



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Yeza Câmara Santiago de Medeiros

**CARACTERIZAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE BLOCOS
ESTRUTURAIS DE CONCRETO**

**Natal
2018**

Yeza Câmara Santiago de Medeiros

**CARACTERIZAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE BLOCOS
ESTRUTURAIS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

Co-orientador: Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes

Natal

2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Medeiros, Yeza Câmara Santiago de.

Caracterização não destrutiva de blocos estruturais de concreto / Yeza Camara Santiago de Medeiros. - 2018.
170 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes.

1. Alvenaria estrutural - Dissertação. 2. Blocos de concreto vazados - Dissertação. 3. Ensaios não destrutivos - Dissertação. I. Nascimento Neto, Joel Araújo do. II. Diógenes, Hidelbrando José Farkat. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.012.4

Yeza Câmara Santiago de Medeiros

**CARACTERIZAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE BLOCOS
ESTRUTURAIS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto – Orientador (UFRN)

Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes.– Coorientador (UFPB)

Prof. Dr. Rodrigo Barros.– Examinador Interno (UFRN)

Profa. Dra. Andrea Brasiliano Silva.– Examinadora Externa (UFPB)

Natal, 30 de maio de 2018.

Agradecimentos

Ao bom Deus por me proporcionar saúde para concluir esse árduo caminho.

Ao professor Joel Araújo do Nascimento Neto pela confiança depositada no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Hidelbrando José Farkat Diógenes pela orientação, suporte, presteza, paciência e disponibilidade, acompanhados de boas cobranças e valiosos ensinamentos.

Aos professores da banca por contribuírem de forma tão construtiva.

Aos professores Rodrigo Barros, Daniel Nelson, Francisco Adriano e Fagner França e também aos professores Joel Araújo e Hidelbrando Diógenes pelo conhecimento fornecido nas disciplinas durante o curso.

A todos do LABEME da UFPB que me permitiram utilizar equipamentos para realização da pesquisa experimental.

A todos os responsáveis pelo funcionamento do PEC.

À minha mãe, responsável por todas as minhas conquistas.

Aos meus grandes amigos Jarlusa Ferreira, Andréa Beserra e Marcelo Godeiro por sempre me fazerem lembrar que havia vida além do mestrado.

Ao meu Felipe, sempre presente e disposto a me ouvir e me amparar.

À Interblock por todo o material disponibilizado, sendo possível assim a realização deste trabalho.

À CAPES, pela bolsa de estudos que possibilitou a realização da pesquisa.

CARACTERIZAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE BLOCOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO

Yeza Câmara Santiago de Medeiros

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

Co-orientador: Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes

RESUMO

O emprego sistemático do sistema construtivo de alvenaria estrutural no mercado da construção civil brasileira demanda atualmente soluções técnicas que objetivem avaliar a qualidade dos seus componentes de forma rápida, econômica e eficaz. Embora a resistência à compressão das paredes de alvenaria seja representada pela ação conjunta dos seus componentes (bloco, argamassa e graute), os blocos são os responsáveis pela maior parcela dessa resistência. Para garantir a qualidade dos blocos, a NBR 6136 estabelece requisitos. Dentre eles, os blocos devem possuir arestas vivas e não devem apresentar trincas, fraturas ou outros defeitos. A forma mais usual de identificar tais defeitos é realizando uma inspeção visual, processo trabalhoso e que demanda tempo em meio a uma linha de produção. Nesse contexto, o presente estudo apresentou uma alternativa para identificação de falhas em blocos de concreto por meio de ensaios não destrutivos. Após análise dos espectros dos blocos obtidos experimentalmente com o uso da técnica de excitação por impulso – utilizando microfone e acelerômetro – e de forma teórica com a análise modal numérica, foi possível perceber padrões na resposta acústica dos blocos íntegros da família M-15 e M-20. Dessa forma, estabeleceram-se critérios para o controle de qualidade dos blocos utilizando a espectroscopia de ultrassom ressonante. Com isso, o estudo em questão teve o objetivo principal de testar metodologias de ensaios não destrutivos buscando avaliar a conformidade de blocos de concreto para fins estruturais, onde foi estabelecido um espectro padrão e avaliado sua eficácia em componentes vazados.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Blocos de concreto vazados. Ensaios não destrutivos.

NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF STRUCTURAL CONCRETE BLOCKS

Yeza Câmara Santiago de Medeiros

Orientador: Prof. Dr. Joel Araújo do Nascimento Neto

Co-orientador: Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes

ABSTRACT

The systematic work of the structural masonry construction system in the Brazilian civil construction market currently demands technical solutions that aim to evaluate the quality of its components in a quick, economic and effective way. Although the compressive strength of masonry walls is represented by the joint action of its components (block, laying mortar and grout), blocks are responsible for the largest share of this resistance. To ensure the quality of the blocks, NBR 6136 establishes requirements. Among them, the blocks must have sharp edges and must not show cracks, fractures or other defects. The most common way to identify such defects is by performing a visual inspection, a time-consuming process in the middle of a production line. In this context, the article presented an alternative for the identification of failures in concrete blocks by means of non-destructive tests. After analyzing the spectra of the blocks obtained experimentally by the impulse excitation technique - using microphone and accelerometer - and theoretically by the numerical modal analysis, it was possible to perceive patterns in the acoustic response of the intact blocks of the M-15 and M-20 family (Brazilian blocks sizes). Thus, it was established criteria for the quality control of the blocks by using resonant ultrasound spectroscopy. The main objective of this study was to try non-destructive testing methodologies in order to evaluate the conformity of concrete blocks for structural purposes, where a standard spectrum has been established and its efficacy assessed on hollow components.

Palavras-chave: Structural masonry. Hollow concrete blocks. Nondestructive tests.

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações

Lista de Tabelas

Lista de Equações

Lista de Siglas e Abreviaturas

CAPÍTULO 1	1
1.1. Objetivos da pesquisa	4
1.1.1. Objetivo Geral	4
1.1.2. Objetivos Específicos	4
1.2. Justificativa	4
1.3. Metodologia	5
1.4. Estrutura da dissertação	6
CAPÍTULO 2	8
2.1. Breve histórico	8
2.2. Alvenaria Estrutural	10
2.2.1. O bloco	12
2.2.2. Requisitos para avaliação da integridade dos blocos na alvenaria estrutural	17
2.2.3. Métodos de avaliação da integridade de blocos de concreto para alvenaria estrutural	19
2.3. Conceitos básicos de vibrações	20
2.4. Ensaio não destrutivo	26
2.4.1. Excitação por Impulso & Módulo de Elasticidade do Material dos blocos	28
2.4.2. Excitação por Impulso & Captador Acústico	32
2.4.3. Excitação por Impulso & Acelerometria	35
2.4.4. Espectroscopia de Ultrassom Ressonante	36
3.1. Generalidades	39
3.2. Descrição dos modelos e parâmetros das análises	40
CAPÍTULO 4	45
4.1. Generalidades	45
4.2. Primeira etapa – coleta, classificação e caracterização do material do bloco	46
4.3. Segunda etapa – Técnica de Excitação por Impulso	58
4.3.1. Descrição dos ensaios	59

4.4.	Terceira etapa – Espectroscopia de Ultrassom Ressonante	64
4.4.1.	Metodologia de análise da RUS	64
4.5.	Quarta etapa – Ensaios à compressão axial	65
4.5.1.	Descrição dos modelos	65
4.5.2.	Descrição dos ensaios	66
CAPÍTULO 5		68
5.1.	Resultados	68
5.1.1.	Módulo de elasticidade do material dos blocos	68
5.1.2.	Espectros via TEI + Captador Acústico	70
5.1.3.	Espectros via TEI x Acelerômetro	76
5.1.4.	Comparação Espectros x Análise modal via ANSYS®	78
5.1.5.	Resultados de compressão dos blocos	81
5.2.	Análise dos resultados	84
5.2.1.	Módulo elasticidade do material dos blocos	84
5.2.2.	Espectros via TEI e a RUS	85
5.2.3.	Espectros via TEI x Acelerômetro	90
5.2.4.	Análise modal dos blocos	91
5.2.5.	Compressão dos blocos	94
CAPÍTULO 6		97
ANEXOS		105
APÊNDICES		108
APÊNDICE A – Médias dos espectros dos blocos pequenos conformes de concreto vazado.....		109
APÊNDICE B – Médias dos espectros dos blocos pequenos não conformes de concreto vazado		122
APÊNDICE C – Média dos espectros dos blocos grandes conformes de concreto vazado.....		132
APÊNDICE D – Médias dos espectros dos blocos grandes não conformes de concreto vazado.....		144

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Construções antigas em alvenaria estrutural: (a) Pirâmide de Quéops no Egito; (b) Coliseum em Roma. (Infoescola (2018) e Dreamstime (2018), respectivamente)	8
Figura 2.2 – Edifício Monadnock em Chicago com destaque para paredes superdimensionadas (Cerâmica Vale da Gândara (2018))	9
Figura 2.3 – Condomínios de médio padrão em alvenaria estrutural localizados em Natal, Rio Grande do Norte: (a) Lacqua Condomínio Clube; (b) Novo Sttilo Home Club ((Cyrela Plano & Plano (2018)).....	10
Figura 2.4 – Interação de paredes com carregamento vertical (adaptado de SILVA, 2003).....	11
Figura 2.5 – Produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural (Autor, 2018)	14
Figura 2.6 – Bloco de concreto simples (ABNT NBR 6136 (2016)).....	15
Figura 2.7 – Tipos de blocos de concreto (CAMACHO (2006)).....	15
Figura 2.8 – Exemplos de modos de vibração de um bloco vazado de: (a) 39º modo; e (b) 40º modo;.....	21
Figura 2.9 – Sistema de um grau de liberdade (DIÓGENES, 2010)	23
Figura 2.10 – Amplitude de Ressonância (adaptado de MAST (2001))	25
Figura 2.13 – Curvas obtidas a partir de modelos teóricos demonstrando a influência da taxa de deformação nas curvas tensão-deformação de um concreto (SHKOLNIK, 2008).	30
Figura 2.14 – Valores de fator de correção, T (ASTM C215, 2014)	31
Figura 2.11 – Aparato experimental para obtenção da frequência de ressonância: (a) fundamental transversal, (b) longitudinal e (c) torcional (adaptado de ALMEIDA, 2005)	33
Figura.2.12 – Exemplo de um espectro de resposta	34
Figura 2.15 – Acelerômetro piezoelétrico (dBWave.i e Grupo ISQ)	35
Figura 2.16 – Espectros de cilindros de aço: (a) Espectro ressonante de um cilindro de aço aceitável; (b) Espectro ressonante de um cilindro de aço com um pequeno defeito; (c) Espectro ressonante de um cilindro de aço com grande defeito. (adaptado da ASTM E2001, 2013).	37
Figura 3.1 – Modelagem do prisma retirado da parede transversal do bloco da família M-15 para avaliar teoricamente o módulo de elasticidade do material .	41
Figura 3.2 – Elemento finito de barra BEAM188 (ANSYS RELEASE 14.0 (2018)).....	41
Figura 3.3 – Modelagem numérica via ANSYS® dos blocos da família M-15 e M-20, respectivamente.	42
Figura 3.4 - Condições de contorno do bloco de concreto vazado de 140mm x 190mm x 290mm.....	44

Figura 4.1 – Blocos da família M-20 paletizados para transporte.....	46
Figura 4.2 – Identificação de blocos conformes da família M-20.....	48
Figura 4.3 – Danos apresentados nos blocos da família M-15.....	52
Figura 4.4 – Danos apresentados nos blocos da família M-20.....	56
Figura 4.5 – Aferição das dimensões do BC20 da família M-15.....	57
Figura 4.6 - Sistema Sonelastic [®] para amostras de médio porte caracterizando um cilindro de concreto no modo de vibração longitudinal (ATCP Engenharia Física, 2017).....	58
Figura 4.7 – Aparato do ensaio no prisma retirado da parede transversal do bloco da família M-15 para obtenção do módulo de elasticidade no modo transversal.....	59
Figura 4.8 – Ensaio da TEI para obtenção das frequências naturais do BPC24	61
Figura 4.9 – TEI para obtenção das frequências naturais do BGNC15.....	61
Figura 4.10 – Ensaio da Técnica de Excitação por Impulso no BNC14 com o uso do acelerômetro.....	62
Figura 4.11 – Modelo do acelerômetro 7253C Triaxial IEPE (Endevco (2018)).....	63
Figura 4.12 – Sigalcac Ace + Quattro (Data Physics (2018))	63
Figura 4.13 – Capeamento dos blocos conformes da família M-15 para realização dos ensaios à compressão	66
Figura 4.14 – Ensaio à compressão em bloco conforme 10 da família M-20 e bloco não conforme 18 da família M-15, respectivamente.....	66
Figura 5.1 – Análise modal do Prisma I da família M-15 apresentando o modo de vibração com deformação flexional associado à frequência 1678,0 Hz	70
Figura 5.2 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco conforme da família M-15	71
Figura 5.3 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco não conforme da família M-15	71
Figura 5.4 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco conforme da família M-20	72
Figura 5.5 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco não conforme da família M-20	72
Figura 5.6 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos conformes da família M-15	73
Figura 5.7 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos não conformes da família M-15.....	74
Figura 5.8 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos conformes da família M-20	74
Figura 5.9 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos não conformes da família M-20.....	75
Figura 5.10 – Espectros das médias do BPC24 com o uso do microfone e acelerômetro	77
Figura 5.11 – Espectros das médias do BPNC22 com o uso do microfone e acelerômetro	77

Figura 5.12 – Espectros das médias do BGC23 com o uso do microfone e acelerômetro	78
Figura 5.13 – Espectros das médias BGNC14 com o uso do microfone e acelerômetro	78
Figura 5.14 – Décimo modo de vibração com frequência 1683,76 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-15.....	80
Figura 5.15 – Décimo quarto modo de vibração com frequência 2149,83 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-15.....	80
Figura 5.16 – Décimo oitavo modo de vibração com frequência 2789,38 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-15.....	80
Figura 5.17 – Décimo modo de vibração com frequência 1292,20 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-20.....	81
Figura 5.18– Décimo primeiro modo de vibração com frequência 1552,89 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-20.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração (ABNT NBR 6136 (2016))	16
Tabela 2.2 – Dimensões Nominais (Adaptada da ABNT – NBR 6136, 2016) ..	18
Tabela 2.3 – Descrição dos princípios e aplicações dos diferentes tipos de NDT's (adaptado de JULIANI, 2014).....	27
Tabela 3.1 – Propriedades dos prismas para modelagem*	42
Tabela 3.2 – Propriedades dos blocos vazados para modelagem	43
Tabela 4.1 – Quantidade de blocos para realização dos ensaios	47
Tabela 4.2 – Não conformidades nos blocos de concreto.....	48
Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos e de massas dos prismas para obtenção do módulo de elasticidade.....	58
Tabela 4.4 – Blocos ensaiados à compressão	66
Tabela 5.1 – Parâmetros geométricos e de massa dos blocos das famílias M-15 e M-20	68
Tabela 5.2 – Módulos de Elasticidade transversais via Técnica de Excitação por Impulso nos prismas retirados das paredes dos blocos.....	69
Tabela 5.3 – Frequência do primeiro modo de vibração via Técnica de Excitação por Impulso e via ANSYS® dos prismas	69
Tabela 5.4 – Picos de ressonância, desvio padrão e variância dos blocos M-15 e M-20	76
Tabela 5.5 – Primeiros picos de ressonância de blocos de concreto vazado da família M-15 encontrados via Sonelastic® e ANSYS®	79
Tabela 5.6 – Primeiros picos de ressonância de blocos de concreto vazado da família M-20 encontrados via Sonelastic® e ANSYS®	79
Tabela 5.7 – Resistência à compressão simples dos blocos (<i>F_{Abruta}</i> em MPa)	83
Tabela 5.8 – Resistência média à compressão dos blocos (<i>f_{bm}</i>).....	83
Tabela 5.9 – Desvio padrão das resistências dos blocos (<i>S_d</i>).....	83
Tabela 5.10 – Resistência característica à compressão estimada dos blocos.	84

LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. 2.1 – Frequência Natural Sistema Amortecido.....	22
Eq. 2.2 – Frequência Natural Angular	22
Eq. 2.3 – Módulo de elasticidade dinâmico Transversal	30
Eq. 2.4 – Módulo de Elasticidade Dinâmico Longitudinal.....	31
Eq. 2.5 – Módulo de Rigidez	32
Eq. 5.1 – Resistência à compressão característica estimada	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	--	<i>American Concrete Institute</i>
ANSYS	–	<i>Swanson Analysis System</i>
ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPC	–	Bloco Pequeno Conforme
BPNC	–	Bloco Pequeno Não Conforme
BGC	–	Bloco Grande Conforme
BGNC	–	Bloco Grande Não Conforme
EI	–	Eco Impacto
END	--	Ensaio Não Destrutivo
RUS	–	<i>Resonant Ultrasonic Spectroscopy</i>
TEI	–	Técnica de Excitação por Impulso

CAPÍTULO 1

Introdução

A alvenaria estrutural é um método de construção milenar que cresce no mercado brasileiro por ser considerada econômica e por oferecer um processo de execução mais rápido e com menor número de etapas. Nos últimos anos, tal crescimento pode ser atribuído ao desenvolvimento de programas governamentais voltados às habitações de interesse social como, por exemplo, o Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), lançado em março de 2009 pelo Governo Federal.

Nesse processo construtivo é possível projetar e executar de forma racional, evitando-se custos desnecessários e reduzindo significativamente o consumo e o desperdício de materiais. Camacho (2006) afirma que por meio da simplificação das técnicas de execução e do uso de formas e escoramentos, pode-se gerar uma economia estimada de até 30% em relação ao método convencional de construção com o uso do concreto armado.

O sistema em Alvenaria Estrutural funciona de forma que a alvenaria exerce tanto a função tradicional de vedação vertical, bem como cabe a esta resistir aos carregamentos e transferi-los às fundações. Nesse sentido, não é possível realizar eventuais remoções, pois, o custo da adaptação da arquitetura para um novo uso inviabiliza na maioria das vezes as alterações. Atrelado a isso, existe também o fato de haver limitações no projeto arquitetônico devido à construção em módulos, sendo prejudicada a realização de projetos com geometrias complexas.

Formada por bloco, argamassa de assentamento e graute, cada elemento possui características particulares necessárias para o ideal funcionamento do sistema, onde cada componente desempenha determinada função. Embora todos os elementos trabalhem em conjunto, os blocos – de concreto ou cerâmico – apresentam maior relevância por serem os principais elementos a resistirem às tensões e exercerem uma maior influência na resistência à compressão dos painéis de paredes. Nesse sentido, para analisar

a integridade e garantir a resistência estabelecida em projeto dos blocos, ensaios normatizados são realizados e requisitos são estabelecidos.

A ABNT - NBR 6136 (2016) define bloco vazado de concreto simples como sendo um componente de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta. A ABNT - NBR 6136 (2016) ainda dimensiona os blocos em módulos, indica quais experimentos devem ser realizados de acordo com a ABNT - NBR 12118 e estabelece condições ideais para o recebimento do material através da análise de aspectos físicos que devem ser atendidos para a garantia da sua integridade e, por consequência, da resistência final de parede.

Os experimentos usuais recomendados pela ABNT - NBR 6136 (2016) são: a análise dimensional, a absorção da área líquida, a retração linear por secagem, a permeabilidade, e por fim, a resistência à compressão. Percebe-se que estes ensaios não são passíveis de serem feitos em linha de produção, ou seja, sem a interferência humana e, ainda, terminam por gerar resíduos uma vez que alguns têm caráter destrutivo.

Os requisitos normativos da ABNT – NBR 6136 (2016) se dividem entre gerais e específicos, os específicos tratam sobre as dimensões dos blocos e dos experimentos. Já os requisitos gerais versam sobre as propriedades do material que deve ser utilizado para fabricação do bloco de concreto e afirma que os blocos devem ter arestas vivas sem apresentar fissuras ou outros defeitos que possam prejudicar o seu assentamento ou afetar a resistência e a durabilidade da construção. Também não é permitido qualquer tipo de reparo que oculte defeitos eventualmente existentes no bloco.

Atualmente, a forma utilizada para encontrar fissuras nos blocos é a inspeção visual, unidade por unidade. Esse processo trabalhoso demanda muito tempo, considerando que em uma linha de produção mecanizada é possível se produzir de 360 a 960 blocos (do tipo M-15, por exemplo) por hora¹.

Nesse contexto, surge como alternativa aos métodos tradicionais de avaliação da qualidade dos blocos de concreto, ensaios não destrutivos (END's – Ensaio Não Destrutivo). É possível avaliar a integridade (presença de fissuras, por exemplo) de forma automatizada com a realização de ensaios não

¹ Informação fornecida pela empresa Sahara através do site: www.sahara.com.br, visita em 28/02/2018.

destrutivos utilizando, por exemplo, a Técnica de Excitação por Impulso (TEI) e a Espectroscopia de Ultrassom Ressonante (RUS - *Resonant Ultrasonic Spectroscopy*). Podem-se citar soluções similares já utilizadas na indústria automobilística como o programa Soneteste[®], desenvolvido pela ATCP Engenharia Física que tem como princípio a TEI+RUS.

LIMA (2013) descreve a técnica de excitação por impulso como um método de teste capaz de determinar a frequência fundamental de ressonância do corpo de prova, com geometria adequada, por excitação mecânica utilizando um dispositivo eletromagnético que pode ser acionado de forma manual ou mecânica.

A técnica de excitação tem sido aplicada, na maioria dos casos, em amostras maciças com geometria adequada (prismas e cilindros), no entanto, é possível estabelecer um critério de inspeção e controle de qualidade dos blocos de concreto para alvenaria estrutural a partir da análise espectral da resposta da amostra em teste.

De posse dos espectros, pode-se caracterizar a qualidade de um corpo, ou de um corpo de prova, através de uma análise comparativa entre os espectros obtidos em teste via TEI e os espectros previamente aceitáveis obtidos de amostras íntegras e conformes. Tal metodologia é conhecida como espectroscopia de ultrassom ressonante (*Resonant Ultrasonic Spectroscopy – RUS*).

Desta forma, o presente trabalho desenvolve-se na expectativa do avanço contínuo dos métodos e técnicas experimentais, que visem o estabelecimento de soluções mais práticas, econômicas, e confiáveis. Acreditando que a obtenção experimental do espectro padrão de blocos conformes permitirá, no futuro, aperfeiçoar a caracterização de blocos de concreto para alvenaria estrutural.

1.1. Objetivos da pesquisa

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o uso de ensaios não destrutivos já utilizados para caracterização da conformidade de peças maciças, em blocos de concreto vazados para fins estruturais.

Para tanto são elencados os seguintes objetivos específicos:

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar metodologias de ensaios não destrutivos, em especial a Técnica de Excitação por Impulso e a Espectroscopia de Ultrassom Ressonante em peças vazadas, estabelecendo um espectro padrão para blocos de concreto vazados para alvenaria estrutural com resistências à compressão de 4 MPa das famílias M-15 e M-20;
- Analisar a eficácia da Técnica de Excitação por Impulso em blocos de concreto vazado com o uso do microfone comparando as frequências naturais obtidas por meio deste e de um acelerômetro;
- Realizar a análise modal numérica de blocos de concreto por meio do pacote computacional baseado no método dos elementos finitos ANSYS;
- Avaliar a possibilidade do estabelecimento de uma correlação entre as frequências naturais obtidas por meio da técnica de excitação por impulso e a resistência à compressão do bloco;
- Identificar vantagens e desvantagens das técnicas utilizadas.

1.2. Justificativa

A necessidade de aprofundamento dos estudos voltados à caracterização não destrutiva de materiais e o desenvolvimento de novas metodologias de Ensaios Não Destrutivos (END's) é cada vez mais relevante

no contexto atual da indústria da construção civil com a busca pela racionalização dos processos, melhoria da produtividade e da sustentabilidade.

O aperfeiçoamento dos ensaios não destrutivos aplicados a blocos de alvenaria estrutural poderá, no futuro, aumentar a produção e diminuir as perdas do processo.

Ressalta-se que o ensaio não destrutivo é, em geral, bastante preciso, rápido, barato, e permite elevada repetibilidade e qualidades desejáveis para a industrialização da construção.

Outro aspecto importante é a possibilidade de realizar vários ensaios a partir de uma mesma amostra, com o monitoramento das propriedades dos materiais ao longo de sua vida útil.

1.3. Metodologia

O estudo desenvolvido teve caráter numérico-experimental. Para alcançar os objetivos descritos anteriormente, efetuaram-se ensaios não destrutivos via técnica de excitação por impulso utilizando o programa Sonelastic[®], a fim de se obter os espectros da resposta de cada bloco.

Em paralelo, objetivando estabelecer uma referência para análise dos resultados obtidos, foi realizada a análise modal numérica de um modelo representativo em 3D de um bloco de concreto vazado mediante o uso do programa ANSYS[®], fundamentado no método dos elementos finitos. A análise foi realizada com o módulo de elasticidade dinâmico previamente obtido via Técnica de Excitação por Impulso, a partir da extração de corpos de provas prismáticos das paredes dos blocos, procedimento que será detalhado no Capítulo 4, que trata sobre o programa experimental.

A análise modal numérica se prestou para obtenção das frequências e modos de vibração de provável interesse, objetivando estabelecer um espectro padrão para caracterização dos blocos.

Ensaio à compressão também foram realizados a fim de estimar a resistência do concreto e tentar correlacionar as resistências aos espectros encontrados nos ensaios não destrutivos.

Para obter representatividade estatística em relação ao espectro padrão sugerido, foram realizados ensaios em 46 blocos de 140mm x 190mm x 290mm e 42 testes em blocos de 190mm x 190mm x 390mm.

No total foram realizados 528 ensaios – 06 por unidade – não destrutivos nos blocos, e 60 ensaios de ruptura compressão, além de extração de testemunhos prismáticos para obtenção do módulo dinâmico experimental via Técnica de Excitação por Impulso.

Desta forma, buscando apresentar sucintamente as etapas de desenvolvimento do trabalho, tem-se:

- a) Levantamento do material bibliográfico e fichamento de dissertações, teses, livros e artigos ligados ao tema para o desenvolvimento da fundamentação teórica;
- b) Aquisição e coleta dos blocos para os experimentos, classificando-os em conforme e não conformes;
- c) Extração dos testemunhos para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico a ser utilizado na análise modal numérica;
- d) Realização dos ensaios não destrutivos nos blocos de concreto por meio da linha de solução Sonelastic®;
- e) Análise modal numérica do bloco utilizando o pacote computacional em elementos finitos ANSYS®;
- f) Ensaios de ruptura por compressão dos blocos;
- g) Análise e discussão dos resultados;

1.4. Estrutura da dissertação

Ademais do que foi descrito até aqui, os capítulos seguintes versarão sobre:

Capítulo 2: **Fundamentação teórica** – a teoria se deu com a apresentação mais aprofundada sobre alvenaria estrutural, a importância do bloco frente ao painel de alvenaria, as técnicas para avaliação da qualidade dos blocos exigidas em Norma como o ensaio à compressão e outros. Apresentaram-se também os conceitos fundamentais sobre vibração de um

corpo, a dinâmica das estruturas, ensaios não destrutivos, a Técnica de Excitação por Impulso com o uso do microfone e do acelerômetro, e a Espectroscopia de Ultrassom Ressonante. Tais teorias foram importantes para que se pudesse compreender melhor o comportamento da estrutura frente a excitações dinâmicas e como a pesquisa utilizou os ensaios não destrutivos para aferição da qualidade dos blocos de concreto para alvenaria estrutural;

Capítulo 3: **Análise numérica** – neste capítulo foi realizada a apresentação conceitual sobre análise numérica e a descrição da metodologia de ensaio teórico com a modelagem numérica, bem como seus modelos e parâmetros das análises.

Capítulo 4: **Programa experimental** – neste capítulo se deu o principal objeto da pesquisa experimental com a descrição da metodologia e realização dos ensaios da Técnica de Excitação por Impulso em prismas de concreto para obtenção do módulo de elasticidade do material dos blocos e em blocos vazados para obtenção das frequências naturais. Também foi realizada a metodologia de análise da Espectroscopia de Ultrassom Ressonante, a análise modal de um bloco de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-15 e M-20, e os ensaios à compressão;

Capítulo 5: **Resultados e discussões** – trata-se da análise e discussão dos resultados do estudo;

Capítulo 6: **Considerações finais** – trata-se das conclusões em relação à pesquisa realizada;

Referências bibliográficas – livros, artigos, trabalhos e normas citadas neste trabalho;

Anexos – modos de vibração e frequências naturais via ANSYS®.

Apêndices – espectros obtidos via TEI.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1. Breve histórico

A alvenaria estrutural é uma técnica construtiva bastante antiga, presente desde a construção de grandes monumentos da idade antiga como em grandes castelos e catedrais da idade média, de exemplo tem-se: a pirâmide de Quéops, o Coliseu (Figura 2.1), e outros.



Figura 2.1 – Construções antigas em alvenaria estrutural: (a) Pirâmide de Quéops no Egito; (b) Coliseu em Roma. (Infoescola (2018)² e Dreamstime (2018)³, respectivamente)

Apesar de milenar, a alvenaria estrutural perdeu mercado com o surgimento do concreto armado no século XX. Hendry (1981) atribui tal perda às análises empíricas que resultavam em dimensionamentos de paredes com espessuras excessivas.

Pode-se citar o edifício Monadnock em Chicago (Figura 2.2), construído em 1891, com 16 pavimentos, 65m de altura e paredes com aproximadamente 1,80m de espessura. Na Figura 2.2 é possível atentar para uma estrutura mais robusta notando uma alvenaria mais espessa através das janelas do edifício.

² Visita ao site <https://www.infoescola.com> em 28 de fev de 2018;

³ Visita ao site <https://www.dreamstime.com> em 28 de fev de 2018.



Figura 2.2 – Edifício Monadnock em Chicago com destaque para paredes superdimensionadas (Cerâmica Vale da Gândara⁴ (2018))

A recuperação no mercado se deu a partir da década de 50 com o aprofundamento dos estudos sobre a alvenaria estrutural e a publicação de Normas reguladoras. Tal aprofundamento possibilitou análises que se aproximavam mais do comportamento real da estrutura, possibilitando assim projetos mais econômicos.

Embora seja capaz de proporcionar grandes economias, a alvenaria estrutural traz alguns inconvenientes como: limitação do projeto arquitetônico pela concepção estrutural e impossibilidade de adaptação da arquitetura para um novo uso. Tais inconveniências fazem com que o mercado da construção civil de alto padrão não tenha efetivo interesse nesse nicho.

Embora a alvenaria estrutural seja mais comum em obras de baixo padrão devido às suas limitações, esse cenário vem mudando e ganhando espaço em um novo mercado.

Em Natal, no Rio Grande do Norte é possível encontrar edifícios também de médio padrão que utilizaram esse método como o L'Acqua Condomínio Clube (Figura 2.3), um empreendimento da construtora Cyrela Plano & Plano, entregue em meados de 2013 com 5 torres de 20 pavimentos.

Outro condomínio é o Novo Sttilo Home Club (Figura 2.3), condomínio de médio padrão localizado na grande Natal que também foi construído por meio da alvenaria estrutural pela construtora Cyrela Plano & Plano, entregue em meados de 2013, com 6 torres de 15 pavimentos.

⁴ Visita ao site <http://www.valegandara.com/blog/nov/monadnock.php> em 28 de fev de 2018.



Figura 2.3 – Condomínios de médio padrão em alvenaria estrutural localizados em Natal, Rio Grande do Norte: (a) Lacqua Condomínio Clube; (b) Novo Sttulo Home Club ((Cyrela Plano & Plano (2018)⁵)

2.2. Alvenaria Estrutural

Entende-se por “alvenaria” a associação de um conjunto de unidades de alvenaria (tijolos, blocos, pedras, etc.) e, geralmente, argamassa, que possui propriedades mecânicas intrínsecas capazes de constituir elementos estruturais. (ROQUE, 2002).

A alvenaria possui basicamente duas funções, estrutural e/ou vedação vertical, servindo, portanto para: vedar espaços, resistir a cargas oriundas da gravidade, promover segurança, resistir a impactos, à ação do fogo, isolar e proteger acusticamente os ambientes, contribuir para a manutenção do conforto térmico, além de impedir a entrada de vento e chuva no interior dos ambientes. (TAUIL & NESE, 2010).

Vilató & Franco (2000) afirmam que a alvenaria estrutural consiste na utilização de paredes formadas por tijolos especiais (blocos estruturais) que desempenham a função de vedação vertical e de estrutura de sustentação.

O carregamento se dá basicamente por tensões de compressão e são transferidas e distribuídas até as fundações através da própria alvenaria. (Figura 2.4).

⁵ Visita ao site <https://www.cyrela.com.br> em 28 de fev de 2018.

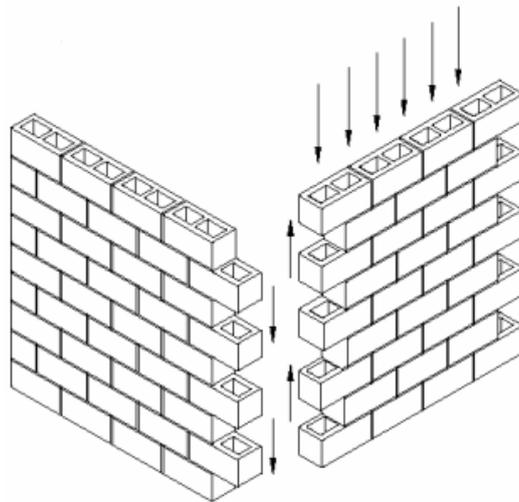


Figura 2.4 – Interação de paredes com carregamento vertical (adaptado de SILVA, 2003).

Roque (2002) afirma que a disposição da alvenaria estrutural com seus diferentes elementos caracteriza um material composto heterogêneo, intrinsecamente descontínuo, com boa resistência à compressão, fraca resistência à tração e, sob a ação exclusiva da gravidade, oferece um baixo risco de deslizamento. A heterogeneidade da alvenaria estrutural está diretamente relacionada a dois fatores: processo de fabricação dos blocos e a qualidade da execução da parede.

Formada por bloco, argamassa e graute, cada elemento da alvenaria estrutural possui características particulares necessárias para o funcionamento ideal do sistema estrutural, desempenhando determinadas funções e importâncias.

Embora todos os elementos trabalhem em conjunto, dentre eles, os blocos apresentam maior relevância por serem os principais elementos a resistirem às tensões e exercerem uma maior influência na resistência final dos painéis de paredes.

Camacho (2006) afirma que as unidades (blocos e tijolos) são os componentes mais importantes que compõe a alvenaria estrutural, uma vez que são eles que comandam a resistência à compressão e determinam os procedimentos para aplicação da técnica da coordenação modular nos projetos.

Assim, diante de tal relevância, torna-se imperativo aprofundar os conhecimentos acerca da influência do bloco para alvenaria estrutural frente ao painel de parede, bem como garantir a sua integridade e resistência de projeto.

2.2.1. O bloco

As unidades de alvenaria são disponíveis na forma de tijolos e blocos, produzidas com argila, concreto ou silicato de cálcio. As unidades de concreto são as mais utilizadas no Brasil, seguidas pelas unidades cerâmicas e as sílico-calcárias. (BARBOSA, 2004).

A fabricação de blocos estruturais, ou tijolos especiais para fins estruturais, costumava ser de forma manual, o que limitava sua produção e dificultava o estabelecimento de padrões de conformidade.

Com o aumento da mecanização do processo fabril foi possível produzi-los em maior escala e em um menor espaço de tempo, tornando-os mais uniformes e com um melhor controle de qualidade, o que contribuiu com o crescimento do seu uso.

Focando nos blocos de concreto, a produção se dá por meio de uma dosagem racional (estabelecimento do traço a depender da resistência exigida) de cimento, areia, pó de pedra e água. Apesar de se chamar blocos de concreto, a mistura tem exigências diferentes dos concretos tradicionais.

Uma das características que difere do concreto tradicional é a consistência da mistura, onde são utilizados agregados de baixa umidade, sem consistência plástica. Segundo Frasson et al. (2010), a produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural ou de vedação é caracterizada pelo “concreto seco”, ou concreto levemente umedecido. A umidade normalmente empregada é de 6,0% a 8,0%.

Outra característica que difere os blocos de concreto para alvenaria estrutural dos concretos tradicionais tem relação com o fator água/cimento.

“Diferente de um concreto de consistência plástica, o concreto seco para a produção de blocos não segue à risca a “lei de Abrams”, com sua conhecida relação água/cimento e sua influência na resistência à compressão. Normalmente, na produção dos blocos de concreto, quanto maior a quantidade de água

empregada na mistura, mais alta será a resistência mecânica final do produto. Isto ocorre porque a água empregada confere uma maior plasticidade à mistura, facilitando a prensagem do material nas máquinas vibroprensas (maior eficiência na remoção dos vazios).” (FRASSON et al, 2010).

A não aplicação completa da “Lei de Abrams” se dá devido ao fato de que os blocos de concreto com pouca umidade possuem muitos vazios e produzem unidades de menor resistência por não proporcionar a hidratação completa do cimento, logo, o aumento da umidade poderia também aumentar da resistência do bloco.

Por outro lado, concretos com alta umidade produzem blocos que ficam presos nas fôrmas e inviabilizam a produção. Por esse motivo, é necessário o estabelecimento de uma umidade ótima capaz de estabelecer um equilíbrio entre a compactação do bloco, aproximando ao máximo os agregados, e proporcionar uma melhor resistência.

A baixa umidade exige que a retirada do ar aprisionado seja realizada por equipamentos especiais, onde é necessário um controle de qualidade, pois a regulagem do equipamento exerce grande influência nas propriedades finais dos blocos.

Para fabricação são necessários: silos para armazenagem de cimento, compartimentos com areia e pó de pedra; dosadores; esteira para alimentação dos misturadores; prensa; esteira para transporte dos blocos; área para cura; e sistema de embalagem e paletização (Figura 2.5).

Após a determinação do traço, a areia e o pó de pedra seguem na esteira em direção ao misturador, que também é alimentado pela água e pelo silo de cimento. Após haver a mistura, a massa é depositada na prensa, que possui a fôrma do bloco nas dimensões e formas desejadas e seguem na esteira para armazenamento e cura.



Figura 2.5 – Produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural (Autor, 2018)

(a) Compartimentos para armazenamento da areia e do pó de pedra; (b) Silo de armazenamento de cimento; (c) Misturador; (d) Esteira para alimentação da prensa; (e) Prensa para produção dos blocos; (f) Acabamento nos blocos de concreto; (g) Armazenamento de blocos para cura; (h) Cura dos blocos de concreto.

Os tijolos e os blocos são produzidos em muitas formas (maciços, perfurados e vazados) e dimensões. Para se construir edificações, alguns tipos de blocos podem ser usados. Focando nos blocos de concreto, tem-se de exemplos os que a ABNT – NBR 6136 (2016) apresenta no corpo de seu texto: blocos de largura nominal de 15 cm, designados como M-15, e blocos de largura nominal de 20 cm, designados como M-20.

A Figura 2.6 ilustra os parâmetros geométricos de interesse de um bloco de concreto simples segundo as especificações da ABNT 6136 (2016). Já as variações dos tipos de blocos de concreto são exemplificadas da Figura 2.7.

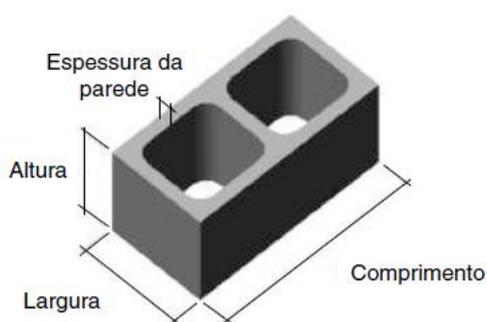


Figura 2.6 – Bloco de concreto simples (ABNT NBR 6136 (2016))

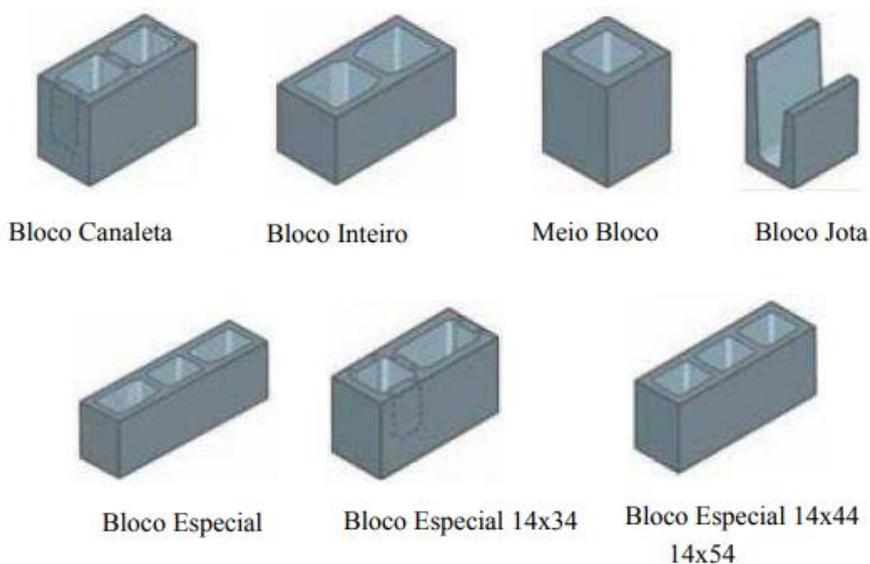


Figura 2.7 – Tipos de blocos de concreto (CAMACHO (2006))

A ABNT – NBR 6136 (2016) define bloco vazado como sendo um componente de alvenaria cuja área líquida (área média da seção perpendicular aos eixos dos furos, descontadas as áreas médias dos vazios) é igual ou inferior a 75% da área bruta (sem desconto das áreas de vazios).

A resistência característica à compressão do bloco, segundo a ABNT – NBR 6136 (2016) é dada pelo f_{bk} , e se divide entre as classes A, B e C (Tabela 2.1), onde:

- **Classe A** faz referência aos blocos com função estrutural de aplicação abaixo do nível do solo e apresenta resistência característica à compressão axial maior ou igual a 8 MPa;
- **Classe B** são aqueles com função estrutural acima do nível do solo e resistência entre 4 MPa e menor que 8 MPa;
- **Classe C** apresenta resistência maior ou igual a 3 MPa, podendo ser considerada com ou sem função estrutural a depender da largura do bloco, com a mínima em 65mm de uso restrito para alvenaria sem função estrutural, e com função estrutural tem-se larguras de 90 mm para edificações de no máximo um pavimento, 115mm de no máximo dois pavimentos e entre 140 mm e 190 mm para edificações de até cinco pavimentos.

Tabela 2.1 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração (ABNT NBR 6136 (2016))

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial MPa	Absorção %				Retração%
			Agregado Nominal		Agregado leve		
			Individual	Médio	Individual	Médio	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 8,0$	$\leq 6,0$			
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 8,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 12,0$	$\leq 10,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$

Os blocos são os principais responsáveis por garantir a resistência final do painel de parede.

A resistência das unidades é o principal fator condicionante da resistência da alvenaria. Porém, cabe ressaltar que o aumento de resistência dos blocos não resulta em incrementos proporcionais de

resistência de alvenaria. Dessa forma, o fator de eficiência da alvenaria, ou seja, a razão entre a resistência da alvenaria e a resistência dos blocos, diminui com o acréscimo da resistência da unidade. (JUSTE, 2001).

Isso se dá devido ao fato de que cada elemento na alvenaria estrutural deve trabalhar em conjunto com os demais, apresentando determinada função e importância. Fatores como: modo de preenchimento das paredes longitudinais e transversais dos blocos, preenchimento de áreas transversais, espessura e resistência da argamassa de assentamento e utilização ou não do graute afetam a resistência final do painel de alvenaria. Aumentar excessivamente a resistência somente do bloco e não atentar para os outros fatores citados acima poderia acarretar uma diminuição considerável da resistência final do painel de parede. (DRYSDALE; HAMID, 2008)

A resistência da alvenaria é aproximadamente proporcional à raiz quadrada da resistência do bloco. (HENDRY, 1981). Drysdale et al. (1994) afirmam que tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração dos blocos têm um papel significativo na resistência da alvenaria. Ou seja, os autores afirmam que o aumento da resistência do painel de alvenaria se dá devido à resistência à tração do bloco, que cresce com o aumento da resistência à compressão.

É fato que os estudos ressaltam a importância do bloco de concreto frente à resistência do painel de alvenaria. Portanto, é imprescindível a realização de ensaios de controle de qualidade. Nesse sentido, objetivando garantir que as características físicas e mecânicas descritas no projeto sejam garantidas, requisitos são exigidos e ensaios normatizados são realizados nos blocos, tais como: resistência à compressão, análise dimensional, absorção da área líquida, retração linear por secagem e permeabilidade, regidas pela ABNT NBR 12118 (2013).

2.2.2. Requisitos para avaliação da integridade dos blocos na alvenaria estrutural

Para que a integridade dos blocos de concreto para alvenaria estrutural seja garantida, e assim, a resistência de projeto atingida, a ABNT NBR – 6136

(2016) estabelece requisitos para produção e aceitação de blocos vazados de concreto simples, destinados à execução de alvenaria com ou sem função estrutural.

Para a produção, apenas cimentos que obedecem às especificações brasileiras destinadas à preparação de concretos e argamassas devem ser utilizados. A água de amassamento deve obedecer à ABNT – NBR 15900-1 (2009) e os agregados graúdos e miúdos devem estar de acordo com a ABNT – NBR 7211 (2009).

Os blocos devem ser fabricados e curados por processos que assegurem a obtenção de um concreto suficientemente homogêneo e compacto. E os lotes devem ser identificados pelo fabricante segundo sua procedência e transportados preferencialmente cubados ou paletizados.

A ABNT – NBR 6136 (2016) ainda exige que os blocos atinjam dimensões nominais especificadas na Tabela 2.2 que é uma adaptação da Tabela 1 presente na referida Norma.

Tabela 2.2 – Dimensões Nominais (Adaptada da ABNT – NBR 6136, 2016)

Família		20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	7,5x40	
Medida nominal (mm)	Largura	190	140		115			90		65	
	Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
	Comprimento	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	290	390
		Meio	190	190	140	190	115	-	190	140	190
		2/3	-	-	-	-	-	240	-	190	-
		1/3	-	-	-	-	-	115	-	90	-
		Amarração L	-	340	-	-	-	-	-	-	-
		Amarração T	-	540	440	-	365	-	-	290	-
		Comp. A	90	90	-	90	-	-	90	-	90
		Comp. B	40	40	-	40	-	-	40	-	40
		Canaleta	390	390	290	390	240	365	390	290	-
		Meia Canaleta	190	190	140	190	115	-	190	140	-

Legenda: Comp. A: Compensador A; Com. B: Compensador B; Nota: As tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos indicados nesta Tabela são de $\pm 2,0$ mm para a largura e $\pm 3,0$ mm para a altura e para o comprimento.

A espessura de parede mínima para blocos M-15 é de 16 mm e para blocos M-20 a espessura de 26 mm. Os blocos devem possuir arestas vivas e sem apresentar trincas, fraturas ou outros defeitos que possam prejudicar o

seu assentamento ou afetar a resistência e a durabilidade da construção. Também não é permitido qualquer reparo que oculte defeitos eventualmente existentes no bloco.

A composição e geometria dos blocos de concreto alteram a própria resistência da unidade, interferindo, conseqüentemente, na resistência final do conjunto. Diante disso, é importante a detecção de falhas como fissuras, descontinuidades e outros defeitos que possam vir a comprometer a resistência final do projeto.

2.2.3. Métodos de avaliação da integridade de blocos de concreto para alvenaria estrutural

Os blocos vazados de concreto devem atender aos limites de resistência, absorção e retração linear por secagem estabelecidos na Tabela 2.1. Para isso, ensaios regidos pela ABNT – NBR 12118 (2013) devem ser realizados.

A análise dimensional é realizada com um paquímetro calibrado e de comprimento adequado às dimensões do bloco. É importante que os blocos obedeçam às dimensões e tolerâncias especificadas de acordo com a modulação. Os problemas com precisão dimensional afetam diretamente a coordenação modular e contribuem para aumentar os desperdícios de blocos.

O ensaio de absorção diz respeito à impermeabilidade e porosidade do bloco, acarretando em um acréscimo imprevisto de peso à parede saturada, o que tem relação direta com a durabilidade da construção. Ele é realizado em uma balança com dispositivo para pesagem hidrostática, estufa e termômetro.

Já o ensaio à compressão, o mais importante do ponto de vista do projeto de estruturas, é o que determina diretamente a capacidade resistente do bloco estrutural por meio da ruptura mecânica, e indiretamente, do painel de alvenaria. A carga deve ser aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar durante seu emprego e deve ter seu centro de gravidade coincidindo com o eixo de carga dos pratos da prensa. Durante o carregamento do corpo de prova, os dispositivos de comando da prensa devem ser controlados de

forma que a tensão aplicada (calculada em relação à área bruta) aumente progressivamente e sem choques.

Por fim, a retração por secagem diz respeito à redução de volume resultante da evaporação da água excedente. O ensaio é realizado através de um dispositivo de medida que permita leituras diretas de variação de comprimento do bloco, estufa, câmara de resfriamento, tanque de imersão e balança.

A retração por secagem é uma das causas que contribuem para a formação de fissuras e fraturas nos blocos de alvenaria estrutural, além do transporte inadequado. A existência da fissura causa descontinuidade e compromete a homogeneidade do bloco, podendo provocar patologias e prejudicar o assentamento, a resistência e a durabilidade da alvenaria.

Cabe ressaltar que os ensaios recomendados pela ABNT – NBR 12118 (2013) têm características destrutivas, exceto o de análise dimensional.

A ABNT – NBR 12118 (2013) não menciona a nada sobre ensaios não destrutivos que visem avaliar a conformidade dos blocos.

Assim, objetivando compreender melhor a aplicação de tais técnicas para a detecção de falhas e trincas em blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural, são apresentados nos itens 2.3 e 2.4 conceitos fundamentais da dinâmica das estruturas e o estado da arte acerca de ensaios não destrutivos.

2.3. Conceitos básicos de vibrações

Qualquer movimento de um corpo que ocorre de forma repetida durante um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação, e a teoria de vibração é o estudo responsável pela análise de tais movimentos oscilatórios e as forças associadas a estes.

Segundo Rao (2008), um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor). Sobre vibração de um corpo o autor ainda afirma que:

“A vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial. Se o sistema for amortecido, certa quantidade de energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituída por uma fonte externa, se for preciso manter um regime permanente de vibração.” (RAO, 2008).

Correia (2007) apresenta outra forma de entender a vibração, segundo o referido autor, existe vibração em um corpo quando após uma excitação externa, ocorrem diferentes formas de movimentos oscilatórios completos em relação a uma posição de equilíbrio em um intervalo de tempo. Tais movimentos oscilatórios são chamados de frequência e eles estão associados a um modo de vibração.

Assim, pode-se dizer que frequência natural de um corpo é uma grandeza física associada a movimentos oscilatórios que indica o número de execuções (ciclos) por unidade de tempo, sendo usualmente representada na unidade de Hertz (Hz), e está associada a um modo de vibração. O intervalo de tempo no qual a frequência completa uma oscilação denomina-se período.

Segundo Diógenes (2010), modo de vibração corresponde ao perfil vibracional associado a cada frequência natural. Portanto, os modos de vibração são a forma como a estrutura vibra, tendo relacionada a estes cada uma de suas frequências naturais, ou seja, para cada modo de vibração existe uma frequência natural correspondente. Tal afirmação pode ser melhor entendida a partir da análise da Figura 2.8.

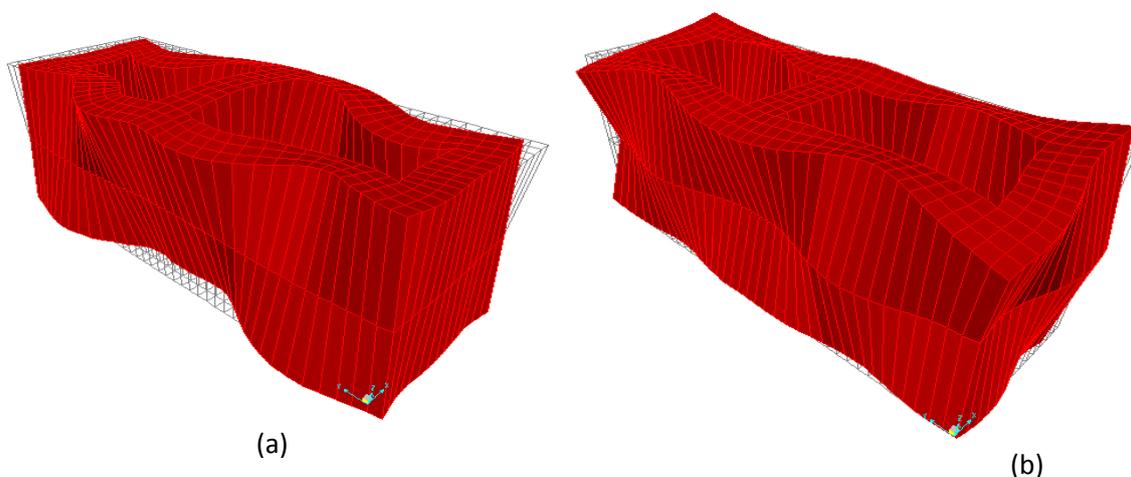


Figura 2.8 – Exemplos de modos de vibração de um bloco vazado de: (a) 39º modo; e (b) 40º modo;

Quando excitado, o corpo apresenta uma ou mais frequências nas quais ele tende a vibrar, em um ou mais modos de vibração. A Figura 2.8 exemplifica dois modos de vibração de um bloco vazado de concreto para alvenaria estrutural. Percebe-se que a representação da Figura 2.8 (a) apresenta o 39º modo de vibração, já a Figura 2.8 (b) apresenta a 40º.

Algebricamente, a frequência natural não amortecida pode ser representada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \omega_n \quad \text{Eq. 2.1}$$

Com:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde:

f = frequência natural não amortecida em Hz;

ω_n = frequência natural angular em (rad/s);

k = rigidez do sistema (N/m);

m = massa do sistema (kg).

A frequência natural (Equação 2.1) diz respeito a um sistema não amortecido (sem dissipação de energia) de um grau de liberdade, ou SDOF (*single degree of freedom*).

Analisando a expressão algébrica Eq. 2.1 pode-se notar que os fatores que incidem sobre as frequências naturais apresentadas por uma estrutura não amortecida são a massa e a rigidez de um corpo.

A rigidez de um corpo se apresenta de forma diretamente proporcional às frequências naturais, ao passo que a massa se apresenta de forma inversa.

Logo, as frequências naturais dependem somente da massa e da rigidez do corpo, e independem da intensidade da força externa aplicada.

Dessa forma, entende-se que é necessária uma energia maior para um corpo que apresenta rigidez elevada vibrar, o que conseqüentemente apresentará maiores frequências naturais. Por outro lado, uma estrutura de grande massa tenderá a absorver parte da energia envolvida, reduzindo a frequência natural.

O sistema de um grau de liberdade (Figura 2.9) é uma simplificação da análise de um sistema, onde se pode utilizar o modelo de massas discretas, selecionando os graus de liberdade mais relevantes e reduzindo-o a um número finito e discretizado. (DIÓGENES, 2010).

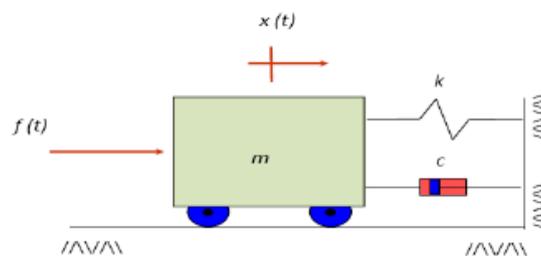


Figura 2.9 – Sistema de um grau de liberdade (DIÓGENES, 2010)

A massa m representa a inércia do sistema, a mola k representa suas propriedades elásticas e o amortecedor c representa um mecanismo de dissipação de energia. A massa m possui apenas translação na direção da coordenada x , que define a posição da massa em qualquer instante de tempo t , sendo necessária apenas uma coordenada para definir a posição de m .

Desse modo, por meio do princípio d'Alembert, o equilíbrio dinâmico de um sistema pode ser obtido pela adição de uma força fictícia ou força de inércia, proporcional à aceleração e de sentido contrário ao movimento. (DIÓGENES, 2010).

Sobre as vibrações, Rao (2008) apresenta algumas classificações importantes: vibração livre ou forçada; não amortecida ou amortecida; linear ou não linear e determinística ou aleatória. Dentre elas, a descrição para vibração livre trata de um sistema que após sofrer uma perturbação inicial, continua a vibrar por conta própria sem nenhuma força externa agir sobre o sistema. A

vibração forçada é quando o sistema está sujeito a uma força externa (por vezes repetitivas).

Rao (2008) ainda afirma que se a frequência da força externa coincidir com uma das frequências naturais do sistema, ocorre uma condição conhecida como ressonância, dessa forma o sistema sofre oscilações perigosamente grandes. Ou seja, se uma estrutura for submetida a uma força externa cuja frequência coincida com uma das frequências naturais da estrutura, mesmo que seja aplicada uma força de excitação minimamente baixa, a amplitude de oscilação atingirá valores elevados e poderá causar desconforto ou até levar a estrutura ao colapso.

O risco de ressonância pode ser diminuído devido à taxa de amortecimento. Em relação à classificação de vibração como amortecida ou não amortecida, Rao (2008) afirma que se nenhuma energia for perdida ou dissipada por atrito ou outra resistência durante a oscilação, a vibração é considerada como não amortecida. Todavia, se qualquer energia for dissipada, a vibração é denominada como amortecida.

Ainda sobre amortecimento, segundo Cossolino e Pereira (2010)

“O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica, sendo particularmente sensível à presença de trincas e micro trincas. É o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada (principalmente pela geração de calor e/ou energia). O amortecimento determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação.”

Assim sendo, o amortecimento absorve a vibração a cada ciclo, reduzindo a amplitude máxima das vibrações na ressonância. Portanto, quanto maior o amortecimento e as frequências naturais de uma estrutura, menor o risco de ressonância (Figura 2.10).

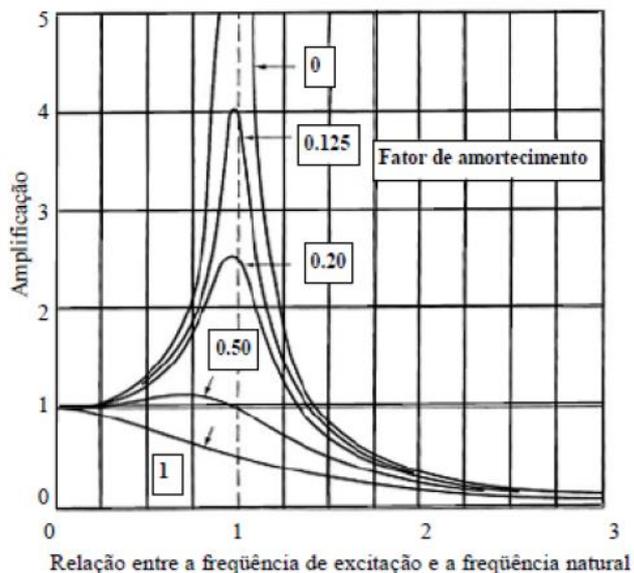


Figura 2.10 – Amplitude de Ressonância (adaptado de MAST (2001))

Além da aplicação clássica nas estruturas em engenharia civil (devido à importância do amortecimento para a integridade de estruturas no caso de abalos sísmicos), a caracterização do amortecimento também vem sendo empregada no estudo de concretos para a avaliação do dano e presença de fissuras. (COSSOLINO E PEREIRA, 2010).

Analisa-se o aumento do amortecimento devido ao atrito entre as paredes das fissuras. Dessa forma, com a existência de fissuras há o aumento do amortecimento e uma diminuição das frequências naturais do corpo.

Menores frequências naturais de um corpo na presença de fissuras também podem ser justificadas devido à diminuição da rigidez do material.

A existência de fissuras nos blocos vazados de concreto para alvenaria deve ser evitada, a presença delas diminui as frequências naturais do sistema, e alterando o número de modos de vibração, por consequência aumentando o risco da estrutura entrar em ressonância quando excitado por forças (ou frequências) externas de menor magnitude, além de prejudicar o assentamento da alvenaria e causar patologias (fissuras na alvenaria) devido à concentração de tensões em pontos específicos da estrutura, podendo – nos casos críticos – levar a estrutura ao colapso.

Uma das formas de caracterizar blocos vazados de concreto para alvenaria estrutural é por meio da análise da resposta acústica obtida em

ensaios não destrutivos baseados na Técnica de Excitação por Impulso combinados com a Espectroscopia de Ultrassom Ressonante.

2.4. Ensaios não destrutivos

Os ensaios considerados como não destrutivos são aqueles que após a sua realização, não provocam danos significativos no elemento ensaiado ou há apenas pequenos danos para serem reparados. Tais ensaios não geram resíduos, podendo ser realizados por diversas vezes em uma única amostra, apresentando a principal característica de não provocar perda na capacidade resistente do elemento.

Os ensaios não destrutivos são usualmente utilizados para a determinação das propriedades elásticas de um material, mas também é possível utilizá-los com o intuito de estimar a qualidade, o grau de deterioração e as propriedades mecânicas de uma estrutura em concreto. (SOARES, 2013).

Existem vários tipos de métodos experimentais não destrutivos, como por exemplo: Eco-impacto; Martelo ou Esclerômetro de Schmidt; métodos à base de ultrassom; métodos que utilizam a frequência de ressonância; métodos magnético-elétricos; técnicas de termografia infravermelha; métodos de emissão acústica e resistividade com medição local elétrica. (MORADIAN & HOSSEINI, 2015).

A Tabela 2.3 apresenta alguns tipos de ensaios não destrutivos encontrados na literatura, explicando de maneira sucinta seus princípios e aplicações:

Tabela 2.3 – Descrição dos princípios e aplicações dos diferentes tipos de NDT's (adaptado de JULIANI, 2014)

Métodos	Princípios	Aplicações
Esclerometria	Aplicar um impacto na superfície do concreto através de uma massa com uma dada energia cinética.	Medir a dureza do concreto e correlacionar com a resistência.
Ensaio de arrancamento (Pullout, Break-Off e Pull-Off)	Medir a força necessária para extirpar corpos metálicos incorporado no concreto fresco.	Determinar a resistência do concreto nas primeiras idades e determinar o melhor momento para a desforma.
Método da maturidade	Medir o histórico de temperatura do concreto fresco.	Acompanhar o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais do concreto combinando os efeitos de tempo e temperatura, podendo-se ter uma base de quando retirar as fôrmas e escoras.
Resistência à penetração	Determinar a profundidade de penetração de sondas.	Determinar a medida de rigidez ou resistência à penetração e correlacionar com sua resistência através das curvas de calibração.
Frequência de Ressonância e Eco-Impacto	Excitar o corpo de prova e determinar suas frequências naturais, correlacionando com o módulo de elasticidade dinâmico e densidade.	Ao longo do tempo identifica-se deteriorações e corrosões do concreto.
Métodos Magnéticos	Aparelhos que se baseiam no princípio de que a presença do aço afeta um campo eletromagnético.	Determinar a localização e posicionamento da armadura, informando cobertura e diâmetro.
Métodos Elétricos	Mudanças nas propriedades (resistência elétrica e de polarização), e constante dielétrica do concreto.	Determinar o teor de umidade no concreto espessuras das lajes e pavimentos e corrosão de armaduras.
Métodos Nucleares	Medir a intensidade da radiação eletromagnética (raios γ) que passa pelo concreto.	Avaliar a densidade do concreto.
Termografia Infra-Vermelho	Baseado na condição de que vazios e fissuras possuem baixa condutividade térmica, assim, quando o calor passa em regiões de falhas, o fluxo de calor causa diferenças localizadas no elemento de concreto.	Utilizada para detectar anomalias em camadas inferiores da superfície do elemento de concreto, vazios internos e fissuras.
Radar de ondas curtas	Propagação de ondas eletromagnéticas pelo concreto.	Detectar danos e vazios no concreto, determinar a umidade do concreto e espessura de pavimentos.
Emissão Acústica	Emissão de ondas elásticas transientes geradas através da liberação de energia causada por uma fonte em um material, por exemplo, uma ocorrência de fissura.	Conhecer a estrutura interna do elemento e como se modifica ao aumentar os danos causados pelo carregamento e determinar a integridade do elemento ou estrutura.

Para Moradian & Hosseini (2015), alguns desses métodos foram empregados para avaliar a condição das estruturas de concreto com diferentes níveis de resultados. Na prática, o martelo de Schmidt e os testadores ultrassônicos de velocidade de pulso são os mais utilizados. O método Eco-Impacto (EI – Eco Impacto) tem sido freqüentemente usado para avaliar a integridade das estruturas de concreto.

“A técnica de teste IE é um método de onda de tensão, que usa energia mecânica para transmitir ondas de som no concreto. Uma análise espectral das ondas P refletidas (de interfaces internas ou limites externos) é então realizada para determinar as características internas do concreto nessa área. A chegada dessas ondas refletidas na superfície é registrada por um transdutor de recepção. Quando o material é tensionado com uma carga aplicada de curta duração, as ondas de tensão se propagam através do material a uma velocidade determinada. Essa velocidade é uma característica do material em que as ondas se propagam. Quando uma superfície de concreto é impactada, um transdutor montado na mesma superfície de concreto recebe as respostas da onda longitudinal de descontinuidades dentro do concreto.” (MORADIAN & HOSSEINI, 2015).

Outro método baseado no mesmo princípio da propagação de ondas é a Técnica de Excitação por Impulso.

2.4.1. Excitação por Impulso & Módulo de Elasticidade do Material dos blocos

Esta técnica é normatizada pela ASTM E1876 (2015) - *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*.

A ASTM E1876 (2015) se baseia em outras normas americanas para materiais específicos como: a C623 que trata de materiais cerâmicos, a C747 que trata sobre materiais em carbono e grafite, e outros.

A norma que trata sobre amostras em concreto é a ASTM C215 (2014) - *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*.

A Técnica de Excitação por Impulso, ou TEI, é descrita pela ASTM E1876:2015 como um método de teste capaz de determinar as propriedades elásticas dinâmicas de materiais elásticos à temperatura ambiente (ou em temperaturas criogênicas e altas com modificações adequadas no equipamento e nos cálculos para compensar a expansão térmica).

A ASTM E1876:2015 afirma que o módulo de elasticidade dinâmico é determinado usando a frequência de ressonância com o modo de vibração, seja de flexão ou longitudinal. O módulo de cisalhamento dinâmico é

encontrado usando a frequência natural associada ao modo de vibração torsional. O módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de cisalhamento dinâmico são usados para calcular a razão de Poisson.

Essas propriedades elásticas dinâmicas – como o módulo de elasticidade dinâmico transversal, longitudinal ou módulo de rigidez – podem ser calculadas se for possível medir a massa, as frequências de ressonância e a geometria da amostra (de forma retangular ou cilíndrica).

Deve-se destacar, todavia, que o módulo obtido na Técnica de Excitação por Impulso é dinâmico e, portanto, as relações disponíveis na ABNT – NBR 6118:2014 entre módulo de elasticidade e resistência a compressão, fazem referência ao módulo de elasticidade estático, portanto o resultado obtido com a TEI para o módulo de elasticidade ainda deve ser ajustado.

Mehta & Monteiro (1994) afirmam que é possível se encontrar o módulo de elasticidade dinâmico majorando o módulo estático em cerca de 20%, 30% e 40% variando respectivamente entre alta, média e baixa resistência. Logo, com a obtenção do módulo dinâmico também é possível se obter, de modo aproximado, o módulo estático.

A diferença entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico de uma amostra de concreto se dá principalmente pelo fato deste material possuir um caráter viscoelástico, ou seja, seu comportamento varia conforme a taxa de deformação aplicada durante o ensaio. (OTANI & PEREIRA, 2015).

Tal viscoelasticidade se dá devido ao fato do concreto apresentar propriedades mecânicas que apresentam certas características de um material sólido elástico, e outras de um líquido viscoso, apresentando também uma deformação diferida ao longo do tempo.

A taxa de deformação aplicada durante um ensaio dinâmico é sempre superior à aplicada em um ensaio estático, assim como os níveis de deformação aplicados em um ensaio dinâmico são menores. Em função disso, o módulo de elasticidade dinâmico ou será maior ou igual ao módulo obtido a partir de um ensaio quase-estático, aproximando-se do módulo tangente inicial do concreto. (SHKOLNIK, 2008).

Em um ensaio realizado por Shkolnik (2008) sobre a relação entre a taxa de deformação e a curva tensão-deformação de um concreto (Figura 2.13), é

possível perceber que quanto menor a taxa aplicada, maior será o tempo para a acomodação das tensões e menor a inclinação da curva tensão-deformação. E quanto maior a taxa, menor será o tempo para a acomodação e maior a inclinação da curva tensão-deformação.

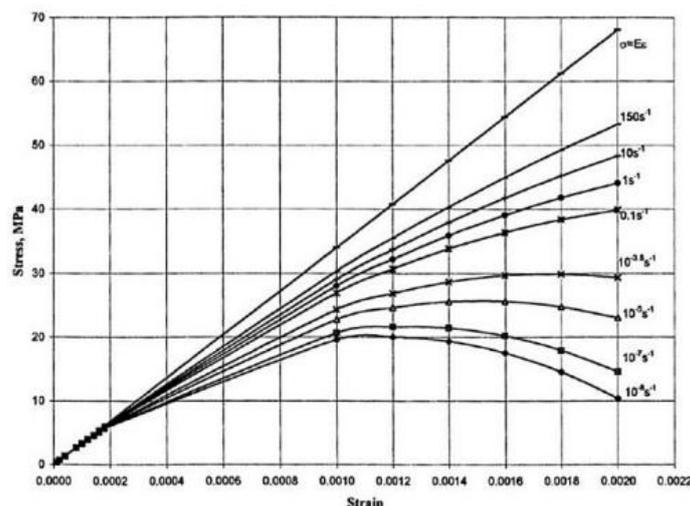


Figura 2.13 – Curvas obtidas a partir de modelos teóricos demonstrando a influência da taxa de deformação nas curvas tensão-deformação de um concreto (SHKOLNIK, 2008).

Assim, feitas as devidas considerações acerca da correlação entre os módulos dinâmico e estático, pode-se determinar o valor dos módulos de elasticidade dinâmico utilizando as equações de Pickett (ASTM C215, 2014), representadas nas Equações 2.1, 2.2 e 2.3.

$$E_{cdt} = C.M.n^2 \quad \text{Eq. 2.3}$$

Sendo:

E_{cdt} = módulo de elasticidade dinâmico transversal, em Pascal;

M = massa da amostra, kg;

n = frequência transversal fundamental, Hz;

C = $1,6067(L^3T/d^4), m^{-1}$ para amostra cilíndrica / $0,9464(L^3T/bt^3), m^{-1}$ para

amostra prismática;

L = comprimento da amostra, metros;

d = diâmetro do cilindro, metros;

t, b = dimensões da seção transversal do prisma, metros. Sendo t a altura e b a base do prisma.

T = fator de correção que depende da relação do raio de giração, K (cilindro de $d/4$ e prisma de $t/3,464$), comprimento da espécie L e a taxa de Poisson.

A Figura 2.14 fornece valores para tal fator de correção:

KL	Valor de T^A			
	$\mu = 0.17$	$\mu = 0.20$	$\mu = 0.23$	$\mu = 0.26$
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.01	1.01	1.01	1.01	1.01
0.02	1.03	1.03	1.03	1.03
0.03	1.07	1.07	1.07	1.07
0.04	1.13	1.13	1.13	1.14
0.05	1.20	1.20	1.21	1.21
0.06	1.28	1.28	1.29	1.29
0.07	1.38	1.38	1.39	1.39
0.08	1.48	1.49	1.49	1.50
0.09	1.60	1.61	1.61	1.62
0.10	1.73	1.74	1.75	1.76
0.12	2.03	2.04	2.05	2.07
0.14	2.36	2.38	2.39	2.41
0.16	2.73	2.75	2.77	2.80
0.18	3.14	3.17	3.19	3.22
0.20	3.58	3.61	3.65	3.69
0.25	4.78	4.84	4.89	4.96
0.30	6.07	6.15	6.24	6.34

Figura 2.14 – Valores de fator de correção, T (ASTM C215, 2014)

Já para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal a ASTM C215 (2014) indica:

$$E_{cdL} = D \cdot M \cdot (n')^2 \quad \text{Eq. 2.4}$$

Sendo:

E_{cdL} = módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, em Pascal;

n' = frequência longitudinal fundamental, Hz;

$D = 5,093(L/d^2), m^{-1}$ para cilindro / $4(L/bt), m^{-1}$ para prismático;

Em relação ao cálculo do módulo dinâmico transversal a ASTM C215 (2014) apresenta:

$$G \text{ dinâmico} = B.M.(n'')^2 \quad \text{Eq. 2.5}$$

Com:

$G \text{ dinâmico}$ = módulo dinâmico de rigidez, em Pascal;

n'' = frequência torcional fundamental, Hz;

$$B = (4LR/A), m^{-1}$$

R = fator de forma: 1,0 para cilindro

1,183 para seção transversal de prisma

$$\frac{\left(\frac{a+b}{b}\right)}{\left[\frac{4a}{b} \cdot 2,52 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,21 \left(\frac{a}{b}\right)^6\right]} \text{ para prismas de seção transversal}$$

com a e b sendo as dimensões da seção e $a < b$;

A = área da seção transversal.

2.4.2. Excitação por Impulso & Captador Acústico

A Técnica de Excitação por Impulso pode ser utilizada para se obter as frequências naturais de um elemento por meio da resposta acústica após a amostra em teste ser submetida a um breve impacto.

A Técnica de Excitação por Impulso consiste em excitar o corpo de prova com um leve impulso mecânico (uma pancada ou batida leve) e calcular os módulos de elasticidade (longitudinal, flexional e transversal) e o amortecimento a partir das frequências e da atenuação da resposta acústica, frequências estas que dependem apenas da massa, das dimensões, da geometria e dos módulos de elasticidade dos materiais. (DIÓGENES et al., 2011).

Pereira et al. (2012) explicam a TEI como:

“A Técnica de Excitação por Impulso pode ser entendida como o ato de excitar, através de um leve e breve impacto mecânico, o modo de ressonância flexional e/ou torcional fundamental de uma amostra em formato de barra ou prisma, e em calcular os módulos elásticos dinâmicos empregando as equações de Pickett a partir das frequências encontradas na resposta acústica, das dimensões e da massa da amostra. Através do valor da frequência natural do sistema, pode-se encontrar o módulo estático de deformação do material e estimar o valor do módulo dinâmico, para posterior determinação do módulo de elasticidade e a resistência à compressão de concreto.”

Para concretos, cabe notar, que a estimativa do módulo de elasticidade longitudinal, possibilita estimar a sua resistência à compressão. O inverso é frequentemente realizado objetivando o desenvolvimento de projetos de estruturas de concreto armado, ou seja, o módulo de elasticidade é uma função da resistência à compressão característica do concreto, conforme indicado na ABNT- NBR 6118 (2014).

Aplicado a concretos, a Norma americana ASTM C215 (2014) fornece orientações para o experimento (Figura 2.11), a fim de determinar a frequência de ressonância fundamental transversal, longitudinal e torcional de prismas e cilindros de concreto, para aquisição do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, do módulo de elasticidade dinâmico flexional, do módulo de elasticidade dinâmico transversal e da razão de Poisson dinâmica.

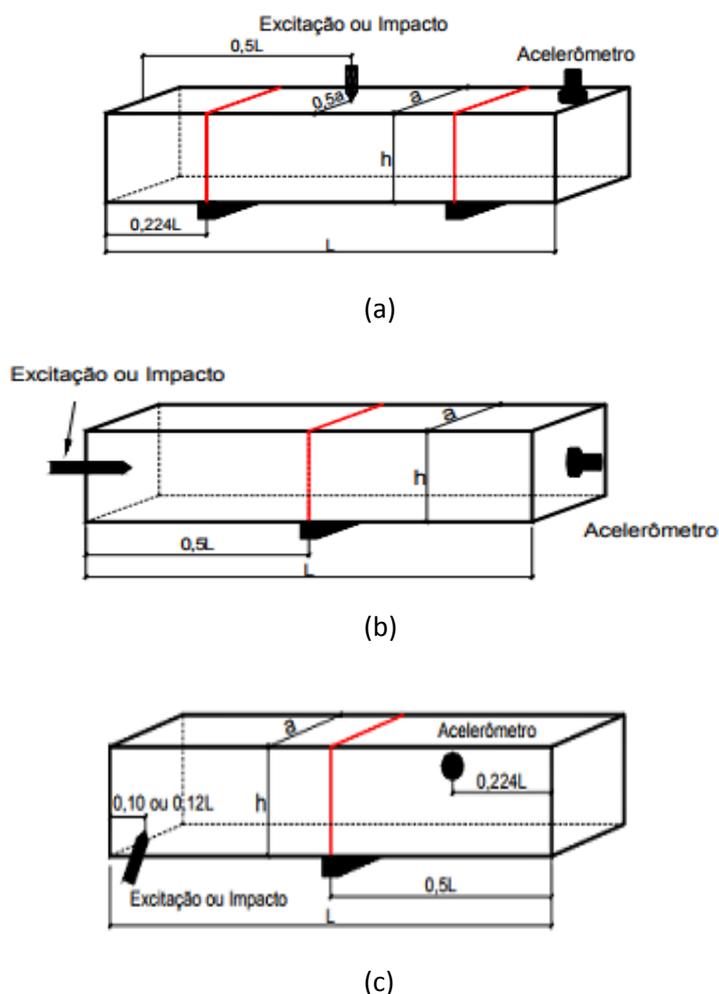


Figura 2.11 – Aparato experimental para obtenção da frequência de ressonância: (a) fundamental transversal, (b) longitudinal e (c) torcional (adaptado de ALMEIDA, 2005)

Conforme pode ser percebido da análise da Figura 2.11, no experimento recomendado pela ASTM C215 (2014), após uma força externa (pancada) excitar um corpo em um ou mais modos, sensores piezoelétricos, como por exemplo, microfone, acelerômetro ou outro tipo de transdutor, captam o sinal mecânico originado pelas vibrações e o transformam em um sinal mensurável na forma de espectro.

É importante que a ponta do instrumento que cause o impacto seja de metal ou plástico rígido, de modo que as frequências do mesmo não alterem a resposta da amostra. A amostra deve estar apoiada de um modo que possa vibrar livremente, os apoios devem estar posicionados de acordo com a ASTM C215 (2014), a depender do tipo de frequência que se deseja captar.

A tradução da resposta vibracional do corpo no domínio da frequência é apresentada na forma de um espectro, onde cada pico corresponde a uma frequência natural (Figura 2.12). Desta forma pode ser possível identificar a variação das propriedades mecânicas da amostra por meio da comparação dos espectros em diferentes condições de utilização, idade ou nível de danificação.

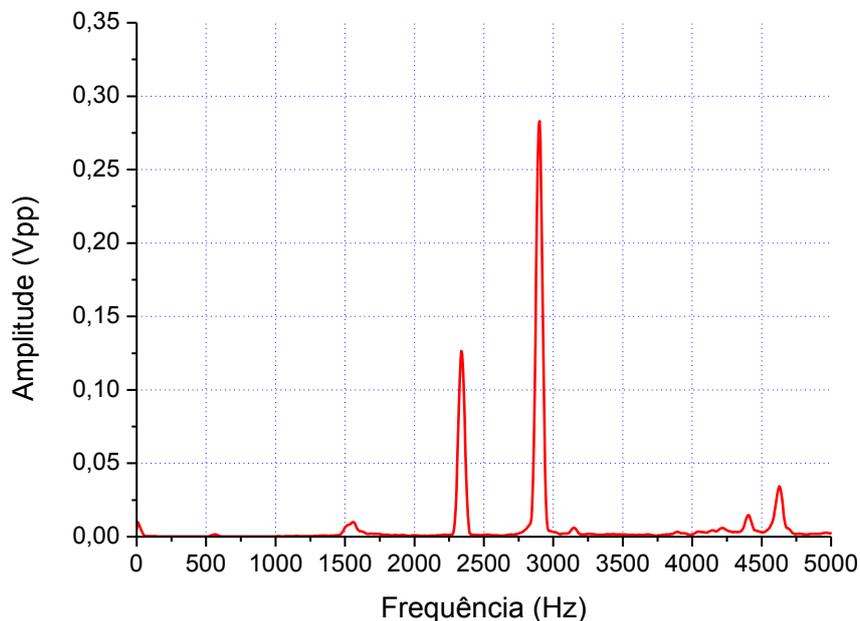


Figura.2.12 – Exemplo de um espectro de resposta

Por fim, cabe comentar que apesar de a Técnica de Excitação por Impulso ser utilizada até então prioritariamente em corpos maciços prismáticos,

avalia-se sua aplicabilidade em amostras prismáticas vazadas, considerando que sua aplicabilidade em discos vazados é uma realidade.

2.4.3. Excitação por Impulso & Acelerometria

As frequências naturais de um corpo na Técnica de Excitação por Impulso geralmente são captadas por meio de transdutores. Transdutores são dispositivos capazes de transformar um tipo de sinal em outro para permitir o controle de processos físicos ou realizar uma medição.

Almeida (2004)⁶ afirma que na análise experimental de estruturas, normalmente, são empregados aparelhos mecânicos (relógios comparadores e extensômetros), elétricos (resistivos, indutivos e acelerômetros), acústicos (transdutores de corda vibrante) e ópticos (mira telescópica e interferometria a laser) para medida dos movimentos.

Os transdutores devem ser sensíveis à presença, magnitude e variação de um dado a ser mensurado, convertendo uma forma de energia em outra, e assim, proporcionando a saída de um sinal elétrico a ser lido por um leitor.

Os transdutores piezoelétricos (Figura 2.15) possuem sensores baseados em cristais piezoelétricos e tem sido bastante utilizados para a determinação da presença de fissuras em estruturas.

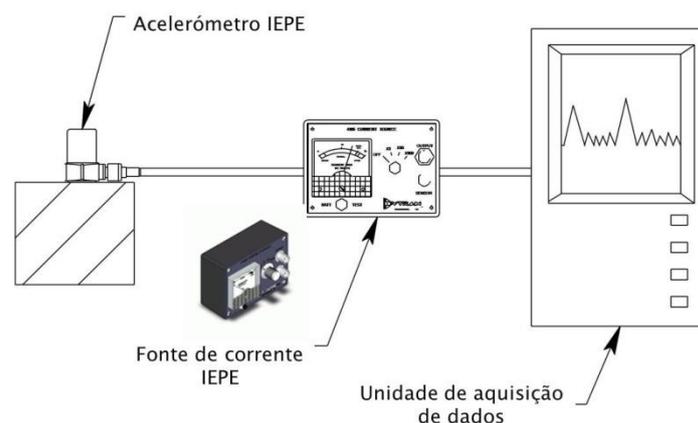


Figura 2.15 – Acelerômetro piezoelétrico (dBWave.i e Grupo ISQ)⁷

⁶ Informação fornecida nas notas de aula da disciplina de Análise Experimental de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

⁷ Visita ao site <https://www.dbi.pt/> em 28 de fev de 2018.

Segundo descrição do acelerômetro piezoelétrico da empresa dBWave.i Acoustic Engineering do Grupo ISQ⁸, ele também é comumente utilizado para a realização de análises modais, controle de qualidade, determinação das frequências naturais, avaliação da integridade da estrutura, e outros.

Os sistemas de aquisição de dados voltados para captação de vibrações são geralmente compostos por uma placa condensadora de sinal, acoplada a um computador, um acelerômetro piezoelétrico (entrada) e um excitador (saída), como por exemplo, um martelo de impacto.

Em informação fornecida pela empresa dBwave.i do Grupo ISQ que detém a linha de produção de acelerômetros piezoelétricos da linha dB.i⁹, algumas características têm tornado o uso desse tipo de transdutor atrativo, tais como: baixo custo de seu sistema de instrumentação e controle; maior relação entre sinal e ruído; leveza; larga gama de frequência; condicionamento de sinal simples, e outras.

Comparando a utilização de transdutores piezoelétricos acoplados, ou seja, acelerômetros, com transdutores não acoplados, a exemplo microfones, permite-se inferir que resposta captada com os acelerômetros seja mais precisa, uma vez que eventuais ruídos do ambiente não interferirão na resposta.

2.4.4. Espectroscopia de Ultrassom Ressonante

De posse dos espectros da resposta obtida via Técnica de Excitação por Impulso, seja quando da utilização de captadores acústicos, seja de acelerômetros, é possível realizar uma análise espectral de uma amostra tido como conforme, ou seja, que não apresenta falhas como: descontinuidades; trincas e fissuras, e que possui as dimensões, geometrias e características mecânicas especificadas em norma.

A análise do espectro da resposta de um número significativo de amostras conformes permite estabelecer o que a ASTM E2001 (2013) denomina de **espectro padrão**.

⁸ Informação fornecida em consulta ao site <https://www.dbi.pt/> em 04 de mai de 2018.

⁹ Informação fornecida em consulta ao site <https://www.dbi.pt/> em 04 de mai de 2018

Tal metodologia de ensaio é conhecida como espectroscopia de ultrassom ressonante, ou RUS (*Resonant Ultrasonic Spectroscopy*).

A norma americana ASTM E2001 (2013)– *Standard guide for Resonant Ultrasound Spectroscopy for Defect Detection in Both Metallic and Non-Metallic Parts*, fornece um guia padrão para detecção de falhas em materiais por meio da RUS.

A RUS detecta e avalia as variações e propriedades mecânicas de um objeto em teste, onde uma parte rígida é obrigada a ressoar, tendo assim suas ressonâncias comparadas a uma ressonância previamente padronizada. Ou seja, os defeitos são detectados com base nas mudanças e variações dos padrões de ressonâncias previamente obtidos por meio de espectros empiricamente aceitáveis. Com base nessa comparação (Figura 2.16), a peça é julgada como sendo aceitável ou não.

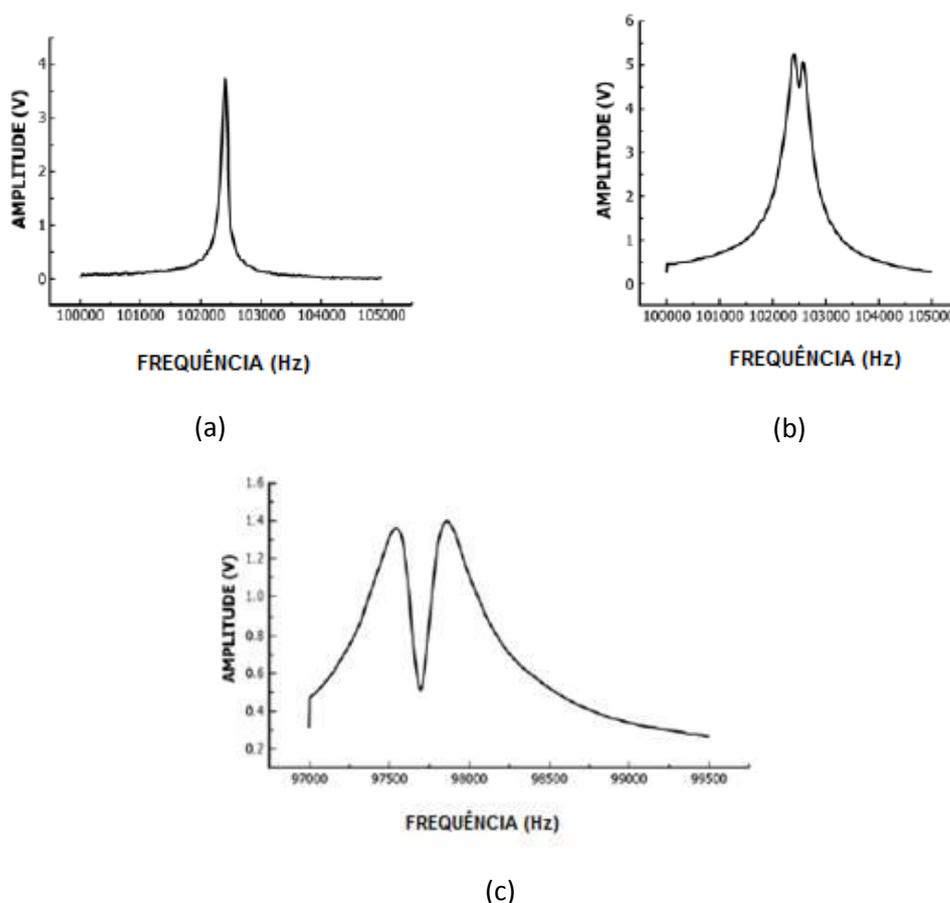


Figura 2.16 – Espectros de cilindros de aço: (a) Espectro ressonante de um cilindro de aço aceitável; (b) Espectro ressonante de um cilindro de aço com um pequeno defeito; (c) Espectro ressonante de um cilindro de aço com grande defeito. (adaptado da ASTM E2001, 2013).

A ASTM E2001 (2013) afirma que embora as técnicas baseadas na Espectroscopia de Ultrassom Ressonante não forneçam a localização exata de uma anomalia dentro de um corpo, elas são muito eficazes em medir todas as ressonâncias, em uma faixa definida da peça, em vez de procurar por defeitos individuais.

A ASTM E2001 (2013) ainda afirma que em uma única medição, é possível averiguar a existência de vários defeitos, como: fissuras, lascas, vazios, óxidos, contaminantes, variações de dimensão, dureza, porosidade, entre outros.

Contextualizando a Espectroscopia de Ultrassom Ressonante com a proposta do presente estudo, pode-se inferir que o método consiste claramente da comparação entre os espectros obtidos em um bloco de concreto para alvenaria estrutural íntegro e um bloco de concreto apresentando fissuras.

CAPÍTULO 3

Análise Numérica

3.1. Generalidades

Na engenharia civil, todo e qualquer tipo de estrutura está sujeita a ações dinâmicas. Diógenes (2010) afirma que ação dinâmica é aquela que varia no tempo, seja em sua magnitude, direção ou posição. Esta variação introduz na estrutura acelerações e velocidades, além de deslocamentos, gerando como consequência forças de inércia e de amortecimento.

Para Borges (2006), existem técnicas de avaliação de desempenho e integridade dos sistemas estruturais através da modelagem envolvendo análises detalhadas, buscando definir modelos capazes de representar adequadamente não só o comportamento estático do sistema físico, mas também o seu comportamento dinâmico estrutural.

A análise dinâmica das estruturas pode ser realizada tanto de forma experimental como analítica. O modelo numérico está usualmente associado à concepção de novos projetos estruturais e à averiguação da segurança de grandes estruturas que apresentam um risco potencial significativo.

Com o avanço da tecnologia surgiram programas computacionais que permitiam analisar previamente o comportamento de uma estrutura diante das ações dinâmicas. Essa análise teórica se dá por meio da modelagem numérica via análise modal, que aliada ao Método dos Elementos Finitos, pode fornecer soluções para estruturas inclusive de alta complexidade.

Nóbrega (2004) afirma que a análise modal é o processo constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo, a fim de determinar os seus parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento modal).

Em casos onde não é possível realizar o modelo experimental (análise modal experimental), podem-se determinar os parâmetros modais

teoricamente, ou, caso ele exista, a abordagem numérica (análise modal teórica) pode servir para verificação e dos resultados experimentais.

Nesse sentido a análise modal numérica realizada nesta dissertação realizado por meio do programa ANSYS® visou fornecer de forma qualitativa, o comportamento dos blocos de concreto vazados para alvenaria estrutural frente a uma ação dinâmica (breve impacto na parede transversal).

Dessa forma, foi possível avaliar o espectro padrão encontrado experimentalmente via Técnica de Excitação por Impulso, estimando as frequências naturais e os modos de vibração das unidades de alvenaria associados aos picos mais relevantes presentes nos espectros.

3.2. Descrição dos modelos e parâmetros das análises

Como visto, um dos objetivos específicos do trabalho proposto é de testar a eficácia da Técnica de Excitação por Impulso e da Espectroscopia de Ultrassom Ressonante em peças vazadas, estabelecendo um espectro padrão para blocos de concreto vazados para alvenaria estrutural com resistências à compressão de 4 MPa das famílias M-15 e M-20.

Para o estabelecimento desse espectro padrão, foram realizados ensaios experimentais via Técnica de Excitação por Impulso para obtenção das frequências naturais dos blocos (Capítulo 4) e análises modais numéricas para avaliar teoricamente essas frequências de ressonância encontradas experimentalmente, e assim ser possível realizar no futuro, a metodologia da Espectroscopia de Ultrassom Ressonante.

A modelagem dos blocos de concreto se deu por meio do programa ANSYS®, com a utilização do SOLID65, sendo este um modelo constitutivo elástico, com módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson definidos.

Para estimativa do módulo de elasticidade para a modelagem dos blocos de concreto, foi necessário determinar preliminarmente o módulo de elasticidade do concreto que compunha os blocos vazados ensaiados a partir da extração de testemunhos prismáticos dos blocos, conforme descrito no Capítulo 4. A estimativa do módulo de elasticidade foi ensaiada experimentalmente por meio do programa no Sonelastic®.

Diante disso, foi realizada a modelagem numérica do prisma da família M-15 (Figura 3.1) e do prisma da família M-20 via ANSYS®.

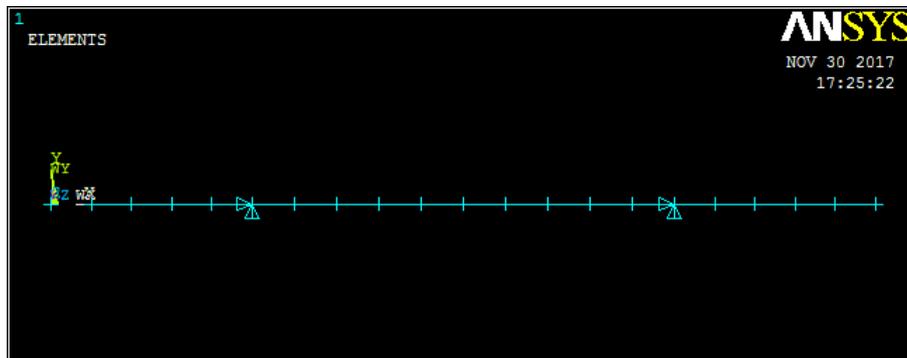


Figura 3.1 – Modelagem do prisma retirado da parede transversal do bloco da família M-15 para avaliar teoricamente o módulo de elasticidade do material

O elemento finito escolhido para modelagem dos prismas foi o BEAM188 (Figura 3.2). Tal elemento de barra é indicado para analisar estruturas de delgadas a moderadamente espessas.

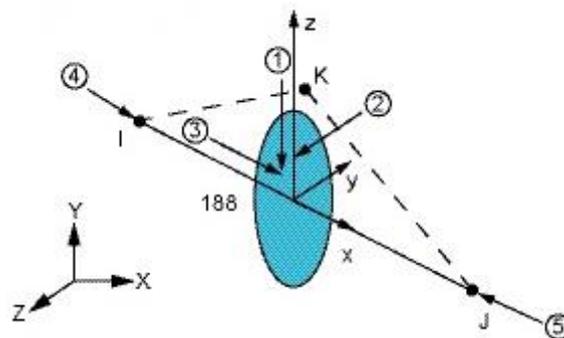


Figura 3.2 – Elemento finito de barra BEAM188 (ANSYS RELEASE 14.0 (2018))

Ele se baseia na viga de Timoshenko, portanto as deformações por cortante são consideradas. Possui seis graus de liberdade por nó e interpolação linear dos deslocamentos. Atualmente é o elemento finito *default* do ANSYS® para a análise de barras.

As condições de contorno seguiram o ensaio experimental, que por sua vez se baseou na Norma americana ASTM C215: 2014.

Os apoios foram colocados a $0,244xL$ (pontos nodais de uma viga bi-apoiada), conforme a excitação do módulo transversal (Figura 2.11 (a)).

As propriedades consideradas na modelagem dos prismas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades dos prismas para modelagem*

	Prisma I (M-15)	Prisma I (M-20)
Largura (m)	0,030	0,032
Altura (m)	0,031	0,034
Comprimento (m)	0,189	0,187
Peso específico (Kg/m³)	1.900	1.900
Módulo de Elasticidade (GPa)	8,28	10,41
Poisson	0,2	0,2

*Experimentos descritos no Capítulo 4 e resultados no Capítulo 5.

A segunda e terceira modelagem trataram sobre as modelagens dos blocos da família M-15 e M-20 para obtenção das frequências naturais e dos seus respectivos modos de vibração.

Diante disso, as análises modais numéricas para obtenção das frequências naturais e modos de vibração foram realizadas em dois modelos representativos em 3D, sendo um bloco vazado de concreto para alvenaria estrutural da família M-15 e outro da família M-20, com expectativa de resistência à compressão de 4,0 MPa (Figura 3.3).

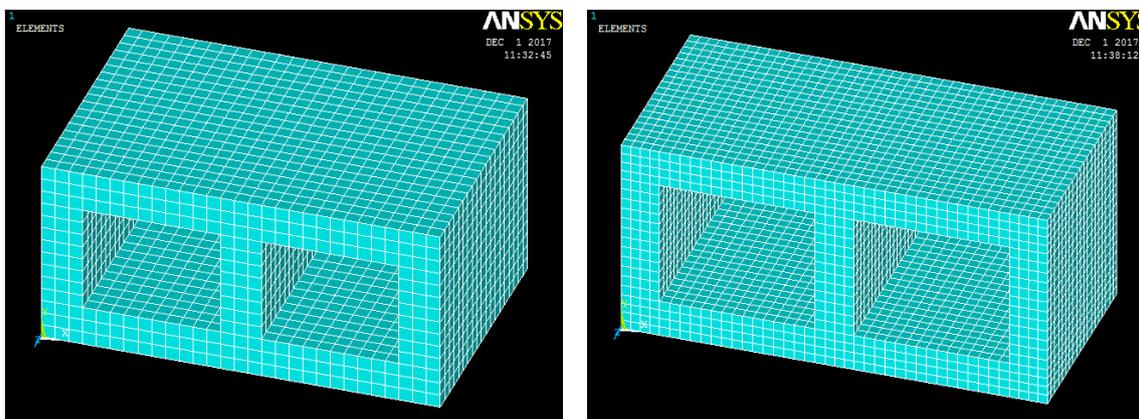


Figura 3.3 – Modelagem numérica via ANSYS® dos blocos da família M-15 e M-20, respectivamente.

Em relação ao tamanho da malha de elementos finitos, foi estabelecido um tamanho máximo de 1 cm para a maior dimensão do elemento finito. Dentre os métodos de extração modal disponíveis no ANSYS® o escolhido foi o que faz uso do algoritmo *Block Lanczos*. Ressalta-se ainda que toda a modelagem

foi desenvolvida dentro do regime linear, considerando o concreto como um material homogêneo e isotrópico.

Por fim, os processos envolvidos na criação dos modelos numéricos desenvolvidos na presente dissertação foram:

- I. Definição dos elementos finitos;
- II. Definição das propriedades dos materiais;
- III. Definição da geometria;
- IV. Geração da malha de elementos finitos
- V. Definição das condições do contorno
- VI. Escolha do tipo de análise e parâmetros da análise;
- VII. Solução e posterior visualização e análise dos resultados.

Em relação aos parâmetros geométricos para a modelagem dos blocos da família M-15 e da família M-20, os modelos se basearam nos blocos coletados, que obedeceram ao padrão de conformidade normativo.

Em relação às espessuras da parede, cabe ressaltar a simplificação do modelo quanto a diferença entre espessuras da base e do topo. A fim de simplificar a modelagem, a espessura delas foi definida com uma média de 3,0 cm para blocos M-15 e 3,5 cm para blocos M-20.

Desta forma o modelo de sólido dos blocos foi desenvolvido dentro do ANSYS utilizando o elemento finito SOLID65. O SOLID65 é um elemento finito isoparamétrico de 4 nós por face com interpolação linear dos deslocamentos.

Tabela 3.2 – Propriedades dos blocos vazados para modelagem

	Bloco M-15	Bloco M-20
Largura (m)	0,14	0,19
Altura (m)	0,19	0,19
Comprimento (m)	0,29	0,39
Espessura de parede (m)	0,03	0,035
Peso específico (Kg/m³)	1.900	1.900
Elasticidade (GPa)	7,24	11,84
Poisson	0,2	0,2

As condições de contorno na modelagem foram as mesmas das realizadas na Técnica de Excitação por Impulso para a excitação longitudinal,

ou seja, apoio na metade do comprimento do bloco, conforme demonstrado na Figura 3.4.

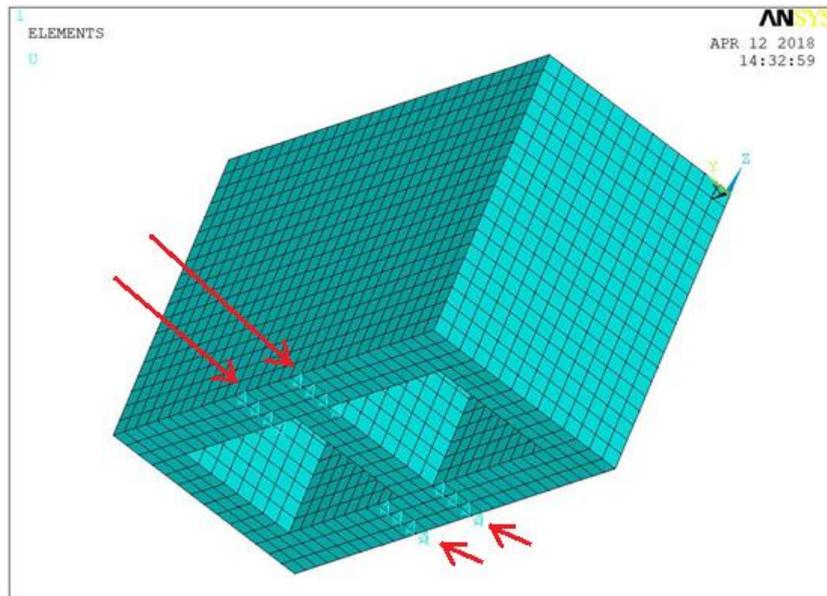


Figura 3.4 - Condições de contorno do bloco de concreto vazado de 140mm x 190mm x 290mm

Os resultados da modelagem tanto dos prismas quanto dos blocos serão apresentados e analisados no Capítulo 5.

CAPÍTULO 4

Programa Experimental

4.1. Generalidades

O programa experimental desta pesquisa é composto por quatro etapas:

- Primeira etapa – Corresponde a etapa de coleta e avaliação visual da conformidade dos blocos, além da extração dos testemunhos prismáticos para a determinação da estimativa do módulo de elasticidade do concreto utilizado nos blocos, para uso na modelagem numérica.
- Segunda etapa – Corresponde à realização da Técnica de Excitação por Impulso tanto nos prismas extraídos das paredes dos blocos com o intuito de estimar o módulo de elasticidade do material concreto, quanto nos blocos vazados de concreto para alvenaria estrutural com o objetivo de captação das frequências naturais para caracterização e aferição das suas qualidades.
- Terceira etapa – Corresponde à utilização do método da Espectroscopia de Ultrassom Ressonante. Esse método é utilizado com a realização de uma análise comparativa entre os espectros encontrados experimentalmente na segunda parte do programa experimental e as frequências naturais e os modos de vibrações fornecidos com a análise modal numérica via ANSYS®.
- Quarta etapa – Essa etapa corresponde aos ensaios à compressão realizados em todos os blocos conformes de concreto de ambas as famílias, e não conformes selecionados. Suas respectivas resistências à compressão foram determinadas a fim de se tentar correlacionar os espectros dos blocos.

4.2. Primeira etapa – coleta, classificação e caracterização do material do bloco

Primeiramente houve a coleta dos blocos de concreto com a empresa Interblock, localizada na cidade de Alhandra, no Estado da Paraíba. Os blocos foram entregues na Universidade Federal da Paraíba, onde todos os ensaios foram realizados.

Os blocos da família M-15 foram fabricados no dia 30/06/2017, pertenceram ao lote 2017063000 e apresentaram $f_{bk,est}$ de 4,65MPa segundo ensaios realizados pela própria Interblock.

Os blocos da família M-20 apresentaram data de fabricação no dia 04/08/2017, pertenceram ao lote BE2017080400 e apresentaram $f_{bk,est}$ de 4,36 MPa segundo ensaios realizados pela própria Interblock.

Os ensaios ocorreram a partir do dia 02/09/2017, ou seja, os ensaios foram realizados de acordo com as exigências da ABNT 6136:2016, que estabelece um prazo mínimo de 28 dias para realização de ensaios em blocos separados para corpos de prova.

O traço foi calculado pela Interblock a fim de se atingir uma resistência à compressão característica de no mínimo 4 MPa.

A amostra chegou ao destino paletizada (Figura 4.1) como exige a ABNT 6136:2016. Alguns blocos sofreram grandes fraturas durante o transporte, o que impossibilitou a realização dos ensaios.



Figura 4.1 – Blocos da família M-20 paletizados para transporte

A fim de obter uma representação estatística, a amostra foi definida muito além da exigida pela ABNT 6136:2016 para quantidade de blocos por lote para realização de ensaios.

Foram solicitados no total de 100 blocos de concreto simples vazado. Dentre eles, 50 da família M-15, com dimensões nominais de 140x190x290 mm e 50 da família M-20, com dimensões nominais de 190x190x390 mm.

De cada família pediu-se que metade da amostra fosse de blocos visualmente intactos e a outra metade de blocos que não estavam de acordo com as exigências da NBR 6136:2016 e apresentavam algum tipo de característica que impossibilitasse a aplicação em obra como: fissuras, fraturas ou descontinuidades. Após algumas perdas durante o transporte, contabilizou-se 88 blocos, com 46 da família M-15 e 42 da família M-20.

Os blocos foram separados de acordo com a família as quais pertenciam (família M-15 – denominados como blocos pequenos, e família M-20 – denominados como blocos grandes) e conformidade (Tabela 4.1).

Em relação às conformidades, eles foram divididos entre conformes e não conformes: os conformes não possuíam nenhum problema aparente (BPC e BGC) e os blocos não conformes (BPNC e BGNC) apresentaram algum tipo de fissura ou fratura.

Tabela 4.1 – Quantidade de blocos para realização dos ensaios

Legenda	Descrição	Quantidade
BPC	Bloco Pequeno Conforme (M-15)	26
BPNC	Bloco Pequeno Não Conforme (M-15)	20
BGC	Bloco Grande Conforme (M-20)	23
BGNC	Bloco Grande Não Conforme (M-20)	19
Total		88 blocos

Após a separação, os blocos foram identificados e numerados. Os lados direito e esquerdo também foram sinalizados para um melhor controle na hora da realização dos ensaios da Técnica de Excitação por Impulso. A Figura 4.2 ilustra a fase de identificação dos blocos conformes da família M-20:



Figura 4.2 – Identificação de blocos conformes da família M-20

Houve variados graus de não conformidades, com diferentes fissuras, profundidades e em diversos locais das paredes dos blocos. Diante de tais variações, após a numeração, os blocos foram divididos entre: os que apresentaram danos quase imperceptíveis (microfissuras), os que apresentaram pequenos danos (fissuras um pouco mais perceptíveis) e outros com grandes danos (pequenos desacoplamentos). (Tabela 4.2).

Essa divisão se deu para facilitar a leitura dos picos de frequência apresentados nos espectros dos blocos ensaiados, correlacionando-os com o nível de dano sofrido e, se possível, analisar como tais danos podem alterar a rigidez do bloco.

Tabela 4.2 – Não conformidades nos blocos de concreto

Danos	Blocos família M-15	Blocos família M-20
Danos quase imperceptíveis	BPNC 02, 07, 09, 11, 12 e 17	BGNC 06 e 11
Pequenos danos	BPNC 01, 03, 06, 14, 16 e 21	BGNC 02, 04, 05, 15, 16, 17, 18 e 19
Grandes danos	BPNC 04, 05, 08, 13, 18, 19, 20 e 22	BGNC 01, 03, 07, 08, 09, 12, 13, 14 e 20

Ilustra-se na Figura 4.3 as não conformidades aparentes nos blocos da família M-15. Ao passo que na Figura 4.4 são apresentadas as não conformidades nos blocos da família M-20.

**BLOCO 01**

Apresentou uma pequena fissura na parede longitudinal frontal, lado direito.

**BLOCO 02**

Apresentou pequena abertura superficial na parede longitudinal da parte traseira, lado direito. Tal fenda se deu pela presença de uma pequena raiz.

**BLOCO 03**

Apresentou uma fissura razoavelmente perceptível em toda a parede longitudinal na parte traseira, lado direito.

**BLOCO 04**

Apresentou fenda muito perceptível até a metade da parede longitudinal frontal, lado direito.

**BLOCO 05**

Apresentou grande desacoplamento entre as paredes longitudinais e transversais do lado esquerdo, tanto na parte de trás como frontal, do topo até a metade do bloco.

Figura 4.3 – Danos apresentados nos blocos da família M-15 (Continua)



BLOCO 06

Apresentou as quinas irregulares e uma pequena fissura na parede longitudinal, lado direito.



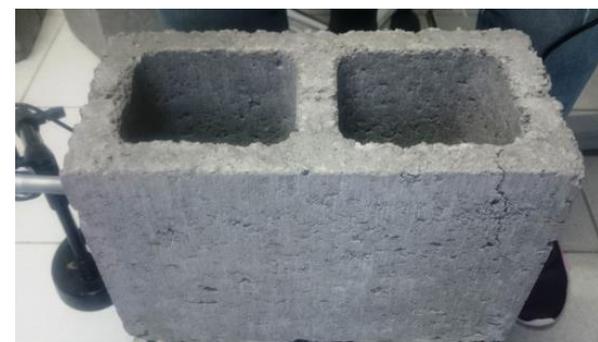
BLOCO 07

Apresentou material não uniforme, com pequena redução de espessura na parte superior das paredes do bloco.



BLOCO 08

Apresentou uma fissura na parede longitudinal frontal e outra igual na parte de trás, lado esquerdo.



BLOCO 09

Apresentou uma microfissura de 8cm de profundidade na parede longitudinal da parte traseira, lado esquerdo.



BLOCO 11

Apresentou uma microfissura na parede longitudinal da parte traseira, do topo a 7cm de profundidade, lado direito.

Figura 4.3 – Danos apresentados nos blocos da família M-15 (Continua)

**BLOCO 12**

Apresentou uma microfissura na parede longitudinal que corta todo o bloco, na parte traseira, lado direito.

**BLOCO 13**

Apresentou desacoplamento na parede longitudinal na parte traseira do bloco que corta quase todo o bloco, lado direito.

**BLOCO 14**

Apresentou fissura levemente perceptível na parede longitudinal frontal que corta quase todo o bloco, lado esquerdo.

**BLOCO 16**

Apresentou uma fissura na parede longitudinal que corta quase todo o bloco, tanto na parede frontal como na parede de trás, lado direito.

**BLOCO 17**

Apresentou uma microfissura de 5cm de profundidade da parede longitudinal frontal, lado direito.

Figura 4.3 – Danos apresentados nos blocos da família M-15 (Continua)



BLOCO 18

Apresentou fissura altamente perceptível na parede longitudinal frontal, do topo até metade do bloco, lado esquerdo.



BLOCO 19

Apresentou uma fissura na parede longitudinal muito perceptível que corta todo o bloco, tanto na parede frontal como na parede de trás, lado esquerdo.



BLOCO 20

Apresentou uma fissura na parede longitudinal muito perceptível que vai do topo até a metade do bloco, tanto na parede frontal como na parede de trás, lado esquerdo.



BLOCO 21

Apresentou uma fissura na parede longitudinal pouco perceptível de 5cm de profundidade, tanto na parede frontal como na parede de trás, lado esquerdo.



BLOCO 22

Apresentou grande descontinuidade na parede longitudinal frontal, lado esquerdo.

Figura 4.3 – Danos apresentados nos blocos da família M-15

A seguir, os danos apresentados nos blocos da família M-20 (Figura 4.4):



BLOCO 01

Apresentou fissura perceptível com 5cm de profundidade na parede longitudinal frontal. Lado esquerdo.



BLOCO 02

Apresentou fissura perceptível com 5cm de profundidade na parede longitudinal na parte de trás. Lado direito.



BLOCO 03

Apresentou fissura perceptível com 5cm de profundidade na parede longitudinal na parte de trás. Lado esquerdo.



BLOCO 04

Apresentou fissura perceptível com 5cm de profundidade na parede longitudinal frontal próximo à parede transversal. Lado esquerdo.

Figura 4.4 – Danos apresentados nos blocos da família M-20 (Continua)

**BLOCO 05**

Apresentou fissura levemente perceptível com 4cm de profundidade na parede longitudinal frontal próximo à parede transversal. Lado esquerdo.

**BLOCO 06**

Apresentou fissura levemente perceptível com 5cm de profundidade na parede longitudinal na parte traseira próximo à parede transversal. Lado esquerdo.

**BLOCO 07**

Apresentou fissura perceptível com 4cm de profundidade na parede longitudinal frontal próximo à parede transversal. Lado esquerdo.

**BLOCO 08**

Apresentou uma descontinuidade devido a presença de um agregado graúdo na parede longitudinal da parte de trás. Lado direito.

**BLOCO 09**

Apresentou fissura perceptível por quase toda a altura do bloco na parede longitudinal frontal próximo à parede transversal. Lado esquerdo.

Figura 4.4 – Danos apresentados nos blocos da família M-20 (Continua)

**BLOCO 11**

Apresentou fissura minimamente perceptível na parede longitudinal frontal (somente na parte interna do bloco) próximo à parede transversal. Lado esquerdo.

**BLOCO 12**

Apresentou fissura perceptível por quase toda a altura do bloco na parede longitudinal frontal próximo à parede transversal. Lado direito.

**BLOCO 13**

Apresentou fissura perceptível com 5cm de profundidade na parede longitudinal na parte traseira próximo à parede transversal. Lado direito.

**BLOCO 14**

Apresentou fissura muito perceptível do topo à metade do bloco na parede longitudinal frontal que vai até a parede transversal. Lado direito.

**BLOCO 15**

Apresentou fissura levemente perceptível com 5cm de profundidade na parede longitudinal frontal à parede transversal. Lado direito.

Figura 4.4 – Danos apresentados nos blocos da família M-20 (Continua)

**BLOCO 17**

Apresentou fissura levemente perceptível com pouca profundidade na parede longitudinal frontal e na parte traseira. Lado direito.

**BLOCO 18**

Apresentou fissura perceptível com pouca profundidade na parede longitudinal da parte de trás próximo à parede transversal. Lado direito.

**BLOCO 19**

Apresentou fissura levemente perceptível com 4cm de profundidade na parede longitudinal frontal e na parte traseira. Lado esquerdo.

**BLOCO 20**

Apresentou fissura perceptível por toda a altura do bloco na parede longitudinal frontal próximo à parede transversal. Lado esquerdo.

Figura 4.4 – Danos apresentados nos blocos da família M-20

Cabe ressaltar que algumas imagens dos blocos da família M-20 não conformes tiveram seus arquivos corrompidos, por este motivo a apresentação da caracterização do aspecto visual do dano não foi realizado.

Após a finalização da etapa de separação dos blocos conformes das duas famílias e a caracterização visual dos não conformes em análise, foi necessário ainda realizar a pesagem e aferição das dimensões (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Aferição das dimensões do BC20 da família M-15

Com a separação, identificação, pesagem e aferição das medidas dos blocos concluídas, e ainda para realização da modelagem numérica, realizou-se a Técnica de Excitação por Impulso a fim de estimar o módulo de elasticidade dos blocos de ambas as famílias.

Para realizar a estimativa do módulo de elasticidade dos blocos de alvenaria estrutural, foi necessária a retirada de alguns testemunhos das paredes transversais e longitudinais dos blocos.

Esses testemunhos foram retirados das partes sem danos dos blocos inutilizados durante o transporte, que possuíam ainda paredes íntegras. Esses blocos foram desprezados para ensaios de captação das frequências naturais por não ser possível a realização do ensaio no bloco inteiro.

Dessa forma, com o uso de uma serra mármore foram retirados sete prismas (Tabela 4.3), dois pertencentes à família M-15 (retirados de um único bloco) e os outros cinco prismas da família M-20 (retirados de dois blocos diferentes).

Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos e de massas dos prismas para obtenção do módulo de elasticidade

Família	M-15				M-20			
	Larg. (m)	Comp. (m)	Alt. (m)	Massa (kg)	Larg. (m)	Comp. (m)	Alt. (m)	Massa (kg)
Prisma I	0,031	0,189	0,030	0,3347	0,034	0,187	0,032	0,4249
Prisma II	0,031	0,189	0,028	0,3369	0,036	0,187	0,031	0,4126
Prisma III	-	-	-	-	0,055	0,185	0,031	0,6155
Prisma IV	-	-	-	-	0,035	0,187	0,033	0,4302
Prisma V	-	-	-	-	0,035	0,186	0,033	0,4377

Os prismas foram retirados das paredes longitudinais e transversais de blocos diferentes, porém produzidos no mesmo lote, como é o caso dos cinco prismas extraídos de dois blocos diferentes da família M-20. Ou até mesmo extraídos do mesmo bloco, porém de paredes diferentes, como os dois prismas da família M-15.

Após a extração desse material regular, pesagem e aferição das medidas, os ensaios via Técnica de Excitação por Impulso para obtenção do módulo de elasticidade transversal foram realizados.

4.3. Segunda etapa – Técnica de Excitação por Impulso

O ensaio não destrutivo via Técnica de Excitação por Impulso foi realizado a fim de se obter tanto o módulo de elasticidade do material em concreto, como a resposta acústica em forma de espectro dos blocos ensaiados.

Para realização dessa primeira etapa do programa experimental foi utilizada uma linha de solução em instrumentação chamada Sonelastic[®] (Figura 4.6) desenvolvida pela ATPC Engenharia Física, empresa localizada em Ribeirão Preto, São Paulo.



Figura 4.6 - Sistema Sonelastic[®] para amostras de médio porte caracterizando um cilindro de concreto no modo de vibração longitudinal (ATPC Engenharia Física, 2017)

O sistema conta com o programa Sonelastic[®], um suporte ajustável, um pulsador e um captador acústico (microfone). E está de acordo com as normas ASTM E1876 (2015), C1259 (2015), C215 (2014) e correlatas.

O programa caracteriza materiais de forma não-destrutiva, encontrando os módulos de elasticidade e de amortecimento a partir das frequências naturais de vibração obtidas via Técnica de Excitação por Impulso e as Equações de Pickett.

Este também objetiva manter o controle de qualidade de peças, componentes e materiais a partir da resposta acústica, que se altera com a presença de trincas, poros e desvios das propriedades mecânicas.

O sistema pode ser utilizado tanto em ensaios realizados à temperatura ambiente, quanto em ensaios em altas e baixas temperaturas, e se adequa para a caracterização de uma ampla gama de materiais, como: abrasivos, rebolos, biomateriais, polímeros, cerâmica, materiais refratários, compósitos, madeiras, concretos, cimentícios, metais e ligas.

4.3.1. Descrição dos ensaios

Os primeiros ensaios da Técnica de Excitação por Impulso foram realizados nos prismas retirados das paredes transversais e longitudinais dos blocos, com o objetivo de estimar os módulos de elasticidade dinâmico do concreto de ambas as famílias.

Os corpos de prova em forma de prisma foram posicionados e apoiados de acordo com as condições de contorno necessárias para obtenção do módulo de elasticidade transversal segundo a ASTM C215 (2014) (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Aparato do ensaio no prisma retirado da parede transversal do bloco da família M-15 para obtenção do módulo de elasticidade no modo transversal

Embora a obtenção das frequências naturais dos blocos vazados tenham sido através da excitação longitudinal, a obtenção da estimativa dos módulos de elasticidade dinâmicos por meio da TEI nos prismas se deu por meio da excitação transversal, uma vez que a excitação longitudinal se apresentou de forma consideravelmente mais complicada em amostras de pequeno porte como mostrada na Figura 4.7.

A estimativa do módulo de elasticidade dinâmico transversal do concreto, e não longitudinal, assim como sugere a ASTM C215 (2014), é aceitável dada à proximidade dos valores obtidos entre eles. Diógenes (2010) indica que essa diferença é inferior a 0,5% para concretos.

Após a obtenção dos módulos de elasticidade através dos prismas, seguiu-se a realizar a Técnica de Excitação por Impulso nos blocos inteiros de concreto para obtenção das respectivas frequências naturais.

Os ensaios foram realizados baseando-se também na norma americana ASTM C215 (2014). Cada corpo de prova foi impactado por uma haste com cabeça metálica e a resposta acústica captada por um microfone unidirecional.

O equipamento teve uma taxa de amostragem de pelo menos 2,5 vezes a frequência máxima esperada e gravou 2048 pontos da onda, que é o mínimo estabelecido pela norma americana.

Todos os blocos foram ensaiados, com exceção dos BPNC10, BPNC15 e BGNC10, que se romperam antes mesmo do ensaio ser realizado.

Os blocos vazados em concreto foram excitados no modo longitudinal, objetivando captar o maior número de frequências possíveis. Dessa forma, o microfone foi posicionado em uma das faces transversais do bloco e a excitação foi provocada na outra face.

A excitação torcional (faces frontal e posterior) poderia apresentar respostas individuais, ou seja, o ensaio poderia determinar a resposta de $\frac{1}{2}$ bloco e não do bloco inteiro.

O transdutor utilizado foi um microfone, tal equipamento é capaz de captar as frequências naturais tanto do bloco como do ambiente, por isso, para tentar captar o menor número de frequências não pertencentes aos blocos (ambiente), os ensaios foram realizados em uma sala fechada com o mínimo de ruídos externos.

As amostras foram apoiadas de forma similar ao recomendado pela ASTM C215, quando da realização de ensaios em prismas maciços.

Os blocos da família M-15 foram apoiados no suporte do próprio equipamento (Figura 4.8).

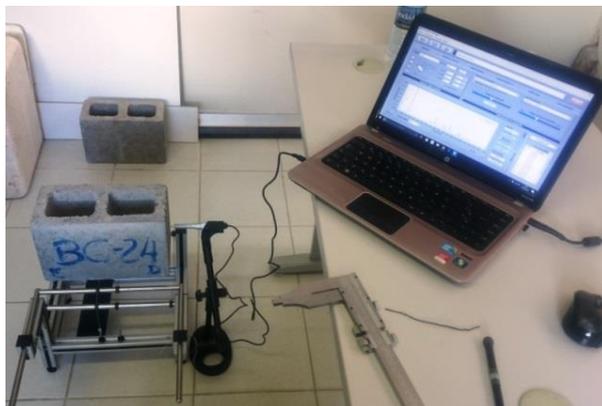


Figura 4.8 – Ensaio da TEI para obtenção das frequências naturais do BPC24

Os blocos da família M-20 por serem de grande porte tiveram que ser apoiados em uma pequena estrutura de madeira que possuía a mesma espessura das paredes transversais dos blocos, sendo posicionada na parede do meio do bloco (Figura 4.9).



Figura 4.9 – TEI para obtenção das frequências naturais do BGNC15

Para obter um melhor controle sobre os ensaios e uma média entre as frequências obtidas por bloco, os ensaios foram divididos entre lado direito e lado esquerdo, onde se realizaram três ensaios em cada face da seção transversal, totalizando seis ensaios por bloco e 528 ensaios no geral: 156 ensaios nos blocos conformes e 120 nos blocos não conformes da família M-

15, 138 ensaios nos blocos conformes e 114 nos blocos não conformes da família M-20.

Após a realização da TEI com a utilização do microfone, foi realizada a Técnica de Excitação por Impulso com o uso de outro transdutor, o acelerômetro (Figura 4.10), na expectativa de captar somente as frequências dos blocos ao quais ele foi acoplado e avaliar a eficácia da Técnica de Excitação por Impulso com o uso do microfone.

Para realização do ensaio (Figura 4.10) foi necessário colar uma chapa metálica em cada face das paredes transversais dos blocos ensaiados, um lado para a fixação do aparelho (acoplado de forma magnética) e a outra para a aplicação do impacto. As condições de contorno se deram da mesma forma que os ensaios com o uso do microfone.



Figura 4.10 – Ensaio da Técnica de Excitação por Impulso no BNC14 com o uso do acelerômetro

Dessa forma, a fim de comparar as frequências obtidas nos ensaios com a utilização dos dois transdutores (microfone e acelerômetro), e, de modo a validar os espectros obtidos com o uso do microfone, foram realizados ensaios com acelerômetro em quatro blocos no total, sendo: um bloco conforme e um não conforme da família M-15 e um bloco conforme e um não conforme da família M-20.

Os blocos ensaiados da família M-15 foram os BPC24 e o BPNC22, da família M-20 foram os blocos BGC23 e o BGNC14. Os blocos conformes

ensaiados com acelerômetro foram escolhidos aleatoriamente, ao passo que os blocos não conformes foram escolhidos devido à presença de grandes danos.

Os ensaios foram realizados com um acelerômetro 7253C Triaxial IEPE (Figura 4.12) da marca Endevco da empresa Meggit, um aparelho com eletrônica embarcada que trabalha com uma fonte de corrente constante e tem sua impedância alterada conforme a variação de carga no cristal piezoelétrico.

O acelerômetro da Endevco (Figura 4.11) utilizado é capaz de realizar ao mesmo tempo a medição da vibração em três eixos diferentes ortogonais e apresenta uma baixa sensibilidade de 10 mV/g, indicado para medir sinais de alta amplitude.



Figura 4.11 – Modelo do acelerômetro 7253C Triaxial IEPE (Endevco¹⁰ (2018))

Em relação ao sistema de aquisição dos sinais dinâmicos nesta etapa, foi-se utilizado o *Sinalcac Ace* (Figura 4.12) da empresa *Data Physics*, que traduz as informações captadas pelo módulo de aquisição *Quattro*.

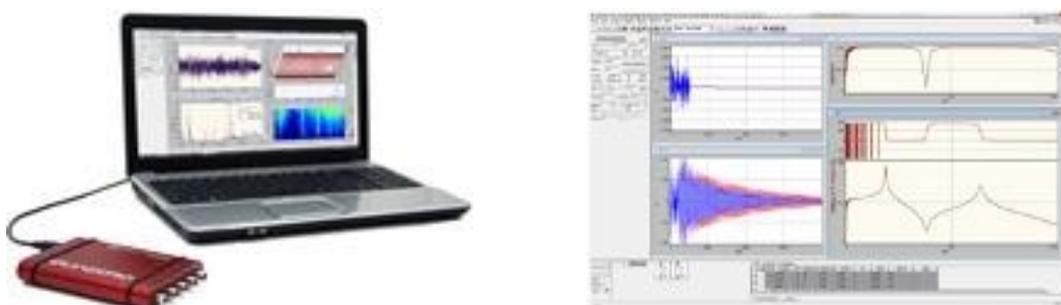


Figura 4.12 – Sinalcac Ace + Quattro (Data Physics¹¹ (2018))

¹⁰ Visita ao site <https://buy.endevco.com/7253c-accelerometer.html> em 28 de fev de 2018.

¹¹ Visita ao site <http://www.dataphysics.com> em 02 de mai de 2018.

Os ensaios da Técnica de Excitação por Impulso com acelerômetro seguiram a mesma linha dos realizados com o captador acústico, foram realizados seis ensaios por bloco, sendo três do lado esquerdo e três do lado direito.

4.4. Terceira etapa – Espectroscopia de Ultrassom Ressonante

Para a realização da terceira parte do programa experimental, a modelagem numérica teve papel importante na análise da espectroscopia de ultrassom ressonante, obtendo frequências modais e comparando com os resultados obtidos em teste via técnica de excitação por impulso. Assim, foi necessário determinar as frequências naturais e os modos de vibração associados a estas por meio do programa ANSYS®.

Esta metodologia de ensaio baseou-se na norma americana ASTM E2001 (2013), que fornece um guia padrão para detecção de falhas em materiais.

4.4.1. Metodologia de análise da RUS

De posse das frequências naturais obtidas por meio da Técnica de Excitação por Impulso e da modelagem numérica, buscou-se encontrar tanto as semelhanças entre as frequências naturais de todos os blocos conformes de cada família, como também as diferenças entre as frequências dos blocos conformes e não conformes de cada família, para que assim fosse possível definir um espectro dito como padrão.

A Espectroscopia de Ultrassom Ressonante funciona apenas como uma metodologia de ensaio, onde após a definição de um espectro padrão, podem-se testar novos blocos, julgando-os como aceitáveis ou não, a depender das mudanças e variações dos padrões entre as respostas acústicas obtidas via TEI e o espectro julgado como padrão.

Por meio da realização da metodologia de ensaio da Espectroscopia de Ultrassom Ressonante em tese, é possível detectar e avaliar as variações e

propriedades mecânicas do objeto em teste, como a presença ou não de fissuras.

Dessa forma, qualquer espectro que fuja desse padrão poderá ser considerado como não conforme. Assim, poderá ser possível identificar os danos de uma forma mais prática com a realização de futuros ensaios via Técnica de Excitação por Impulso.

4.5. Quarta etapa – Ensaios à compressão axial

Na quarta etapa da parte experimental da presente pesquisa foram realizados ensaios de caráter destrutivo, sendo esses, os ensaios à compressão dos blocos.

Através do ensaio à compressão é possível determinar diretamente a capacidade resistente do bloco estrutural, e indiretamente, do painel de alvenaria.

O ensaio obedeceu à ABNT 12118 (2015) e visou verificar se os blocos ensaiados via Técnica de Excitação por Impulso superavam a resistência mínima exigida pela ABNT 6136 (2016) para blocos de função estrutural de 4MPa.

Os ensaios à compressão também foram realizados objetivando estabelecer uma correlação entre as frequências naturais obtidas por meio da Técnica de Excitação por Impulso e as resistências dos blocos, uma vez que a frequência natural é parâmetro intrínseco de cada estrutura em função da massa e da rigidez.

4.5.1. Descrição dos modelos

Foram ensaiados todos os blocos conformes tanto da família M-15 como da M-20. Para os ensaios à compressão dos blocos não conformes, foram selecionados os que apresentaram menores danos.

No total foram ensaiados 26 blocos conformes da família M-15, 22 blocos conformes da família M-20, 07 blocos não conformes da família M-15 e 06 blocos não conformes da família M-20 (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Blocos ensaiados à compressão

<i>Legenda</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Blocos</i>
BPC	26	BPC do 01 ao 26
BPNC	07	BPNC 03, 06, 07, 11, 15, 17 e 18
BGC	22	BPC do 01 ao 23
BGNC	06	BGNC 06, 08, 11, 16,18 e 20

4.5.2. Descrição dos ensaios

Para realizar os ensaios à compressão, os blocos precisaram primeiro passar pelo processo de capeamento (Figura 4.13). O capeamento foi necessário devido à existência de agregados no topo e na base do bloco que poderiam gerar concentração de tensão e eventuais trincas localizadas.



Figura 4.13 – Capeamento dos blocos conformes da família M-15 para realização dos ensaios à compressão

Assim, os blocos estavam prontos para serem rompidos (Figura 4.14).



Figura 4.14 – Ensaio à compressão em bloco conforme 10 da família M-20 e bloco não conforme 18 da família M-15, respectivamente.

A carga foi aplicada na direção vertical, que corresponde ao esforço no qual o bloco deve suportar depois de assentado em obra. E as paredes que possuíam as maiores espessuras foram posicionadas na parte superior da prensa.

A posição do bloco no equipamento se deu com o centro de gravidade do bloco coincidindo com o eixo de carga dos pratos da prensa.

Durante o carregamento, os dispositivos de comando da prensa foram controlados de forma que a tensão aplicada (calculada em relação à área bruta) aumentasse progressivamente e sem choques.

CAPÍTULO 5

Resultados e Discussões

5.1. Resultados

Com o objetivo de avaliar a qualidade de blocos de concreto vazados para alvenaria estrutural, o estudo propôs a caracterização destes através da análise espectral por meio da combinação de ensaios não destrutivos baseados na Técnica de Excitação por Impulso (TEI) e na Espectroscopia de Ultrassom Ressonante (RUS).

Os resultados obtidos foram os seguintes:

5.1.1. Módulo de elasticidade do material dos blocos

Após a separação e identificação dos blocos entre pequenos (família M-15) e grandes (família M-20), conformes (íntegros) e não conformes (apresentaram algum tipo de fissura), foi feita a aferição das medidas e massas de ambas as famílias para que fosse possível realizar a modelagem numérica.

O resultado final se deu através de uma média de todos os resultados obtidos das massas e medidas, e os pesos específicos foram calculados com a divisão dessas médias de massa e seus respectivos volumes (Tabela 5.1):

Tabela 5.1 – Parâmetros geométricos e de massa dos blocos das famílias M-15 e M-20

Propriedades	Família M-15	Família M-20
Largura (m)	0,14	0,19
Comprimento (m)	0,29	0,39
Altura (m)	0,19	0,19
Espessura parede (m)	0,03	0,035
Massa (kg)	8,88	15,5
Peso específico (kg/m³)	1.900	1.900

Ainda para a realização da modelagem numérica, foi necessário estimar o módulo de elasticidade do material dos blocos.

Como se sabe, a Técnica de Excitação por Impulso pode ser utilizada tanto para a estimativa do módulo de elasticidade, como para obtenção das frequências naturais de peças de geometria regular.

Diante disso, tal ensaio foi realizado nos prismas para obtenção tanto do módulo de elasticidade, como das frequências naturais.

Os resultados da estimativa dos módulos de elasticidade transversais extraídos via TEI dos dois prismas da família M-15 e dos cinco prismas da família M-20 são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Módulos de Elasticidade transversais via Técnica de Excitação por Impulso nos prismas retirados das paredes dos blocos

Prisma	Família	E transversal (GPa)	Primeira freq. natural (Hz)	Média E (GPa)
Prisma I	M-15	8,28	1665,5	7,24
Prisma II	M-15	6,19	1426,4	
Prisma I	M-20	10,41	1921,5	11,84
Prisma II	M-20	11,22	2049,3	
Prisma III	M-20	11,31	2209,3	
Prisma IV	M-20	13,65	2423,0	
Prisma V	M-20	12,62	2359,8	

Para avaliar teoricamente os módulos de elasticidade transversais estimados do material de concreto dos blocos vazados de ambas as famílias ao qual foram obtidos via TEI, foram realizadas as primeiras modelagens numéricas.

Dessa forma, utilizando o módulo de elasticidade do concreto obtido experimentalmente com o ensaio da TEI nos prismas, foi possível se obter também as frequências naturais dos prismas, e assim, compará-las às frequências obtidas também via experimental. Mesmo princípio utilizado para avaliar teoricamente as frequências dos blocos vazados.

Para isso, somente os prismas I de ambas as famílias foram modeladas. A análise modal 2D da barra prismática na condição bi-apoiada forneceu os resultados presentes na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Frequência do primeiro modo de vibração via Técnica de Excitação por Impulso e via ANSYS® dos prismas

Prisma	Família	E(GPa)	Primeira freq. TEI (Hz)	Primeira freq. ANSYS® (Hz)
Prisma I	M-15	8,28	1665,5	1678,0
Prisma I	M-20	10,41	1921,5	1886,0

Analisando a Figura 5.1, percebe-se um modo de vibração com deformação flexional associado à frequência natural de 1678,0 Hz.

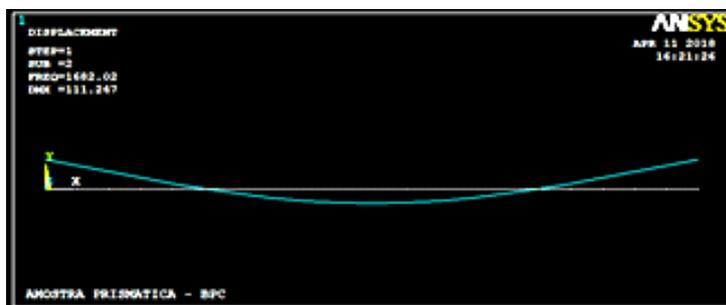


Figura 5.1 – Análise modal do Prisma I da família M-15 apresentando o modo de vibração com deformação flexional associado à frequência 1678,0 Hz

5.1.2. Espectros via TEI + Captador Acústico

De posse do módulo de elasticidade do material concreto, foi possível realizar a análise modal dos blocos para encontrar suas respectivas frequências naturais e modos de vibração, comparando-as com as identificadas nos ensaios via Técnica de Excitação por Impulso dos 88 blocos que restaram após o transporte.

Após a captação das frequências naturais, o equipamento as transformou em um sinal mensurável na forma de espectro.

Como foram realizados seis ensaios em cada unidade de alvenaria, cada bloco teve seu espectro exportado e plotado por meio de uma média desses seis ensaios. Nos Apêndices deste trabalho são apresentadas essas médias individuais, bloco a bloco.

Para facilitar a análise dos resultados, plotou-se em um único gráfico todas essas médias dos blocos pequenos conformes (Figura 5.2), outro gráfico com as médias dos blocos pequenos não conformes (Figura 5.3), um gráfico com as médias dos blocos grandes conformes (Figura 5.4) e por fim, um gráfico com todas as médias dos blocos grandes não conformes (Figura 5.5).

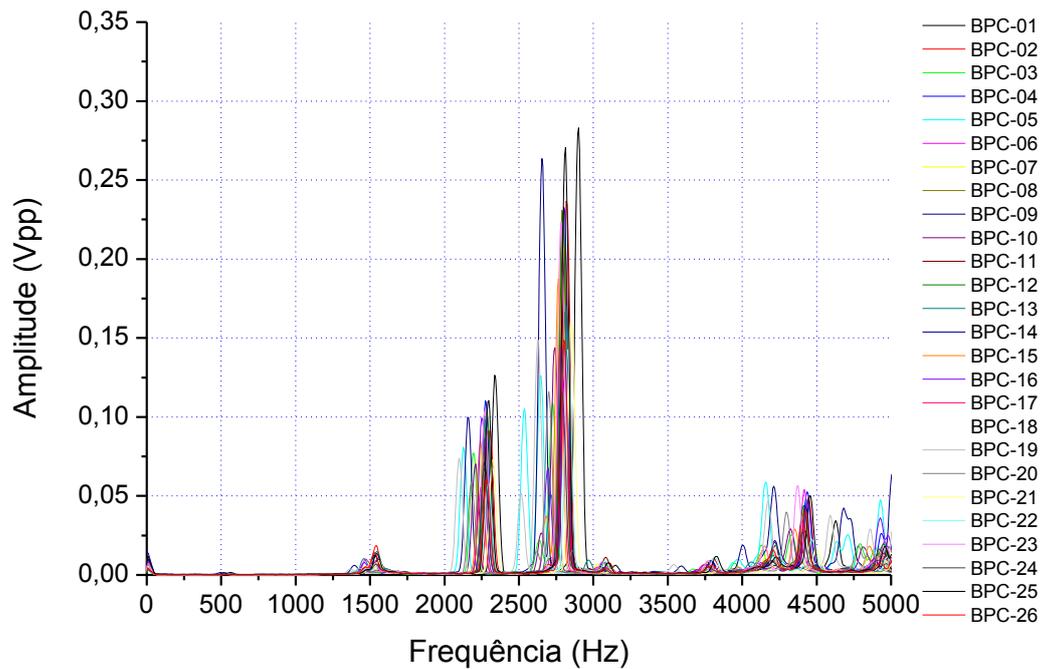


Figura 5.2 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco conforme da família M-15

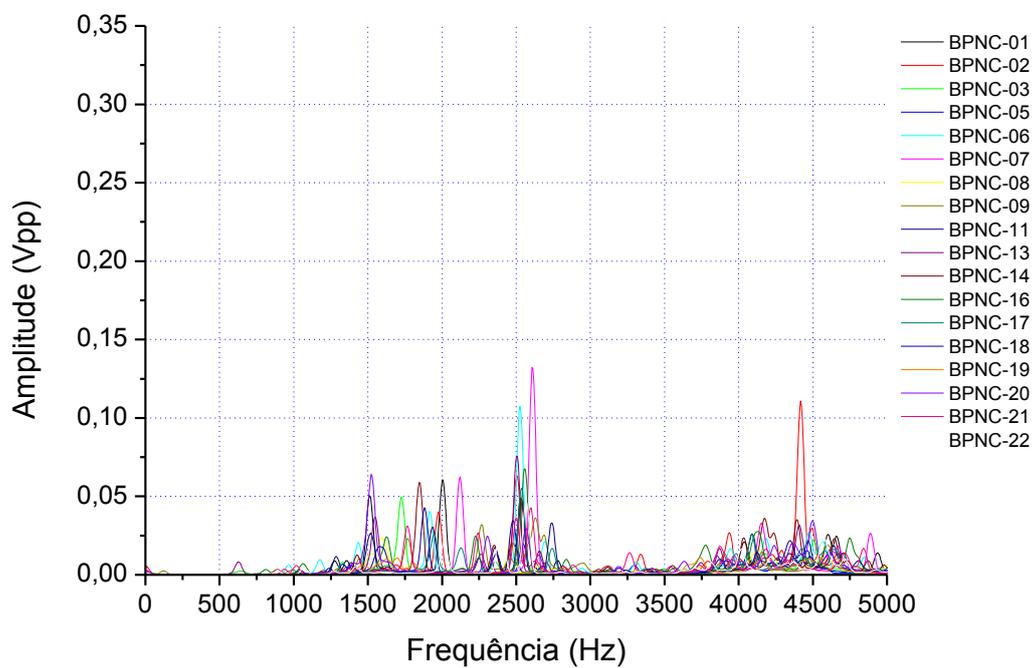


Figura 5.3 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco não conforme da família M-15

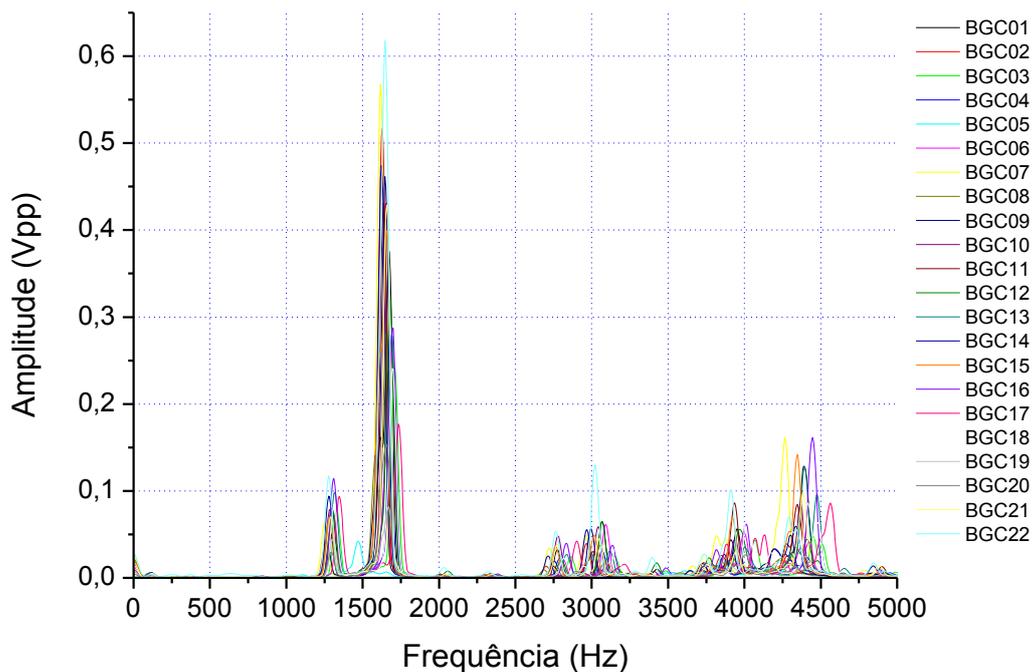


Figura 5.4 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco conforme da família M-20

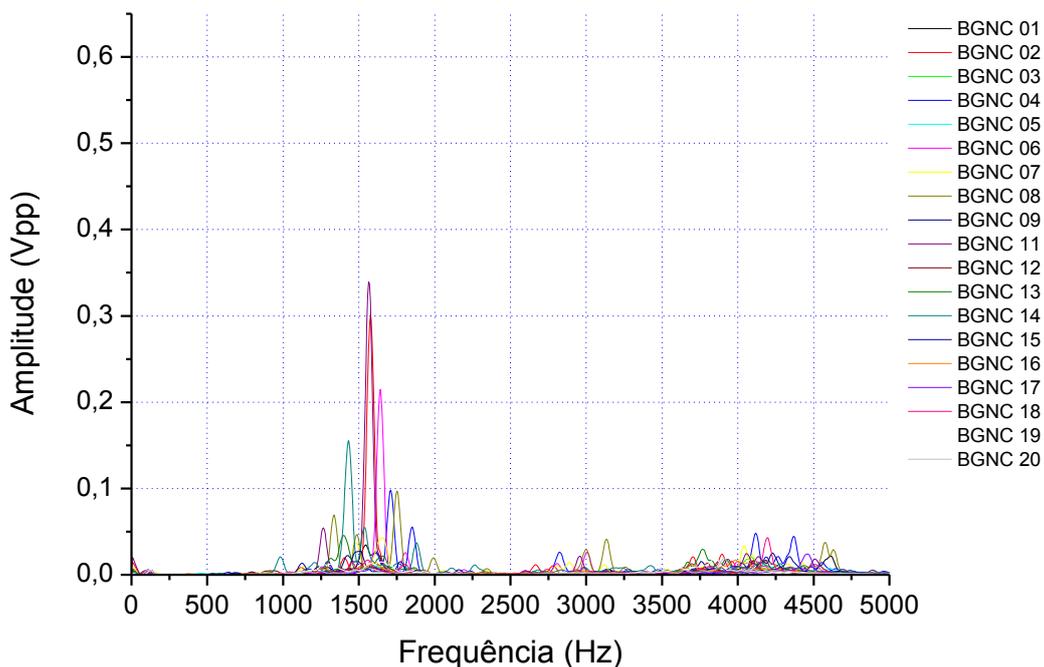


Figura 5.5 – Espectros apresentados pelas médias das frequências naturais de cada bloco não conforme da família M-20

Após a obtenção das médias apresentadas nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, criaram-se médias únicas referentes a cada gráfico apresentado acima. Essas médias geraram espectros que foram chamados de espectro padrão.

Dessa forma, foi possível reunir em um único gráfico a informação referente aos 156 ensaios realizados nos blocos conformes da família M-15 (Figura 5.6).

Em outro gráfico reuniu-se em um único espectro, os 120 ensaios realizados nos blocos não conformes da família M-15 (Figura 5.7).

Na Figura 5.8 tem-se um gráfico com o espectro contendo os 138 ensaios realizados nos blocos conformes da família M-20.

E, por fim, na Figura 5.9 tem-se um gráfico com o espectro contendo os 114 ensaios realizados nos blocos não conformes da família M-20.

De posse então do resultado dos vários ensaios de TEI, apresenta-se na Figura 5.6 o espectro padrão para os blocos da família M-15, com o devido destaque às três principais frequências identificadas nos ensaios.

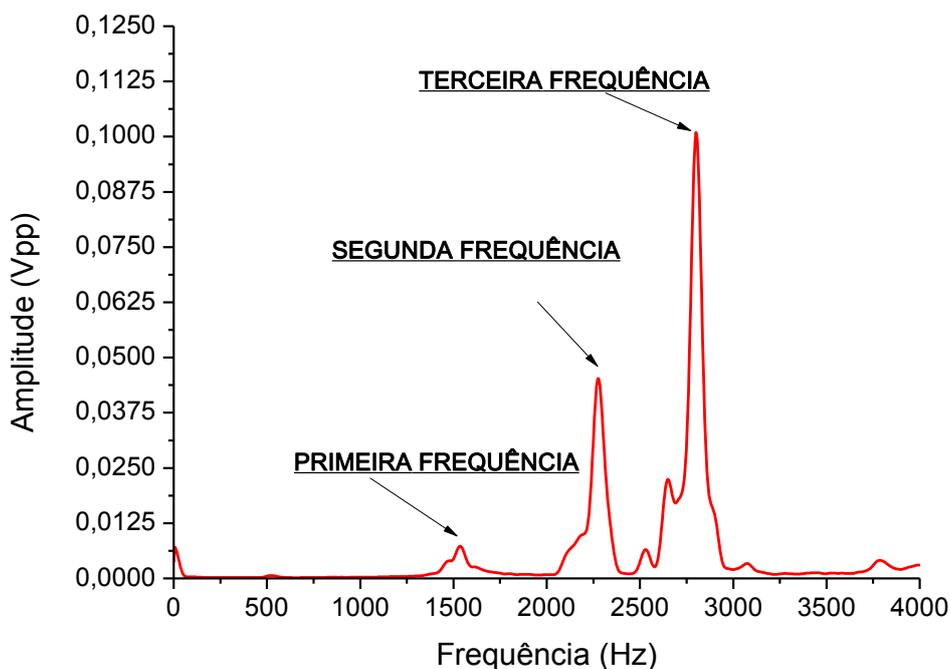


Figura 5.6 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos conformes da família M-15

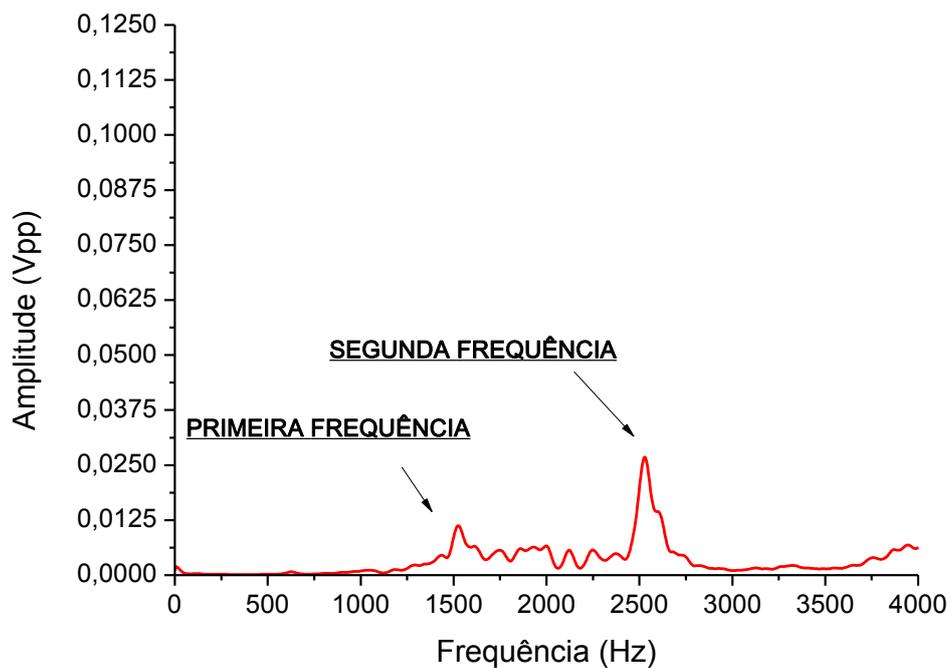


Figura 5.7 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos não conformes da família M-15

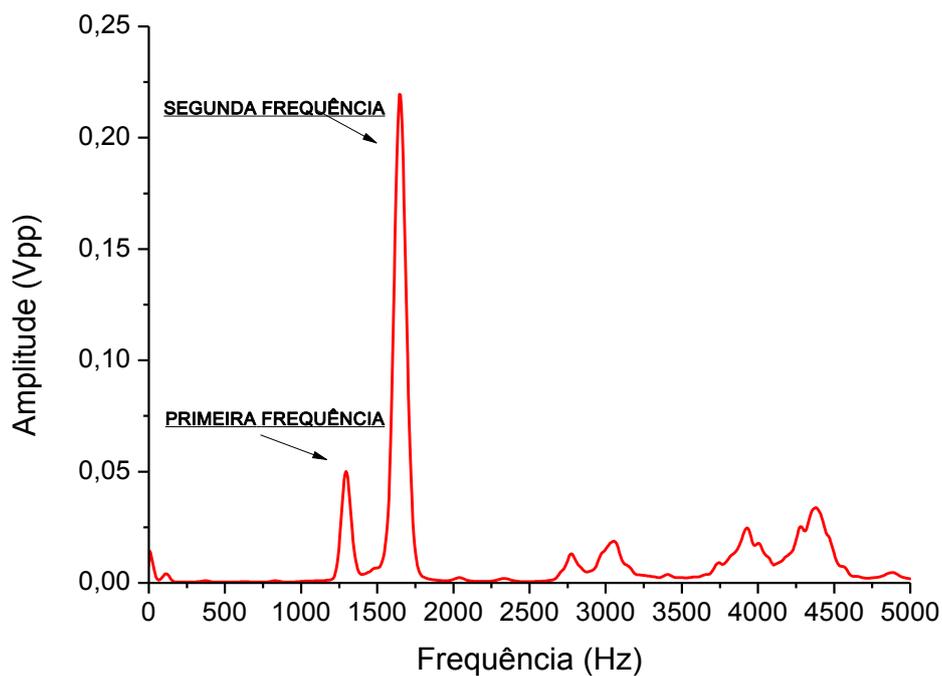


Figura 5.8 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos conformes da família M-20

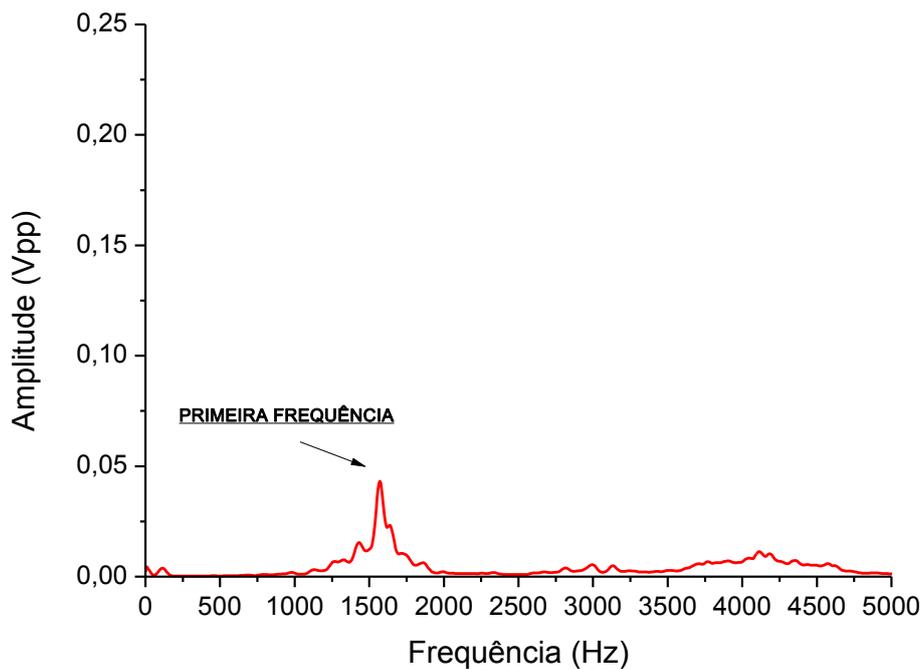


Figura 5.9 – Espectro padrão apresentado por uma média única das frequências naturais de blocos não conformes da família M-20

Diante dos picos de ressonância obtidos via Técnica de Excitação por Impulso, foram calculadas as médias de cada pico, o desvio padrão e o coeficiente de variação (Tabela 5.4).

Essas médias, desvio padrão e variância foram calculados baseados nas médias de cada bloco (referente aos seis ensaios realizados, três em cada lado).

Tabela 5.4 – Picos de ressonância, desvio padrão e variância dos blocos M-15 e M-20

	Blocos M-15				Blocos M-20			
	1º Pico (Hz)	2º Pico (Hz)	Pico duplo (Hz)	3º Pico (Hz)	1º Pico (Hz)	Pico duplo (Hz)	2º Pico (Hz)	
BPC01	1554,43	2338,30	-	2896,15	BGC01	1299,21	-	1673,43
BPC02	1539,41	2310,20	-	2823,31	BGC02	1261,72	-	1627,98
BPC03	-	2190,61	-	2728,85	BGC03	1329,59	-	1710,09
BPC04	1524,94	2275,56	-	2802,84	BGC04	1294,88	-	1668,33
BPC05	-	2123,66	2538,17	2644,20	BGC05	-	-	1467,32
BPC06	1522,04	2273,68	-	2804,15	BGC06	1307,44	-	1687,50
BPC07	1508,66	2256,41	-	2775,95	BGC07	1252,59	-	1617,14
BPC08	1527,06	2271,60	-	2794,07	BGC08	1283,47	1583,01	1654,52
BPC09	-	2158,41	-	2657,30	BGC09	1280,07	-	1646,58
BPC10	-	2203,14	2648,21	2743,41	BGC10	1284,99	-	1654,78
BPC11	1537,50	2285,16	-	2806,64	BGC11	1287,00	-	1637,33
BPC12	1537,83	2285,51	-	2795,61	BGC12	1303,90	-	1678,07
BPC13	-	2273,44	2712,89	2818,36	BGC13	1315,93	-	1691,07
BPC14	1527,23	2268,88	-	2804,10	BGC14	1266,59	-	1622,40
BPC15	-	2238,28	2683,59	2765,63	BGC15	1285,19	-	1655,73
BPC16	-	2245,92	2693,43	2777,08	BGC16	1309,66	-	1695,56
BPC17	-	2245,92	-	2777,08	BGC17	1347,26	-	1735,05
BPC18	1561,80	2331,66	-	2841,91	BGC18	1312,62	-	1695,64
BPC19	-	2118,36	2480,13	2628,61	BGC19	1304,07	-	1669,83
BPC20	-	2182,91	2620,75	2701,41	BGC20	1294,29	-	1656,59
BPC21	1558,22	2331,66	-	2862,82	BGC21	1292,50	-	1656,17
BPC22	-	2294,40	-	2832,66	BGC22	1236,06	-	1620,46
BPC23	1522,06	2274,65	-	2781,49	BGC23	1279,34	-	1645,91
BPC24	1540,39	2267,92	-	2790,47	-	-	-	-
BPC25	1544,49	2293,25	-	2810,04	-	-	-	-
BPC26	1532,02	2285,85	-	2802,96	-	-	-	-
	M-15				M-20			
MÉDIA (HZ)	1535,87	2254,82		2779,50		1292,20		1655,11
DESVIO PADRÃO	14,73	59,13		63,70		24,98		50,66
CV (%)	0,95	2,62		2,29		1,93		3,06

*Nem todos os blocos apresentaram pico duplo, esses picos duplos podem ser mais bem entendidos analisando-se os gráficos no Apêndice A.

5.1.3. Espectros via TEI x Acelerômetro

Para avaliar a eficácia da Técnica de Excitação por Impulso com o uso do microfone, também foram realizados os ensaios da Técnica de Excitação por Impulso para obtenção das frequências naturais dos blocos BPC24 (Figura 5.10), BPC22 (Figura 5.11), BGC23 (Figura 5.12) e BGC14 (Figura 5.13) com o uso do acelerômetro.

O ensaio com o uso do acelerômetro seguiu a mesma linha que com o uso do microfone. Dessa forma, foram realizados seis ensaios em cada bloco, sendo três em cada lado da parede transversal. Para plotar os gráficos seguintes foram retiradas as médias de cada bloco.

Plotaram-se as médias dos espectros de cada bloco em gráficos a fim de se comparar os picos encontrados por meio dos dois transdutores (Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12).

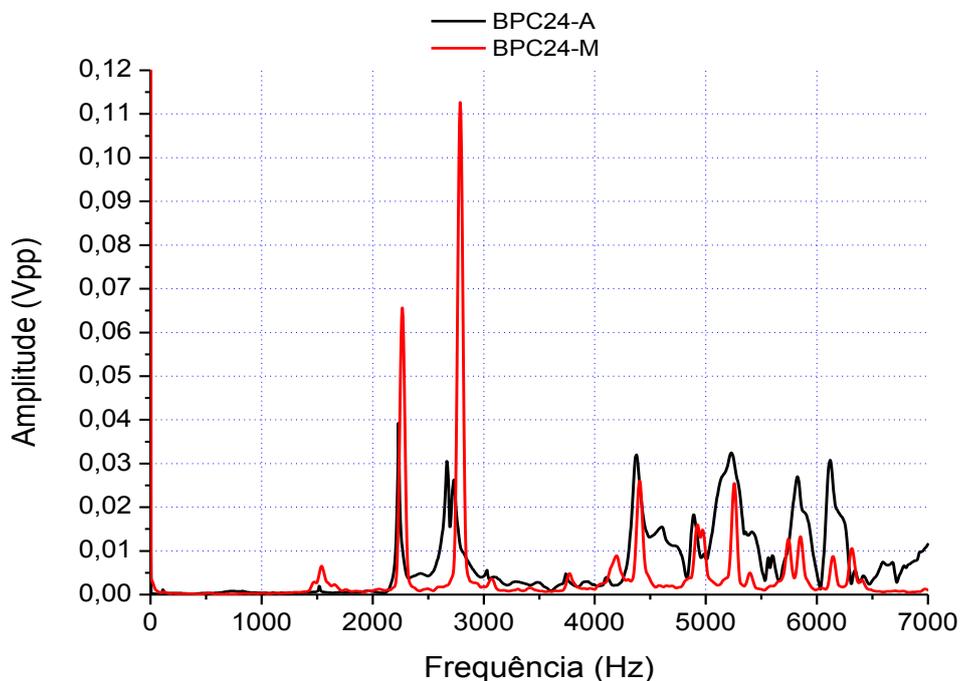


Figura 5.10 – Espectros das médias do BPC24 com o uso do microfone e acelerômetro

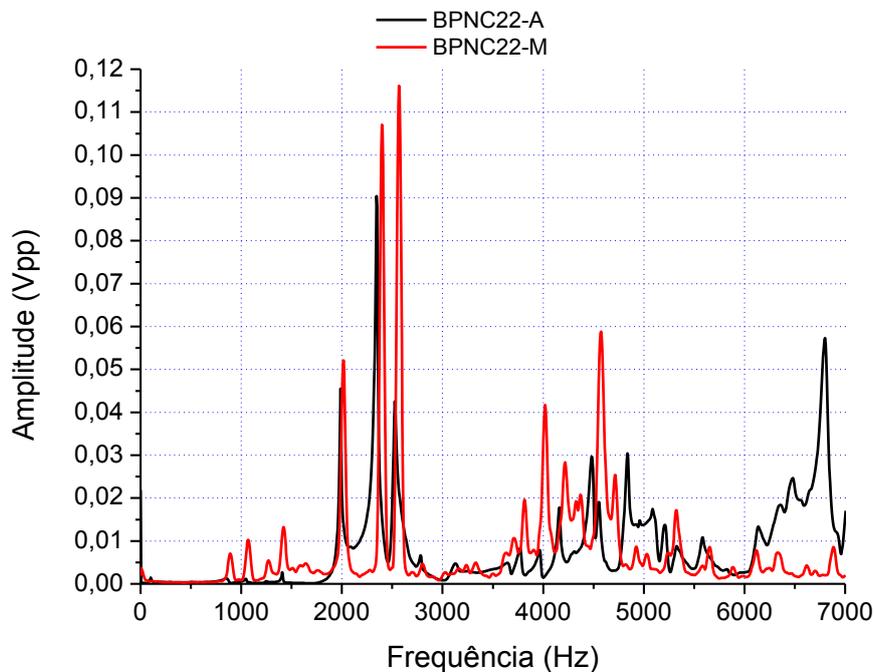


Figura 5.11 – Espectros das médias do BPNC22 com o uso do microfone e acelerômetro

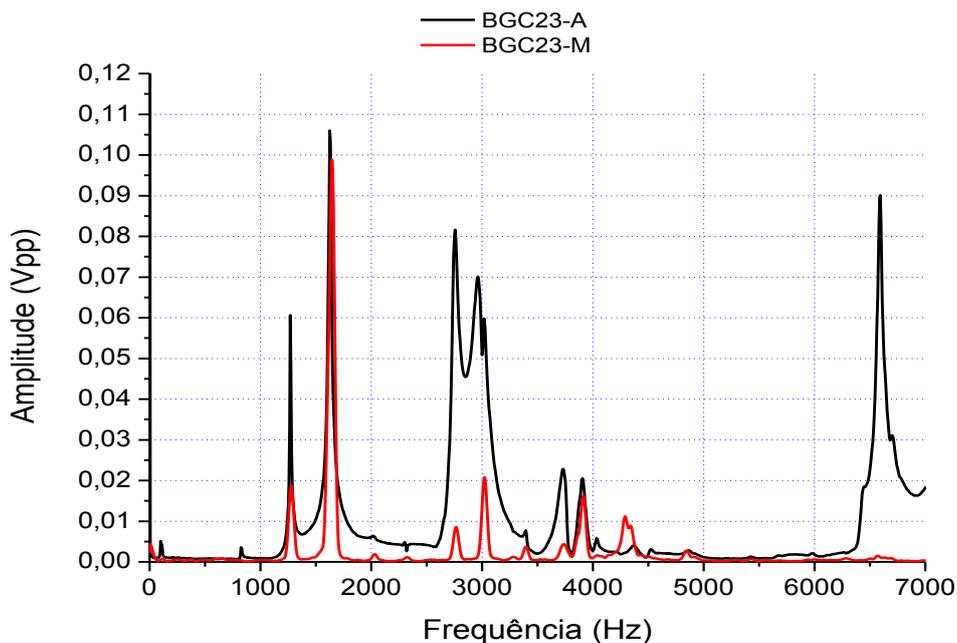


Figura 5.12 – Espectros das médias do BGC23 com o uso do microfone e acelerômetro

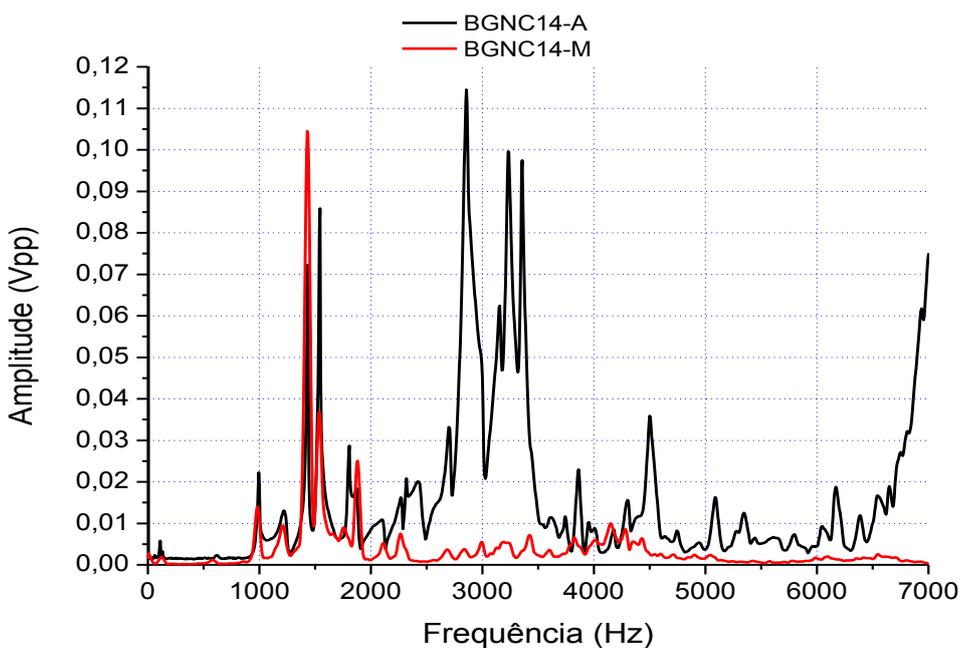


Figura 5.13 – Espectros das médias BGNC14 com o uso do microfone e acelerômetro

5.1.4. Comparação Espectros x Análise modal via ANSYS®

Após todos os ensaios experimentais serem finalizados, se deu início às modelagens numéricas dos blocos. Dessa forma, realizou-se uma modelagem com as mesmas propriedades geométricas, elásticas e de massa dos blocos

da família M-15, e outra modelagem com as mesmas propriedades dos blocos da família M-20.

O objetivo dessa modelagem foi encontrar as frequências naturais dos blocos para que assim fosse possível comparar às frequências encontradas via Técnica de Excitação por Impulso e assim, embasar de forma teórica os espectros padrão sugeridos para ambas as famílias.

Por meio da utilização do ANSYS[®], foi solicitada uma análise nos 50 primeiros modos de vibração em uma faixa de frequência de 0 Hz à 5000 Hz, que faixa de frequência onde se observaram os picos mais relevantes do espectro.

Foram encontrados 40 modos de vibração na modelagem do bloco da família M-15, e 47 modos de vibração para o bloco da família M-20. A lista completa das frequências naturais obtidas da análise modal numérica é apresentada nos ANEXOS A (Família M-15) e B (Família M-20).

Serão apresentados neste item os modos de vibração que tiveram sua frequência natural próxima das identificadas nos picos de ressonâncias presentes nos espectros obtidos experimentalmente.

Após a obtenção dos modos de vibração com suas respectivas frequências naturais associadas, foi criada uma tabela contendo os três primeiros picos de ressonância encontrados por meio da TEI (retirados da Tabela 5.4) e as frequências próximas encontradas por meio da modelagem numérica, tanto para a família M-15 (Tabela 5.5), como para a família M-20 (Tabela 5.6). Os modos de vibração também foram analisados.

Tabela 5.5 – Primeiros picos de ressonância de blocos de concreto vazado da família M-15 encontrados via Sonelastic[®] e ANSYS[®]

Família M-15	TEI (Sonelastic[®])	Modelagem (ANSYS[®])	Nº do modo (ANSYS)
Primeira Frequência	1535,87 Hz	1683,76 Hz	10
Segunda Frequência	2254,82 Hz	2149,83 Hz	14
Terceira Frequência	2779,50 Hz	2789,38 Hz	18

Tabela 5.6 – Primeiros picos de ressonância de blocos de concreto vazado da família M-20 encontrados via Sonelastic[®] e ANSYS[®]

Família M-15	TEI (Sonelastic[®])	Modelagem (ANSYS[®])	Nº do modo (ANSYS)
Primeira Frequência	1292,20 Hz	1272,21 Hz	10
Segunda Frequência	1655,11 Hz	1552,89 Hz	11

Os modos de vibração referentes às frequências naturais foram:

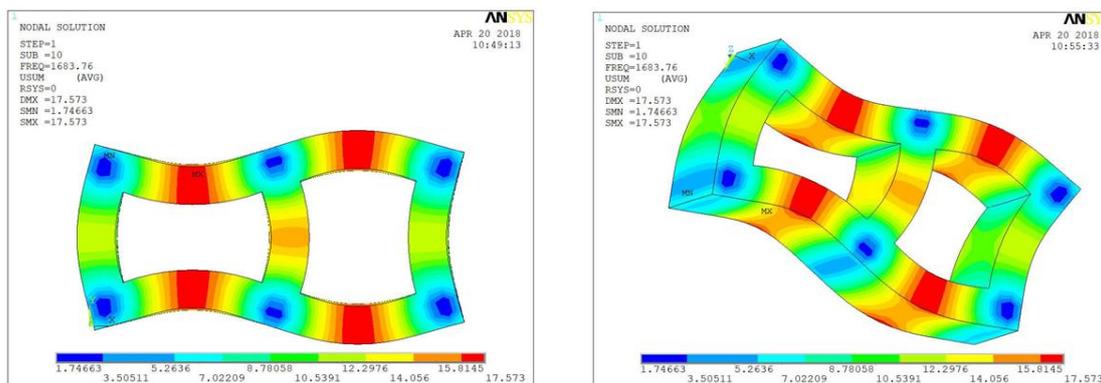


Figura 5.14 – Décimo modo de vibração com frequência 1683,76 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-15

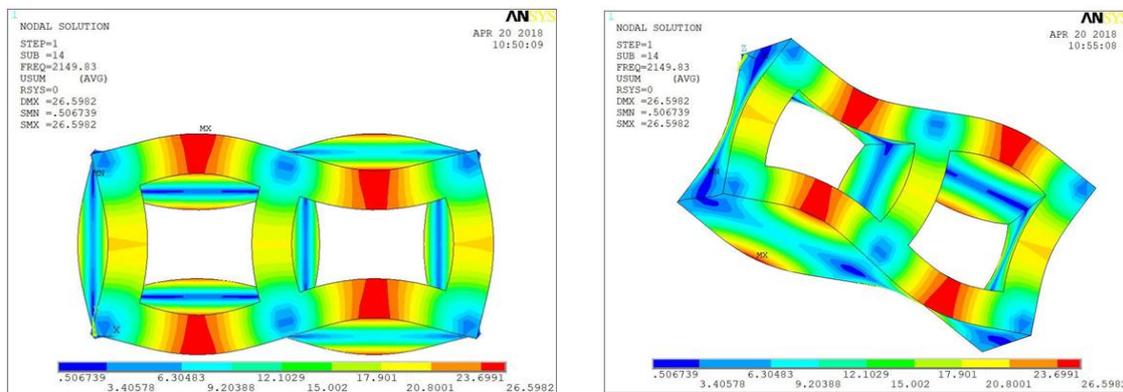


Figura 5.15 – Décimo quarto modo de vibração com frequência 2149,83 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-15

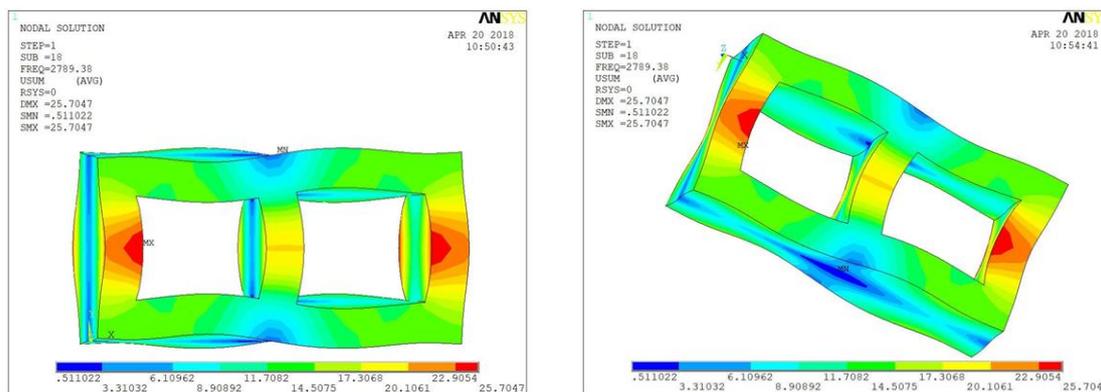


Figura 5.16 – Décimo oitavo modo de vibração com frequência 2789,38 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-15

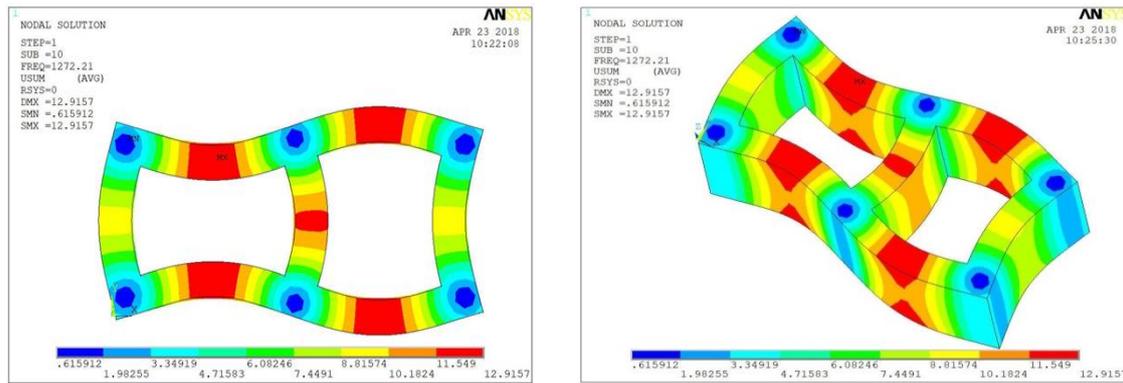


Figura 5.17 – Décimo modo de vibração com frequência 1292,20 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-20

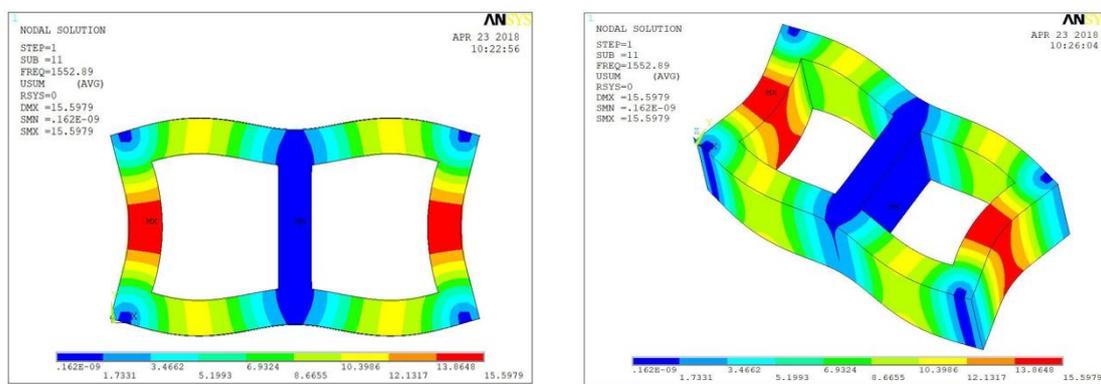


Figura 5.18– Décimo primeiro modo de vibração com frequência 1552,89 Hz de blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural da família M-20

5.1.5. Resultados de compressão dos blocos

Por fim, ainda foram realizados ensaios à compressão nos blocos de concreto objetivando estabelecer uma correlação entre as resistências dos blocos aos seus respectivos espectros encontrados experimentalmente via Técnica de Excitação por Impulso e analisados teoricamente segundo modelagem via ANSYS®. Buscando-se assim, avaliar a conformidade do ponto de vista da resistência à compressão via método tradicional.

A NBR 6136 (2016) permite estimar a resistência característica do bloco, quando há o valor do desvio padrão da fábrica por meio da Equação 5.1:

$$f_{bk,est} = f_{bm} - 1,65 \cdot S_d \quad \text{Eq. 5.1}$$

Sendo:

$f_{bk,est}$ = a resistência característica estimada da amostra (MPa);

f_{bm} = resistência média da amostra (MPa);

S_d = desvio-padrão do fabricante.

A NBR 6136 (2016) afirma que para determinação do desvio padrão de fábrica deve-se separar uma amostra de no mínimo 30 unidades.

Como visto não é o caso do presente estudo devido ao grupo da família M-15 ter somente 26 blocos conformes e seis blocos não conformes ensaiados, e a família M-20 ter somente 23 blocos conformes e cinco não conformes ensaiados.

Todavia, ainda que inferior a 30 unidades, os cálculos foram realizados segundo a NBR 6136 (2016) para obtenção da resistência à compressão característica dos blocos e são apresentados mais a seguir.

Dessa forma, para se obter o valor estimado de resistência à compressão característica dos blocos ($f_{bk,est}$), e sabendo que a NBR 12118 (2014) indica que a resistência à compressão individual deve ser obtida dividindo-se a carga máxima em Newtons pela área bruta dos blocos em mm², são apresentados na Tabela 5.7 os resultados das resistências à compressão simples obtida para cada bloco.

Tabela 5.7 – Resistência à compressão simples dos blocos (F/A_{bruta} em MPa)

Blocos	Resistência (MPa)						
BPC01	7,03	BPNC03	4,22	BGC01	3,77	BGNC08	1,90
BPC02	5,23	BPNC06	4,51	BGC02	2,26	BGNC11	2,62
BPC03	3,97	BPNC07	3,31	BGC03	2,86	BGNC16	3,92
BPC04	5,06	BPNC11	5,05	BGC04	3,25	BGNC18	3,35
BPC05	5,19	BPNC17	2,65	BGC05	3,75	BGNC20	2,27
BPC06	5,12	BPNC18	3,82	BGC06	3,67		
BPC07	5,17			BGC07	2,62		
BPC08	4,90			BGC08	5,18		
BPC09	4,25			BGC09	3,46		
BPC10	4,89			BGC10	3,84		
BPC11	5,33			BGC11	3,32		
BPC12	4,50			BGC12	2,14		
BPC13	5,33			BGC13	3,45		
BPC14	5,24			BGC14	4,01		
BPC15	5,21			BGC15	3,27		
BPC16	3,64			BGC16	3,91		
BPC17	4,99			BGC17	3,78		
BPC18	4,83			BGC18	3,67		
BPC19	4,01			BGC19	3,73		
BPC20	3,33			BGC20	3,09		
BPC21	3,20			BGC21	4,00		
BPC22	4,70			BGC22	3,58		
BPC23	4,27			BGC23	3,98		
BPC24	5,41						
BPC25	4,19						
BPC26	4,05						

Após a realização dos ensaios à compressão simples nos blocos (f_b), pôde-se estimar o valor da resistência média característica à compressão dos blocos (f_m).

A média aritmética (f_{bm}) dos valores de f_b encontrados para cada grupo de blocos foi (Tabela 5.8):

Tabela 5.8 – Resistência média à compressão dos blocos (f_{bm})

Blocos	Médias (MPa)
BPC	4,73
BPNC	3,92
BGC	3,50
BGNC	2,81

Para isso, foi calculado o desvio padrão de cada grupo (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Desvio padrão das resistências dos blocos (S_d)

Blocos	Desvio Padrão (MPa)
BPC	0,796
BPNC	0,814
BGC	0,642
BGNC	0,818

De posse dos valores de resistência média dos blocos é possível se obter o $f_{bk,est}$ encontrando o desvio padrão (Tabela 5.9) por meio da Curva Estatística de Gauss e aplicar na equação (Eq. 5.1).

Diante disso, a resistência à compressão característica estimada dos blocos são apresentadas na Tabela 5.10:

Tabela 5.10 – Resistência característica à compressão estimada dos blocos

Blocos	$f_{bk,est}$ (MPa)
BPC	3,43
BPNC	2,58
BGC	2,44
BGNC	1,47

Logo, a resistência característica estimada do lote apresentada foi de 3,43MPa para os blocos conformes da família M-15; 2,58 para os blocos não conformes da família M-15; 2,44 para os blocos conformes da família M-20; e 1,47 para os blocos não conformes da família M-20.

5.2. Análise dos resultados

5.2.1. Módulo de elasticidade do material dos blocos

O valor médio indicado para o módulo de elasticidade utilizado na modelagem dos blocos de concreto, de ambas as famílias, foi de 7,24 GPa e 11,84 GPa para os blocos M-15 e M-20, respectivamente.

Embora os prismas tivessem em suas composições o mesmo traço e o mesmo peso específico, os módulos de elasticidade encontrados tiveram valores diferentes, uma variação de 4,6 GPa ou +63,53% em relação aos blocos da família M-15, que apresentou uma menor dispersão entre os analisados conforme (Tabela 5.2).

Isto pode ser justificado, em tese, pela não uniformidade do processo de prensagens na etapa de fabricação. Afinal os blocos de concreto para alvenaria estrutural são blocos secos, vibro-prensados onde se verifica vazios internos sendo algumas partes possível até não haver contato entre o aglomerante e o agregado, como mostra a Figura 5.26 extraída de Mohamad et al (2011).

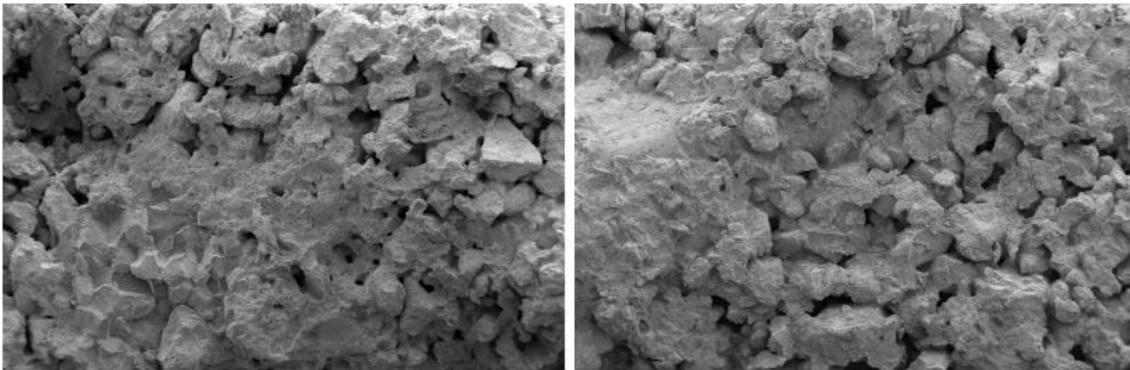


Figura 5.19 – Microestrutura de um bloco de concreto para alvenaria estrutural (MOHAMAD et al. (2011))

A estrutura não uniforme e a quantidade de vazios dos blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural talvez possam influenciar nessa dificuldade em estimar um único módulo de elasticidade para todas as unidades. Por esse motivo, buscou-se estimar os módulos a serem utilizados nos blocos de forma experimental.

A estimativa experimental do módulo de elasticidade do material em concreto se demonstrou fidedigna uma vez que a utilização do valor do módulo na modelagem numérica do prisma resultou em valores de frequência fundamental próximos do obtido experimentalmente.

Dessa forma, foi possível utilizar posteriormente os módulos estimados encontrados experimentalmente na modelagem numérica dos blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural.

Diante dos resultados obtidos, percebeu-se que o programa Sonelastic® é capaz de estimar o módulo de elasticidade em peças de geometrias regulares advindos do material de concreto utilizado para fabricação de blocos estruturais para alvenaria estrutural.

5.2.2. Espectros via TEI e a RUS

Em relação aos espectros dos blocos conformes, estes apresentaram-se, em geral, de forma mais uniforme, com picos de frequências próximos (comparando os espectros de todos os blocos conformes, analisando cada família separadamente), ao passo que os espectros dos blocos não conformes apresentaram uma maior variabilidade da resposta .

Nos espectros apresentados nas Figuras 5.2 e 5.4 foi possível observar um padrão nas respostas dos blocos conformes de cada família. Dessa forma, mesmo que as amplitudes cheguem a mudar por estar relacionada com a intensidade da excitação, as frequências de ressonância permanecem sempre próximas.

O mesmo não é observado nos gráficos das Figuras 5.3 e 5.5, pois não há um padrão nos espectros dos blocos não conformes. Isso pode ser justificado devido ao fato de que cada amostra apresentou diferentes tipos de danos e em diferentes locais ao longo do bloco.

Comparando-se os gráficos dos espectros dos blocos conformes e não conformes de cada família, percebe-se que os primeiros picos de ressonância dos blocos não conformes se apresentaram em frequências naturais menores.

Acredita-se que este fato deve estar associado à presença de danos e fissuras que, diminui a rigidez do bloco e, conseqüentemente, sua resistência.

No geral, a maioria dos blocos que foram classificados como obtendo grandes danos apresentou picos de ressonância em frequências um pouco menores que os pequenos danos, que por sua vez apresentou picos de ressonância em frequências um pouco menores que os blocos com danos quase imperceptíveis.

Isso não se aplicou a todos os casos devido às fissuras terem se apresentado em diferentes localizações e intensidades. Além do mais, a classificação dos blocos não conformes entre danos quase imperceptíveis, pequenos e grandes danos foi realizada somente por meio de uma inspeção visual.

Por esse motivo, para que seja possível correlacionar os espectros à localização dos danos presentes nos blocos, deve-se realizar ensaios futuros com danos controlados.

Também foi possível observar que as amplitudes são predominantemente menores nos espectros dos blocos não conformes de ambas as famílias. Cabe ressaltar que, apesar de a aplicação da força não ter sido de forma controlada, a excitação foi realizada por uma única pessoa e com o mesmo excitador, buscando sempre aplicar uma intensidade semelhante.

A menor amplitude nos espectros dos blocos não conformes também pode indicar a presença de maior amortecimento, característica inerente a peças fissuradas.

Em relação aos espectros padrões obtidos (Figura 5.6 e Figura 5.8) para os blocos conformes das famílias M-15 e M-20, respectivamente, os mesmos apresentaram-se de forma visivelmente distinta.

Os blocos conformes da família M-15 apresentaram três picos em frequências mais altas, mas com amplitudes mais baixas, ao passo que os blocos conformes da família M-20 apresentaram somente dois picos ressonantes em frequências mais baixas e amplitudes mais altas.

Os blocos da família M-15 são mais compactos e possuem menos massa que os da família M-20 na ordem de 42,7%. Esses blocos ainda apresentaram o módulo de elasticidade em média 63% menor que os blocos da família M-20.

Embora apresentando um módulo de elasticidade bem menor, o que indicaria frequências naturais maiores, a incidência da menor massa se sobrepôs, percebendo-se assim, frequências mais altas em relação aos blocos da família M-20.

Os valores obtidos na Tabela 5.5 indicam que os blocos conformes da família M-15 tiveram em média picos de ressonância mais relevantes nas frequências de $1535,87 \pm 14,73\text{Hz}$ com variação de 0,95%, de $2254,82 \pm 59,13\text{Hz}$ com variação de 2,62% para o segundo pico e $2779,50 \pm 63,70\text{Hz}$ com variação de 2,29% para o terceiro pico.

No geral, o coeficiente de variação dos picos da família M-15 foi considerado pequeno. Isso demonstra que todos os blocos ensaiados apresentaram picos de ressonância associados a frequências próximas.

Vale salientar que nem todos os blocos conformes da família M-15 apresentaram pico de ressonância relevante na frequência média de $1535,87\text{Hz}$. Dos 26 ensaiados, 11 blocos não apresentaram. Foram: BPC 03, 05, 09, 10, 13, 15, 16, 17, 19, 20 e 22. Essa quantidade representa aproximadamente 42% da amostra.

Alguns blocos conformes da família M-15 apresentaram picos duplos na frequência média de $2779,50\text{Hz}$. Foram eles: BPC 05, 10, 13, 15, 16, 19 e 20,

representando aproximadamente 27% da amostra de 26 blocos. Tais picos duplos podem ser notados nos respectivos espectros presentes no Apêndice A.

Foi possível perceber que todos esses blocos que apresentaram picos duplos na terceira frequência não apresentaram picos relevantes na primeira frequência, mas nem todos os blocos que deixaram de apresentar picos na primeira frequência apresentaram picos duplos. Foram: BPC 03, 09, 17 e 22.

A ausência do primeiro pico nos blocos conformes da família M-15 pode ser melhor entendida após a análise dos modos de vibração (item 5.2.4 do Capítulo 5).

Já os picos duplos podem indicar realmente frequências próximas ou a realização do ensaio de forma errada, como uma excitação dupla ou de forma prolongada. Entretanto, acredita-se que o ocorrido pode estar associado a modos de vibração muito próximos, uma vez que cada bloco foi ensaiado seis vezes.

Em relação aos blocos da família M-15 não conformes, cada um apresentou um tipo e profundidade diferente de fissura. Porém, a maioria dos danos se deu nas paredes longitudinais próximos às paredes transversais.

Quanto às frequências dos blocos não conformes da família M-15, não foi notado um padrão, já que cada fissura se apresentou de forma diferente. Percebeu-se que os picos de ressonância se deram em frequências predominantemente menores com amplitudes consideravelmente baixas, por mínima que fosse a fissura presente.

O bloco não conforme BPNC 07 da família M-15 foi classificado como com danos quase imperceptíveis por não apresentar fissuras em sua estrutura, apenas uma superfície com material levemente esfarelado (Figura 4.3). O espectro indicou dois picos mais relevantes que se deram em frequências relativamente próximas aos dos blocos conformes da mesma família, mas ainda menores na ordem de 100Hz, sendo elas: 2112,57Hz e 2603,38Hz.

A maioria dos blocos não conformes da família M-15 apresentaram picos com amplitudes consideravelmente mais baixas. Isso pode se dar devido à presença de fissuras, o que causa um alto amortecimento advindo do atrito das paredes dos blocos entre as fissuras.

Em se tratando dos blocos da família M-20 as frequências associadas aos picos de ressonância foram 1292,20Hz no primeiro pico, com 24,98Hz de

desvio padrão e variação de 1,93%. O segundo pico se deu na frequência 1655,11Hz com 50,66Hz de desvio padrão e 3,06% de variação.

O coeficiente de variação dos picos da família M-20 foi considerado pequeno. Isso demonstra que todos os blocos ensaiados apresentaram picos de ressonância associados a frequências próximas.

Somente o bloco conforme BGC 05 da família M-20 indicou comportamento espectral típico dos blocos não conformes, se apresentando de forma não uniforme e com picos mal definidos, o que representou aproximadamente 4% do total da amostra.

O BGC 05 apresentou um pico ressonante na frequência de 105,47 Hz, um mais relevante na frequência 1467,32Hz de amplitude mínima, e um pico em 3853,38Hz. Tal fato pode indicar alguma desconformidade não perceptível por meio de uma inspeção visual.

Somente o bloco conforme BGC08 da família M-20 apresentou pico duplo na frequência de 1654,52Hz. O mesmo bloco apresentou o primeiro pico na frequência indicada normalmente pelos outros blocos conformes da mesma família.

Quanto aos blocos não conformes da família M-20, todos os danos se apresentaram nas paredes longitudinais. Na maioria da amostra os danos presentes eram menores quando comparado aos identificados nos blocos da família M-15, mas apresentaram espectros com maiores diferenças entre os conformes e não conformes.

Alguns blocos não conformes da família M-20 classificados com grandes e pequenos danos nas paredes longitudinais apresentaram espectros com picos de amplitudes consideravelmente menores em relação aos outros não conformes da família M-20, são eles: BGNC 03, 05, 16, 17, 18, 19 e 20. Isso pode indicar que eles tiveram um amortecimento maior em comparação aos outros blocos não conformes devido a um dano.

Os blocos não conformes BGNC 06 e 11 classificados com danos quase imperceptíveis apontaram espectros com comportamento parecido aos conformes da mesma família, apresentando frequências próximas. Essas frequências próximas podem indicar que a rigidez do bloco não foi muito afetada, mesmo com a presença de danos.

O bloco não conforme BGNC 06 da família M-20 mostrou apenas um pico relevante com frequência de 1644,74 Hz, valor próximo ao segundo pico comumente presente nos blocos conformes da mesma família.

A ausência do primeiro pico no BGNC 06 pode ser melhor entendida após a análise dos modos de vibração (item 5.2.4 do Capítulo 5).

O bloco não conforme BGNC11 da família M-20 apresentou picos ressonantes nas frequências 1260,44 Hz e 1570,59 Hz, valores próximos aos dos blocos conformes.

O comportamento espectral do bloco mesmo fissurado apresentando frequências próximas aos blocos íntegros pode ser melhor entendido após a análise dos modos de vibração (item 5.2.4 do Capítulo 5).

Ainda em relação aos blocos não conformes da família M-20, os BGNC 01, 03, 05, 09, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20 apresentaram picos em amplitudes tão baixos que precisaram ter as escalas dos gráficos alteradas para que fosse possível identificá-los.

Todos esses blocos foram caracterizados com pequenos e grandes danos (nenhum com danos quase imperceptíveis). Os BGNC 06 e 11 apresentaram danos quase imperceptíveis e picos de ressonância de amplitudes mais relevantes. Essa baixa amplitude pode indicar a presença de amortecimento devido ao atrito realizado pelas paredes dos blocos fissurados.

Todos os blocos não conformes da família M-20 apresentaram picos de aproximadamente 1500Hz, o que o aproxima do pico de 1655,11Hz encontrado nos blocos conformes da família M-20. Porém, a maioria desses picos vieram acompanhados de picos duplos, triplos ou mais, com um espectro bastante desuniforme.

Isso indica que o primeiro pico comum aos blocos conformes da família M-20 também foi excitado nos blocos não conformes devido ao fato de que o dano presente não impossibilita o bloco não conforme de deformar no modo correspondente (Figura 5.17).

5.2.3. Espectros via TEI x Acelerômetro

A eficácia da Técnica de Excitação por Impulso com o uso do microfone foi ratificada pelos ensaios com o uso do acelerômetro. A partir da análise dos

espectros presentes nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 foi possível perceber em todos os casos, que os espectros de cada bloco obtidos via microfone apresentaram picos na mesma frequência que os obtidos via acelerômetro, independentemente de o bloco ser conforme ou não.

Este fato indica que, embora o microfone também capte as frequências naturais do ambiente ao qual a amostra está sendo ensaiada, os filtros do sinal implementados no programa Sonelastic® se demonstraram adequados, possibilitando utilizar a solução com a finalidade proposta pela pesquisa, de tentar caracterizar os blocos de concreto vazados em uma linha de produção.

5.2.4. Análise modal dos blocos

Determinado o espectro padrão dos blocos experimentalmente, se buscou então analisar quais as frequências mais próximas àquelas encontradas via Técnica de Excitação por Impulso que se destacaram nos espectros padrão das famílias M-15 e M-20, e quais os prováveis modos de vibração associados a elas.

As frequências naturais encontradas por meio das análises modais numéricas foram apresentadas nos ANEXOS A e B.

Os primeiros modos de vibração com frequências próximas de zero são as frequências associadas ao corpo rígido, elas só apresentam movimento de rotação, sem deformação, logo elas foram desconsideradas da análise do espectro.

Para ambas as famílias, a identificação dos modos de vibração e a suas frequências associadas foram importantes especialmente para a análise dos blocos não conformes, possibilitando entender a ausência de algumas frequências nos espectros desses blocos.

Analisando os modos de vibração associados aos picos de ressonância encontrados numericamente nos blocos da família M-15 (Figuras 5.14, 5.15 e 5.16), percebeu-se que cada modo de vibração correspondeu a uma frequência de deformação diferente.

O primeiro pico de ressonância do bloco da família M-15 modelado se deu na frequência 1683,76Hz e teve o modo de vibração de número 10 associado a ele. O segundo pico se deu na frequência 2149,83Hz com o modo

de vibração de número 14 associado a ele, e, por fim, o terceiro pico se deu na frequência de 2789,38Hz com o 18º modo de vibração associado a ele.

O modo de vibração da primeira frequência ressonante identificada dos blocos da família M-15 apresentou de forma mais evidente a deformação longitudinal, já o modo referente à segunda frequência ressonante destacou a deformação torcional, e o terceiro também uma deformação torcional do bloco. Nos três modos de deformação, se percebeu excitação nas paredes longitudinais.

Tendo em vista a Figura 4.3, todos os blocos não conformes da família M-15 apresentaram fissuras nas paredes longitudinais (frontal e/ou posterior). Essas fissuras podem ter sido responsáveis pela ausência dos picos de ressonância nas mesmas frequências naturais presentes nos blocos que não apresentaram nenhum tipo de dano. Essa descontinuidade pode ter impossibilitado o bloco de vibração nos modos indicados para blocos conformes na modelagem numérica.

Tal observação pode justificar também o fato de os blocos conformes da família M-15 BPC 03, 05, 09, 10, 13, 15, 16, 17, 19, 20 e 22 terem apresentado ausência do primeiro pico ressonante na frequência natural 1535,87Hz captado pelo microfone via Técnica de Excitação por Impulso pela presença de pequenas descontinuidades não perceptíveis em uma inspeção visual.

Da mesma forma que esse pico de ressonância na frequência média na ordem de 1500 Hz se apresentou nos blocos não conformes BPNC 01, 06, 08, 09, 11, 12, 13, 14, 16, 17 e 20 da família M-15 com uma amplitude mínima, comportamento similar ao apresentado pelos blocos conformes da mesma família.

Esse primeiro pico indicado tanto nos blocos conformes como nos não conformes da família M-15 sugere que as fissuras presentes nos blocos não conformes estavam localizadas numa região insensível ao décimo modo de vibração, o que não impossibilitou a excitação na frequência correspondente ao modo, como indicado na Figura 5.14.

Desses blocos não conformes da família M-15 que apresentaram picos na frequência média de 1500Hz, pode-se destacar o BPNC 11, que apresentou também pico na frequência 1570,59 Hz.

Analisando a Figura 4.3, percebe-se que há apenas uma fissura mínima localizada na parede longitudinal do BPNC 11. Provavelmente essa fissura está localizada em uma região insensível aos modos de vibração 10 e 11 (Figura 5.17 e 5.18) dos blocos da família M-20, o que possibilitou que ambos os modos fossem excitados.

Analisando os modos de vibração associados aos picos de ressonância encontrados numericamente nos blocos da família M-20 (Figuras 5.17 e 5.18), percebeu-se que cada modo de vibração correspondeu a uma frequência de deformação diferente, sendo ambas de deformação longitudinal.

Os blocos da família M-20 também apresentaram fissuras predominantemente localizadas nas paredes longitudinais (frontal e/ou posterior).

Tanto os blocos conformes da família M-15 como o da família M-20 apresentaram pico de ressonância no mesmo modo de vibração (modo 10), porém em frequências diferentes.

O primeiro pico de ressonância do bloco da família M-20 modelado se deu na frequência 1333,67Hz e teve o modo de vibração de número 10 associado a ele. O segundo pico se deu na frequência 1627,91Hz com o modo de vibração de número 11.

De forma mais clara, a relação entre a presença de danos e a ausência de picos pode ser melhor esclarecida com a análise das Figuras 4.4, 5.17 e 5.18.

Com a Figura 4.4, notou-se que todos os dos danos presentes nos blocos não conformes da família M-20 também se deram nas paredes longitudinais, bem próximos às paredes transversais.

Em análise à Figura 5.18, é possível notar que a parede transversal do meio do bloco é uma região menos sensível com a excitação longitudinal em blocos da família M-20, especificamente nesse décimo modo de vibração.

Logo, se houvesse uma fissura nela, o bloco iria apresentar um pico de ressonância no modo 11 com a frequência média de 1552,89Hz associada da mesma forma que um bloco íntegro.

Por outro lado, analisando a Figura 5.17 pode-se notar que a região central da parede do meio do bloco é bem sensível, portanto, o espectro

provavelmente não apresentaria pico de ressonância na frequência de 1272,21 Hz associada ao décimo modo.

Portanto, para encontrar outros modos de vibração onde as fissuras presentes nas paredes longitudinais próximas às paredes transversais (região predominante da aparição de fissuras), vale testar a eficácia dos ensaios da Técnica de Excitação por Impulso em blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural também em outros modos de excitação, como o transversal e torcional.

5.2.5. Compressão dos blocos

Para finalizar as análises do programa experimental, ensaios à compressão em alguns blocos foram realizados para tentar correlacionar as suas respectivas resistências aos espectros encontrados experimentalmente.

Todos os blocos conformes foram ensaiados e os blocos não conformes foram selecionados com o critério de apresentarem menos fissuras. Foram escolhidos os blocos BPNC 03, 06, 07, 11, 17 e 18 da família M-15 e BGNC 08, 11, 16, 18 e 20 da família M-20.

Embora a amostra da pesquisa não tenha tido no mínimo 30 blocos para encontrar o desvio padrão de fábrica como sugerido pela NBR 6136 (2016), a pesquisa estimou o desvio padrão e, aplicado à Equação 5.1 junto com a resistência média dos blocos, apresentou a resistência característica à compressão estimada para cada grupo ensaiado.

Os blocos conformes da família M-15 apresentaram uma média de resistência de 3,72Mpa. Ainda da família M-15, os blocos não conformes apresentaram uma média de resistência de 2,87Mpa.

Os blocos conformes da família M-20 apresentaram uma média de resistência de 2,57Mpa. Para os blocos não conformes da família M-20, a resistência característica média se deu em 1,88.

As resistências médias se mostraram muito inferiores ao que se buscou para um traço de no mínimo 4MPa, inclusive em relação a alguns blocos que não apresentaram nenhum tipo de dano da família M-15 e todos os blocos conformes da família M-20.

Percebeu-se que alguns blocos fissurados apresentaram resistência característica à compressão do bloco superior a alguns blocos conformes de mesma família, como o bloco não conforme BPC 11 da família M-15 que apresentou a maior resistência, sendo ela superior à resistência dos blocos conformes BPC 03, 09, 10, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25 e 26.

Da mesma forma que o bloco não conforme BGNC 16 da família M-20, mesmo apresentando fissuras, obteve resistência à compressão maior que a maioria os blocos conformes com exceção dos BGC 08, 14, 16, 21 e 23 da família M-20.

O bloco conforme 01 da família M-15 com maior resistência característica à compressão apresentou o valor de 6,02MPa, sem picos duplos e as frequências relevantes se deram em 1554,43Hz, 2338,30Hz e 2896,15Hz.

Somente o terceiro pico do BPC01 se deu de forma levemente superior aos demais terceiros picos dos blocos conformes da família M-15, mas como dito, isso é uma questão de intensidade de aplicação da força, não interferindo na frequência natural associada ao pico.

O bloco conforme 21 da família M-15 que apresentou menor resistência característica à compressão de 2,19MPa, não apresentou picos duplos e suas frequências ressonantes foram 1558,22Hz, 2331,66Hz e 2862,82Hz. Ou seja, o bloco apresentou resistência muito inferior comparado ao BPC01 e mesmo assim obteve picos de frequências ressonantes próximos, mas amplitudes inferiores na ordem de 50% nos dois últimos picos.

O bloco não conforme da família M-15 que apresentou melhor resistência foi o BPNC11 com 3,99MPa. O bloco apresentou uma microfissura de 4cm quase imperceptível na parede longitudinal do lado direito e picos de ressonância de amplitude mínima em frequências próximas de 1500Hz, 1800Hz e 2500Hz comparado as frequências 1554,43Hz, 2338,30Hz e 2896,15Hz do bloco de maior resistência, o BPC01.

O bloco conforme 08 da família M-20 apresentou a maior resistência característica à compressão com 4,30MPa e apresentou picos duplos com frequências naturais em 1283,47Hz, 1583,01Hz e 1654,52Hz.

O bloco não conforme BGNC 08 da família M-20 apresentou a menor resistência característica à compressão do grupo, com 0,96MPa. E apresentou

picos de ressonância muito próximos, com as frequências médias em 1334,58 Hz, 1482,87Hz e 1758,56Hz.

Mesmo o bloco conforme BGC 08 da família M-20 apresentando uma resistência característica à compressão aproximadamente quatro vezes maior que a resistência do bloco não conforme BGNC 08 da mesma família, o bloco BGNC 08 apresentou frequências próximas aos blocos conformes.

Embora os espectros dos blocos BGC 08 e BGNC 08 tenham apresentado essas frequências próximas, eles se comportaram de forma diferente.

O bloco não conforme BGNC 08 apresentou amplitude consideravelmente menor, o que pode indicar a presença de amortecimento devido à presença de algum tipo de dano.

Tal fato também pode indicar que poderia haver algum tipo de descontinuidade interna no bloco conforme BGC 08 da família M-20, ou ainda, que o dano causado no BGNC 08 não estava localizada em uma região sensível à deformação do bloco (Figuras 5.17 e 5.18), possibilitando o bloco, mesmo danificado, a ser excitado nas frequências comuns aos blocos conformes.

Foi notável que não foi possível estabelecer uma correlação entre as frequências ressonantes e as resistências à compressão, pois blocos com resistências muito inferiores apresentaram picos de ressonância em frequências próximas aos blocos com resistências mais altas. Talvez seja possível estabelecer essa correlação com a utilização de uma excitação controlada com análises nas amplitudes.

Todos os blocos com picos duplos da família M-15 apresentaram resistências inferiores à 4MPa, com exceção do BPC13 que teve a resistência característica à compressão de 4,01MPa.

CAPÍTULO 6

Considerações Finais

Observou-se que o módulo de elasticidade de um prisma de geometria regular em concreto seco vibro prensado utilizado na alvenaria estrutural pôde ser estimado com a utilização da Técnica de Excitação por Impulso por meio do uso de um microfone e o sistema Sonelastic[®].

Embora o uso de um acelerômetro proporcione uma resposta mais específica em relação ao bloco, a presente pesquisa apostou na utilização do captador acústico (microfone) por possibilitar um aparato de ensaio fácil e prático, já que não há a necessidade de acoplamento do transdutor.

Diante disso, notou-se que é possível realizar o ensaio da Técnica de Excitação por Impulso para obtenção das frequências naturais em blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural com o uso do microfone, e que mesmo esse tipo de transdutor captando as frequências do ambiente ao qual o ensaio está sendo realizado, o mesmo é capaz de captar as primeiras frequências fundamentais dos blocos. Esse tipo de ensaio se torna muito mais prático e rápido que com o uso do acelerômetro.

Analisando os resultados do programa experimental, observou-se que os espectros das respostas dos blocos conformes tanto da família M-15 (Figura 5.2) como M-20 (Figura 5.4) se comportaram de maneira parecida, com picos de ressonância próximos, e seguiram um padrão, mudando apenas as amplitudes, que estão relacionadas à intensidade da excitação. O que indica ser possível se obter um espectro padrão para a utilização do Espectroscopia de Ultrassom Ressonante no contexto dos blocos de concreto.

Os blocos não conformes apresentaram os danos apenas nas paredes longitudinais. Esses defeitos alteraram os picos de ressonância para frequências menores devido à diminuição da rigidez, com amplitudes

consideravelmente menores devido à presença de um maior amortecimento proporcionado pelo atrito realizado pelas paredes dos blocos entre as fissuras.

Sugere-se então que os espectros para blocos íntegros da família M-15 devem apresentar picos de ressonância em frequências médias da ordem de $2254,82 \pm 59,13\text{Hz}$ com variação de 2,62% para o primeiro pico e $2779,50 \pm 63,70\text{Hz}$ com variação de 2,29%. A princípio, o primeiro pico de $1535,87\text{Hz}$ foi desprezado devido a não aparecer em todos os blocos conformes.

De forma análoga sugere-se que o espectro para blocos íntegros da família M-20 devam apresentar picos de ressonância em frequências da ordem de $1292,20 \pm 24,98\text{Hz}$ com variância de 1,93% para o primeiro pico e $1655,11 \pm 50,66\text{Hz}$ com variância de 3,06% para o segundo pico.

Isso indica que os blocos que futuramente vierem a ser ensaiados pela Técnica de Excitação por Impulso e não apresentarem picos de ressonância em frequências próximas aos picos indicados, tanto para família M-15 como para a família M-20, podem apresentar algum tipo de descontinuidade, mesmo que não sendo identificada apenas por meio de uma inspeção visual.

Na análise modal, o bloco conforme da família M-15 apresentou picos de ressonância em três modos de vibração, com deformação no modo longitudinal (primeiro) e torcional (segundo e terceiro pico). Já o bloco da família M-20 apresentou somente picos de ressonância em dois modos de vibração, ambos na deformação longitudinal.

Ainda na modelagem numérica, os primeiros picos de ambas as famílias apresentaram modos de vibração com a mesma deformação longitudinal, porém associadas a frequências naturais diferentes (Décimo modo de vibração, com a mesma deformação longitudinal, porém com frequências associadas de $1683,76\text{Hz}$ para a família M-15 e $1272,21\text{Hz}$ para a família M-20).

Essa mesma excitação em modos iguais, mas em frequências diferentes (família M-15 com picos de ressonância em frequências naturais maiores, comparando-se aos picos apresentados pela família M-20) pode indicar a incidência da massa nas frequências naturais de um corpo.

Notou-se também que apesar de alguns dos blocos não conformes indicarem picos de ressonância em frequências próximas aos dos blocos conformes, os espectros se apresentaram de forma visivelmente diferentes,

com presença de vários picos duplos e triplos, e amplitudes consideravelmente mais baixas.

A presença de picos de ressonância em frequências próximas tanto em blocos íntegros como fissurados (não deveria aparecer em blocos não conformes) pode estar associado aos modos de vibração excitados pelo ensaio longitudinal. Pois, a localização das fissuras que se deu, na maioria, nas paredes longitudinais dos blocos estarem em uma região menos sensível da deformação devido à excitação longitudinal.

Por esse motivo, para que seja possível captar os danos presentes nos blocos, numa localização mais próxima às paredes transversais, local onde a maioria se apresentou, vale testar a eficácia dos ensaios da Técnica de Excitação por Impulso em blocos de concreto vazado para alvenaria estrutural também em outros modos de excitação, como o transversal e torcional.

Em relação à resistência à compressão, não foi possível precisar uma relação entre esta e os espectros dos blocos.

Para se estabelecer uma correlação, ainda que empírica entre a resistência a compressão e às frequências naturais apresentadas nos espectros, sugere-se a realização de novos ensaios da Técnica de Excitação por Impulso, para resistências maiores, buscando observar se há uma alteração na faixa de frequência do espectro padrão.

Também é sugerido que futuros ensaios sejam realizados com uma amostra maior de blocos e com uma excitação controlada para avaliar melhor a influência da amplitude na resposta acústica de uma estrutura.

Cabe destacar que, apesar de o material para realização da pesquisa experimental ter sido solicitado junto a uma empresa notadamente conceituada no Estado da Paraíba, as resistências à compressão característica dos blocos de concreto foram inferiores ao esperado de 4,0 MPa para uma boa quantidade de blocos da família M-15, e todos os blocos da família M-20.

Futuros ensaios com resistências mínimas à compressão exigida em Norma devem ser realizados para que seja possível analisar melhor a relação entre resistência à compressão e espectro.

Outra sugestão é realizar ensaios da Técnica de Excitação por Impulso para obtenção das frequências naturais com o uso de blocos, além dos conformes, de não conformes com danos controlados, para que se possa

modelar tais defeitos e estimar as frequências naturais numéricas. Dessa forma, poderá ser possível correlacionar corretamente os picos de ressonância presentes nos espectros aos respectivos danos.

Por fim, devido à praticidade da utilização dos ensaios não destrutivos na construção civil, futuros estudos na área devem ser realizados para a caracterização de blocos de concreto vazados para alvenaria estrutural com o uso da Técnica de Excitação por Impulso e da Espectroscopia de Ultrassom Ressonante, garantindo a resistência à compressão característica mínima das unidades exigida por Norma e com uma intensidade de excitação controlada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. F. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura.** Dissertação para obtenção do título de mestre. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

ALMEIDA, P. A de Oliveira. **Transdutores para medida de deslocamentos lineares.** Notas de aulas das disciplinas de Análise Experimental de Estruturas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ARAÚJO, I. D. Gomes. **Análise modal operacional: métodos de identificação baseados em transmissibilidade.** Tese para obtenção do título de doutor. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15961-2 – Alvenaria estrutural – Blocos de concreto parte 2: Execução e controle de obras.** Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118 – Projetos de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6136 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12118 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

ASTM International. **ASTM C215: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens.** Estados Unidos, 2014.

ASTM International. **ASTM E2001: Standard guide for Resonant Ultrasound Spectroscopy for Defect Detection in Both Metallic and Non-metallic Parts.** Estados Unidos, 2013.

ASTM International. **ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.** Estados Unidos, 2015.

BARBOSA, Claudius de Souza. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as prioridades mecânicas do material constituinte.** Dissertação para obtenção do título de mestre. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

BORGES, Adailton Silva. **Análise modal baseada apenas na resposta – decomposição no domínio da frequência.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2006.

FRASSON, A. J. et al. **Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural.** Caderno Técnico Alvenaria Estrutural. CT-10. Suplemento da Revista Prisma. Editora Mandarin Ltda. 2010.

CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural.** UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. NEPAE – Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural. Ilha Solteira, 2006.

CORREIA, A. A. **Vibrações de sistemas com 1 grau de liberdade.** Curso de dinâmica. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2007.

COSSOLINO, L.C. PEREIRA, A. H. A. **Amortecimento: classificação e métodos de determinação.** Informativo Técnico-Científico ITC04 – Amortecimento ATCP. São Carlos, 2010. Disponível em: <
<http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/artigos/ITC04-ATCP.pdf>>

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.** Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia civil. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

DIÓGENES, H.J. F.; et al. **Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response.** Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, vol. 4, num. 5, p. 792- 813, 2011.

DRYSDALE, R.G., HAMID, A.A., and BAKER, L.R. **Masonry Structures: Behavior and Design.** Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1994.

DRYSDALE, Robert G. HAMID, Ahmad A. **Masonry Structures: Behavior and design.** 3ª edição. Boulder, Colorado, 2008.

GARCIA, P. D. **Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos.** Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia civil. Escola politécnica de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

HENDRY, A. W. **Structural Brickwork.** The Macmillan Press Ltd. Londres, 1981.

JULIANI, Lucas M. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos.** Dissertação para obtenção do título de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

JUSTE, Andrea E. **Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão.** Dissertação para obtenção do título de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

LIMA, Pedro Cunha de. **Obtenção e determinação da capacidade de amortecimento da liga Cu-14Al-4Ni pelo método de excitação por impulso.** 2013. 74 f., il. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/15686>>. Visita: 24/11/2016.

MAST, R. F. **Vibration of precast prestressed concrete floors.** PCI Journal. Nov/dez. Estados Unidos, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** Pini. São Paulo, 1994.

MOHAMAD, G. et. al. **Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibro-compactados à seco.** Revista Matéria. ISSN 1517-7076. v. 16, n.1, pp. 638-657. 2011.

MORADIAN, M. HOSSEINI P. **Evaluation of deteriorated concrete structures in aggressive environments by nondestructive methods.** Second International Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites. 11-13 April 2012.

NÓBREGA, P. G. B. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas.** Tese para obtenção do título de doutor. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

NÓBREGA, P.G.B.; HANAI, J.B. **A Análise Modal na Avaliação de Estruturas de Concreto Pré-moldado.** 1o. Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado. São Carlos, 2005.

OTANI, L.B. PEREIRA, A.H.A. **Estimativa do módulo de elasticidade estático de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso.** Informativo técnico científico ITC-07/ATCP. ATCP Engenharia Física. Jul, 2015.

PEREIRA, A. H.A. et al. **Algoritmo para determinação do amortecimento de materiais cerâmicos pela técnica das frequências naturais de vibração via excitação por impulso.** Revista Cerâmica, Órgão Oficial da Associação Brasileira de Cerâmica. Ano LVIII. Vol. 58. Abr/mai/jun, 2012.

POPOVICS, J. S. **A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete.** University of Illinois, Urbana, IL. ACI-CRC Final Report. 2008.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas/Singiresu S. Rao;** revisor técnico José Juliano de Lima Junior; tradução Arlete Simille. -- São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

- ROMAGNA, R. H. **Resistência à compressão de prisma de blocos de concreto grauteados e não grauteados.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.
- ROQUE, Joao C. Almendra. **Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria.** Braga: Universidade do Minho. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. 2002.
- SHKOLNIK, I. E. **Influence of high strain rates on stress–strain relationship, strength and elastic modulus of concrete.** Cement & Concrete Composites, v. 30, pp. 1000-1012. 2008.
- SILVA, W. J. **Estudo experimental de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos sujeitas a ações verticais.** Dissertação para obtenção do título de mestrado. UNESP. Ilha Solteira, 2003.
- SOARES, C. R. P. **Ensaio não destrutivo para a caracterização de betões de elevado desempenho reforçado com fibras.** Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia civil. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto, 2013.
- TAUIL, Carlos Alberto. NESE, Flávio José M. **Alvenaria Estrutural.** Metodologia do Projeto, detalhes, mão de obra, Normas e ensaios. Editora Pini. São Paulo, 2010.
- VILATÓ, R. R., & FRANCO, L. S. **Racionalização do projeto de edifícios em alvenaria estrutural.** (PCC - 2515 Alvenaria Estrutural). Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ANEXOS

ANEXO A – Modos de vibração e frequências naturais do bloco M-15 via ANSYS®

SET,LIST Command

File

```

**** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE ****

```

SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.0000	1	1	1	1
2	0.0000	1	1	2	2
3	0.16661E-03	1	1	3	3
4	0.22590E-03	1	1	4	4
5	0.30948E-03	1	1	5	5
6	0.40218E-03	1	1	6	6
7	821.13	1	1	7	7
8	986.93	1	1	8	8
9	1003.6	1	1	9	9
10	1683.8	1	1	10	10
11	1835.8	1	1	11	11
12	1977.8	1	1	12	12
13	1995.2	1	1	13	13
14	2149.8	1	1	14	14
15	2524.0	1	1	15	15
16	2646.3	1	1	16	16
17	2724.5	1	1	17	17
18	2789.4	1	1	18	18
19	2795.5	1	1	19	19
20	2828.0	1	1	20	20
21	3106.9	1	1	21	21
22	3306.0	1	1	22	22
23	3306.6	1	1	23	23
24	3367.8	1	1	24	24
25	3412.8	1	1	25	25
26	3435.0	1	1	26	26
27	3526.7	1	1	27	27
28	3709.9	1	1	28	28
29	3853.3	1	1	29	29
30	3865.3	1	1	30	30
31	3874.0	1	1	31	31
32	3894.9	1	1	32	32
33	3936.1	1	1	33	33
34	4071.8	1	1	34	34
35	4072.4	1	1	35	35
36	4104.6	1	1	36	36
37	4392.1	1	1	37	37
38	4458.3	1	1	38	38
39	4482.6	1	1	39	39
40	4624.5	1	1	40	40

ANEXO B – Modos de vibração e frequências naturais do bloco M-20 via ANSYS®

SET,LIST Command

File

```

**** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE ****

```

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.25478E-03	1	1	1
2	0.37424E-03	1	2	2
3	0.52994E-03	1	3	3
4	177.84	1	4	4
5	639.76	1	5	5
6	715.78	1	6	6
7	737.54	1	7	7
8	828.08	1	8	8
9	881.34	1	9	9
10	1272.2	1	10	10
11	1552.9	1	11	11
12	1905.4	1	12	12
13	1934.5	1	13	13
14	2039.4	1	14	14
15	2116.3	1	15	15
16	2318.7	1	16	16
17	2380.0	1	17	17
18	2429.5	1	18	18
19	2510.3	1	19	19
20	2598.5	1	20	20
21	2790.1	1	21	21
22	2841.2	1	22	22
23	2970.6	1	23	23
24	3159.0	1	24	24
25	3164.9	1	25	25
26	3322.2	1	26	26
27	3383.0	1	27	27
28	3526.6	1	28	28
29	3635.0	1	29	29
30	3638.4	1	30	30
31	3661.9	1	31	31
32	3734.3	1	32	32
33	3744.4	1	33	33
34	3796.5	1	34	34
35	3889.4	1	35	35
36	3988.5	1	36	36
37	4015.6	1	37	37
38	4084.0	1	38	38
39	4140.5	1	39	39
40	4420.6	1	40	40
41	4507.8	1	41	41
42	4690.7	1	42	42
43	4710.7	1	43	43
44	4881.6	1	44	44
45	4909.4	1	45	45
46	4952.5	1	46	46
47	4975.7	1	47	47

APÊNDICES

APÊNDICE A – Médias dos espectros dos blocos pequenos conformes de concreto vazado

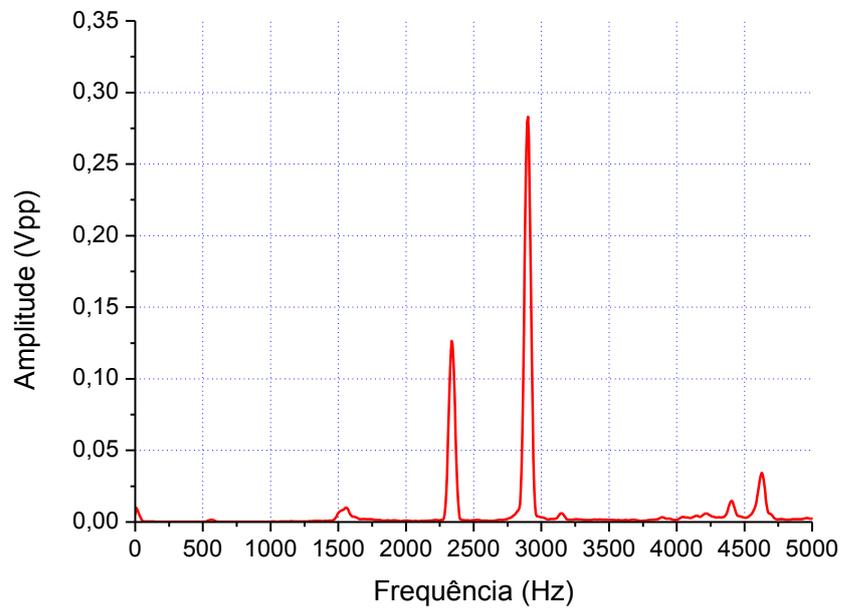


Figura A.1 – Média do BPC01

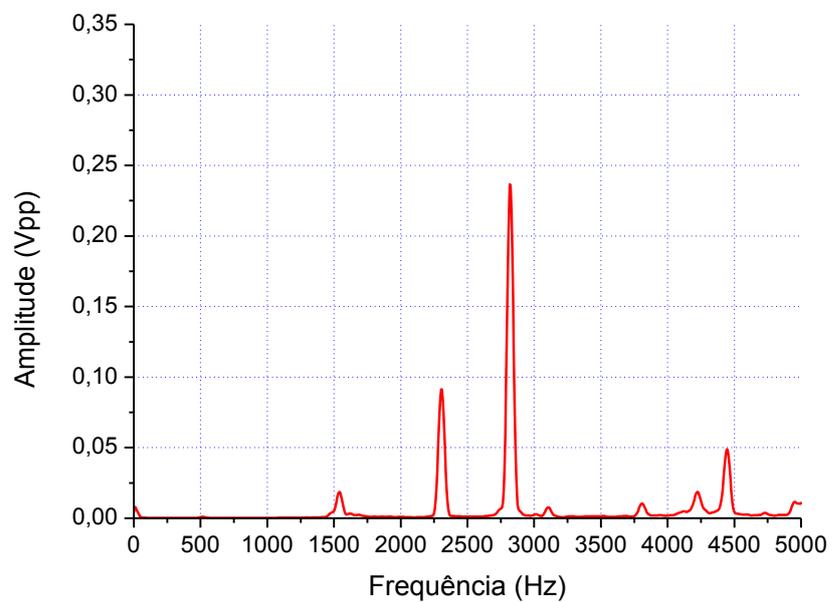


Figura A.2 – Média do BPC02

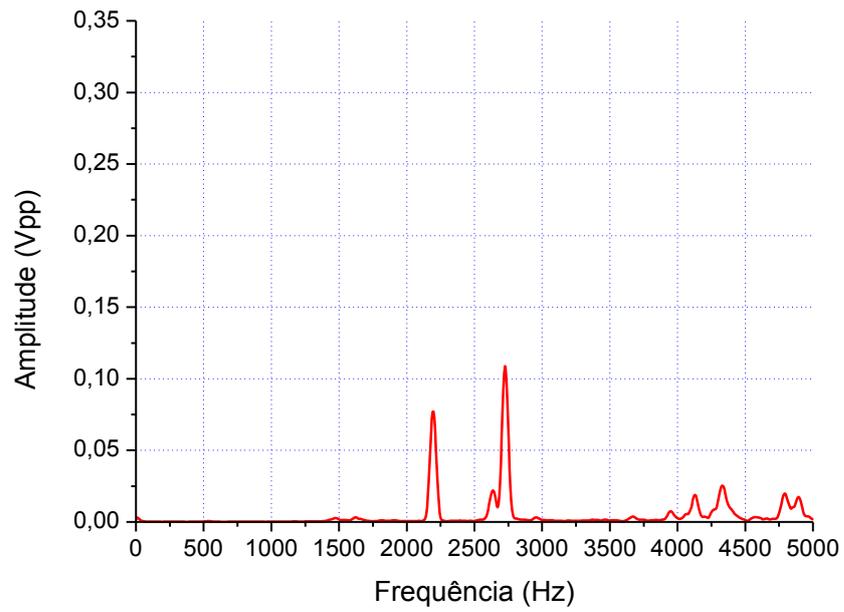


Figura A.3 – Média do BPC03

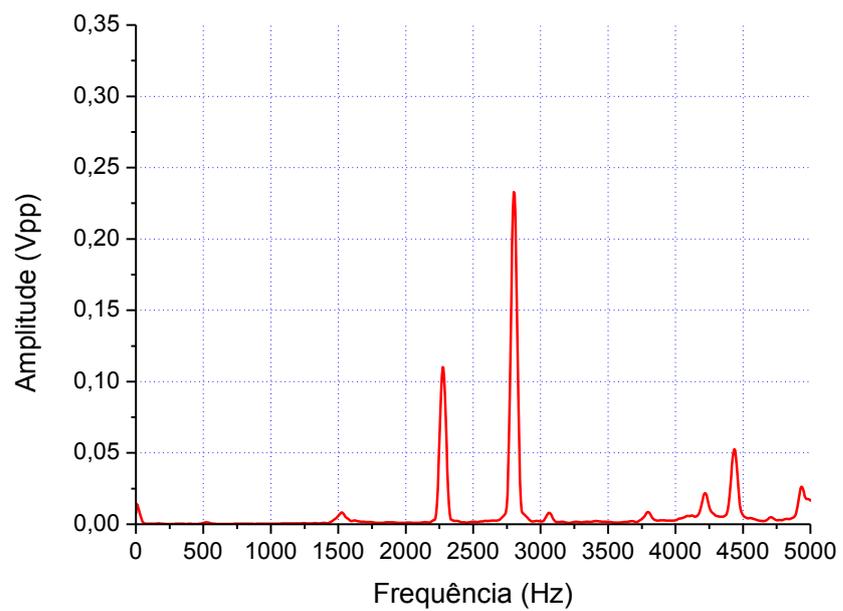


Figura A.4 – Média do BPC04

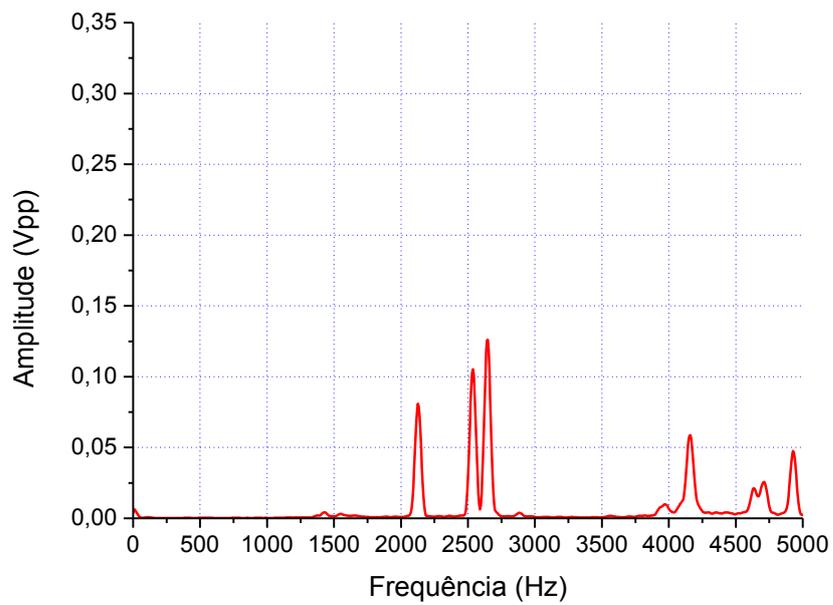


Figura A.5 – Média do BPC05

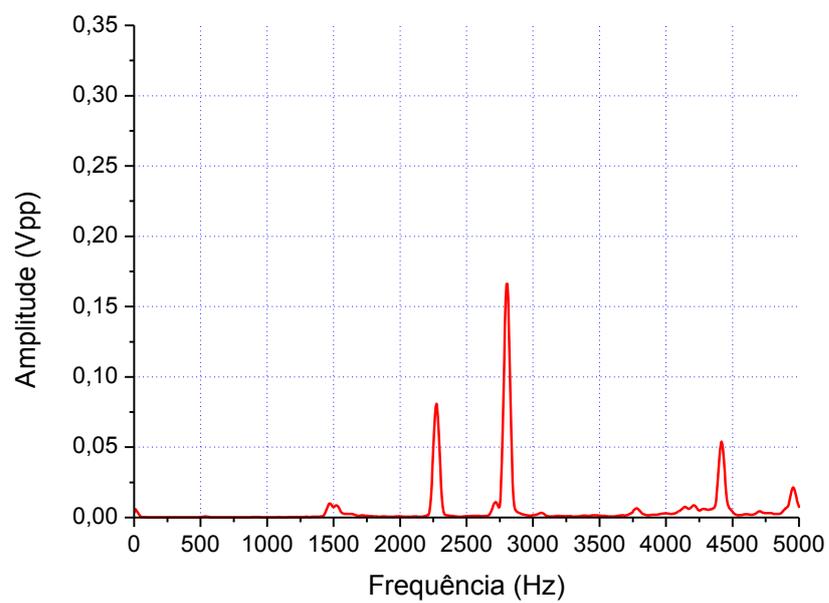


Figura A.6 – Média do BPC06

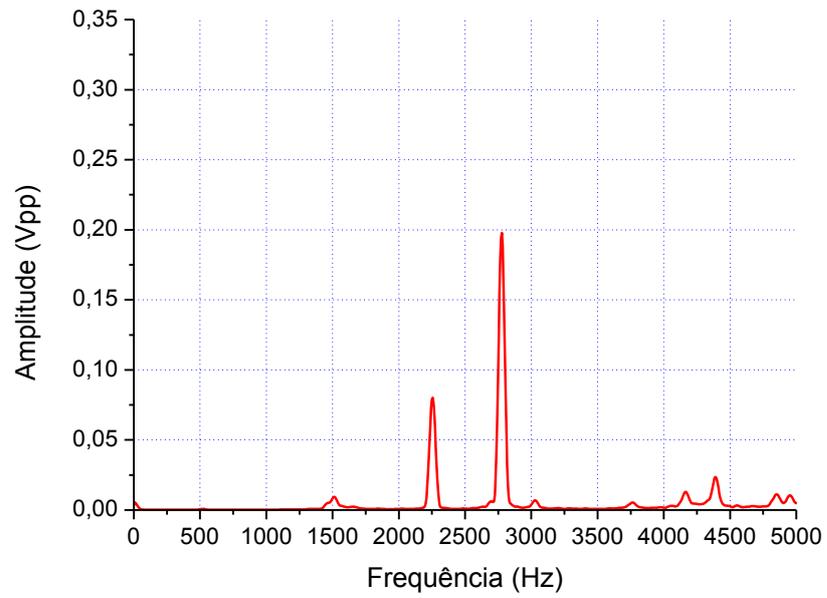


Figura A.7 – Média do BPC07

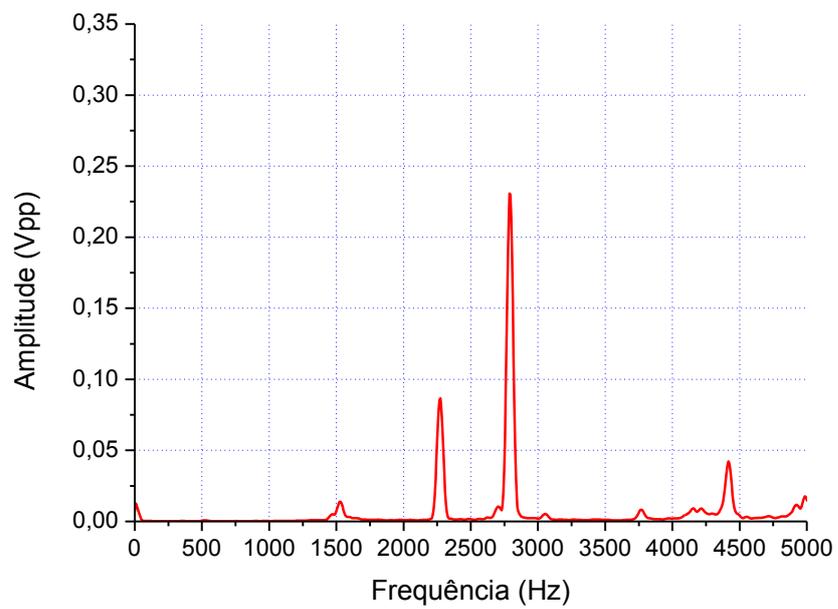


Figura A.8 – Média do BPC08

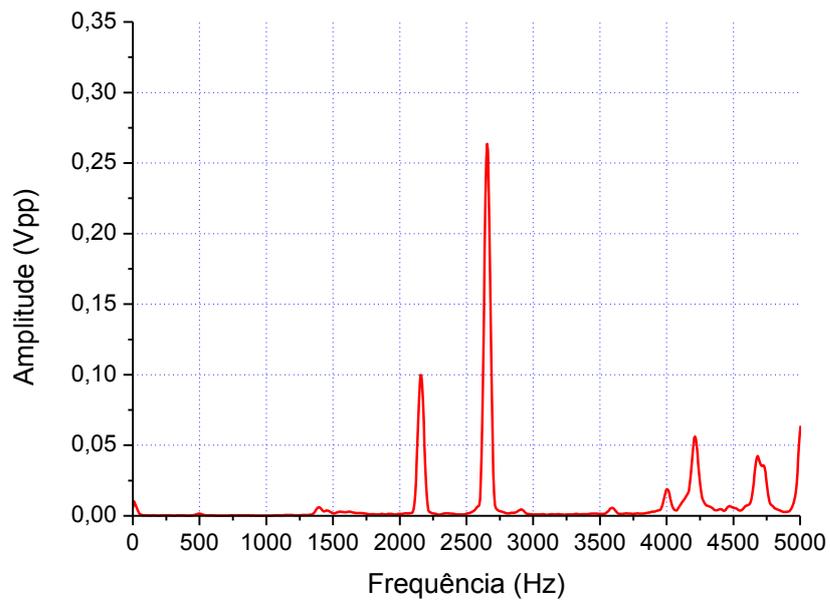


Figura A.9 – Média do BPC09

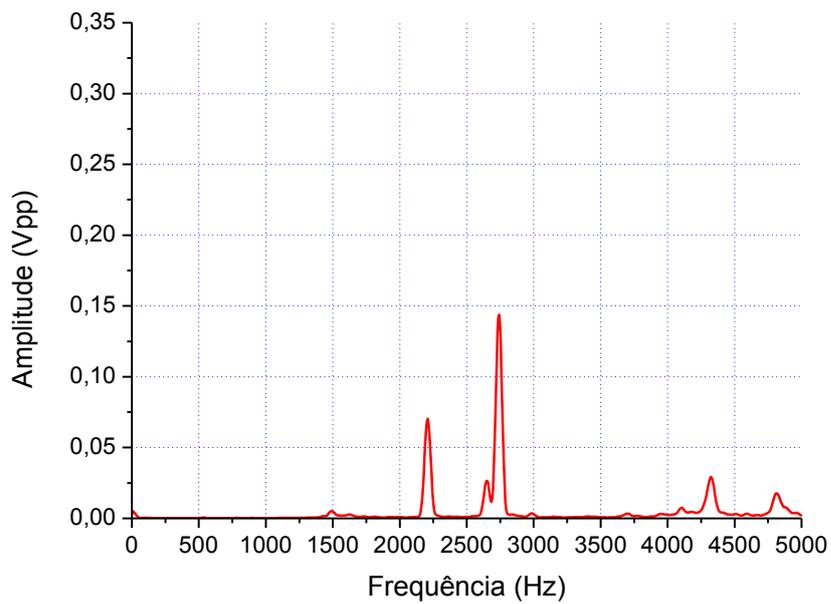


Figura A.10 – Média do BPC10

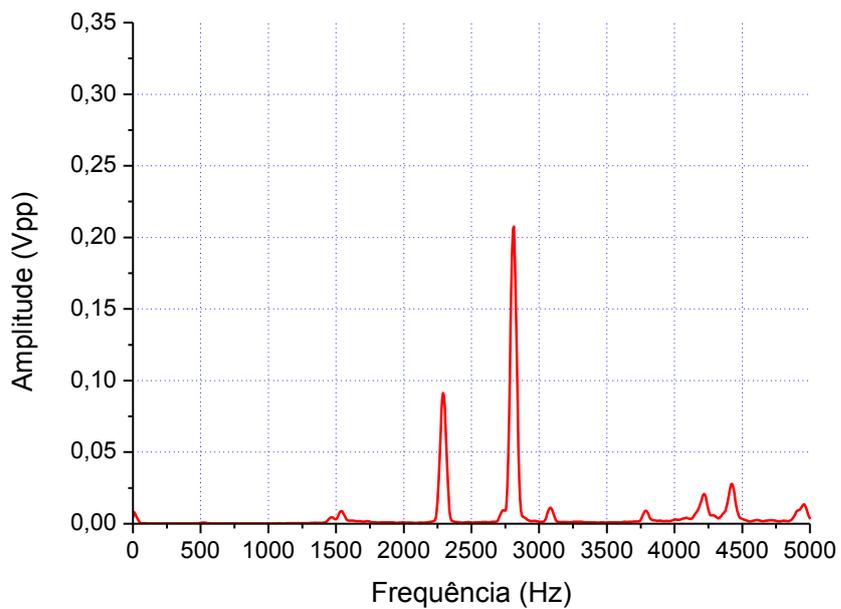


Figura A.11 – Média do BPC11

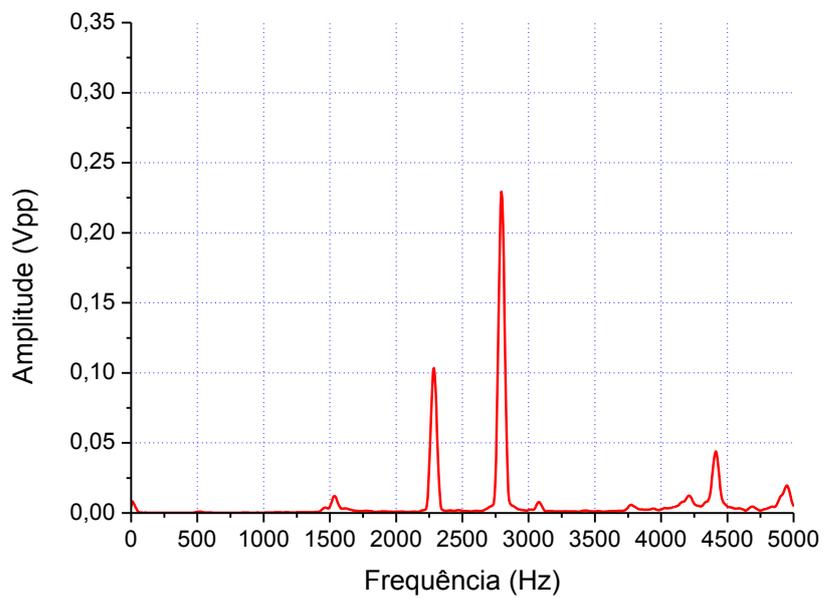


Figura A.12 – Média do BPC12

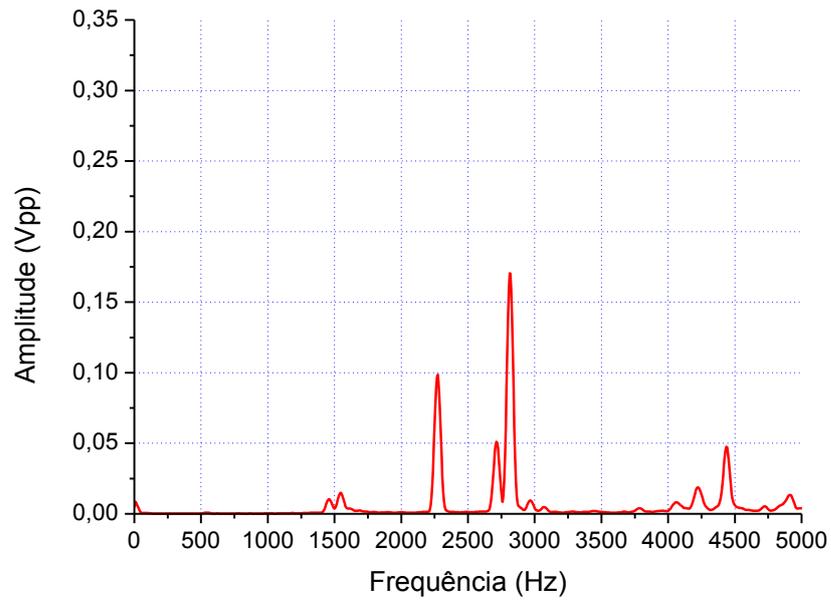


Figura A.13 – Média do BPC13

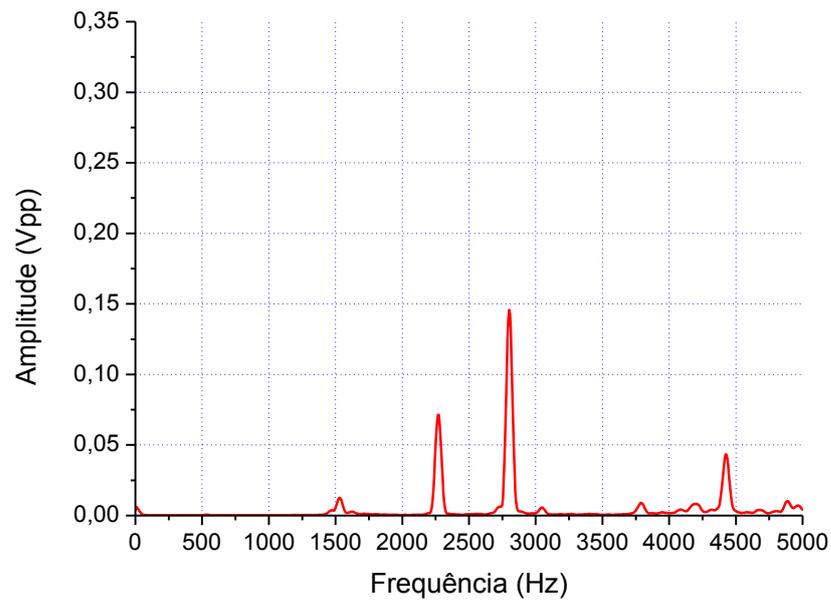


Figura A.14 – Média do BPC14

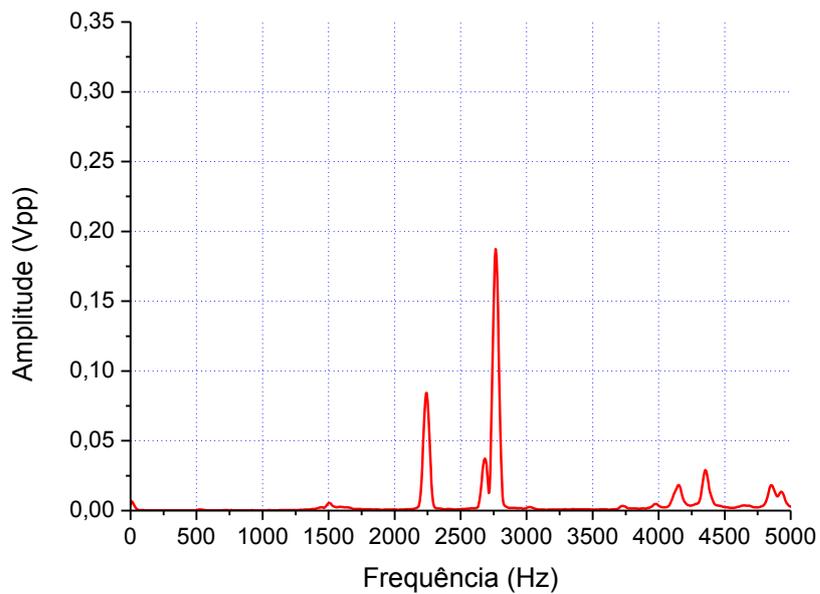


Figura A.15 – Média do BPC15

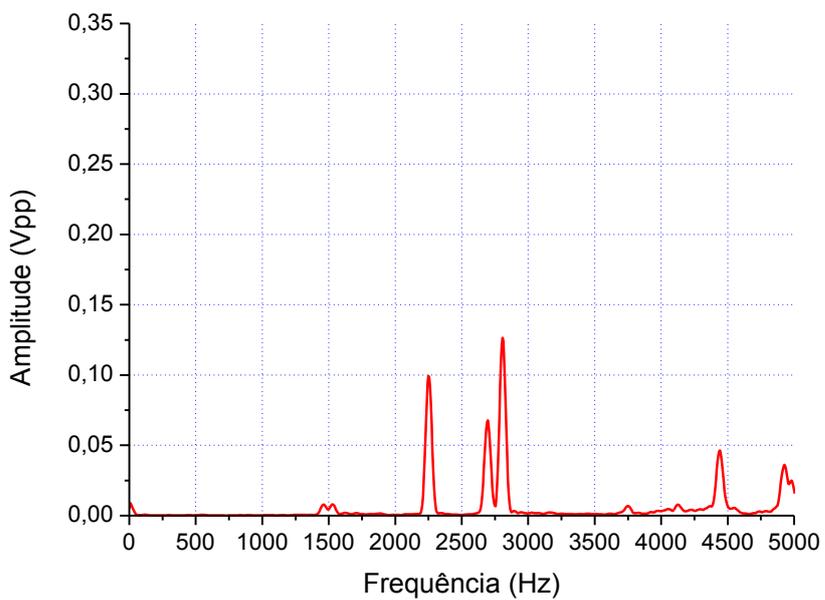


Figura A.16 – Média do BPC16

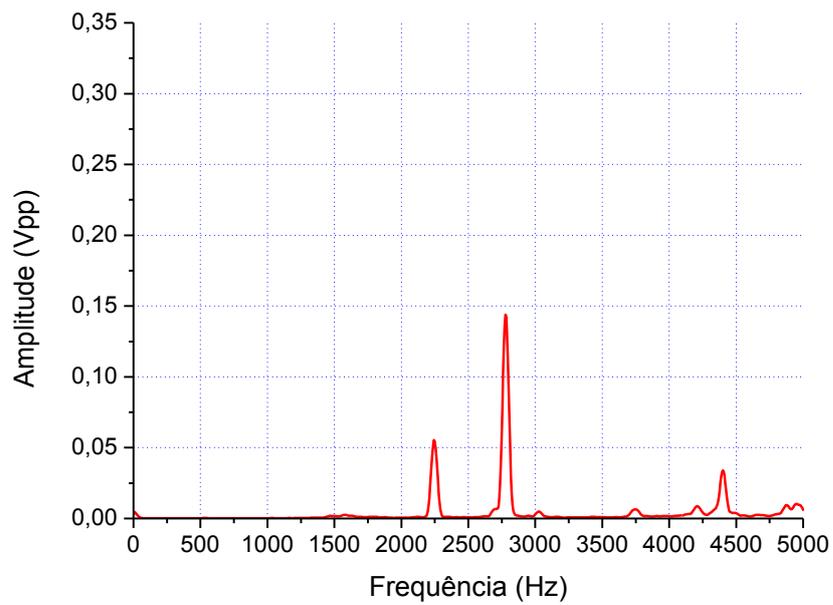


Figura A.17 – Média do BPC17

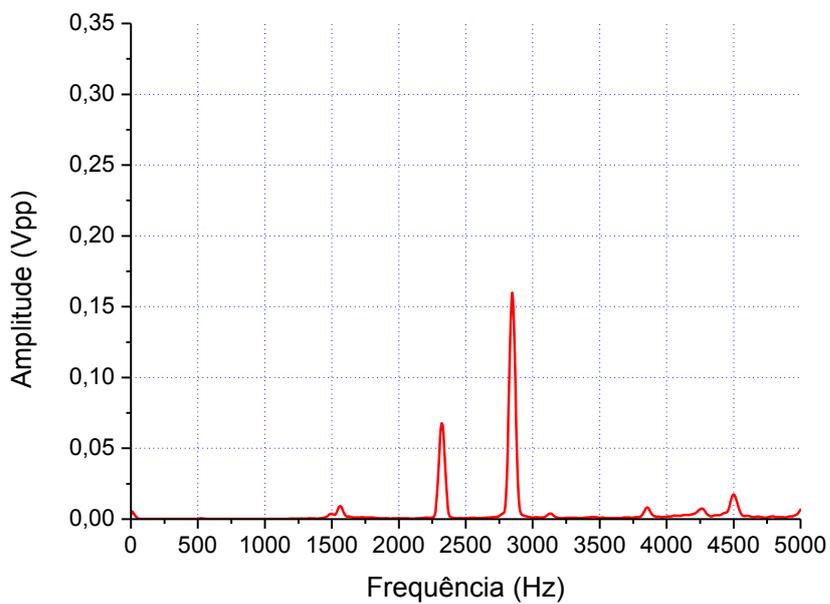


Figura A.18 – Média do BPC18

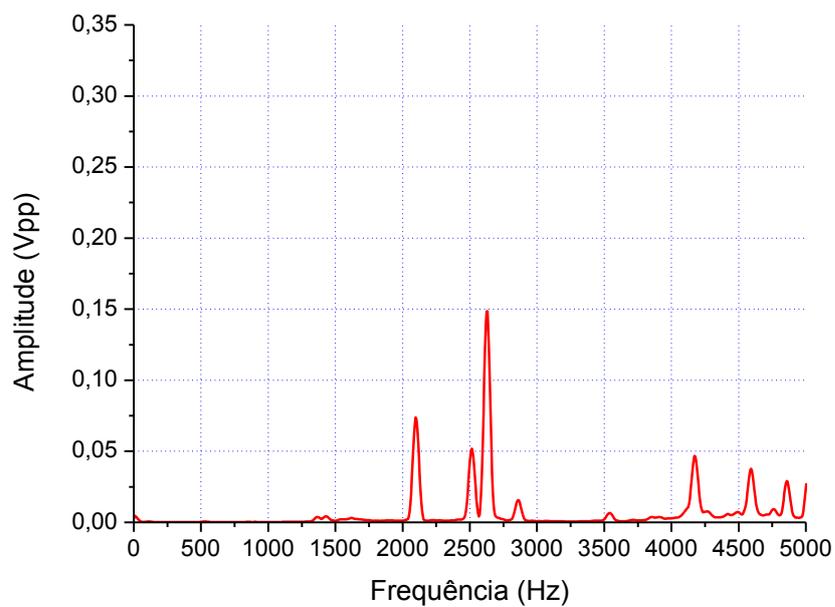


Figura A.19 – Média do BPC19

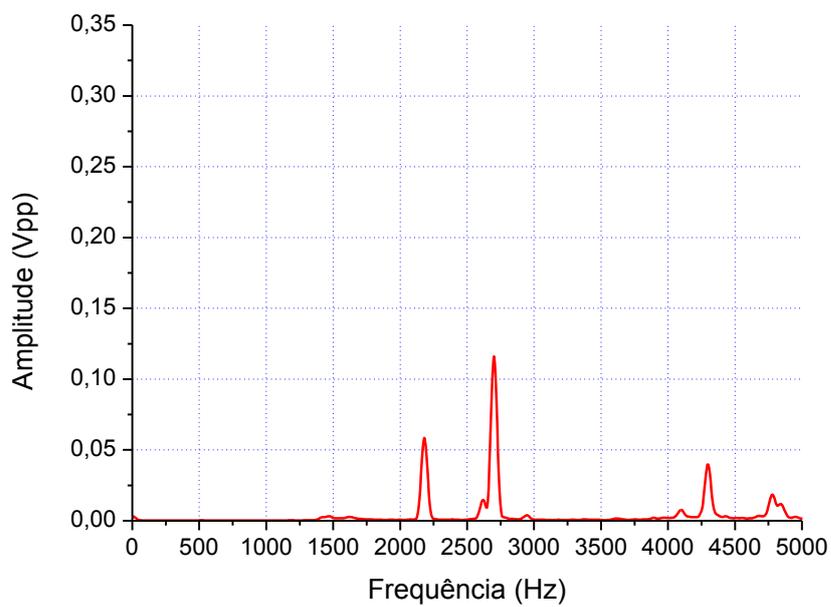


Figura A.20 – Média do BPC20

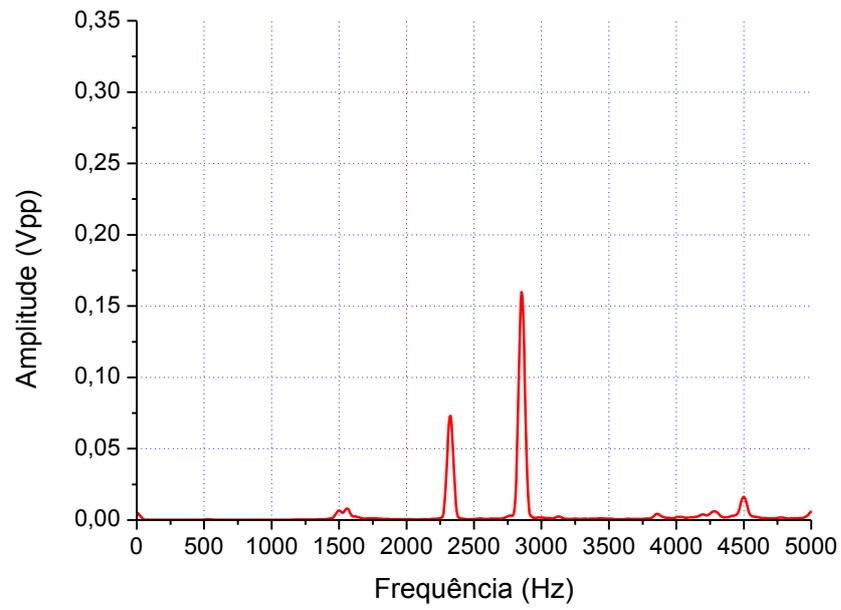


Figura A.21 – Média do BPC21

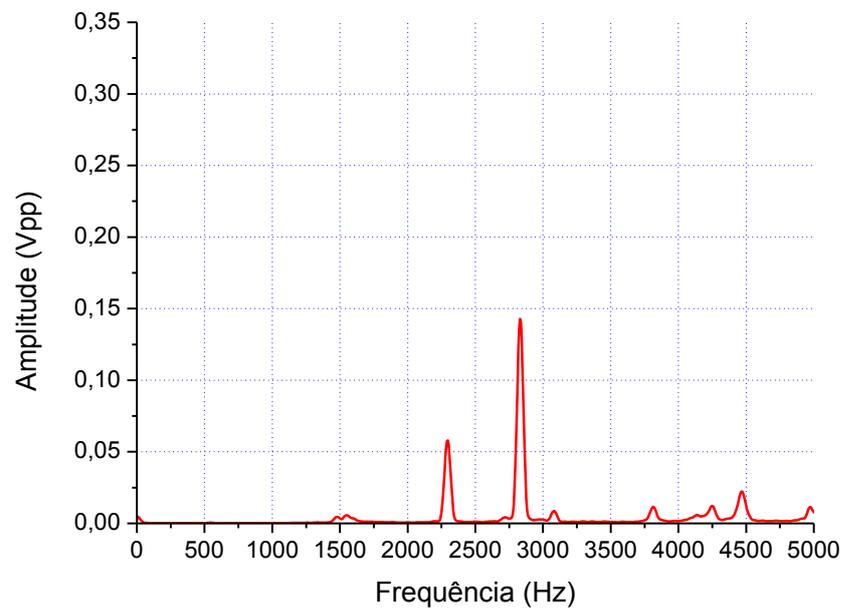


Figura A.22 – Média do BPC22

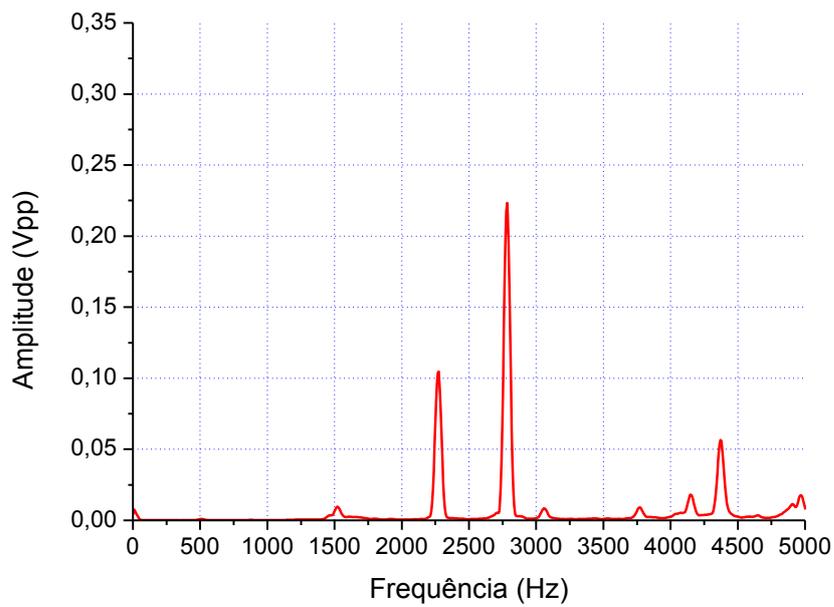


Figura A.23 – Média do BPC23

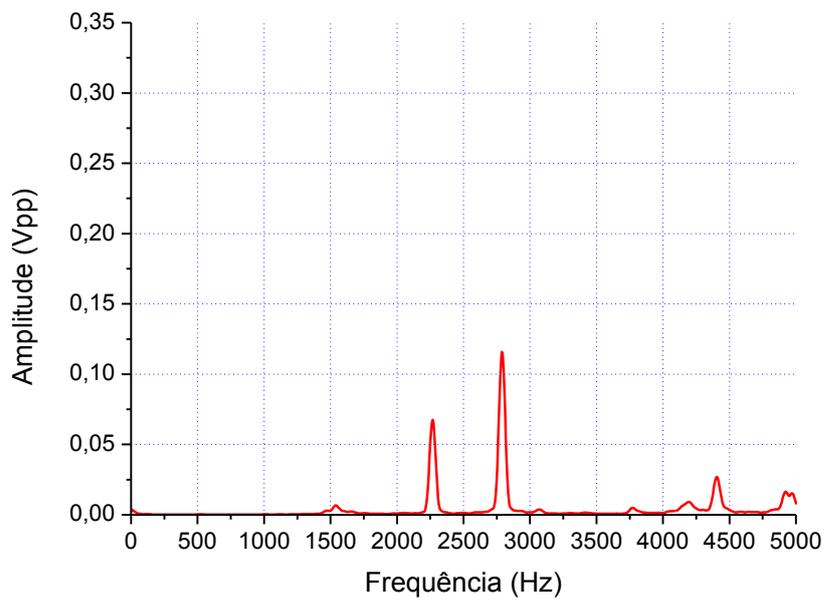


Figura A.24 – Média do BPC24

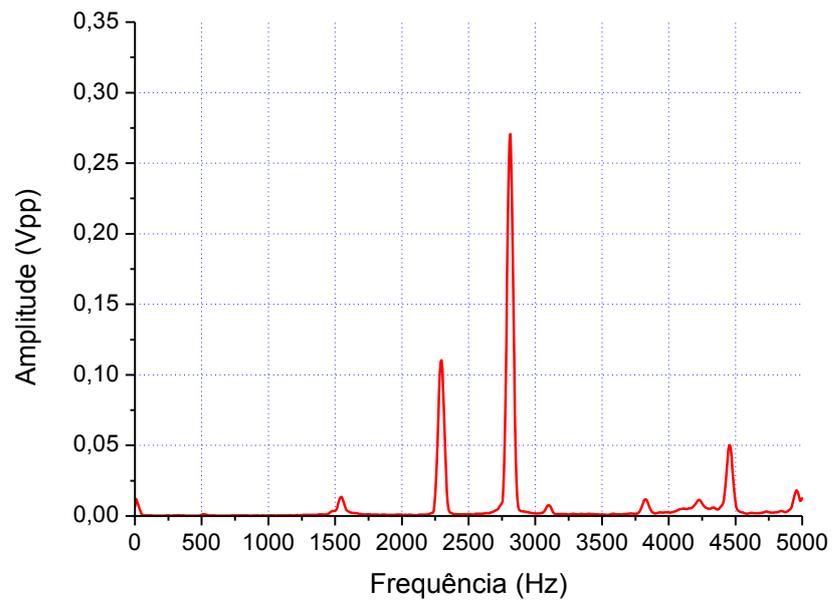


Figura A.25 – Média do BPC25

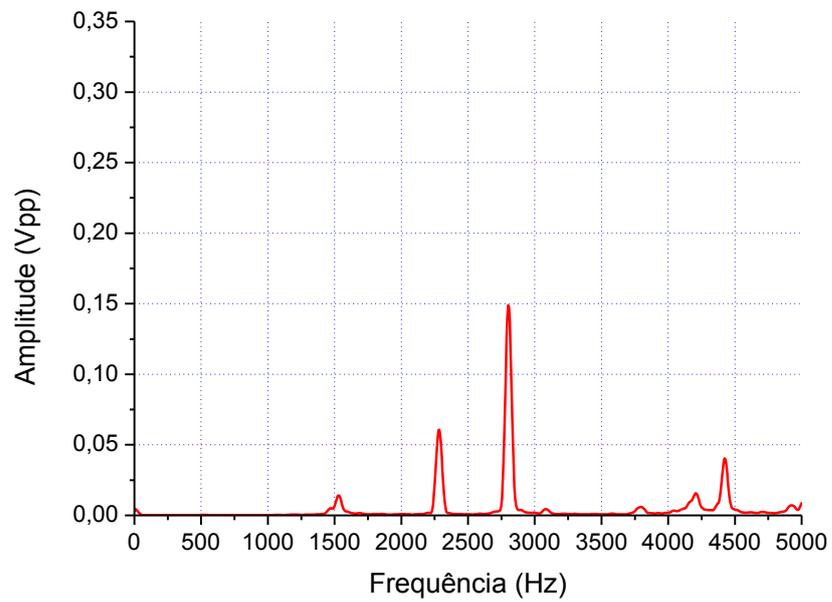


Figura A.26 – Média do BPC26

APÊNDICE B – Médias dos espectros dos blocos pequenos não conformes de concreto vazado

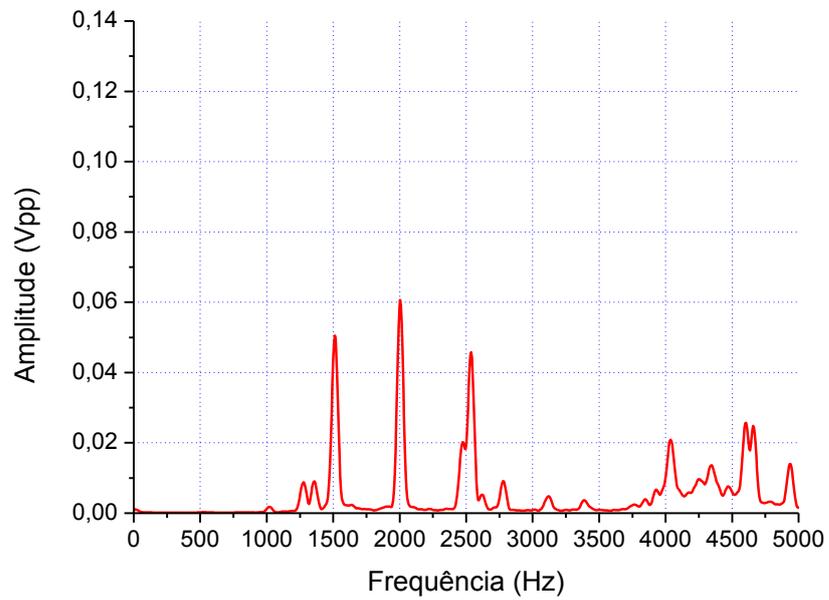


Figura B.01 – Média do BPNC01

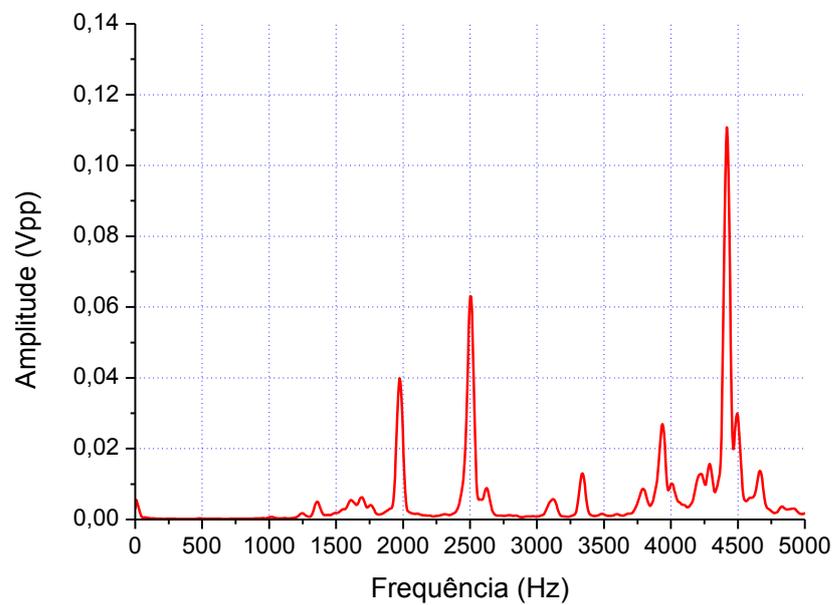


Figura B.02 – Média do BPNC02

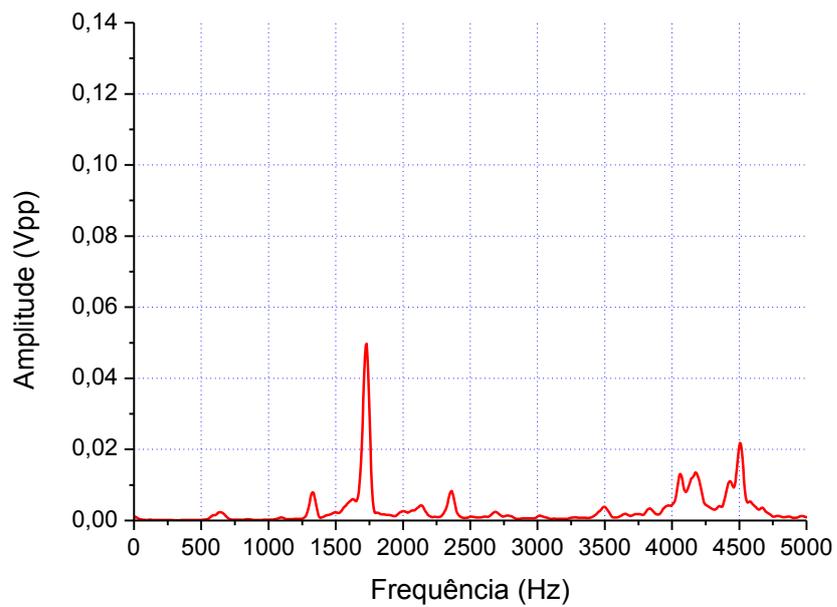


Figura B.03 – Média do BPNC03

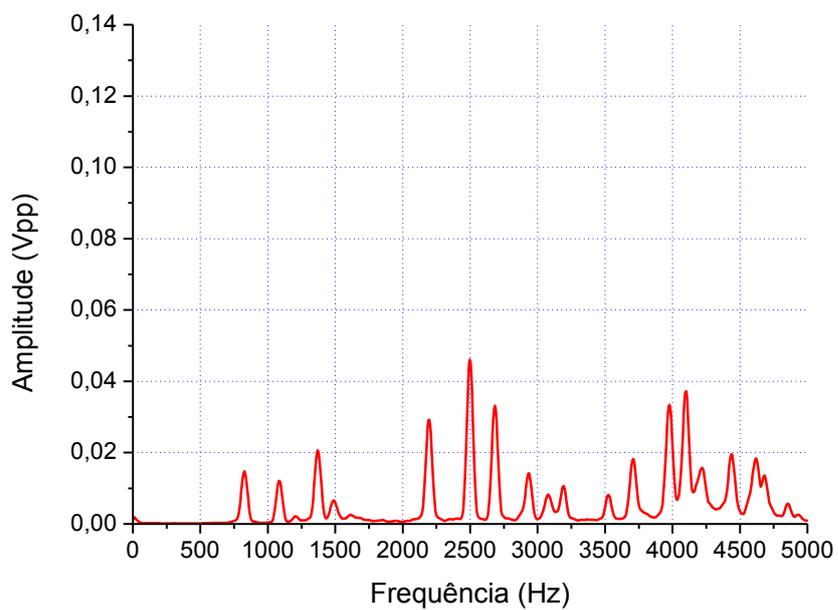


Figura B.04 – Média do BPNC04

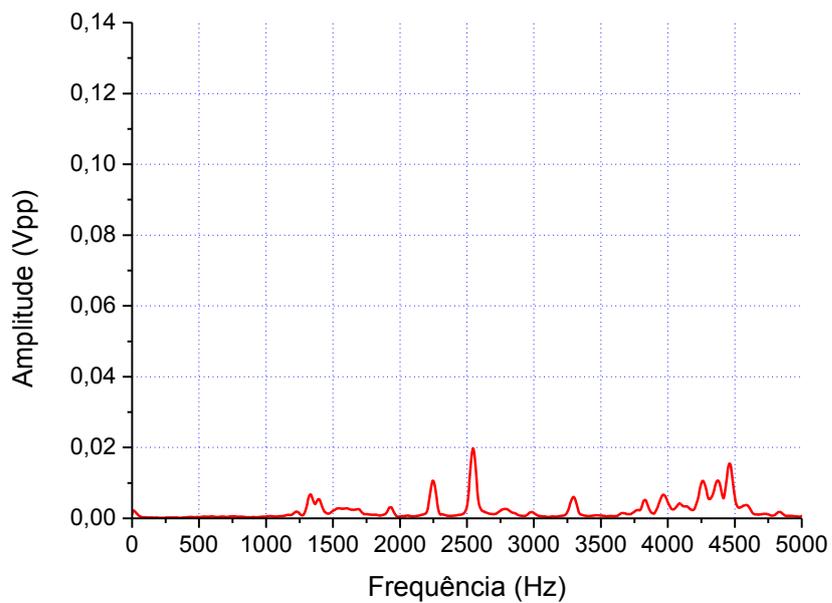


Figura B.05 – Média do BPNC05

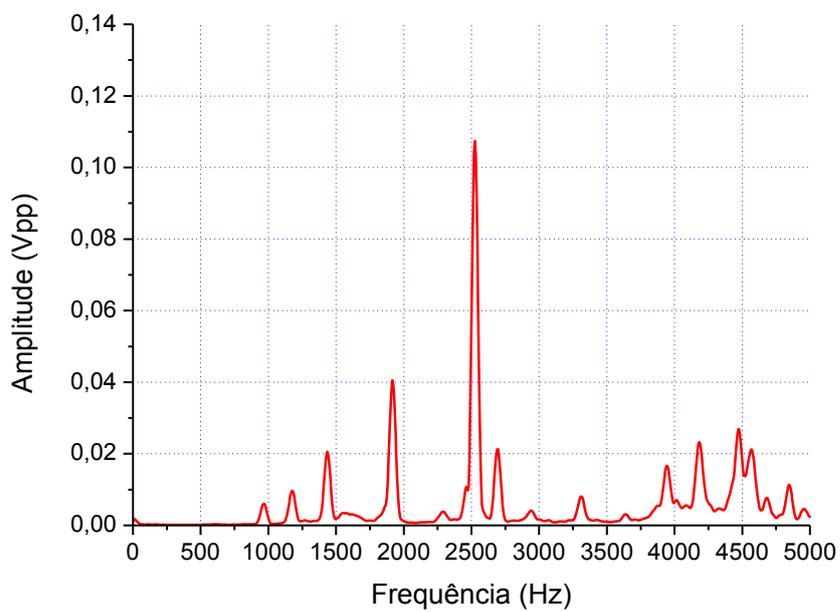


Figura B.06 – Média do BPNC06

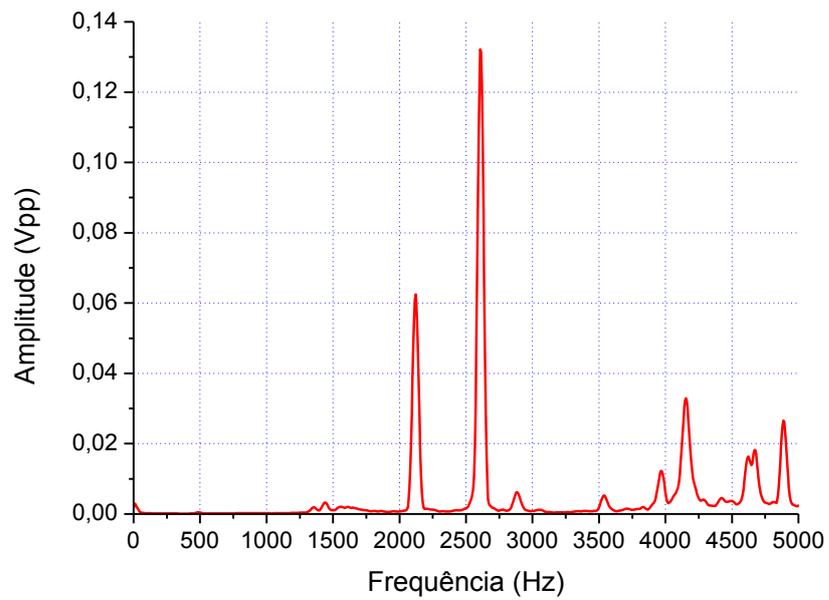


Figura B.07 – Média do BPNC07

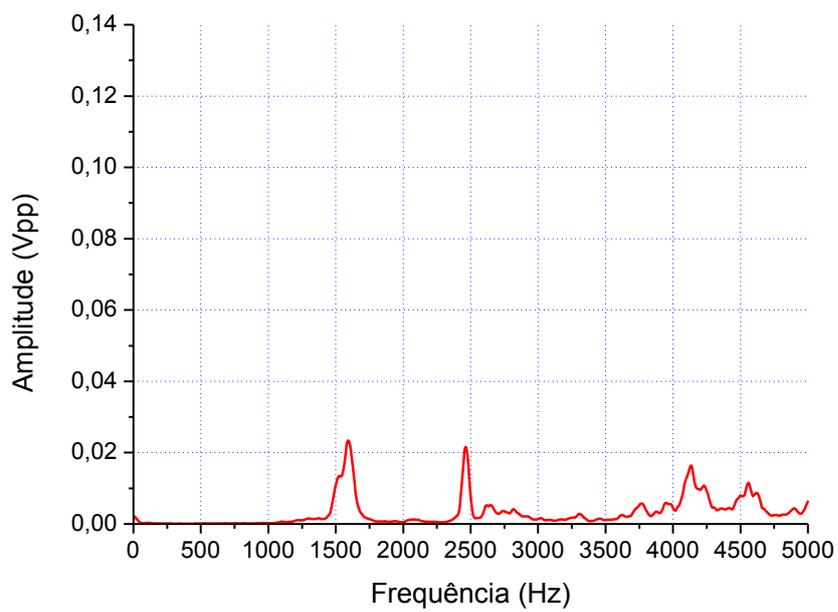


Figura B.08 – Média do BPNC08

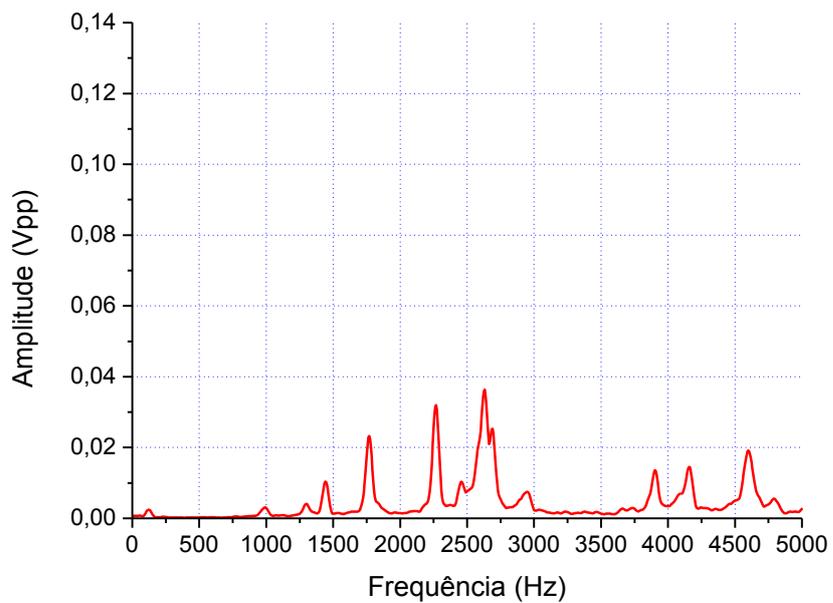


Figura B.09 – Média do BPNC09

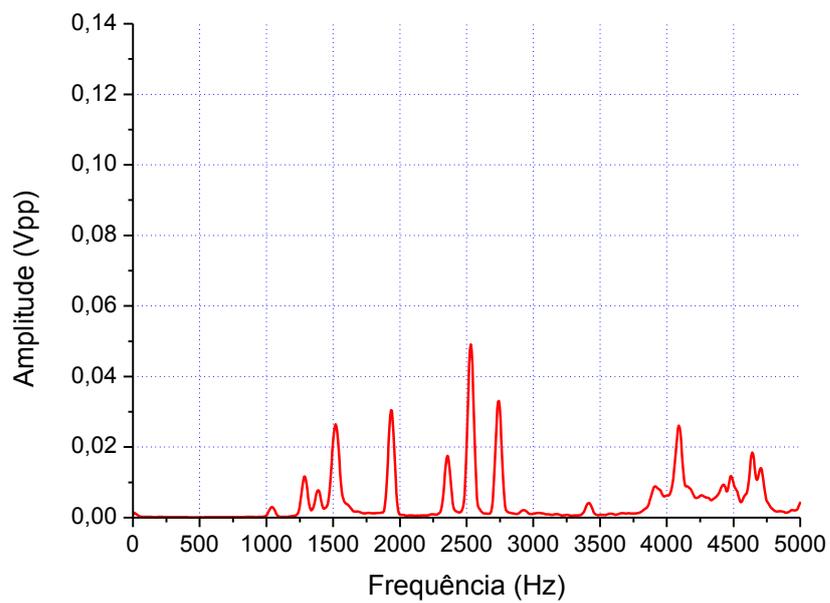


Figura B.11 – Média do BPNC11

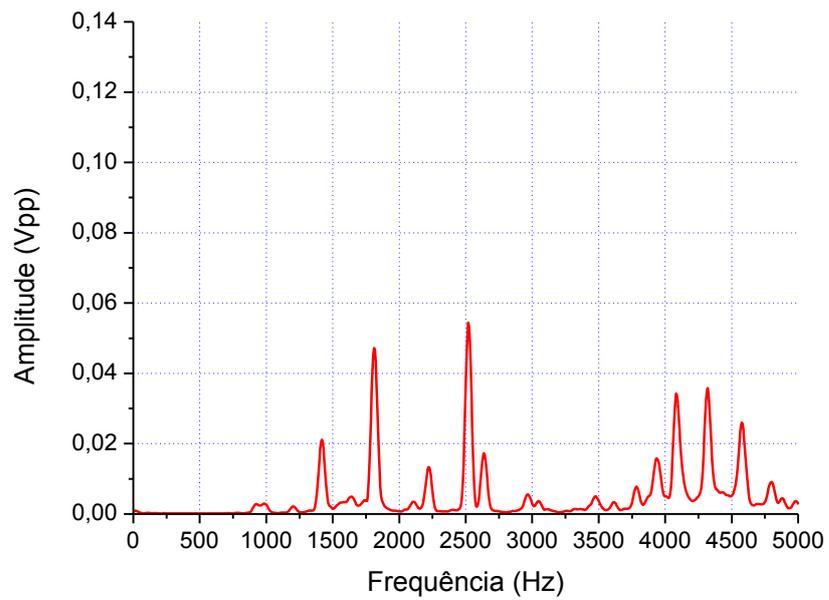


Figura B.12 – Média do BPNC12

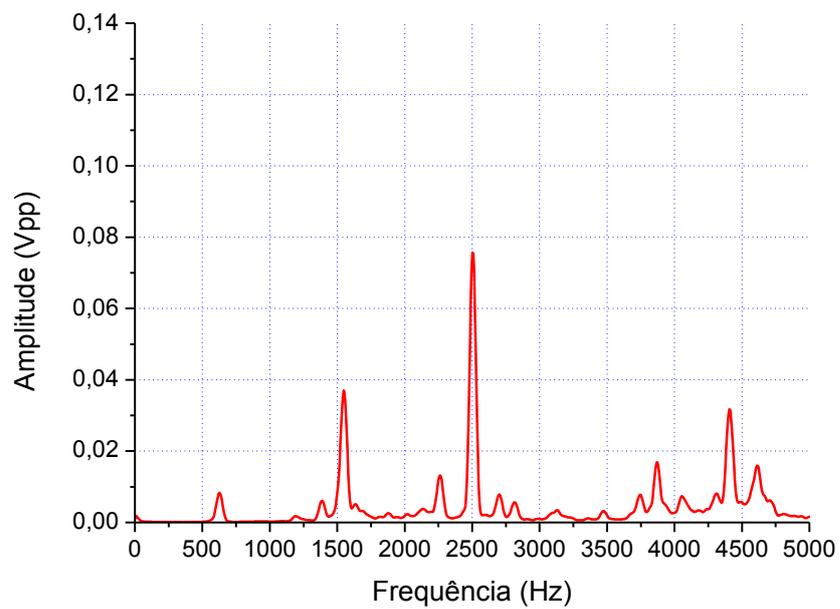


Figura B.13 – Média do BPNC13

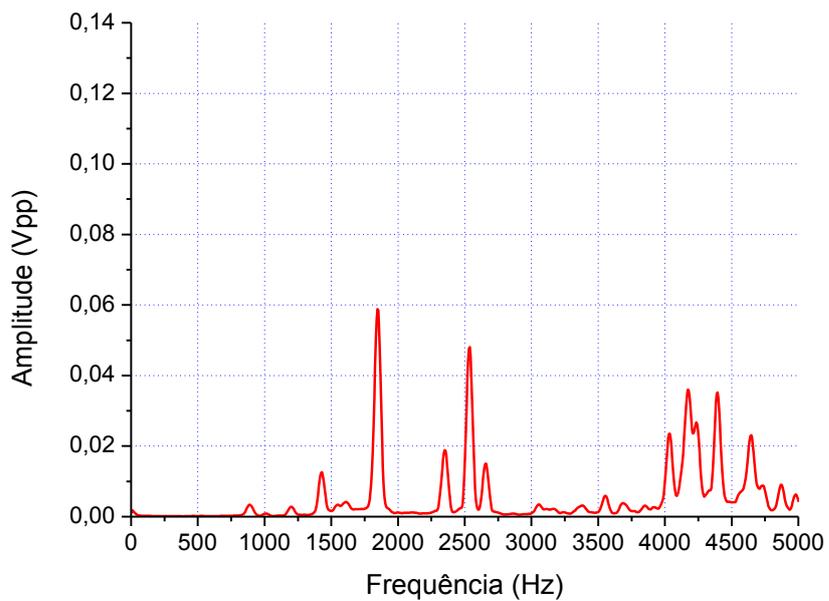


Figura B.14 – Média do BPNC14

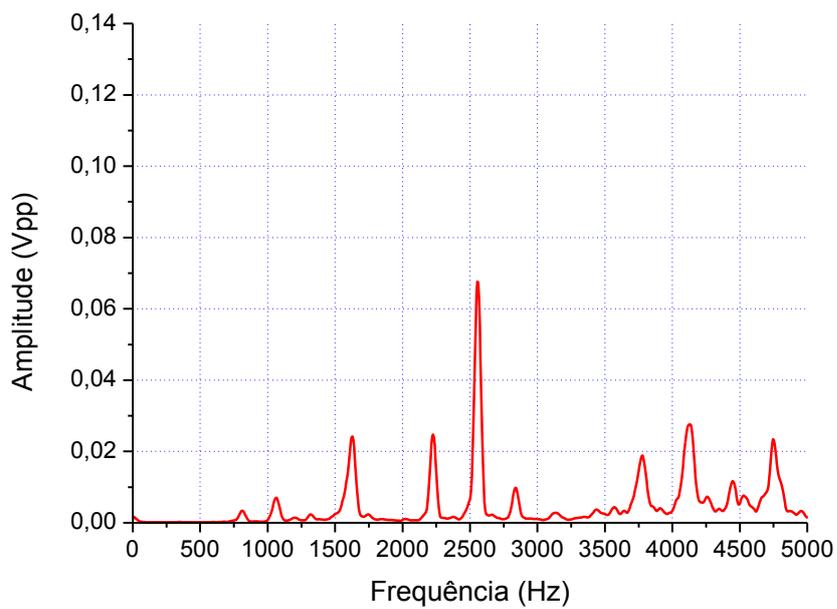


Figura B.16 – Média do BPNC16

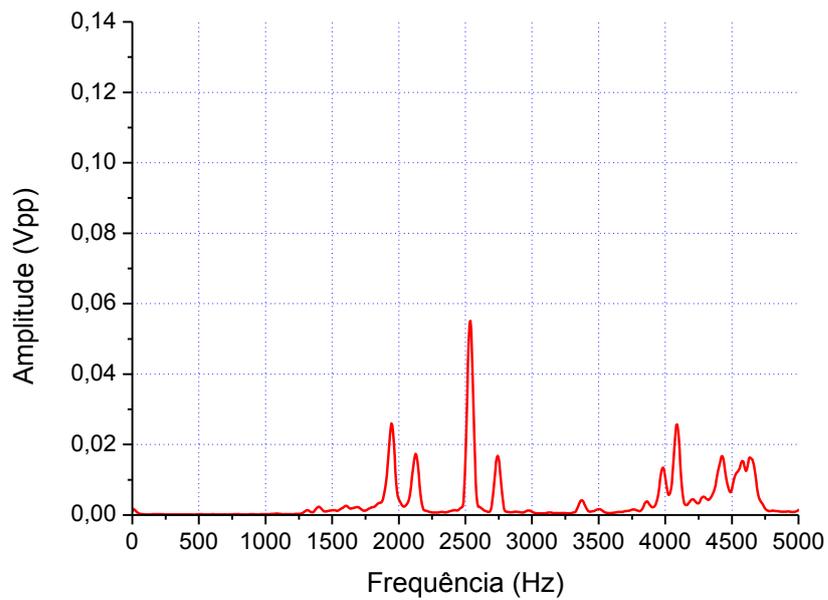


Figura B.17 – Média do BPNC17

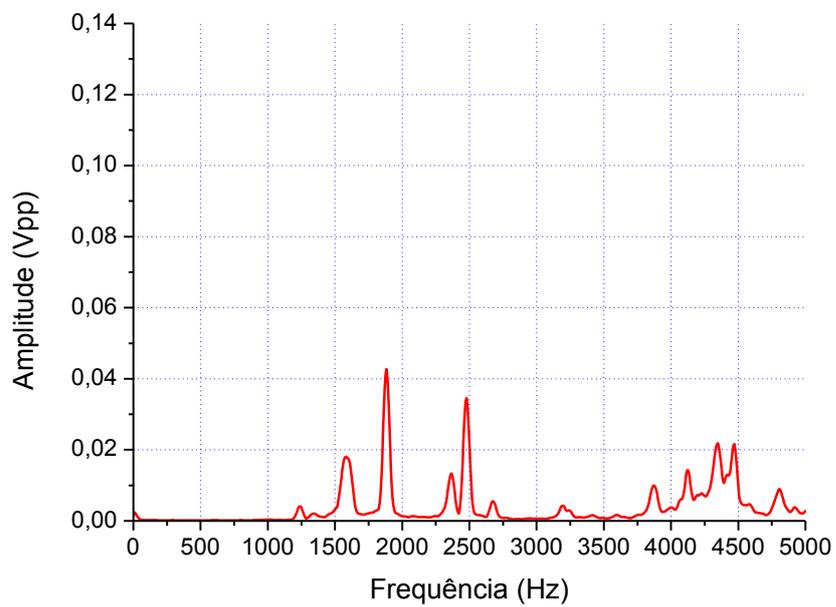


Figura B.18 – Média do BPNC18

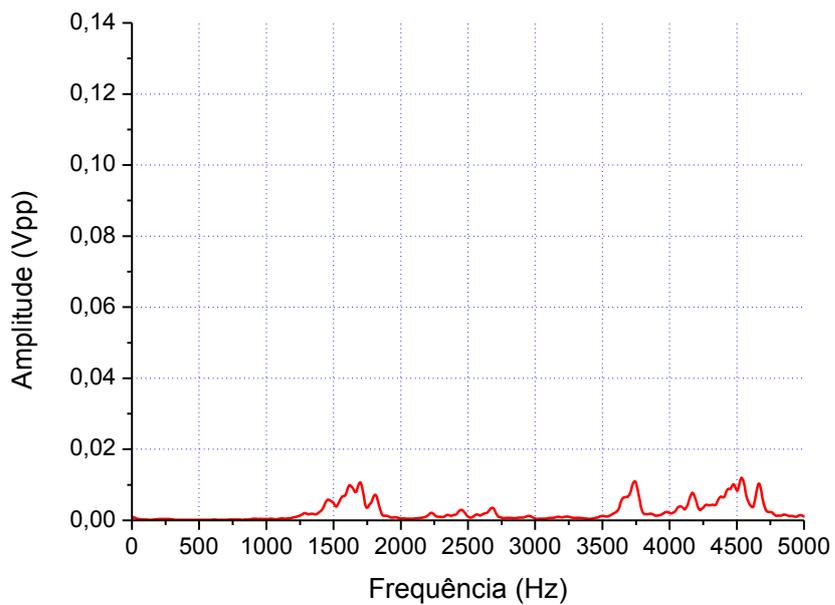


Figura B.19 – Média do BPNC19

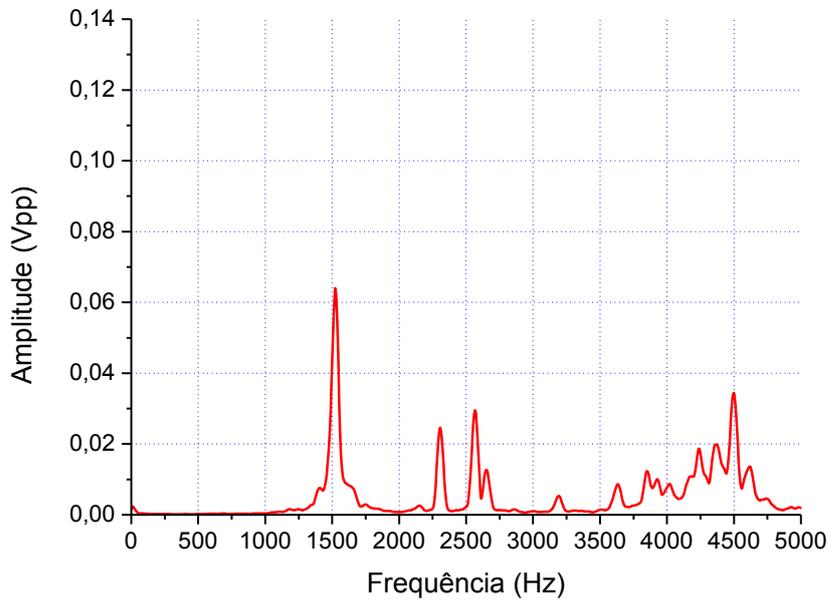


Figura B.20 – Média do BPNC20

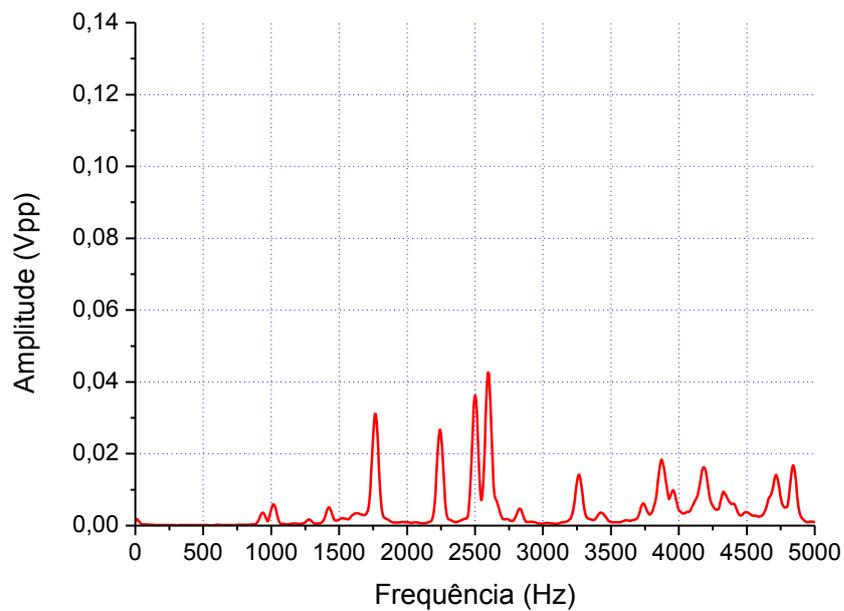


Figura B.21 – Média do BPNC21

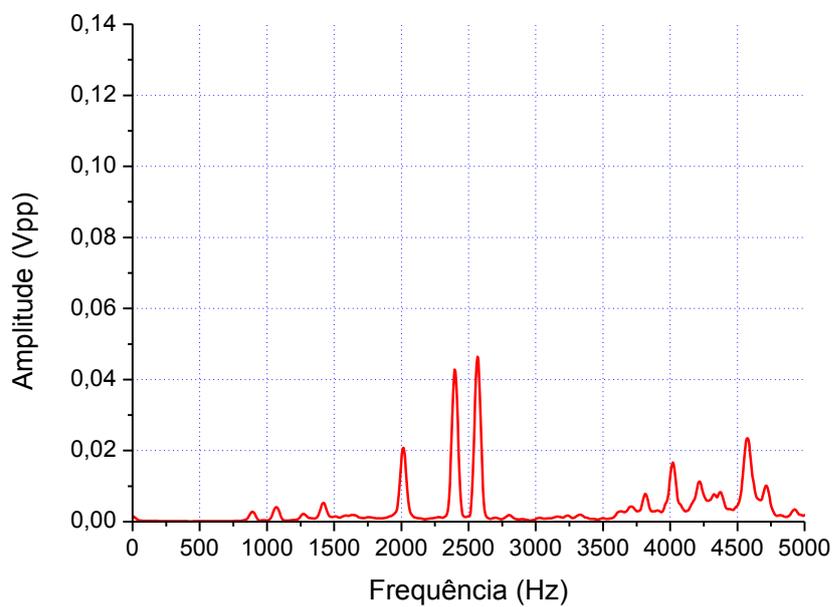


Figura B.22 – Média do BPNC22

APÊNDICE C – Média dos espectros dos blocos grandes conformes de concreto vazado

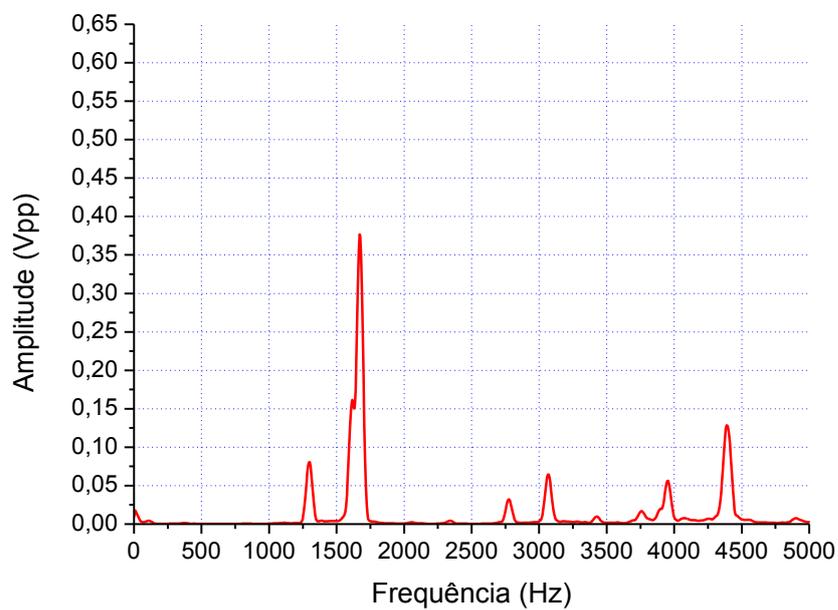


Figura C.01 – Média do BGC01

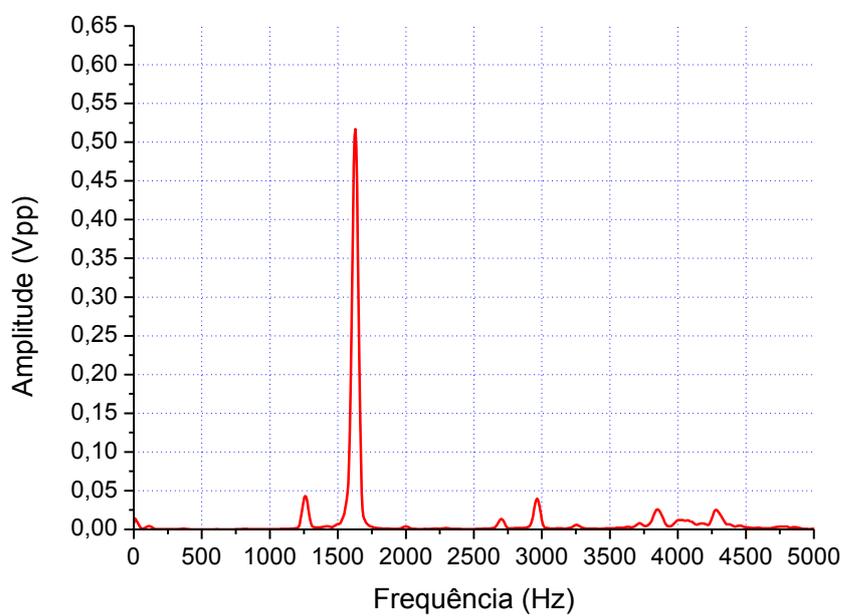


Figura C.02 – Média do BGC02

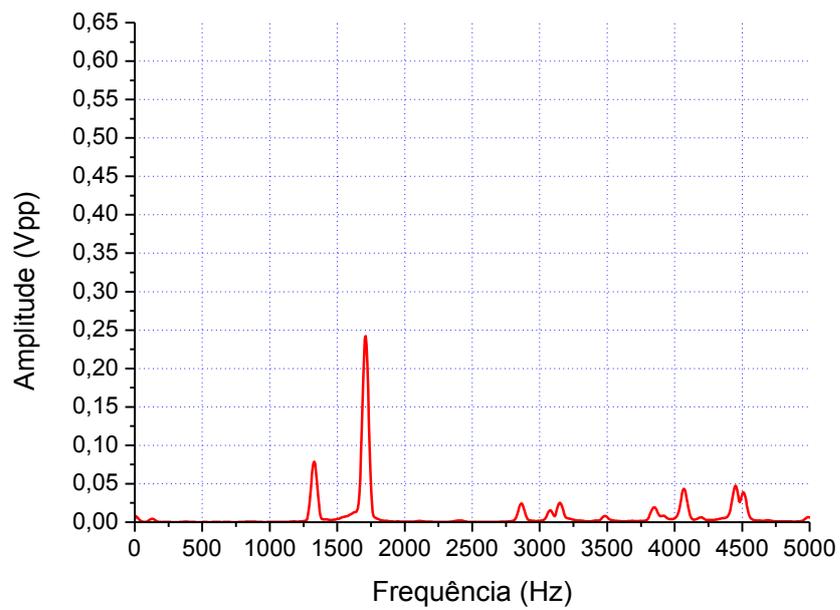


Figura C.03 – Média do BGC03

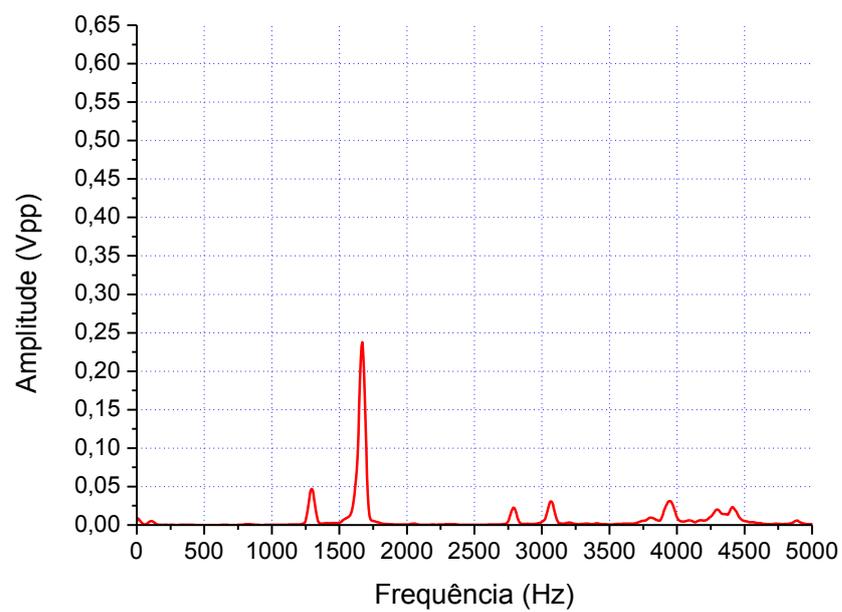


Figura C.04 – Média do BGC04

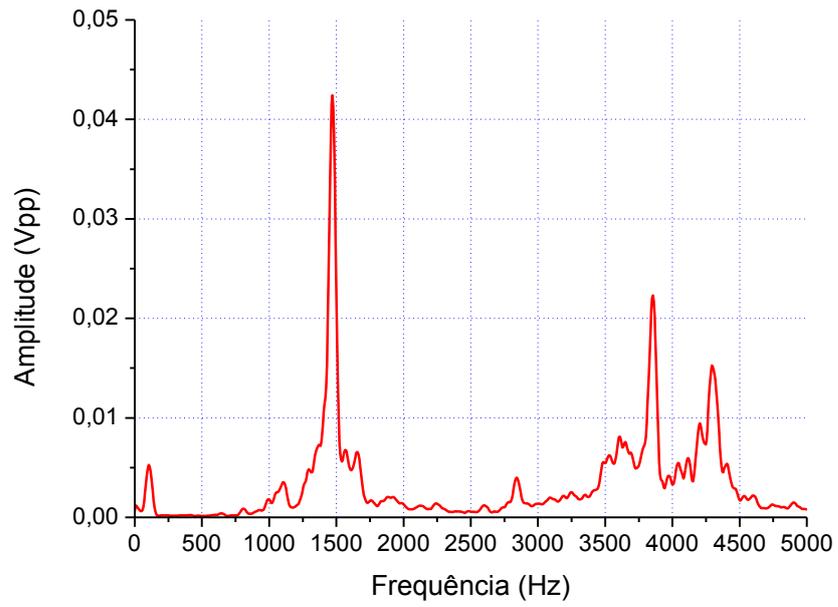


Figura C.05 – Média do BGC05

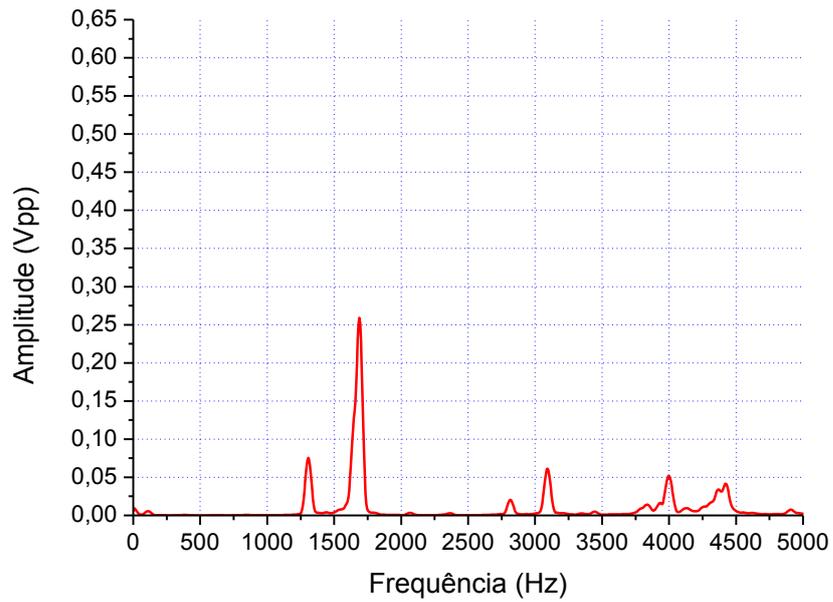


Figura C.06 – Média do BPG06

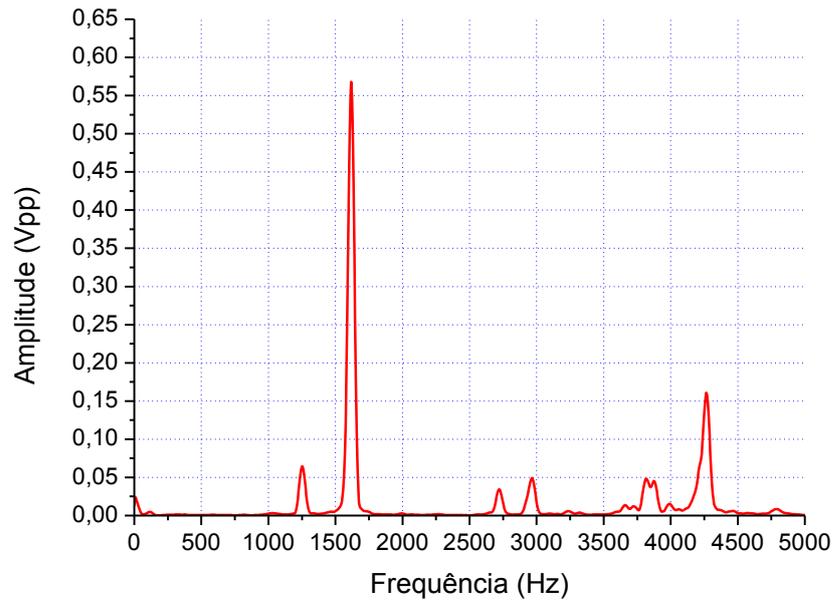


Figura C.07 – Média do BGC07

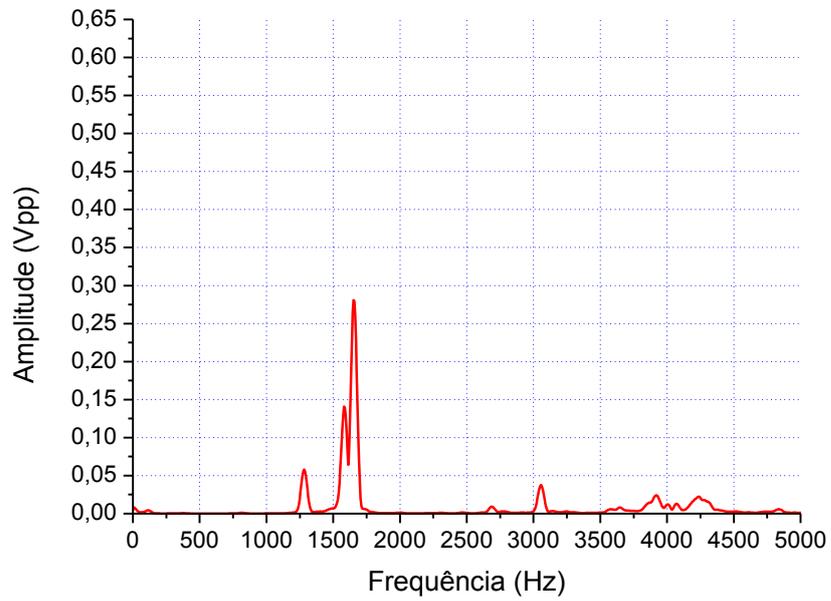


Figura C.08 – Média do BGC08

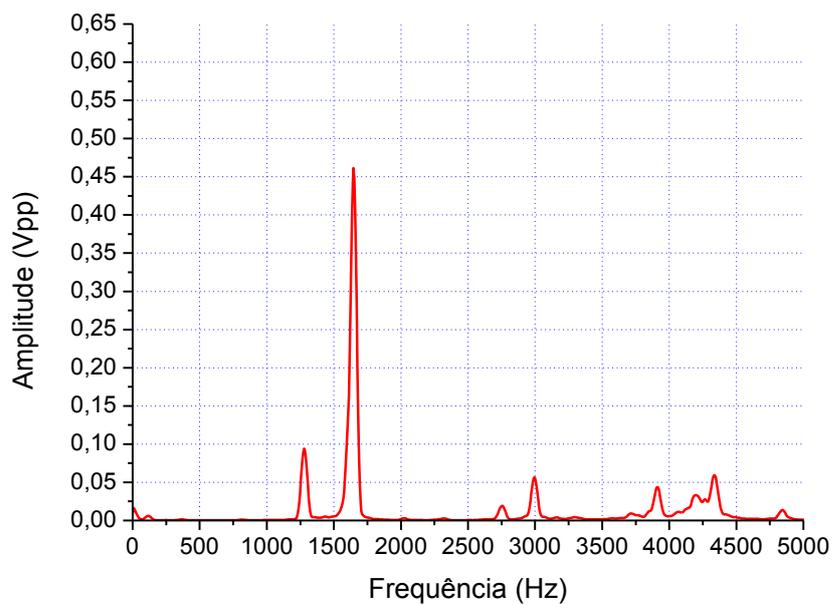


Figura C.09 – Média do BGC09

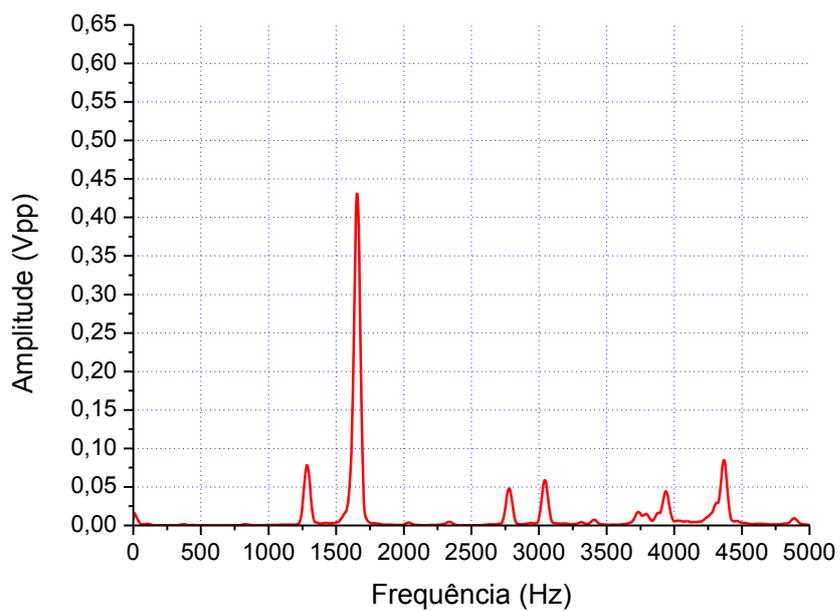


Figura C.10 – Média do BGC10

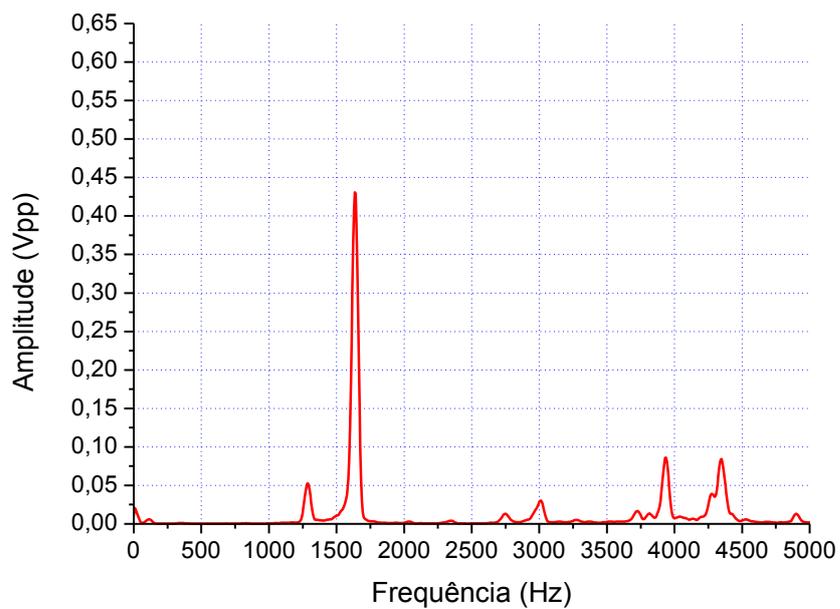


Figura C.11 – Média do BGC11

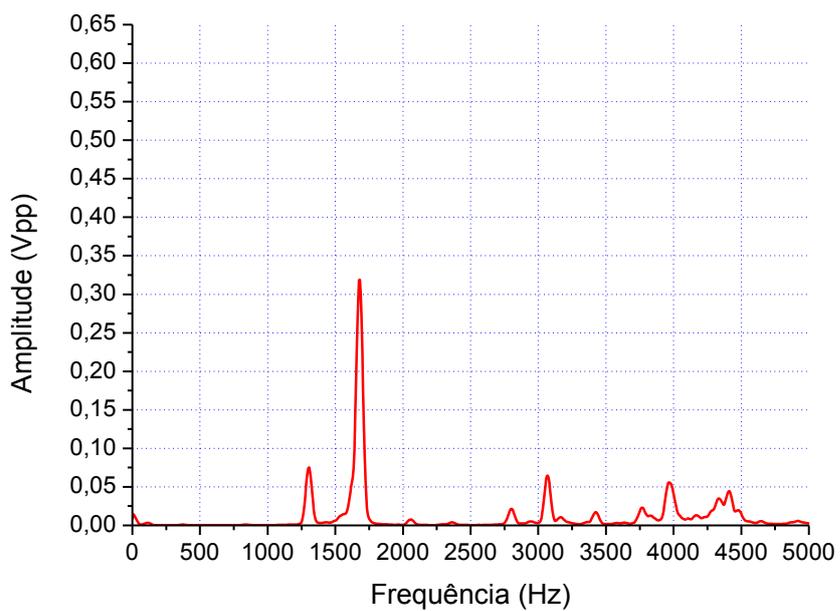


Figura C.12 – Média do BGC12

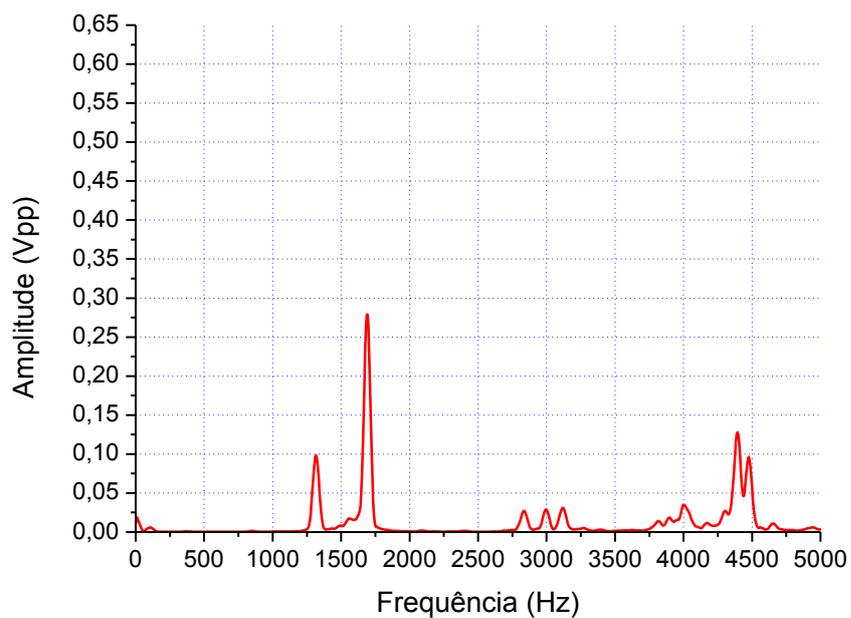


Figura C.13 – Média do BGC13

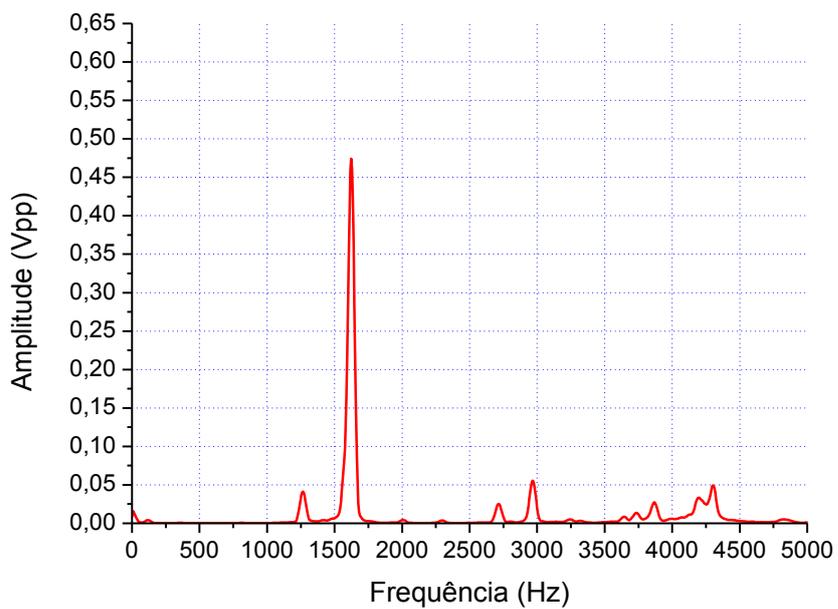


Figura C.14 – Média do BGC14

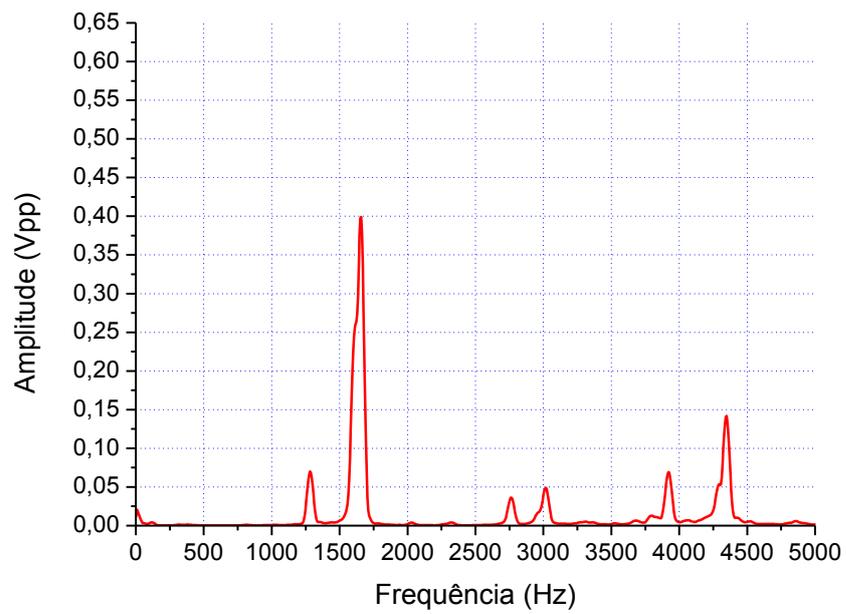


Figura C.15 – Média do BGC15

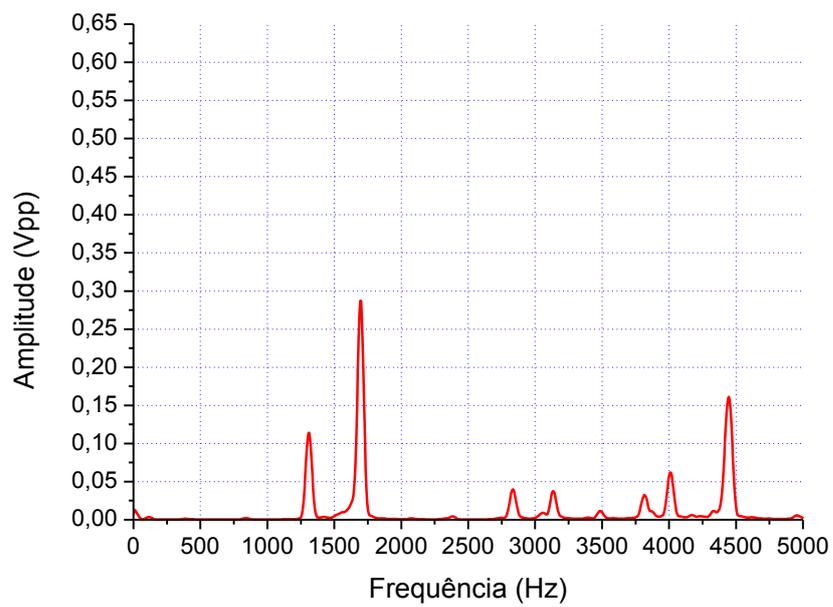


Figura C.16 – Média do BGC16

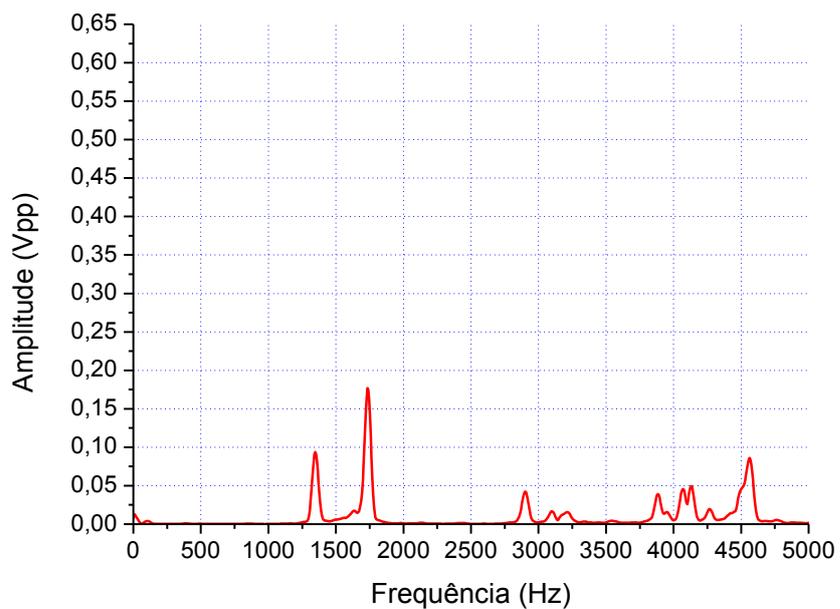


Figura C.17 – Média do BGC17

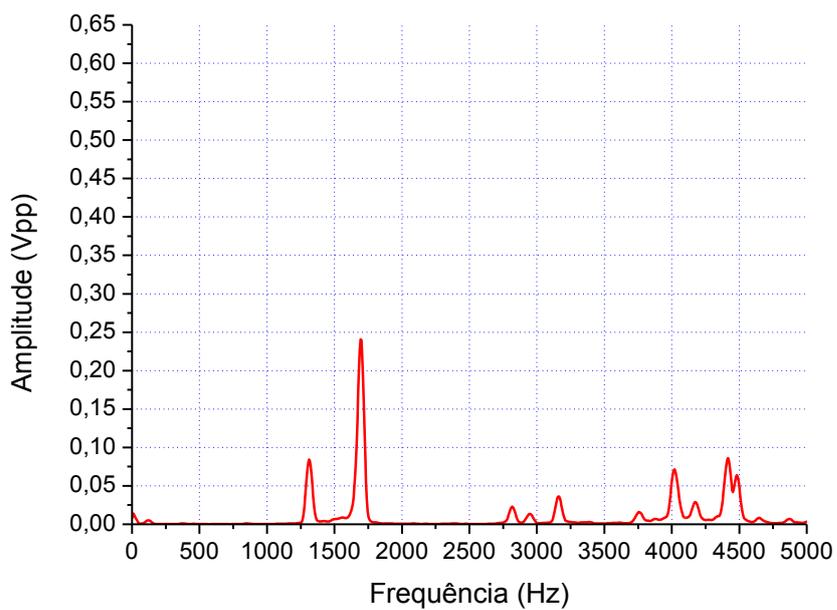


Figura C.18 – Média do BGC18

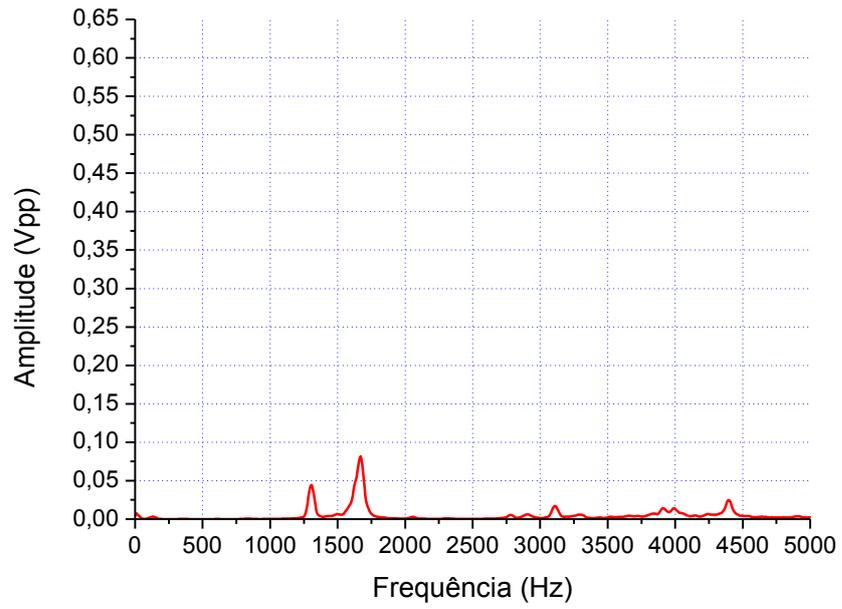


Figura C.19 – Média do BGC19

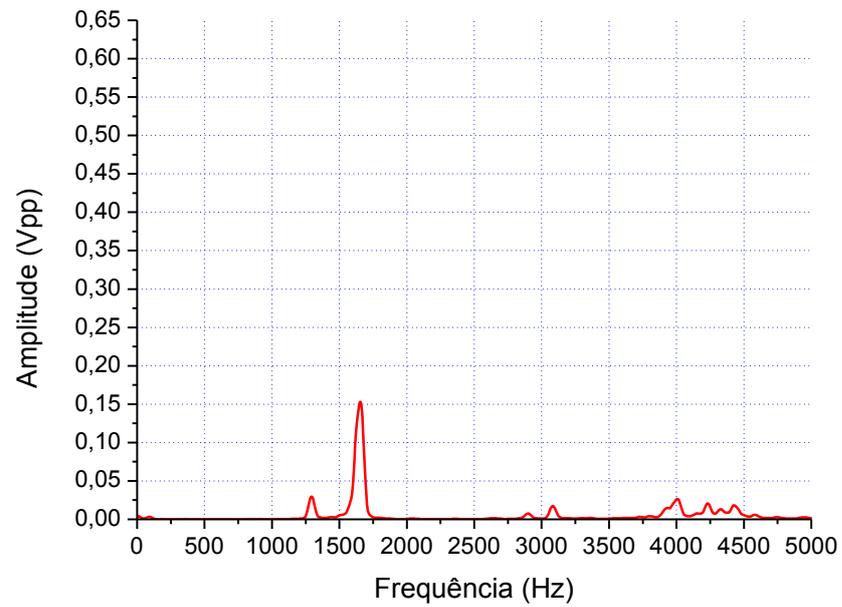


Figura C.20 – Média do BGC20

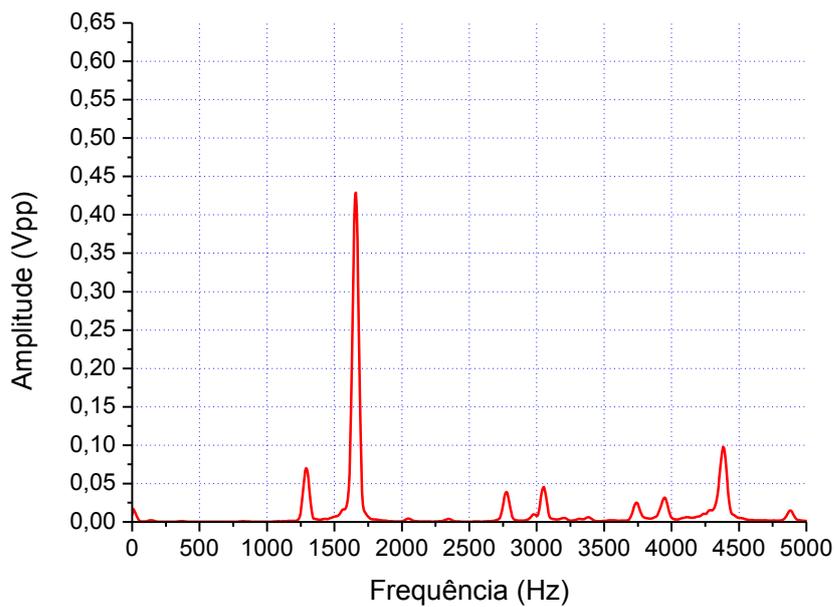


Figura C.21 – Média do BGC21

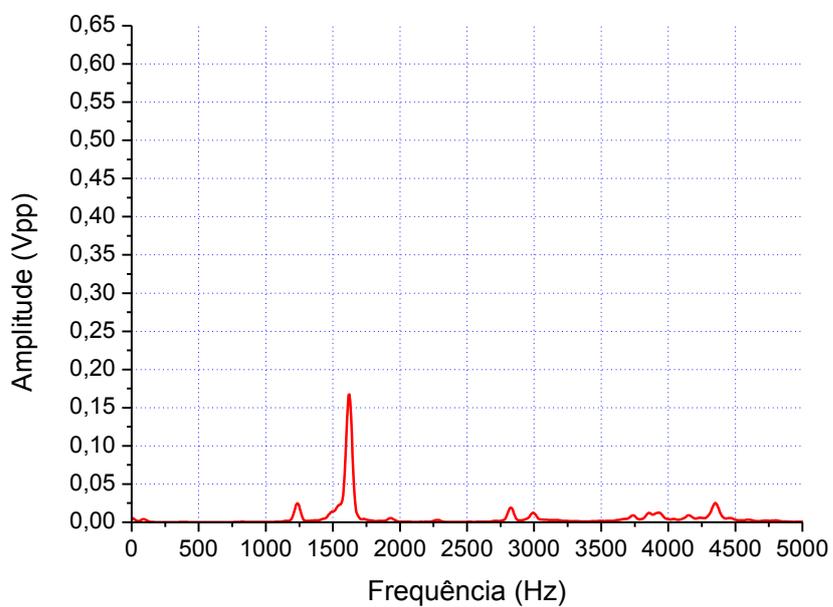


Figura C.22 – Média do BGC22

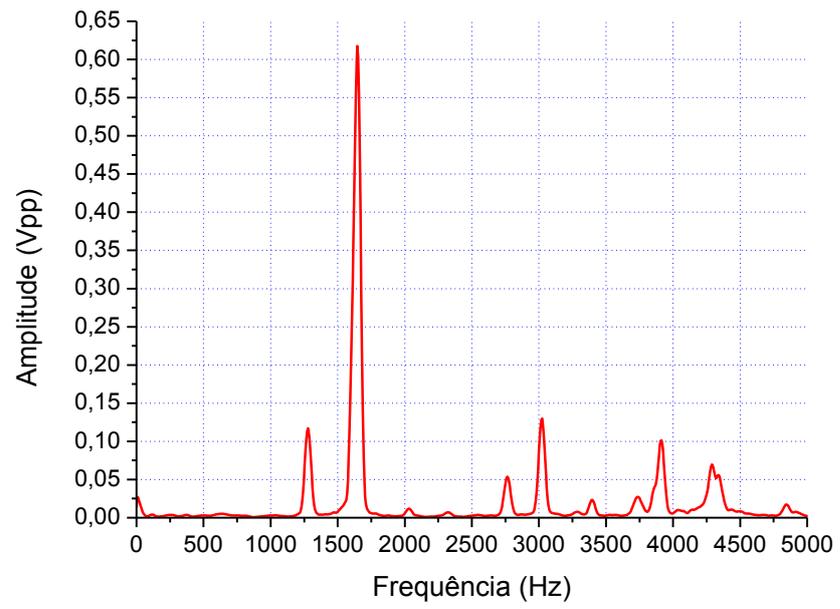


Figura C.23 – Média do BGC23

APÊNDICE D – Médias dos espectros dos blocos grandes não conformes de concreto vazado

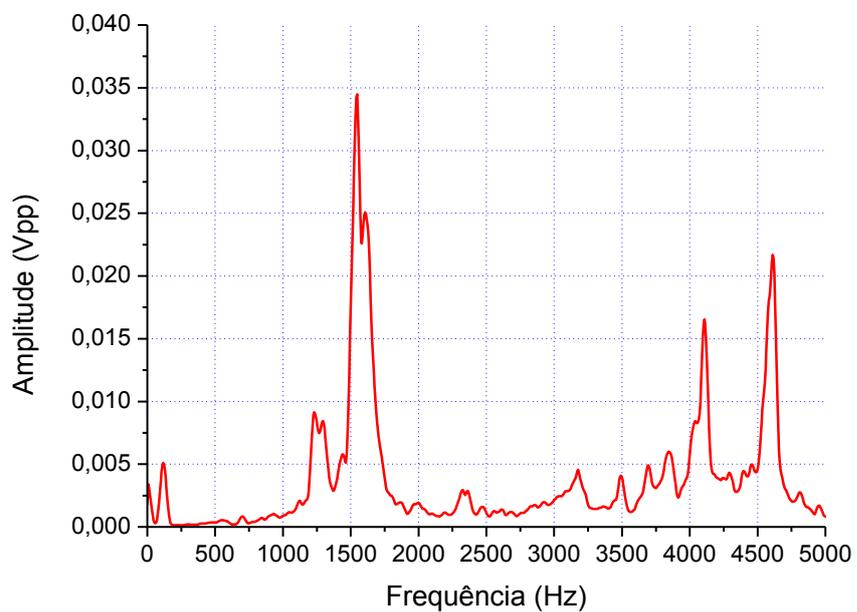


Figura D.01 – Média do BGNC01

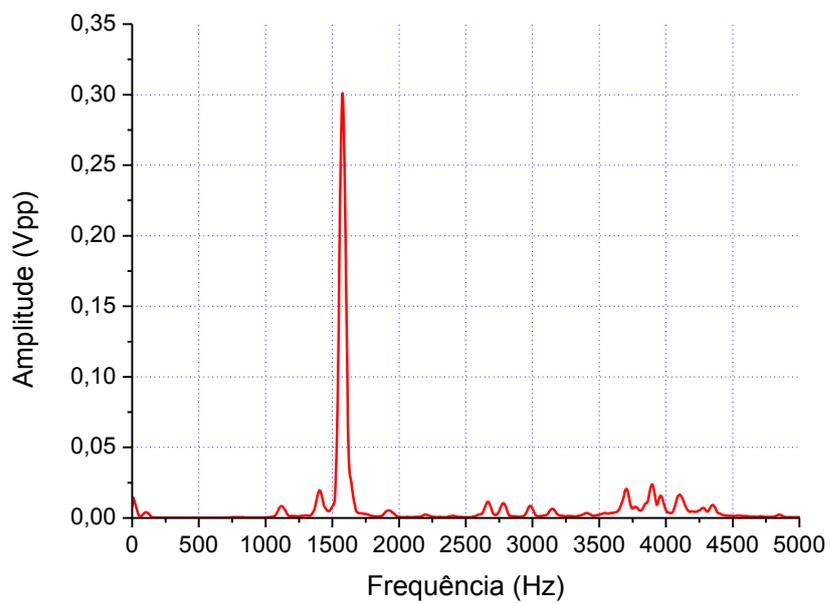


Figura D.02 – Média do BGNC02

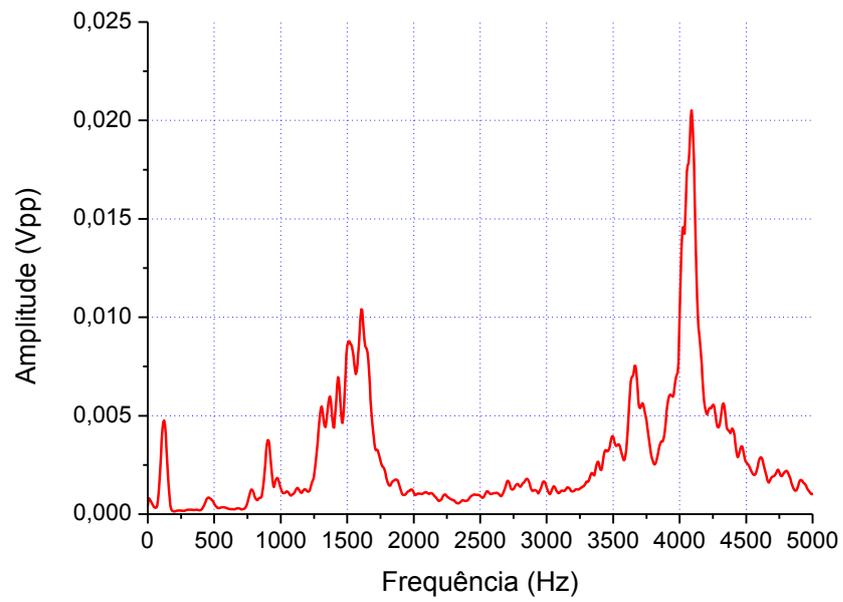


Figura D.03 – Média do BGNC03

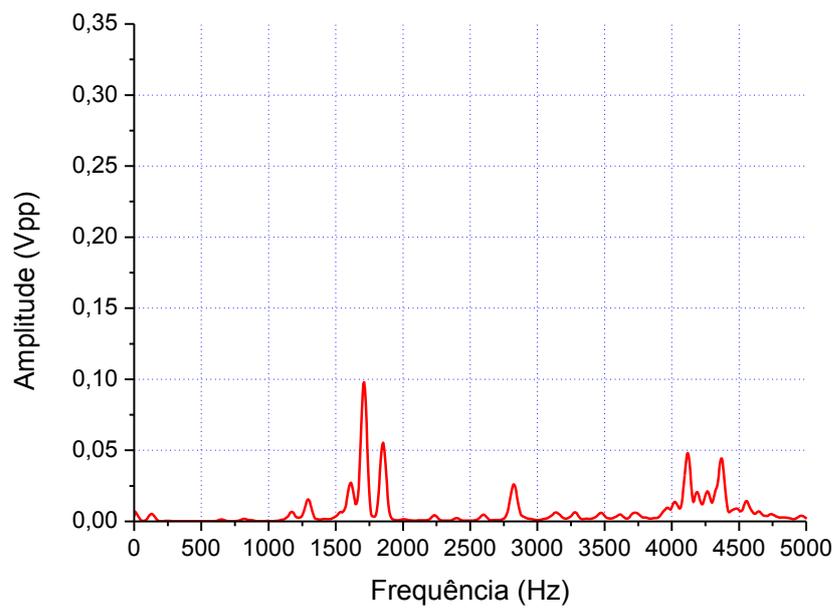


Figura D.04 – Média do BGNC04

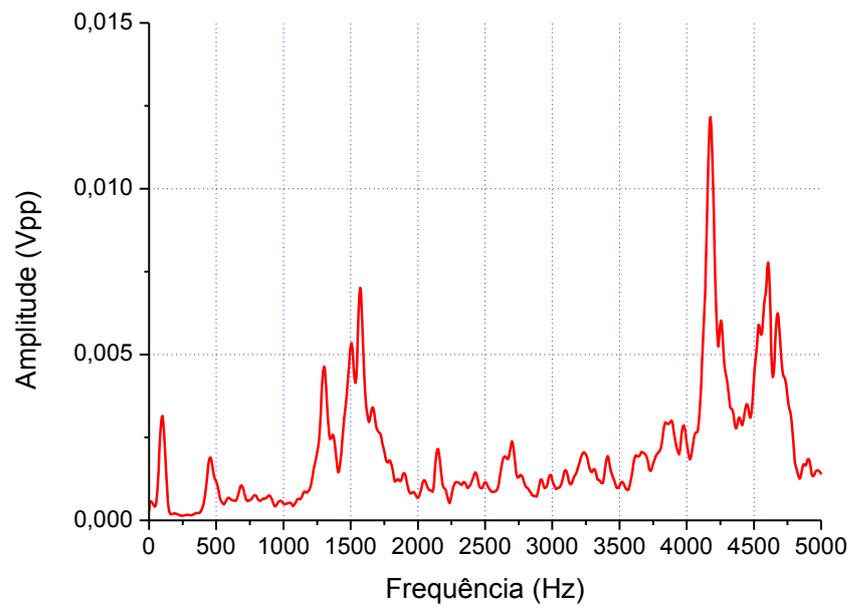


Figura D.05 – Média do BGNC05

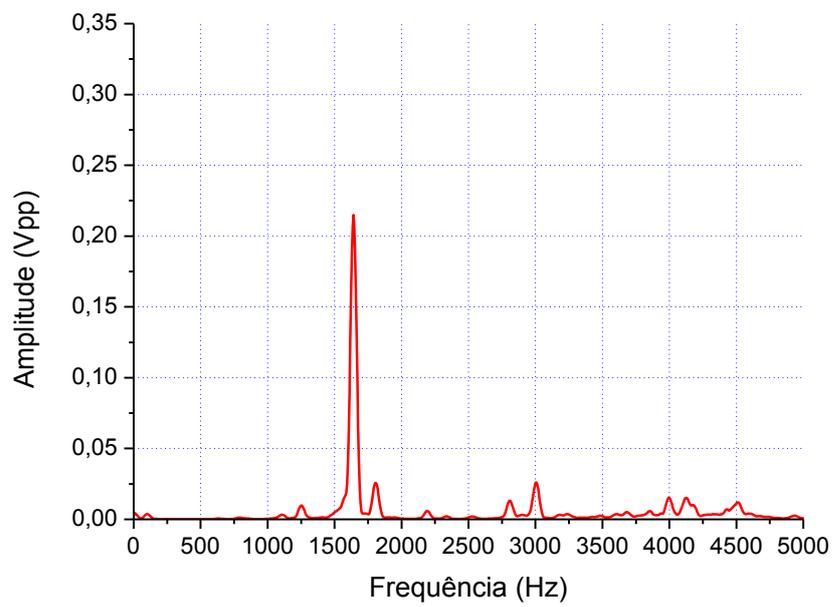


Figura D.06 – Média do BGNC06

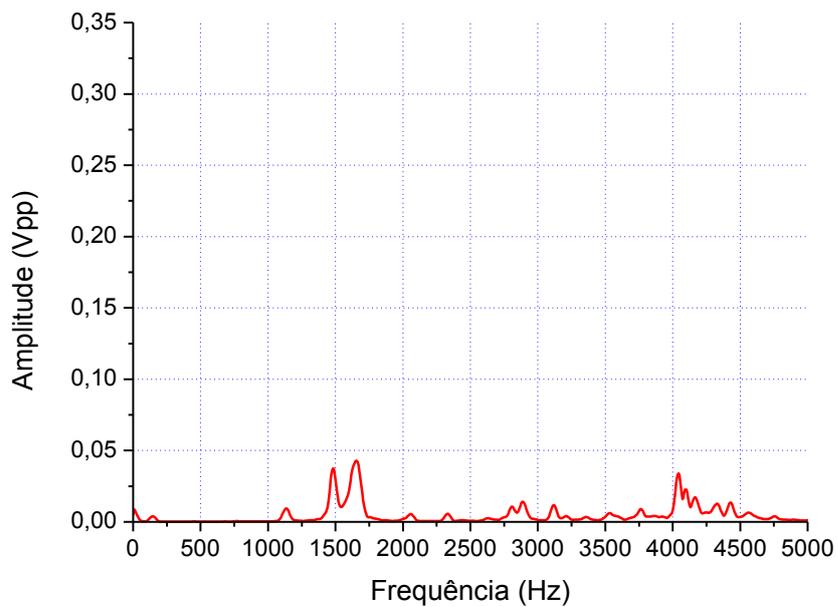


Figura D.07 – Média do BGNC07

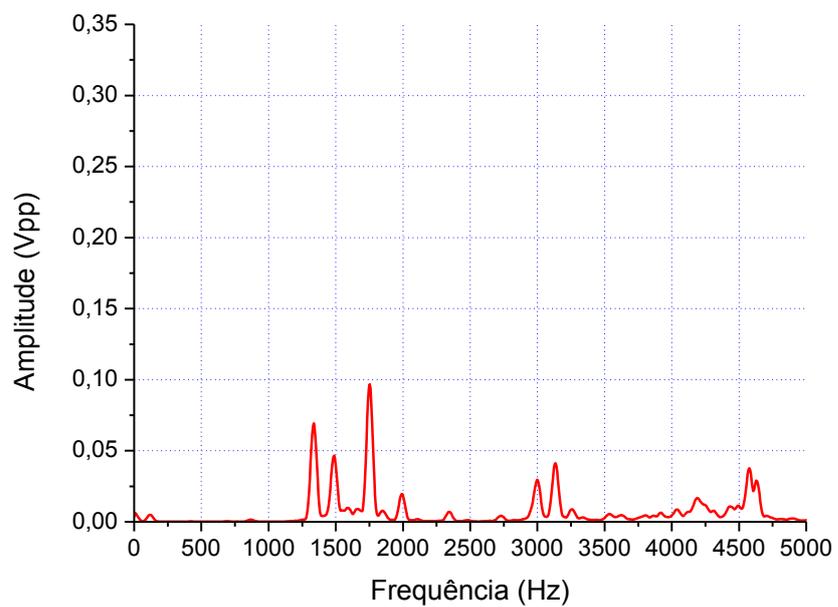


Figura D.08 – Média do BGNC08

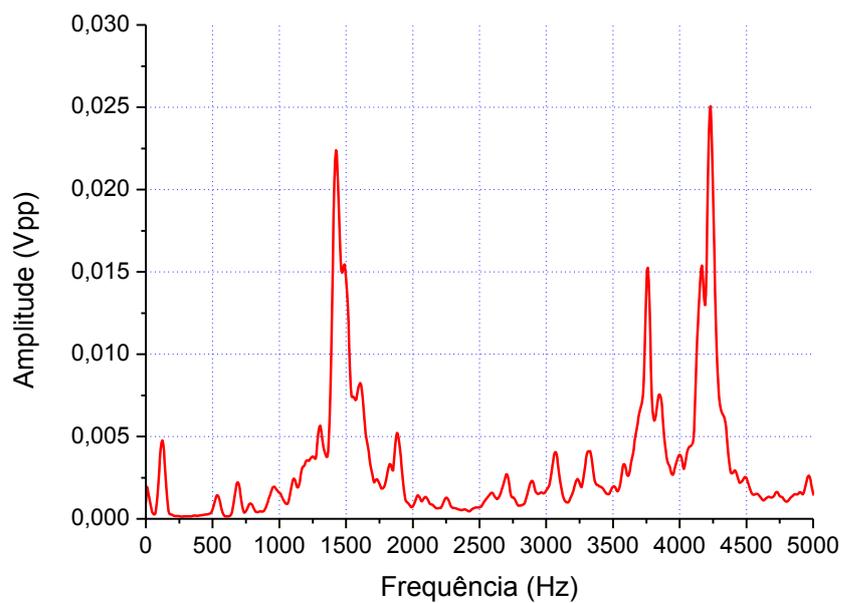


Figura D.09 – Média do BGNC09

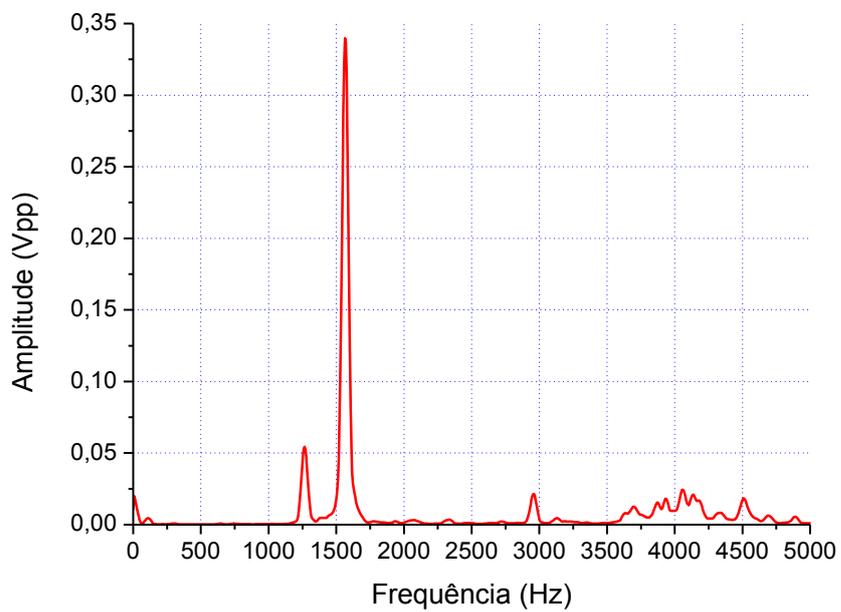


Figura D.11 – Média do BGNC11

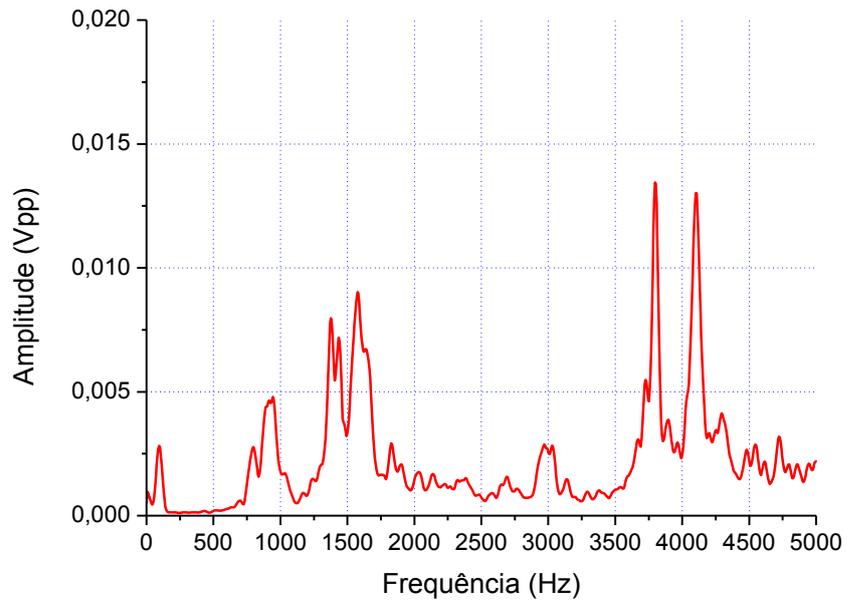


Figura D.12 – Média do BGNC12

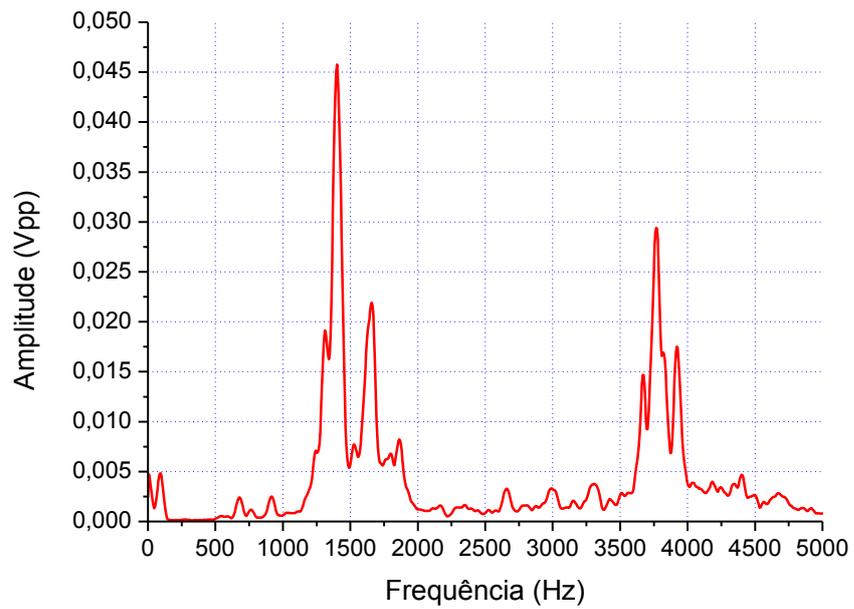


Figura D.13 – Média do BGNC13

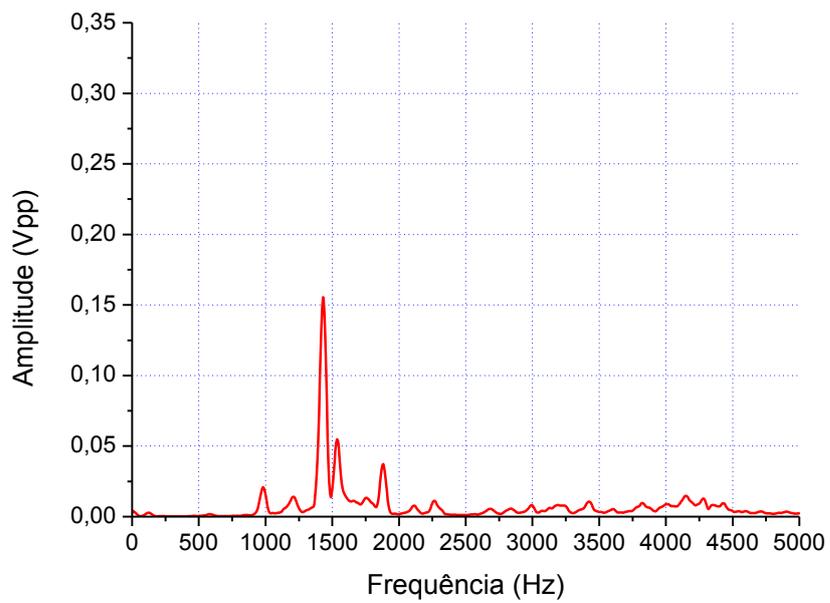


Figura D.14 – Média do BGNC14

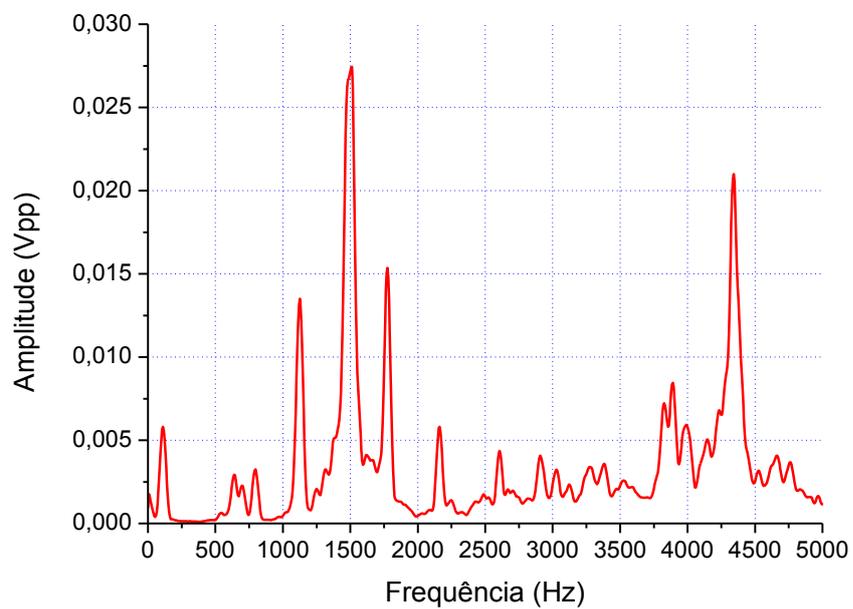


Figura D.15 – Média do BGNC15

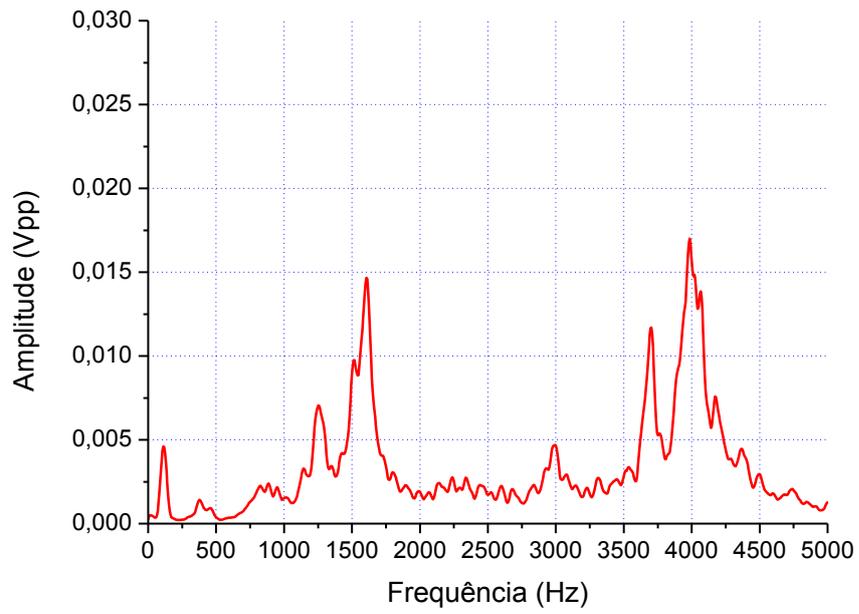


Figura D.16 – Média do BGNC16

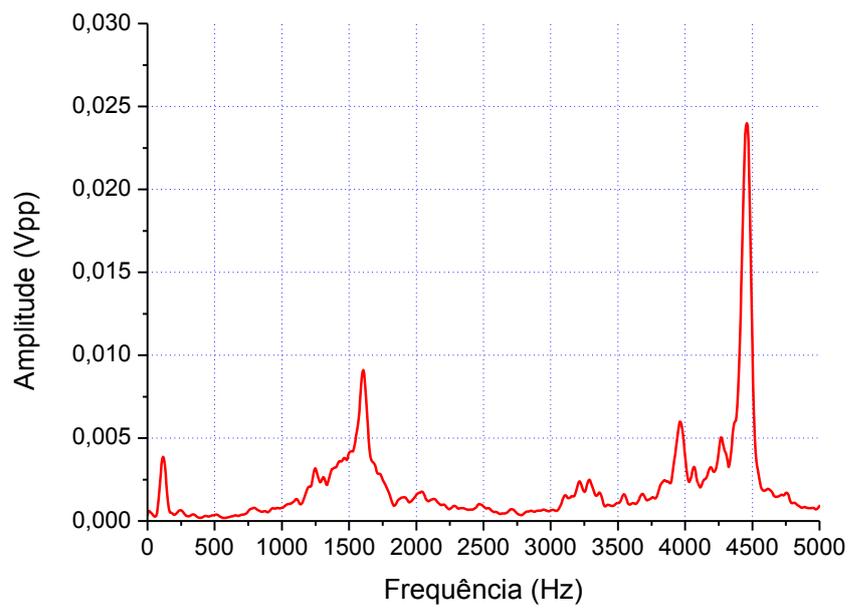


Figura D.17 – Média do BGNC17

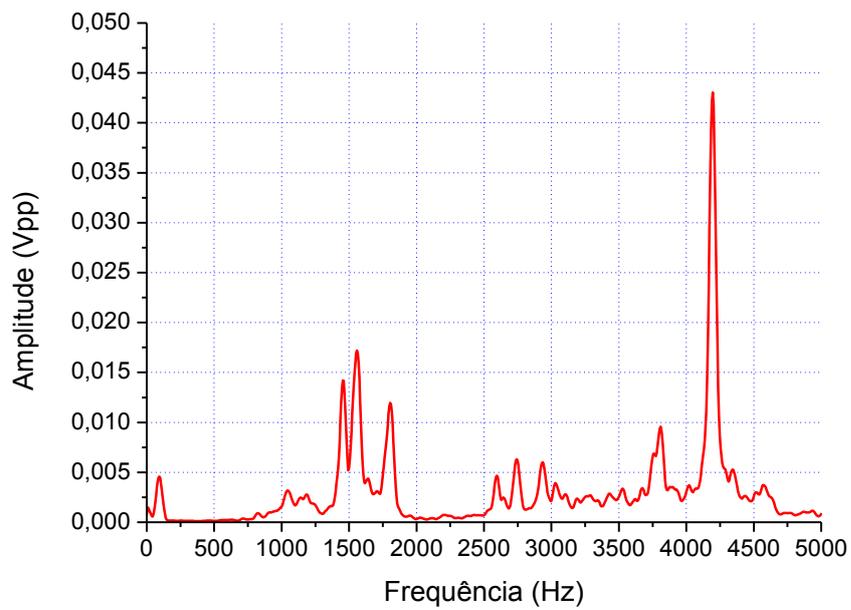


Figura D.18 – Média do BGNC18

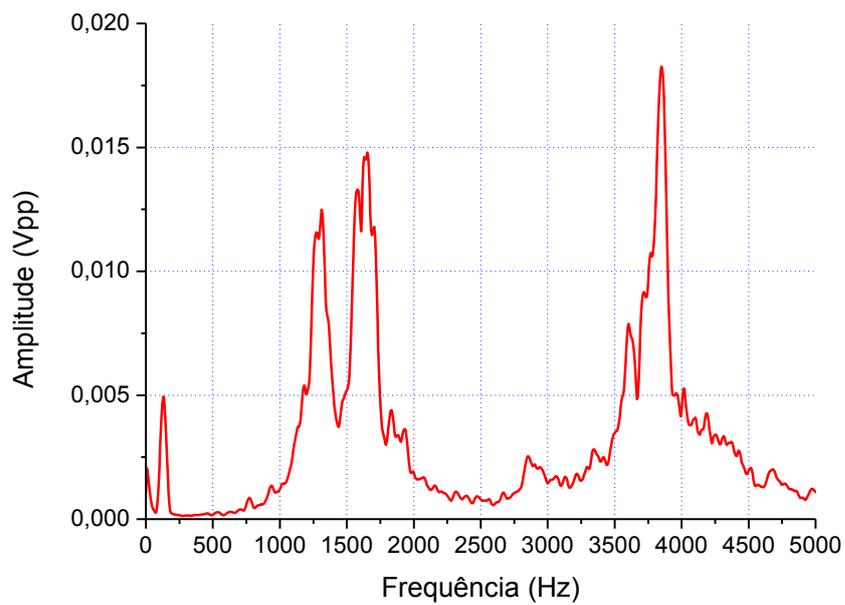


Figura D.19 – Média do BGNC19

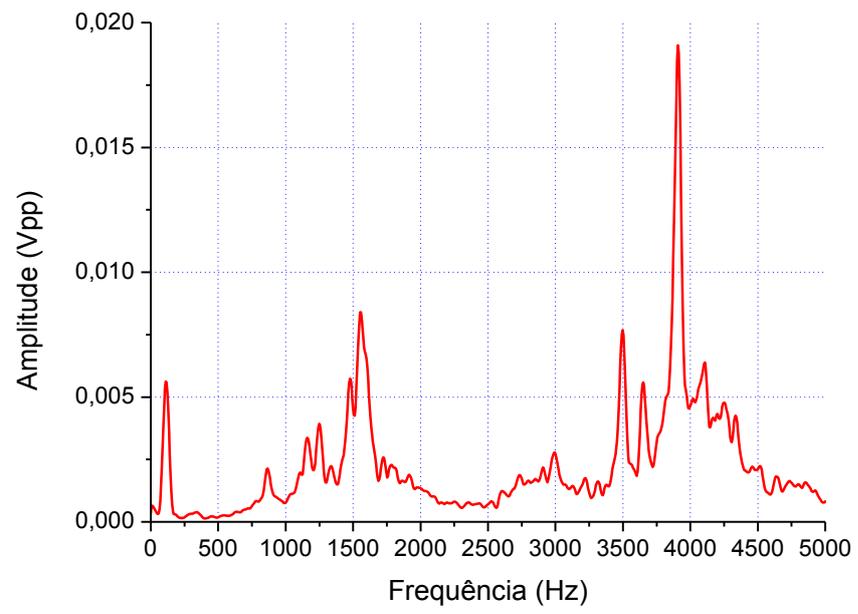


Figura D.20 – Média do BGNC20