

## Platform for dynamic tests: preliminary studies, design and construction

## Plataforma de ensaios dinâmicos: estudos preliminares, projeto e construção



J. E. CAMPUZANO <sup>a</sup>  
georc2003@yahoo.es

R. DE CASTRO <sup>b</sup>  
djyopa@gmail.com

S. ÁVILA <sup>c</sup>  
avilas@unb.br

G. DOZ <sup>d</sup>  
graciela@unb.br

### Abstract

This paper is about the design and construction of a platform for dynamic tests especially with people jumping, walking, etc. Initially it was tried to find out projects already implemented in platforms and dynamic tests and to study the loads produced by movement of people on slabs and the structural response to these loads. The limits established by different standards have been also studied for these dynamic responses, taking into account the ultimate limit state, as well as the structure in service, since the human body is very sensitive to structural vibrations. Parametric studies were performed considering various configurations of slabs (different spans, thicknesses and conditions of support) have been done, looking for a configuration that could have natural frequency close to the frequencies of the human loads. The slab should have dimensions compatible with the available physical space, fundamental frequency below 5 Hz and maximum immediate deflection compatible with the indications of the Brazilian standard NBR6118: 2007. Based on these criteria was chosen a rectangular structure consists of a solid reinforced concrete rectangular slab studded in two opposite edges of steel beams with shear connectors type U. The other two edges are free. The steel beams supporting the slab, in turn, are supported on eight metal profiles (two in each corner of the slab) that are supported on two to two short columns of steel profile H. Profiles U in steel are welded to four columns, forming a horizontal frame. Numerical analysis of the dynamic test platform have been performed for free and forced vibration, for obtaining the natural frequencies and corresponding vibration modes, considering the self-weight of the structure and the load that simulates people's weight. After obtaining a structural configuration that fulfilled the stipulated requirements, the design of the slab taking into account the recommendations of the Brazilian standard NBR6118: 2007. The platform was built and has been done a preliminary experimental study to obtain the first natural frequencies.

**Keywords:** dynamic tests, natural frequency, slabs, induced vibrations.

### Resumo

Este trabalho trata do projeto e construção de uma plataforma para a realização de ensaios dinâmicos especialmente com pessoas pulando, caminhando, etc. Procurou-se inicialmente localizar projetos já executados de plataformas de ensaios dinâmicos e estudar os carregamentos produzidos pelo movimento de pessoas em lajes e a resposta das estruturas a esses carregamentos. Foram estudados também os limites estabelecidos por diferentes normas para essas respostas dinâmicas, tendo em vista tanto o estado limite último como a estrutura em serviço, já que o corpo humano é bastante sensível às vibrações estruturais. Realizaram-se estudos paramétricos considerando várias configurações de lajes (diferentes vãos, espessuras e condições de apoio), buscando uma configuração que possuísse frequência natural próxima das frequências dos carregamentos humanos. A laje deveria ter dimensões apropriadas ao espaço físico disponível, frequência fundamental inferior a 5 Hz e flecha máxima instantânea compatível com as indicações da norma brasileira NBR6118:2007. Com base em esses critérios foi escolhida uma laje retangular maciça de concreto armado engastada em duas bordas opostas em vigas metálicas com conectores de cisalhamento tipo U. As outras duas bordas são livres. As vigas metálicas de apoio da laje, por sua vez, apóiam-se sobre 8 perfis metálicos (dois em cada canto da laje) que se apóiam dois a dois sobre colunas curtas de aço de perfil H. Perfis U de aço são soldados às quatro colunas, formando um quadro horizontal. Foram realizadas análises numéricas da plataforma de ensaios dinâmicos em vibração livre e forçada para obter as frequências naturais e os modos de vibração correspondentes, considerando o peso próprio da estrutura e o carregamento que simula o peso das pessoas. Obtida uma configuração de estrutura que cumprisse com os requisitos estipulados, foi feito o dimensionamento da laje levando-se em conta as recomendações da norma brasileira NBR6118:2007. A plataforma foi construída e já foi feito um estudo preliminar experimental para obtenção das primeiras frequências naturais.

**Palavras-chave:** ensaios dinâmicos, frequência natural, lajes, vibrações induzidas.

<sup>a</sup> Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, georc2003@yahoo.es, Brasília DF, Brasil.

<sup>b</sup> Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, djyopa@gmail.com, Brasília DF, Brasil.

<sup>c</sup> Universidade de Brasília, Faculdade do Gama, avilas@unb.br, Brasília DF, Brasil.

<sup>d</sup> Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, graciela@unb.br, Brasília DF, Brasil.

## 1. Introdução

O estudo de vibrações induzidas em lajes têm se intensificado nos últimos anos. São muitas as causas que levaram a esta realidade e, entre as mais importantes, podem ser mencionadas a utilização cada vez maior de materiais mais resistentes que permitem lajes mais esbeltas e flexíveis e a utilização das estruturas para atividades que não haviam sido previstas inicialmente nos projetos originais. Estes fatores têm contribuído cada vez com maior frequência, para o surgimento de problemas de vibrações nas estruturas e, em particular, nas lajes.

Estruturas flexíveis são, em geral, mais suscetíveis aos efeitos de carregamentos dinâmicos. Um fator preponderante é a baixa frequência natural apresentada por esse tipo de estrutura, que responde de forma amplificada a carregamentos dinâmicos que apresentem frequência próxima à frequência da estrutura. Entre os carregamentos dinâmicos de baixa frequência de atuação que são comuns em lajes podem-se citar os carregamentos gerados por atividades humanas, como caminhar, dançar, pular, etc.

Nesse sentido, podem se mencionar vários relatos de estruturas que apresentaram problemas relacionados à resposta a carregamentos dinâmicos originados por movimentos de pessoas, entre eles os estádios Maracanã (RJ), Nilson-Nelson (DF), Mangueirão (PA), a Igreja Universal do Reino de Deus (RJ) e a passarela Millennium Footbridge (Londres, Inglaterra). (Faisca, [1])

A passarela Millennium Footbridge, localizada em Londres, foi interdita menos de uma hora depois de sua abertura devido à apresentação de fortes vibrações laterais. As passarelas suspensas do hotel Hyatt Regency em Kansas City/EUA apresentaram vibrações excessivas durante um campeonato de dança que culminou com o colapso da estrutura e causou a morte de 114 pessoas e ferimentos em outras 200. (Ramroth, [2]).

Thornton *et al.*, [3] *apud* Ritchey e Kenneth, [4], estudaram dois casos de edificações, um edifício utilizado como escola de segundo grau, e o outro como faculdade, ambos com grandes vãos e espaços, e contendo salas para realização de atividades físicas, nos quais foram percebidas vibrações excessivas, causando desconforto aos usuários.

Webster e Vaicaitis, [5], *apud* Ritchey e Kenneth, [4], pesquisaram as fortes vibrações presentes em um sistema de laje mista de um edifício da cidade de New York, produzidas por pessoas que dançavam perto de um restaurante, provocando temor aos ocupantes do restaurante durante o jantar. Estas vibrações produziram acelerações na laje de até 7m/s<sup>2</sup> e deslocamentos de 3,3 mm.

Battista e Varela [6], constataram problemas de vibrações excessivas em pisos de edificações residenciais, mesmo quando os mesmos obedeciam aos critérios de normas de projeto estrutural. Em casos de estruturas como as mencionadas se torna necessário um estudo aprofundado das vibrações induzidas pelas atividades que as pessoas desenvolvem, pois essas oscilações podem causar problemas de desconforto e danos à saúde, e em casos extremos podem colocar em risco a segurança da estrutura. É importante ainda mencionar que a caracterização desse tipo de carregamento ainda não é consenso entre os pesquisadores da área e deve-se estudar, entre outros aspectos, o efeito de multidão, as vibrações laterais, etc.

Por outro lado, para a elaboração de um modelo teórico confiável para a análise, projeto e verificação de lajes de edifícios sob ação

de cargas dinâmicas induzidas por pessoas, é importante que esse modelo seja validado por meio de correlações teórico-experimentais das respostas dinâmicas da estrutura. Daí a importância de poder realizar ensaios experimentais em lajes submetidas a carregamentos dinâmicos.

Com base no exposto, é estudado numericamente o comportamento dinâmico de algumas configurações de lajes submetidas a carregamentos induzidos pelo homem, com vistas à construção de uma plataforma de ensaios dinâmicos. As estruturas são modeladas utilizando um pacote computacional de elementos finitos, (ANSYS 2007, [7]) que permite a realização das análises modais e transientes, fornecendo como resultados imagens, animações, históricos de deslocamentos, velocidades e acelerações nodais, assim como gráficos da amplitude do deslocamento em função da frequência e os momentos solicitantes utilizados para o dimensionamento da estrutura.

Com esses elementos é feito o dimensionamento de uma laje que será utilizada como plataforma de ensaio para simular diferentes situações de carregamentos humanos, permitindo desse modo, tanto a caracterização numérica dos carregamentos induzidos por pessoas em movimento como a avaliação da resposta estrutural.

### 1.1 Considerações sobre o carregamento induzido

As vibrações provocadas por atividades humanas podem ocorrer tanto na direção vertical como na horizontal (lateral e longitudinal), motivadas pelas componentes vertical e horizontal da força exercida pelas pessoas (Bachman, [8]). Esta força em geral pode ser considerada como periódica (CEB, [9]) e pode ser representada por meio de uma parcela estática representativa do peso da pessoa e de uma série de Fourier, na qual o primeiro harmônico apresenta uma frequência variável entre 1,8 e 3,5 Hz segundo a atividade realizada (frequência de passo). Já os harmônicos seguintes se caracterizam por frequências múltiplas dessa primeira frequência.

De acordo com Bachmann e Ammann [10], uma pessoa pulando origina uma força vertical que pode ser escrita como:

$$F_p(t) = \begin{cases} K_p * G * \sin(\pi * t / t_p), & \text{para } t \leq t_p \\ 0, & \text{para } t_p < t \leq T_p \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

$K_p = F_{p,max} / G$ : Fator de impacto dinâmico.

$F_{p,max}$ : Carga dinâmica de pico.

G: Peso do indivíduo (geralmente considerado G=800N)

$t_p$ : Duração do contato.

$T_p = 1/f_s$ : Período do carregamento.

O carregamento, e conseqüentemente as vibrações, na direção lateral, são causados pelo movimento do corpo da pessoa nesta direção. Geralmente, as funções de carregamento horizontal lateral e horizontal longitudinal, advindas da ação de caminhar, correr, dançar, etc. também podem ser modeladas da mesma forma, escolhendo-se os coeficientes de Fourier apropriados. Estas vibrações laterais merecem atenção especial já que foram responsáveis, por exemplo, pelos problemas ocorridos na inauguração

da Passarela Millenium, em Londres. De acordo com Dallard *et al*, [11], as pessoas são menos estáveis lateralmente que verticalmente, e por isso mais sensíveis ao movimento lateral, o que as leva a modificarem as características do movimento quando experimentam vibrações laterais, procurando "sintonizar" seus movimentos com os da estrutura e provocando, desse modo, o aumento da amplitude da vibração. Este problema é conhecido como efeito *lock-in*.

Como já mencionado, outro aspecto de grande importância na análise das vibrações induzidas numa estrutura está relacionado com o número de pessoas em atividade. Isto se deve ao fato de que quando um grupo de pessoas se movimenta de forma sincronizada ou aproximadamente sincronizada, o fator de impacto produzido é elevado, o que gera grandes valores para as cargas induzidas na estrutura. Os experimentos realizados por Allen em 1985 (Gomes, [12]) indicam que os fatores de impacto podem ser superiores a 5, quando o número de pessoas aumenta.

A descrição matemática rigorosa da força exercida por vários pedestres é bastante complexa. Com efeito, quando mais de uma pessoa efetua movimentos em uma estrutura ocorre a superposição dos efeitos de cada uma sobre a estrutura, de modo que, em determinados instantes, as amplitudes de vibração serão adicionadas ou subtraídas, dependendo da frequência ou fase. Daí a importância de se aprofundar o estudo, com base em resultados experimentais, da caracterização do carregamento induzido por pessoas em movimento.

## 2. Ferramenta computacional

Neste trabalho são analisadas numericamente diferentes lajes

com vistas ao projeto da plataforma de ensaios dinâmicos, já mencionada. A discretização das diferentes estruturas analisadas é feita utilizando o programa computacional (ANSYS 2007,[7]).

São utilizados os tipos de elementos que melhor simulam o comportamento de cada componente estrutural modelado, neste caso os elementos SHELL63, BEAM4, SOLID65 e SOLID45 (ver Figura 1). O elemento SHELL63 possui seis graus de liberdade em cada um de seus quatro nós, translação em X, Y e Z e rotação em torno dos mesmos; é indicado para simular o comportamento de membranas e aceita carregamentos em seu próprio plano e ortogonal a ele.

Já o BEAM4 possui seis graus de liberdade em cada um de seus dois nós (I e J), translação em X, Y e Z e rotação em torno dos mesmos. É um elemento uniaxial apto a modelar tração, compressão, torção e flexão. O elemento SOLID65 possui oito nós, cada um com três graus de liberdade, sendo eles translações segundo os eixos X, Y e Z. É capaz de simular o comportamento de materiais como o concreto, ou seja, que podem fissurar quando submetidos a esforços de tração e sofrer esmagamento na compressão. As armaduras podem ser incluídas e resistem apenas a esforços axiais. É possível considerar a não linearidade dos materiais. Esse elemento foi utilizado na discretização da laje de concreto e dos quatro pilares para os modelos mais sofisticados.

Por fim, o elemento SOLID45 foi utilizado para simular o comportamento dos perfis metálicos. Da mesma forma que o SOLID65, o SOLID45 também possui oito nós, sendo cada nó com três graus de liberdade, referentes às translações segundo X, Y e Z. O SOLID45 também permite considerar a plasticidade, bem como a ortotropia do material.

Como já mencionado inicialmente, são realizadas as análises modais utilizando o pacote computacional para várias configurações

Figura 1 – Tipos de elementos utilizados nos modelos de (ANSYS 2007, (7))

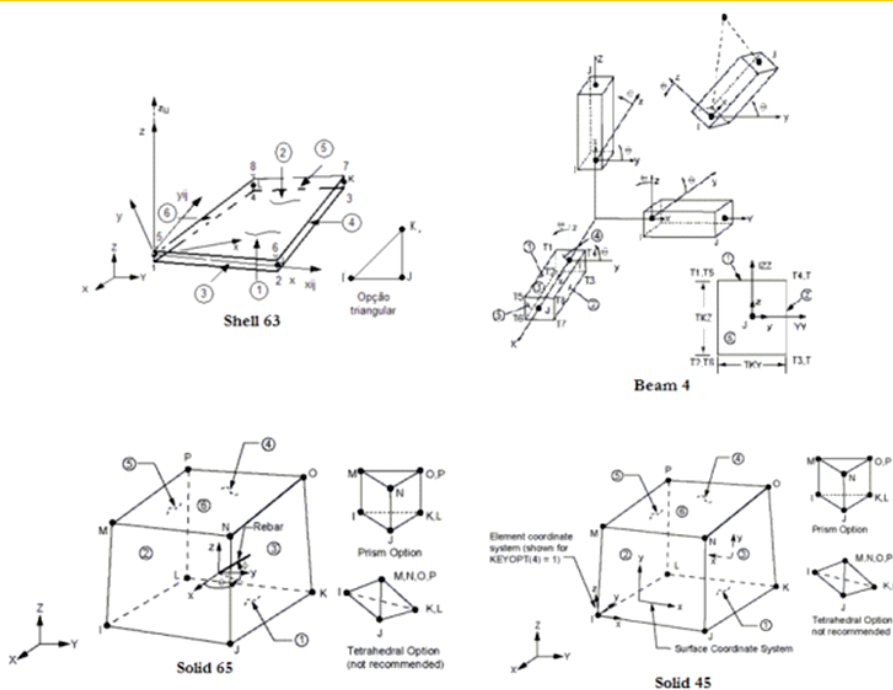


Figura 2 – Plataforma de ensaios dinâmicos - modelo simplificado



de estruturas. Os resultados obtidos nas análises para todas as estruturas propostas são discutidos e avaliados para a determinação da estrutura a ser projetada. Apenas para essa estrutura escolhida são feitas também as análises estática e dinâmica.

### 3. Análise numérica

#### 3.1 Modelo inicial

O objetivo das análises é fornecer subsídios para a construção de uma plataforma para ensaios dinâmicos que permitirá o estudo dos carregamentos induzidos por atividades humanas. Por esse motivo é importante que a plataforma apresente frequência natural menor que 5 Hz enquanto a flecha máxima deve se manter em níveis próximos aos recomendados pela norma brasileira (ABNT NBR 6118:2007, [13]).

Inicialmente é realizado um estudo numérico para determinar as dimensões da plataforma que cumpram com as especificações de tamanho e características dinâmicas mencionadas. O modelo consiste em uma laje retangular maciça de concreto, engastada em duas de suas bordas enquanto que as outras duas bordas da laje são apoios livres, como se observa na Figura 2. Não foram considerados os pilares e vigas inicialmente.

A partir das análises modais (ver Tabela 1) foi possível perceber a influência de diversos fatores nas frequências naturais da estrutura. Dentre eles cabe mencionar a resistência à compressão do concreto e a espessura da laje. Observou-se que lajes com lados iguais apresentavam frequência fundamental mais baixa que outras da mesma área, mas com formato retangular.

Estes resultados permitiram a elaboração de um modelo mais completo, com o objetivo de verificar como a rigidez dos outros elementos estruturais constituintes da estrutura (vigas e pilares) poderia influenciar o comportamento dinâmico da plataforma. Para esse modelo foram utilizados os elementos SOLID65 para a laje e pilares e SOLID45 para as vigas metálicas. Assim se escolheu um modelo de dimensões 6,1 m x 4,9 m que se caracterizou por uma frequência fundamental de 4,48 Hz enquanto a segunda alcançava 7,11 Hz, distante o suficiente da primeira frequência, diminuindo a possibilidade de acoplamento de modos.

#### 3.2 Modelo completo

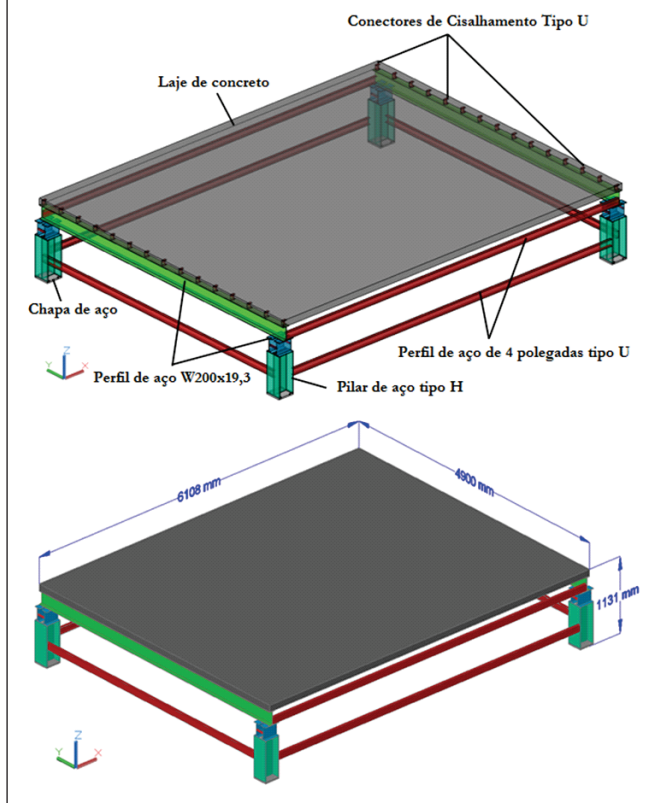
O esquema estrutural da laje escolhida para construção com suas dimensões e os detalhes do sistema de apoio estão apresentados na Figura 3.

Tabela 1 – Frequências naturais dos modelos preliminares

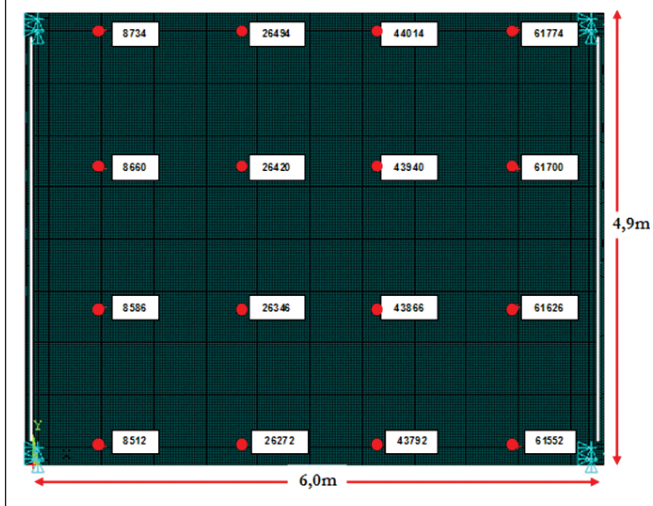
$f_{ck}$ (Resistência característica à compressão do concreto)	25 MPa		21 MPa		
	Espeçura da laje	Largura da laje	Comprimento da laje		
	7 cm	10 m	5 m		
Modelo número	1 (engastado no comprimento)	2 (engastado no comprimento)	3 (engastado em todos os bordos)	4 (apoios simples em todos os bordos)	5 (apoios simples em todos os bordos)
<b>Frequência 1</b>	2,29 Hz	9,26 Hz	10,22 Hz	5,13 Hz	4,91 Hz
<b>Frequência 2</b>	3,74 Hz	9,72 Hz	13,23 Hz	8,21 Hz	7,86 Hz
<b>Frequência 3</b>	6,33 Hz	11,44 Hz	18,61 Hz	13,34 Hz	12,77 Hz
<b>Frequência 4</b>	8,57 Hz	14,80 Hz	26,33 Hz	17,45 Hz	16,70 Hz
<b>Frequência 5</b>	11,38 Hz	20,19 Hz	26,59 Hz	20,52 Hz	19,64 Hz



**Figura 3 – Desenho esquemático e medidas gerais da plataforma de ensaios dinâmicos, montada no Laboratório de Estruturas**



**Figura 4 – Distribuição das cargas pontuais (análise estática e análise transiente) e numeração dos nós correspondentes**



espaçadas 1,5 m, cada uma com um peso de 800 N. Além de este carregamento, a análise considerou ainda o peso próprio dos elementos estruturais. Na figura 4 se pode observar a distribuição das cargas pontuais.

Para a análise modal foi considerado o peso próprio obtido a partir das características físicas listadas na Tabela 2.

Na Figura 5 se apresentam as três primeiras formas modais correspondentes às três primeiras frequências naturais da estrutura assim como a sexta forma modal, correspondente à sexta frequência da estrutura. Para a primeira frequência natural se verifica com clareza que este modo de vibração está associado aos efeitos de flexão

Foi considerada uma sobrecarga para dimensionamento de 1,0 kN/m<sup>2</sup> que resulta menor do que o recomendado para lajes de edifícios residenciais pela ABNT NBR 6120:1980, [14]. Mesmo assim essa sobrecarga parece segura devido ao uso a que a plataforma será destinada, pois, considerando uma pessoa com massa de 80 kg a laje poderá suportar 0.535 pessoas por metro quadrado, ou seja um total de 16 pessoas na laje. Os momentos solicitantes foram obtidos através da análise estática realizada. Para um dimensionamento seguro, o momento positivo solicitante foi obtido do modelo que considera apoio simples nas vigas e o momento negativo solicitante foi obtido através do modelo que considera engaste nas vigas. Com isso foi feita a verificação da altura útil da laje assim como o dimensionamento das armaduras. A flecha calculada da laje superou a flecha máxima recomendada pela norma em aproximadamente 10 mm, considerando um valor aceitável uma vez que a laje será utilizada como, plataforma para ensaios dinâmicos.

### 3.21 Análises estática, modal e transiente

Com as dimensões finais da plataforma escolhidas foram feitas as análises estática, modal e transiente considerando o modelo da Figura 3.

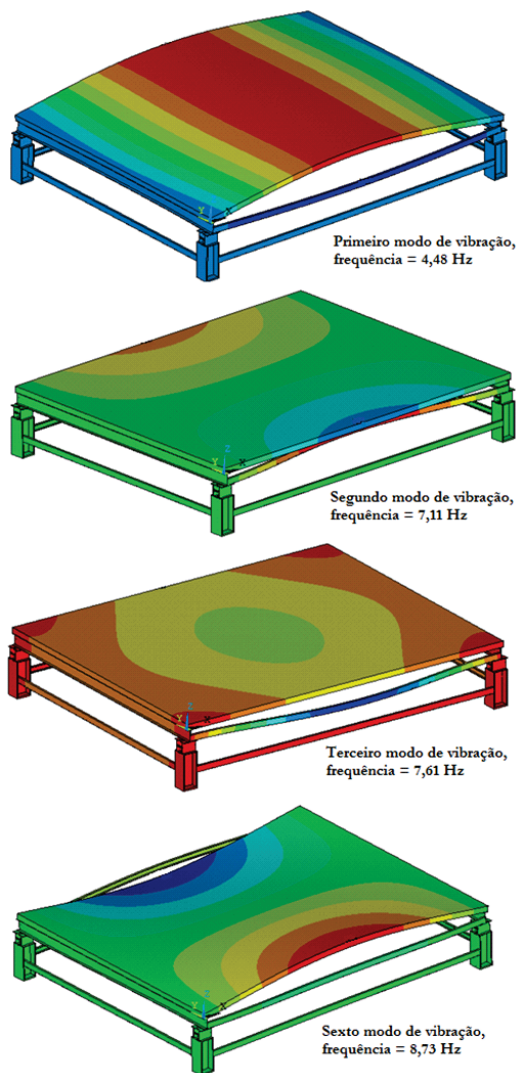
Para a análise estática foi considerada a atuação de 16 pessoas

**Tabela 2 – Peso próprio aproximado da plataforma de ensaios dinâmicos**

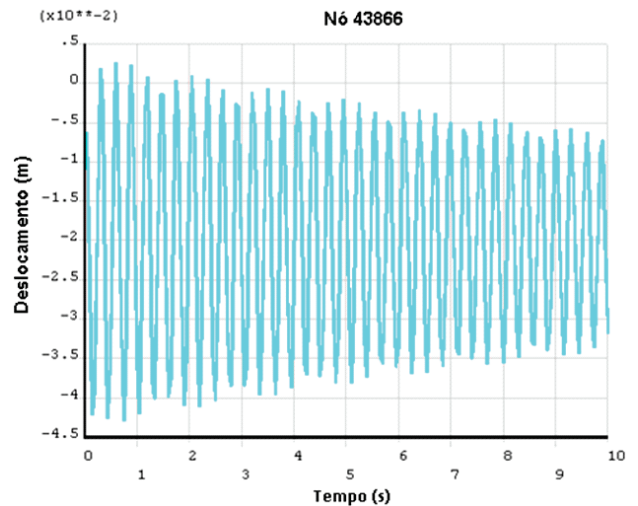
Material	Peso próprio de cada peça
Base de aço	0,447 kN
Pilar de aço tipo H	2,112 kN
Perfil aço U de 4 polegadas	2,595 kN
Perfil aço W 200 x 19,3	2,264 kN
Enrijecedores	0,045 kN
Conectores de cisalhamento	0,126 kN
Laje de concreto	74,820 kN
Peso aproximado total da plataforma de ensaios dinâmicos	82,409 kN

vertical da laje. Já para a segunda e a terceira frequência natural da estrutura, observam-se modos com flexão lateral dos perfis de aço tipo U, devido à pouca rigidez dos perfis e à falta de travamento entre os mesmos. A sexta forma modal se caracteriza pela torção da laje (segundo modo só da laje) e está indicada na Figura 5. Para a análise transiente foi simulada uma aula de ginástica com carregamento dinâmico atuando durante 10 segundos com 16 pessoas pulando. O tempo de cálculo foi subdividido em intervalos de tempo de 0,05s. Adotou-se uma frequência de excitação dinâmica de 3,4 Hz, característica das atividades aeróbicas consideradas (CEB, [9]). Nesta análise foram obtidos, para cada nó, gráficos que indicam o deslocamento, a velocidade e a aceleração vertical ao longo de 10 segundos. Nas Figuras 6 e 7 se observam respectivamente a deformação e aceleração máxima do nó 43866. Em relação às acelerações pode se mencionar que superam os

**Figura 5 – Formas modais da plataforma de ensaios dinâmicos mediante elementos finitos**



**Figura 6 – Evolução do deslocamento na direção vertical (eixo Z) no tempo. (nó 43866)**



valores máximos permitidos no guia prático de Murray *et al* [15], provavelmente por causa da sua pouca rigidez. A Tabela 3 apresenta os valores máximos da resposta dinâmica da estrutura nos nós da Figura 4. Em vermelho estão indicados os sentidos de deslocamento, velocidade e aceleração.

### 3.3 Etapas da construção da plataforma de ensaios dinâmicos

A plataforma de ensaios dinâmicos indicada na Figura 3 foi projetada para a realização de futuras pesquisas numérico-experimen-

**Figura 7 – Evolução da aceleração na direção vertical (eixo Z) no tempo (nó 43866)**

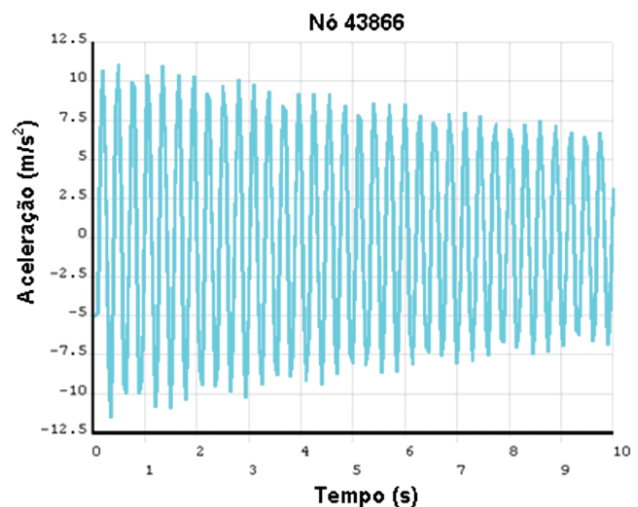


Tabela 3 – Deslocamento, velocidade e aceleração na direção Z(vertical), para os nós analisados na análise transiente

Número de Nó	Valores máximos		
	Deslocamento em Z Uz (mm)	Velocidade em Z Vz (m/s)	Aceleração em Z Az (m/s <sup>2</sup> )
8512	↓ 16,780	↓ 0,218	↑ 4,430
8586	↓ 19,356	↑ 0,255	↑ 5,060
8660	↓ 19,331	↑ 0,254	↑ 5,055
8734	↓ 16,747	↓ 0,217	↑ 4,432
26272	↓ 41,972	↓ 0,543	↓ 10,982
26346	↓ 42,053	↑ 0,543	↓ 11,277
26420	↓ 42,043	↑ 0,543	↓ 11,266
26494	↓ 41,980	↓ 0,544	↓ 10,968
43792	↓ 42,877	↓ 0,555	↓ 11,232
43866	↓ 42,877	↑ 0,555	↓ 11,528
43940	↓ 42,866	↑ 0,553	↓ 11,516
44014	↓ 42,886	↓ 0,555	↓ 11,217
61552	↓ 19,024	↓ 0,247	↑ 5,018
61626	↓ 21,359	↑ 0,280	↓ 5,556
61700	↓ 21,334	↑ 0,280	↓ 5,550
61774	↓ 18,995	↓ 0,247	↑ 5,021

tais de lajes submetidas a cargas dinâmicas geradas por grupos de pessoas em movimento. Com os estudos numéricos concluídos procedeu-se à construção física da plataforma no Laboratório de Estruturas da UnB. A plataforma foi construída seguindo um planejamento em diferentes etapas observando um processo lógico de construção, descrito a seguir.

O primeiro passo para a construção da estrutura foi a união dos perfis de aço de 4 polegadas com os pilares tipo H, segundo as dimensões projetadas, com um área aproximada de 30 m<sup>2</sup>.

O segundo passo foi a montagem dos dois perfis de aço tipo W 200 x 19,3, com seus respectivos conectores de cisalhamento tipo U e os perfis de aço tipo U de 4 polegadas, fechando o quadro superior e assim proporcionando maior rigidez à estrutura.

O terceiro passo para a construção da plataforma foi a instalação de escoramento metálico e de madeira, para suportar a forma da laje de concreto. Toda esta estrutura temporária de escoramento foi construída no mesmo nível dos pilares verticais e nos níveis horizontais das vigas e das formas de madeira.

O quarto passo foi a instalação da armadura com barras de aço tipo ASTM A 572 Grau 50. Para a armadura positiva na direção do comprimento da laje (direção X) se colocaram 39 barras de comprimento 5,0 m e de bitola de 6,5 mm espaçadas a cada 15 cm. Para a armadura na direção perpendicular (direção Y) se colocaram 41 barras de comprimento de 6,1 m e de bitola de 12,5 mm espaçadas a cada 11,8 cm. Além disso, realizou-se a instalação de armadura negativa na região do engaste flexível que consistiu em 25 barras em cada borda apoiadas nos perfis de aço de bitola de 12,5 mm e de comprimento 1,82 m.

O quinto passo consistiu na concretagem da laje até alcançar a espessura de 10 cm utilizando concreto bombeado com  $f_{ck}$  de 25 MPa.

O sexto passo foi o processo da cura do concreto que foi feito durante 30 dias. Nos primeiros 7 dias foi colocada água na laje em intervalos regulares de duas horas. Já nos restantes 23 dias a cura foi feita a cada dois dias, verificando sempre que os panos que a recobriam permaneciam úmidos. Durante todo o processo os panos foram cobertos com plástico.

Por último, foi retirado o escoramento de aço e de madeira depois de 35 dias da concretagem. A Figura 8 apresenta fotos das diferentes etapas da construção da plataforma de ensaios dinâmicos.

### 3.4 Ensaios experimentais

Para a obtenção das frequências naturais da plataforma de ensaios dinâmicos, a mesma foi excitada com impactos por meio da utilização de uma marreta de aço e uma borracha colocada na superfície da laje. A resposta foi medida utilizando um único acelerômetro móvel que foi sendo afixado em diferentes pontos da laje (ver figura 9) por meio de placas metálicas. O acelerômetro utilizado é piezoelétrico do tipo 4366, fabricado pela empresa Brüel & Kjaer, de massa aproximadamente igual a 10 gramas e sensibilidade de 4,80 pC/ms<sup>-2</sup>, ligado à um sistema de aquisição de dados composto por um módulo ADS2000, fabricado pela empresa Linx Tecnologia Eletrônica, contendo duas placas condicionadoras do tipo AI-2164, cada uma com 16 canais de aquisição de dados. Os dados foram monitorados e registrados utilizando-se o software AqDados 7. O sistema de aquisição foi configurado para adquirir os registros provenientes de um canal (canal 0), correspondente ao acelerômetro fixado na laje da plataforma, em instantes de tempo de  $5 \times 10^{-3}$  s resultando numa frequência de amostragem de 200 Hz ( $1/\Delta t$ ). Neste caso, a frequência de corte ou frequência de



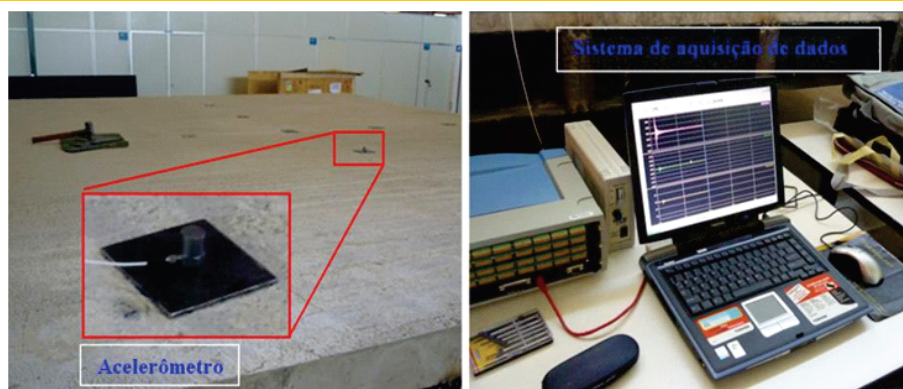
Figura 8 – Diferentes etapas de construção da plataforma de ensaios dinâmicos



Nyquist foi de 100 Hz ( $1/2\Delta t$ ) e a duração do ensaio foi de 15 s.

Verificou-se que as duas primeiras frequências naturais da

Figura 9 – Sistema de aquisição de dados para obtenção experimental das frequências naturais da estrutura





**Tabela 4 – Frequências naturais da plataforma de ensaios dinâmicos e porcentagens de erro respeito as frequências experimentais**

Frequência No	Frequências experimentais	Frequências numéricas Solid65 e Solid45	Frequências numéricas Shell63 e Beam4	Erro Solid65 e Solid45	Erro Shell63 e Beam4
f1	4,20 Hz	4,48 Hz	3,83 Hz	6,67%	8,81%
f2	7,23 Hz	7,11 Hz	5,84 Hz	1,66%	19,23%
f3	8,30 Hz	7,61 Hz	6,32 Hz	8,31%	23,86%

plataforma obtidas experimentalmente nos diferentes ensaios ficaram perto das frequências obtidas numericamente com o modelo de elemento tipo Solid65 e Solid45, como se pode observar na Tabela 4.

#### 4. Conclusões

Foi projetada e construída uma plataforma para ensaios dinâmicos composta por uma laje de concreto armado apoiada em vigas e pilares de aço, para realização de estudos experimentais com pessoas caminhando, dançando e pulando.

Inicialmente foram estudadas plataformas com características geométricas diversas apresentando frequências fundamentais abaixo de 5 Hz com o objetivo de que a estrutura seja excitada fortemente por carregamentos induzidos por atividades humanas, as quais caracterizam-se por frequências em uma faixa menor que 5 Hz. Além disso, garantiu-se que a segunda e terceira frequência ficassem distantes da primeira, de forma a evitar o fenômeno de acoplamento de modos.

Uma vez escolhida a geometria definitiva, levando-se ainda em consideração as restrições de espaço do Laboratório de Estruturas da UnB, iniciaram-se as análises numéricas para obtenção de deformações e tensões necessárias ao dimensionamento da plataforma.

A análise dinâmica da plataforma caracterizou-se inicialmente por uma análise modal, que forneceu os três primeiros modos naturais de vibração da estrutura e suas respectivas frequências. Verificou-se que o primeiro modo de vibração apresenta predominância dos efeitos de flexão vertical da laje. Os dois modos seguintes, se caracterizam por flexão lateral dos perfis de aço tipo U, que unem os pilares, devido à pouca rigidez dos perfis e à falta de travamento entre os mesmos.

As frequências de vibração numéricas associadas a esses modos têm valores entre 4,48 Hz e 7,61 Hz. O primeiro valor fica próximo das frequências geradas pelos carregamentos dinâmicos oriundos de pessoas praticando atividades físicas. Portanto, conclui-se que esses modos poderão vir a ser excitados em ensaios simulando aulas de ginástica.

Posteriormente realizaram-se também as análises estática e transiente simulando atividades aeróbicas com um grupo de 16 pessoas. Foram obtidos os deslocamentos estáticos da laje e os provocados na laje pela simulação de uma aula de ginástica, e os pontos da estrutura com maiores velocidades e acelerações verticais.

Da análise estática verifica-se que os momentos de projeto considerados por Borges, [16], são superiores a os momentos da análise estática e transiente do presente trabalho. Conclui-se, portanto,

que estes atendem aos requisitos para os quais será utilizada a plataforma de ensaios dinâmicos.

Na análise transiente foram verificadas grandes deformações, devido ao carregamento dinâmico gerado pelas simulações das pessoas na atividade de pular numa aula de ginástica. Observa-se ainda que a região central da laje resulta a mais solicitada, com as maiores velocidades e acelerações, as quais não atendem às normas consultadas.

Essas acelerações têm valores muito altos comparados aos exigidos pelas normas devido à pouca rigidez que apresenta a laje e pela falta de apoios contínuos, entre outros fatores. É importante deixar claro que a plataforma foi projetada e construída com o objetivo de apresentar vibrações excessivas para fins de estudos experimentais.

As frequências obtidas experimentalmente resultam próximas das frequências calculadas numericamente e acredita-se que as diferenças que se observam são devidas ao tipo de apoio considerado na análise numérica, engaste, que na prática não é um engaste perfeito.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da CAPES e ao professor Yosiaki Nagato pela colaboração ao longo do trabalho.

#### 6. Referências bibliográficas

- [01] FAISCA, R.G. Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas, Tese de Doutorado-COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, Dezembro de 2003.
- [02] RAMROTH, WILLIAM G. JR. Planning for Disaster, How Natural and Manmade Disasters Shape the Built Environment.
- [03] THORNTON, C.H., CUOCO, D.A., VELIVASAKIS, E. E. "Taming Structural Vibrations." Civil Engineering (New York), 60 (11), 1990. pp 57-59.
- [04] RITCHEY, JHON KENNETH, Application of Magneto-Rheological Dampers in Tuned Mass Dampers for Floor Vibration Control, Master of Science, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, October 2003.
- [05] WEBSTER, A. C. AND VAICAITIS, R. "Application of Tuned Mass Dampers to Control Vibrations of Composite Floor Systems." AISC Engineering Journal., 3rd Qtr, 1992, pp 116-124.

- [06] BATTISTA, R.C., VARELA, W.D., Medidas corretivas para vibrações de painéis contínuos de lajes de edifícios, XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasil. 2002.
- [07] ANSYS, Swanson Analysis Systems, Version 10.8.0.7, 2007.
- [08] BACHMANN, H. Lively footbridges- a real challenge. International Conference on Design and Dynamic Behaviour of Footbridges – Footbridges 2002, Paris, França.
- [09] CEB. Vibration problems in structures. Practical Guidelines. Bulletin D'Information No 209. Comité European du Béton, Zurich, August, 1991.
- [10] BACHMANN, H., AMMANN, W. Vibrations in Structures Induced by Man and Machines, 1987.
- [11] DALLARD, P., FITZPATRICK, A. I., FLINT, A., LE BOURVA, S., LOW, A., SMITH, R. M. R., WILLFORD, M. The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer, Vol. 79/No 22. November 2001.
- [12] GOMES, D. H. M. Controle das vibrações induzidas em passarelas para pedestres. 2006. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, UnB, Brasília, Brasil.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto, Rio de Janeiro, 2007.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações, Rio de Janeiro, 1980.
- [15] MURRAY, T. M., ALLEN, D.E., UNGAR, E.E., Floor vibrations due to human activity, second printing, October 2003.
- [16] BORGES, R. DE C. E., Estudo preliminar com vistas à construção de uma plataforma para ensaios dinâmicos, Monografia de projeto final 2, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília DF, 2011.