura.

Portanto, devem ser ponderados os efeitos das perfurações, que, apesar de não terem se mostrado determinantes para alterações sensíveis nas características dos blocos cerâmicos, produziram modificações nas tensões dos modelos numéricos, nos modos de ruptura observados experimentalmente e nos espectros de frequência dos blocos.

Financiamento

O estudo teve apoio da Cerâmica Salema, através do fornecimento de blocos cerâmicos.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270 - 1:** Componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270 - 2:** Componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria - Parte 2: Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16868 - 1:** Alvenaria Estrutural - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ALMEIDA, O. M. L. **Furos em blocos cerâmicos para fins estruturais:** uma abordagem experimental estática e dinâmica. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/15795>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CEN/CENELEC – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1:** General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Brussels: CEN/CENELEC, 2005.

DIÓGENES, H. J. F. **Análise tipológica de elementos e sistemas construtivos pré-moldados de concreto do ponto de vista de sensibilidade a vibrações de serviço.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.18.2010.tde-06042010-110905>.

DIÓGENES, H. J. F.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C. Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic

response. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 5, p. 792-813, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952011000500007>.

FREITAS, A. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de prismas e miniparedes submetidos à compressão**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/producao/887>. Acesso em: 5 mar. 2019.

GRILLANDA, N.; CHIOZZI, A.; MILANI, G.; TRALLI, A. Tilting plane tests for the ultimate shear capacity evaluation of perforated dry joint masonry panels. Part I: Experimental tests. **Engineering Structures**, v. 238, e112124, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112124>.

HUANG, H.; ZOU, C.; LAN, Z.; CHEN, S. Analysis of mechanical characteristics of walls of masonry structure house under dynamic load. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 676, n. 1, 012059, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/676/1/012059>.

MACHADO, D. W. N. **Alvenaria estrutural: construindo conhecimento**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7898>. Acesso em: 4 mar. 2024.

MEDEIROS, Y. C. S. **Caracterização não destrutiva de blocos estruturais de concreto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/26160>. Acesso em: 8 ago. 2022.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. Juntas verticais: influência no comportamento mecânico da alvenaria estrutural. **Prisma**, v. 29, n. CT 14, p. 37-41, 2008. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/17201>. Acesso em: 5 mar. 2019.

PEREIRA, A. H. A.; MUSOLINO, B.; MACIEL C. D.; RODRIGUES J. A. Algoritmo para determinação do amortecimento de materiais cerâmicos pela técnica das frequências naturais de vibração via excitação por impulso. **Revista Cerâmica**, v. 58, p. 229-237, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000200014>.

PINHEIRO, D. G. **Estudo do comportamento mecânico de blocos cerâmicos com diferentes larguras**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7742>. Acesso em: 4 mar. 2024.

ROMAN, H.; MUTTI, C. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: Editora UFSC, 1999.

SANTOS, S. P. **O contexto normativo recente dos eurocódigos sobre estruturas de alvenaria**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2007. Disponível em: http://www.hms.civil.uminho.pt/events/alvenaria_2007/001_020.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

SOARES, C. R. P. **Ensaio não-destrutivo para a caracterização de betões de elevado desempenho reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/68845>. Acesso em: 23 jan. 2019.

SON, K.-S.; PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K. Behaviour of concrete columns with drilled holes. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 7, p. 411-419, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1680/macr.2006.58.7.411>.

Sonelastic. **Visão geral dos sistema Sonelastic**. Disponível em: <https://www.sonelastic.com/pt/productos/sistemas/visao-geral.html>. Acesso em: 19 mar. 2019.

SOUZA, F. T.; SARMANHO, A. M. C.; OLIVEIRA, L. C. P. Análise da influência das dimensões das perfurações em pilares compostos por perfis em aço formados a frio do tipo U enrijecido com perfurações. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 1, p. 30-37, 2022. DOI: <https://doi.org/10.25286/rep.v7i1.1717>.

VILELA, R.; MASCIA, N. T.; DONADON, B. F. Confiabilidade estrutural e simulação numérica de vigas de Madeira Lamelada Colada (MLC) reforçadas com fibra sintética. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 57, p. 36-50, dez. 2021. ISSN 2447-9187. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5799>.

ZANOTO, C.; ROTTER, L. C. S.; CAMPOS, H. F. Análise comparativa de desempenho entre os sistemas construtivos em concreto armado, alvenaria estrutural e light wood frame. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 57, p. 76-85, dez. 2021. ISSN 2447-9187. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5824>.