



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

GABRIEL SOARES FERREIRA

**AVALIAÇÃO DE DANOS EM LAJES PRÉ-MOLDADAS DE
CONCRETO MEDIANTE O USO DE TESTES MODAIS: UM ESTUDO DE
CASO**

JOÃO PESSOA - PB

2016

GABRIEL SOARES FERREIRA

**AVALIAÇÃO DE DANOS EM LAJES PRÉ-MOLDADAS DE
CONCRETO MEDIANTE O USO DE TESTES MODAIS: UM ESTUDO DE
CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas

Orientador: Profº Dr. Roberto Leal Pimentel

JOÃO PESSOA - PB

2016

S676a Ferreira, Gabriel Soares

Avaliação de danos em lajes pré-moldadas de concreto mediante o uso de testes modais: um estudo de caso/ Gabriel Soares Ferreira. – João Pessoa, 2016.

70f. il.:

Orientador: Prof^a. Prof^o Dr^o Roberto Leal Pimentel

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – CGEC /Campus I / UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Testes de vibração 2. Detecção de dano 3. Ensaios não destrutivos
4. Domínio da frequência. I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2ª ed. 624 (043)

FOLHA DE JULGAMENTO

GABRIEL SOARES FERREIRA

AVALIAÇÃO DE DANOS EM LAJES PRÉ-MOLDADAS MEDIANTE O USO DE TESTES MODAIS: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em _____ de _____ de 20____.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas

Orientador: Profº Dr. Roberto Leal Pimentel

BANCA EXAMINADORA

Profº Dr. Roberto Leal Pimentel

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental –
CT/UFPB

Profª Dra. Andrea Brasiliano Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental –
CT/UFPB

Profº Hidelbrando José Diógenes Farkat

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental –
CT/UFPB

Profª Dra. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

À minha mãe Maria Cleide,
ao meu pai Antonio Ferreira (*in memoriam*),
à minha família e amigos e, principalmente,
à Deus, pela inspiração, amor e companhia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, que me deu ânimo e coragem para concluir esta etapa de minha vida.

Agradeço à minha família pelo apoio e suporte dados.

Agradeço aos amigos e colegas pelo companheirismo ao longo desse caminho trilhado.

Agradeço à Aninha Guedes, Rennan Mesquita e Nathália Andrielly pela amizade, pelas alegrias e bons momentos que vivenciamos. Agradeço à Fábio Giovanni pelos conhecimentos transmitidos e pela paciência.

Agradeço aos meus professores pelo compartilhamento do saber e, em especial, ao professor Roberto Pimentel pela oportunidade e confiança dadas a mim ao longo desses anos.

Agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa importante da minha vida.

“Porquanto, melhor é a sabedoria do que as mais finas jóias, e de tudo que se possa ambiciar, absolutamente nada se compara a ela!”

(Provérbios 8:11)

RESUMO

Os ensaios de vibração utilizados na detecção, localização, avaliação ou conhecimento do estado da estrutura estão dentro dos testes denominados não-destrutivos. Contudo, há controvérsias sobre os mesmos oriundas da sensibilidade dos parâmetros modais ao dano, isto é, quão degradada a estrutura deve estar para que ocorram variações consideráveis nas propriedades vibratórias (frequência natural, modos de vibração e amortecimento), o que é uma característica intrínseca da avaliação estrutural baseada em dados dinâmicos. Na presente monografia, foram realizados testes de vibração em lajes pré-moldadas visando avaliar a aplicação de ensaios não destrutivos voltado para detecção de dano. Para tanto, um conjunto de lajes pré-moldadas pertencentes a dois blocos residenciais com quatro imóveis cada foi estudado, identificando que nos dois blocos existiam lajes com e sem fissuras. Os testes de vibração foram realizados excitando a estrutura com martelo instrumentado e "*heel-drop*", tendo a resposta sido captada por acelerômetro. Observando-se o sinal do acelerômetro no domínio da frequência foi possível notar que as lajes fissuradas apresentavam valor mais baixo de frequência natural para o primeiro modo de vibração. Filtrando-se os sinais das frequências naturais mais baixas, foi possível observar variação no comportamento entre lajes fissuradas e não-fissuradas, ao plotar os valores relativos de frequência versus número de ciclos de decaimento, onde as primeiras apresentaram padrão de comportamento similar e diferente das lajes não-fissuradas. Tais fatos forneceram evidência para a viabilidade dos testes usados como metodologia para avaliação rápida da estrutura.

Palavras-chave: Testes de vibração, detecção de dano, ensaios não destrutivos, domínio da frequência

ABSTRACT

Modal tests used in detection, localization, evaluation or to provide information about the health of the structure are among the tests called non-destructive. However, there are controversial discussions about them based on the sensibility of modal parameters to the damage, that is, how intense the damage must be so that considerable variations occur, what is an intrinsic characteristic of structural diagnosis based on dynamic data. In the present work, vibration tests were applied in precast slabs aiming to evaluate the application initially mentioned. To reach it, a set of precast slabs from two residential buildings with four units each were studied, identifying that in both blocks there were slabs with and without cracking. Vibration tests were done exciting the structure with a hammer and heel-drop and the response was obtained by an accelerometer. Through the observation of the accelerometer signal in frequency domain it was possible to see that the cracked slabs presented a lower frequency value for the first vibration mode. By filtering the signals of the lower modes, it was possible to observe a variation on the behavior by plotting the relative frequency versus number of cycles though the comparison between the slabs with and without cracks, were the first ones presented a similar pattern and different from the intact ones. These facts provide evidence of viability of the used tests as a methodology for quick assessment of the structure.

Keywords: Vibration tests, damage detection, nondestructive tests, frequency domain

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
c	amortecimento viscoso
cm	centímetro
dB	decibel
DMS	displacement mode shape
EDO	Equação diferencial ordinária
ξ	taxa de amortecimento
Φ	ângulo de fase
FFT	fast fourrier transform
FRF	função resposta em frequência
°C	graus Celsius
g	gravidade
Hz	hertz
k	rigidez
kg	quilograma
kN	quilonewton
lbf	libra-força
m	massa
mA	miliampère
MEF	Método dos elementos finitos
NBR	Norma Brasileira
NDT	non-destructive test
mV	Milivolt
N	Newton
Ω	impedância
SMS	stain mode shape
V	Volt
V CC	Volt corrente contínua
ω	frequência

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: especificações da armadura das treliças	22
Tabela 2: Características do martelo instrumentado	32
Tabela 3: frequência vs tempo ciclo para laje 1A, com excitação por <i>single jump</i> no ponto <i>line</i> e acelerômetro no ponto <i>middle</i>	43
Tabela 4: frequência/frequência média vs tempo ciclo para laje 1A, com excitação por <i>single jump</i> no ponto <i>line</i> e acelerômetro no ponto <i>middle</i>	43
Tabela 5: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 1A... 46	
Tabela 6: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 4A... 47	
Tabela 7: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 1B... 47	
Tabela 8: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 4B... 48	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: comportamento de fissura em uma viga em balanço: (a) Fissura fechada com rigidez inicial; (b) estágio transitório e (c) fissura aberta com rigidez mínima	18
Figura 2: planta baixa térrea do duplex.....	20
Figura 3: planta baixa do 1º andar	20
Figura 4: disposição dos imóveis no terreno.....	21
Figura 5: esquema da seção transversal da laje	21
Figura 6: desenho esquemático da armadura da vigota.....	22
Figura 7: vigota Volterrana não-protendida.....	23
Figura 8: laje com vigotas volterranas protendidas e lajotas cerâmicas	23
Figura 9: laje da cobertura vista por baixo (vide cinta de amarração) ...	24
Figura 10: croqui da casa 1A com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)	25
Figura 11: croqui da casa 2A com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)	25
Figura 12: croqui da casa 3A com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)	26
Figura 13: croqui da casa 4A com representação dos pontos de ensaio (dimensões em cm).....	26
Figura 14: croqui da casa 1B com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)	27
Figura 15: croqui das casas 2B, 3B e 4B, com representação dos pontos de ensaio (dimensões em cm)	27
Figura 16: fissura em laje da casa 1A.....	28
Figura 17: fissura em laje da casa 1B.....	28
Figura 18: Esquema geral do sistema de aquisição	29
Figura 19: aplicação do heel-drop em laje de concreto	30
Figura 20: excitação de laje com martelo instrumentado.....	30
Figura 21: martelo instrumentado usado nos ensaios	31
Figura 22: forma do impulso em função do tipo de cabeça de bater .	32
Figura 23: espectro da força mostrando a resposta em frequência como função da cabeça de bater	32

Figura 24: esquema típico de um acelerômetro piezoelétrico.....	34
Figura 25: acelerômetro usado nos ensaios	34
Figura 26: Vista superior (a) e corte longitudinal (b) do acelerômetro ...	35
Figura 27: condicionador de sinais	35
Figura 28: analisador de espectro usado nos ensaios.....	36
Figura 29: croqui da casa 1A com indicação dos pontos de ensaio (dimensões em cm).....	37
Figura 30: croqui da casa 1B com indicação dos pontos de ensaio (dimensões em cm).....	37
Figura 31: espectro do sinal para laje 1B com ambas a excitação (usando o martelo instrumentado) e resposta no ponto <i>middle</i>	40
Figura 32: espectro do sinal considerado bom para casa 1B, com ambas a excitação (usando <i>heel-drop</i>) e resposta no ponto <i>middle</i>	40
Figura 33: amplitude no domínio da frequência com sinal considerado ruim para casa 1B, com excitação (usando <i>heel-drop</i>) e resposta no ponto <i>middle</i>	41
Figura 34: decaimento de sinal no domínio do tempo considerado bom, aplicado na casa 1B, com excitação (por <i>heel-drop</i>) e resposta no mesmo ponto, para modo no intervalo de 5 à 25 Hz.	42
Figura 35: decaimento de sinal no domínio do tempo considerado ruim, aplicado na casa 1B, com excitação (por <i>heel-drop</i>) e resposta no mesmo ponto, para modo no intervalo 5 à 30,5 Hz.	42
Figura 36: espectro médio para as lajes tipo A.....	45
Figura 37: espectro médio para as lajes tipo B.....	45
Figura 38: variação de frequência ao longo do sinal para a laje tipo A..	46
Figura 39: variação de frequência ao longo do sinal para a laje tipo B..	47

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 INTRODUÇÃO	12
1.2 ESTRUTURA DO TCC.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 GERAIS.....	15
2.2 ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4. METODOLOGIA.....	20
4.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	20
4.2 DOS EQUIPAMENTOS USADOS.....	29
4.3 DOS ENSAIOS.....	36
4.4 DO PROCESSAMENTO	39
5. RESULTADOS	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS.....	54
APÊNDICE	55

1. INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O atual panorama técnico-científico da construção civil é oriundo de evoluções tanto nos materiais aplicados quanto nas ferramentas computacionais. Uma preocupação que acompanhou tal evolução diz respeito à durabilidade das estruturas, que se mostrou mais visível com a relativamente recente publicação da Norma de Desempenho ABNT NBR 15755:2013 (Edificações Habitacionais - Desempenho), garantindo maior segurança para os projetistas e os usuários finais.

Dentro das patologias que podem acometer as estruturas de concreto armado, estão as fissuras. A norma brasileira para projeto de estruturas de concreto ABNT NBR 6118:2014 já contempla estados limites para que as fissuras que venham a surgir sejam imperceptíveis ao olho humano. Contudo, podem vir a surgir por variadas causas, seja um projeto estrutural defeituoso ou uma execução mal feita, por exemplo. Segundo Thomaz (1998), as fissuras são patologias particularmente importantes devido a três aspectos fundamentais que são o abalo psicológico causado, o alerta para um possível estado de perigo e comprometimento no desempenho da obra

Uma questão que também se levanta com o surgimento das fissuras é o grau de dano decorrente destas, que podem inclusive nem ser visíveis ou acessíveis. Usualmente, o estudo da causa é feito por inspeção visual, seguido da recuperação do elemento danificado. Contudo, a mesma nem sempre é eficiente, pois depende, em primeiro plano, da experiência do observador para identificar sua origem, e em segundo plano, da capacidade limitada para avaliação da extensão do dano. Assim, um conhecimento mais aprofundado em relação ao grau de dano teria vantagem em não apenas fornecer um diagnóstico mais preciso, como também uma recuperação menos onerosa.

Uma das formas de se acompanhar o desempenho de estruturas ou obter determinadas propriedades é mediante o uso de testes e ensaios não destrutivos (do inglês *Non-destructive Test* - NDT), a exemplo do uso da esclerometria para obtenção da resistência superficial de materiais ou do ultrassom, aplicado na

verificação da continuidade de peças estruturais. A ideia por trás de tais ensaios é que a estrutura a ser ensaiada sofra nenhum ou o mínimo de dano.

Conforme Curadelli et al (2008), os ensaios não destrutivos mais difundidos requerem que a localização do dano seja conhecida a princípio e que seja acessível para inspeção e ensaio. Tais limitações levaram ao desenvolvimento de técnicas de detecção baseadas em variações das propriedades vibratórias. Os testes modais aplicados na detecção de danos em estruturas são baseados nas relações entre as propriedades modais (como a frequência natural, taxa de amortecimento e os modos de vibração) e as propriedades físicas da estrutura analisada (massa, rigidez e amortecimento), de forma que as variações nas segundas levarão a mudanças que podem ser detectadas nas primeiras e associadas ao dano.

Uma das críticas feitas ao uso dos testes modais para detecção de dano, segundo Dilella e Morassi (2011), diz respeito à sensibilidade dos parâmetros dinâmicos ao dano, sendo uma característica intrínseca do diagnóstico baseado em dados dinâmicos. Contudo, testes realizados por Pimentel *et al* (2013) em lajes pré-moldadas de concreto, semelhantes às usadas neste estudo de caso, demonstraram a aplicabilidade dos referidos testes na detecção de dano oriundo de fissuração induzida por diferentes níveis de carga.

O motivador desta monografia é outro estudo realizado em lajes pré-moldadas formada por vigotas e com revestimento concretado *in loco*. Ao se aplicar testes modais em lajes com e sem fissuras e comparar os resultados, foi possível verificar que variações nos sinais captados eram observáveis. Assim, a motivação da pesquisa é demonstrar que os referidos testes podem ser usados como método prático para detecção de dano, em conformidade com resultados obtidos pelo autor desta monografia em ensaios realizados em lajes maciças durante período como aluno de iniciação científica.

1.2 ESTRUTURA DO TCC

O presente trabalho de curso inicia, no capítulo 2, explicando seus objetivos gerais e específicos. No capítulo 3 é apresentada a revisão da literatura a respeito do uso de ensaios de vibração como método para detecção de danos em estrutura, contendo os resultados mais relevantes e os mais recentes sobre o tema. Em sequência, no capítulo 4, é feita a apresentação do estudo de caso, seguida por explanação da metodologia aplicada e os materiais usados. No capítulo 5 são

apresentados os resultados obtidos, sobre os quais é feita a discussão. No capítulo 6 é feita a conclusão do trabalho, dissertando sobre o que se foi proposto e o que se conseguiu. O trabalho termina com a apresentação das referências bibliográficas adotadas e dos anexos/apêndices.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAIS

Explorando os conhecimentos adquiridos ao longo dos anos de iniciação científica, o objetivo geral é demonstrar, através de um caso prático, a aplicabilidade de testes modais como uma forma não destrutiva de detecção de danos em lajes pré-moldadas de concreto através da variação nas propriedades dinâmicas modais.

2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Descrever o sistema de aquisição utilizado;
- Aplicar testes de vibração em lajes com e sem fissuras;
- Verificar a ocorrência de variação das propriedades modais para diferentes estados (fissuradas ou não);
- Comparar os resultados para lajes dos imóveis de um mesmo bloco.
- Verificar a aplicabilidade dos testes modais em um caso real.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os testes modais estão dentro do grupo de tecnologias aplicáveis na verificação de degradação em estruturas. Uma classificação bem conhecida para os métodos de detecção de dano é baseada na informação que o método pode fornecer, tendo sido definida por Rytter (1993, p. 3) em quatro níveis:

- Nível 1: Detecção, o método aqui inserido fornece uma indicação qualitativa do dano que pode estar presente na estrutura.
- Nível 2: Localização, onde o método dá informações sobre o provável local do dano.
- Nível 3: Avaliação, o método fornece informações sobre o tamanho do dano.
- Nível 4: Consequência, o método fornece informações sobre a segurança atual da estrutura dado um certo nível de dano.

Na classificação dada por Rytter (1993), cada nível engloba também as características dos níveis anteriores. Assim, um método no Nível 3 também atende aos requisitos dos níveis 1 e 2, e assim sucessivamente.

No caso dos testes modais, há estudos sobre a aplicação dos mesmos nos diferentes níveis de classificação supracitados, dependendo do tipo de material estudado e da propriedade modal analisada. Xu et al (2014) obteve resultados positivos na detecção de dano em um modelo experimental de um edifício de 12 andares em aço através de variações na rigidez. Em um estudo com vigas simplesmente apoiadas de concreto armado, Ismail e Ong (2012) objetivavam detectar a localização e o grau de dano oriundo de vazios de concretagem mediante a variação na rigidez a flexão, tendo êxito apenas em detectar a localização. Curadelli et al (2008) usou a variação no coeficiente instantâneo de amortecimento para detecção de danos em vigas de concreto armado. No trabalho de Hu *et al* (2011), testes modais foram usados para obtenção das primeiras frequências vibração em vigas de madeira para variados graus de dano, simulados através da remoção de massa das mesmas. Um algoritmo indicador de dano baseado na comparação da flexibilidade modal local pré e pós-dano foi aplicado, conseguindo detectar e localizar os danos para diferentes cenários.

Uma outra aplicação encontrada na literatura foi o uso de testes modais para a calibração de modelos reais construídos usando o método dos elementos finitos (MEF). Uma vez obtidas as propriedades modais *in loco*, as mesmas são usadas na correção dos modelos computacionais e, com isso, permite-se detectar danos em estruturas. Chellini *et al* (2010) realizou ensaios modais em um pórtico de aço com lajes de concreto sujeito a vibrações sísmicas, obtendo as propriedades vibratórias para três níveis de degradação e inserindo-as em um modelo MEF, tendo como objetivo acompanhar a evolução dos danos nas ligações viga-pilar.

Também em relação ao uso de ensaios modais associados à modelos MEF, Hsieh *et al* (2008) aplicou técnicas de detecção de dano usando modelo em elementos finitos corrigido com ensaios modais, estudando três casos: um puramente numérico, um protótipo em escala de um edifício e uma ponte de concreto com seis vãos. Como resultado, foi possível não apenas localizar como também conhecer a magnitude do dano. Outro trabalho que envolveu o uso de modelos MEF foi o desenvolvido por Kim e Lee (2000). Nele, os autores investigaram a variação das propriedades modas e sua comparação com modelos em elementos finitos para detecção de danos em tubos de aço. As propriedades modais avaliadas foram as frequências naturais, os modos de vibração em deslocamento ou DMS (*displacement mode shape*) e os SMS (*stain mode shape*), tendo estes últimos apresentado os resultados mais satisfatórios como indicadores da existência de patologias.

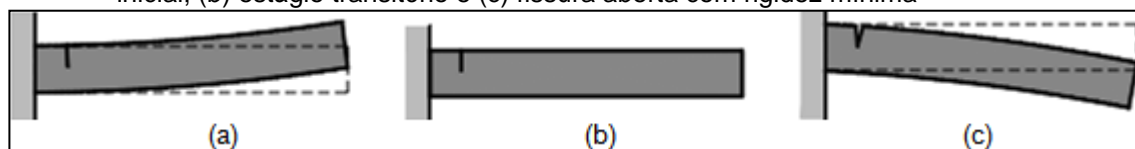
Um método interessante para detecção de dano encontrado na literatura foi o uso de algoritmos para filtragem de sinais. Dworakowski, Ambrosini e Mandrok (2015) avaliaram o uso da filtragem modal para localização de danos em placas. Tomando por base o fato de que os danos alteram os modos de vibração localmente devido à perda de rigidez, os autores criaram uma malha em uma placa de aço e aplicaram dois danos à mesma. O método proposto conseguiu não apenas localizar os danos, como também fornecer suas magnitudes e direções.

Embora os testes modais tenham como objetivo primário detectar danos, à medida em que avançam na escala proposta por Rytter (1993), se faz necessária também a criação de índices para permitir comparação de resultados. Nesse sentido, pode-se os trabalhos de Gao *et al* (2015) e de Iezzi, Spina e Valente (2015). No primeiro, os autores propuseram um indicador de dano (*damage index*) baseado na parte imaginária da Função Resposta em Frequência (FRF), a qual é relacionada

com a flexibilidade modal. Ensaio realizados em uma placa de aço com dois danos e diferentes condições de apoio demonstraram a efetividade do índice proposto. Já no segundo artigo, os autores propuseram indicadores baseados nos efeitos da variação de amortecimento nos modos de vibração, o que ocorria pelo aumento da energia de dissipação com a degradação. Os modos complexos originados com os dados foram transformados em escalares e comparados com indicadores oriundos da literatura. O uso de indicadores globais de dano também foi identificado, embora com menor frequência. Almeida, Rodrigues e Lima (2010) avaliaram, em relatório de pesquisa na Rodovia Presidente Dutra, o grau de dano em pontes de concreto ao longo da referida rodovia através de um indicador de dano global que considerava a variação das frequências naturais de vibração.

Uma outra forma de classificação das tecnologias de detecção de danos em estruturas diz respeito ao comportamento do material durante o ensaio modal, conforme a Figura 1, havendo duas categorias: método elástico-linear e aproximação dinâmica não-linear. Conforme Tücker e Bayraktar (2011), a classificação em uma das duas categorias vai depender das suposições feitas.

Figura 1: comportamento de fissura em uma viga em balanço: (a) Fissura fechada com rigidez inicial; (b) estágio transitório e (c) fissura aberta com rigidez mínima



Fonte: Ramos *et al* (2006)

O método é dito linear se for assumida a hipótese de que, durante o teste modal, as fissuras permanecem abertas, o que origina uma resposta também linear. Com isso, os danos só podem ser ligados a variações nas condições de contorno, geometria ou propriedades dos materiais (como a perda de massa, rigidez). Nesta categoria se encontram a maior parte dos estudos. Caso contrário, o método é não-linear, onde a estrutura recupera sua rigidez quando, durante o movimento oscilatório, as fissuras se fecham. Os estudos nesta segunda considerando as características não-lineares do concreto armado na detecção de dano também apresentaram resultados satisfatórios, embora em um número mais discreto de publicações.

O uso de redes neurais, que se baseiam no cérebro humano e simulam o comportamento do sistema nervoso, associadas a testes de vibração para detecção

de danos, foi uma outra metodologia encontrada na literatura. Marcy *et al* (2013) fez o uso de redes neurais artificiais com um algoritmo de retropropagação que, exitosamente, quantificou danos em pórticos espaciais previamente localizados pelo método do erro residual.

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso desta monografia são oito imóveis tipo duplex iguais entre si em planta, construídos em concreto armado e com alvenaria de vedação. No pavimento inferior, os imóveis contam com terraço, salas de estar e jantar, banheiro, cozinha e dispensa sob a escada de acesso ao andar superior. No primeiro pavimento estão localizadas duas suítes, sendo uma delas com varanda. Em ambos os pavimentos, o revestimento interno do piso é de cerâmica 40x40cm. Plantas baixas dos pavimentos térreo e superior, bem como um esquema da disposição dos imóveis no terreno, podem ser visualizados, respectivamente, nas Figuras 2, 3 e 4.

Figura 2: planta baixa térrea do duplex

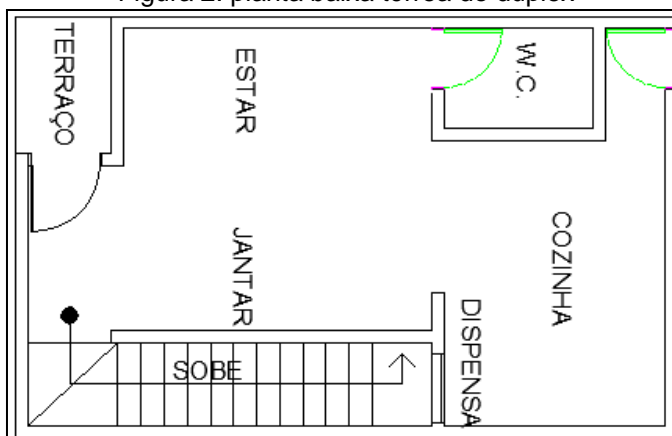


Figura 3: planta baixa do 1º andar

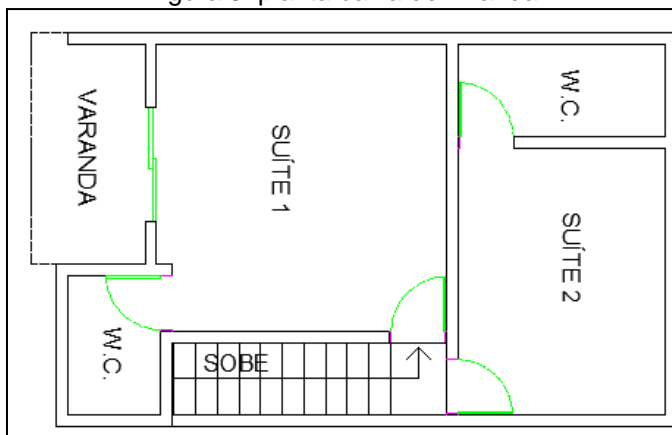
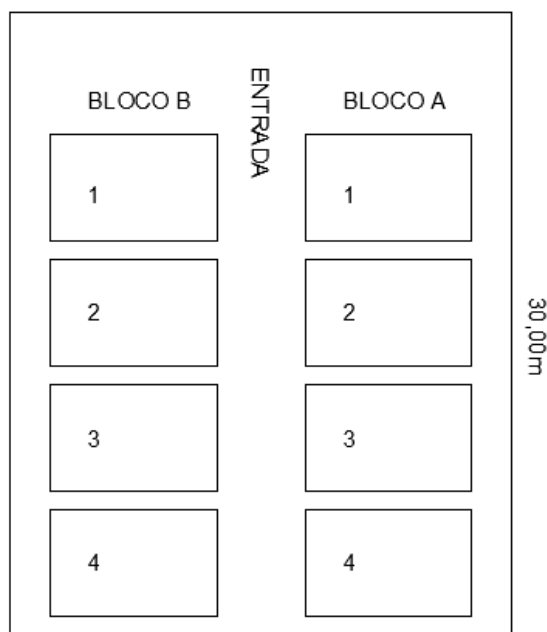
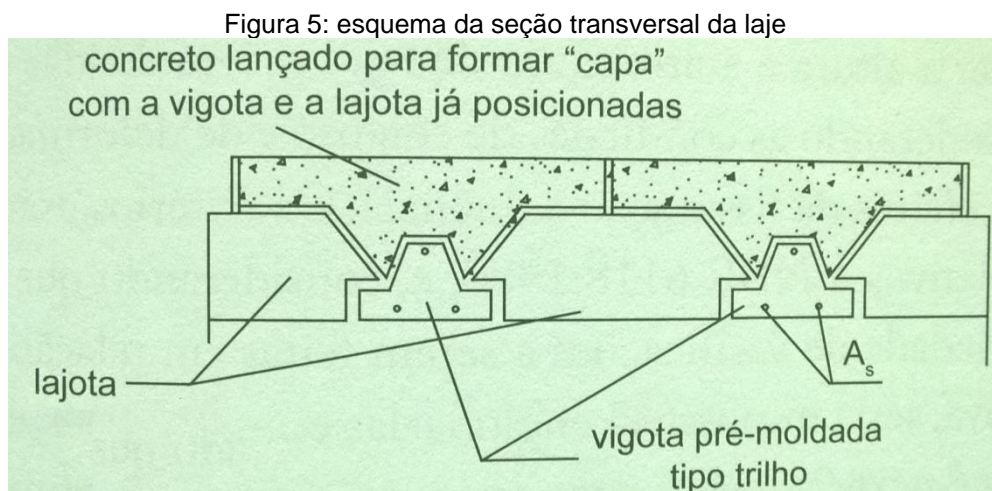


Figura 4: disposição dos imóveis no terreno
24,00m

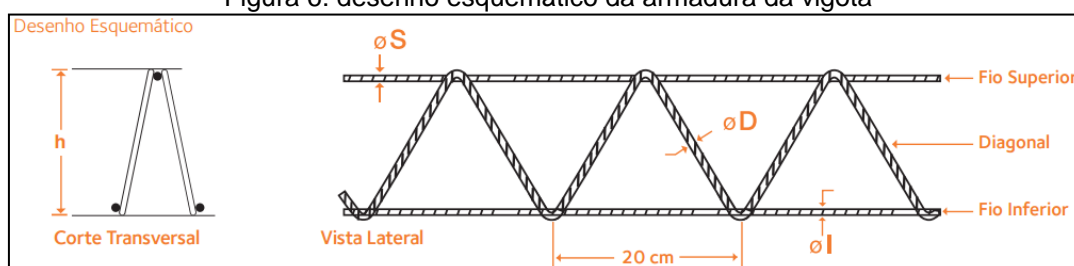


Os imóveis foram construídos em concreto armado com o uso de lajes pré-moldadas do tipo Volterrana com o uso de lajotas cerâmicas como material inerte. A Figura 5 apresenta um esquema da seção transversal desse tipo de laje. Na figura 6 é apresentado um desenho esquemático da armadura utilizada no trilho de concreto.



Fonte: Carvalho e Filho (2013, pág. 87)

Figura 6: desenho esquemático da armadura da vigota

Fonte: Acelor Mital¹

Considerando-se o vão mínimo encontrado e o tipo de edificação, o trilho adotado pode-se supor sendo do tipo Beta-12, cuja armadura inferior é $2\phi 6,0\text{mm}$, conforme mostra a Tabela 01 fornecida pelo fabricante Acelor Mittal.

Tabela 1: especificações da armadura das treliças

Modelo	Designação	Altura (h) (mm)	Composição/Fios			Peso Linear (kg/m)
			Superior (ϕS)	Diagonal (ϕD)	Inferior (ϕI)	
TB 8L	TR 8644	80	6	4,2	4,2	0,735
TB 8M	TR 8645	80	6	4,2	5	0,825
TB 12M	TR 12645	120	6	4,2	5	0,886
TB 12R	TR 12646	120	6	4,2	6	1,016
TB 16L	TR 16745	160	7	4,2	5	1,032
TB 16R	TR 16746	160	7	4,2	6	1,168
TB 20L	TR 20745	200	7	4,2	5	1,111
TB 20R	TR 20756	200	7	5	6	1,446
TB 25M	TR 25856	250	8	5	6	1,686
TB 25R	TR 25858	250	8	5	8	2,024
TB 30M	TR 30856	300	8	5	6	1,823
TB 30R	TR 30858	300	8	5	8	2,168

Fonte: Acelor Mital²

Ilustrações dos trilhos usados e do enchimento com tijolos bem como do executado em loco estão demonstradas nas Figuras 07, 08 e 09. As vigotas usadas nesse tipo de laje podem ser protendidas ou não. Por comparação, as não-

¹Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/galeria-midia/publicacoes/handbook.pdf>>. Acesso em: Junho, 2016

²Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/galeria-midia/publicacoes/handbook.pdf>>. Acesso em: Junho, 2016

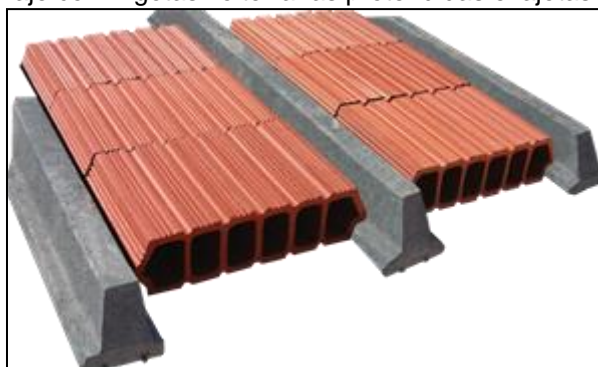
protendidas, além de suportarem uma carga menor, possuem uma armadura de espera para ancoragem e transmissão de esforços, conforme a Figura 06. O uso de lajes pré-moldadas Volterranas tem como principais vantagens a agilidade e menor custo de execução, por dispensar o uso de fôrmas e ter necessidade de menos escoramento, além de ser mais leve, se comparada com a equivalente maciça. Nessas lajes, as vigotas são dispostas no sentido do menor vão, recebendo uma capa de concreto por cima. Há, contudo, a necessidade de uma armadura suplementar na direção transversal para evitar fissuras de retração.

Figura 7: vigota Volterrana não-protendida



Fonte: Arte Laje³

Figura 8: laje com vigotas volterranas protendidas e lajotas cerâmicas



Fonte: Central Premoldados⁴

³ Disponível em: < <http://www.artelaje.com.br/site/laje/index.php>>. Acesso em: Fev, 2016

⁴ Disponível em: < <http://centralpremoldados.com.br/home/2013-01-16-22-35-25/2013-01-16-23-06-29>>. Acesso em: Fev, 2016

Figura 9: laje da cobertura vista por baixo (vide cinta de amarração)



Por inspeção visual, observou-se que as lajes sobre as áreas de estar e jantar de alguns dos imóveis possuíam fissuras no reboco e que, em alguns casos, tinham a extensão de todo o vão do ambiente. A etapa inicial do estudo de caso foi o mapeamento de todas as fissuras existentes, com sua disposição, extensão e localização (apenas no reboco ou na cerâmica de revestimento superior). Croquis dos imóveis contendo os pontos escolhidos para o ensaio e mapeamento das fissuras encontradas podem ser vistos nas figuras 10 à 15.

Figura 10: croqui da casa 1A com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)

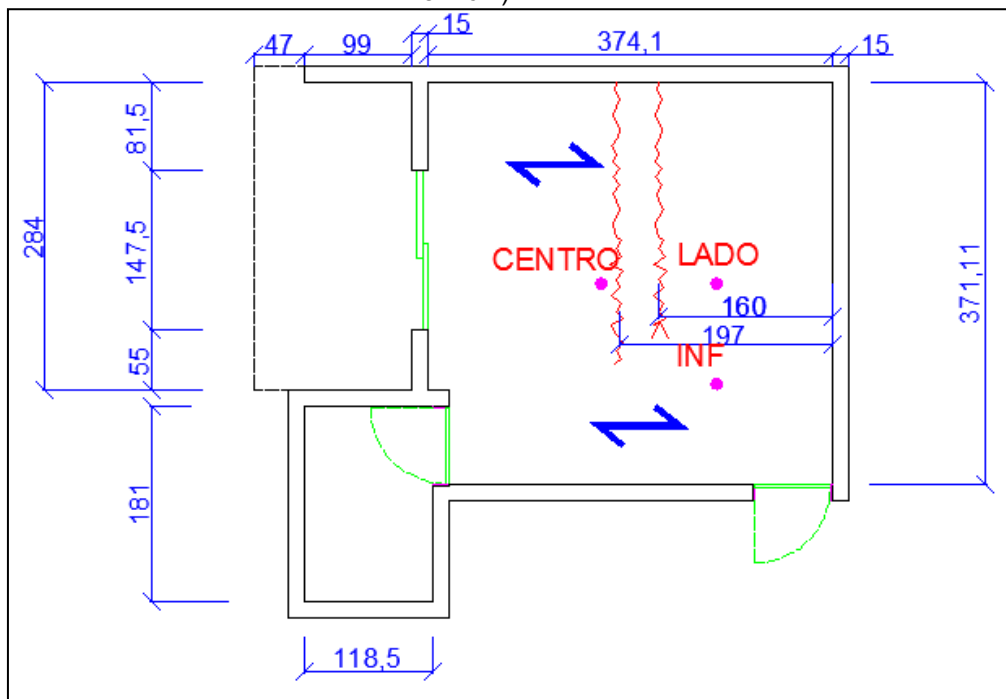


Figura 11: croqui da casa 2A com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)

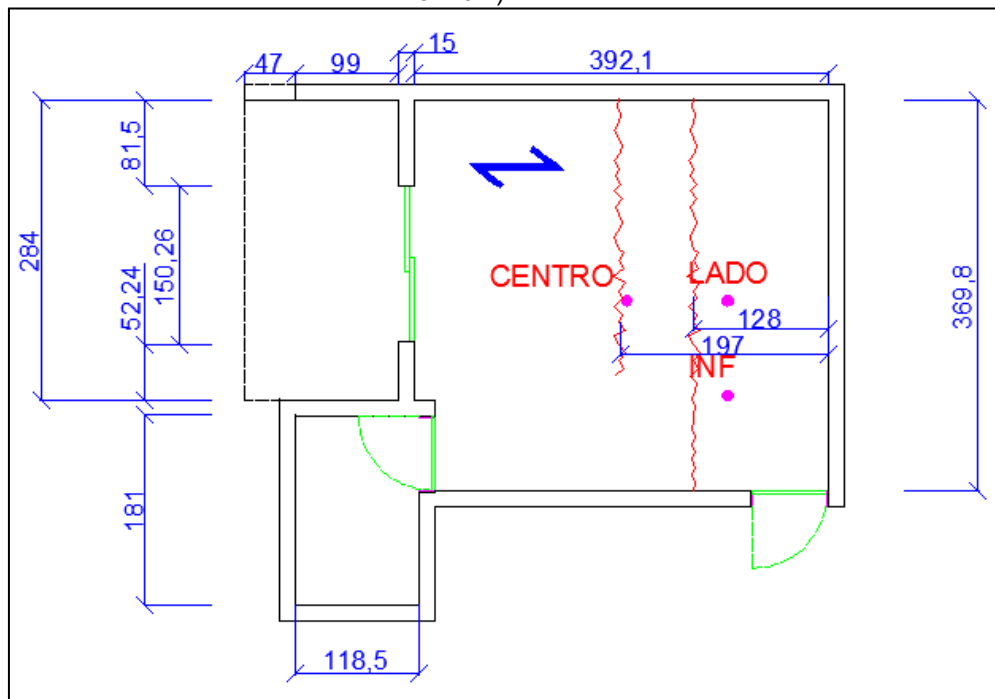


Figura 12: croqui da casa 3A com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)

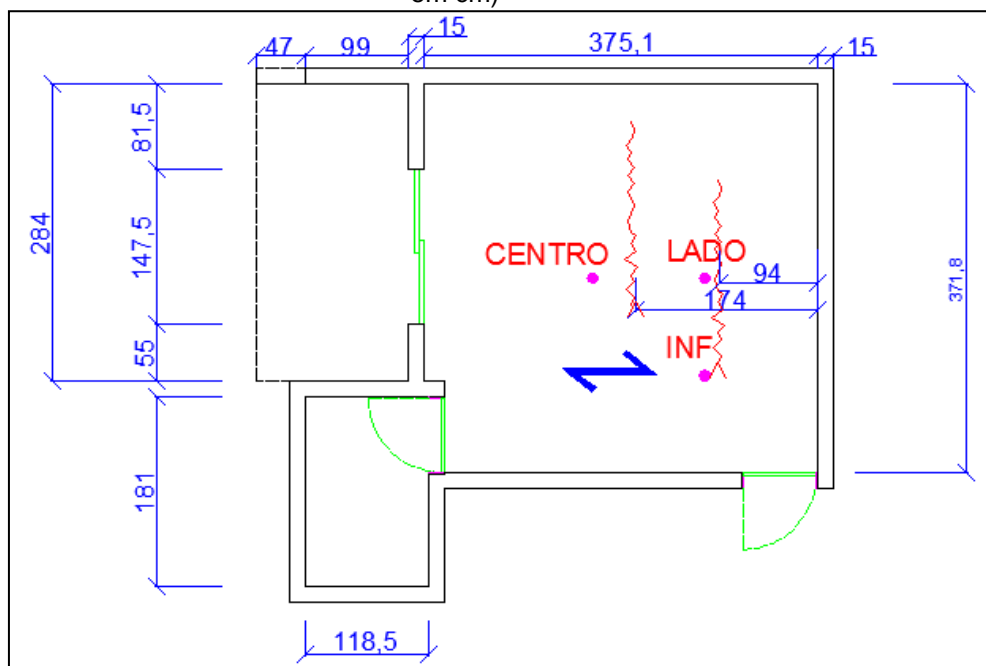


Figura 13: croqui da casa 4A com representação dos pontos de ensaio (dimensões em cm)

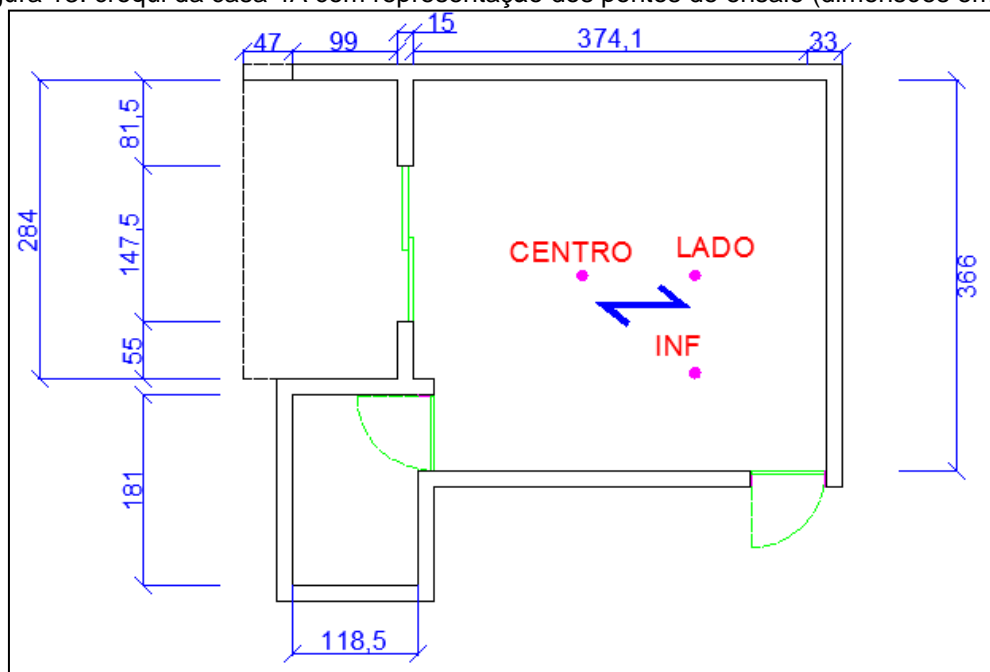


Figura 14: croqui da casa 1B com representação das fissuras e pontos de ensaio (dimensões em cm)

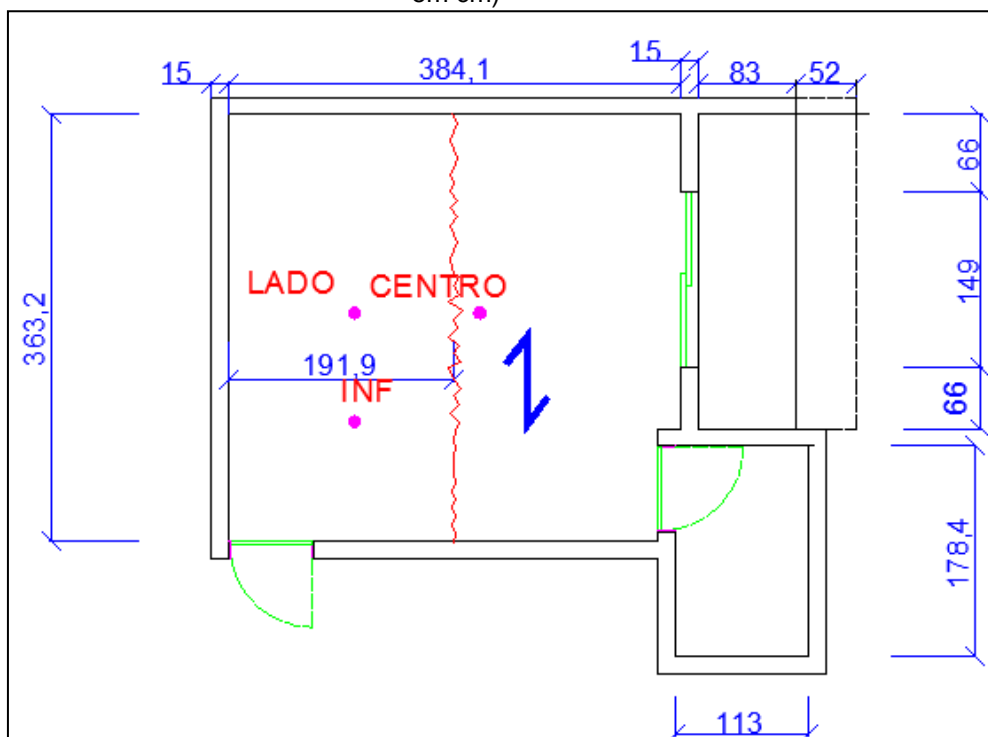
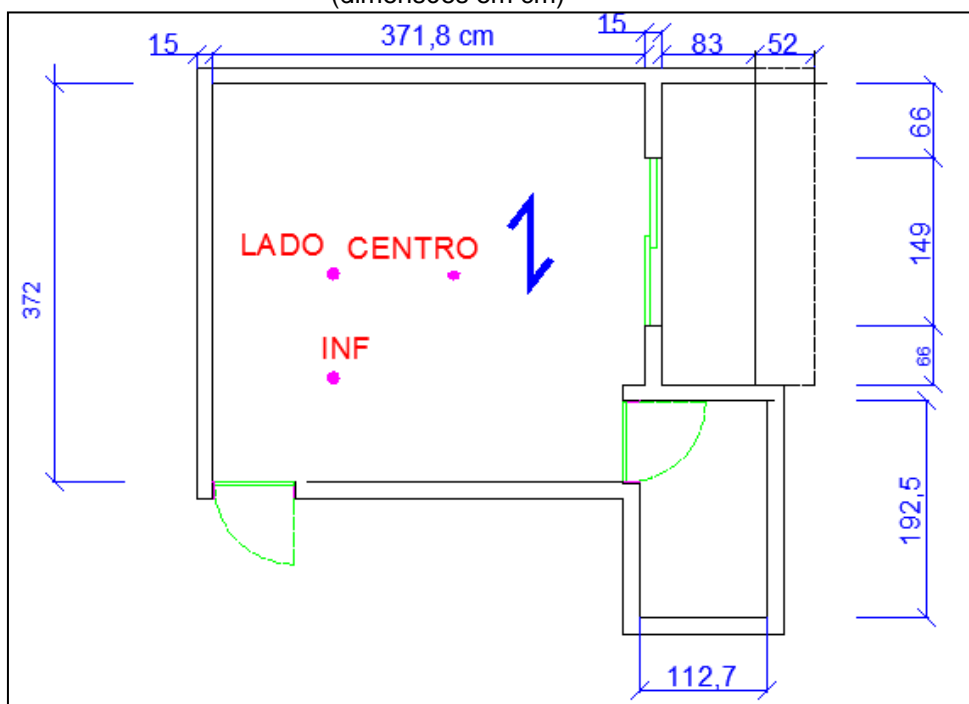


Figura 15: croqui das casas 2B, 3B e 4B, com representação dos pontos de ensaio (dimensões em cm)



Em seguida, se realizou a quebra de parte do reboco inferior para verificar se as fissuras estavam ocorrendo paralela ou perpendicularmente às vigotas. Conforme

observados nas Figuras 16 e 17, as trincas não apenas estavam paralelas às vigotas, como também ocorriam na região de contato do elemento pré-moldado com as lajotas cerâmicas.

Figura 16: fissura em laje da casa 1A

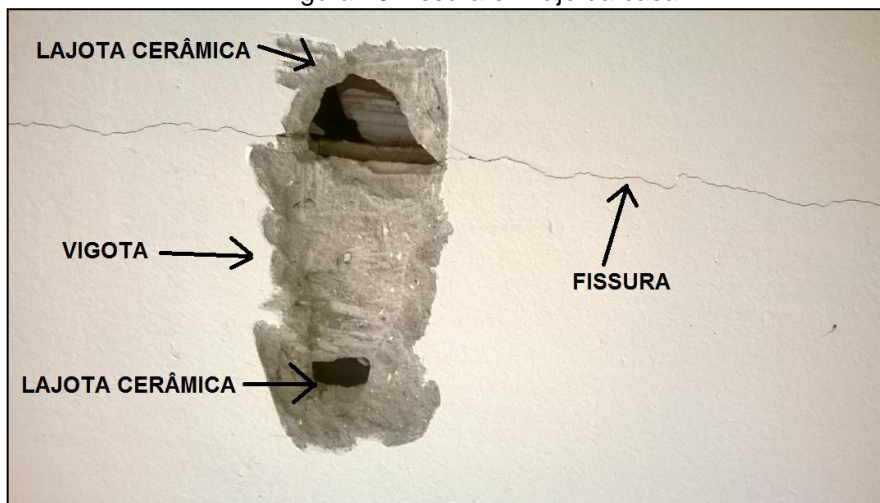
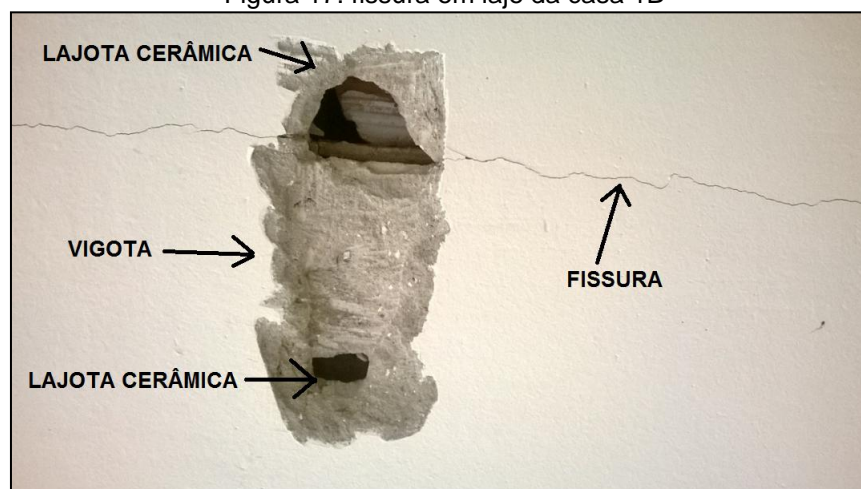


Figura 17: fissura em laje da casa 1B



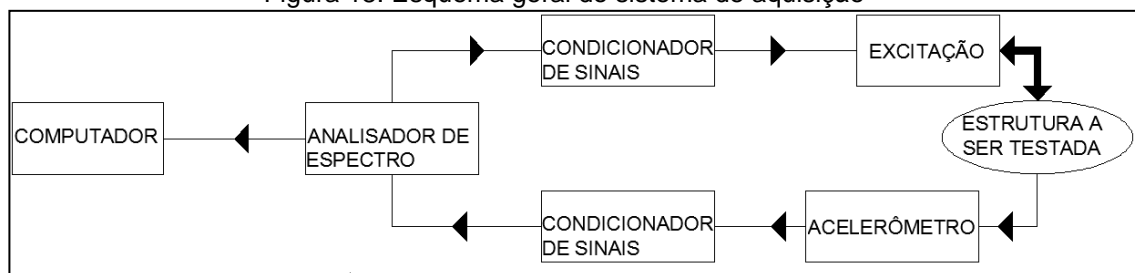
Como os oito imóveis estavam desocupados, tinham um mesmo padrão arquitetônico e cinco deles tinham fissuras, se verificou a possibilidade de avaliar a aplicabilidade dos testes modais e compará-los com os imóveis que não apresentavam trincas. A comparação se deu por meio das propriedades modais, obtidas com um sistema de aquisição a ser descrito a seguir.

4.2 DOS EQUIPAMENTOS USADOS

A verificação da existência de dano é feita pela variação nas propriedades vibratórias da estrutura. Para obtenção das referidas propriedades, usa-se um sistema de aquisição, cujo esquema pode ser observado na Figura 18. Com exceção da conexão entre o analisador de espectro e o computador, a qual é feita por cabo USB, os demais componentes são ligados entre si com o uso de cabos com terminais do tipo BNC. O sistema de aquisição adotado nos ensaios tem como elementos principais:

- fonte do sinal de excitação;
- acelerômetro;
- condicionador de sinais;
- analisador de espectros

Figura 18: Esquema geral do sistema de aquisição



Fonte: Adaptado de EWINS (1984, página 101)

A função desempenhada por cada componente do sistema de aquisição é dada a seguir.

4.2.1 Fonte do sinal de excitação

Depende do tipo de ensaio que será executado. No caso estudado, a excitação foi feita inicialmente com martelo instrumentado e, posteriormente, com *heel-drop*. O *heel-drop* (ou *step relaxation*, do inglês, que significa "lançamento ou relaxamento de calcanhar") consiste em ficar apoiado na ponta dos pés e, subitamente, lançar-se contra o piso, aplicando um impacto com os calcanhares, conforme ilustrado na figura 19.

Figura 19: aplicação do heel-drop em laje de concreto



Fonte: BUTZ, HECHLER e TRUMPF (2005, pg. 488)

A outra forma de excitação é mediante o uso de um martelo instrumentado, também chamado de martelo de impacto, conforma a figura 20. O referido instrumento consiste de uma marreta dotada de uma cabeça fixa e diferentes cabeças de bater, sendo ainda dotado de uma célula piezoelétrica em seu interior. Uma característica dos materiais piezoelétricos é que, ao sofrerem impacto, geram corrente elétrica. Assim, ao excitar a estrutura, um sinal elétrico é gerado, sendo transmitido ao analisador de espectros.

Figura 20: excitação de laje com martelo instrumentado



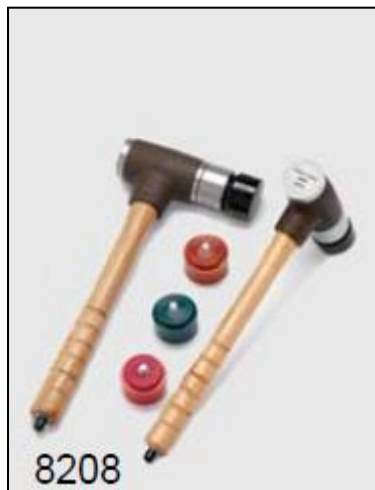
Fonte: BUTZ, HECHLER e TRUMPF (2005, pg. 488)

Conforme dito anteriormente, o martelo instrumentado dispõe de cabeças de bater com diferentes rigidezes. A sensibilidade dos mesmos é expressa em unidades de voltagem por força (mV/N ou mV/lbf). A escolha da cabeça que irá excitar a estrutura depende da rigidez do material excitado. Quanto mais rígidos os materiais, menor será a duração do pulso e, assim, maior será a faixa de frequência coberta pelo impacto. De forma análoga, quanto mais flexível for a cabeça do martelo, menor será a faixa de frequência. Dessa forma, a cabeça do

martelo escolhida para excitar a estrutura foi a mais flexível disponível, de forma a concentrar a energia de impacto na faixa mais baixa de frequência.

Pode-se observar na Figura 21 o martelo usado nos experimentos. O modelo usado é o Tipo 8208, da Brüel&Kjaer. O mesmo é dotado de uma cabeça de 3 libras (1,36078 kg) e quatro cabeças de bater com variadas rigidezes.

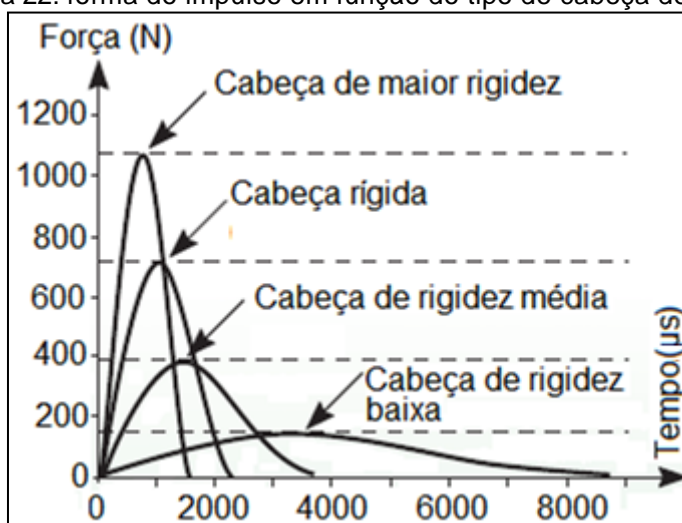
Figura 21: martelo instrumentado usado nos ensaios



Fonte: Folheto do produto (BRUEL&KJAER Inc.,2015)

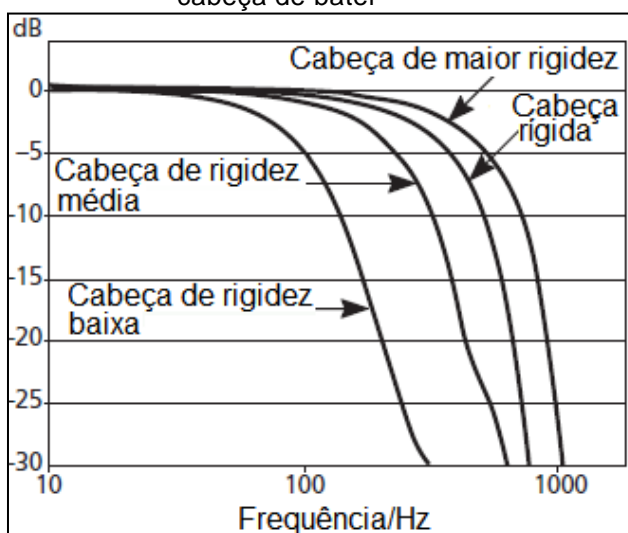
Conforme o folheto informativo sobre o equipamento disponibilizado pelo fabricante, as cabeças de bater permitem controlar a amplitude e o decaimento do impacto e da resposta em frequência. Isso pode ser observado nas Figuras 22 e 23, também constantes no folheto que está no apêndice dessa monografia, representando, respectivamente, a forma dos sinais de impulso de acordo com o tipo de cabeça de bater e a resposta em frequência como função do tipo de cabeça de bater. Na Figura 22, onde se mostra a forma do impulso em função do tipo de cabeça de bater, sendo possível observar que, quanto menor a rigidez da cabeça de bater, mais longo é o decaimento. Na figura 23, observa-se o espectro da força mostrando a resposta em frequência como função da cabeça de bater. A Tabela 2 contém as especificações do fabricante para o modelo usado nos ensaios.

Figura 22: forma do impulso em função do tipo de cabeça de bater



Fonte: Folheto do produto (BRUEL&KJAER Inc.)

Figura 23: espectro da força mostrando a resposta em frequência como função da cabeça de bater



Fonte: Folheto do produto (BRUEL&KJAER Inc.)

Tabela 2: Características do martelo instrumentado

Características Dinâmicas	Unidade	
Sensibilidade (Típica)	mV/N	0,225
Escala Total para Intervalo da Força de Compressão	kN	22,2
Erro Linear na Escala Total	% da escala total	< ±2
Características Elétricas		

Tabela 2: Características do martelo instrumentado

(Continua)

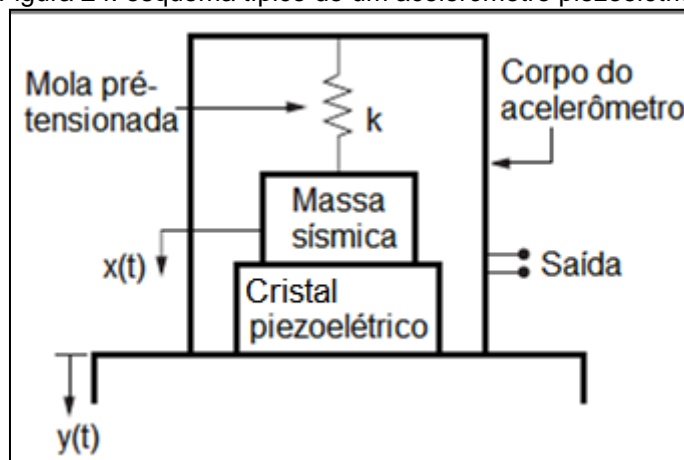
Características Dinâmicas	Unidade	
Escala Total na Tensão de Saída	V	±5
Tensão de Polarização de CC	V	+9 até +12
Impedância de Saída	Ω	<100
Tensão de Alimentação	mA	2 à 20
Escala de Voltagem	V CC	+18 à +30
Características do Ambiente		
Intervalo de Temperatura	°C	-73 à +60
Máxima Força de Compressão	kN	44,4
Características Físicas		
Comprimento total	cm	'93
Massa Sísmica Efetiva	k	1,36
Material da caixa do sensor	-	17-4 aço inoxidável
Conector	-	BNC

Fonte: Folheto do produto (BRUEL&KJAER Inc.)

4.2.2 Acelerômetro

Os acelerômetros fazem parte do grupo de equipamentos denominados transdutores, cuja função é converter uma forma de energia (mecânica) em outra (elétrica). Assim como o martelo instrumentado, o acelerômetro é dotado de uma célula piezoelétrica. Contudo, a transdução no acelerômetro se faz de forma indireta, mediante o uso de uma massa sísmica (ou auxiliar), que pode ser esquematicamente observada na Figura 24. Ao excitar a estrutura, o conjunto massa sísmica e corpo do acelerômetro se movem em conjunto, sendo a razão das acelerações da massa sísmica e do corpo do acelerômetro (x''/y''), conforme EWINS (1984), unitária para um intervalo de frequência de zero até a primeira frequência ressonante do transdutor.

Figura 24: esquema típico de um acelerômetro piezoelétrico



Fonte: Adaptado de KELLY,2012

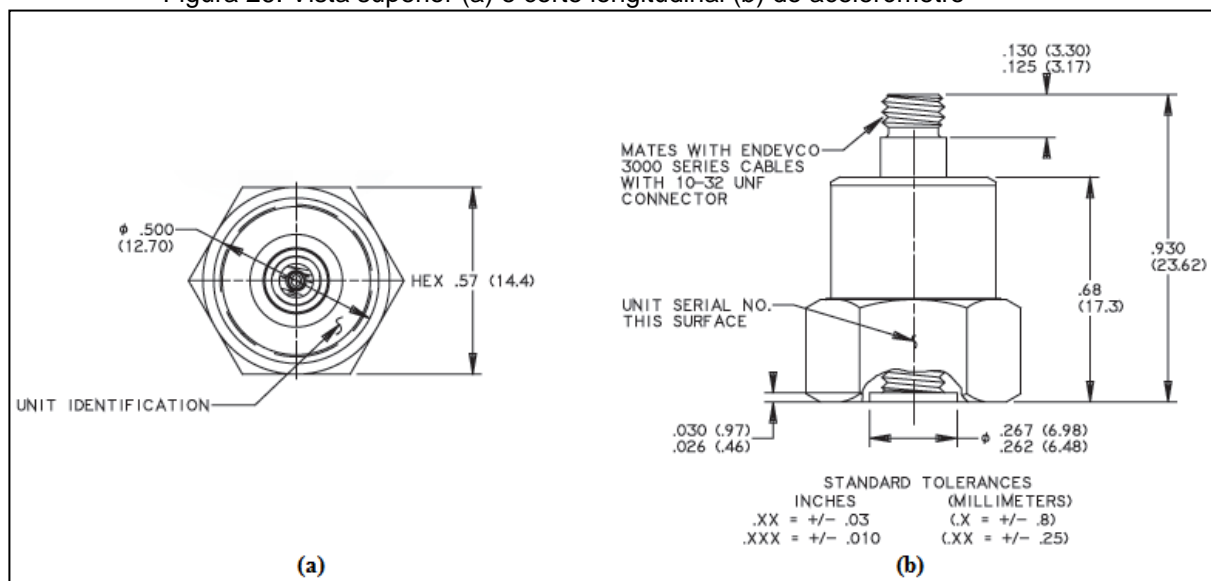
Quando o corpo ao qual o acelerômetro está equipado vibra, a massa sísmica se move em relação ao corpo do transdutor, causando deformação no cristal piezoelétrico, o que gera corrente elétrica, a qual é transmitida ao analisador de espectro já amplificada. O sinal do movimento é da massa sísmica em relação ao corpo do acelerômetro.

Nos ensaios realizados, o acelerômetro usado foi o modelo Isotron® 752A13 da Endevco®, com sensibilidade de 1V/g. O modelo, que pode ser visto nas Figuras 25 e 26, possui uma base hexagonal com rosca para fixação e saída de dados na parte superior. O referido modelo atua numa ampla faixa de frequências, indo até 100kHz.

Figura 25: acelerômetro usado nos ensaios



Figura 26: Vista superior (a) e corte longitudinal (b) do acelerômetro



Fonte: Catálogo do fabricante (ENDEVCO, 2015)

4.2.3 Condicionador de Sinais

Os sinais emitidos pelo cristal piezoelétrico do acelerômetro não podem ser diretamente fornecidos ao analisador de espectro devido ao fato de terem pequena intensidade. Assim, para que o sinal tenha uma intensidade capaz de ser lida pelo analisador, deve antes passar pelo condicionador de sinais, o qual atua de duas formas: amplificando a carga ou a tensão fornecida pelo acelerômetro.

O condicionador usado nos ensaios foi o modelo 4416B da Endevco®, que pode ser visto na Figura 27.

Figura 27: condicionador de sinais



4.2.4 Analisador de Espectros

O analisador de espectros tem a função de medir e processar os sinais condicionados das fontes de excitação e resposta. Dos diferentes tipos existentes, o mais comum é o Analisador de Espectro de Fourier (do inglês *Fast Fourier Transform*, FFT). Com base nos sinais processados é possível obter propriedades como a taxa de amortecimento, frequências naturais e modos de vibração, seja na forma gráfica ou numérica.

Usou-se nos ensaios o analisador SignalCalc® Ace, da Data Physics, conforme vista na figura 28. Conforme informa o fabricante no folheto do produto, o equipamento é responsável por toda a etapa de processamento dos sinais, tendo o computador a função de "interface humana e exibição dos dados". Realiza análises em variados domínios: tempo, frequência, amplitude e ordem. Conta com quatro canais de entrada, o que permite a obtenção de respostas em diferentes pontos da estrutura simultaneamente. Conta com uma resolução de 120dB na faixa dinâmica e 40kHz na faixa em tempo-real, em conjunto com o zoom e a alta resolução.

Figura 28: analisador de espectro usado nos ensaios



Fonte: Folheto do produto (DataPhysics, 2015)

4.3 DOS ENSAIOS

Os ensaios na estrutura se deram com o uso de testes de impacto nos pontos indicados nas figuras 29 e 30, para as casas do bloco A e B, respectivamente.

Figura 29: croqui da casa 1A com indicação dos pontos de ensaio (dimensões em cm)

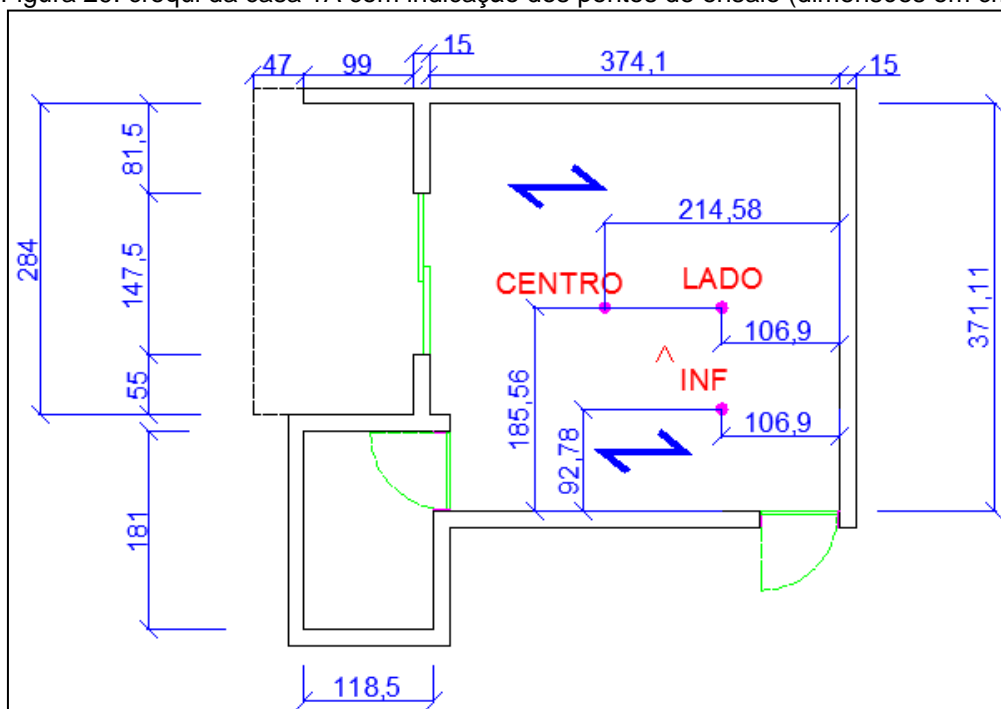
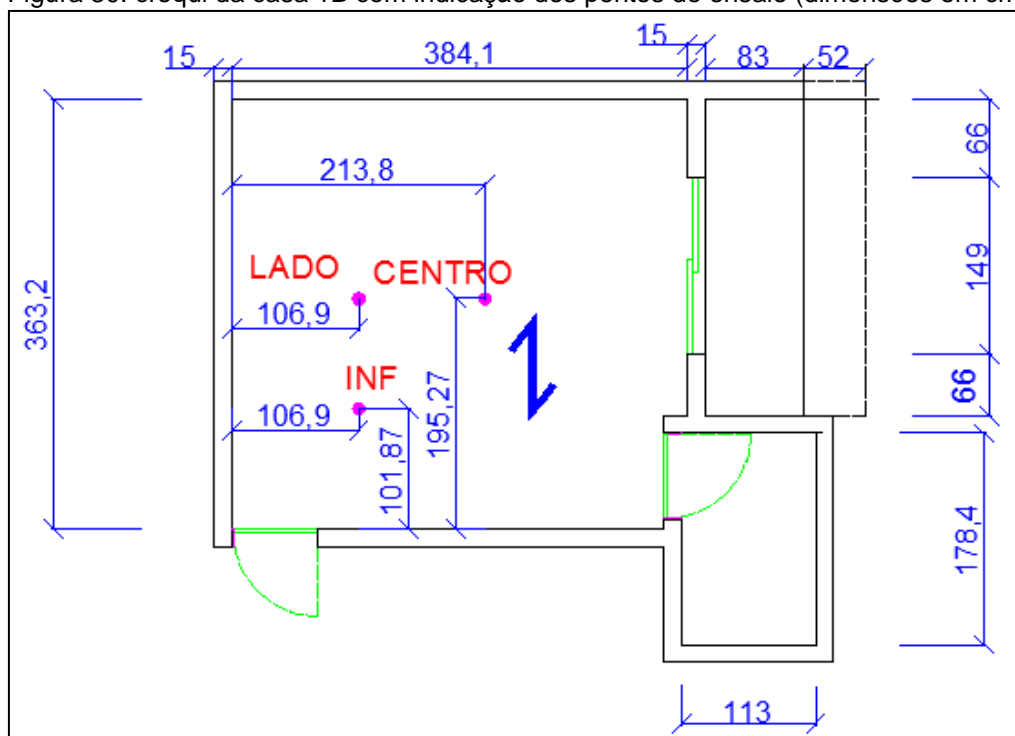


Figura 30: croqui da casa 1B com indicação dos pontos de ensaio (dimensões em cm)



O ponto "centro" está localizado aproximadamente no centro dos dois vãos. O ponto "lado" dista do ponto central aproximadamente 1/4 do comprimento do maior vão, estando alinhado com o mesmo. O ponto "inf", alinhado com o "lado", dista dele aproximadamente 1/4 do comprimento do

menor vão. O ponto central dos dois vãos é vantajoso por, conforme Zaman (1996), geralmente fornecer a melhor resposta devido às amplitudes relativamente maiores, tendo-se, por isso, mantido o acelerômetro nesse ponto. As excitações foram então realizadas nos três pontos escolhidos. O critério de disposição dos pontos foi adotado de igual modo para todas as lajes ensaiadas de cada bloco.

A escolha dos pontos de ensaio foi obtida mediante estudos anteriores em lajes pré-moldadas de concreto e maciças, através dos trabalhos de Pimentel *et al* (2013) e Pimentel *et al* (2015). Tendo tais pontos demonstrado resultados satisfatórios na detecção de variação das propriedades vibratórias pelo uso de ensaios modais, eles foram escolhidos para realização dos ensaios nas lajes do presente estudo de caso.

A etapa inicial de excitação das lajes se deu com o uso do martelo instrumentado. Para tanto, a pessoa que manuseava o martelo permanecia sentada em uma cadeira sobre a laje ensaiada e excitava a estrutura pela aplicação de impacto no ponto de teste. Após o impacto, a pessoa permanecia imóvel, de forma a evitar interferência no sinal captado. Como as lajes são estruturas de baixa frequência, a cabeça usada para bater foi a mais macia, de forma a concentrar a energia de impacto ao máximo.

Uma outra forma de excitar a estrutura foi mediante a aplicação de impacto do calcanhar (*heel drop test*). Nesse ensaio, a mesma pessoa que operava o martelo elevava o corpo e se apoiava na ponta dos pés, lançando-se subitamente e aplicando impacto com os calcanhares. Após o impacto, a pessoa permanecia parada durante o tempo de aquisição, de forma a não gerar interferência no sinal captado. Conforme Butz, Hechler e Trumpf (2005), o *heel-drop* tem a vantagem de ser fácil e rapidamente aplicado em diferentes pontos embora o impacto produzido pela mesma pessoa possa variar, de forma que os resultados não são precisamente reproduzidos. Ainda assim, tal forma de excitação é aceita no meio técnico, sendo, inclusive, adotada em normas técnicas, como o AISC Design Guide 11: Floor Vibrations Due to Human Activity, embora a mesma proponha metodologia mais moderna.

A terceira e última forma de excitação aplicada foi mediante o uso de pulos únicos (*single jumps*), mantendo-se o mesmo cuidado tido nos duas formas anteriores para evitar interferência no sinal captado. Embora apenas a excitação

com martelo permita conhecer com precisão a força de aplicação do impacto, o interesse maior estava na variação das propriedades com o grau de fissuração esta última não foi necessária para o estudo proposto.

Os testes preliminares para verificação do potencial estudo de caso foram feitos com o martelo, sendo seguido pelas demais formas supracitadas. O tempo de aquisição de dados adotado em todas as excitações foi de 4 segundos, o que correspondia a 4096 pontos de captura, incluindo 30 pontos antes da aplicação de impacto, os quais funcionavam como pontos *pre-trigger*. Por ser uma estrutura de baixas frequências, uma banda com 0 à 50 Hz de largura foi escolhida para obtenção dos primeiros modos nas lajes. Vale salientar que, durante os ensaios nas lajes de interesse, apenas a pessoa responsável pela excitação permanecia sobre as mesmas. O sistema de aquisição era instalado no quarto vizinho.

4.4 DO PROCESSAMENTO

A excitação em cada ponto escolhido (seja pelo uso do martelo instrumentado, de *heel-drop* ou *single jump*) para cada laje ensaiada, gerou um conjunto de dados, que foram salvos pelo analisador de espectro em dois formatos bem difundidos em programas de análise modal e estrutural: ASCII e UFF. A etapa inicial do processamento é, com base na Função Resposta em Frequência (FRF) adquirida, para cada ponto, determinar as frequências de vibração. Conforme dito em tópico anterior, a etapa inicial de excitação foi realizada com martelo instrumentado. Contudo, observou-se, após o processamento, que o impacto aplicado com o martelo não excitava a estrutura suficientemente. Assim, partiu-se para as duas formas restantes de impacto.

As figuras 31, 32 e 33 contém espectros para excitação e resposta na laje 1B usando diferentes formas de impacto, na quais é possível observar o primeiro modo em torno dos 28Hz. Observa-se que, na figura 28 o valor máximo atingido pelo sinal foi de aproximadamente 1,2g, ao passo que, com o *heel-drop*, o valor chegou ao máximo de aproximadamente 6,2g. Assim, o *heel-drop* e *single-jump* foram usados como forma de excitação nas lajes ensaiadas. No que diz respeito ao sinal ter sido considerado bom ou ruim, isto foi verificado na etapa seguinte do processamento.

Figura 31: espectro do sinal para laje 1B com ambas a excitação (usando o martelo instrumentado) e resposta no ponto *middle*

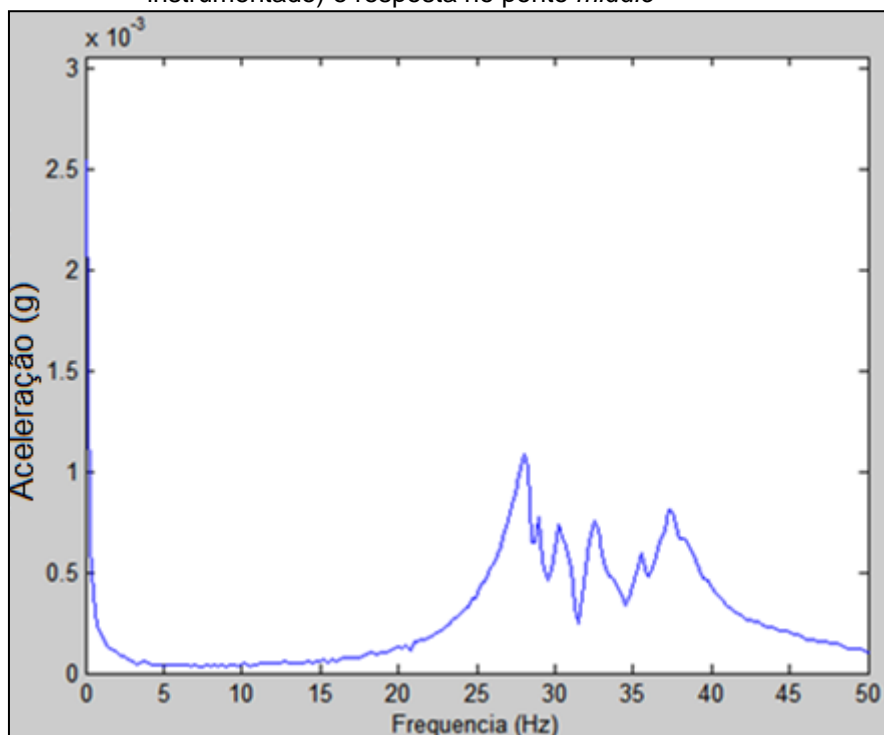


Figura 32: espectro do sinal considerado bom para casa 1B, com ambas a excitação (usando *heel-drop*) e resposta no ponto *middle*.

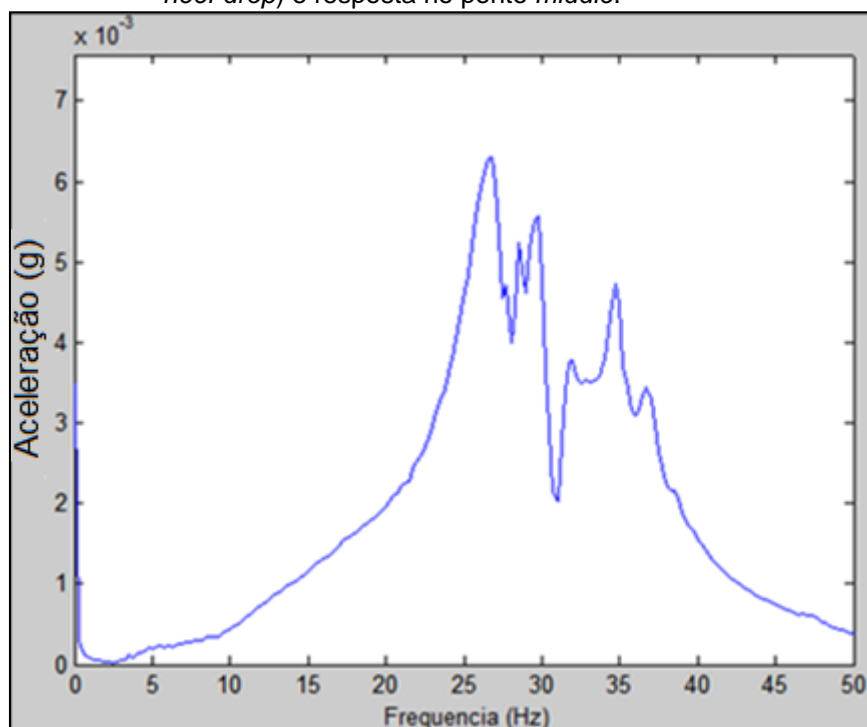
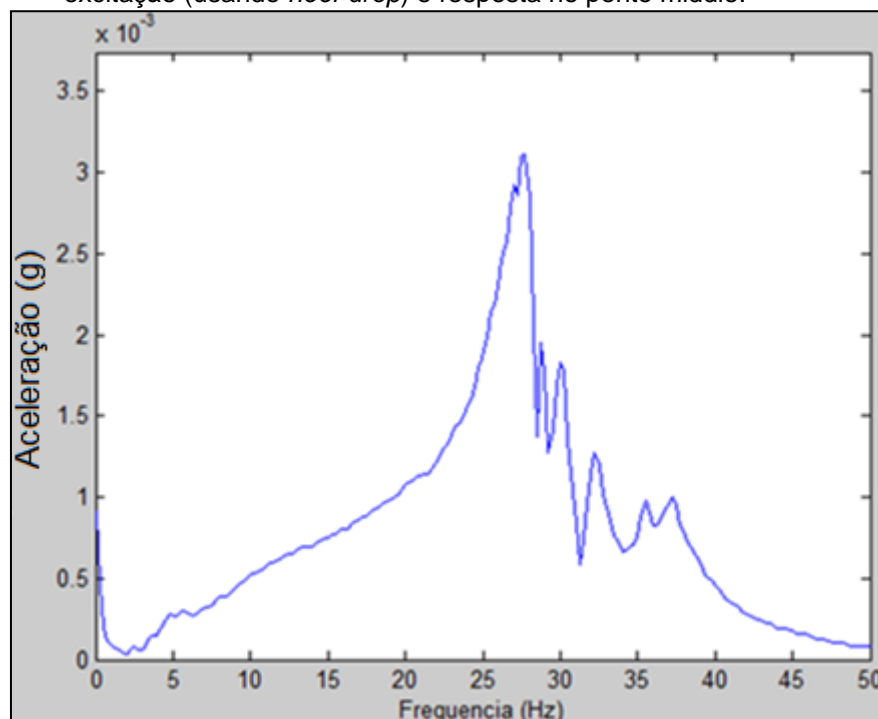


Figura 33: amplitude no domínio da frequência com sinal considerado ruim para casa 1B, com excitação (usando *heel-drop*) e resposta no ponto middle.



As frequências naturais são identificadas visualmente no espectro do sinal através dos picos nos mesmos. Definindo-se um intervalo de frequência que melhor isole o modo, aplica-se uma filtragem do sinal no domínio da frequência com programa de análise numérica, tendo como dados de saída o sinal no domínio do tempo. Em alguns sinais, devido a superposição de modos adjacentes, essa etapa não foi possível. Nas figuras 34 e 35 observa-se o sinal filtrado para os espectros apresentados nas figuras 32 e 33, respectivamente. Na figura 34 nota-se que o decaimento do sinal é exponencial, característico de amortecimento viscoelástico (KELLY, 20012, pág. 71). Já na figura 35 o decaimento é menos suave e, após 1,1 segundos, apresenta interferências.

Figura 34: decaimento de sinal no domínio do tempo considerado bom, aplicado na casa 1B, com excitação (por *heel-drop*) e resposta no mesmo ponto, para modo no intervalo de 5 à 25 Hz.

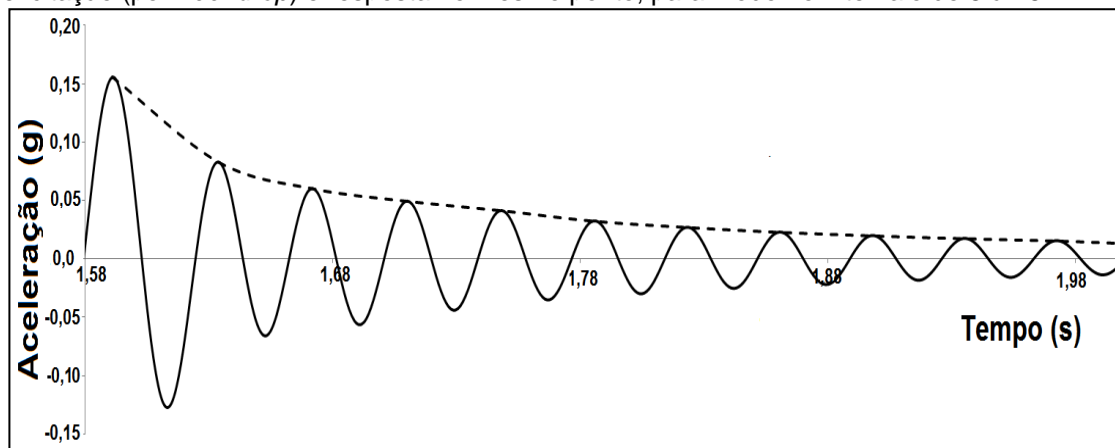
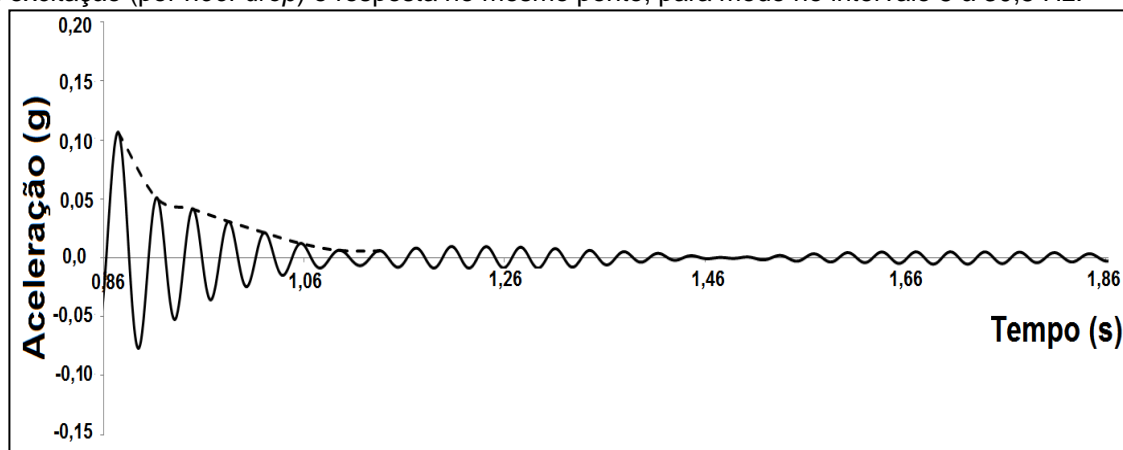


Figura 35: decaimento de sinal no domínio do tempo considerado ruim, aplicado na casa 1B, com excitação (por *heel-drop*) e resposta no mesmo ponto, para modo no intervalo de 5 à 30,5 Hz.



Fonte: arquivo pessoal.

De forma a obter uma avaliação mais precisa das frequências naturais de cada ciclo de vibração, uma interpolação linear foi feita entre os pontos do sinal no domínio do tempo, de forma a identificar os tempos consecutivos correspondentes aos zeros da resposta. Pela diferença entre os valores se obtinha o período de cada ciclo, cujo inverso era a frequência. A tabela 3 apresenta as frequências para dezesseis ciclos e seu valor médio para um teste na laje 1A.

Para se investigar a variação da frequência natural com o decaimento do sinal, calculou-se inicialmente o seu valor médio, conforme o exemplo da laje 1A apresentado na tabela 4. A seguir, os valores de frequência de cada ciclo foram

divididos por sua respectiva média, permitindo uma comparação entre diferentes tipos de laje (fissuradas ou não).

Tabela 3: frequência vs tempo ciclo para laje 1A, com excitação por *single jump* no ponto *line* e acelerômetro no ponto *middle*.

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
Frequência (Hz)	Ciclo
28,3901637	1
29,17445716	2
29,17056635	3
28,93989535	4
28,76165533	5
29,01270566	6
29,39039824	7
29,50306378	8
29,48940362	9
29,4714274	10
29,47110202	11
29,5476358	12
29,73603964	13
29,6774121	14
29,4577659	15
29,35144924	16
Freq Média	29,28

Tabela 4: frequência/frequência média vs tempo ciclo para laje 1A, com excitação por *single jump* no ponto *line* e acelerômetro no ponto *middle*.

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
Freq/Freq Média	Ciclo
0,969474612	1
0,996256867	2
0,996124003	3
0,98824699	4
0,982160404	5
0,990733335	6
1,003630879	7
1,00747821	8
1,00701174	9
1,006397883	10
1,006386772	11
1,009000267	12
1,01543393	13

Tabela 4: frequência/frequência média vs tempo ciclo para laje 1A, com excitação por *single jump* no ponto *line* e acelerômetro no ponto *middle*.

(Continua)

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
1,013431902	14
1,005931367	15
1,002300838	16

Outra forma usada para verificar a variação das propriedades com a fissuração foi pela comparação do espectro de resposta, a FRF. Tendo em vista que, como foram realizados testes com diferentes pessoas e que pode ocorrer variações nas excitações induzidas por um mesmo indivíduo, os espectros tinham picos com amplitudes diferentes. A solução encontrada foi a obtenção de um espectro normalizado, dividindo-se os valores do sinal de cada teste pelo seu valor de pico máximo no intervalo de 0 à 50 Hz. Por fim, um espectro médio foi calculado com os sinais relativos da etapa anterior, tendo-se feito isso para todas as lajes ensaiadas, permitindo fácil identificação das frequências naturais. Em um gráfico com valor máximo unitário.

5. RESULTADOS

O espectro médio para cada laje ensaiada está mostrado nas figuras 36 e 37. Por terem vãos diferentes entre os blocos (A e B), a comparação foi feita com casas de um mesmo conjunto. É possível observar que os modos com menor frequência estão localizados nas lajes 1A e 1B, as quais estão também fissuradas. Lajes que não apresentavam fissuração (4A, 3B e 4B) possuem os maiores valores de frequência para o primeiro modo.

Figura 36: espectro médio para as lajes tipo A

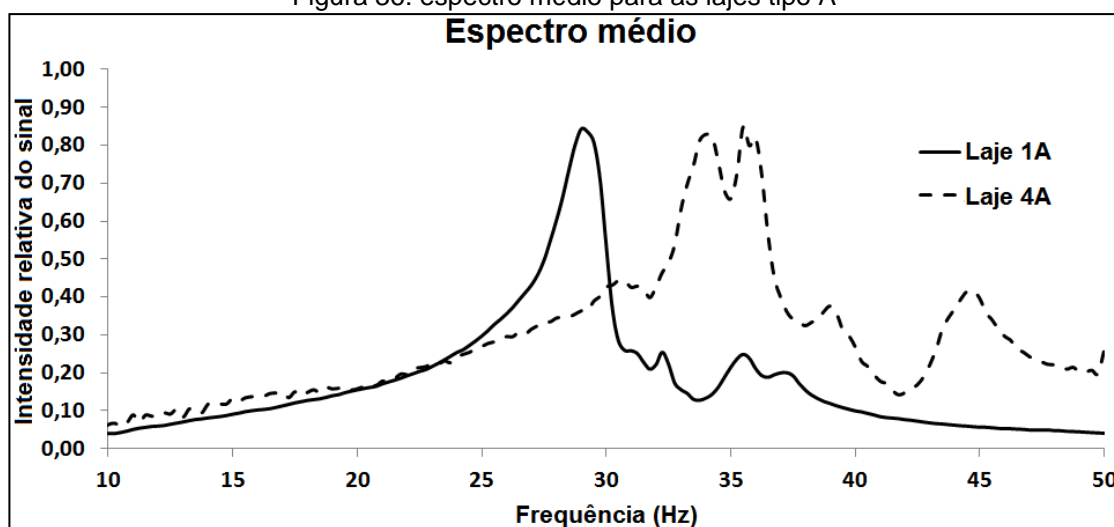
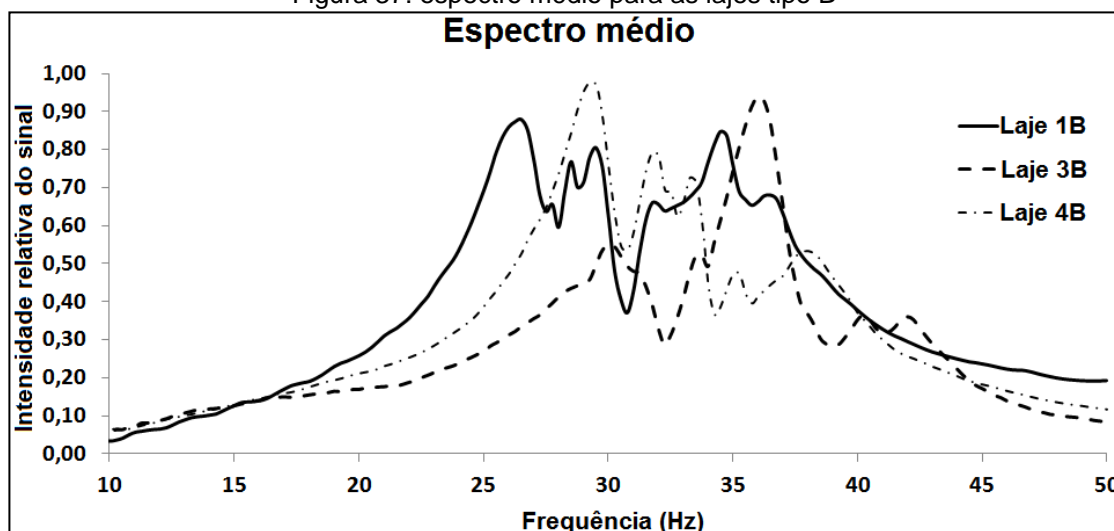


Figura 37: espectro médio para as lajes tipo B



Em relação à variação de frequência com o decaimento do sinal, os resultados para as lajes ensaiadas do bloco A estão mostrados na figuras 38, tendo seus valores apresentados nas tabelas 5 e 6. Os resultados para as lajes tipo B

estão mostrados na figura 39 e apresentados nas tabelas 7 e 8. Para as lajes tipo A, observa-se que, enquanto o sinal da laje 1A (que está fissurada) apresenta um crescimento com o número de ciclos, o comportamento inverso é observado na laje 4A (que não está fissurada). Para as lajes tipo B, enquanto a laje 1B (fissurada) apresenta um crescimento do sinal com o número de ciclos, a laje 4B (não fissurada) apresenta comportamento estável.

Figura 38: variação de frequência ao longo do sinal para a laje tipo A

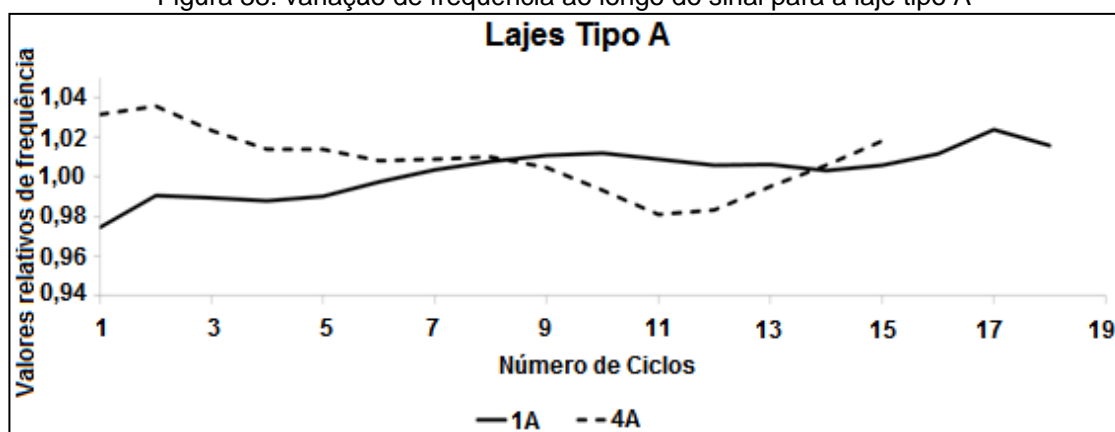


Tabela 5: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 1A

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
Freq/Freq Média	Ciclo
0,974319816	1
0,990728331	2
0,989375333	3
0,988073008	4
0,990300515	5
0,997606241	6
1,003642899	7
1,007793713	8
1,011097245	9
1,011894102	10
1,008992757	11
1,005996297	12
1,006402648	13
1,003243316	14
1,005881853	15
1,011627171	16
1,023910464	17
1,015831615	18

Tabela 6: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 4A

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
Freq/Freq Média	Ciclo
1,031540355	1
1,035624311	2
1,023450916	3
1,013828972	4
1,014040154	5
1,008343621	6
1,008908964	7
1,01023134	8
1,004830414	9
0,993397691	10
0,981144132	11
0,983165027	12
0,99528486	13
1,005905517	14
1,018103236	15

Figura 39: variação de frequência ao longo do sinal para a laje tipo B

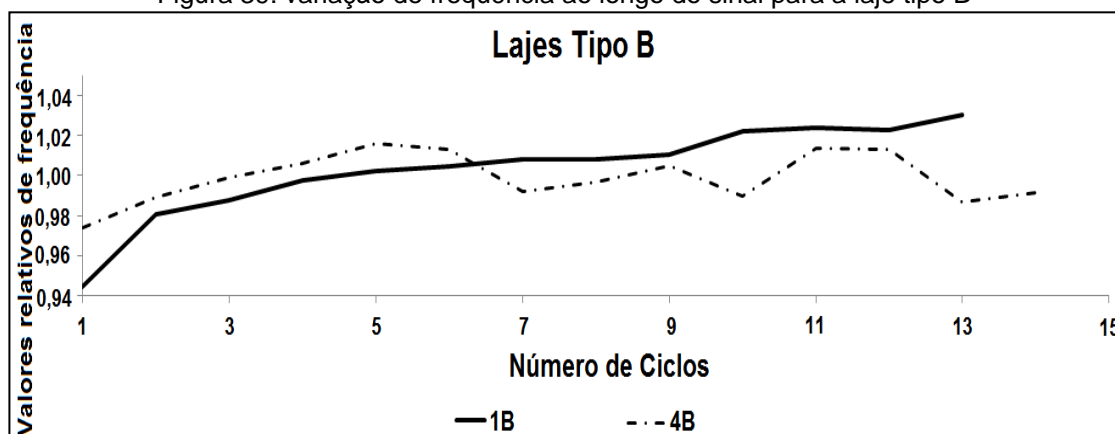


Tabela 7: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 1B

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
Freq/Freq Média	Ciclo
0,944523061	1
0,980778266	2
0,987448127	3
0,997783833	4
1,002483531	5
1,004562329	6
1,007956169	7
1,0082792	8
1,010506248	9

Tabela 7: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 1B
(Continua)

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
1,021836474	14
1,024064513	15
1,022874706	16
1,030005439	14

Tabela 8: média das frequências médias vs tempo ciclo para laje 4B

Room 1A-heel-drop line - Acel. middle - Jump strong	
Freq/Freq Média	Ciclo
0,974081503	1
0,988958573	2
0,999030242	3
1,00629079	4
1,016130767	5
1,012913657	6
0,992160574	7
0,996722704	8
1,0047638	9
0,9893938	10
1,013865644	11
1,012936921	12
0,986711366	13
0,991479968	14

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Testes de vibração foram aplicados em lajes pré-moldadas de concreto agrupadas em dois blocos (A e B) e com diferentes condições estruturais (fissuradas ou não) de forma a verificar a sua aplicabilidade na detecção de dano. O procedimento teve como base a variação nas frequências naturais induzidas pela perda de rigidez originária da fissuração nas lajes.

Os testes mostraram que as lajes fissuradas tanto apresentavam frequências de vibração mais baixas que suas semelhantes não fissuradas, como também apresentavam um comportamento padrão de crescimento do sinal normalizado ao longo dos ciclos, padrão esse não observado nas lajes íntegras. Esse comportamento poderia ser explicado pela variação na rigidez oriunda da abertura e fechamento das fissuras devido ao impacto da excitação.

Vale frisar que as fissuras encontradas eram relativamente modestas, estando dispostas na região de contato entre as vigotas e os blocos cerâmicos, paralelamente às primeiras. Tais fissuras não caracterizam-se como um problema estrutural e, possivelmente, foram originárias de problemas executivos que não comprometeram a capacidade estrutural das lajes. Outra possibilidade é a deformação excessiva da vigota que, pelas dimensões da laje (aproximadamente iguais), faz com que a laje se comporte como uma placa. Entretanto, observação das variações na frequência ao longo do sinal permitiu confirmar um padrão de comportamento para as lajes dos dois blocos em um mesmo estado (fissurada ou não).

Conclui-se que, com base no comportamento observado, os testes modais constituem uma forma qualitativa de detecção de dano. Como forma quantitativa também possui aplicabilidade, mediante o uso de um indicador de dano pela comparação das propriedades pré e pós-dano, o que foge ao escopo deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISC/CISC. *Steel Design Guide Series 11, Floor Vibration Due to Human Activity*. American Institute of Steel Construction, Chicargo, IL, 1997.

ALMEIDA, Pedro Afonso de Oliveira; RODRIGUES, José Fernando Sousa; LIMA, Ariane Barros. *Critérios de otimização de projetos de pontes a partir de espectros de aceleração induzidas por veículos nos tabuleiros*. Relatório final de pesquisa realizada para a concessionária da Rodovia Presidente Dutra. Contrato ACTUA-ND-4600004851/08, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15755: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BUTZ, C.; HECHLER, O.; TRUMPF, H. *Load-deformation and vibration-behaviour of new types of composite slim-floor slabs*. Improvement of Buildings' Strucutral Quality by New Technologies, páginas 481-491. Disponível nos anais da Final Conference of COST Action C12, Innsbruck, Austria, 2005.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson R. de Figueiredo. *Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado*. 3ª Ed, São Carlos: EdUFSCar, 2013.

CHELLINI, Giuseppe; ROCK, Guido de; NARDINI, Luca; SALVATORE, Walter. *Damage analysis of a steel-concrete composite frame by finite element model updating*. Journal of Constructional Steel Research, 66, páginas 398-441, 2010.

CURADELLI, R. O.; RIERA, J. D.; AMBROSINI, D.; AMANI, M. G. *Damage detection by means of structural damping identification*. Engineering Structures, 30, páginas 3497-3504, 2008.

DILENA, Michele; MORASSI, Antonio. *Dynamic testing of a damaged bridge*. Mechanical Systems and Signal Processing, 25, páginas 1485-1507, 2011.

DWORAKOWSKI, Ziemowit; AMBROZINSKI, Lukasz; MENDROK, Krzysztof. *Damage localization in plates with use of the procedure based on Modal Filtration*. Journal of Physics: Conferences Serires, 628, 012028, 2015.

EWINS, D.J. *Modal Testing: Theory and Practice*. Research Studies Press Ltd, 1984.

GAO, Hai-yang; GUO, Xing-lin; OUYANG, Huajiang; YANG, Xiu-ming. *Multi-damage localization in plate structure using frequency response function-based indices*. Journal of Physics: Conferences Serires, 628, 012004, 2015.

HSIEH, K.; HALLING, M.; BARR, P.; ROBINSON, M. *Structural Damage Detection Using Dynamic Properties Determined from Laboratory and Field Testing*. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 22:4, páginas 238-244, 2008.

HU, Chuanshuang; XIAO, Min; ZHOU, Haibin; WEN, Wei; YUN, Hong. *Damage detection in of wood beams using the differences in local modal flexibility*. The Japan Wood Research Society, 57, páginas 479-483, 2011.

IEZZI, F.; SPINA, D.; VALENTE, C.. *Damage assessment through changes in mode shapes due to non-proportional damping*. Journal of Physics: Conferences Serires, 628, 012019, 2015.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Viena, Áustria, 2002.

ISMAIL, Zubaidah; ONG, Zhi Chao. *Honeycomb damage detection in a reinforced concrete beam using mode shape regression*. Measurement, 45, páginas 950-959, 2012.

KELLY, S. Graham. *Mechanical Vibrations: Theory and Applications*. Cengage Learning, 2012.

KIM, Sungkon; LEE, Jungwee. *Use od Modal Testing to Identify Damage on Steel Members*. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 4:2, páginas 75-82, 2000.

MARCY, M.; BRASILIANO, A.; LIMA, G.; DOZ, G. *Locating and quantifying damages in 3-D frame using residual error method and neural networks*. Anais da 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, 2013.

PIMENTEL, R. L.; FERREIRA, G. S.; GONÇALVES, M. S.; NYAWAKO, D. S.; RYNOLDS, P. *Damage detection in concrete precast slabs: a quick assessment through modal tests*. Anais da 6th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'15), 2015.

PIMENTEL, Roberto Leal; FERREIRA, Enildo Tales; MELO, Aluísio Braz de; GUEDES, Túlio de Oliveira. *Avaliação da Capacidade de carga de lajes pré-moldadas utilizando testes modais*. Anais do IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas CINPAR 2013. João Pessoa, 2013.

RAMOS, Luís F.; ROECK, Guido de; LOURENÇO, Paulo B.; CAMPOS-COSTA, Alfredo. *Vibration Based Damage Identification of Masonry Structures*. Anais da 5th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 2006.

RAO, S. S. *Mechanical vibrations*. 5ª Ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

RYTTER, A. *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Aalborg: Departamento da Tecnologia da Construção e Engenharia Estrutural, Universidade de Aalborg. Fracture and Dynamics; N° 44, Vol. R9314.

SOUZA, V. C.. RIPPER, Thomaz. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. São Paulo: Editora Pini, 1998.

THOMAZ, Ercio. *Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação*. São Paulo: Editora Pini:IPT:EPUSP, 19.

XU, Y.; HUANG, Q.; Zhan, S; SU, Z.; LIU, H. *FRF-based structural damage detection of controlled buildings with podium structures: Experimental investigation*. Journal of Sound and Vibration, 333, páginas 2762-2775, 2014.

ZAMAN, A. *Dynamic response testing and finite element modelling*. In: Fire, Static and Dynamic Tests of Building Structures. Proceedings of the Second Cardington Conference. Cardington, Inglaterra, 1996.

ANEXOS

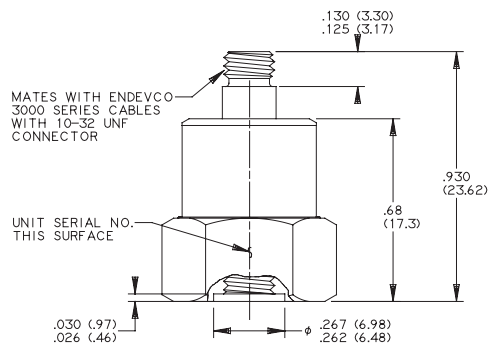
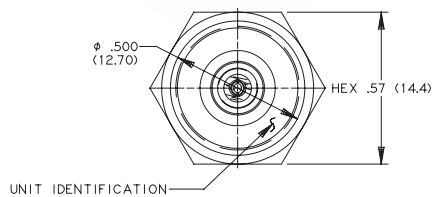
- 1) Folheto do acelerômetro**
- 2) Folheto do martelo instrumentado**
- 3) Folheto do condicionador**
- 4) Folheto do analisador de espectros**



Model 752A12 / A13 ISOTRON[®] accelerometer

Features

- Built-in IEEE P1451.4 TEDS
- Hermetically sealed, rugged
- Exceptional resolution
- Wide bandwidth (flat to 10 kHz)
- Aerospace, automotive and general laboratory applications



STANDARD TOLERANCES
 INCHES (MILLIMETERS)
 .XX = +/- .03 (X = +/- .8)
 .XXX = +/- .010 (.XX = +/- .25)

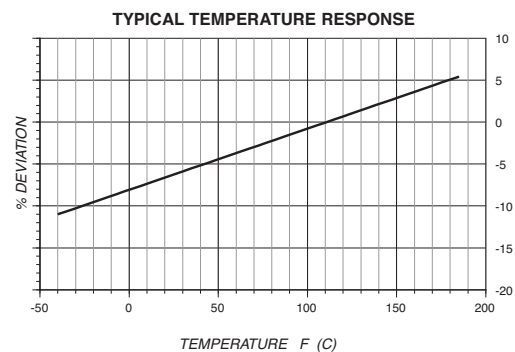
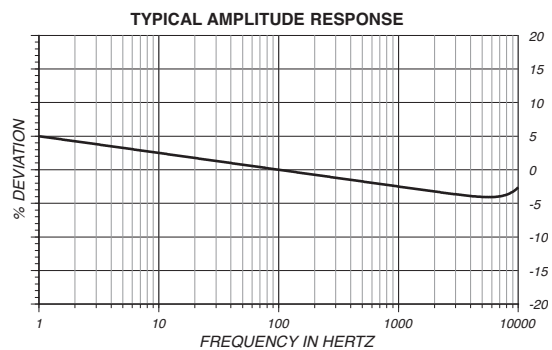
CAD FILE 75X

Description

The Endevco model 752A is a lightweight piezoelectric accelerometer with integral electronics, which features IEEE P1451.4 Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) capabilities. This accelerometer offers exemplary dynamic range and frequency response, and maintains excellent phase characteristics over its entire operating frequency range. Model 752A also demonstrates outstanding shock survivability. This unit is designed to withstand most rough handling in laboratory environments without sustaining internal damage. This unit features a 10-32 top connector and a hex mounting base utilizing a 10-32 mounting stud.

The model 752A can be powered by any signal analyzer that features a 2 to 10 mA constant current supply. The model 752A features Endevco's PIEZITE[®] Type P-8 crystal element. Signal ground is isolated from the mounting surface. The model 752A is available in a 100 mV/g version, 752A12 and a 1V/g version, 752A13.

Endevco signal conditioner models 133, 2775B, 2793, 4416B, 4999, 6634C or OASIS 2000 (4990A-X with cards 482B, 433, 428) are recommended for use with this accelerometer.



Model 752A12 / A13 ISOTRON[®] accelerometer

Endevco

Specifications

The following performance specifications conform to ISA-RP-37.2 (1964) and are typical values, referenced at +75°F (+24°C) and 100 Hz, unless otherwise noted. Calibration data, traceable to National Institute of Standards and Technology (NIST), is supplied.

Dynamic characteristics	Units	752A12	752A13
Range	g	±50	±5
Voltage sensitivity, typical	mV/g	100	1000
Tolerance	%	±20	±25
Frequency response		See typical curve	See typical curve
Amplitude response			
±5%	Hz	1 to 8000	1 to 8000
±1dB	Hz	0.5 to 10 000	0.3 to 10 000
Phase response <5° [1]	Hz	1	2
Phase response <10°	Hz	0.2	1
Resonance (nom.)	kHz	28	28
Transverse sensitivity	%	≤ 5	≤ 5
Temperature response		See typical curve	See typical curve
Amplitude linearity	%	≤ 1	≤ 1
Output characteristics			
Output polarity		Provide positive output when acceleration is in the direction of the sensitive axis.	
Output connection		See connection diagram	
DC output bias voltage	Vdc	+7 to +14	+7 to +14
Output impedance			
from 2 to 3 mA	Ω	≤ 300	≤ 300
3 to 10 mA	Ω	≤ 100	≤ 100
Full scale output voltage	V pk	±5	±5
Residual noise (1 Hz to 10 kHz bandwidth)	μ g rms	150 (max)	50 (max)
Grounding		Signal ground is connected to the case and isolated from the mounting surface	
Power requirements			
Constant current	mA	+2 to +10	+2 to +10
Supply voltage (including transients) [2]	Vdc	+20 to +30	+20 to +30
Warm-up time (to reach 10% of final bias)	sec	< 5	< 5
Environmental characteristics			
Temperature range			
Operating		-4°F to +185°F (-20°C to +85°C)	
Storage		-40°F to +257°F (-20°C to +125°C)	
Humidity		Hermetically sealed	Hermetically sealed
Sinusoidal vibration limit (without damage)	g	±300	±300
Shock limit (without damage) [3]	g pk	5000	5000
Base strain sensitivity (at 250 μstrain)	eq. g / μstrain	< 0.001	< 0.001
Thermal transient sensitivity	eq. g / °F / °C)	0.02 (0.05)	0.02 (0.05)
Electromagnetic noise	eq. g / Gauss	0.0002	0.0002
Physical characteristics	Units	752A12	752A13
Dimensions		See outline drawing	
Weight	oz (gm)	0.45 (13)	0.45 (13)
Case material		Titanium inner/outer case	Titanium inner/outer case
Connector [4]		Coaxial receptacle w/ 10-32 UNF thread designed to mate w/ Endevco model 3000 series cables	
Calibration			
Supplied:			
Sensitivity	mV/g		
Transverse sensitivity (7g pk, 12 Hz)	%		
Frequency response		20 Hz to 8 kHz	20 Hz to 8 kHz



APPLIES TO CALIFORNIA FACILITY

Model 752A12 / A13 ISOTRON® accelerometer

Endevco

Accessories

Product	Description	752 A12/A13
3061A-120	Cable assembly, 10 ft	Included
2981-12	Mounting stud, 10-32, hex I.D.	Included
2981-3	Stud, 10-32 adapter	Optional
15071	Adapter stud 1/4-28 UNF to 10-32 UNF	Optional
2981-4	Mounting stud, 10-32 to 5 mm	Optional
133	Signal conditioner	Optional
2775B	Signal conditioner	Optional
2793	Isotron signal conditioner	Optional
4416B	Signal conditioner	Optional
4999	Signal conditioner	Optional
6634C	Signal conditioner	Optional
4990A-X	Oasis 2000 computer-controlled system with cards 428, 433 and/or 482B. Only 482B card supports i-TEDS	Optional

Notes:

1. Phase deviation from unit to unit $\pm 2^\circ$.
2. 21 Vdc minimum must be available to the accelerometer to ensure full-scale operation at the temperature extremes.
3. Shock pulses of short duration may excite transducer resonance. Shock level above the sinusoidal vibration limit may produce temporary zero shift, which will result in erroneous velocity or displacement data after integration.
4. Coaxial 10-32 receptacle mates with Endevco model 3061A-120 cable.
5. Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.



Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

©ENDEVCO CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA92675 USA
(800) 982-6732 • (949) 493-8181 fax (949) 661-7231 • www.endevco.com • Email: applications@endevco.com

082710

MEGGITT
smart engineering for
extreme environments

PRODUCT DATA

Heavy-duty Impact Hammers Types 8207, 8208 and 8210

Uses

- Impact-force measurements on medium to very large structures
- Measurement of frequency response functions using impact excitation techniques
- As part of a dynamic structural testing system for modal analysis and prediction of structural response

Features

- Robust construction
- 1-, 3- and 12-pound versions for a variety of structures
- DeltaTron® (low-impedance) output
- Four impact tips for controlling frequency response and impulse
- Supplied in easily transportable carrying case



Description

The heavy-duty impact hammers are designed to excite and measure impact forces on medium to very large structures. An accelerometer (or laser velocity transducer) is used to measure the response of the structure. By using an FFT analyzer, such as the PULSE™ system, the frequency response function and mode shapes of the test structure can then be derived.

Characteristics

The hammers have built-in electronics. The sensitivity is expressed in terms of voltage per unit force (mV/N or mV/lbf). All types feature a BNC connector at the bottom of the shaft. Each hammer is supplied with four interchangeable impact tips to control the amplitude and decay of the impact and frequency response. The hammers must never be used without an impact

tip. The sensor housing is made of stainless steel and is permanently attached to the hammer.

Calibration

The hammers are supplied with individual calibrations of their sensitivity.

Versions

- Type 8207: 1-pound head for exciting medium size structures such as machinery and larger auto frames.
- Type 8208: 3-pound head for exciting large structures such as pipelines, storage tanks and concrete castings.
- Type 8210: 12-pound head for exciting very large structures such as buildings, bridges and ships.

Fig. 1 Impulse shapes of the hammers showing the shape as a function of used impact tip. From left to right Type 8207, 8208 and 8210

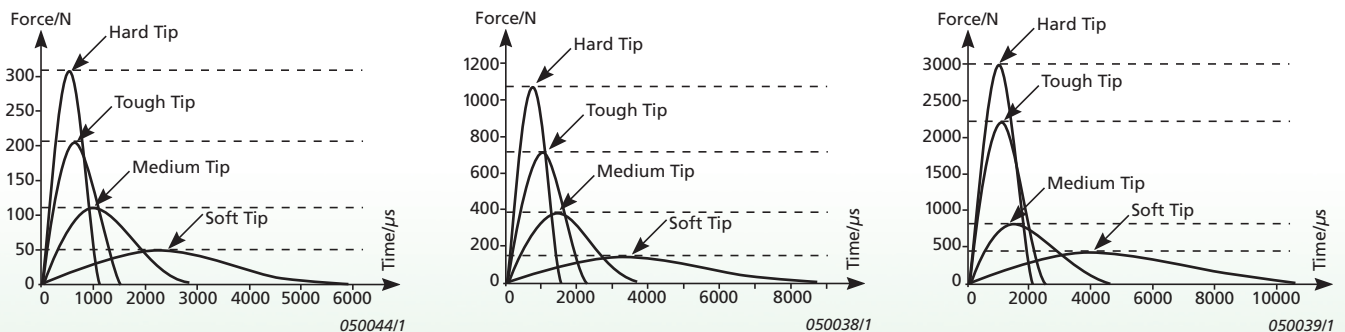
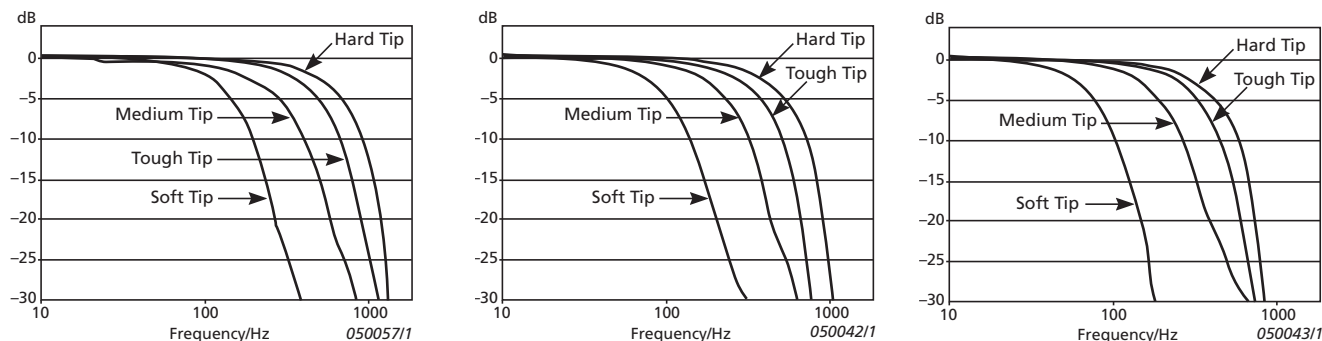


Fig. 2 Force spectra of the hammers showing the frequency response as a function of used impact tip. From left to right: Type 8207, 8208, 8210





Specifications – Heavy-duty Impact Hammers Types 8207, 8208 and 8210

	Units	8207	8208	8210
Dynamic Characteristics				
Sensitivity (typical)	mV/N (mV/lbf)	0.225 (1)		
Full Scale Force Range Compression	kN (lbf)	22.2 (5000)		
Linear Error at Full Scale	% full scale	<±2		
Electrical Characteristics				
Full Scale Output Voltage	V	±5		
DC Output Bias Voltage	V	+9 to +12		
Output Impedance	Ω	<100		
Power Supply	mA	2 to 20		
Voltage Range	V DC	+18 to +30		
Environmental Characteristics				
Temperature Range	°C (°F)	-73 to +60 (-100 to +140)		
Max. Force Compression	kN (lbf)	44.4 (10000)		
Physical Characteristics				
Overall Length	cm (in.)	30 (11.7)	39 (15.2)	90 (35.3)
Effective Seismic Mass	kg (lb.)	0.45 (1)	1.36 (3)	5.44 (12)
Sensor Housing Material		17-4 stainless steel		
Connector		BNC		

All values are typical at 25°C (77°F) unless measurement uncertainty is specified

COMPLIANCE WITH STANDARDS

 Compliance with EMC Directive and Low Voltage Directive of the EU

 Compliance with the EMC requirements of Australia and New Zealand

Ordering Information

Types 8207, 8208, and 8210 include:

Carrying Case
Calibration Chart
Soft Impact Tip (Brown)
Medium Impact Tip (Green)
Tough Impact Tip (Red)
Hard Impact Tip (Black)
PVC Insulated Cable, 10–32 UNF to BNC Connector, 5 m (16.4 ft)
Plug Adaptor, BNC/10–32 UNF

OPTIONAL ACCESSORIES*

AO-0531-D-050 70°C, Insulated Single Screen Flexible Cable, 10–32 UNF to BNC, 5 m (16.4 ft)
JP-0145 Plug Adaptor, BNC/10–32 UNF
UA-2057 Set of four Impact Tips for Impact Hammer Type 8207
UA-2058 Set of four Impact Tips for Impact Hammer Type 8208
UA-2060 Set of four Impact Tips for Impact Hammer Type 8210*
ZZ-0245 In-line TEDS Adaptor, 10–32 UNF to 10–32 UNF

* Additional accessories and cables are available (see www.bksv.com)

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice. © Brüel & Kjær. All rights reserved.

HEADQUARTERS: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S · DK-2850 Nærum · Denmark
Telephone: +45 7741 2000 · Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær 



Battery Powered ISOTRON® Conditioner

**ENDEVCO
MODEL
4416B**

Model 4416B

- Low Noise Operation
- Portable Compact Size
- Eight Hours of Continuous Battery Operation
- Operational During Battery Recharge Cycle
- Selectable Gain of 1 or 10
- Status Indicator LED
- Economical, Charger Included

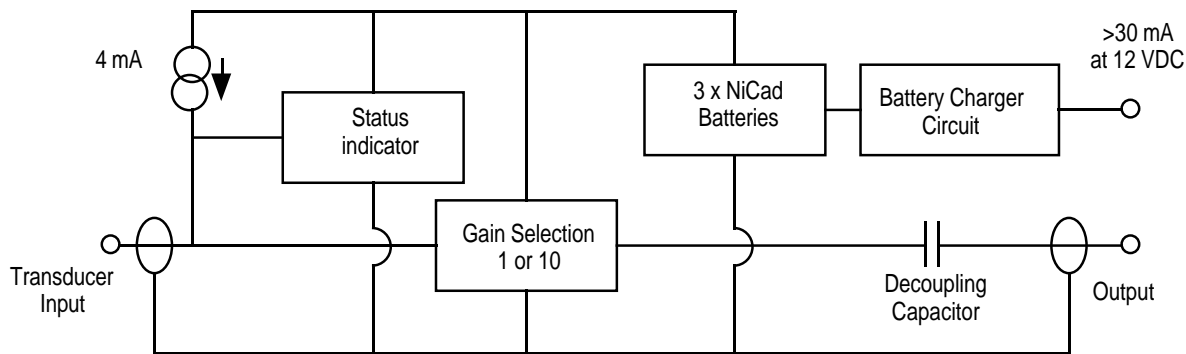
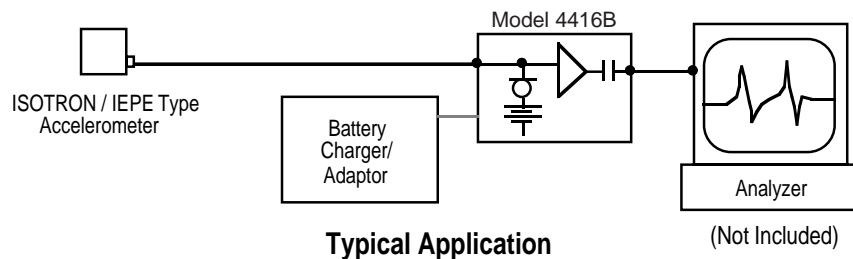


Not actual size



DESCRIPTION

The ENDEVCO® Model 4416B ISOTRON® Signal Conditioner is a small, battery-operated, low noise signal conditioner for use with ISOTRON® or other piezoelectric voltage mode transducers. It supplies power to the transducer from a constant current source, and provides a selectable gain of 1 or 10. The conditioner is powered by rechargeable NiCad batteries, and can be operated during the recharging cycle. An LED status indicator informs the user of a short, open, or normal operating conditions. Model 4416B contains internal automatic power shutdown circuitry to protect the rechargeable batteries from deep discharge damage.



ENDEVCO MODEL 4416B

Battery Powered ISOTRON® Conditioner

SPECIFICATIONS

INPUTS

TYPE	Single-ended, constant current two-wire system
INPUT IMPEDANCE	> 20 k Ω
EXCITATION CURRENT	4.7 mA ±20%
COMPLIANCE VOLTAGE	> 18 V. This represents the sum of AC and DC components.
TRANSDUCER STATUS LED	The LED will not light if the transducer is disconnected, open, or the battery is low. The LED becomes red if a short is detected; green when condition is normal.

OUTPUTS

TYPE	Single-ended, one side connected to circuit ground
OUTPUT IMPEDANCE	< 10 Ω, in series with at least 40 μF
LINEAR OUTPUT VOLTAGE	10 volts pk-pk (3.535 V rms) or greater
LINEAR OUTPUT CURRENT	2.0 mA or greater

TRANSFER CHARACTERISTICS

GAIN	1 or 10 selectable
Accuracy	±1.5% (Including variation with temperature and time)
FREQUENCY RESPONSE	Within ±5% from 1 Hz to 20 kHz, reference at 100 Hz
Lower Cutoff Frequency	-5% at 1 Hz, -3db at 0.3 Hz (maximum)
Upper Cutoff Frequency	-5% at 20 kHz, -3db at 40 kHz (maximum)
AMPLITUDE LINEARITY	1% of reading from best fit straight line approximation
RESIDUAL NOISE	45 μV rms maximum RTI with input shunted with 100 ohms or 100 μV rms RTO, whichever is greater
TOTAL HARMONIC DISTORTION	Less than 1% maximum for signal of full scale or less

POWER

BATTERIES	Powered by 3 rechargeable nickel cadmium batteries contained within the unit
TYPICAL BATTERY LIFE	8 hours minimum continuous use
EXTERNAL POWER SUPPLY	12 VDC at 25 mA minimum
RECHARGE CYCLE TIME	3 hours minimum with unit OFF, 6 hours minimum with unit ON Operating this unit during the recharging cycle is possible but will extend the recharge cycle time.
CHARGER LED INDICATION	The LED will go on when the batteries are being charged.

PHYSICAL

DIMENSIONS	3.125" w x 1.25" h x 5.875" d (79.4 mm x 31.8 mm x 149.2 mm)
WEIGHT	18 oz (510 gm) typical
CONNECTIONS	BNC for both Input and Output

ENVIRONMENTAL

TEMPERATURE	Operating	+32°F to +122°F (0°C to +50°C)
	Storage	-40°F to +122°F (-40°C to +50°C)
	Recharging	+59°F to +122°F (+15°C to +50°C)
HUMIDITY	95% R.H.	

ACCESSORIES

EHM1159	110 VAC to 12 VDC ADAPTOR (Call factory for 220VAC Adaptor)
EJ21	MICRODOT10-32 to BNC ADAPTOR

NOTES

1. For ultra-low noise application, Model 4416BM1 offers the same basic design without the gain stage.
2. Maintain high levels of precision and accuracy using Endeveco's factory calibration services. Call Endeveco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.



All-in-one Basic Vibration Measurement (BVM) kits available. Call ENDEVCO Application Engineers for details.

Continued product improvement necessitates that Endeveco reserve the right to modify these specifications without notice. Endeveco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endeveco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax (949) 661-7231
www.endevco.com Email:applications@endevco.com

Ultra-Portable, Cost-Effective Dynamic Signal Analyzer **SignalCalc[®] ACE**



4 input channels, 2 sources

High Speed Tachometer

120 dB dynamic range

40 kHz realtime bandwidth
(94 kHz optional)

SignalCalc

Dynamic

Signal

Analyzers

ACE



SignalCalc

Dynamic Signal Analyzers



Ultra-Portable, Cost-Effective Dynamic Signal Analyzer

The new SignalCalc ACE weighs just over a pound, and packs an unprecedented signal processing punch: four input channels, two output channels, one tachometer channel, 40 kHz standard realtime rate (94 kHz optional), and over 120 dB dynamic range. ACE transforms any Notebook computer into a high precision dynamic signal analyzer, one that can travel with you and work professionally -- even in the absence of line power.

Standard Features

- Auto Power Spectrum
- Transfer Function (FRF)
- Synchronous Average
- Correlation
- Histogram



Optional:

- | | |
|--|---|
| Realtime Zoom | MIMO (multi-reference Transmissibility) |
| High Resolution, up to 25,600 lines | Stepped Sine |
| RPM Based Measurements | SRS Analysis |
| Order Tracking | Drop Test |
| Demodulation | Realtime Octave |
| Rotordynamics | Sound Quality - Loudness |
| Balancing | Sound Power |
| Waterfall, Spectrogram and Campbell Diagrams | Acoustic Intensity |

ACE is able to directly power integrated circuit piezoelectric sensors without additional signal conditioning electronics. ICP coupling, standard on ACE, adds to AC/DC coupling (each, single-ended or differential) to provide signal input choices for virtually any test. The optional TEDS compatibility makes set up of channel sensitivities and engineering units effortless.

Unprecedented Power

Powered by Quattro, ACE provides 32 bit floating-point DSPs delivering up to 204.8 kHz sample rate on all channels simultaneously. All inputs are coupled to dedicated 24 bit sigma-delta ADCs while both outputs have 24 bit DACs. Integral anti-aliasing filters protect the inputs and outputs. This horsepower provides over 120 dB dynamic range with up to 94 kHz real-time rate while measuring and displaying 1600 line Transfer Functions, Coherence and all other related measurements. It facilitates high-resolution measurements to 25,600 lines, real-time Zoom, waterfall measurements and simultaneous disk recording. All signal processing is done by the DSPs embedded in Quattro; your computer running Windows, acts merely as the human interface and data display.

The high computation speed gives you overlap processing for faster averaging. It allows capture of machine run-ups, speech signatures and other rapidly changing time/frequency events as they happen. Your computer screen becomes an instantaneous viewport into the activity and content of your signals.

Outstanding Dynamic Range

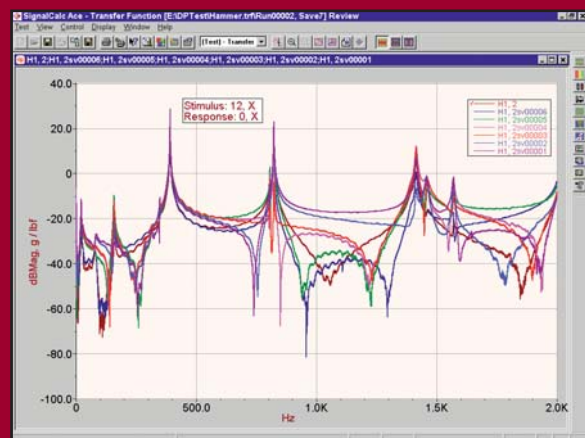
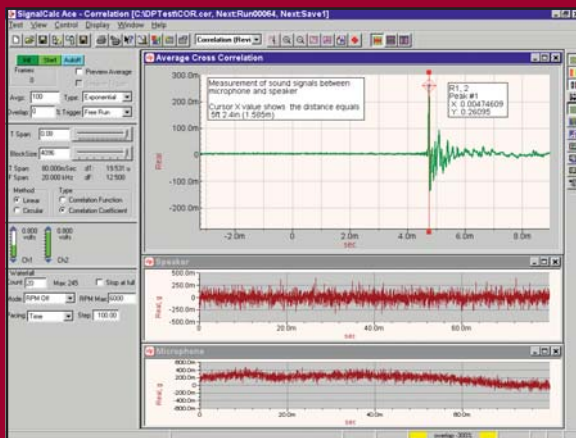
ACE incorporates high quality Sigma Delta converters, 32-bit floating-point arithmetic, leading edge analog design and accurate signal processing algorithms. This combination of carefully integrated ingredients produces measurements of astonishing dynamic range and fidelity. ACE can identify and separate two closely spaced tones differing in amplitude by a factor of 1,000,000: 1. In concert with Zoom and High-Resolution options, the high dynamic range allows you to detect features normally not observed in spectral measurements.



SignalCalc ACE

Comprehensive Measurements

ACE performs analysis in the time, frequency, order and amplitude domains. Use synchronous averaging to recover repetitive events buried in noise. Correlate signals to discover their similarity and temporal alignment. Use FFT spectrum analysis to identify dominant frequencies and spectral density levels. Characterize linear systems by their Transfer, Coherence and Impulse Response functions. Measure Probability functions and test the normality of your experimental data. SignalCalc ACE core functions include powerful FFT measurements, high dynamic range, and extensive analysis tools. Standard functions include full Engineering Units selection and conversion, Automatic Export, Professional Reports, easy data management with Signal Map, flexible display of results, cursor functions for detailed analysis, and an unsurpassed intuitive user interface. Optional application modules extend the functionality to include real-time Octave and 1/3 Octave analysis, Sound Power and Intensity, RPM-based measurements, Order Tracking, MIMO and Stepped Sine testing, SRS analysis, Demodulation, Rotordynamics analysis, multi-plane Balancing, Waterfall and Spectrogram presentations, Throughput-to-Disk, Zoom and High-Resolution FFT analysis.



Multiple Analysis Domains

Choose the analytic viewpoint that best explains the physics of your application. ACE provides uniquely informative displays in Time, Frequency, Amplitude, Order, Amplitude and Angle domains.



Ultra-Portable, Cost-Effective Dynamic Signal Analyzer

Noise and Vibration Testing Features

Two independent signal generators provide choices of sine, swept-sine, random noise, pseudo-random, burst-random, pink noise, chirp, impulse and half-sine transients. For impact tests, excellent trigger controls combined with force and response windows, automatic overload rejection and preview averaging assure the capture of optimum data. For shaker tests, burst random eliminates spectral leakage from lightly damped structures while sine sweep and dwell support holographic studies. Perform MIMO analysis when driving a structure using the two sources or set up multiple references for transmissibility measurements. In Modal testing, ACE makes it easy to save measurement point and direction information with the FRFs in the native format of all currently offered commercial Modal Analysis programs.

Intuitive User Interface

The intuitive organization of controls and the flexible arrangement of measurement data on screen is a significant contribution to the art of user interface design. You will find ACE a natural extension of how you use word processors, spreadsheets, or other Windows applications. The application window is divided into control panels and graphic windows. Control panels contain related measurement parameters while graphic windows contain one or more traces. These elements may be arranged in any format that suits the application or pleases the operator.

Control panels can dock to the edges of the window or float anywhere on the desktop. You can hide and retrieve them at the click of a button. Graphics may be sized and customized with selectable colors, textures, grids, readouts and annotation.





Discover more at www.dataphysics.com

Data Physics Corporation

1741 Technology Drive, Suite 260, San Jose, CA 95110

TEL: +1-408-437-0100 FAX: +1-408-437-0509

Data Physics has been supplying high performance test and measurement solutions for over 20 years. With the addition of a full line of electrodynamic shakers to complement its vibration controllers and dynamic signal analyzers, Data Physics is a total solution supplier for noise and vibration applications.

Data Physics Worldwide

Data Physics (UK) Ltd.

South Road
Hailsham
East Sussex
BN27 3JJ, United Kingdom
TEL: +44-(0)-1323-846464
FAX: +44-(0)-1323-847550

Data Physics (Deutschland) GmbH

Theodor Heuss Strasse 21
D-61118 Bad Vilbel
Deutschland
TEL: +49-(0)-6101-50-95-61
FAX: +49-(0)-6101-50-95-62

Data Physics (France) S.A.

22 Rue Jean Bart
78960 Voisins le Bretonneux
France
TEL: +33-(0)-1-39-30-50-60
FAX: +33-(0)-1-39-30-50-79

Data Physics (Bharat) Pvt. Ltd.

411, 15th Cross
2nd Block, Jayanagar
Bangalore - 560011, India
TEL: +91-80-2656-5810
FAX: +91-80-2656-2609

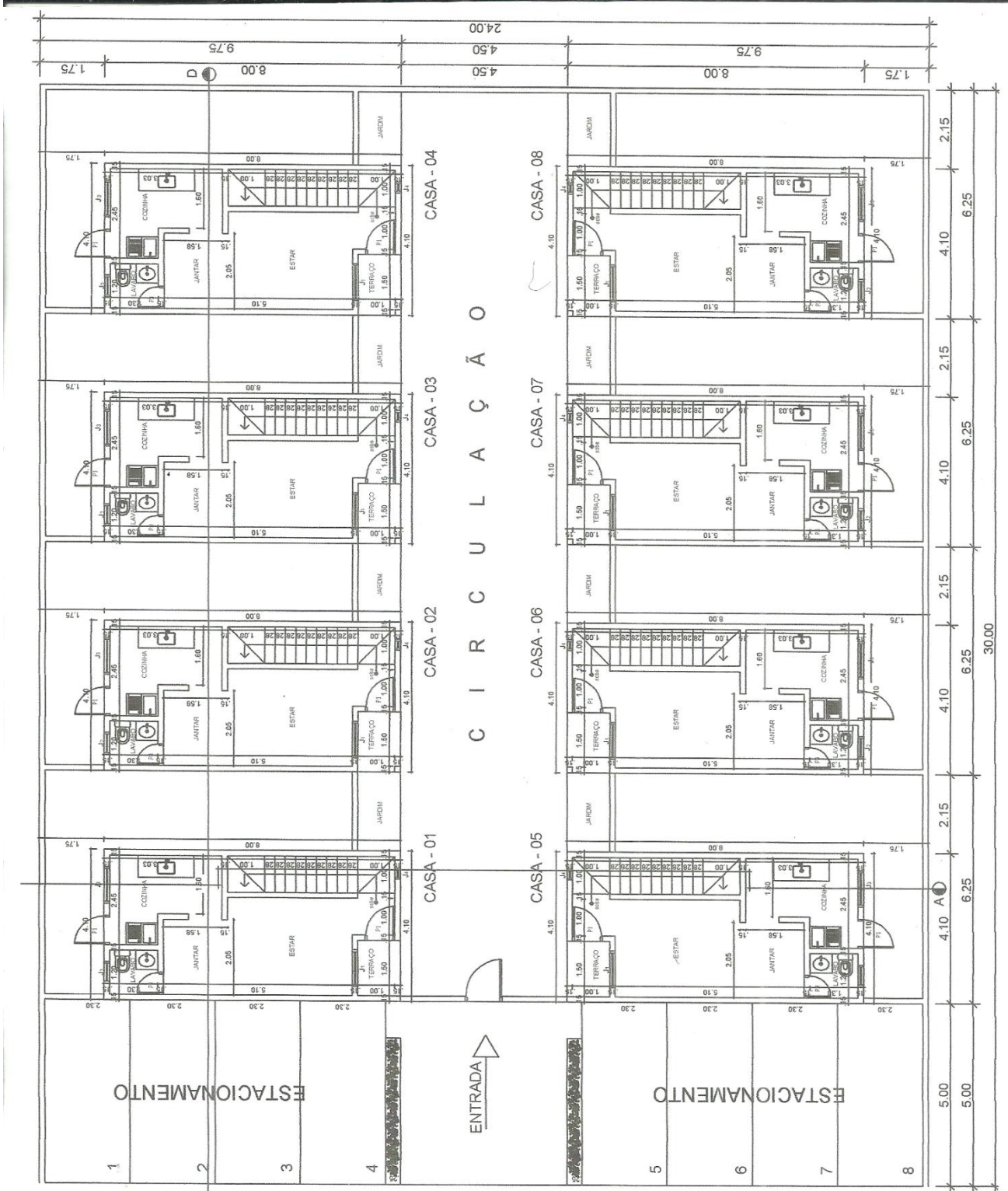
Data Physics (China)

Suite 1605, LT Square
500 Chengdu Road North
Huangpu District, Shanghai
P.R. China 20003
TEL: +86 -21-621-86533
TEL: +86 -21-632-71692
FAX: +86-21-621-73370

APÊNDICE

1) Planta pavimento térreo.....	53
2) Planta Pavimento superior.....	54

Planta Baixa Pavimento Térreo (Aprovado na PMJP)



Planta Baixa Pavimento Superior (Aprovado na PMJP)

