

**Ensaio dinâmico em estrutura de concreto
apoiada continuamente em meio elástico**

Relatório Técnico-Científico

São Paulo
2012

AGRADECIMENTOS

Ao Fundo Mackenzie de Pesquisa, na pessoa de seu presidente Dr. José Francisco Hintze Júnior e dos funcionários Cristiane Alves Macedo, Edivaldo Ferreira Cavalcante, Marli Rosana Tonin e Verônica de Farias.

Ao Professor Doutor Milton Dias Júnior do Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas (UNICAMP) e aos seus orientados Hugo Heidy Miyasato e Vinícius Gabriel Segala Misionatto que gentilmente se deslocaram desde Campinas para realizar ensaios vibracionais na estrutura.

Ao Engenheiro Francisco Laconelli da empresa MAVI – Máquinas Vibratórias que emprestou o motor de massas desbalanceadas para os ensaios de carregamento cíclico.

Ao Engenheiro Luciano Ponci, Diretor da empresa TEKNIKAO pelo empréstimo de dois acelerômetros utilizados no sensoriamento da placa.

À equipe técnica da empresa Lynx, em especial ao Eng. André, que gentilmente realizaram análises espectrais dos dados temporais obtidos durante os testes experimentais

Aos técnicos dos laboratórios de usinagem I, Edson Agostinho Lima da Silva, laboratório de solda, técnico José Antonio dos Santos Neto (Branco) e acadêmico Elson Barão Soares (Barão).

Ao Departamento de compras do Instituto Presbiteriano Mackenzie.

Ao Departamento de manutenção da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 OBJETIVO	11
2 METODOLOGIA	13
3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS	25
3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O CARREGAMENTO CÍCLICO ...	25
3.2 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A ANÁLISE MODAL	34
3.3 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A ANÁLISE HARMÔNICA	35
3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA A CARGA IMPULSIVA	38
3.5 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A ANÁLISE TRANSIENTE	55
4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS	62
5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	63
6 CONCLUSÕES	65
7 DIFICULDADES ENCONTRADAS DURANTE A VIGÊNCIA DO PERÍODO DE TESTES	66
8 BIBLIOGRAFIA	67

1 INTRODUÇÃO

O comportamento dinâmico de estruturas planas, tais como lajes, apoiadas em pontos discretos ou suspensas na forma de tabuleiros motivam pesquisas que estudam, entre outros fenômenos, os modos vibracionais e lançam mão de recursos computacionais que conseguem capturar o real ou o previsto comportamento da estrutura. Quando a interação da estrutura depende do comportamento de camadas inferiores e da resposta dinâmica destas o estudo numérico requer dados mais completos para uma análise coerente e compatível com a realidade.

Esse tipo de estrutura, que tem apoio contínuo, é comumente utilizado em pisos industriais, pátios de aeroportos ou em pavimentos rodoviários, cujas atividades realizadas nesses locais têm características de carregamentos periódicos ou impulsivos. Isso motiva pesquisas com vistas no comportamento modal e seus efeitos sobre a estrutura. Esses estudos apresentam uma característica interdisciplinar complexa abrangendo, ao seu redor, vários campos da Ciência. No caso do pavimento, ele foi uma solução técnica aplicada às vias de transporte para proporcionar facilidades sociais, econômicas e humanas. E, sem dúvida, favoreceu a integração dos povos desde as primeiras construções que remontam ao Egito antigo. Desde então os pavimentos vêm sofrendo modificações de ordem técnica e construtiva, devido a pesquisas e soluções propostas pela academia. O estudo desse tipo de estrutura, como área de pesquisa, mostra uma história rica de métodos analíticos e empíricos desenvolvidos desde a década de 1920 até a simulação numérica, contando com recursos computacionais, dos anos 1990. Entretanto, não significa que todas as dúvidas tenham sido sanadas e que o assunto tenha chegado a uma solução final.

No que se refere ao projeto de um pavimento, um dos fatores que recebe grande consideração é o custo e isso, em linhas gerais, pede economia de material e otimização de processos, aliando-se qualidade, segurança e durabilidade. Uma das formas de se minorar o custo, no caso do pavimento de concreto, é estabelecer uma espessura ótima para a placa, que é um dos componentes da estrutura, responsável por receber todas as solicitações, quer sejam climáticas ou mecânicas.

Por outro lado, a exposição da placa do pavimento aos eventos do cotidiano traz o aparecimento de patologias que, apesar de serem conhecidas, levam os especialistas a realizar experimentos específicos, no sentido de obter maiores

conhecimentos a respeito delas, fazendo desse componente estrutural um atrator para a realização de estudos e experimentos. Então, na tentativa de propor soluções a problemas práticos e técnicos, esse ramo da Ciência enveredou por vários caminhos, um deles é aquele que busca refinamento teórico com informações geradas por experiências conduzidas em campo por meio de pistas reais ou em pistas experimentais. As informações geradas por esses experimentos são então tratadas, interpretadas e levadas novamente a campo, aprimorando, dessa forma, os métodos utilizados.

Esse refinamento, feito pela mensuração dos fenômenos físicos, por meio dos processos experimentais, é uma boa maneira para estudar o comportamento da estrutura frente às solicitações às quais ela estará sujeita durante a sua vida. Dentre elas podem-se destacar as variações da temperatura e as deformações. Essas informações têm, a partir de então, um papel fundamental para ajuste de teoria ou validações em modelos matemáticos ou, ainda, confrontação para modelos estatísticos de previsão.

Um levantamento bibliográfico prévio indicou que, em todas as situações estudadas, as placas foram analisadas *in situ*, sob condições ambientais normais e expostas à sazonalidade. Apesar deste processo retratar a veracidade do comportamento da placa, impede que alguns procedimentos possam ser revistos, repetidos ou modificados. Além do mais, sabe-se que a repetição de testes sob mesmas condições são problemáticos e, por vezes, inviáveis quando existe a dependência dos fatores climáticos. Sem contar a impossibilidade da realização de testes acelerados com repetição de ciclos.

Uma alternativa ou uma forma de contornar esses problemas é a realização de testes sob condições controladas, isso implica a construção de um elemento de pavimento interno a um laboratório onde seja possível a aplicação de condições controladas. Essa estrutura já existe e foi instrumentada com sensores de deformação, faltando apenas a instrumentação com acelerômetros (ou servo acelerômetros) e sensores de deslocamento do tipo *linear variable differential transformer* (LVDT) ou do tipo potenciométrico.

A vantagem da realização de experimentos *in door* é o pleno controle sobre as variáveis temporais sazonais e as intempéries. No entanto, o mais importante é o poder de manipulação sobre alguns parâmetros importantes, tais como intensidade das cargas impostas, número de passagens (será imposto por uma máquina hidráulica), deformações, temperaturas, deslocamentos, acelerações ou, ainda, a realização de

estudos estruturais com diferentes composições de espessuras, diferentes composições de apoio (bases, sub-base) ou tipos de revestimentos, medidas de aderência entre estruturas sobrepostas (placa e base) e a possibilidade de realização de testes acelerados.

O mesmo não se pode dizer das pistas reais instrumentadas, cujos testes demandam intervalos de tempo relativamente longos meses ou anos (pois dependem dos carregamentos impostos pelos veículos). Essas pistas foram e são, até hoje, construídas à semelhança de pistas comuns, podendo fazer parte de um pavimento de uso contínuo ou em lugares reservados especialmente para testes e coletas de dados. A desvantagem da instrumentação *in situ*, no que tange a obtenção de dados físicos periódicos ou sazonais, apresenta certa problemática, em termos logísticos e econômicos, devido a estrutura encontrar-se ao relento e, muitas vezes, distante dos locais de análise; estradas, por exemplo. Outros obstáculos que se interpõem são as intempéries naturais e a segurança, tal qual relata Pereira (2003)¹ sobre a depredação de condicionadores ocorrida durante trabalhos de pesquisa em trecho da estrada SP-79.

Utilizando-se uma metodologia ou outra, a intenção técnica desses experimentos sempre foi à busca de dados que pudessem ser confrontados ou utilizados pelos projetistas, no sentido de obter informações capazes de estimar o comportamento da estrutura frente às solicitações às quais fica exposta.

No Brasil, a aplicação do concreto, segundo Severi e Balbo, (2001) e Rodolfo, (2001), como uma estrutura para pavimentação, remonta à década de 1940 com a construção de pavimentos rodoviários e pistas de aeroportos. No entanto, as primeiras experiências com instrumentação começaram na década de 1970. No Estado de São Paulo, os experimentos iniciais foram realizados na primeira pista experimental, construída na Universidade de São Paulo no ano de 1999 por ocasião do trabalho realizado por Rodolfo (2001), onde se buscou calibrar um modelo numérico com os dados oriundos do pavimento instrumentado. Raia (2010), em estrutura confeccionada dentro de um laboratório mostrou a concordância entre os dados extraídos do campo e aqueles obtidos *in door*.

Com respeito a ensaios *in door*, pesquisas realizadas, no país, nas últimas décadas, têm influenciado os projetistas ao ponto de utilizarem resultados na incorporação dos procedimentos de projeto de pavimento. Como exemplo, cita-se, entre outras referências, a IP-06 e a IP-07 (SÃO PAULO, 2002) (instrução para projeto) da

¹ Conforme descrito por Pereira (2003, p. 79).

Secretaria Municipal da Infra-Estrutura Urbana que utiliza os resultados do estudo realizado por Cervo (2006) que indica a necessidade de novos modelos para os critérios de dimensionamento da estrutura em relação à sua fadiga.

Esses estudos têm grande importância para a análise das falhas da estrutura, que podem ser do tipo funcional, quando o pavimento não produz segurança provocando solicitações de desconforto sobre os usuários dos veículos e do tipo falha estrutural, que está ligada à falência do revestimento em suportar cargas para as quais foi projetado. A previsão de ocorrência da falha é baseada na estimativa da vida útil do pavimento, pois se espera que, dentro desse prazo, ele resista adequadamente.

O presente trabalho explora especificamente os estudos de fadiga, porém deve-se ter em mente que a alternância de ciclos dinâmicos poderá gerar resultados de interesse sobre a vida útil do pavimento. O comportamento do pavimento, com relação ao carregamento dinâmico, aliado ao carregamento estático, poderá servir, com seus dados, para os estudos da falha do pavimento sob as circunstâncias impostas. Esse aspecto é investigado por Mahboub, Liu e Allen (2004), que mostraram a necessidade de acrescentar conhecimento sobre o comportamento da placa sob carregamento térmico e aqueles induzidos pela carga rodoviária.

Apesar das várias pesquisas, uma condição pré-definida, sob a qual irá ocorrer uma falha no pavimento, é de difícil previsão e caracterização nas condições atuais, porém pode-se supor que o acúmulo de dados e pesquisas venha a fornecer tal resposta.

A maioria das pesquisas limita-se à aplicação de cargas estáticas, no entanto, o pavimento fica sujeito às solicitações dinâmicas durante sua vida. De acordo com Cervo (2006), a hipótese de Miner é amplamente utilizada para análise da influência da história de tensões na resistência à fadiga dos materiais. Milton A. Miner (apud Medina, 1997), por meio de estudos em materiais metálicos, observou relações de tensões de tração, mínima e máxima, com aplicação de cargas cíclicas, observando que a energia aplicada ao material contribui para a ruptura por fadiga. Cervo (2004), considera que a expressão da teoria do dano linear não reconhece a influência da variação dos níveis de tensão na seqüência de aplicação de cargas. A hipótese acumula a taxa de um mesmo grau de tensão sem verificar o histórico de tensões anteriores.

A estrutura construída assemelha-se a um pavimento, cuja função é de resistir e distribuir os esforços verticais, horizontais e tangenciais, sendo que sua construção deve se opor ao desgaste e propiciar conforto ao usuário. Essa estrutura é

construída e destinada a distribuir ao subleito os esforços verticais, oriundos dos veículos, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e à segurança e resistir aos esforços horizontais, tornando mais durável a sua superfície (SOUZA, 1980, BALBO, 2007).

O projeto de um pavimento depende da análise do solo, das camadas inferiores à placa que são capazes de suportar as cargas solicitantes e vários outros fatores (BRASIL, 2004). Cargas de roda, por exemplo, originam tensões de flexão, que dependem da carga aplicada, da área de contato, da pressão do ar nos pneus, do meio elástico sobre o qual se apóia a placa, da espessura da placa e da posição da carga na placa, tendo como ponto crítico, segundo Westergaard (1926), a borda da placa. Esse conjunto de camadas, que compõe o pavimento, possui comportamento elástico, linear, sendo as camadas: base (sub-base) e subleito caracterizados pelos módulos de reação “k”.

Para Souza (1972), o pavimento é um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço infinito, que é o subleito.

Os pavimentos rígidos, de acordo com Oliveira (2000), podem ser construídos através de uma placa simples, armada, ou protendida, com ou sem barras de transferência. O concreto, para essa finalidade, pode ter a adição de fibras ou ser construído com diferentes tecnologias, por exemplo, concreto rolado

O pavimento experimental desenvolvido no presente estudo foi do tipo simples² e visto como uma estrutura composta por uma placa, base e subleito, onde se tentou criar uma condição próxima à dos pavimentos reais, cujas características construtivas foram vistas de formas diferentes com o passar dos anos. Sendo assim, o pavimento experimental foi construído como uma estrutura em que foram aplicadas as técnicas comuns de dimensionamento valendo-se do conhecimento das características mecânicas da base e subleito.

No pavimento rígido de concreto simples, a espessura da placa depende do carregamento aplicado pela roda, da resistência à tração na flexão do concreto e da capacidade de suporte da base. O pavimento de concreto simples é formado por placas apoiadas sobre a fundação que oferecem uma impedância aos esforços de tração e / ou compressão.

² A escolha desse tipo de pavimento se deveu a sua versatilidade em aplicações que vão desde a área urbana até a industrial.

Uma classificação dada para pavimentos, segundo um procedimento de projeto baseado na tensão limite para CCP, é estar abaixo da resistência à tração do concreto. Em outras palavras, o revestimento (placa) trabalha essencialmente à tração. As tensões são modeladas pelo uso das equações de Westergaard³, baseadas na teoria da elasticidade, na qual a placa vem apoiada sobre um líquido denso (SOUZA, 1980).

Observa-se, a partir das definições, que a placa é o principal componente estrutural e sua elevada resistência à tração tende a aliviar as tensões nas camadas inferiores.

As expressões originais de Westergaard estão descritas pelas equações 1 a 5.

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k} \right)^{-0,15} a_1^{0,6} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{3(1+\mu)P}{2\pi h^2} \left(\log_e \frac{l}{a} + 0,6159 \right) \quad (2)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (3)$$

$$b = \sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad (4)$$

$$k = \frac{P}{\delta} \quad (5)$$

sendo:

b – raio equivalente;

l – raio de rigidez relativa;

σ_c – máxima tensão de tração na fibra externa superior da placa, quando a carga é apoiada no canto da placa;

μ – coeficiente de Poisson do concreto;

E – módulo de elasticidade do concreto ($E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$);

k – módulo de reação do subleito (coeficiente de recalque, módulo de Westergaard);

P – carga total por roda em N;

³ Harold Malcolm Westergaard (1888-1950) Professor de Mecânica Aplicada na Universidade de Illinois.

a_1 – distância, sobre a bissetriz, do canto da placa até o centro de aplicação da carga, supondo com raio a ;

a – raio de contato da carga

h – espessura da placa em m;

σ_e – máxima tensão de tração na fibra externa inferior da placa, quando a carga é apoiada na borda da placa (ou como Souza (1980) ‘no bordo livre da placa’);

σ_i – máxima tensão de tração na fibra externa inferior da placa, quando a carga é apoiada no interior da placa;

p – pressão nominal de contato;

δ – recalque numa prova com placa rígida de raio a .

Pela teoria clássica de placas na flexão, um pavimento só pode deformar de duas maneiras: contrair-se ou expandir-se (fletir), mantendo a seção transversal plana. O primeiro tipo de deformação pode ser causado por um componente da temperatura uniforme, o segundo tipo pode ser causado pelo efeito combinado de temperatura e carga dinâmica devido ao tráfego sobre o pavimento (CHOUBANE, 1995).

Uma placa pode ser definida como um elemento estrutural laminar que também pode ser caracterizada por apresentar uma dimensão desprezível, pequena, em relação às outras duas. As placas são planas e a espessura é identificada pela distância entre as superfícies.

De acordo com o material de que é feita, elas podem ser classificadas como:

- a) isótropas: quando as propriedades forem as mesmas em qualquer direção;
- b) ortótropas: quando as propriedades forem diferentes em duas direções ortogonais;
- c) anisótropas: quando as propriedades forem diferentes em todas as direções.

A relação da espessura h pelo comprimento L classifica a placa como:

a) delgada caso aconteça a relação: $\frac{1}{100} < \frac{h}{L} \leq \frac{1}{5}$;

b) muito delgada caso as dimensões obedeçam a relação: $\frac{h}{L} \leq \frac{1}{100}$;

c) moderadamente espessa quando ocorrer a relação: $\frac{h}{L} > \frac{1}{5}$.

Por hipótese, a placa será considerada isótropa e, devido às suas dimensões 3,00 m de comprimento, 1,78 m de largura e 0,15 m de espessura, será classificada como delgada.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é a sistematização de dados experimentais com a finalidade de ajustar um processo numérico que seja aplicável a uma estrutura real, para a estimação da falha bem como o comportamento modal, quando solicitada dinamicamente.

Como objetivo específico, o presente trabalho visa estudar o comportamento do pavimento, construído em uma escala reduzida e distorcida, cujo elemento estrutural, placa, foi instrumentado com sensores de deformação, aceleração e deslocamento. Essa estrutura existente está construída interna a um laboratório que é capaz de dar suporte a todas as exigências que o experimento necessitar. Nessas condições, a hipótese é que, ao invés de instrumentar um pavimento em escala real para a retirada de dados, pode-se realizar o mesmo procedimento em laboratório onde, com controle de algumas variáveis e possibilidade de repetição de testes, se possa fornecer e fortalecer respostas adequadas para o estudo de estruturas de concreto apoiadas em meio elástico.

Apesar dos métodos de projeto estarem além do objetivo desse trabalho, vale acrescentar que, mesmo consagrados, muitos trabalhos científicos discutem novas técnicas e aplicações no projeto e execução de pavimentos, sendo que o método utilizado atualmente, segundo Pitta (1998), está baseado naquele ditado pela *Portland Cement Association* (PCA/84). Um aspecto que se deve destacar é que o trabalho aqui proposto não investiga a transferência de carga entre placas contíguas. Mas, implicitamente, verificará a influência da base, pois se sabe que o desempenho da fundação (sub-base e subleito) é fator importante do projeto.

Sendo assim, no sentido de acrescentar conhecimento e contribuir com maiores informações sobre o comportamento da placa, colocando-a em um estado de repouso, isolada de interferências de fatores externos, para obtenção de dados “limpos” de tensões e deformações, com controle absoluto sobre as condições de testes que venham a se adequar às diversas situações e condições utilizadas na construção de pavimentos, bem como, indiretamente, apresentar uma metodologia para testes acelerados, em laboratório, em placas de concreto com alternância do estado dinâmico, justifica-se a elaboração do presente trabalho baseado no desenvolvimento de um estudo de ajuste numérico, com a intenção de que a confrontação dos dados possa contribuir para adaptações nos métodos de dimensionamento desse tipo de estrutura e que possa, também, através da sistematização dos dados, fornecer subsídios para futuras pesquisas.

A relevância e ineditismo do trabalho foram analisados com uma visão social, técnica e econômica. Sob o aspecto sócio-ambiental, a metodologia proposta acena com a possibilidade de minimizar impactos em áreas reservadas para testes *in situ*. Sob o aspecto econômico, pode-se almejar vantagens com relação ao custo de projeto, execução, duração dos experimentos e manutenção. O aspecto de relevância, sob o prisma da engenharia, será a facilidade da manipulação dos diversos parâmetros mecânicos que venham conduzir resultados experimentais tão significativos quanto aqueles realizados em pavimentos de concreto de cimento Portland (CCP) reais. Por outro lado, o ensaio de um elemento de pavimento interno a um laboratório, como se fosse uma pista experimental, possibilitará a aplicação da metodologia para outros testes devido a sua mobilidade, aplicação de procedimentos de projeto dentro de um ambiente de laboratório e, senão o mais importante, controle das variáveis de ensaio.

A estrutura em estudo foi construída sobre uma laje de reação, onde um sistema hidráulico, disponível no local e pertencente ao laboratório de Estruturas da EEUPM. Ele foi responsável pela aplicação de cargas estáticas sobre a estrutura, especificamente sobre a placa. O pavimento foi construído em três camadas (placa, base e subleito), tendo como subleito um polímero, cuja função foi a de garantir o apoio contínuo da estrutura.

Foram embutidos da placa quinze sensores de deformação que irão permitir a observação do campo de deformações da placa. Devido à simetria da placa, somente três sensores de deformação foram utilizados.

2 METODOLOGIA

Para a obtenção dos dados estáticos e dinâmicos (modais) a placa de CCP foi instrumentada com acelerômetros, LVDT e, pelos já existentes, sensores de deformação. O conjunto estrutural, composto por três camadas sobrepostas, forma uma estrutura não monolítica, tendo como destaque o fato da placa e base não estarem aderidas e que o subleito foi formado através de um polímero. O conjunto, com geometria retangular e em escala linear e distorcida⁴, em relação aos pavimentos reais, está construído interno a um laboratório de ensaios mecânicos em uma área de 30,0 m² com pé direito de 6,0 m, localizado entre outros dois laboratórios existentes e protegido por portas de aço para passagem de materiais e uma porta de passagem comum, do tipo corta-fogo, como pode ser visualizado em planta baixa pelo desenho 1. Devido a essa posição, as condições ambientais, tais como umidade e temperatura, se mantêm com pouca variação em relação ao ambiente externo. Isso é importante, pois, sendo o concreto um material higroscópico, mesmo após a cura pode absorver ou perder água em função da umidade do ar, apresentando dilatação ou contração (retração). Segundo a *American Concrete Institute* (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE,1988), a mudança de um estado úmido para um estado seco com 50% de umidade pode causar uma retração de 0,6% na placa. O mesmo efeito pode ocorrer nas mudanças de temperatura. O local é dotado de ar condicionado e infra-estrutura capaz de suportar as necessidades técnicas que a experiência irá exigir.

A estrutura foi construída sobre uma laje de reação e sob uma máquina de ensaios de tração/ compressão, acionada por um cilindro hidráulico e instrumentada com uma célula de carga com capacidade de até 1,5 MN. A excitação dinâmica da placa foi realizada por um motor com massas desbalanceadas ou excêntricas e por martelo de impacto. As fotografias 1 e 2 ilustram o aspecto físico dos equipamentos mencionados. As características técnicas do excitador são dadas na tabela 1.

⁴ No presente trabalho as dimensões de comprimento e largura estão em uma escala de 1:2, enquanto que, a espessura possui relação de 1:1. Nessa situação a escala pode ser encarada como distorcida.

Tabela 1. Dados técnicos do excitador de massas desbalanceadas.

Vimot tipo	Potência		Corr. max			Torque	Impacto	massa
	kW	HP	A	A	A	kgf cm.	N	kg
E-10-8	0,75	1,00	2,0	1,8	1,6	80	700	70



Fotografia 1. Vibrador E-10-8 com massas desbalanceadas
 Fonte: Sítio do fabricante MAVI, 2012, utilizado nos testes com excitação harmônica.



Fotografia 2. Martelo de impacto, já instrumentado e conectado ao sistema de aquisição de dados.
 Fonte: Acervo dos autores, utilizado nos testes impulsivos.

A escolha foi baseada na capacidade de geração de força sobre a placa. Ele também pode ser controlado com o inversor de frequência adquirido para esse fim. O martelo de impacto foi utilizado para o levantamento das frequências críticas da placa. Ele foi construído por técnicos da Universidade de Campinas (UNICAMP), especificamente da Faculdade de Engenharia Mecânica e pelo departamento de projeto mecânico. O deslocamento da placa foi monitorado pelos LVDT e os modos vibracionais por acelerômetros. A temperatura ambiente foi mantida na faixa de 24,0 °C a 26,0 °C imposta pelos condicionadores de ar (o condicionamento de ar fica inoperante nos finais de semana e ao final do expediente que, durante o ano letivo, vai das 7h

30min às 23h 00min. Nos períodos de recesso e férias escolares, o acionamento é facultativo).

A medição da umidade será monitorada diariamente por meio de um higrômetro, não rastreado, portátil, marca LUTRON, modelo HT-3005.



Desenho 1. Localização do experimento.
Fonte: Acervo próprio (2008).

A estrutura (pavimento) foi construída em um molde de madeira de espessura de 2,5 cm e foi escorado lateralmente com suportes fixados na base da laje de reação. Deve-se notar que essa fixação não foi classificada como um vínculo, mesmo porque não impôs restrições aos movimentos da placa ou ao conjunto.

No momento da construção da placa do pavimento, sensores de deformação e de temperatura (termômetros) foram embutidos na massa fresca do concreto em posições específicas e identificados segundo a sua posição geométrica no interior da placa. O embutimento dos sensores foi executado segundo os trabalhos realizados por Sargand e Khory (1999).

O processo construtivo dos sensores de deformação seguiu procedimentos descritos por Raia (2010), ou seja, *strain gages* (também conhecidos como extensômetros elétricos de resistência – EER ou extensômetros de resistência elétrica – ERE) foram colados em substrato de fibra de vidro, formando uma célula de carga chamada célula embutimento (CE) ou célula de deformação. Essa extensometria de embutimento segue as mesmas considerações e técnicas utilizadas na extensometria de superfície.

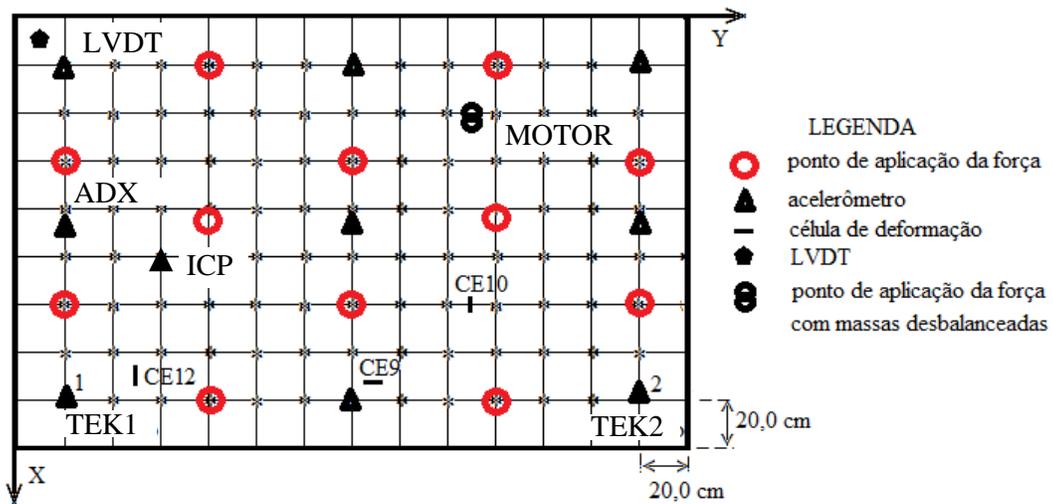
Um cuidado especial foi tomado com relação à dependência térmica com a temperatura das células de embutimento ou sensores de deformação. Para tanto, foram embutidas células sem função de medir deformação chamadas células *dummy* (CED), que serviram para realizar a compensação térmica quando fosse utilizada a configuração em meia ponte.

Os sensores (células de deformação – CE) foram mergulhados em resina a base de epóxi tipo compound S200 da Vedacit® (VEDACIT, 2006) e posteriormente em areia fina nº 10. Esse procedimento foi adotado, com base nos trabalhos de Pappalardo et al. (2006), para garantir a aderência da célula na massa de concreto evitando a ocorrência de movimento, a não ser aquele causado pela placa.

A conexão elétrica entre os sensores de deformação, deslocamento e aceleração ao sistema de aquisição de dados será realizada por meio de cabos blindados referenciados (aterrados) ao sistema de aquisição. O condicionamento dos sinais foi realizado através de um sistema fabricado pela empresa Lynx Tecnologia Ltda, modelo ADS 2000, capaz de suportar, sem multiplexação, trinta e dois canais diferenciais.

A interpretação dos sinais foi realizada por um software, desenvolvido na linguagem de programação C++ fornecido pelo fabricante, chamado AqDados e a análise dos dados de deformação, aceleração e deslocamento foi realizada por outro software fornecido pelo fabricante, conhecido como AqDanalysis v.7.02.

Todos os dados foram sistematizados pelo software estatístico MINITAB® e planilhas do Microsoft Excel®. Para verificação das frequências naturais nas direções x, y e z, com maior interesse essa última coordenada, a placa foi instrumentada como indicado pelo desenho 2. O processo para determinação das frequências modais foi realizado excitando-se a estrutura com martelo de impacto em posições predeterminadas, que podem ser conferidas no desenho 2.



Desenho 2. Posição dos sensores e ponto de aplicação de carga dinâmica harmônica sobre a placa da estrutura.
Fonte: Acervo dos autores

DISPOSITIVO	Posição Coordenada X	Posição Coordenada Y	Posição Coordenada Z
Sensor de deformação CE9	147,0	152,0	13,0
Sensor de deformação CE10	120,0	175,0	11,0
Sensor de deformação CE12	150,0	50,0	4,0
Sensor de deslocamento LVDT	10,0	10,0	0,0
Acelerômetro (1) TEK1	160,0	20,0	0,0
Acelerômetro (2) TEK2	160,0	280,0	0,0
Acelerômetro (3) ADX	80,0	20,0	0,0
Acelerômetro (4) ICP	80,0	20,0	0,0

Quadro 1. Localização dos sensores de deformação, deslocamento e acelerômetros.
Dimensões em milímetros.
Fonte: Elaborado a partir dos dados de Raia (2008) modificado.

Dois acelerômetros (indicados por 1 e 2) foram mantidos fixos a sobre a estrutura, para a identificação das frequências críticas, quando a placa foi submetida a excitações contínuas. Os sensores de deformação (indicados por CE) indicaram a deformação interna à placa. Os sensores de deslocamento (LVDT) foram mantidos fixos na origem do sistema e indicaram o deslocamento desse ponto. Esses sensores registraram o comportamento da estrutura quando excitada com massas desbalanceadas. A estrutura também foi excitada por meio de impulsos cíclicos gerados pela percussão de um martelo de impacto.

Os ciclos forçados forma determinados de acordo com o volume diário médio (VDM) de tráfego e velocidade de passagem dos veículos estabelecidos em norma. O tempo de duração dos testes foi baseado no número de solicitações exercidas pelos veículos. O experimento tomou como referência as solicitações realizadas por um veículo padrão. No caso, um ônibus do tipo convencional classe 2C, composto de dois eixos simples (ES), traseiro e dianteiro cuja carga máxima por eixo é de 5,0 toneladas. O sistema hidráulico carregou a estrutura com 2,0 toneladas e, sobre essa carga, o motor excitador manteve um carregamento cíclico de 700,0 N.

Como a estrutura existente, que pode ser vista na fotografia 3, possui 1,8 m de largura, ao passo que uma placa real tem, em média, 4,0 m, a carga cíclica foi aplicada no canto placa simulando apenas um carregamento de 2,0 toneladas. O intervalo cíclico foi controlado com um inversor de frequência marca AGEON, modelo XF *standart* referenciado a uma velocidade de 60,0 a 80,0 km/h.



Fotografia 3. Aspecto da estrutura e da máquina hidráulica utilizados no experimento.

Fonte: Acervo dos autores

A fotografia 4 mostra o motor com massas desbalanceadas fixado sobre a placa e mantido fixo pelo carregamento da máquina hidráulica.



Fotografia 4. Fonte de excitação com massas desbalanceadas.
Fonte: Acervo dos autores

A percussão para a análise de frequência foi realizada por meio de um martelo de impacto e em posições determinadas pelo número de acelerômetros. A fotografia 5 mostra o posicionamento dos acelerômetros, de acordo com o planejamento realizado no desenho 2.



Fotografia 5. Posicionamento dos sensores sobre a placa.
Marcado, em vermelho, pontos de excitação.
Fonte: Acervo dos autores

A fotografia 6 mostra o processo de percussão com martelo de impacto. Foram utilizados sete acelerômetros e um sistema de aquisição de sinais na LMS *International*, que está indicado no detalhe.



Fotografia 6. Excitação da placa com martelo de impacto e sistema de aquisição de dados.

Fonte: Acervo dos autores.

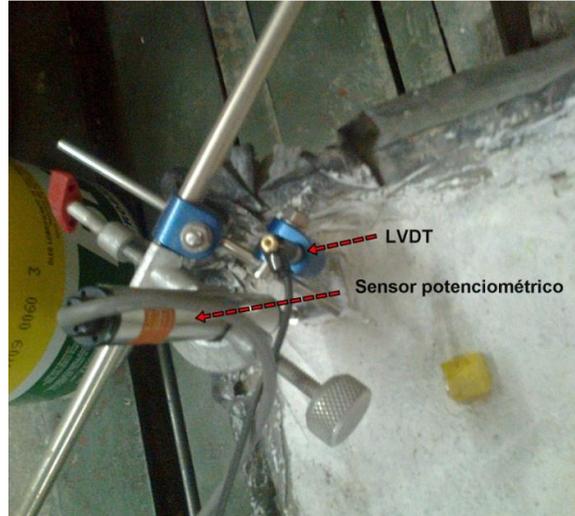
A fotografia 7 mostra a célula de carga que monitorou a aplicação da força sobre a estrutura e, ao fundo, o motor excitador.



Fotografia 7. Posicionamento da célula de carga sobre a placa.

Fonte: Acervo dos autores.

Os deslocamentos foram medidos por um LVDT e um sensor de deslocamento potenciométrico. A fotografia 8 mostra o posicionamento no canto da placa e a forma de fixação, que foi feita em relação à laje de reação.

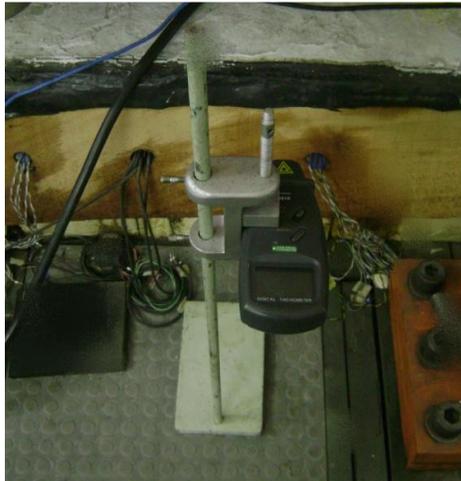


Fotografia 8. Posicionamento dos sensores de deslocamento no canto esquerdo da placa.
Fonte: acervo dos autores

A fixação dos acelerômetros foram colados com cola a base de cianocrilato (superbonder) sobre a superfície da placa. A fotografia 9 mostra esse procedimento. A medida das rotações foi realizada com tacômetro digital com mira a LASER marca ICEL, modelo TC5010, que pode ser visto, em seu suporte, na fotografia 10.



Fotografia 9. Especialista realizando a colagem dos acelerômetros.
Fonte: acervo dos autores.



Fotografia 10. Medida da rotação do motor.
Fonte: Acervo dos autores

O modelamento numérico utilizou o Método dos Elementos Finitos por meio do software ANSYS® (licença acadêmica) usado para a simulação do comportamento modal e espectral da estrutura, a qual foi modelada conforme dados reais extraídos do modelo físico exposto no laboratório. As propriedades físicas das partes que compõem a estrutura são as mesmas obtidas nos ensaios dos materiais e podem ser vistos no quadro 2 e indicadas no desenho 3.

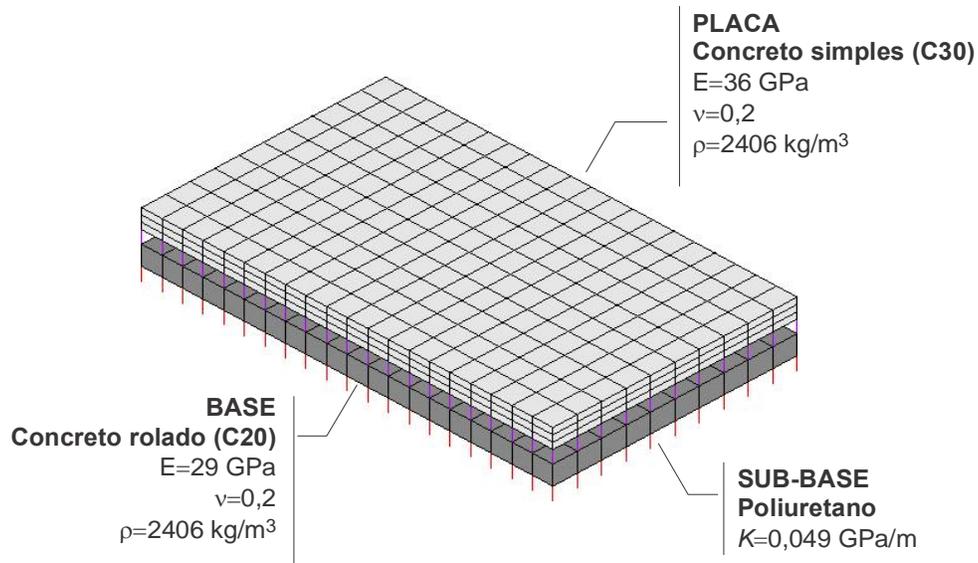
A excitação harmônica foi imposta segundo a equação 6, cuja amplitude da força imposta, foi de 700 N.

$$F(t) = F_0 \cdot \text{sen}\omega t = 700 \text{ N} \cdot \text{sen}(2\pi ft) \quad (6)$$

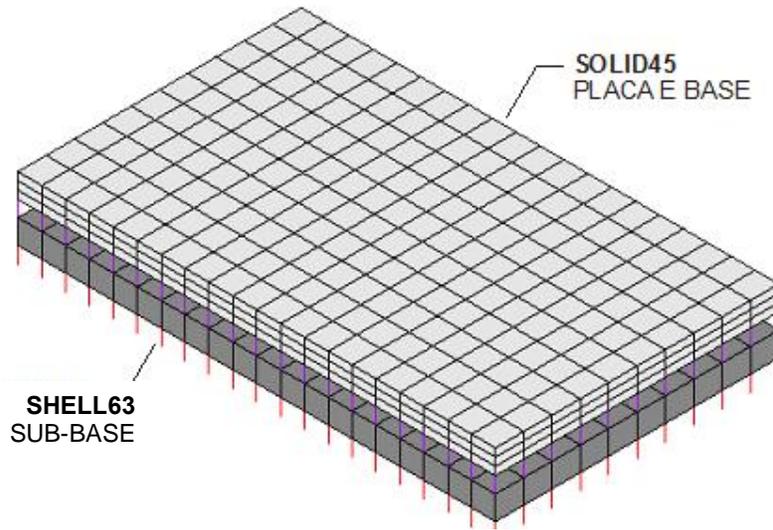
As frequências foram medidas com os sensores apresentados no Quadro 1. O desenho 2 ilustra os pontos de instrumentação e o ponto de aplicação do motor de massas desbalanceadas. A análise foi realizada utilizando os elementos sólidos hexaédricos com oito nós, para a base e sub-base, e elementos laminares de placa com 4 nós, para a introdução do coeficiente de fundação elástica correspondente ao subleito. A última coluna do quadro 2 mostra dados do subleito introduzidos (valores médios). O quadro 2 apresenta também os parâmetros físicos (módulo de elasticidade e peso específico) da base e sub-base utilizados no modelo matemático.

Registros	Unidade	Base	Placa (pavimento)	Subleito poliuretano		
Traço	-----	1:9:0,67	1:4,5:0,39	-----		
Cimento	kg/m ³	227	408	-----		
Areia	kg/m ³	908	781	-----		
Brita	kg/m ³	1135	1055	-----		
Água	L	152	159	-----		
Relação água-cimento	L/kg	0,67	0,39	-----		
Teste de Compressão						
7 dias	MPa	25,4	37,5	-----		
28 dias	MPa	27,2	44,2	-----		
		centro	terços	centro	terços	-----
Teste de tração na flexão	MPa	3,6	2,8	8,6	7,2	-----
Módulo de elasticidade	GPa	29,0		36,0		0,0046
Massa específica	kg/m ³	2406,0		2406,0		44,0
Módulo de reação	GPa/m	-----		-----		0,049

Quadro 2. Ensaio tecnológicos do concreto utilizado na base e na placa.
 Fonte: Dados obtidos a partir das informações do laboratório de ensaios de materias.



Desenho 3. Propriedades físicas de cada elemento da estrutura.
 Fonte: acervo dos autores.



Desenho 5. Tipos de elementos finitos utilizados nas análises dinâmicas na estrutura (modal, harmônica e impacto).
Fonte. Acervo dos autores.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O CARREGAMENTO CÍCLICO

Os gráficos a seguir mostram o valor do nível global da vibração ocorrida sobre a placa no período de ensaios. A placa foi carregada ciclicamente durante 2 meses com frequências que variavam no intervalo de 400,0 rpm até 800,0 rpm, que correspondem a velocidades de 7,0 km/h a 12,0 km/h, coerentes com a passagem dos ônibus nos pontos de parada. Velocidades maiores não foram conseguidas com o sistema de excitação por massas desbalanceadas.

O gráfico 1 indica o carregamento cíclico de 480,0 rpm (7,0 km/h), resultados dos acelerômetros fixados na superfície da placa. A frequência indicada, 8,0 Hz, é referente à do motor, aquela vista em 60,0 Hz é interferência da rede elétrica. Os acelerômetros foram escolhidos devido às características de sensibilidade e resposta temporal. O acelerômetro ADX é do tipo *Microelectromechanical systems* (MEMS), O acelerômetro ICP é do tipo comum piezoelétrico, assim como os outros dois, TEK 1 e TEK2.

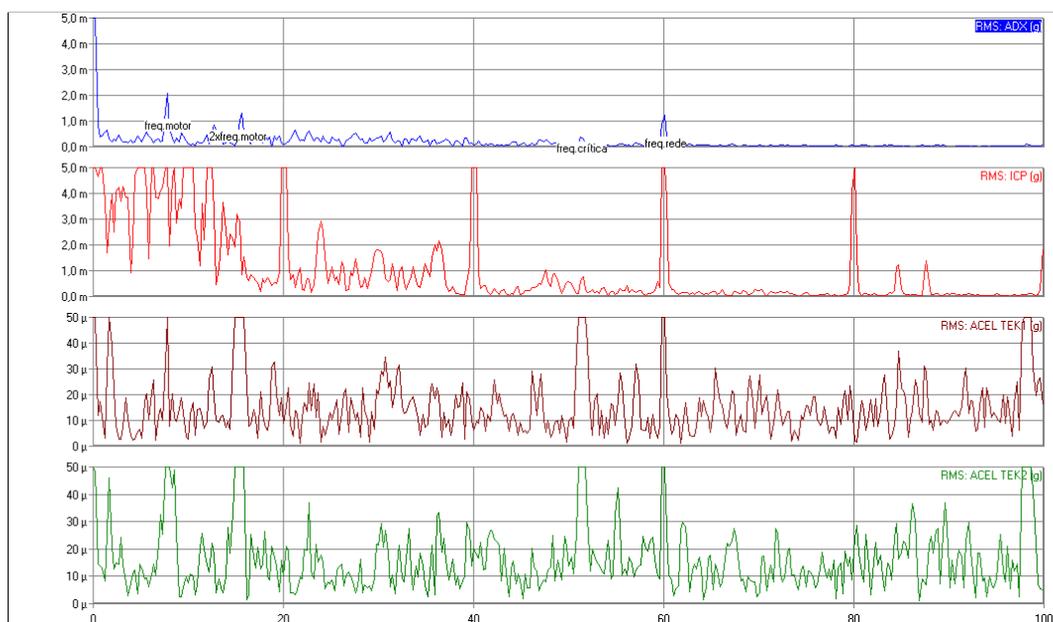


Gráfico 1. Espectro global visto pelos acelerômetros ADX, ICP, TEK1 e TEK2 para a frequência de excitação de 8,0 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 2 mostra a resposta global dos sensores de embutimento CE9 (SG1), CE10 (SG5), CE12(SG12) e a célula de carga. Os CEs têm respostas semelhantes e indicam como é o comportamento vibracional interno á placa. A célula de carga indicou o comportamento resultante das oscilações relativas entre a máquina de ensaio e a placa de concreto.

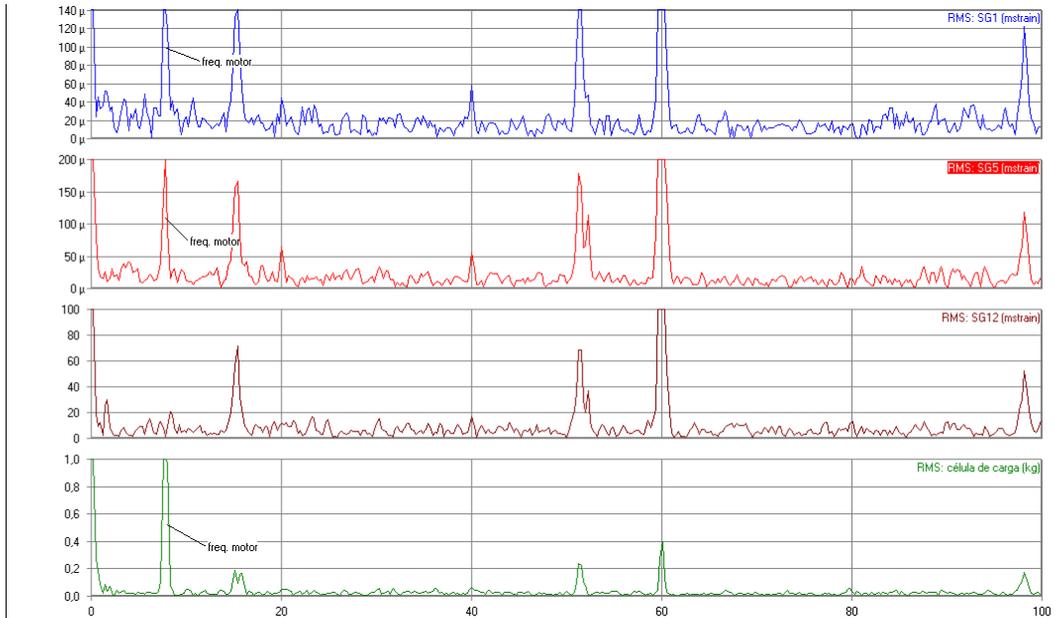


Gráfico 2. Espectro global visto pelos sensores SG1, SG5, SG12 e célula de carga para a frequência de excitação de 8,0 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 3 mostra o comportamento dos sensores de deslocamento LVDT e POT. Diferente dos outros sensores, o interesse é o deslocamento da placa mediante a força excitadora. No entanto, observam-se as mesmas ocorrências de frequências.

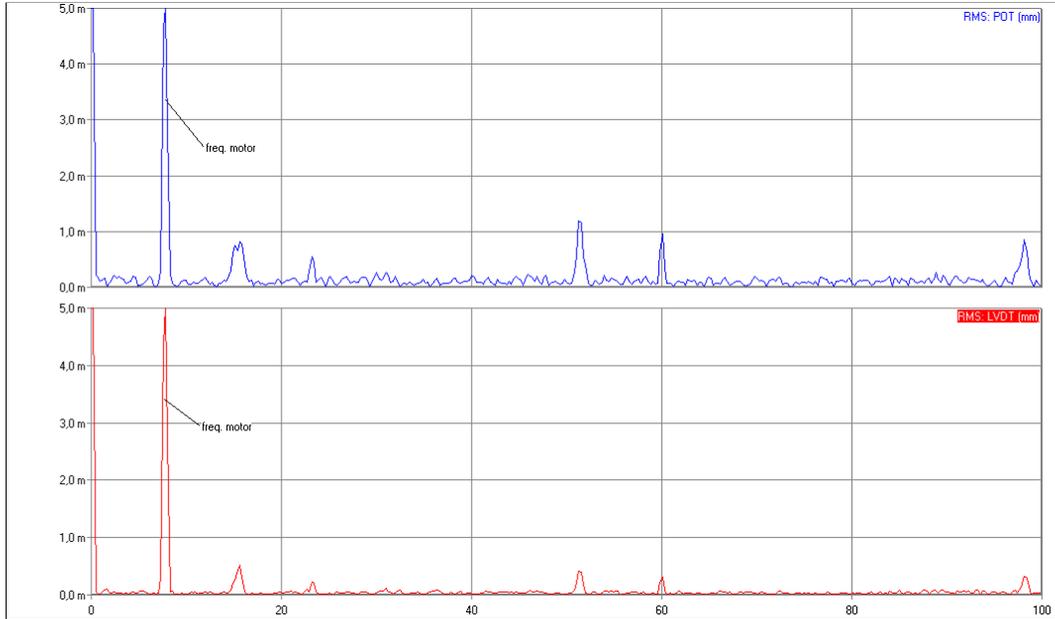


Gráfico 3. Deslocamento global visto pelos sensores LVDT e POT para a frequência de excitação de 8,0 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 4 indica o carregamento cíclico de 760,0 rpm (11,0 km/h), resultados dos acelerômetros fixados na superfície da placa. A frequência indicada, 12,0 Hz, é referente à do motor, aquela vista em 60,0 Hz é interferência da rede elétrica. Os acelerômetros foram escolhidos devido às características de sensibilidade e resposta temporal.

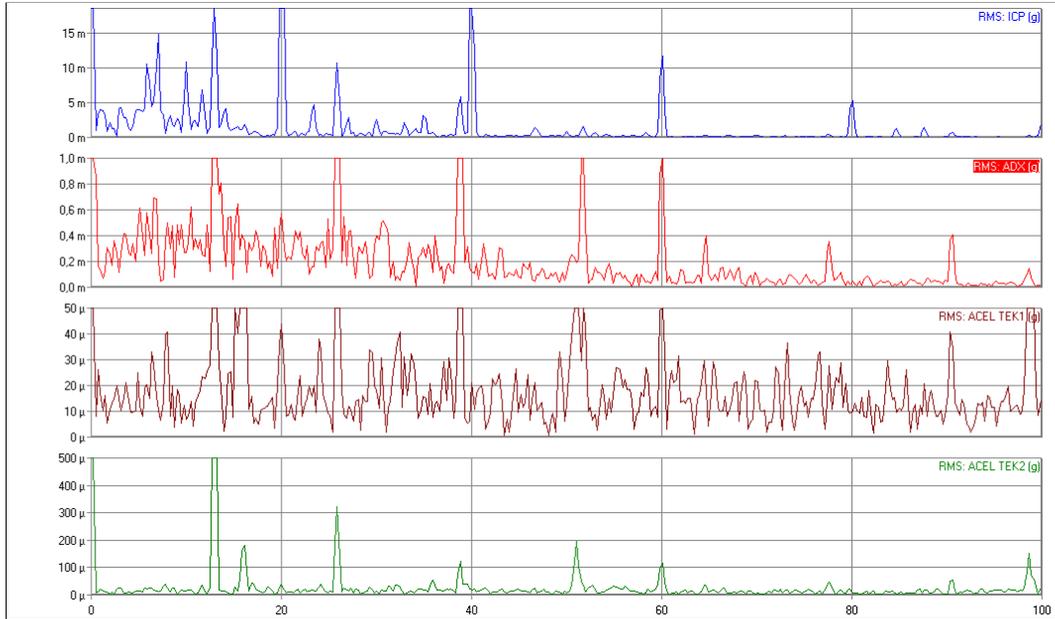


Gráfico 4. Espectro global visto pelos acelerômetros ADX, ICP, TEK1 e TEK2 para a frequência de excitação de 12,0 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 5 mostra a resposta global dos sensores de embutimento CE9 (SG1), CE10 (SG5), CE12(SG12) e a célula de carga.

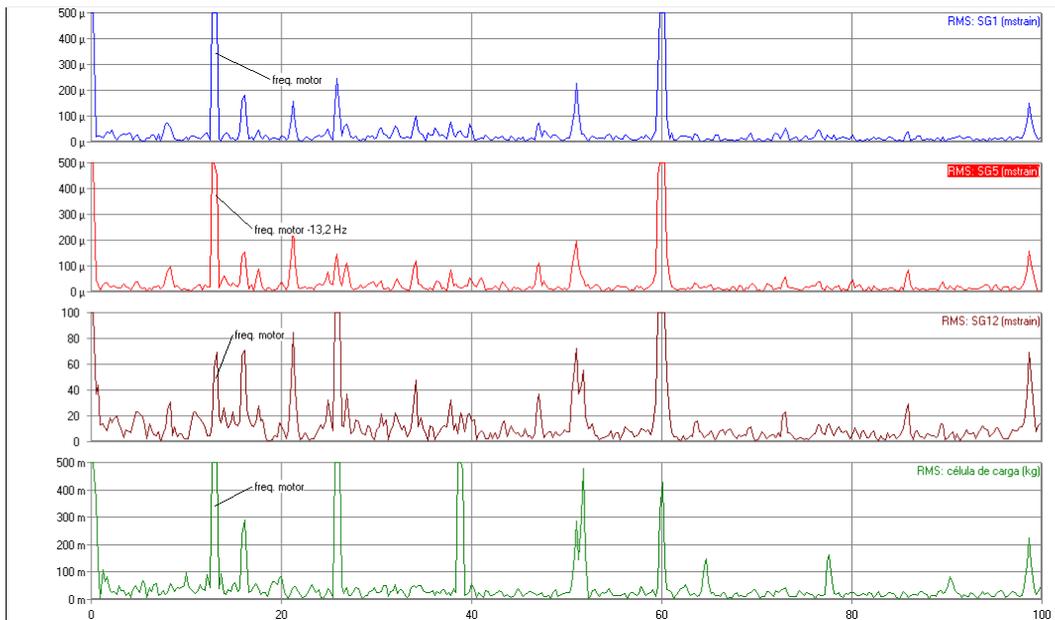


Gráfico 5. Espectro global visto pelos sensores SG1, SG2, SG12 e célula de carga para a frequência de excitação de 12,0 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais

O gráfico 6 mostra o comportamento dos sensores de deslocamento LVDT e POT.

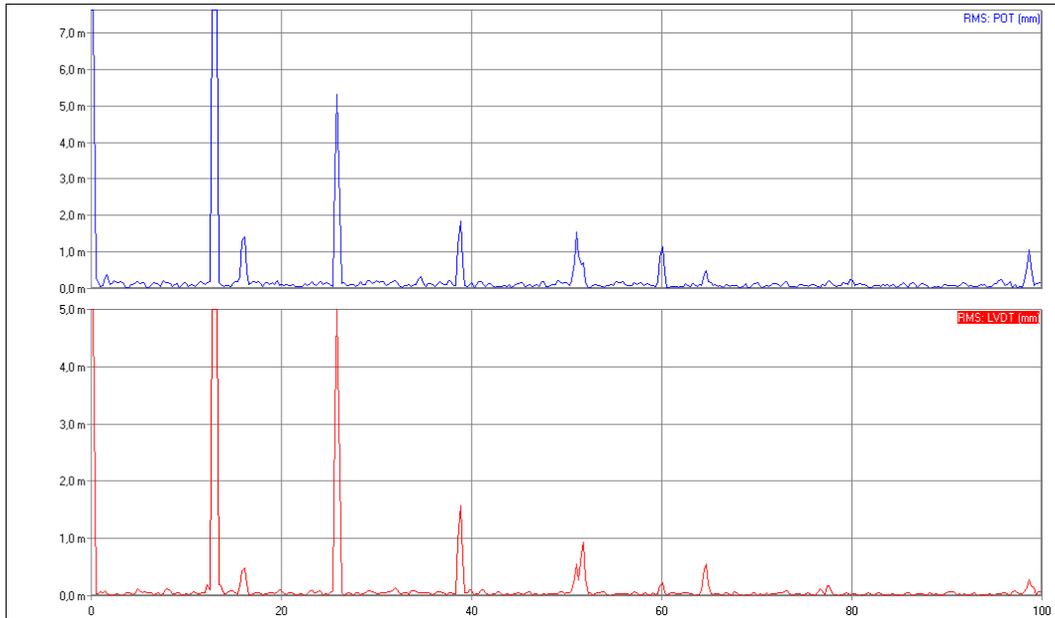


Gráfico 6. Deslocamento global visto pelos sensores LVDT e POT para a frequência de excitação de 12,0 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 7 indica o carregamento cíclico de 810,0 rpm (12,0 km/h), resultados dos acelerômetros fixados na superfície da placa. A frequência indicada, 13,5 Hz, é referente à do motor, aquela vista em 60,0 Hz é interferência da rede elétrica. Os acelerômetros foram escolhidos devido às características de sensibilidade e resposta temporal.

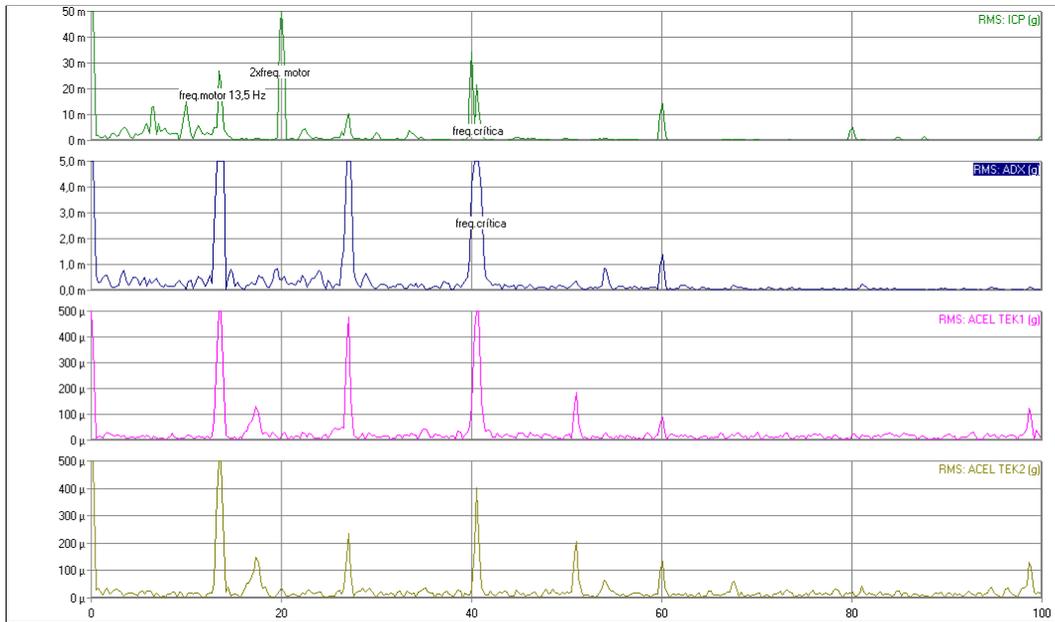


Gráfico 7. Espectro global visto pelos acelerômetros ADX, ICP, TEK1 e TEK2 para a frequência de excitação de 13,5 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 8 mostra o comportamento dos sensores de deslocamento LVDT e POT.

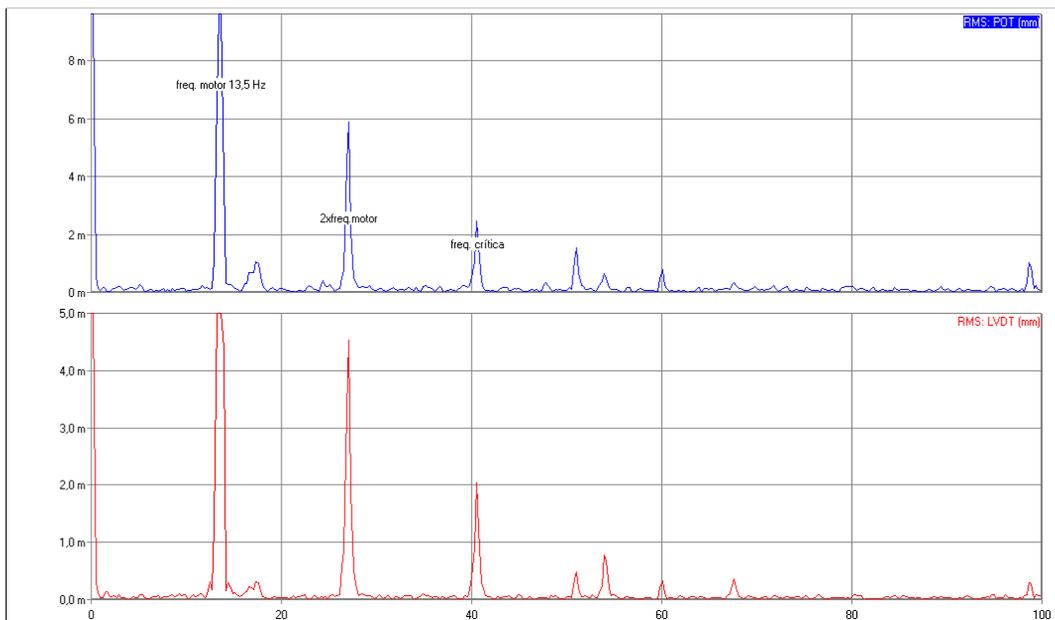


Gráfico 8. Deslocamento global visto pelos sensores LVDT e POT para a frequência de excitação de 13,5 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 9 mostra a resposta global dos sensores de embutimento CE9 (SG1), CE10 (SG5), CE12(SG12) e a célula de carga.

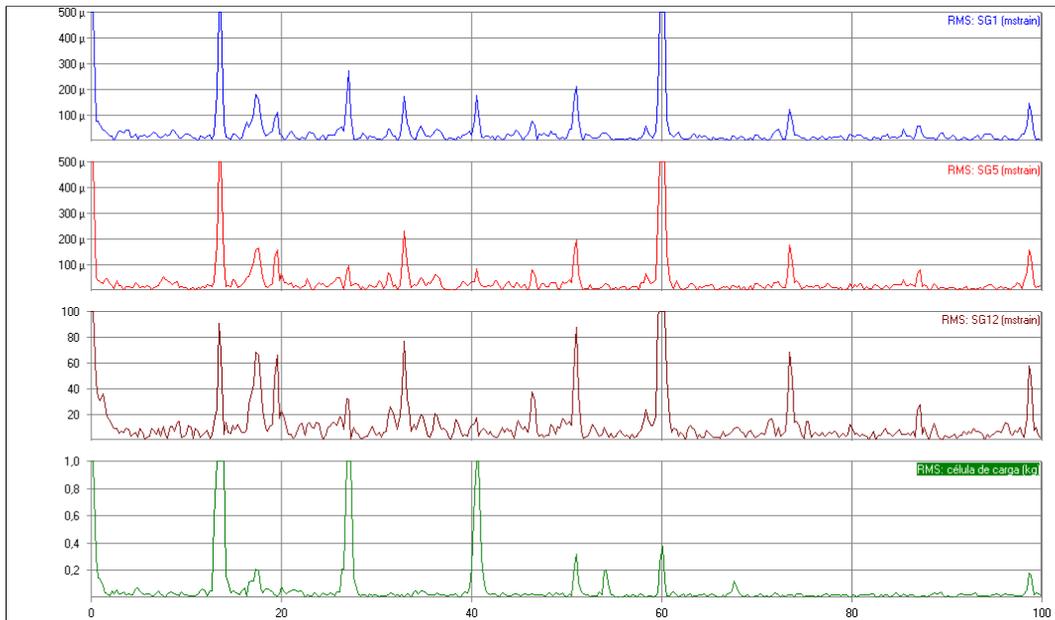


Gráfico 9. Espectro global visto pelos sensores SG1, SG2, SG12 e célula de carga para a frequência de excitação de 13,5 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 10 indica o carregamento cíclico de 842,0 rpm (14,0 km/h), resultados dos acelerômetros fixados na superfície da placa. A frequência indicada, 14,2 Hz, é referente à do motor, aquela vista em 60,0 Hz é interferência da rede elétrica. Os acelerômetros foram escolhidos devido às características de sensibilidade e resposta temporal.

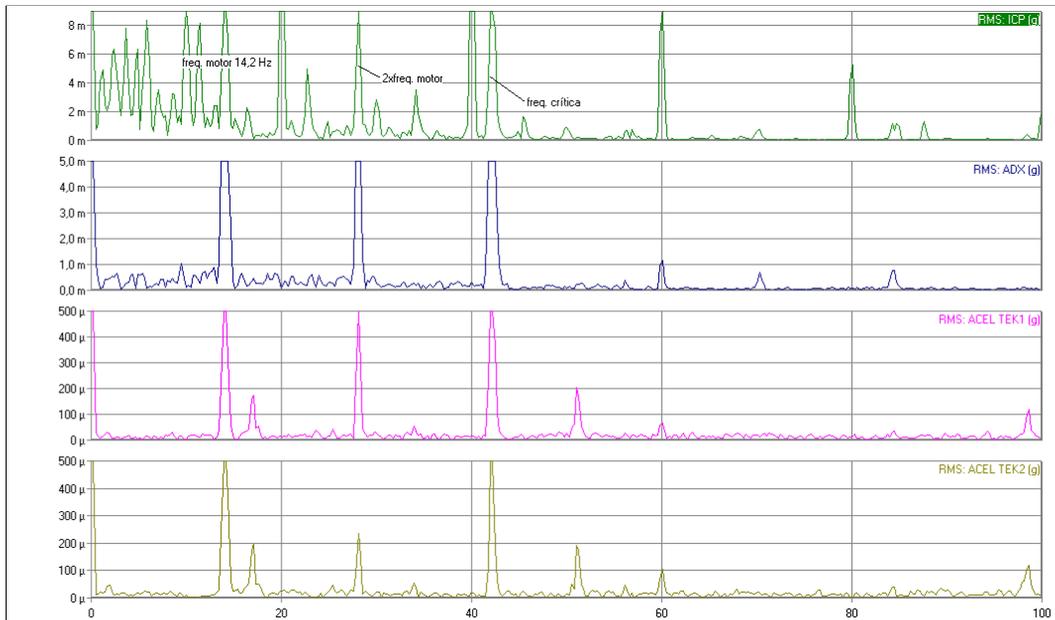


Gráfico 10. Espectro global visto pelos acelerômetros ADX, ICP, TEK1 e TEK2 para a frequência de excitação de 14,2 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 11 mostra a resposta dos sensores de deslocamento LVDT e POT.

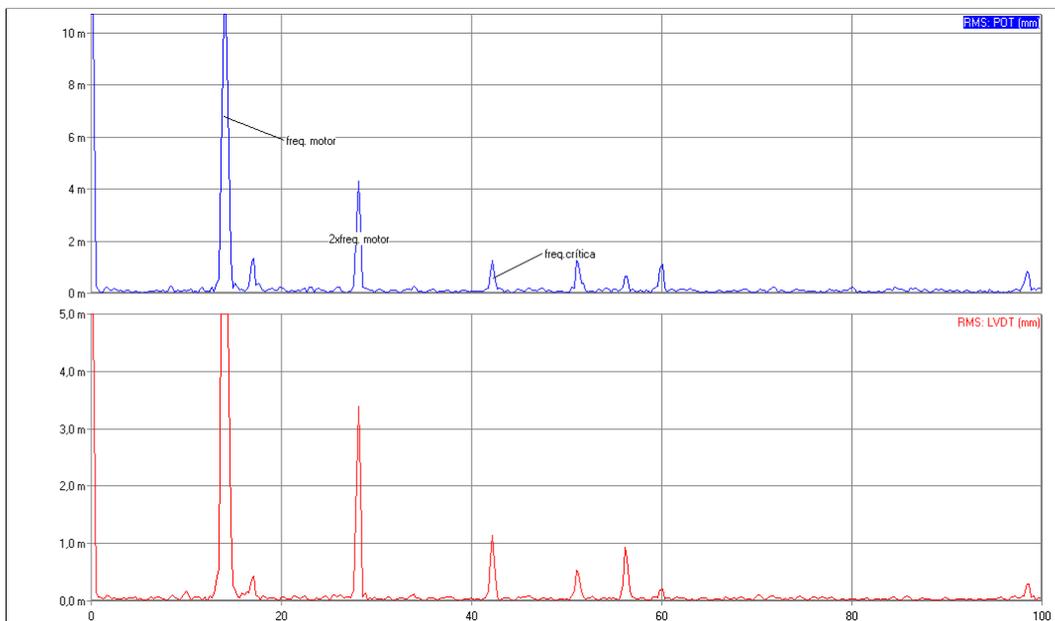


Gráfico 11. Deslocamento global visto pelos sensores LVDT e POT para a frequência de excitação de 14,2 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

O gráfico 12 mostra a resposta global dos sensores de embutimento CE9 (SG1), CE10 (SG5), CE12(SG12) e a célula de carga.

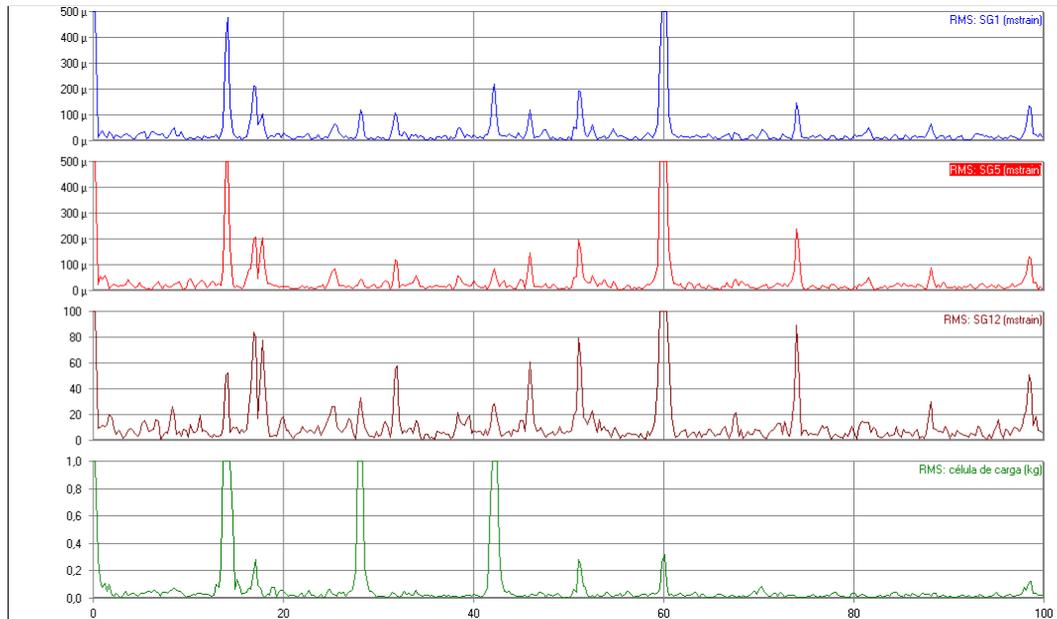
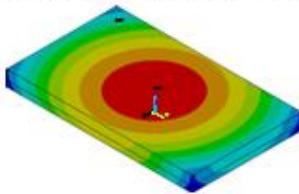
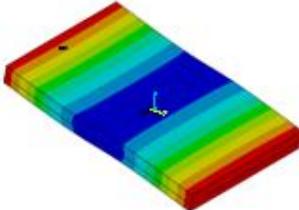
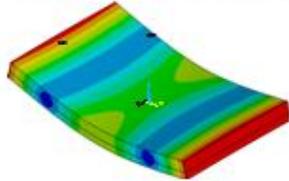


Gráfico 12. Espectro global visto pelos sensores SG1, SG2, SG12 e célula de carga para a frequência de excitação de 14,2 Hz.

Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

3.2 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A ANÁLISE MODAL

A seguir, são mostrados os resultados da análise de frequências naturais da placa correspondente a uma excitação harmônica livre e não amortecida. O quadro 3 apresenta os primeiros três modos de frequência natural, assim como, as frequências críticas.

MODO	FREQUÊNCIA (Hz)	FORMA MODAL
1	45,5	Deslocamento translacional vertical governado pela rigidez do sub-leito 
2	79,8	Deslocamento rotacional do conjunto governado pela rigidez do sub-leito 
3	112,0	Flexão da base e sub-base no plano vertical contém maior lado da placa 

Quadro 3. Modos e frequências naturais de vibração
 Fonte: Acervo dos autores, retirado da análise por elementos finitos

3.3 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A ANÁLISE HARMÔNICA

A seguir, são mostrados os resultados da simulação numérica por elementos finitos referentes à parte prática realizada com motor de massa desbalanceada.

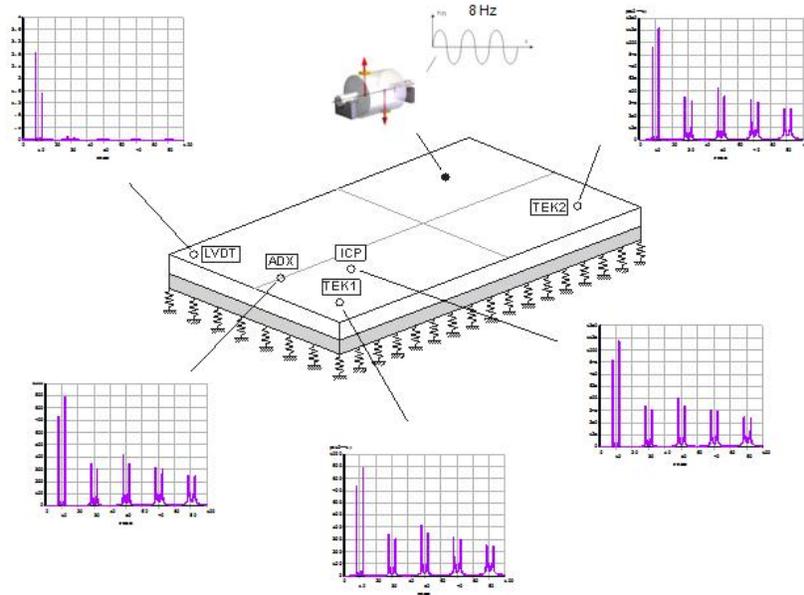


Gráfico 13. Espectros de resposta de deslocamentos (LVDT) e de acelerações para a frequência forçada de 8,0 Hz.
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos

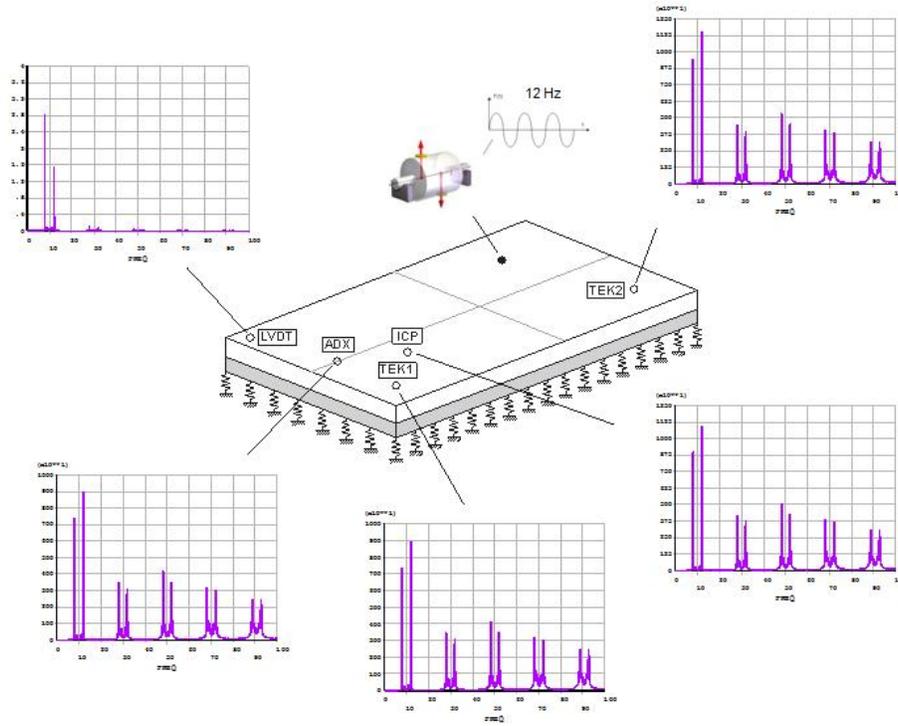


Gráfico 14. Espectros de resposta de deslocamentos (LVDT) e de acelerações para a frequência forçada de 12,0 Hz.
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos

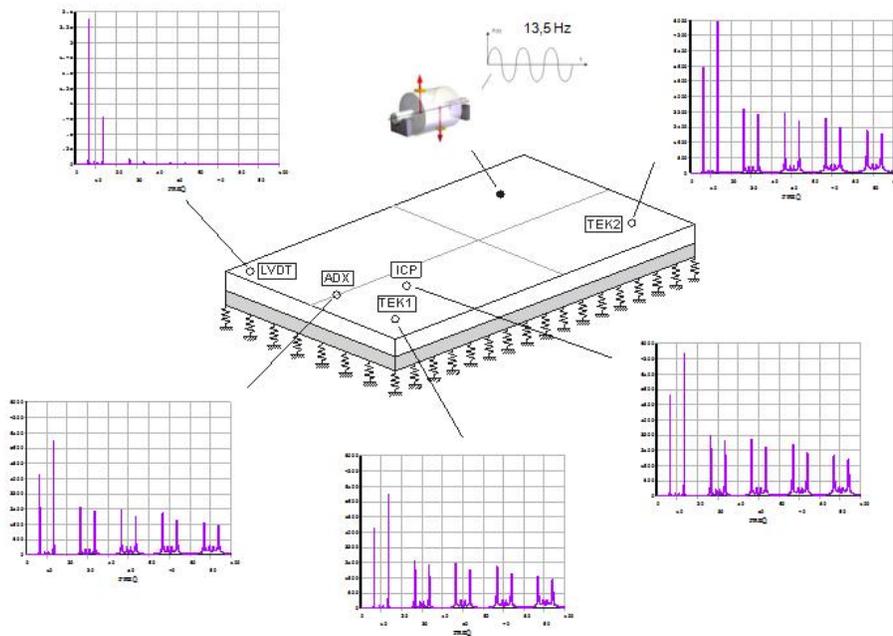


Gráfico 15. Espectros de resposta de deslocamentos (LVDT) e de acelerações para a frequência forçada de 13,5 Hz.
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos

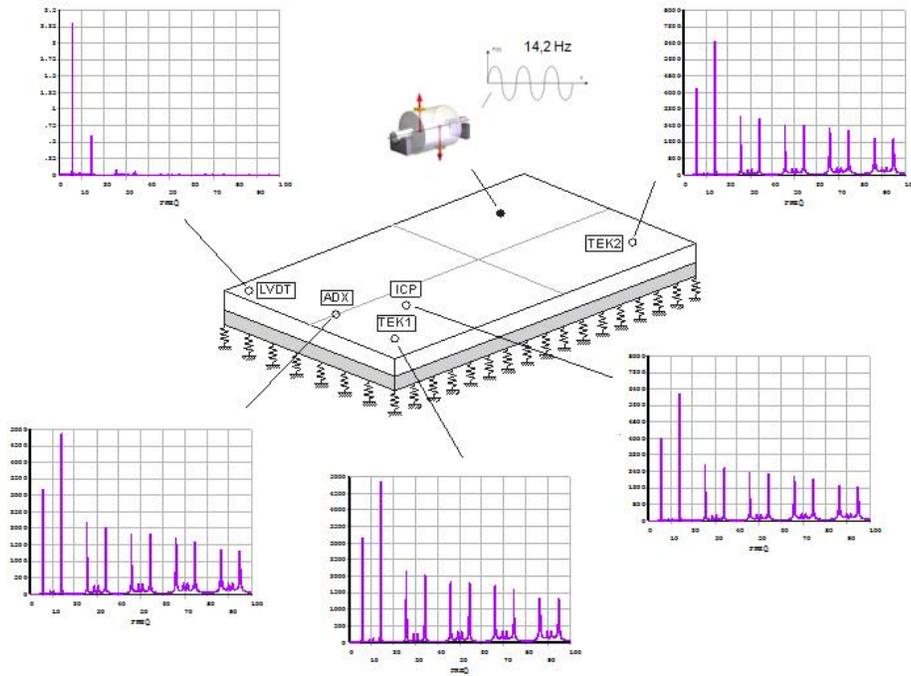
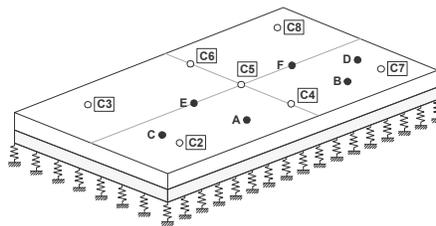


Gráfico 16. Espectros de resposta de deslocamentos (LVDT) e de acelerações para a frequência forçada de 14,2 Hz.
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos

3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA A CARGA IMPULSIVA

O carregamento impulsivo foi realizado com martelo de impacto nos pontos descritos no desenho 6. Sendo os pontos de 1 a 15 onde a placa foi excitada, os pontos em vermelho indicam onde foram medidas as acelerações e as frequências. As designações C2 a C8 representam os canais do sistema de aquisição, que é a mesma nomenclatura utilizada nas funções de resposta em frequência (FRFs) dos gráficos a seguir. O canal C1 representa a força, no gráfico 13, C1 representa excitação no ponto 1 (ver legenda da figura); no gráfico 14, representa excitação no ponto 2. Assim, FRF(C1,C7) na figura 18 é a função de resposta em frequência do ponto 13 com excitação no ponto 1. Os gráficos 28 e 29, são exemplos de uma excitação impulsiva e uma resposta livre.

3(C3)	6	9(C6)	12	15(C8)
2	5	8(C5)	11	14
1(C2)	4	7(C4)	10	13(C7)



Desenho 6. Disposição dos pontos de medida e excitação executados na placa.

Fonte: Acervo dos autores.

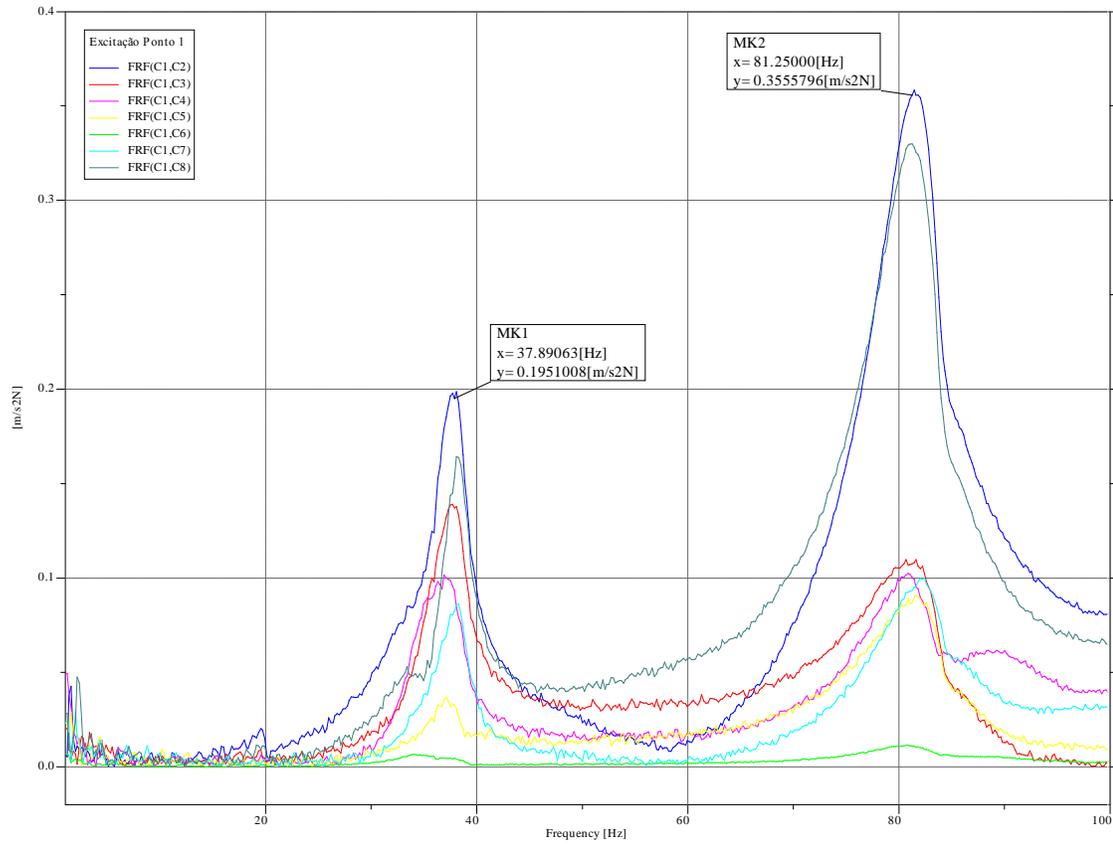


Gráfico 17. Resposta em frequência com excitação no ponto 1 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

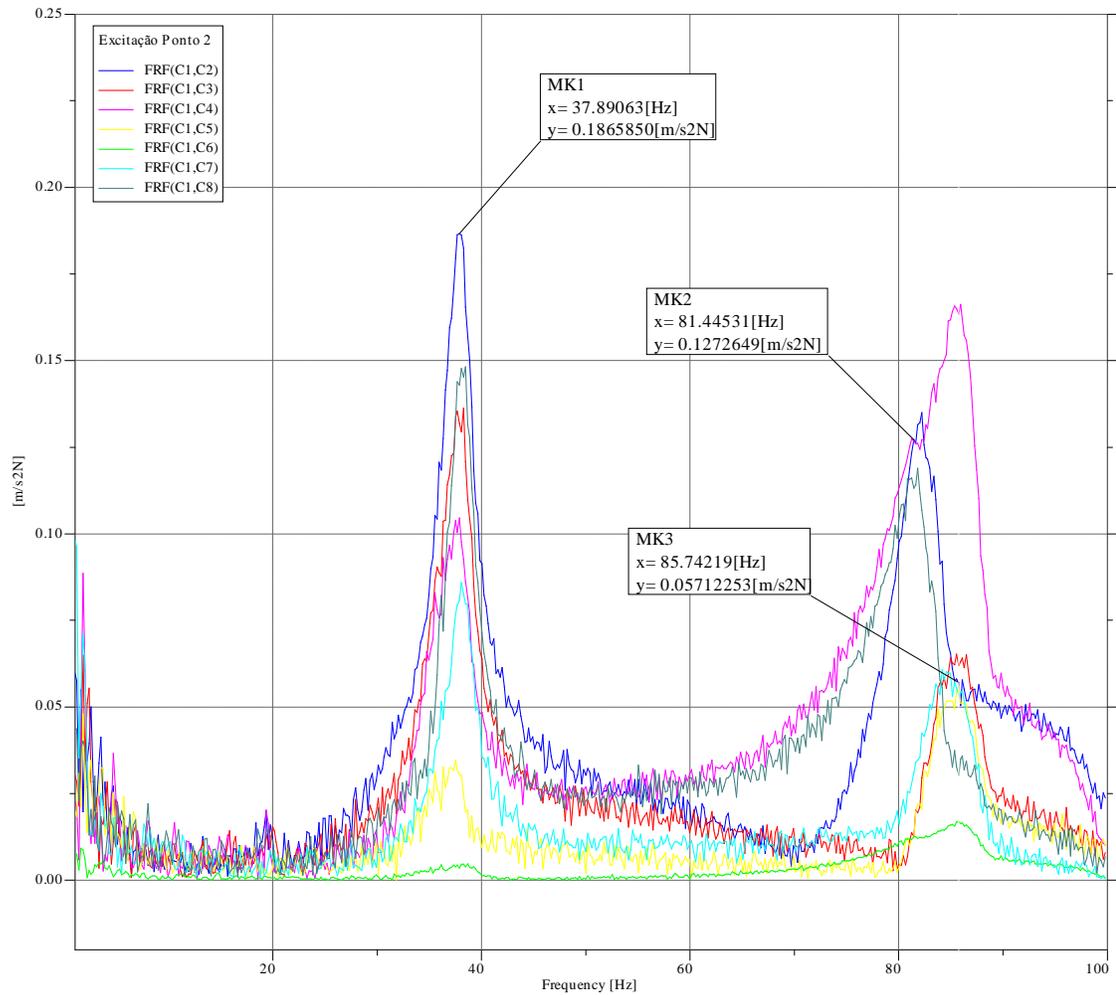


Gráfico 18. Resposta em frequência com excitação no ponto 2 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

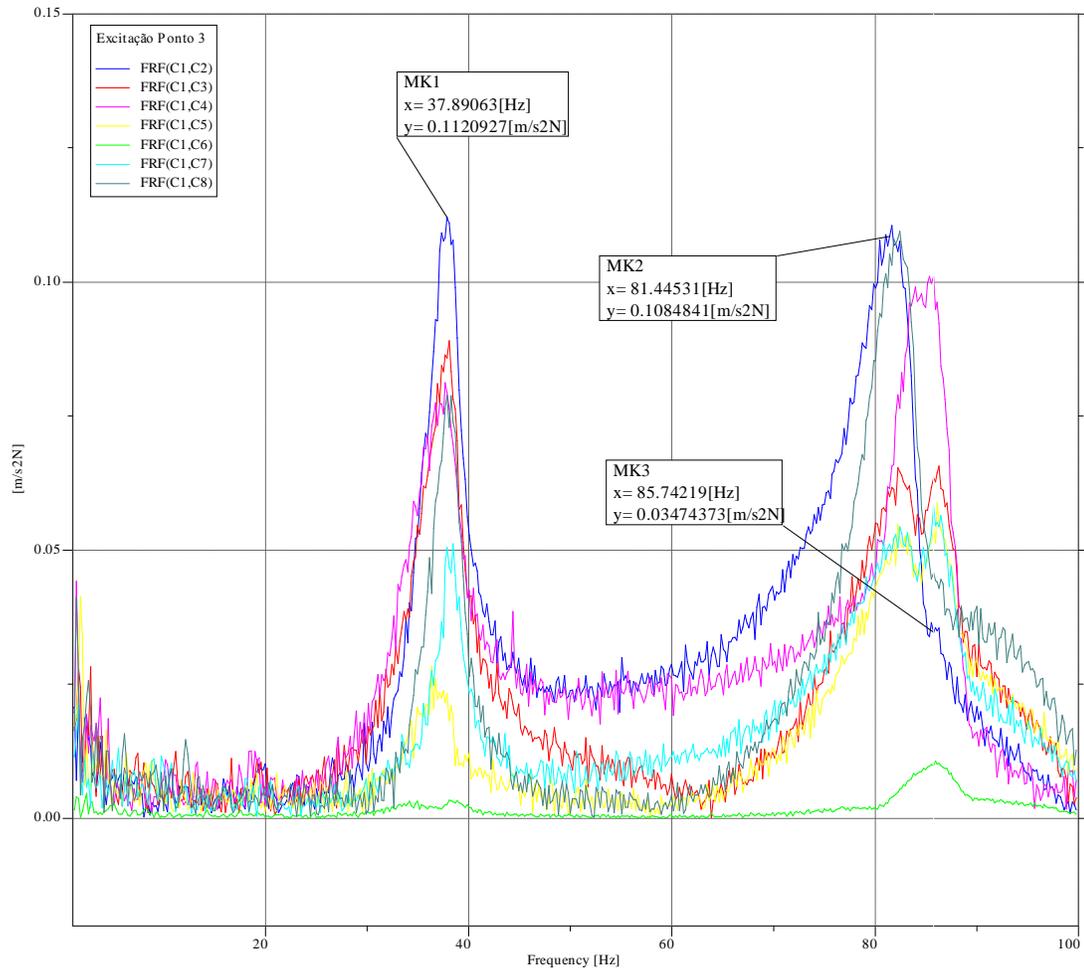


Gráfico 19. Resposta em frequência com excitação no ponto 3 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

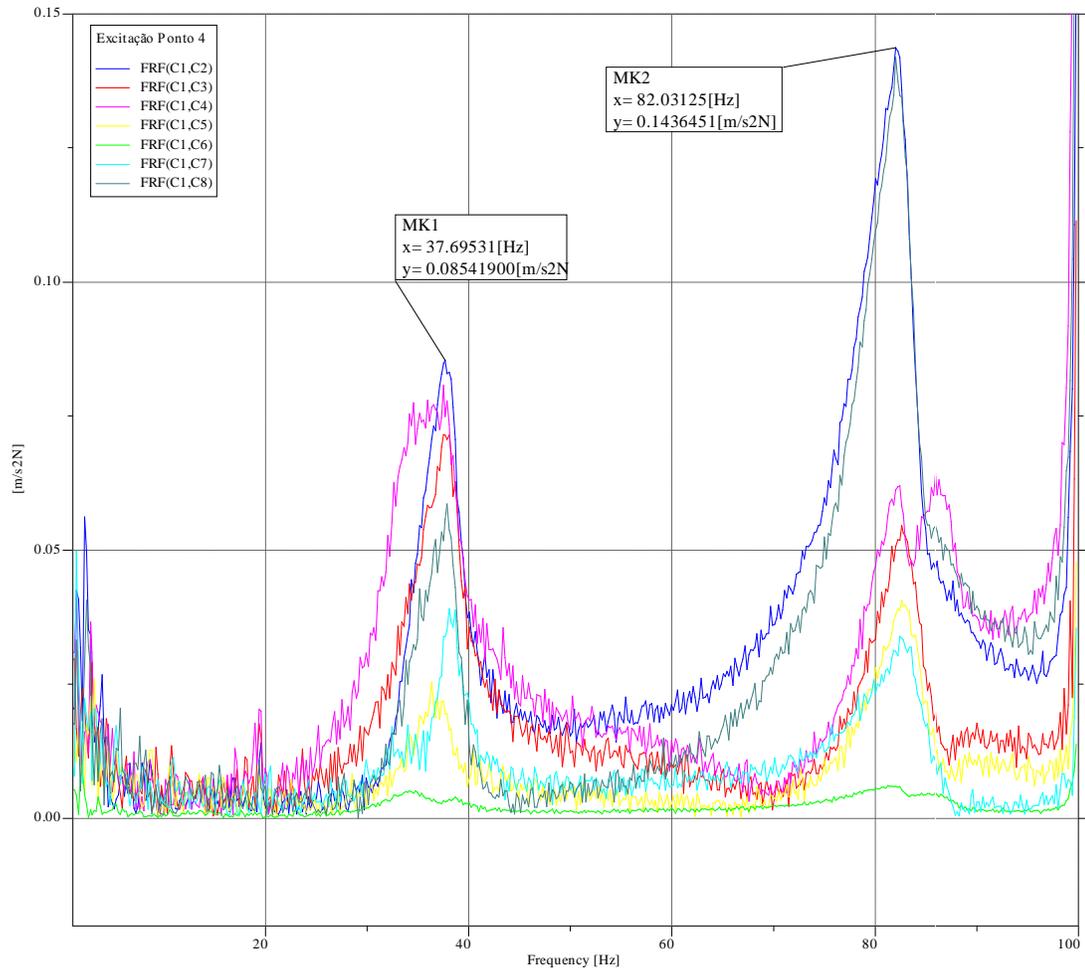


Gráfico 20. Resposta em frequência com excitação no ponto 4 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

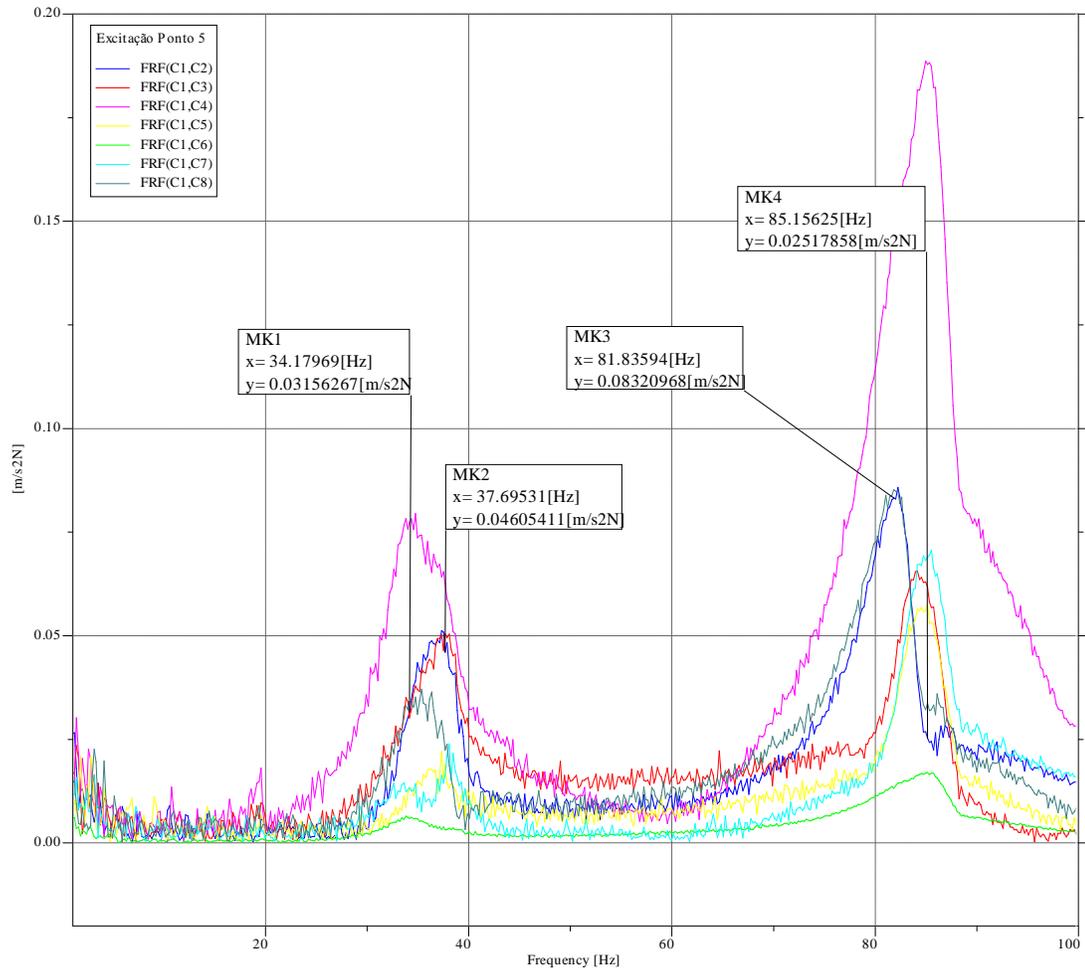


Gráfico 21. Resposta em frequência com excitação no ponto 5 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

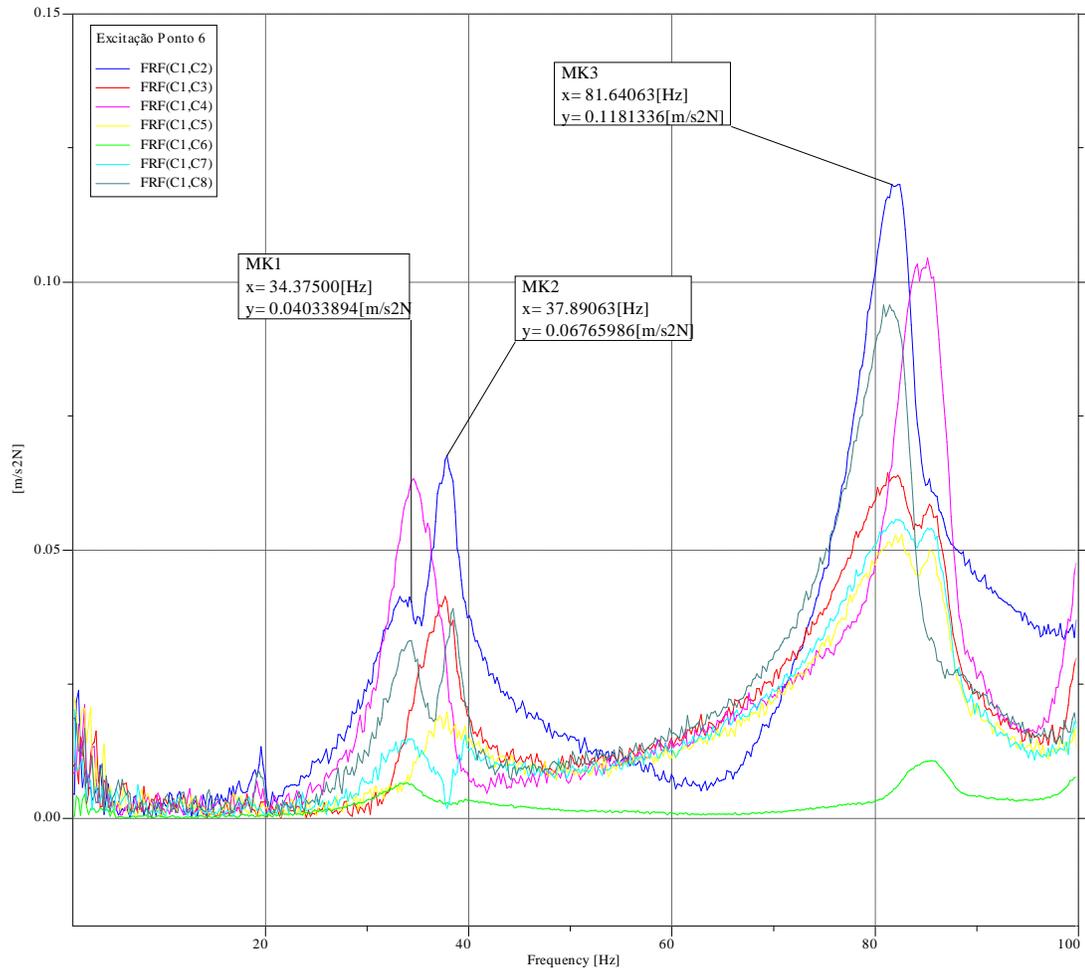


Gráfico 22. Resposta em frequência com excitação no ponto 6 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

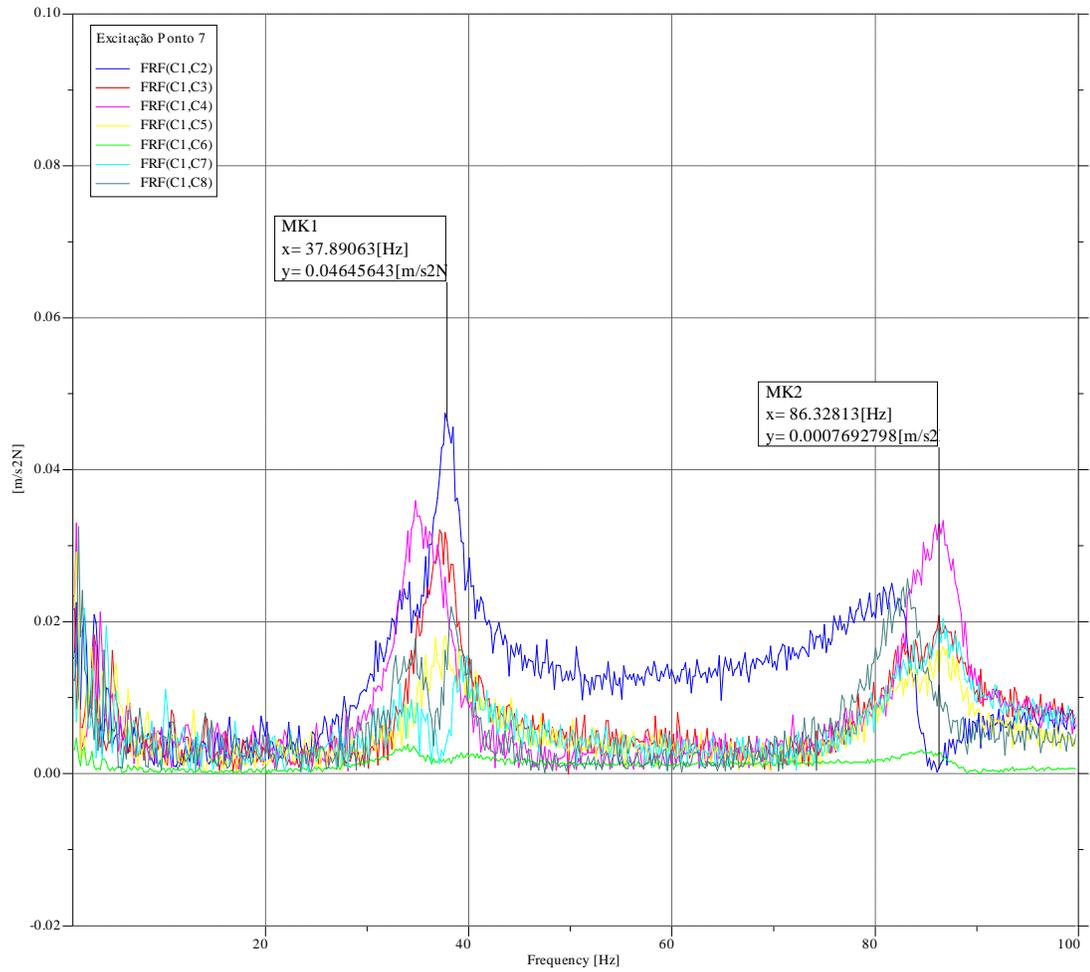


Gráfico 23. Resposta em frequência com excitação no ponto 7
com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

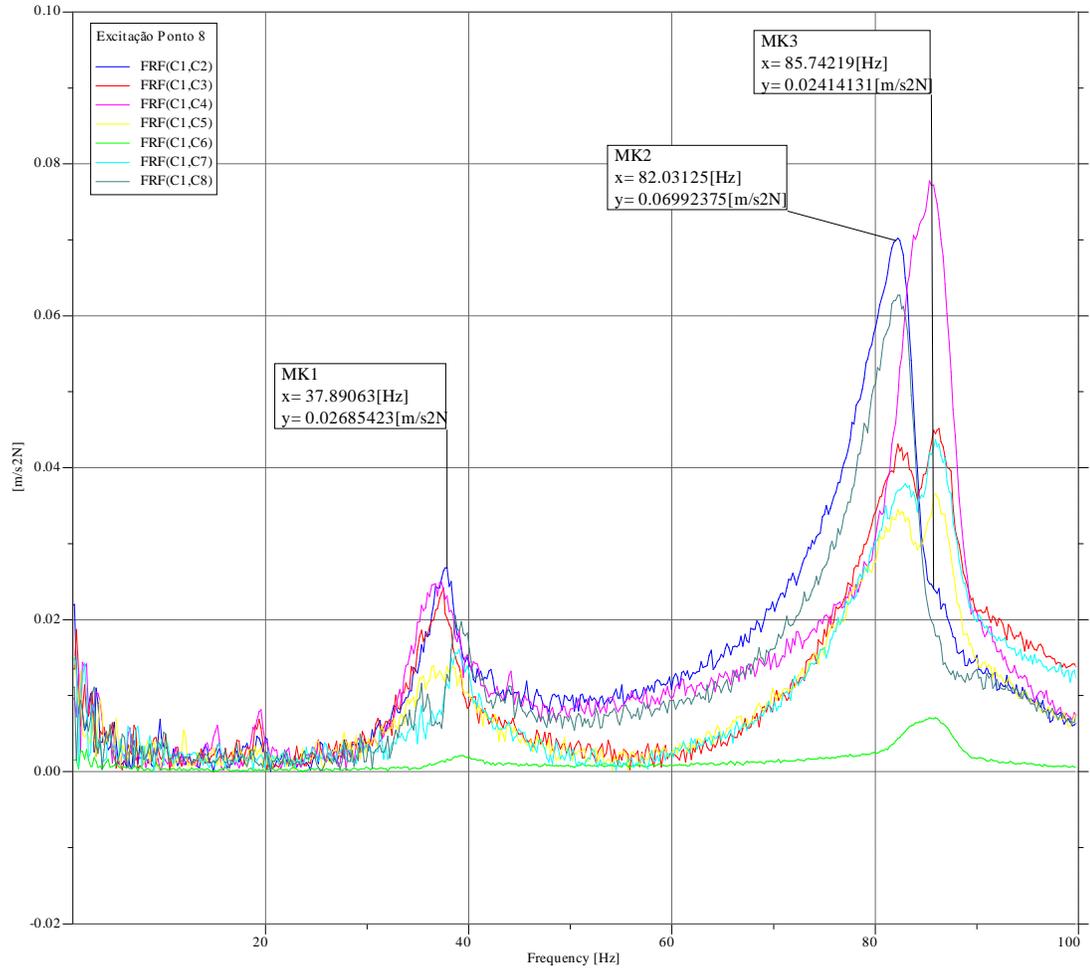


Gráfico 24. Resposta em frequência com excitação no ponto 8 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

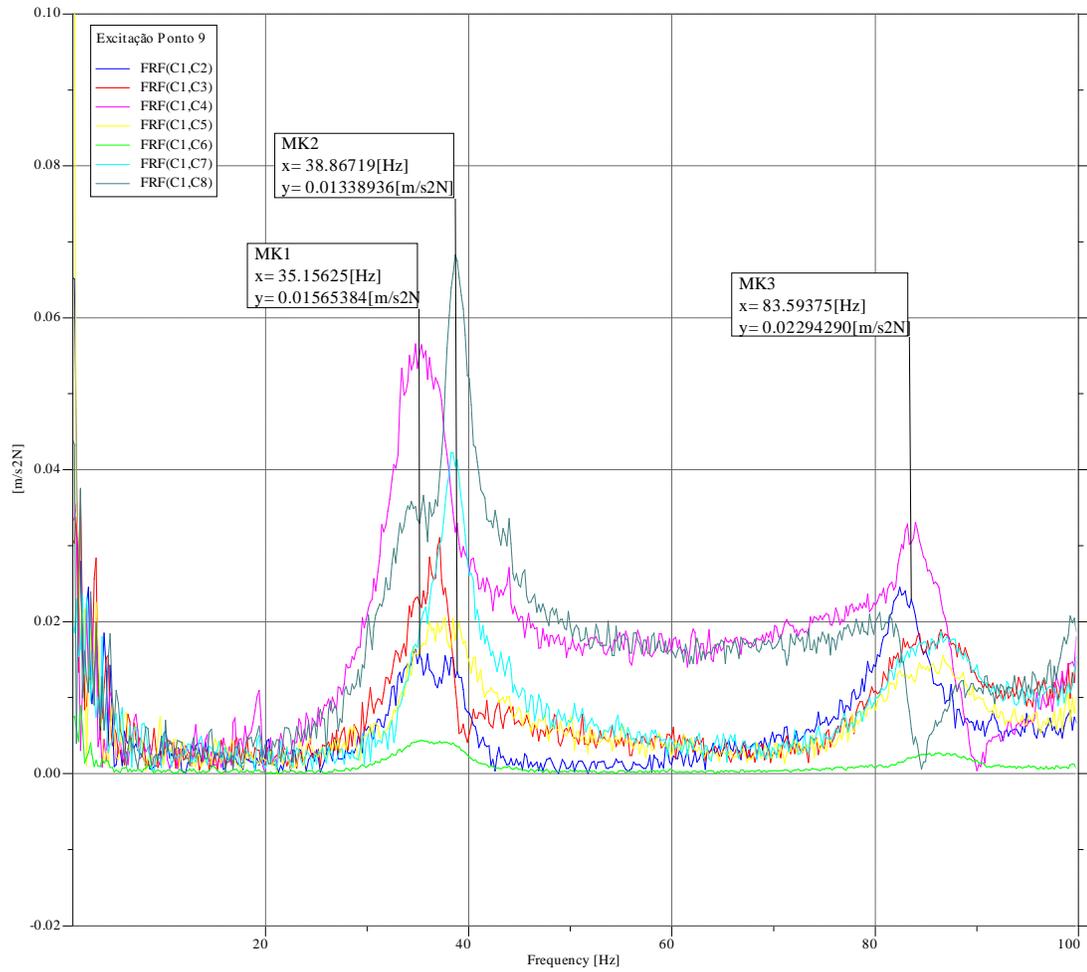


Gráfico 25. Resposta em frequência com excitação no ponto 9 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

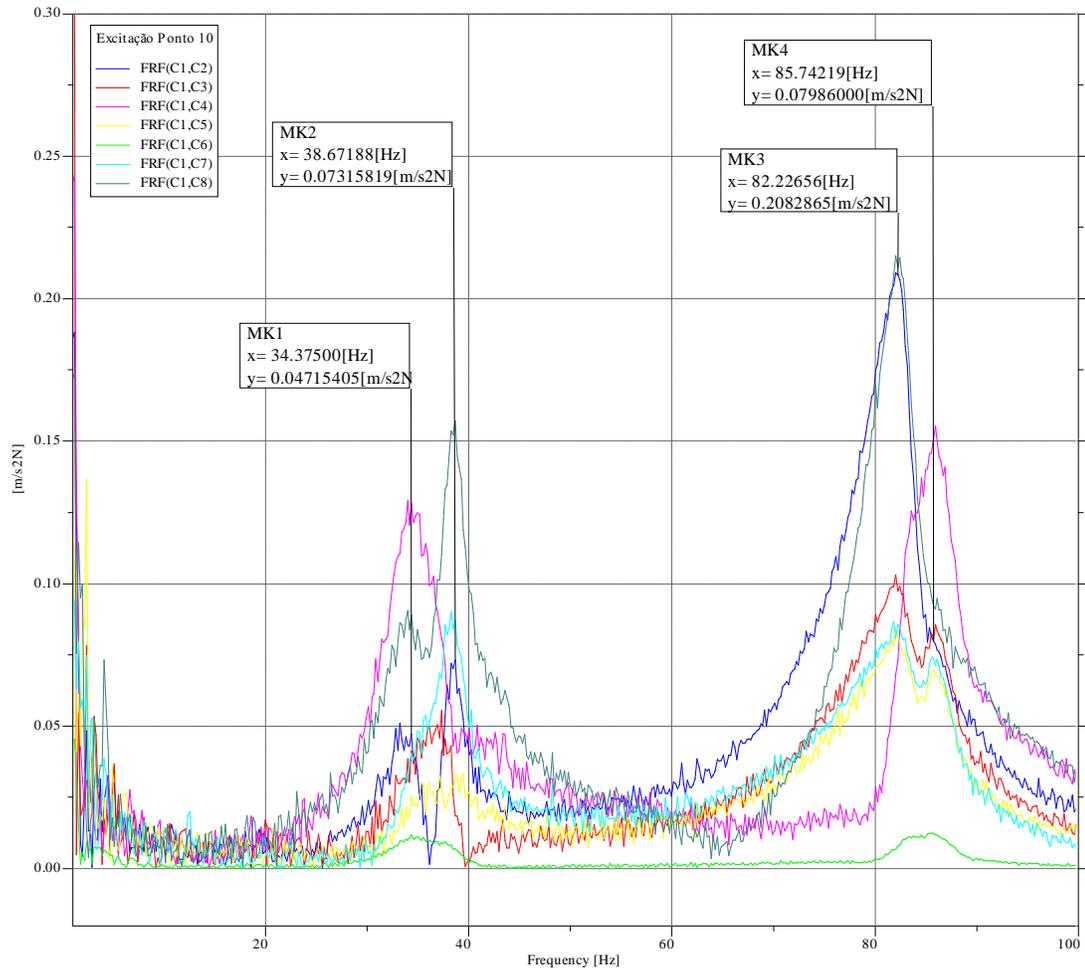


Gráfico 26. Resposta em frequência com excitação no ponto 10 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

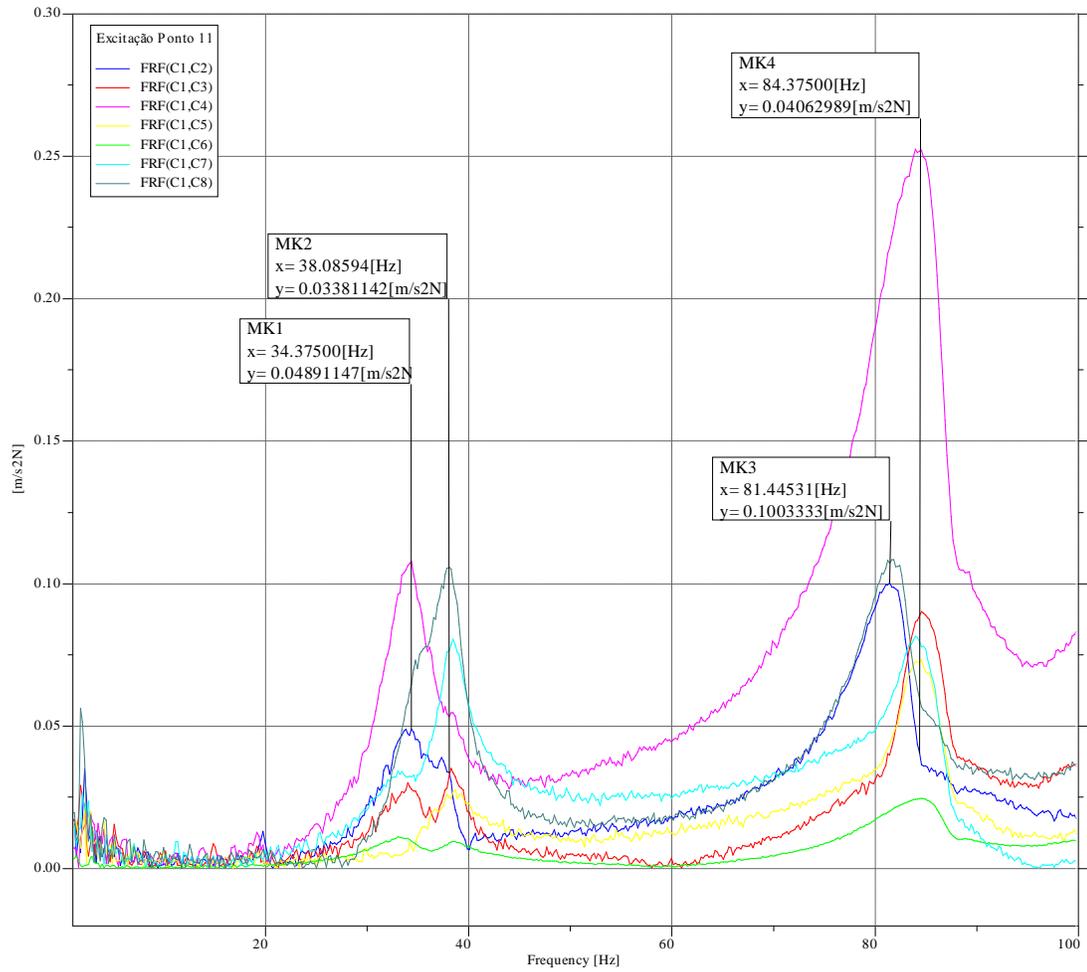


Gráfico 27. Resposta em frequência com excitação no ponto 11 com as respectivas acelerações
 Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

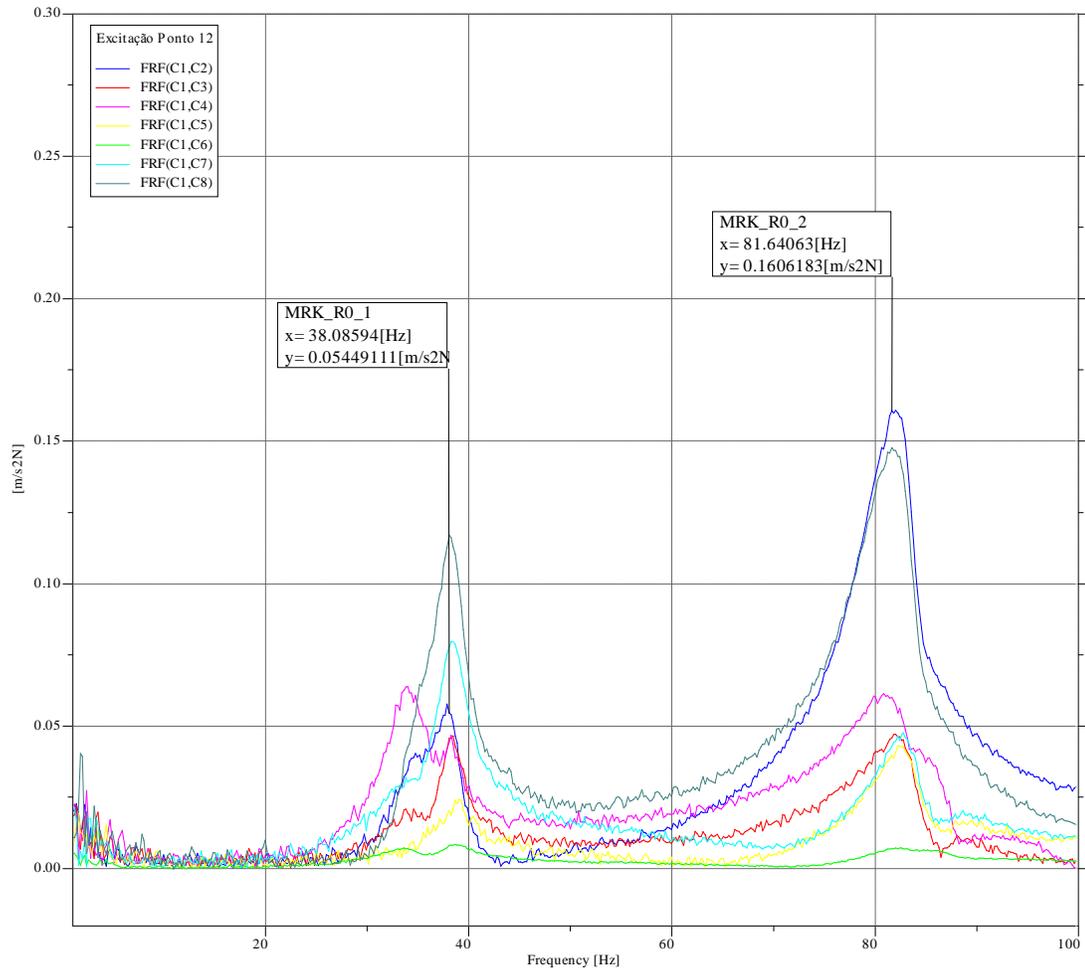


Gráfico 28. Resposta em frequência com excitação no ponto 12 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

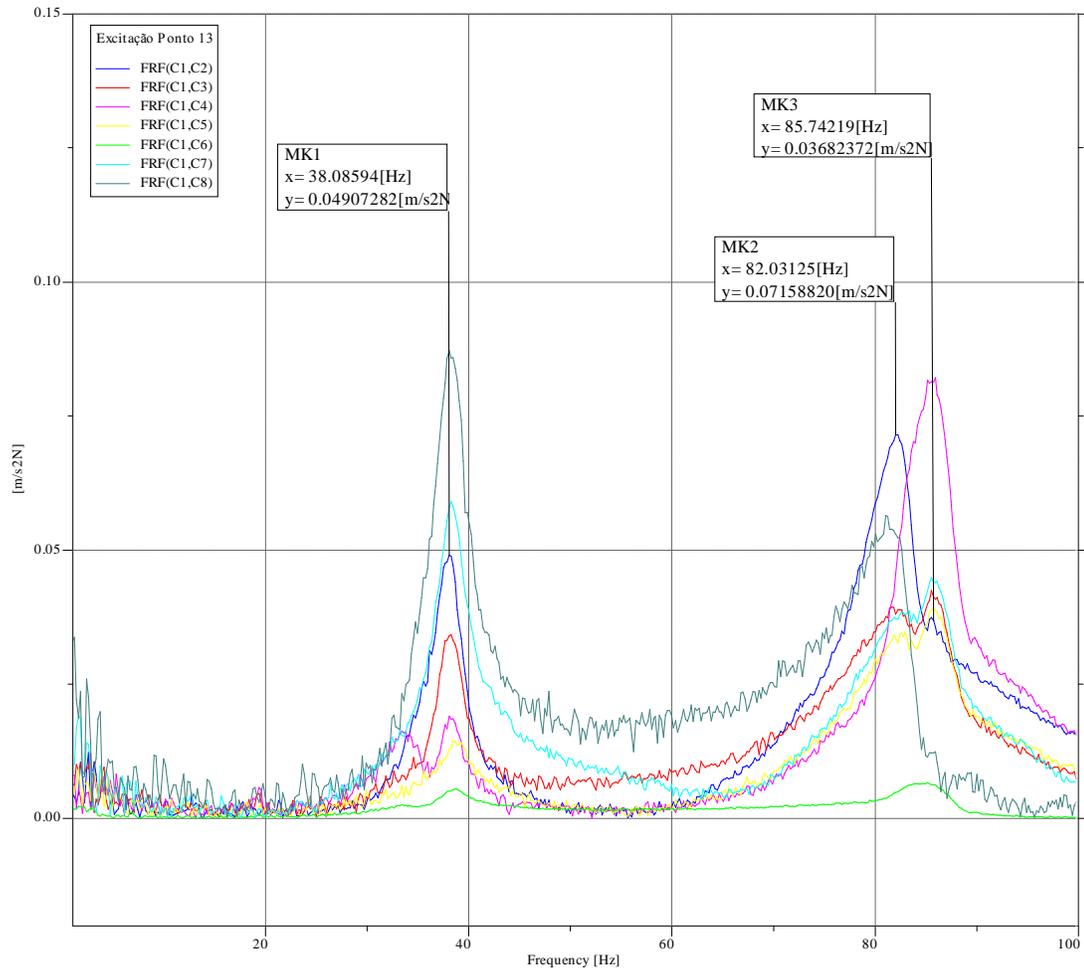


Gráfico 29. Resposta em frequência com excitação no ponto 13 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

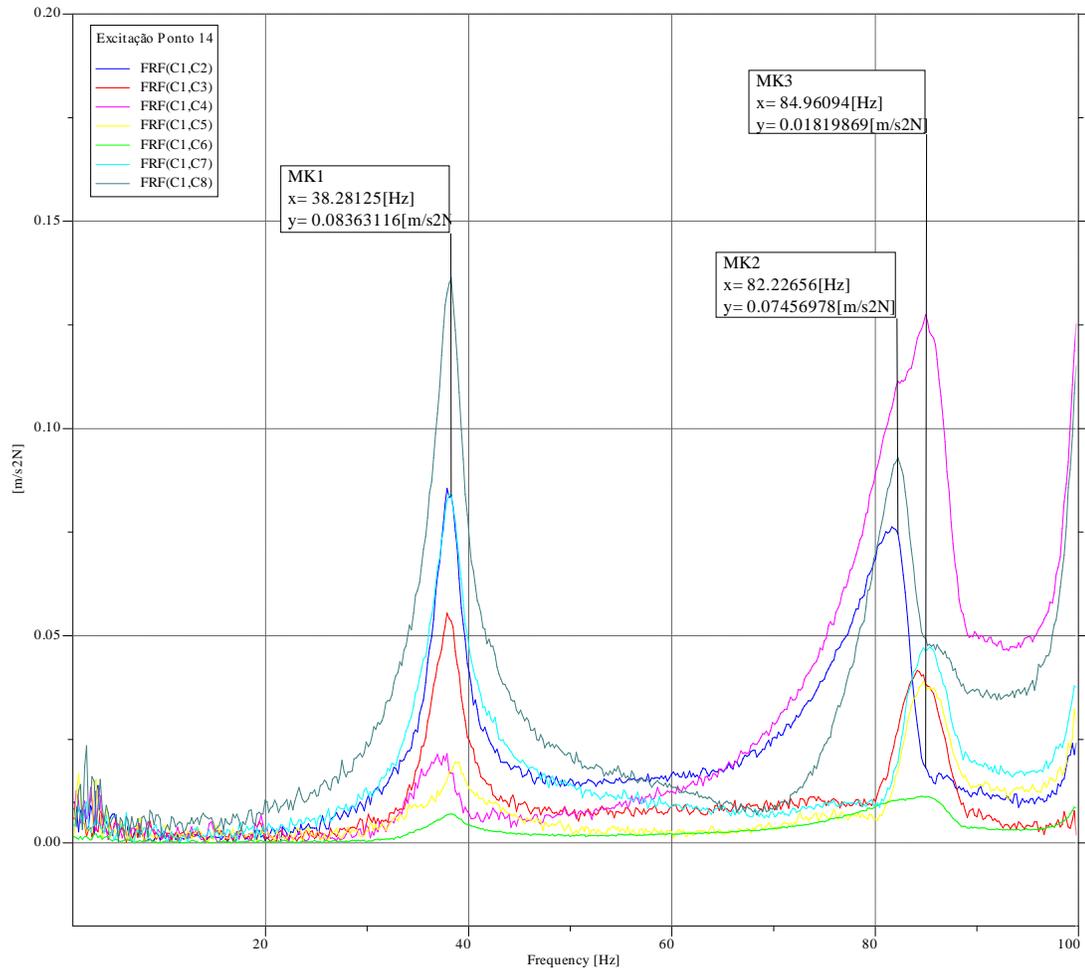


Gráfico 30. Resposta em frequência com excitação no ponto 14 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

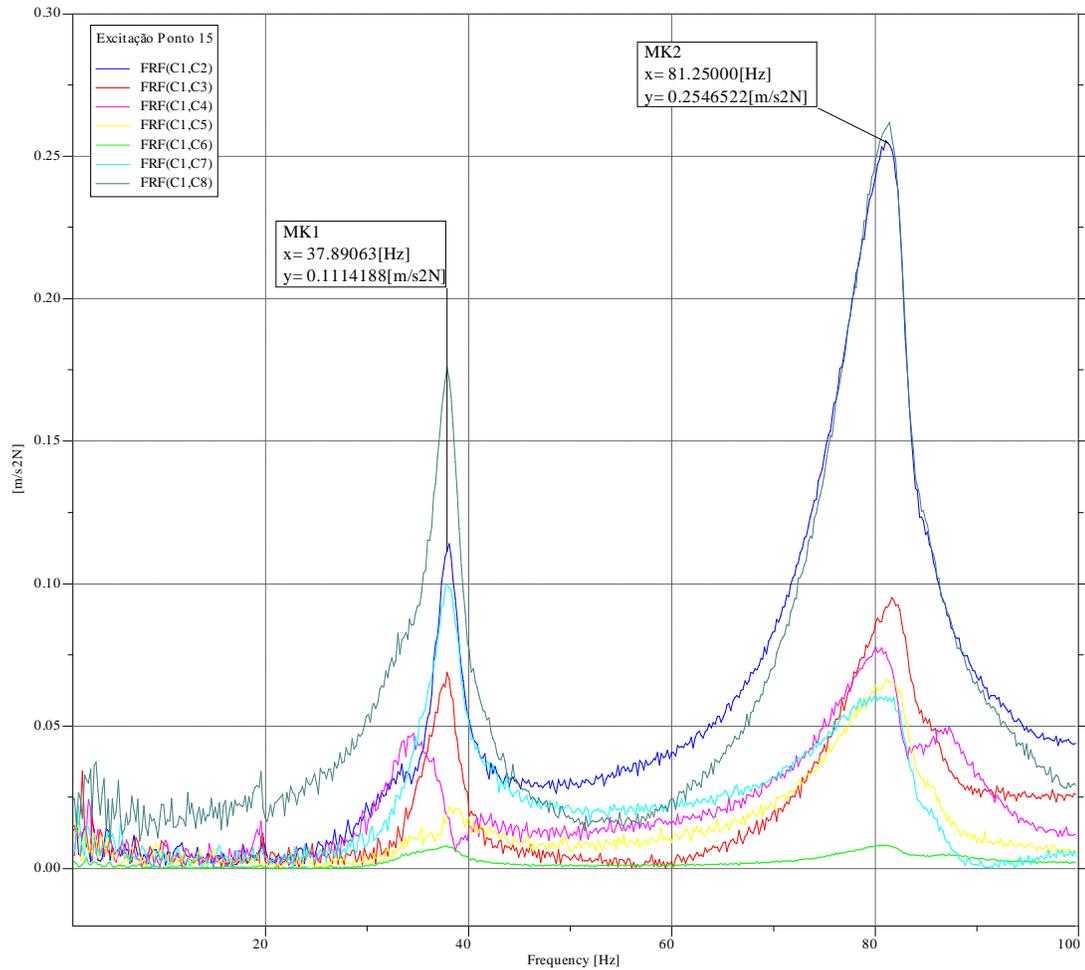


Gráfico 31. Resposta em frequência com excitação no ponto 15 com as respectivas acelerações
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

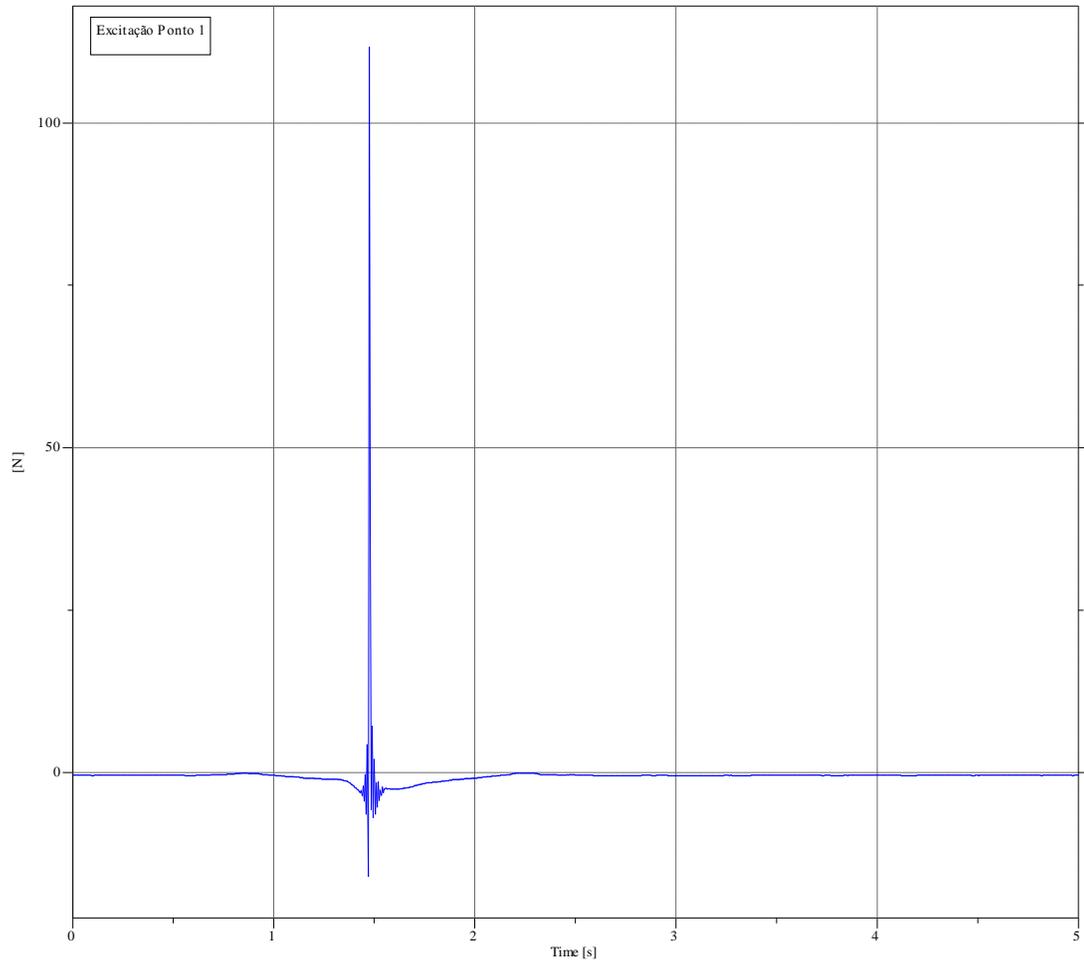


Gráfico 32. Exemplo da resposta impulsiva.
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

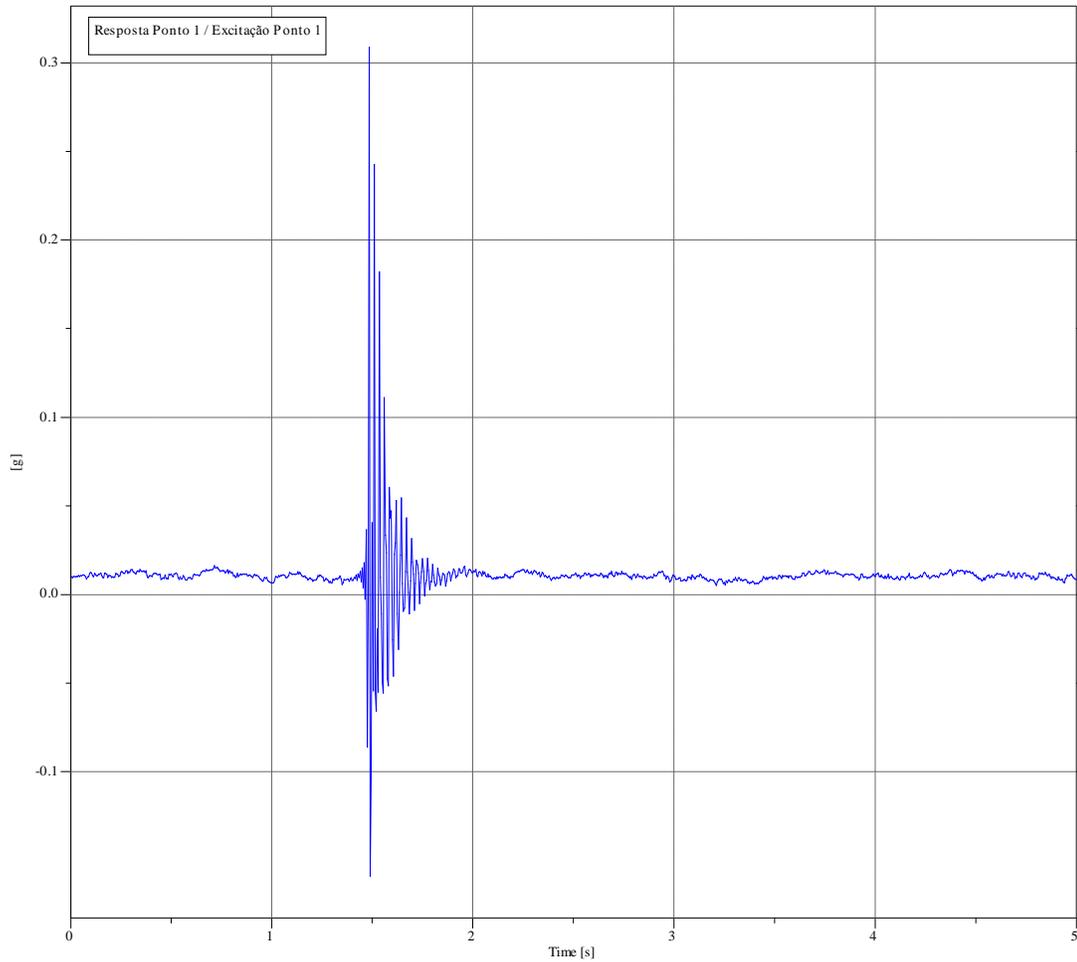


Gráfico 33. Exemplo da resposta temporal.
Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

3.5 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A ANÁLISE TRANSIENTE

A seguir, são mostrados os resultados da simulação numérica referentes à parte prática realizada com o martelo de impacto. Considerou-se para a análise dinâmica transiente, com incrementos de tempo de 0,03 segundos para o tempo de análise de 100,0 segundos, o peso do martelo é igual a 10,0 N com duração de 0,3 segundos sem amortecimento.

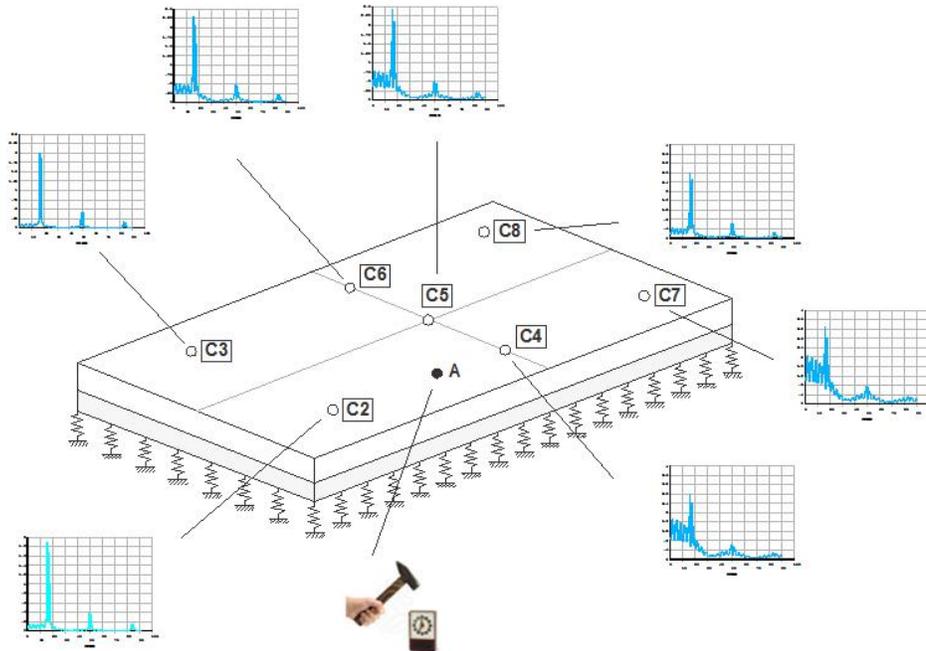


Gráfico 34. Ponto de aplicação da carga impulsiva (ponto A) e pontos de instrumentação (C2 a C8)
 Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

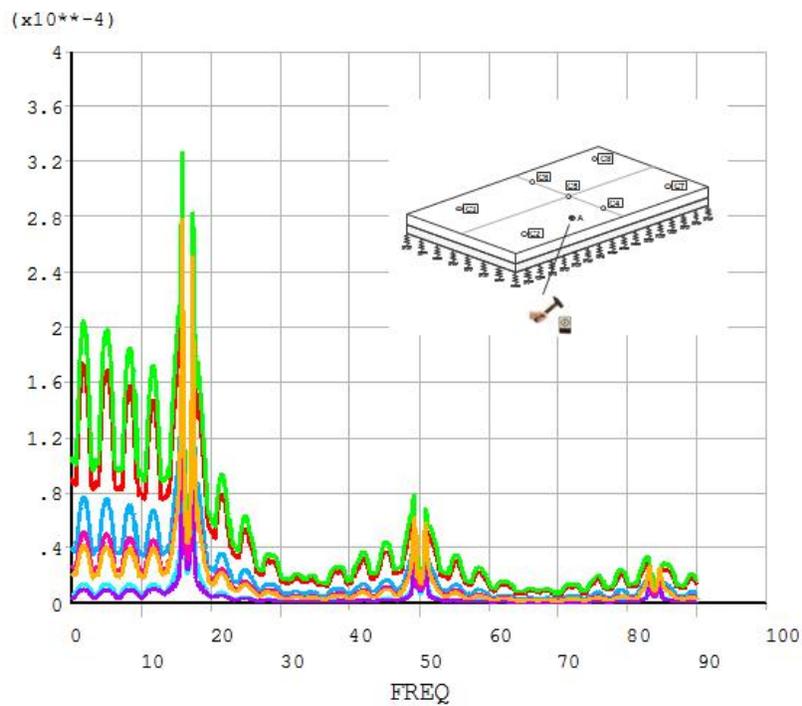


Gráfico 35. Espectro de resposta de acelerações relativas nos pontos de instrumentação (C2 a C8) para a carga impulsiva no ponto A
 Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

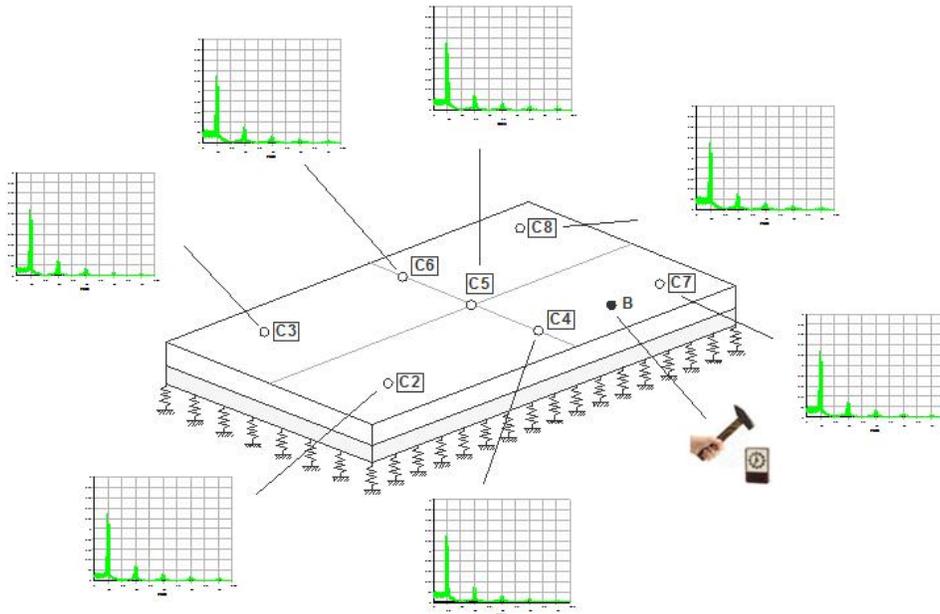


Gráfico 36. Ponto de aplicação da carga impulsiva (ponto B) e pontos de instrumentação (C2 a C8)
 Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

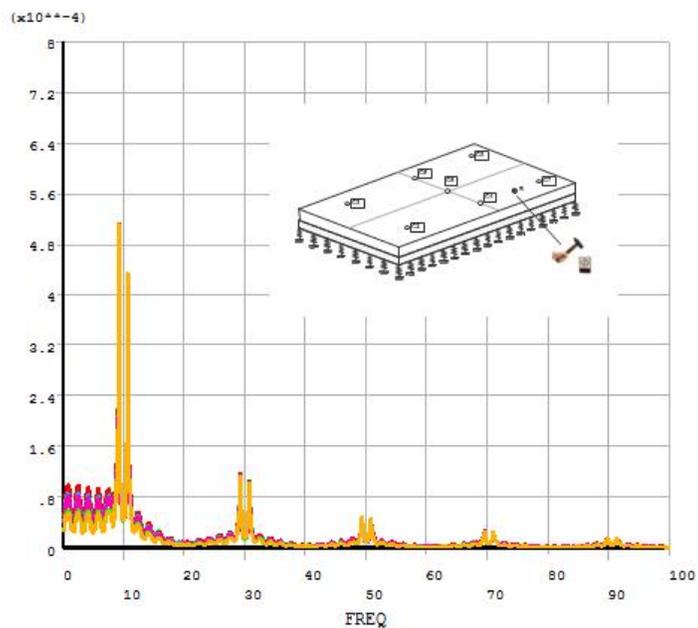


Gráfico 37. Espectro de resposta de acelerações relativas nos pontos de instrumentação (C2 a C8) para a carga impulsiva no ponto B
 Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

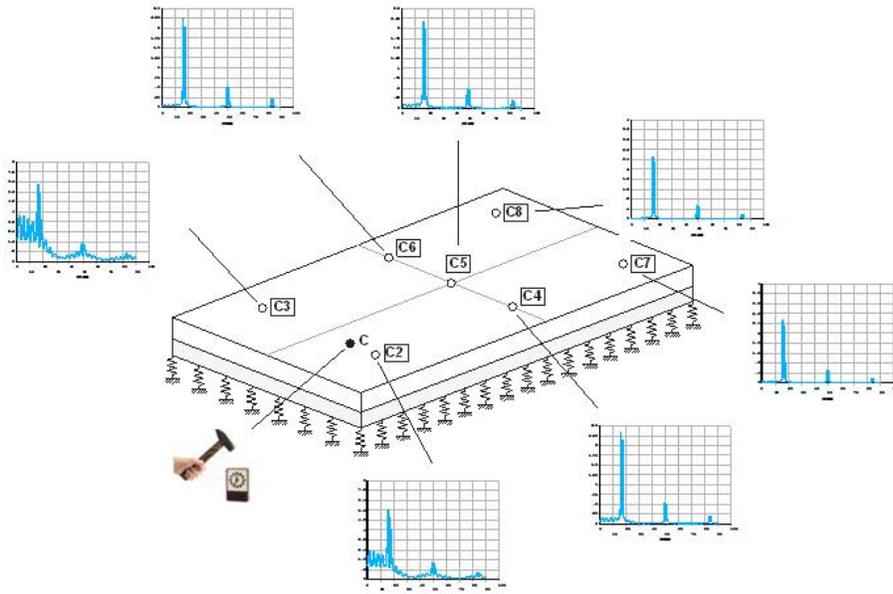


Gráfico 38. Ponto de aplicação da carga impulsiva (ponto C) e pontos de instrumentação (C2 a C8)
 Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

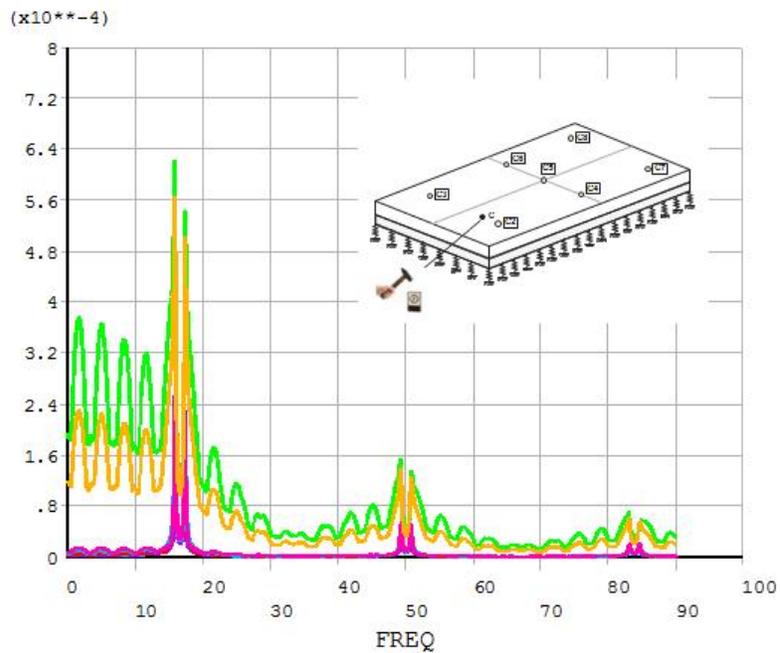


Gráfico 39. Espectro de resposta de acelerações relativas nos pontos de instrumentação (C2 a C8) para a carga impulsiva no ponto C
 Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

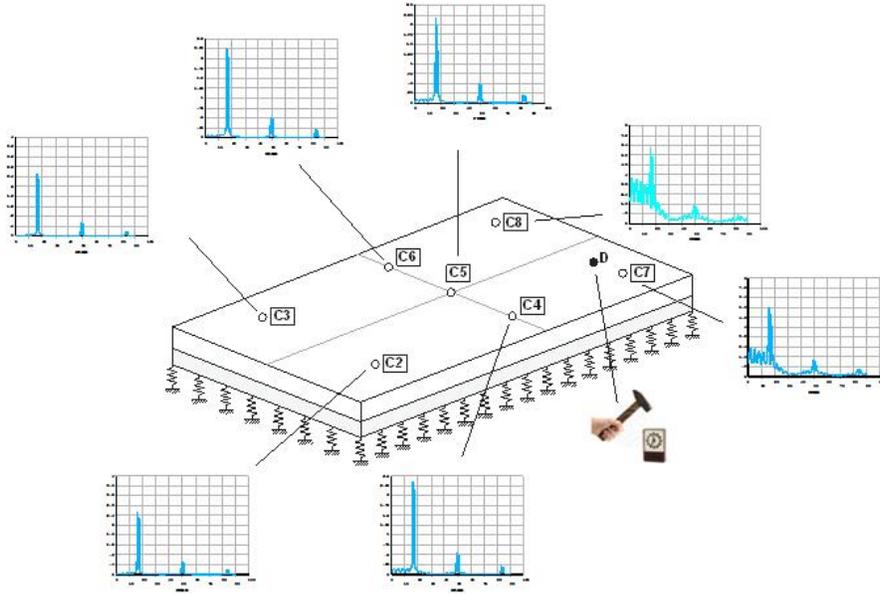


Gráfico 40. Ponto de aplicação da carga impulsiva (ponto D) e pontos de instrumentação (C2 a C8)

Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

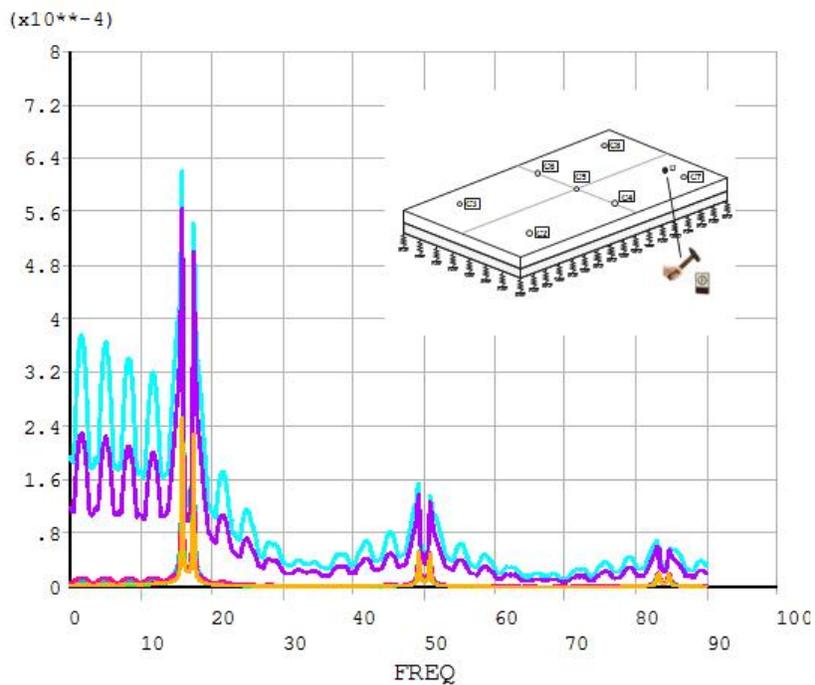


Gráfico 41. Espectro de resposta de acelerações relativas nos pontos de instrumentação (C2 a C8) para a carga impulsiva no ponto D

Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

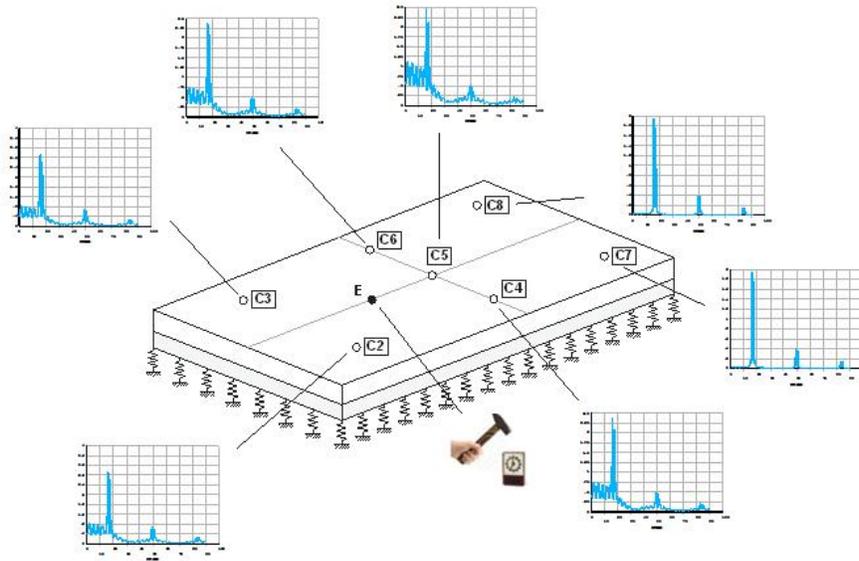


Gráfico 42. Ponto de aplicação da carga impulsiva (ponto E) e pontos de instrumentação (C2 a C8)
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

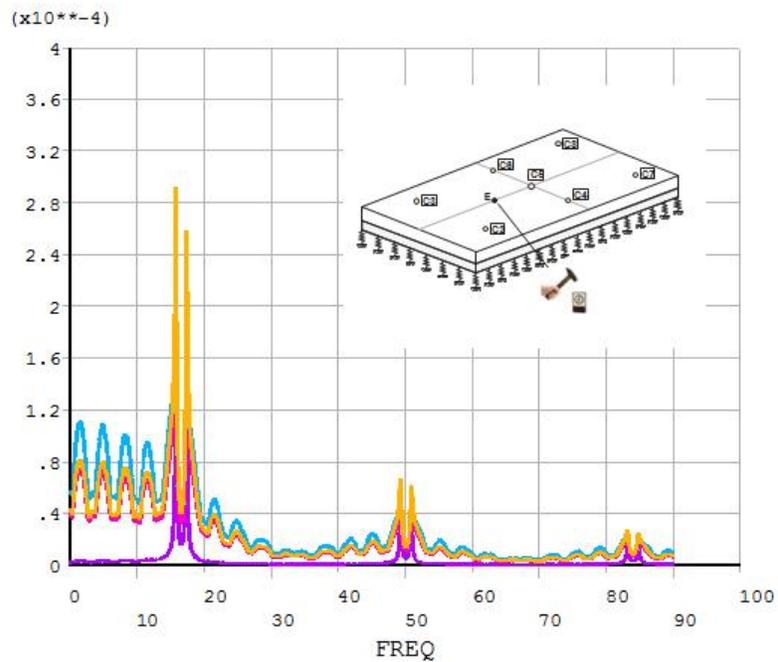


Gráfico 43. Espectro de resposta de acelerações relativas nos pontos de instrumentação (C2 a C8) para a carga impulsiva no ponto E
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

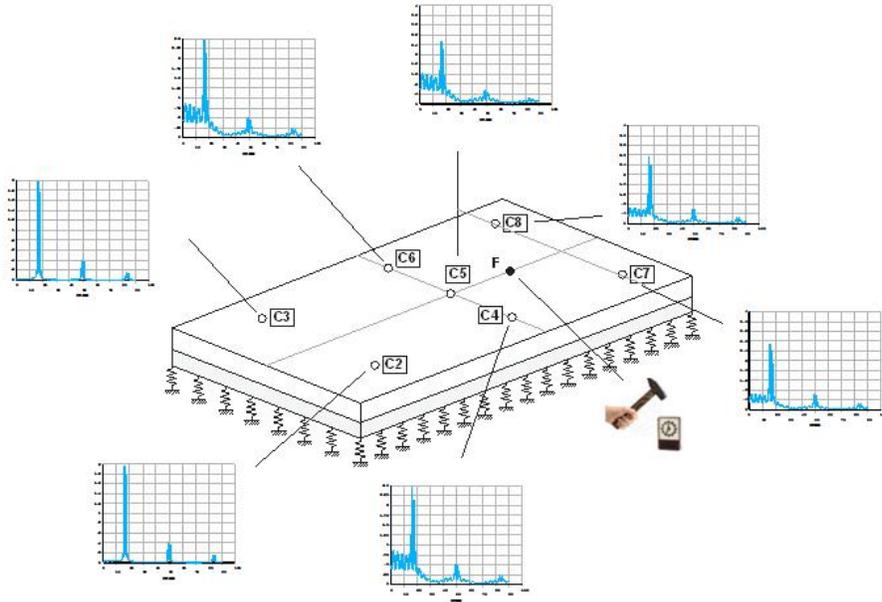


Gráfico 44. Ponto de aplicação da carga impulsiva (ponto F) e pontos de instrumentação (C2 a C8)
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

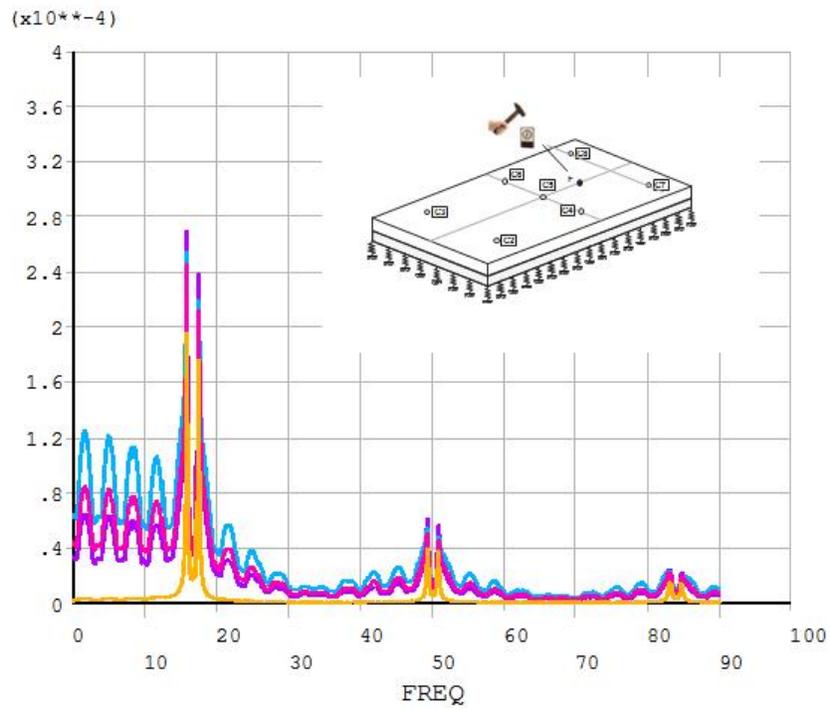


Gráfico 45. Espectro de resposta de acelerações relativas nos pontos de instrumentação (C2 a C8) para a carga impulsiva no ponto F
Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

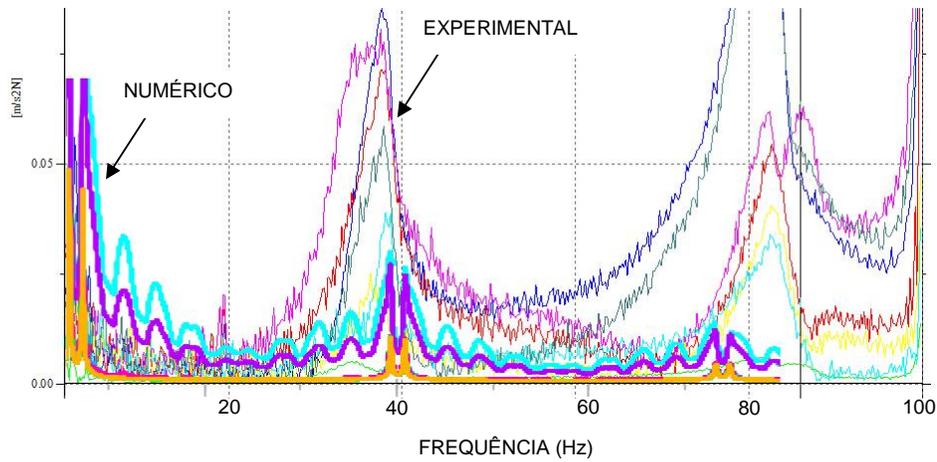


Gráfico 46. Comparação dos resultados numéricos e experimentais para o ponto de aplicação da carga impulsiva (ponto A) nos pontos de instrumentação (C2 a C8)
 Fonte: Elaborado a partir dos resultados numéricos.

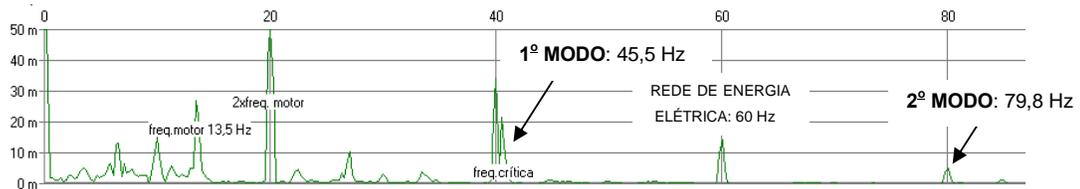


Gráfico 47. Comparação dos resultados numéricos e experimentais para o espectro de resposta do acelerômetro ADX para a frequência de excitação de 13,5 Hz.
 Fonte: Elaborado a partir dos dados experimentais.

5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados experimentais obtidos nos pontos S_1 e S_2 mostram como a placa se comporta com três frequências diferentes de passagem, do veículo, pelo pavimento. O gráfico 1 (7,0 km/h) apesar de não mostrar frequências, detalhadas, de 0,0 Hz a 10,0 Hz, pode-se perceber que a placa responde na frequência de 8,0 Hz. A maior visibilidade é dada pelos sensores TEK1 e TEK2. O gráfico 2, que mostra o comportamento interno da placa, isso foi capturado pelos sensores de embutimento, eles mostram a frequência de operação do motor, bem como, amplitudes na região dos 50,0 Hz e uma perto dos 100,0 Hz, como não apresentam multiplicidade, presume-se que seja o movimento da placa sobre a base. O gráfico 3 mostra o comportamento em função do deslocamento da placa. Apesar da resolução ser pequena, pode-se perceber a resposta do motor e uma informação entre 40,0 Hz e 60,0 Hz. O gráfico 4 (11,0 km/h), mostra a resposta dos acelerômetros, com diferentes sensibilidades, e os respectivos espectros. Nota-se o aparecimento de frequências em torno de 40,0 Hz e 80,0 Hz. A simulação numérica indicou que a placa possui deslocamento para frequências 40,0 Hz e 80,0 Hz. O gráfico 5 indica que o SG5 mostrou resposta semelhante aos acelerômetros e, como no caso dos 8,0 Hz, indica uma amplitude entre 40,0 Hz e 60,0 Hz. O gráfico 6, representa os dados dos sensores de deslocamento, que indicam uma grande amplitude próximo aos 40,0 Hz mas são transparentes à frequência de 80,0 Hz.

e uma rotação em torno do eixo y, mas isso não pode ser mensurado pelo fato da não existência de um sensor nessa situação e pelo fato do excitador não trabalhar nessa região. Mas os sensores superficiais indicaram tal comportamento com perda da sensibilidade, sacrificando, dessa maneira, as amplitudes.

Com relação ao restante do espectro, os gráficos 1, 2 e 3 por meio dos quatro sensores de aceleração, de deformação e deslocamento exibem como a placa responde a excitação de 480,0 rpm. Podemos observar o aparecimento de amplitudes que se destacam na região de 40,0 Hz e próximo dos 100,0 Hz. Isso se repete nos gráficos com carregamento cíclico de 760,0 rpm, 810,0 rpm e 842,0 rpm.

Algumas raias não significam o comportamento da placa, mas indicam o desbalanceamento do motor, suas harmônicas e a frequência de rede elétrica. Algumas não são identificadas, mas podem representar algum tipo de choque do motor com a

placa ou, da própria placa, sobre a sub-base, que, como se sabe, não é aderida e, isso, poderia causar informações desencontradas.

Os gráficos de 7 a 9 representam o comportamento da placa na frequência de 13,5 Hz. Fica mais evidente, pelas observações das amplitudes e espectro apresentados pelos sensores, que a placa apresenta uma sensibilidade nas frequências de 40,0 Hz e entre 70,0 Hz e 80 Hz.

Quando a placa é exposta à excitação de 14,2 Hz, os sensores apresentam as mesmas leituras, isso pode ser observado nos gráficos 10 a 12.

A simulação numérica realizada com uma excitação harmônica, também seguiu o mesmo critério e frequências da parte experimental. Os gráficos de 13 a 15 mostram que o maior deslocamento vertical ocorre próximo à frequência de 40,0 Hz e 80,0 Hz, visto por todos os “sensores”, exceto os sensores internos, estes não podem ser simulados. O quadro 3 facilita a visualização do comportamento da placa. Pode-se observar que a placa apresenta uma flexão por volta dos 110,0 Hz. Isso é interessante, pois os gráficos, da parte experimental, já vinham mostrando que a placa responde a essa frequência. Apesar de não representar uma possibilidade prática, pois seria o mesmo de um veículo trafegar em alta velocidade. O primeiro modo 45,5 Hz e o segundo 79,8 Hz são mais significativos.

As respostas impulsivas experimentais estão apresentadas dos gráficos 17 ao 31, eles mostram, na totalidade, que a placa tem resposta nas frequências de 40,0 Hz e 80,0 Hz, que ficaram evidentes nas análises anteriores. Os gráficos 32 e 33 são exemplos das excitações provocadas na placa durante a formação das FRFs.

A excitação simulada em EF, mostrada por meio dos gráficos 34 ao 45, indica quais frequências podem ser classificadas como críticas, que são coincidentes, com aquelas obtidas na parte experimental. As ondulações moduladas sobre o espectro são originadas pelo processo numérico e, até onde se sabe, não existe um controle sobre elas.

Os gráficos 46 e 47 são determinantes para que se possa observar a concordância entre os resultados experimentais e numéricos. Apesar dos ensaios impulsivos não se estenderem acima dos 100,0 Hz, observa-se que os primeiros modos situam-se na faixa de 40,0 Hz a 80,0 Hz.

A isenção do método numérico não evidencia a frequência de 60,0 Hz que, como dito anteriormente, origina-se da frequência da rede elétrica.

6 CONCLUSÕES

Os principais resultados oriundos da análise do estudo proposto foram:

- I. A verificação da funcionalidade da instrumentação em uma placa de pavimento, ou seja, a possibilidade da utilização de sensores internos à mesma e a obtenção, com o emprego da metodologia, de informações relevantes sobre os fenômenos físicos envolvidos no processo.
- II. O método numérico está em plena concordância com os resultados experimentais. Isso significa que é perfeitamente possível a utilização de tal procedimento para realizar análises em placas de pavimento de concreto não aderidas.
- III. Durante o processo numérico a fundação da estrutura mostrou-se sensível na produção dos resultados. Isso não pode ser verificado na parte experimental. Tendo em vista que todos os testes foram realizados em uma só placa.
- IV. A evidência experimental e numérica de que o coeficiente de fundação elástica, simulando a presença da sub-base, deve ser um parâmetro de projeto a ser considerado durante a concepção das placas de pavimento de concreto.
- V. A confirmação, através da análise do modelo matemático, das suspeitas de que as placas sofrem deformações devido à passagem dos veículos podendo excitar os modos de vibração em baixa e alta frequência levando à fadiga e, conseqüente, ruptura prematura. Como pôde ser visto nas simulações numéricas e nos testes mecânicos. A deformação, apesar de relativamente pequena conforme indicado pelos instrumentos LVDT, é capaz de gerar conjuntamente à aplicação de cargas externas, condições muito favoráveis a colapsos relacionados ao fenômeno da fadiga
- VI. Os resultados foram coerentes àqueles dos modelos matemáticos escolhidos para o problema proposto. Entretanto, as diferenças de resultados em algumas situações foram geradas pela idealização do modelo matemático perante o modelo prático.
- VII. A verificação da necessidade de um estudo complementar e de muitos outros testes utilizando a bancada construída, objetivando aumentar o banco de dados e atingir conclusões mais sólidas e abrangentes, sobre diversas questões que permanecem em aberto, entre elas, correlações entre a placa de concreto em escala reduzida e os pavimentos em tamanho real.

7 DIFICULDADES ENCONTRADAS DURANTE A VIGÊNCIA DO PERÍODO DE TESTES

As principais dificuldades encontradas no desenvolvimento do projeto foram: a demora na aquisição de todos os equipamentos necessários para os testes práticos, o considerável tempo de preparação e calibração dos equipamentos. Os últimos testes obrigaram a reavaliação das condições originalmente previstas para excitação da placa, e levaram a uma mudança na forma e procedimento.

Uma condição experimental idealizada originalmente, todavia não realizada, contemplava a excitação da placa de concreto a vibrações de baixa frequência com carregamento de eixo simples. Isso não foi possível, mas foi contornado com a excitação com motor de massas desbalanceadas.

Outras condições relevantes foram testadas. Todavia, os resultados dos experimentos foram obtidos às vésperas do vencimento de prazo de execução do projeto, impedindo uma análise mais aprofundada, rigorosa e conclusiva dos mesmos. Por esse motivo, houve comprometimento da comparação dos resultados dos modelos matemáticos com o experimento, ainda que os resultados dos modelos matemáticos estivessem prontos.

É devido a tal conjectura, que o relatório técnico-científico apresentado contém resultados experimentais selecionados, que foram apenas relacionados e devem ser analisados apropriadamente. As conclusões serão apresentadas formalmente nos trabalhos científicos produzidos em decorrência deste estudo.

Ainda é necessário ressaltar a possibilidade de que, apesar do processo meticuloso de experimentação, alguns resultados dos sensores devam sofrer correções, ou ainda, calibração. Infelizmente, não há condições de garantir categoricamente que, todos os sensores estão isentos das interferências elétricas que, certamente, introduziram algum erro nas medidas.

8 BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI manual of concrete inspection: SP- 2. 8. ed.,Detroit, 1988.

BALBO, J. T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Norma DNIT 055/2004-ME: pavimento rígido: prova estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub . base em projeto de avaliação de pavimentos: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2004.

CERVO, C. T. *Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento portland para pavimentação*. 2006. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2006.

CHOUBANE, B.; TIA, M. Analysis and verification of thermal-gradient effects on pavement. *Journal of Transportation Engineering*, New York, v.121, n.1, jan./feb., 1995.

MAVI, Máquinas vibratórias. Disponível em http://www.mavi.com.br/produto.php?produto_id=1, acesso em maio de 2012.

MAHBOUB, K. C.; LIU, Y.; ALLEN, D. L. Evaluation of temperature responses in concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering*, New York, v.130, n.3, p. 395-401, may/jun., 2004.

MEDINA, J. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1997.

OLIVEIRA, P. L. *Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto*. 2000. 218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2000.

PAPALLARDO, A. J.; BANDEIRA, A.; PRISZKULNIK, S. Comportamento à flexão de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro (GFRP). In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, São Paulo. *Anais*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

PEREIRA, D. S. *Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre placa de concreto e base cimentada ou asfáltico*. 2003. 299f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PITTA, M. R. *Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84*. São Paulo: ABCP, 1998. Publicação ET-97.

RAIA, F. *Estudo dos efeitos da temperatura em pavimento de concreto instrumentado*. 2010. 285f. Tese (Doutorado em Tecnologia de reatores – Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RODOLFO, M. P. *Análise de tensões em pavimentos de concreto com base cimentada e sujeitos a gradientes térmicos*. 2001. 203f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SÃO PAULO (SP). Secretaria de Infra- estrutura. *Instruções de projeto*. 2002. Disponível em:
<http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/infraestruturaurbana/pavimentacao_comunitaria/normas/0001>. Acesso em: 20 mai. 2010.

SARGAND, S. M.; KHOURY, I. S. Sensor installation in rigid pavement. *Experimental Techniques*, v. 23, n.3, may/jun. 1999.

SEVERI, A. A.; BALBO, J. T. Gradientes térmicos em pavimentos de concreto nas condições de clima tropical. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2001, Campinas. *Panorama Nacional da Pesquisa em Transporte*. Rio de Janeiro: J. R. A Setti/O. F. Lima Júnior, 2001. v. 1, p.299-308.

SOUZA, L.M . *Pavimentação rodoviária*. 2 ed., Rio de Janeiro: LTC/DNER- Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 1980. v.1.

_____. A Problemática do Dimensionamento De Pavimentos, Relatório Parcial do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, setor de Pesquisa e Planejamento, Rio de Janeiro, 1972.

VEDACIT. *Resina base epóxi para pisos e revestimentos*. COMPOUND S 200. Disponível em: <http://www.vedacit.com.br/>. Acesso em 15 mai. 2010.

WESTERGAARD, H. M. Stress in concrete pavements computed by theoretical analysis. *Public Roads*, Washington, DC, v. 7, n. 2, p.25-35, 1926.