



Departamento de Engenharia Civil

**VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELAS ACTIVIDADES HUMANAS
EM GINÁSIOS E SALÕES DE DANÇA**

Celso Moisés de Alexandre Martins
(Licenciado em Ciências de Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador Científico: Doutora Ildi Cismasiu

Co-orientador Científico: Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva

Júri

Presidente: Doutor João Rocha de Almeida

Vogais: Doutor António Manuel Pinho Ramos

Doutora Ildi Cismasiu

Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva

Abril 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Ildi Cismasiu por me ter acompanhado no decurso da tese, mostrando-me sempre a forma mais correcta e simplificada de pensar aquando a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Gonçalves da Silva, por tornar possível a realização deste trabalho, e pelo voto de confiança que me concedeu.

Ao Engenheiro Álvaro Pinto pelo apoio moral e incondicional, sem o qual seria impossível dar continuidade ao trabalho.

Aos meus pais e irmãos pela paciência e motivação que me transmitiram ao longo do curso.

À Sílvia pelo companheirismo, afecto e pela força que me transmitiu nos momentos difíceis.

Aos colegas Ildeberto Benrós e Jorge Rodrigues pela disponibilidade a que se propuseram sempre que foi necessário.

Aos meus amigos e colegas pelo carinho e confiança.

RESUMO

No presente trabalho é apresentado um estudo relativo ao comportamento de uma laje submetida a acções dinâmicas induzidas por actividades rítmicas típicas de ginásios e salões de dança. A estrutura em estudo é um ginásio localizado em Lisboa, em que a laje superior é solicitada por grupos de pessoas que praticam actividades rítmicas, tais como dança e saltos rítmicos.

Começou-se por caracterizar as acções dinâmicas provenientes de actividades humanas e definiu-se analiticamente vários tipos de solicitações que descrevem essas actividades.

De seguida descreveu – se em resumo algumas normas disponíveis na literatura que definem os níveis máximos de vibrações tendo em conta o conforto humano.

Após a modelação da estrutura e a validação desta, através da convergência da frequência fundamental para malhas de menores dimensões, aplicaram-se cargas dinâmicas à estrutura.

Foram analisados três casos de cargas, em que cada um descreve a respectiva actividade rítmica. Os valores de aceleração obtidos excedem os máximos admissíveis, o que conduziu ao uso de um método de controlo estrutural para a redução destas acelerações.

Palavras-Chave

- Conforto humano
- Amortecedores de massas sintonizadas
- Laje
- Vibrações

ABSTRACT

This work presents a study of a floor submitted to dynamics loads induced by rhythms activities typical of gymnasiums and dance floors. The building is located in Lisbon, and is used as a gym on the first floor where groups of people practice rhythmic activities like dance and jumps.

The work begins by making the characterization of dynamics loads due to human activities and defining analytically various kinds of loads that describe those activities.

Subsequently some standards available in the literature are described in summary defining the maximum levels of vibration with regard to human comfort.

After modeling the structure and making the validation of the model, through convergence of the fundamental frequency for small meshes, the dynamic response was evaluated.

Three cases of loads were analyzed, each load describing rhythmic activities. Acceleration values obtained exceeded the maximum allowable forcing the use of a method of structural control to reduce these accelerations.

Key-words

- Human confort
- Tuned mass dampers
- Slabs
- Vibrations

Índice Geral

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 OBJECTIVO DO TRABALHO.....	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
Capítulo 2 - Acção Dinâmica Induzida por Actividades Humanas.....	5
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA	5
2.2 MODELAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA	7
2.3 REPRESENTAÇÃO DA CARGA	8
2.3.1 CARGA PARA MOVIMENTO DE DANÇA	8
2.3.2 CARGA DO SALTO RÍTMICO	11
Capítulo 3 - Normas e Critérios de Conforto	13
3.1 NORMA CANADIANA, CSA.....	13
3.2 A NORMA ISO 2631/ 2: 1989.....	14
3.3 GUIA PRÁTICO DA AISC	15
Capítulo 4 - Modelação da Estrutura.....	17
4.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA.....	17
4.2 DEFINIÇÕES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	19
4.3 REFINAÇÃO DAS MALHAS DOS ELEMENTOS FINITOS E SIMPLIFICAÇÃO DO MODELO	21
Capítulo 5 - Sistemas de Controlo de Vibrações.....	23
5.1 CONTROLO ESTRUTURAL	27
5.1.1 CONTROLO PASSIVO.....	27
5.1.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓPTIMOS PELO MÉTODO DE JANGID	
31	
Capítulo 6 - Análise Dinâmica	35
6.1 ANÁLISE MODAL	35
6.2 ESCOLHA PONTOS CRÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO MÁXIMA	39
6.3 REPRESENTAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA NO SAP2000	41

6.4	RESULTADOS DA ANÁLISE	43
6.4.1	CASO 1.....	46
6.4.2	CASO 2.....	50
6.4.3	CASO 3.....	53
Capítulo 7 - Aplicação do Controlo Passivo		59
7.1	DIMENSIONAMENTO DO TMD	60
7.1.1	1ª PROPOSTA	61
7.1.2	2ª PROPOSTA	63
7.1.3	3ª PROPOSTA	65
7.1.4	4ª PROPOSTA	67
7.1.5	5ª PROPOSTA	69
7.1.6	6ª PROPOSTA	70
7.1.7	7ª PROPOSTA	72
7.1.8	8ª PROPOSTA	75
7.1.9	9ª PROPOSTA	76
7.1.10	10ª PROPOSTA	78
7.2	AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DAS ACELERAÇÕES	81
Conclusão		85
Bibliografia.....		1

Índice de Figuras

Figura 2-1 - Força vertical para o impacto do calcanhar [13]	6
Figura 2-2 - Resposta ao impacto do calcanhar [13]	6
Figura 2-3 - Foto do ginásio em estudo, por Geovani Ricciardi	7
Figura 2-4 - Representação da sobreposição dos efeitos associados aos dois pés [19].	9
Figura 2-5 - Força para o movimento andar e a reacção do piso [20]	10
Figura 2-6 - Função de carregamento proposta pelo Varela [12]	10
Figura 2-7 - Força para o salto rítmico [1]	11
Figura 3-1 - Critérios para vibrações em residências, escritórios e salas de aulas [13]	14
Figura 3-2 - Curva básica para acelerações verticais [26]	15
Figura 4-1 - Estrutura do pavimento do edifício.	18
Figura 4-2 - Secção da viga transversal, ao longo do vão.	19
Figura 4-3 - Secção da viga transversal sobre pilar.	19
Figura 4-4 - Ligações entre elementos definidos no SAP2000 [29]	19
Figura 4-5 - Modelo estrutural adoptado para o piso do edifício em análise, Sap2000	21
Figura 4-6 - Convergência da frequência natural para vários graus de liberdade	22
Figura 4-7 - Modelo estrutural simplificado, Sap 2000	22
Figura 5-1 - Representação de amortecedor friccional e dispositivo de chapa gousset [21]	24
Figura 5-2 - Representação de amortecedor visco – elástico [30] [21]	24
Figura 5-3 - Amortecedor fluido viscoso [21]	25
Figura 5-4 - Representação de isolamento de base [21]	25
Figura 5-5 - Representação do elastómero cintado [21]	26
Figura 5-6 - Representação a), b) e c) de TMD's em lajes [8], [19]	26
Figura 5-7 - Modelo de massa M e supressor de vibrações com massa m [30]	28
Figura 5-8 - Relação entre o rácio de frequências e o rácio de massas [31]	29
Figura 5-9 - Modelo de massa m1 e um TMD com massa m2 [30]	30
Figura 5-10 - Modelo de viga simplesmente apoiada TMD's aplicados. [30]	32

Figura 6-1 - Factores de participação modal para o grau de liberdade Uz	36
Figura 6-2 - Modo de vibração referente ao a) modo 1 e b) modo 2	37
Figura 6-3 - Modo de vibração referente ao a) modo 3 e b) modo 4	38
Figura 6-4 - Modo de vibração referente ao a) modo 5 e b) modo 6	38
Figura 6-5 - Modo de vibração referente ao a) modo 7 e b) modo 8	38
Figura 6-6 - Modo de vibração referente ao a) modo 9 e b) modo 10	39
Figura 6-7 - Modo de vibração referente ao a) modo 11 e b) modo 12	39
Figura 6-8 - Pontos escolhidos para o primeiro modo de vibração	40
Figura 6-9 - Pontos escolhidos para o segundo modo de vibração.....	40
Figura 6-10 - Pontos escolhidos para o terceiro modo de vibração.....	41
Figura 6-11 - Função salto - rítmico definida no SAP2000.....	42
Figura 6-12 - Variação do factor de impacto com o incremento do coeficiente de contacto	42
Figura 6-13 - Função seno, sem e com os coeficientes de amplificação.....	43
Figura 6-14 - Representação de quatro cargas aplicadas na laje, Sap 2000.	44
Figura 6-15 - Variação da aceleração no nó 8814, aceleração de pico.....	44
Figura 6-16 - Variação da aceleração no nó 8814 (aceleração em RMS)	45
Figura 6-17 - Representação de 39 cargas aplicadas na laje, Sap 2000.	46
Figura 6-18 - Definição do factor de escala, factor de tempo e tempo de chegada para cada passo no sap2000 para a função salto – rítmico, Sap 2000.	47
Figura 6-19 - Carga aplicada num ponto, para seis passos com frequências de 3,4 HZ e tempo de contacto de 0,0735 s.....	47
Figura 6-20 - Resposta da aceleração em unidades m/s ² , nó 8814	49
Figura 6-21 - Resposta do deslocamento em unidades m, nó 8814	49
Figura 6-22 - Definição do factor de escala, factor de tempo e tempo de chegada para cada passo no sap2000 para a função Modelo 2.5 Hz, Sap2000.	50
Figura 6-23 - Carga aplicada num ponto, para seis passos com frequências de 2,5 HZ e tempo de contacto de 0,2 s.....	51
Figura 6-24 - Resposta da aceleração do nó 8814.....	52
Figura 6-25 - Resposta do deslocamento do nó 8814	53

Figura 6-26 - Definição do factor de escala, factor de tempo e tempo de chegada para cada passo no sap2000 para a função Modelo 1.8 Hz.....	54
Figura 6-27 - Carga aplicada num ponto, para seis passos com frequências de 1,8 HZ e tempo de contacto de 0,556 s.....	54
Figura 6-28 - Resposta da aceleração do nó 8814.....	56
Figura 6-29 - Resposta do deslocamento do nó 8814.....	56
Figura 7-1 - Modelo de um TMD, sap2000 [29].....	59
Figura 7-2 - Janela de inserção das propriedades do TMD.....	60
Figura 7-3 - Janela de inserção das características dinâmicas do TMD.....	60
Figura 7-4 - Posição de dois TMD's para o controlo das vibrações.....	61
Figura 7-5 - Resposta do nó 8814 para 1ª Proposta e sem TMDs.....	63
Figura 7-6 - Posição de três TMD's para o controlo das vibrações.....	64
Figura 7-7 - Resposta do nó 8814 para 2ª Proposta e sem TMDs.....	65
Figura 7-8 - Posição de quatro TMD's para o controlo das vibrações.....	65
Figura 7-9 - Resposta do nó 8814 para 3ª Proposta e sem TMDs.....	66
Figura 7-10 - Posição de cinco TMD's para o controlo das vibrações.....	67
Figura 7-11 - Resposta do nó 8814 para 4ª Proposta e sem TMDs.....	68
Figura 7-12 - Posição de sete TMD's para o controlo das vibrações.....	69
Figura 7-13 - Resposta do nó 8814 para 5ª Proposta e sem TMDs.....	70
Figura 7-14 - Posição de oito TMD's para o controlo das vibrações.....	71
Figura 7-15 - Resposta do nó 8814 para 6ª Proposta e sem TMDs.....	72
Figura 7-16 Posição de nove TMD's para o controlo das vibrações.....	73
Figura 7-17 - Resposta do nó 8814 para 7ª Proposta e sem TMDs.....	74
Figura 7-18 - Posição de dez TMD's para o controlo das vibrações.....	75
Figura 7-19 - Resposta do nó 8814 para 8ª Proposta e sem TMDs.....	76
Figura 7-20 - Posição de onze TMD's para o controlo das vibrações.....	77
Figura 7-21 - Resposta do nó 8814 para 9ª Proposta e sem TMDs.....	78
Figura 7-22 - Posição de doze TMD's para o controlo das vibrações.....	79
Figura 7-23 - Resposta do nó 8814 para 10ª Proposta e sem TMDs.....	80

Figura 7-24 - Evolução das acelerações com o incremento de TMDs	81
Figura 7-25 - Evolução das acelerações com a diminuição do número de pessoas	82
Figura 7-26 - Representação dos doze TMDs aplicados à estrutura.....	83

Índice Tabelas

Tabela 1 - Frequência das forças e coeficientes dinâmicos [14].....	8
Tabela 2 - Acelerações limites [27].....	15
Tabela 3 - Características do material betão C 30 / 37.....	17
Tabela 4 - Características geométricas das secções.....	18
Tabela 5 - Quantidade de elementos utilizados no modelo	20
Tabela 6 - Valores dos parâmetros para o cálculo dos valores óptimos [30].....	32
Tabela 7 - Modos de vibração obtidos, para um modelo estrutural simplificado.....	37
Tabela 8 - Valores de aceleração máxima e mínima, em m/s ² , para os nós críticos para o caso 1	48
Tabela 9 - Valores de aceleração máxima e mínima, em m/s ² , para os nós críticos para o caso 2	51
Tabela 10 - Valores de aceleração máxima e mínima, m/s ² , para os nós críticos para o caso 3	55
Tabela 11 - Acelerações máximas de pico e em RMS	57
Tabela 12 - Propriedades de dois TMDs , controlo do 1 ^o modo pelo método de Jangid	61
Tabela 13 - Acelerações nos pontos de análise, para dois TMD´s	62
Tabela 14 - Critérios regulamentares	62
Tabela 15 - Propriedades de três TMDs, controlo do 1 ^o modo pelo método de Jangid	64
Tabela 16 - Acelerações nos pontos de análise, para três TMD´s	64
Tabela 17 Propriedades de quatro TMDs, controlo do 1 ^o modo pelo método de Jangid....	66
Tabela 18 - Acelerações nos pontos de análise, para quatro TMD´s	66
Tabela 19 - Propriedades de cinco TMDs,controlo do 1 ^o modo pelo método de Jangid	67
Tabela 20 - Acelerações nos pontos de análise, para cinco TMD´s.....	68
Tabela 21 - Propriedades de dois TMDs, controlo do 2 ^o modo pelo método de Jangid	69
Tabela 22 - Acelerações nos pontos de análise, para sete TMD´s	70
Tabela 23 - Propriedades de seis TMDs, controlo do 1 ^o modo pelo método de Jangid	71
Tabela 24 - Propriedades de dois TMDs, controlo do 2 ^o modo pelo método de Jangid	71

Tabela 25 - Acelerações nos pontos de análise, para oito TMD's	72
Tabela 26 - Propriedades de sete TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid.....	73
Tabela 27 - Acelerações nos pontos de análise, para nove TMD's	74
Tabela 28 - Verificação dos critérios de aceleração no nó 8814	74
Tabela 29 - Propriedades de oito TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid.....	75
Tabela 30 - Acelerações nos pontos de análise, para dez TMD's	76
Tabela 31 - Propriedades de oito TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid.....	77
Tabela 32 - Acelerações nos pontos de análise, para 11 TMD's	78
Tabela 33 - Propriedades de oito TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid.....	79
Tabela 34 - Acelerações nos pontos de análise, para 12 TMD's	80
Tabela 35 - Comparação das acelerações nos pontos de análise.	81
Tabela 36 - Deslocamentos das massas dos TMDs.....	83

Lista de abreviaturas

AISC - American Institute of Steel Construction

BS - British Standard

CSA - Canadian Standard Association

ISO – International Standard Organization

NBC - National Building Code of Canada

TMDs - Tuned Mass Dampers

Lista de símbolos

a_0	Aceleração de pico
B	Largura equivalente (m)
C	Amortecimento
$f(t)$	Força
f	Frequência fundamental da estrutura (Hz)
f_{mi}	Factor de impacto do calcanhar
f_s	Frequência do passo da actividade
g	Aceleração de gravidade (m/s^2)
G	Peso da pessoa
j	Rácio de frequência da força
k_p	Factor de impacto
k_1	Rigidez do sistema
k_2	Rigidez do sistema adicional
L	Comprimento do vão (m)
M	Massa do sistema
m	Massa adicional

n	Número de amortecedores de massa sintonizados
nh	Número de termos da série de Fourier representativa da actividade
$R_{m\acute{a}x}$	Amplitude máxima da resposta em frequência
r_n	Énésimo harmónico do coeficiente de Fourier normalizado em G
t	Tempo em segundos
t_p	Tempo de contacto
T_p	Período do passo
x_{st}	Deslocamento estático
η	Coefficiente de contacto
θ	Ângulo de fase
α	Rácio de frequência natural
$\alpha_{\acute{o}ptimo}$	Rácio da frequência óptima
α_i	Coefficiente dinâmico
μ	Rácio de massa
β_L	Largura da banda
ζ	Coefficiente de amortecimento
ζ'	Coefficiente de amortecimento médio
ω	Peso do piso
ω_1	Frequência do sistema principal
ω_2	Frequência do sistema adicional

Capítulo 1

Introdução

A competição no mercado global tem forçado os engenheiros a desenvolverem estruturas de peso mínimo e soluções de baixos custos laborais, como também a aumentar a velocidade de construção. São estruturas de construção e montagem rápida, capazes de suportar grandes vãos, permitindo maior flexibilidade de espaço construído. Uma das consequências deste tipo de construção é o aumento considerável dos problemas relacionados com vibrações indesejáveis em pisos de edifícios e que em alguns casos, podem comprometer a integridade do projecto. Por exemplo, o fenómeno de vibração é frequente em vários tipos de estruturas sujeitas a acções dinâmicas provenientes de actividades rítmicas [1],[2] e pode ser excessivo nos casos em que os níveis de vibração excedem o limite para o qual a vibração se torna desconfortável.

O principal factor que causa o aumento dos níveis de vibração é a proximidade da frequência da força à frequência natural da estrutura. As amplitudes das vibrações são então amplificadas embora sejam reduzidas através do amortecimento [3]. Em certos casos, o projectista é obrigado a modificar a rigidez da estrutura ou a distribuição de massas para evitar a ocorrência desse fenómeno.

Experiências realizadas por Batista e Varela [4] indicam que os problemas relacionados com excitações dinâmicas produzidas por actividades rítmicas são mais acentuados e frequentes em lajes de painéis contínuos. Verificou-se também que um aumento até 60 % na espessura da laje ou o uso de painéis leves para divisórias não conduziu a uma solução eficiente para a redução de vibrações [2].

Isto implica que o cálculo do reforço da estrutura tem de ser correctamente feito uma vez que o aumento considerável da espessura da laje poderá aumentar significativamente a massa desta, conduzindo à redução da frequência natural do piso.

A solução de amortecedores de massa sintonizados, vulgarmente designados por TMDs ("Tuned Mass Dampers") tem sido utilizada com algum sucesso na redução de problemas de vibração [5]. Um TMD é basicamente uma massa ligada através de uma mola e um dispositivo de amortecimento ao sistema vibratório, em locais estratégicos directamente abaixo do piso. Reduz a amplificação de vibrações transferindo energia cinética do piso para a massa do TMD e também dissipa alguma energia através de dispositivo de amortecimento [3]. O funcionamento desta solução é eficaz se a frequência do TMD for aproxi-

madamente igual à frequência natural do piso havendo apenas uma frequência significativa de vibração e também se estiver localizado no ponto de maior amplitude [6].

O uso de vários TMD's sintonizados às frequências dos respectivos modos de vibração significativos seria necessário para obter redução das contribuições associadas às frequências naturais desses modos.

A utilização de TMD's revela ser uma boa solução para vibrações de edifícios sujeitos à acção do vento ou a forças harmónicas [7],[8], enquanto o reforço estrutural é mais utilizado como medida correctiva para problemas de vibrações em lajes sujeitas a acções dinâmicas induzidas por actividades rítmicas [7]. No entanto, é importante dimensionar adequadamente os elementos estruturais para as solicitações impostas pelas actividades rítmicas em lajes de ginásios e salões de dança. Em Portugal, para a determinação da resposta de pisos de edifícios devido a vibrações induzidas por actividades humanas há alguma experiência. Cita-se como exemplo a participação da FEUP na elaboração do documento HiVoSS (Human induced Vibrations of Steel Structures) [9], as normas usualmente utilizadas são a ISO - International Standard Organization que é a base da HiVoSS e as normas canadiana - Canadian Standards Association e inglesa BS 6841:1987 British Standard [10].

1.1 OBJECTIVO DO TRABALHO

O objectivo do presente trabalho é analisar o comportamento de uma laje quando submetida a actividades rítmicas. A resposta dinâmica é analisada e comparada aos valores limites de alguns regulamentos e propõe – se o uso de múltiplos amortecedores sintonizados para o controlo das vibrações.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é constituído por um conjunto de sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta na generalidade a problemática de vibrações causadas por acções induzidas por humanos.

No segundo capítulo, são caracterizadas as acções dinâmicas induzidas por actividades rítmicas. Os tipos de danças são divididos em categorias e tem-se em consideração parâmetros importantes, como o tempo de contacto, para a modelação da carga dinâmica associada.

No terceiro capítulo, são sistematizadas algumas normas e critérios de conforto humano encontrados na literatura e aplicáveis para casos de vibrações induzidas por actividades humanas.

No quarto capítulo, são descritas as características geométricas da estrutura em estudo e define-se o modelo estrutural ao pormenor no programa SAP2000.

No quinto capítulo, os sistemas de controlo de vibrações são definidos na generalidade, descrevendo-se algumas vantagens e aplicações. De forma sucinta aborda-se o controlo passivo de vibrações, focalizando-se na formulação matemática de alguns sistemas e expressões para a obtenção de parâmetros óptimos dos TMD's.

No sexto capítulo, são realizadas as análises modal e dinâmica para a determinação das características dinâmicas e a resposta da estrutura.

No sétimo capítulo, é efectuada uma análise sobre os efeitos dos TMD's sintonizados para os dois primeiros modos de vibração, de modo a reduzir as acelerações excessivas.

Finalmente, o capítulo oito descreve as principais conclusões deste trabalho.

Capítulo 2

Acção Dinâmica Induzida por Actividades Humanas

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA

A carga induzida por actividades rítmicas constitui num problema muito complexo, devido ao facto de a característica da excitação dinâmica gerada, estar directamente relacionada com a massa e altura de cada indivíduo e pela forma específica como cada um executa um certo passo rítmico. Este aspecto dificulta a caracterização matemática e física deste fenómeno [1].

A actividade rítmica a caracterizar é a dança e para a análise dinâmica interessa dividir os tipos de danças em duas categorias [11]. A primeira categoria abrange o tipo de dança que mantém o contacto contínuo com o pavimento, inclui-se neste caso a prática de danças a que não estão associados saltos rítmicos, dança normal. A segunda categoria envolve saltos rítmicos e neste caso, o contacto com o pavimento é descontínuo.

Um factor a ter em consideração nos saltos rítmicos poderá ser o impacto dos calcanhares. A característica da acção dinâmica do impacto do calcanhar pode ser determinada experimentalmente através de ensaios de impacto de calcanhares em placas [2], que geram funções que representam o modelo de carga, Figura 2-1. Este tipo de carga, considerado como uma fonte principal de excitação, produz respostas transientes [2], de acordo com a Figura 2-2. A função é obtida através de ensaios *heel drop tests*, em que o ensaio consiste em elevar o calcanhar a uma certa altura correspondente ao peso da pessoa, para posterior queda deste sobre a placa [2],[12].

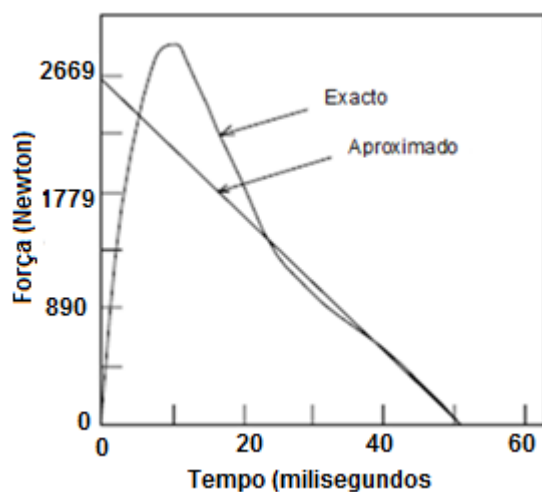


Figura 2-1 - Força vertical para o impacto do calcanhar [13]

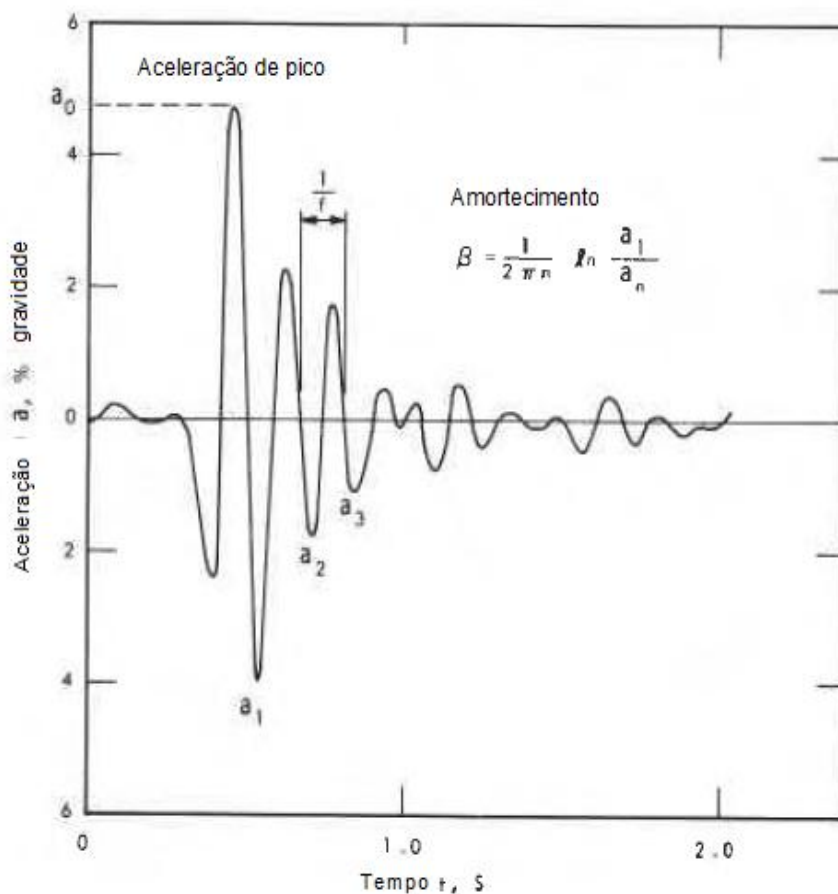


Figura 2-2 - Resposta ao impacto do calcanhar [13]

A resposta deste tipo de impacto é essencialmente dada por vibrações no modo fundamental, uma vez que os modos de vibração elevados amortecem rapidamente e não cau-

sam desconforto [13]. A frequência fundamental, o amortecimento e a aceleração inicial, são determinados através da curva da resposta, Figura 2.2.

2.2 MODELAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA

A definição analítica da acção dinâmica também é complexa e a respectiva resposta é complicada de se obter. Experiências e investigações mostram que o problema pode ser simplificado [14]. As forças podem ser representadas por funções trigonométricas harmónicas. Em geral, a força cíclica é representada pela combinação de forças sinusoidais, em que as frequências são múltiplos da frequência do salto.



Figura 2-3 - Foto do ginásio em estudo, por Geovani Ricciardi

As frequências induzidas pela dança e saltos rítmicos são frequentes em salas de dança ou ginásios, para efeito de dimensionamento, consideram-se entre 1,80 a 3,40 Hz [1].

O número de pessoas que participam na actividade deve ser considerado [15]. Os movimentos rítmicos que duram mais de 20 segundos geralmente são representados por forças dinâmicas periódicas [16]. Se várias pessoas estiverem envolvidas as forças aplicadas poderão ser sincronizadas. Nestes casos, as forças dinâmicas aumentam com número de participantes [17].

O tempo de contacto é um parâmetro importante a ter em consideração na modelação da acção dinâmica e é definido através do coeficiente de contacto. De acordo com o referido em [11] o coeficiente η dado pela Fórmula 2.2.1 é a razão entre o tempo de contacto e

período do passo. Caracteriza os diferentes ritmos de música, e toma valores do intervalo [0,1].

$$\eta = \frac{t_p}{T_p} \quad 2.2.1.$$

t_p – Tempo de contacto

T_p – Período do passo

O parâmetro η é importante na determinação da intensidade da carga característica de cada actividade rítmica.

2.3 REPRESENTAÇÃO DA CARGA

2.3.1 Carga para Movimento de Dança

A força dinâmica pode ser representada por desenvolvimento em séries de Fourier [14] de acordo com a Fórmula 2.3.2. Nela pode identificar-se uma parcela para a carga estática, correspondente ao peso do indivíduo, adicionada à combinação de forças harmónicas.

$$F(t) = G[1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi f_s t + \theta)] \quad 2.3.2.$$

P é o peso da pessoa (considera-se o valor médio de 700N [2]), α_i é o coeficiente dinâmico, f_s é a frequência do passo da actividade, t é o tempo em segundos, θ é o ângulo de fase [2], e i é o número de harmónicos. Os valores destes parâmetros são dados na Tabela 1.

Tabela 1 - Frequência das forças e coeficientes dinâmicos [14]

Harmónico	Turma de aeróbica		Grupo de dança	
	f, Hz	α_i	f, Hz	α_i
1	2 - 2,75	1,5	1,5 - 3	0,5
2	4 - 5,5	0,6		
3	6 - 8,25	0,1		

De acordo com Ellis e Ji [18], o fenómeno físico de ressonância pode ocorrer em pisos relativamente rígidos com frequência fundamental $f_1 > 10 \text{ Hz}$, indicando que mais coeficientes dinâmicos poderão ter que ser considerados, dependendo das características dinâmicas dos pisos.

O desenvolvimento por séries de Fourier aproxima funções de carga para movimentos de dança, na variação temporal da acção dinâmica, Figura 2-4.

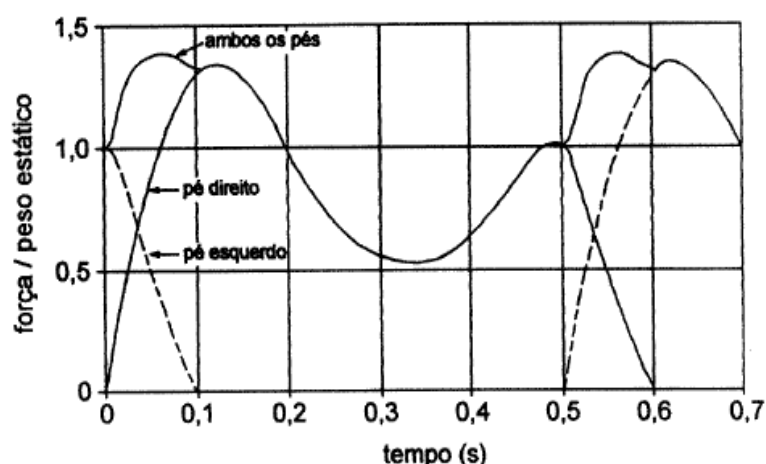


Figura 2-4 - Representação da sobreposição dos efeitos associados aos dois pés [19].

Varela [20] considera um factor importante, o impacto do calcanhar, na determinação da função de carga. Este factor aumenta consideravelmente a força aplicada no pavimento, Figura 2-5. O modelo proposto contém cinco troços, Figura 2-6, para além das séries de Fourier com o máximo de quatro harmónicos, considera também os coeficientes que quantificam os efeitos dinâmicos do impacto do calcanhar. A representação matemática é dada pela Fórmula 2.3.3.

$$F(t) = \begin{cases} \left(\frac{f_{mi}F_m - P}{0.04T_p}\right)t + G, & 0 \leq t \leq 0.04T_p \\ f_{mi}F_m \left[\frac{C_1(t-0.04T_p)}{0.02T_p} + 1\right], & 0.04T_p \leq t \leq 0.06T_p \\ F_m, & 0.06T_p \leq t \leq 0.15T_p \\ G\left[1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i \sin(2\pi f_c(t + 0.1T_p) + \theta_i)\right], & 0.15T_p \leq t \leq 0.90T_p \\ 10(G - C_2)\left(\frac{t}{T_p} - 1\right) + G, & 0.90T_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad 2.3.3.$$

O factor máximo das séries de Fourier e os coeficientes são dados pelas seguintes expressões.

$$F_m = G(1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i) \quad 2.3.4.$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{f_{mi}} - 1\right) \quad 2.3.5.$$

$$C_2 = \begin{cases} G(1 - \alpha_2), & nh = 3 \\ G(1 + \alpha_2 + \alpha_4), & nh = 4 \end{cases} \quad 2.3.6.$$

O factor de impacto do calcanhar, f_{mi} , varia com as características das pessoas. Geralmente é adoptado o valor 1.12. G é peso da pessoa em Newtons, nh é o número de termos da série de Fourier representativa da actividade dançar. f_s é a frequência do passo da

actividade, α_i é o coeficiente dinâmico e θ_i é o ângulo de fase. São considerados $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$, $\theta_3 = \pi$ e por extrapolação $\theta_4 = \frac{3\pi}{2}$.

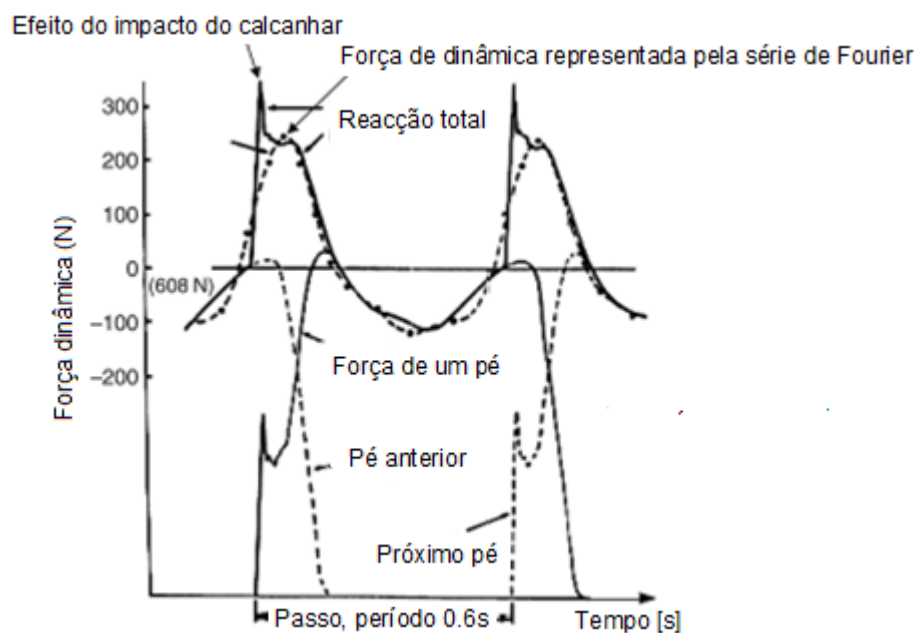


Figura 2-5 - Força para o movimento andar e a reacção do piso [20]

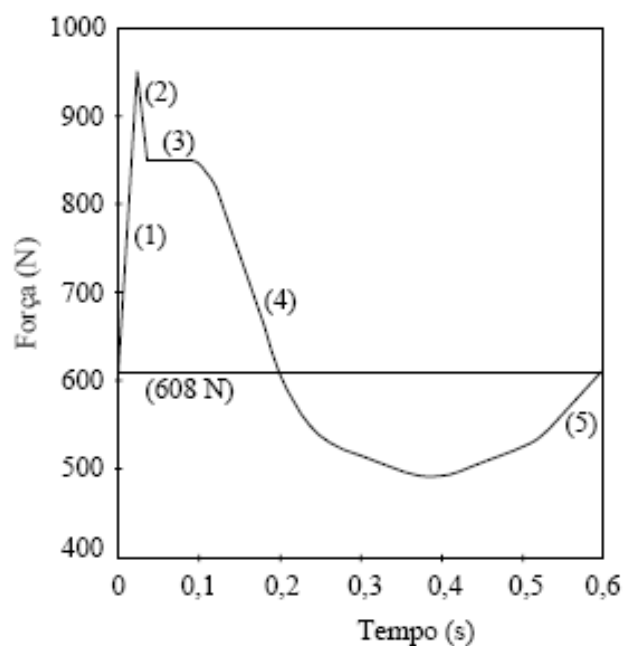


Figura 2-6 - Função de carregamento proposta pelo Varela [12]

2.3.2 Carga do Salto Rítmico

O contacto descontínuo da força dinâmica é representada, Figura 2-7, por uma função semi - sinusoidal durante o contacto, e um valor nulo da força quando não há contacto [21][1],[11], de acordo com a Fórmula 2.3.7,

$$\begin{cases} F(t) = Gk_p \sin(\pi f_s t), & t < t_p \\ F(t) = 0, & t_p < t < T_p \end{cases} \quad 2.3.7.$$

t_p é o tempo de contacto, T_p é o período do passo definida pela relação $\frac{1}{f_s}$ e a variável k_p é definida pela relação $\frac{F(t)_{máx}}{P}$ em que $F(t)_{máx}$ é a máxima amplitude da função sinusoidal e G é o peso da pessoa.

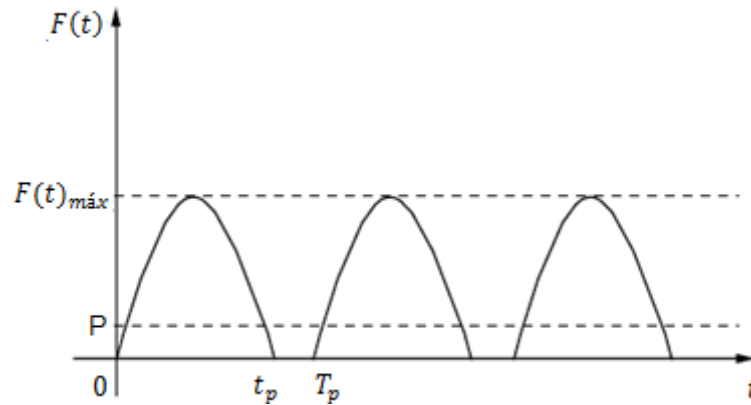


Figura 2-7 - Força para o salto rítmico [1]

O impulso de cada salto [11] é igual ao peso da pessoa vezes o período do salto rítmico, Fórmula 2.3.8

$$\int_0^{t_p} k_p G \sin\left(\frac{\pi t}{t_p}\right) dt = GT_p \quad 2.3.8.$$

O factor de impacto, k_p , é obtido através da relação

$$k_p = \frac{\pi}{2\alpha} \quad 2.3.9.$$

Nota-se que a força máxima é inversamente proporcional ao tempo de contacto.

A função de carga é periódica e pode ser aproximada por séries de Fourier Fórmula 2.3.10.

$$F(t) = G \left[1.0 + \sum_{n=1}^{\infty} r_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T_p} t + \phi_n\right) \right] \quad 2.3.10.$$

Onde r_n é o enésimo harmónico do coeficiente de Fourier normalizado em G e ϕ_n é o ângulo de fase do enésimo harmónico.

Capítulo 3

Normas e Critérios de Conforto

Em Portugal não existem normas regulamentares e critérios de conforto para a prática de dimensionamento de pisos sujeitos a actividades rítmicas, e verificações de acelerações limites máximo para a qual a vibração é perceptível. Recorre-se a normas estrangeiras que procuram salvaguardar o bom funcionamento em serviço das estruturas sujeitas a este de solicitações.

A norma da British Standard BS6399 [22], preocupa-se principalmente com a segurança de passadiços em que actuam forças sincronizadas como as impostas pelas actividades rítmicas. Não disponibiliza aos projectistas nenhum procedimento a seguir para efectuar as verificações. A Concrete Society e a Timber Research and Development Association também emitiram procedimentos específicos para materiais, a última edição publicada pela Concrete Centre pode ser aplicada em edifícios e pontes de qualquer material de construção. A norma CSA – Canadian Standard Association – Norma S16.1-1974 - Steel Structures for Buildings – Limit States design emitiram critérios de conforto, dando importância a edifícios de escritórios, residenciais e escolares. A norma ISO – International Standard Organization- 2631-2 considera relevante a posição do corpo humano na percepção de vibrações de cargas impulsivas e contínuas, e é aplicada para qualquer tipo de edifício. A AISC- American Institute of Steel Construction, providencia um guia prático com os princípios básicos e métodos de análises simples para verificar os critérios de vibrações em edifícios metálicos e pontes pedonais. Pode ser utilizado para estruturas em betão uma vez que interessa os níveis de percepção de acordo com cada actividade.

3.1 NORMA CANADIANA, CSA

Na norma CSA – Canadian Standard Association [23], os critérios para vibrações são definidos em função de picos de aceleração. Os modos de vibração, a frequência natural, a taxa de amortecimento e a aceleração de pico são determinados experimentalmente através do ensaio *heel drop*. As acelerações obtidas são comparadas aos limites de aceleração de pico apresentados no gráfico, Figura 3-1.

Pode-se também determinar analiticamente a aceleração de pico [13] em função do impulso causado pelo impacto da queda do calcanhar, Fórmula 3.1.11

$$a_0 = 0.9 \frac{2\pi f \text{impulso}}{\text{massa equivalente}} \frac{100}{g} = \frac{60f}{\omega BL} \quad 3.1.11.$$

em que f é a frequência fundamental da estrutura (Hz), g é a aceleração de gravidade (m/s^2), ω é o peso do piso e da sobrecarga, L é o comprimento do vão (m), B é a largura equivalente (m), o impulso é $70 N \cdot s$

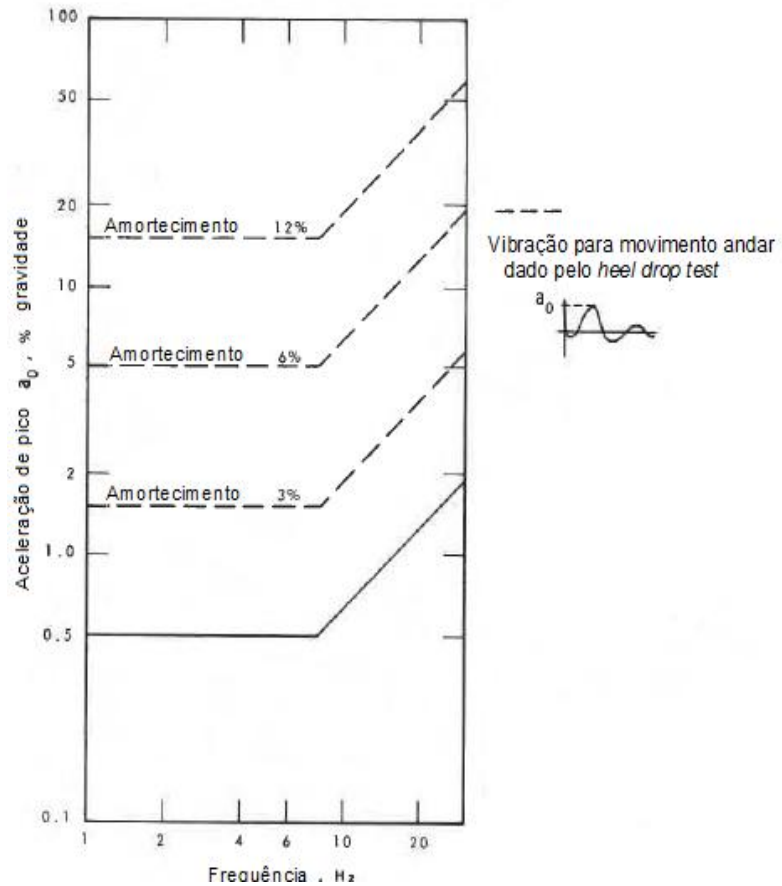


Figura 3-1 - Critérios para vibrações em residências, escritórios e salas de aulas [13]

3.2 A NORMA ISO 2631/ 2: 1989

A norma ISO 2631/ 2: 1989 [24] o limite para os critérios de aceitabilidade de vibrações é apresentado no gráfico, Figura 3-2. As curvas representam o limite para o qual as acelerações passam a ser perceptíveis, dependendo do tipo de uso que é dado à estrutura [25].

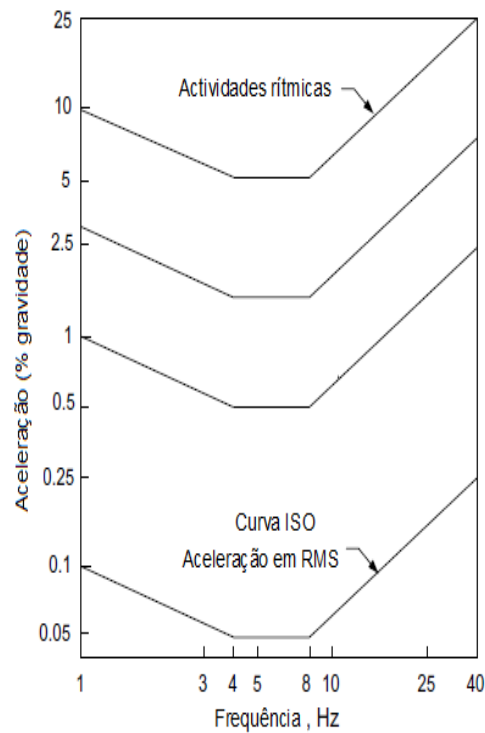


Figura 3-2 - Curva básica para acelerações verticais [26]

3.3 GUIA PRÁTICO DA AISC

O *American Institute of Steel Construction*, AISC, na série 11 do Steel Design Guide Series [14] elabora o critério recomendado para o dimensionamento a actividades rítmicas. Neste contexto, refere-se que vibrações em pavimentos de salões de dança podem ser um problema se a frequência do piso for menor que 10 Hz.

Para se determinar a importância dos locais sensíveis, é adoptado o critério do AISC - série 11, que utiliza valores acelerações limites da Tabela 2. A aplicação deste critério não resulta em problemas de fadiga.

Tabela 2 - Acelerações limites [27]

Locais	Aceleração limite (% g)
Escritórios ou residências	0.4-0.7
Ginásios	1.5-2.5
Actividades rítmicas	4-7

Capítulo 4

Modelação da Estrutura

4.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura em estudo é constituída por um piso térreo e dois pisos elevados, o primeiro piso destina-se a aulas de ginástica, e está dividido em seis compartimentos. O piso é correntemente solicitado pelas cargas induzidas por actividades rítmicas.

O piso em estudo tem o comprimento de 51,35 m e a largura igual a 29,80 m. Os vãos estão apoiados em oito pilares na direcção longitudinal e dois na direcção transversal. As vigas principais interiores são em caixão, Figura 4-2, e as vigas principais e secundárias nos bordos têm secções rectangulares. Os pilares têm secções rectangulares com comprimentos adoptados de 3,5 m para piso inferior e superior. A mesma altura foi adoptada para as paredes resistentes. A compartimentação do piso da laje não foi considerada, por se considerar que o seu peso não contribui para a sobrecarga da estrutura. Considerou-se a parede interior das caixas das escadas, por esta ter ligações à laje da estrutura.

Os materiais utilizados são Betão C 30/37 para a laje, vigas e pilares e Aço A500 NR para os respectivos elementos estruturais, Tabela 3.

Tabela 3 - Características do material betão C 30 / 37

Massa específica	2500 Kg/m^3
Módulo de elasticidade	30 GPa
Coefficiente de Poisson	0,2

A laje do piso tem espessura constante $e = 0,16$ m. As características geométricas das restantes secções são apresentadas na Tabela 4. Pretendendo-se modelar a estrutura para posterior análise dinâmica, interessa aferir o módulo de elasticidade dinâmico. Este é um parâmetro tradicionalmente incerto nas análises dinâmicas. Em situações em que as lajes são submetidas a excitações dinâmicas, o betão torna-se mais rígido do que quando submetido a cargas estáticas [1],[28].

Isto é devido ao facto de as tensões envolvidas neste tipo de acções dinâmicas serem muito baixas comparativamente às envolvidas em análises estáticas. O módulo de elasti-

cidade dinâmico do betão será maior que o usado em análises estáticas. Considerou-se para este estudo um aumento de 34% do módulo de elasticidade convencional [1].

Tabela 4 - Características geométricas das secções

		Secção rectangular		Secção em U		Inércia (m ⁴)	Área (m ²)		
		Largura (m)	Altura (m)	Banzo				Alma	
				Espessura (m)	Largura (m)	Espessura (m)	Largura (m)		
Vigas principais	VPT.1 (2.50x1.20)			0,3	2,5	0,35	1,04	0,1314	1,328
	V1.11 (0.30x1.20)	0,3	1,2					0,0281	0,312
Vigas secundárias	V1,3 (1.00x0.60)	1,0	0,6					7,10E-03	0,44
	V1,10 (0.25x0.70)	0,25	0,7					3,28E-03	0,135
	VP	1,0	1,04					0,0937	1,04
Pilar baixo	Secção 1x1	1,0	1,0					0,0833	1,0
Pilar cima	Secção 0,5x0,5	0,5	0,5					5,21E-03	0,5

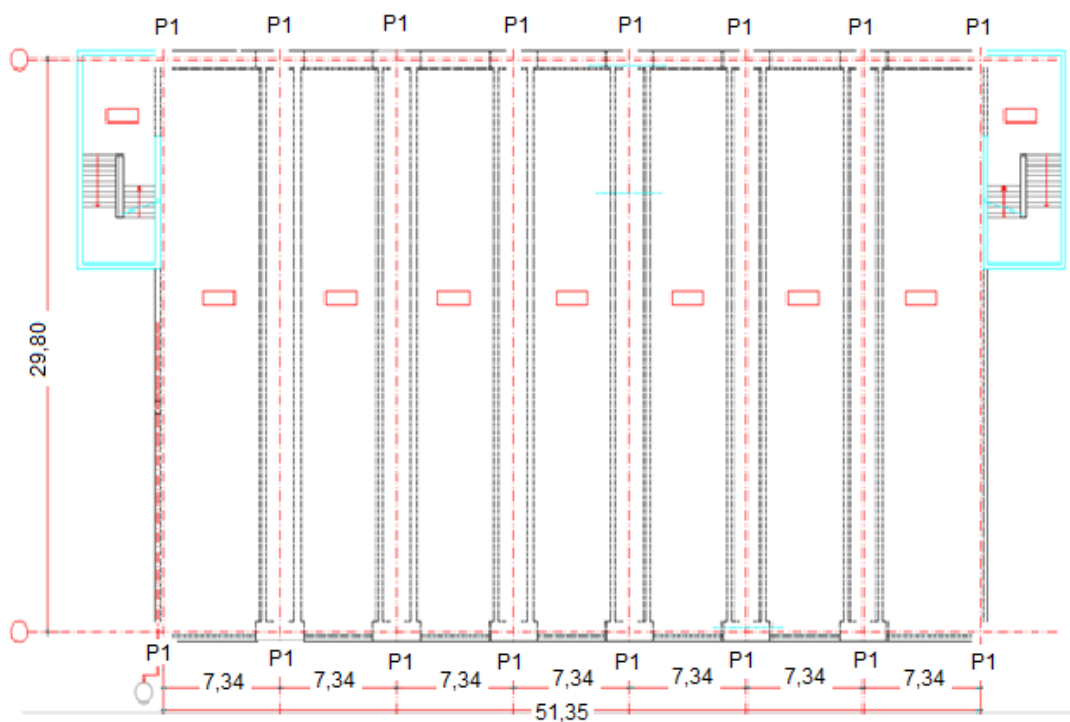


Figura 4-1 - Estrutura do pavimento do edifício.

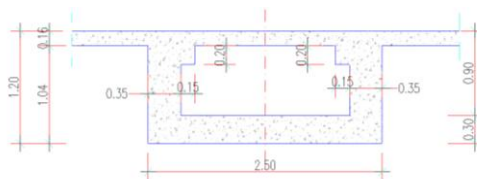


Figura 4-2 - Secção da viga transversal, ao longo do vão.

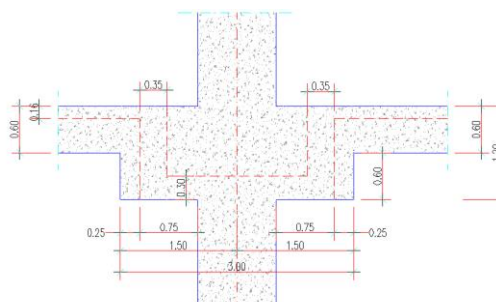


Figura 4-3 - Secção da viga transversal sobre pilar.

4.2 DEFINIÇÕES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Utilizando o programa SAP2000 [29] foi possível modelar os elementos estruturais, salvaguardando uma boa aproximação ao comportamento real da estrutura.

No SAP2000, o elemento de barra usa a formulação tridimensional viga - coluna que inclui os efeitos do momento flector bi - axial (flexão desviada), torção, deformação axial e deformação bi axial. Foram aplicados *Join offsets* nas ligações. Esta função é útil, por exemplo, no caso em estudo, para modelar vigas e pilares quando o eixo da viga não intersecta o centro do pilar. A Figura 4-4 mostra em alçado e em planta as ligações comuns em que as vigas exteriores têm certa excentricidade para alinhar com a parte exterior do edifício.

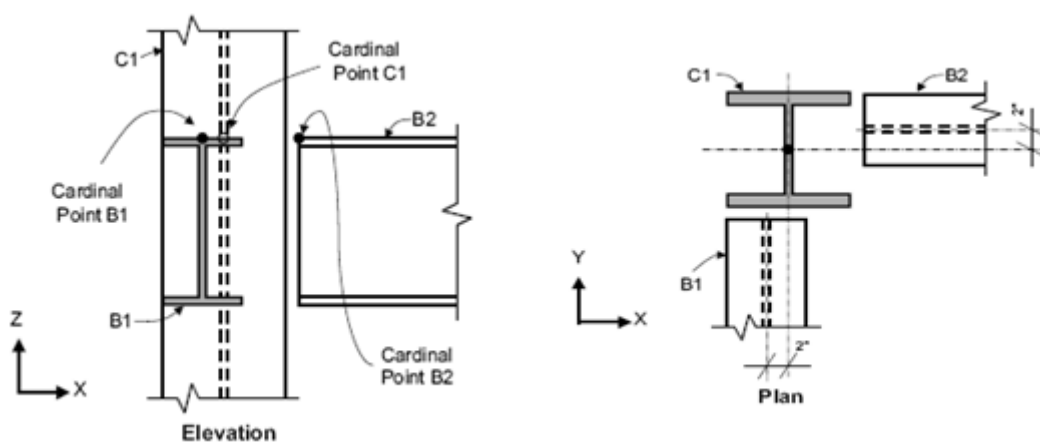


Figura 4-4 - Ligações entre elementos definidos no SAP2000 [29]

Os elementos *shell* são definidos usando a formulação dos elementos finitos quadrangulares ou triangulares e combina o comportamento à flexão de uma membrana e placa. Cada elemento tem coordenadas locais para definir as propriedades dos materiais e condições de carregamento. E também pode ser carregado por gravidade e por cargas distribuídas em qualquer direcção. A integração numérica em quatro pontos é utilizada para a rigidez do elemento.

A estrutura foi modelada utilizando elemento shell para laje e elemento de barra para os pórticos. Teve-se o cuidado de usar *offset* a partir do eixo neutro das secções de vigas para se ter em conta a excentricidade nas ligações viga, pilar e laje.

Sugere-se que os pilares sejam modelados com o seu comprimento real e com continuidade no piso [28] . E que as extremidades sejam encastradas ou fixas, para este caso optou-se por um modelo com pilares sobre apoios encastrados.

Na Tabela 5 são apresentados o número de barras utilizadas para o modelo em estudo, os seus respectivos comprimentos e peso total.

Tabela 5 - Quantidade de elementos utilizados no modelo

Secção	Tipo de elemento	Número de partes	Comprimento total m	Peso total KN
VPT.1(2.50x1.20)	Barra	131	178,8	5936,16
V1,3(1.00x0.60)	Barra	44	33,38	367,18
V1,10 (0.25x0.70)	Barra	44	33,38	112,658
VP	Barra	48	36	936
V1.11(0.30x1.20)	Barra	76	59,6	464,88
Pilar	Barra	16	40	942,525
Pilar2	Barra	16	40	250
Parede	Shell			522,75
Laje	Shell			6124,496

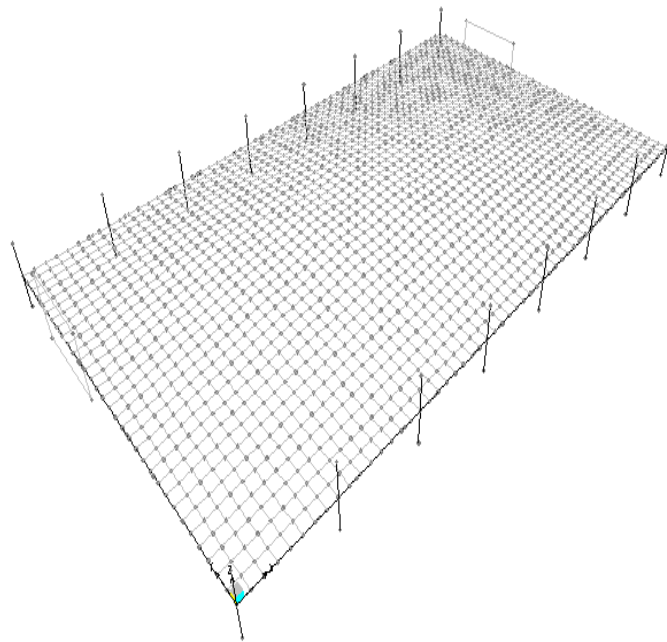


Figura 4-5 - Modelo estrutural adoptado para o piso do edifício em análise, Sap2000

4.3 REFINAÇÃO DAS MALHAS DOS ELEMENTOS FINITOS E SIMPLIFICAÇÃO DO MODELO

Realizou-se a análise modal para se obterem as frequências naturais e os modos de vibração do modelo da estrutura. O tipo de análise utilizado determina os modos de vibração e frequências de sistemas não amortecidos de vibração livre. A massa foi distribuída e representada automaticamente pelo programa SAP2000. A formulação é a seguir referida.

As malhas do modelo são quadrangulares, com dimensões diferentes nos dois lados. À medida que se foi refinando a malha obtiveram-se dimensões aproximadamente iguais nos lados da malha e um aumento dos graus de liberdade. Observa-se pelo gráfico, Figura 4-6 que as frequências convergem à medida que os graus de liberdade aumentam. Como o comportamento dos modos de vibração são os mesmos para os maiores graus de liberdade, visto que para graus de liberdade superiores a 1917 não se obteve melhorias na solução, optou-se por modelar para frequência fundamental 4,92Hz. Tem-se a vantagem de diminuir o esforço computacional e o tempo necessário durante as análises numéricas. Na Figura 4-7 tem-se o modelo estrutural, as dimensões das malhas 0,92x0,93m são iguais para todos os elementos.

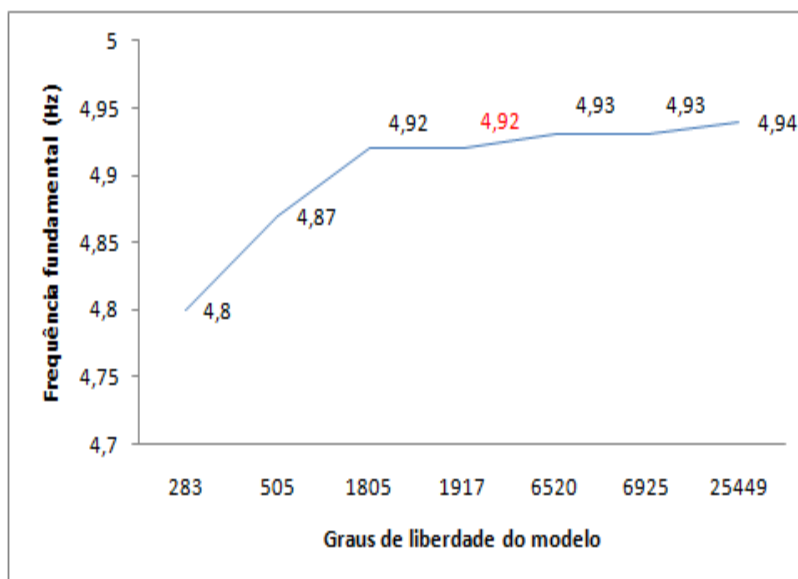


Figura 4-6 - Convergência da frequência natural para vários graus de liberdade

Visto que as cargas que interessam para a análise dinâmica actuam numa parte da estrutura, optou-se por seccionar a estrutura em duas partes, simplificando assim o modelo. O comportamento dinâmico não se altera significativamente porque o modo de vibração fundamental tem a mesma deformada.

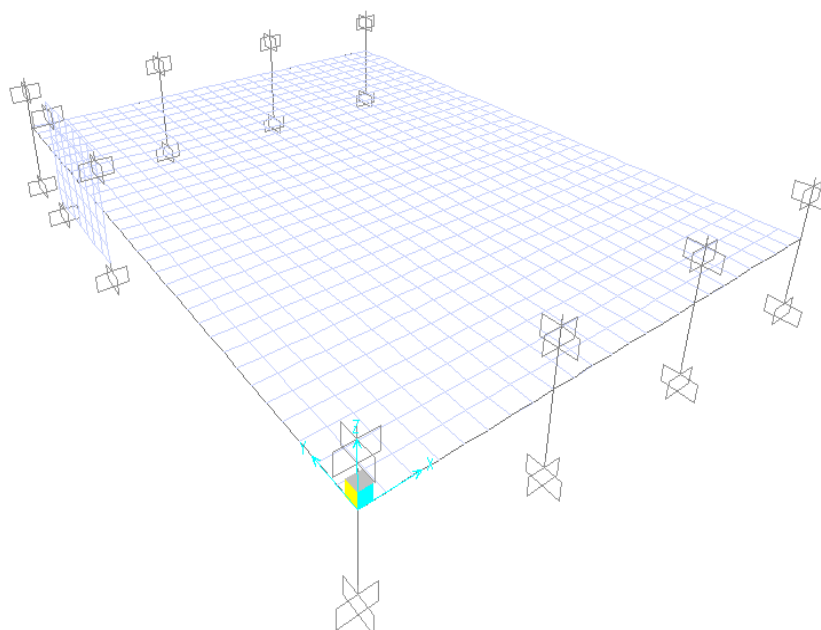


Figura 4-7 - Modelo estrutural simplificado, Sap 2000

Capítulo 5

SISTEMAS DE CONTROLO DE VIBRAÇÕES

O controlo estrutural baseia-se na alteração das características dinâmicas da estrutura, através de adição de dispositivos externos ou forças externas para responder aos efeitos dinâmicos.

Os sistemas de controlo estrutural são classificados em activo, semi-activo, híbrido e passivo.

- **Sistemas Activos**

Os sistemas activos [5] são representados por amortecedores de massa activa, cabos activos, diagonais activas ou actuadores piezoeléctricos. Estes sistemas dependem de uma fonte de energia para poderem funcionar e de dispositivos que obtenham as respostas da estrutura para, em função destas, gerar uma força de controlo. Têm um custo considerável em termos de instalação, manutenção e de funcionamento pelo facto de consumirem energia externa.

- **Sistemas Semi – Activos**

Os sistemas semi – activos [5] são representados por dispositivos de rigidez variável, amortecedores de atrito variável, amortecedores viscosos de orifício variável e amortecedores de viscosidade variável. Estes sistemas não adicionam energia à estrutura, mas possuem propriedades que, controladas de forma óptima, reduzem a resposta do sistema estrutural. Têm a vantagem de possuir a adaptabilidade dos controladores activos sem depender grandes quantidades de energia, podendo em muitas aplicações funcionar com baterias de emergência, no caso de falta de energia.

- **Sistemas Híbridos**

O controlo através destes sistemas reúne as características de controlo activo e passivo. A vantagem relativamente aos dois sistemas anteriores reside no facto de que este sistema exige forças de magnitudes muito pequenas nos amortecedores, o que gera uma considerável redução no custo, para além de um desempenho mais eficiente comparado ao sistema passivo, uma vez que amplia a faixa de frequência em que o mesmo funciona de forma eficiente. Outro aspecto importante é que, na falta de energia, a sua componente passiva oferece certo grau de protecção à estrutura.

- **Sistemas passivos**

Os amortecedores dos sistemas passivos dissipadores podem ser divididos em amortecedores friccionais, visco - elásticos, viscosos e histeréticos [8]. Estes distinguem-se pelo modo de dissipação de energia.

O funcionamento do amortecedor friccional assenta na dissipação de energia através do atrito entre várias superfícies de deslizamento do aparelho. O dispositivo consiste numa chapa de *gousset* entre as faces do perfil de contraventamento, a qual é seccionada em duas partes, permitindo através do ajuste da tensão nos parafusos, o atrito entre as diversas faces, Figura 5-1.

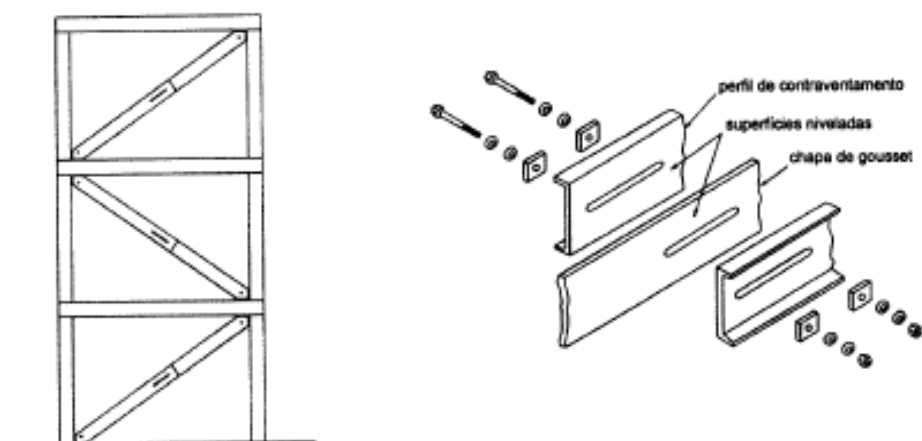


Figura 5-1 - Representação de amortecedor friccional e dispositivo de chapa gousset [21]

Os amortecedores visco - elásticos [8] são constituídos por chapas metálicas unidas por um material com comportamento visco - elástico, sendo a energia comunicada pelas acções exteriores, dissipada por efeito da deformação por corte do material visco - elástico, Figura 5-2. O processo de dissipação de energia é atingido quando o amortecedor se movimenta com as vibrações da estrutura, convertendo a energia mecânica em energia térmica.

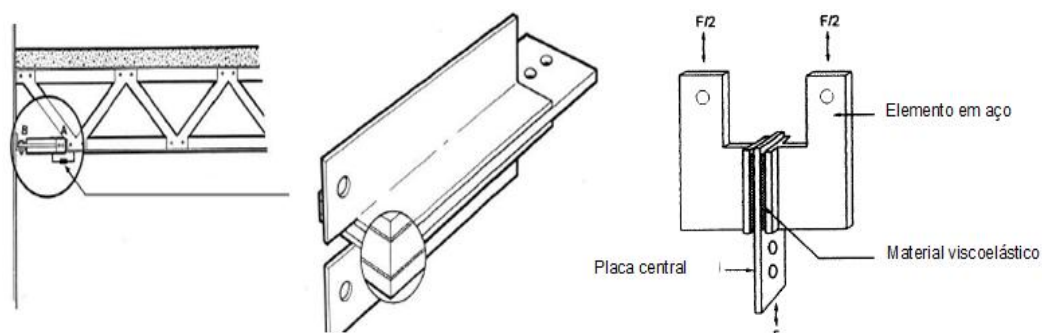


Figura 5-2 - Representação de amortecedor visco - elástico [30] [21]

Os amortecedores podem ainda ser desenvolvidos mediante a utilização de fluidos viscosos [30], sendo então designados amortecedores de fluido viscoso. Neste caso, a dissipação de energia dá-se devido à passagem forçada de um determinado fluido por um ou vários orifícios. Este processo consiste na conversão de energia mecânica em calor, enquanto um pistão cilíndrico se move através da substância, Figura 5-3.

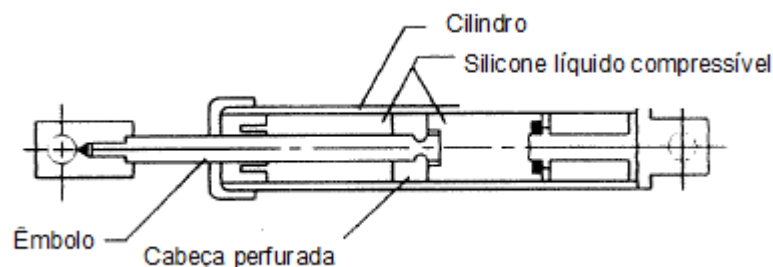


Figura 5-3 - Amortecedor fluido viscoso [21]

O isolamento de base tem o principal objectivo, reduzir os esforços induzidos na estrutura pela acção sísmica. Esta redução é obtida isolando a estrutura ao nível da base, modificando o seu período natural de vibração baixando a rigidez horizontal em geral [30].

Refira-se, no entanto, que um sistema de isolamento de base pode também ter aspectos negativos, por exemplo, a possível ocorrência de grandes deslocamentos ao nível da base, e fazer com que a frequência fundamental da estrutura seja muito baixa, devido à pequena rigidez horizontal dos blocos de apoio, aumentando a sua vulnerabilidade à acção do vento [21]. A Figura 5-4 mostra a título de exemplo um sistema de isolamento de base aplicado numa estrutura. O bloco representado esquematicamente na Figura 5-5 é de elastómero cintado com núcleo de chumbo utilizado num sistema de isolamento de base. O núcleo de chumbo tem como objectivo introduzir a possibilidade de dissipação de energia, capacidade que o elastómero por si só não possui.

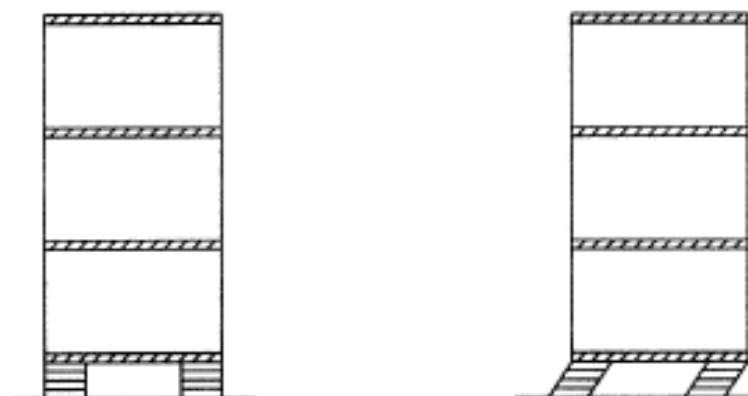


Figura 5-4 - Representação de isolamento de base [21]

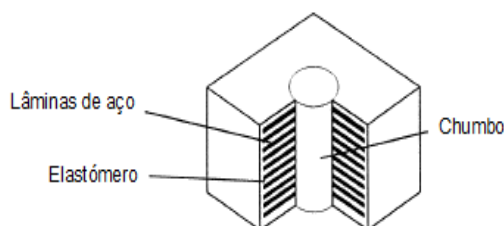


Figura 5-5 - Representação do elastómero cintado [21]

Finalmente, refere-se o uso de TMD ("Tuned mass damper"). O princípio de funcionamento do TMD é a vibração desfasada do sistema de amortecimento relativamente ao sistema estrutural, resultando na redução da amplitude da resposta devido a dissipação de energia sob a forma de calor. Portanto, os movimentos relativos dos dois sistemas aumentam o amortecimento efectivo.

Para funcionarem correctamente, estes têm de estar devidamente sintonizados para a frequência de cada modo de vibração que contribui para a determinação da resposta, podendo registar – se uma significativa perda de eficiência para pequenos desvios de calibração. Portanto, deve-se adoptar pelo menos tantas unidades de TMD's quantos modos distintos se queiram controlar e estes devem ser devidamente calibrados. Um exemplo de aparelhos utilizados para o controlo de vibração de lajes é apresentado na Figura 5-6.

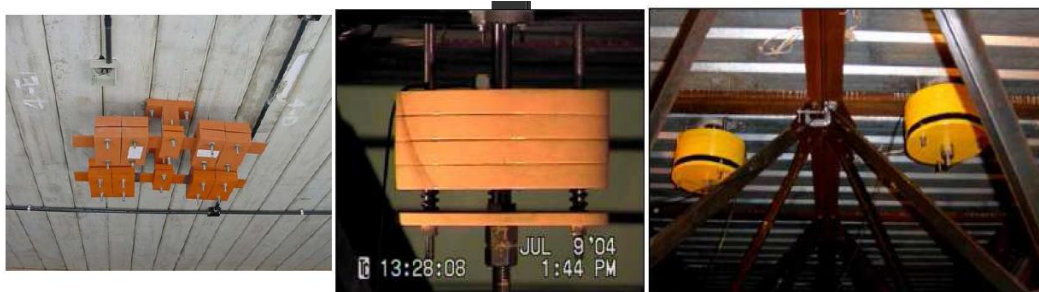


Figura 5-6 - Representação a), b) e c) de TMD's em lajes [8], [19]

A Figura 5-6 mostra uma solução de controlo composta por TMD's formados por conjuntos de massas simétricas fixas à estrutura por intermédio de barras de aço, as quais é possível ajustar à frequência natural de cada dispositivo por variação do vão da barra do dispositivo. Pode-se observar pela Figura 5-6 a), que os TMD's estão sintonizados para frequências diferentes. No trabalho de Varela [20], foram instalados dois amortecedores, Figura 5-6 b) e c), no centro da laje, com taxa de amortecimento de 1,5%. O ajuste de frequência foi realizado sintonizando a frequência natural do primeiro modo da estrutura, através da alteração do comprimento efectivo das molas e da adição e remoção dos discos de massa.

No controlo de vibrações em pontes pedonais tem-se dado especial atenção à utilização de TMD's para controlo de vibrações verticais e laterais. Um conjunto de TMD's foi utilizado na ponte pedonal Pedro e Inês em Coimbra, sintonizados para a frequência de vibração lateral de cerca de 0,9 Hz. Foram também implementados vários TMD's para o controlo de vibrações verticais, na medida em que a estrutura apresenta um conjunto de frequências naturais na gama de frequências susceptíveis de serem excitadas pelas acções induzidas por actividades humanas [8]. Esta aplicação corresponde à primeira implementação de TMD's em estrutura desta natureza em Portugal.

5.1 CONTROLO ESTRUTURAL

5.1.1 Controlo Passivo

Com o objectivo de se reduzir os níveis de vibração excessivos nas estruturas, utilizando métodos que não recorrem a fontes de energia exterior, adopta-se o controlo passivo de energia. Tem-se a vantagem de melhorar o desempenho estrutural e aumentar os níveis de conforto dos seus utilizadores.

A redução é feita à custa da absorção da energia mecânica por parte da massa passiva e a deformação do aparelho. A massa adicional é relativamente pequena comparada com a massa da laje.

- **Aplicação de um Supressor de Vibrações**

Um supressor de vibrações é basicamente uma massa adicional ligada ao sistema principal através de uma mola. Este tipo de amortecedor é eficiente se o sistema é excitado por uma força periódica de frequência constante, especialmente quando esta se aproxima à frequência do sistema. A Figura 5-7 representa um sistema de massa M e rigidez k_1 , excitada por uma força $f(t)$. Uma massa adicional m é ligada ao sistema principal através de uma mola com rigidez k_2 e amortecimento C .

Considerando que o amortecimento é nulo e se a frequência natural do amortecedor for igual à frequência da força, a massa do sistema principal não vibrará.

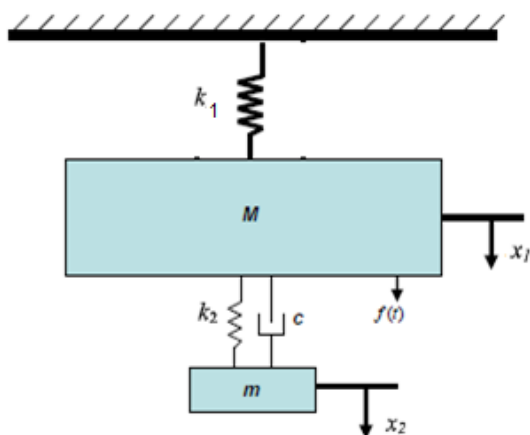


Figura 5-7 - Modelo de massa M e supressor de vibrações com massa m [30]

Considere-se as seguintes equações de movimento.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = F \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad 5.1.1$$

A solução do sistema de equações é dada pela seguinte relação,

$$\begin{cases} x_1 = a_1 \sin(\omega t) \\ x_2 = a_2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad 5.1.2$$

Substituindo as equações e dividindo por $\sin(\omega t)$, se $\sin(\omega t) \neq 0$ tem-se

$$\begin{cases} \frac{a_1}{x_{st}} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}\right) \left(1 + \frac{k_2}{k_1} - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) - \frac{k_2}{k_1}} \\ \frac{a_2}{x_{st}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}\right) \left(1 + \frac{k_2}{k_1} - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) - \frac{k_2}{k_1}} \end{cases} \quad 5.1.3$$

em que x_{st} , é o deslocamento estático.

ω_1 - Frequência do sistema principal de massa $M = m_1$

ω_2 - Frequência do sistema adicional de massa $m = m_2$

Observando a primeira equação do sistema 5.1.3, verifica-se que a amplitude a_1 é nula quando a frequência do amortecedor é igual à frequência da força.

Suponha-se que o amortecedor é dimensionado para reduzir a amplitude do sistema principal em ressonância. Se for $\omega_1 = \omega_2$ o equivalente a $\frac{k_2}{k_1} = \frac{m_2}{m_1}$, o sistema pode ser escrito da seguinte forma,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a_1}{x_{st}} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right)\left(1 + \frac{m_2}{m_1} - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) - \frac{m_2}{m_1}} \\ \frac{a_2}{x_{st}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}\right)\left(1 + \frac{m_2}{m_1} - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right) - \frac{m_2}{m_1}} \end{array} \right. \quad 5.1.4$$

Ao adicionar o TMD o sistema passa a ter duas frequências de ressonância por este ter dois graus de liberdade. As novas frequências de ressonância localizam-se em pontos imediatamente à esquerda e à direita da frequência de ressonância para um grau de liberdade.

A frequência de ressonância depende da relação de massas, $\mu = \frac{m_2}{m_1}$.

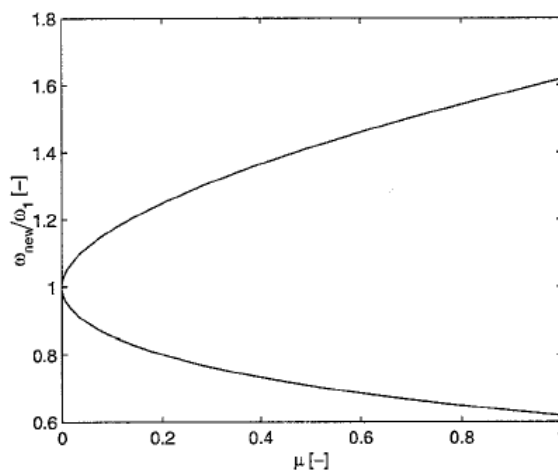


Figura 5-8 - Relação entre o rácio de frequências e o rácio de massas [31]

Observa-se que as frequências de ressonância afastam-se a medida que a relação entre massas aumenta. Uma maior relação entre massas pode ser vantajoso nos casos em que a frequência da força oscila próximo da frequência a que o amortecedor foi sintonizado. A massa do amortecedor também influencia a amplitude deste, sendo menor para maiores massas. Este aspecto é relevante para situações em que se pretende instalar amortecede-

dores em locais em que não são permitidos grandes deslocamentos deste por serem pouco espaçosos.

- **Aplicação de um TMD**

O modelo do sistema é representado por uma massa principal m_1 ligada ao exterior por uma mola com rigidez K_1 e um amortecedor constante C_1 , à qual está ligada uma massa adicional m_2 através de uma mola de rigidez K_2 e um amortecedor constante C_2 , Figura 5-9.

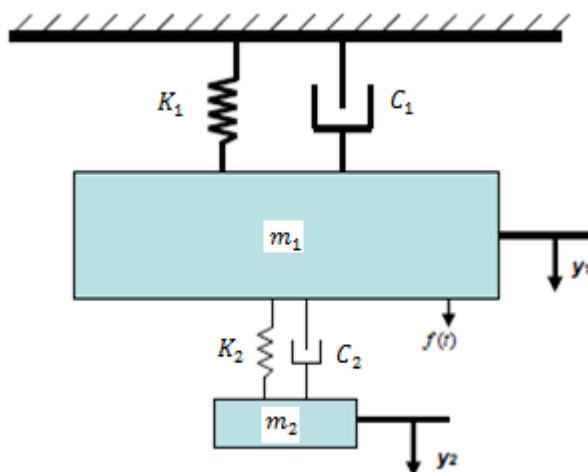


Figura 5-9 - Modelo de massa m_1 e um TMD com massa m_2 [30]

Se a massa estiver ligada ao sistema principal através de uma mola e um amortecimento constante, a gama de frequências em que a resposta é reduzida pode ser consideravelmente aumentada. A equação de movimento do sistema é representada pelo seguinte sistema de equações,

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2(x_1 - x_2) + k_1 x_1 = F \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad 5.1.5$$

A solução do sistema de equações é dada pela seguinte relação,

$$\begin{cases} x_1 = a_1 \sin(\omega t - \varphi_1) \\ x_2 = a_2 \sin(\omega t - \varphi_2) \end{cases} \quad 5.1.6$$

Determinam – se as amplitudes a_1 e a_2 escrevendo a equação 5.1.6 na forma complexa.

$$\begin{cases} x_1 = X_1 e^{J\omega t} \\ x_2 = X_2 e^{J\omega t} \end{cases} \quad 5.1.7$$

Substituindo o sistema 5.1.7 na equação de movimento resulta na seguinte equação,

$$\begin{cases} -m_1\omega^2 X_1 + j\omega c(X_1 - X_2) + k_2(X_1 - X_2) + k_1 X_1 = F \\ -m_2\omega^2 X_2 + j\omega c(X_2 - X_1) + k_2(X_2 - X_1) = 0 \end{cases} \quad 5.1.8$$

Convertendo o sistema de equações numa expressão de X_1 para valores absolutos deste, obtém-se a seguinte solução para a amplitude do sistema principal.

$$\frac{a_1}{F} = \sqrt{\frac{(k_2 - m_2\omega^2)^2 + \omega^2 c^2}{\left[(-m_1\omega^2 + k_1)(-m_2\omega^2 + k_2) - m_2\omega^2 k_2\right]^2 + \omega^2 c^2(-m_1\omega^2 + k_1 - m_2\omega^2)^2}} \quad 5.1.9$$

Substituindo x_{st} , deslocamento estático e μ e definindo novas variáveis, a expressão pode ser escrita da seguinte forma [23],

$$\frac{a_1}{x_{st}} = \sqrt{\frac{\left(2\frac{c}{C}j\right)^2 + (j^2 - \alpha^2)^2}{\left(2\frac{c}{C}j\right)^2 (j^2 - 1 + \mu j^2)^2 + [\mu\alpha^2 j^2 - (j^2 - 1)(j^2 - \alpha^2)]^2}} \quad 5.1.10$$

Rácio de frequência natural

$$\alpha = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad 5.1.11$$

Rácio de frequência de força

$$j = \frac{\omega}{\omega_1} \quad 5.1.12$$

Coefficiente de amortecimento

$$C = 2m_2\omega_1 \quad 5.1.13$$

O objectivo é encontrar a combinação de f e c/C para uma dada relação μ que resulte numa mínima resposta dinâmica. A seguir será apresentado um critério de optimização para uma estrutura com N graus de liberdade.

5.1.2 Determinação dos Parâmetros Óptimos pelo Método de Jangid

A metodologia consiste em variar o coeficiente de amortecimento ξ , a largura da banda βL e a razão de frequência α para uma dada razão de massa μ e n números de TMDs de forma a que a resposta máxima tenha o menor valor [30][29][28][19].

Considere-se o sistema principal representado na Figura 5-10, no qual estão instalados n TMDs com características dinâmicas diferentes, os parâmetros do i – ésimo TMD são massas m_i , amortecimento c_i e rigidez k_i .

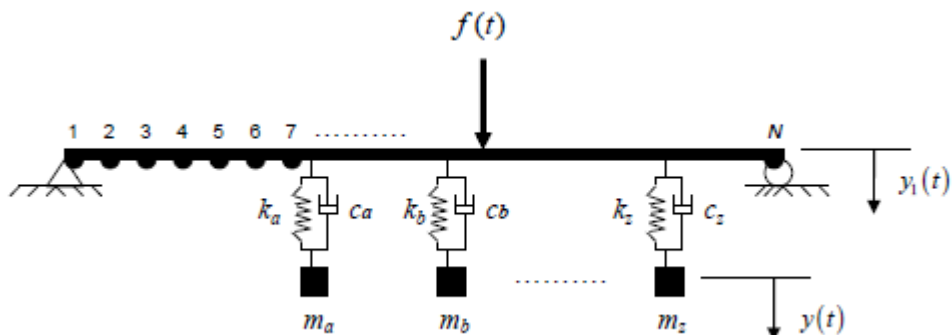


Figura 5-10 - Modelo de viga simplesmente apoiada TMD's aplicados. [30]

De acordo com [19],[30], as expressões para o cálculo dos parâmetros óptimos dos amortecedores são dados pelas expressões.

$$\xi' = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)(1-0,5\mu)}} + (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\mu} \left\{ a_4 \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1 \right) + a_5 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) + a_6 (\sqrt{n} - 1) \right\} \quad 5.1.14$$

$$\beta_L = (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\mu} \left\{ a_4 \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1 \right) + a_5 (n - 1) + a_6 (\sqrt{n} - 1) \right\} \frac{1}{\sqrt{n}} \quad 5.1.15$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{1-0,5\mu}}{1+\mu} + (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\mu} \left\{ a_4 \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1 \right) + a_5 (n - 1) + a_6 (\sqrt{n} - 1) \right\} \frac{1}{\sqrt{n}} \quad 5.1.16$$

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\mu}}(1+\mu) + (a_1 + a_2\sqrt{\mu} + a_3\mu)\sqrt{\frac{1}{\mu}} \left\{ a_4 \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1 \right) + a_5 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) + a_6 \left(\frac{1}{n\sqrt{n}} - 1 \right) \right\} \quad 5.1.17$$

Os valores dos parâmetros são dados pela Tabela 6.

Tabela 6 - Valores dos parâmetros para o cálculo dos valores óptimos [30]

Parâmetros	ξ'	β_L	α	R_{\max}
a1	0,5474	0,42113	-0,00241	0,2985
a2	0,1038	0,04479	0,72152	-0,0078
a3	-0,4522	-0,38909	-0,4397	0,2355
a4	0,7604	-0,73518	-0,66385	-0,0442
a5	0,3916	-0,11866	-0,01138	0,6265
a6	0,0403	4,86139	0,99522	0,4789

O cálculo da frequência média dos amortecedores é dado pela seguinte relação,

$$\alpha_{\text{óptimo}} = \frac{\omega_T}{\omega_{est}} \quad 5.1.18$$

Em que $\alpha_{\text{óptimo}}$ é determinado pela relação anterior e ω_{est} é a frequência natural da estrutura.

A frequência ω_i de cada amortecedor é dada pela seguinte expressão,

$$\omega_i = \omega_T \left[1 + \left(i - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\beta_L}{n-1} \right] \quad 5.1.19$$

Fixando-se a rigidez é possível determinar as massas de cada TMD, pela seguinte expressão,

$$m_i = \frac{K}{\omega_i^2} \quad 5.1.20$$

A massa resultante do sistema satisfaz a seguinte condição, em que M é a massa total do sistema.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{M} \quad 5.1.21$$

A constante de amortecimento c_i para cada massa m_i é determinada pela seguinte expressão,

$$m_i = 2m_i \xi_{\text{óptimo}} \omega_i \quad 5.1.22$$

Estudos mostram que o método de Jangid é eficazmente empregue no controlo estrutural [30].

Capítulo 6

Análise Dinâmica

6.1 ANÁLISE MODAL

Para um sistema estrutural submetido a um carregamento dinâmico é possível escrever-se matematicamente o sistema de equações que regem o movimento do sistema:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad 6.1.1$$

em que M é matriz de massa, C é a matriz de amortecimento do sistema, K é a matriz de rigidez e P é força com variação temporal.

Sujeito às condições iniciais $\underline{u}(0) = u_0$ e $\dot{\underline{u}}(0) = v_0$

A análise modal envolve a resolução do seguinte problema característico

$$[k - \omega^2 M]\varphi = 0 \quad 6.1.2$$

As quantidades ω^2 , são valores característicos que indicam os quadrados das frequências para vibrações livres, e os vectores próprios φ correspondem às formas dos modos de vibração.

A solução não trivial é possível só se o $Det([k - \omega^2 M]) = 0$.

Resolvendo o determinante obtém-se a equação algébrica dos N graus de liberdade para os parâmetros das frequências ω^2 . As N raízes $\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2, \dots, \omega_n^2$ da equação representam os quadrados das frequências dos N modos de vibração que são possíveis na estrutura. O modo com menor frequência é o primeiro modo de vibração. Pode ser demonstrado que para valores reais, simétricos e positivos das matrizes de massa e rigidez que verificam as condições estáticas e de fronteira, têm as raízes das frequências reais e positivas.

Através da seguinte relação,

$$u = \theta \cdot q = \sum_{i=1}^k q_i \cdot \theta^{(i)} \quad 6.1.3$$

Utilizando a matriz modal $\theta = [\theta^{(1)}, \dots, \theta^{(k)}]$ (modos normalizados com a matriz de massa formam as colunas desta matriz) chega-se a

$$\tilde{P}_i = \theta^T \cdot P \cdot q_0 = \theta^{-1} \cdot u_0 = \theta^T \cdot M \cdot u_0, \quad \tilde{v}_i = \theta^{-1} \cdot v_0 = \theta^T \cdot M \cdot v_0$$

e usando $u = \theta \cdot q$ obteve-se sistema de equações definidas pela Fórmula 6.1.4,

$$\ddot{q}_i + 2\omega_n^{(i)} \varepsilon_i \dot{q}_i + \omega_n^{(i)2} q_i = \tilde{P}_i, \quad i = 1, \dots, k \quad 6.1.4$$

com condições iniciais $q_i(0) = q_{i0}, \dot{q}_i(0) = \dot{q}_{i0}, i = 1, \dots, k$

Depois de resolver $q_i(t), i = 1, \dots, k$ (coordenadas generalizadas) obtém-se $u(t)$.

O número dos modos de vibração necessários para descreverem o comportamento da estrutura foi determinado tendo em conta os factores de participação modal e as frequências associadas a cada modo. Respostas associadas às maiores frequências amortecem-se rapidamente e não são excitadas pelas frequências típicas de actividades humanas.

Os cálculos foram efectuados pelo programa SAP2000 que inicialmente monta a matriz de rigidez e a matriz de massa da estrutura. A determinação das frequências e modos de vibração foi feita de acordo com a Fórmula 6.1.2. A participação modal para os modos 1-12 é representada graficamente, Figura 6-1. Nota-se que o primeiro modo de vibração é o mais significativo assim como os restantes modos ímpares, em que o factor de participação modal diminui a medida que a frequência aumenta.

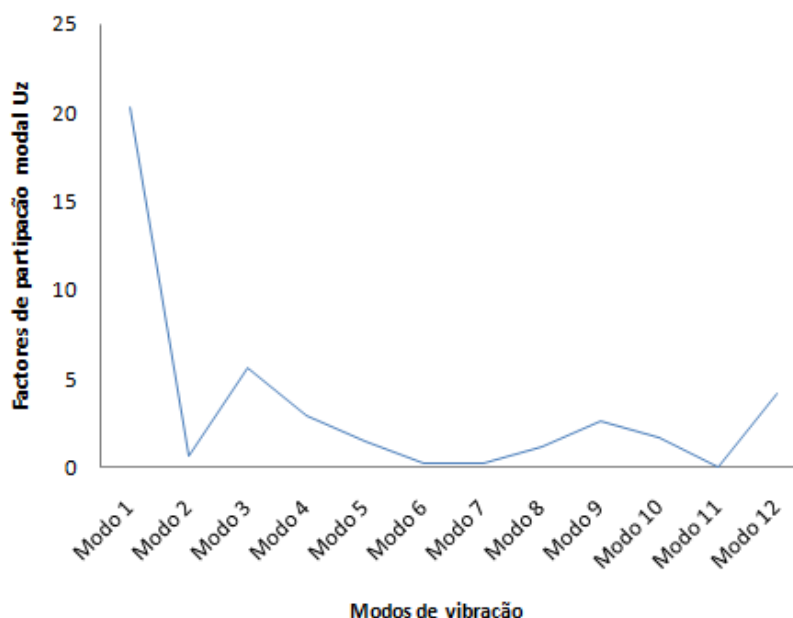


Figura 6-1 - Factores de participação modal para o grau de liberdade Uz

A Tabela 7 apresenta os modos de vibração obtidos para o modelo estrutural simplificado.

Tabela 7 - Modos de vibração obtidos, para um modelo estrutural simplificado

Modos	Período	Frequência	Frequência Natural
	s	Hz	rad/s
Modo 1	0,20	5,03	31,58
Modo 2	0,18	5,51	34,63
Modo 3	0,16	6,37	40,03
Modo 4	0,12	8,41	52,84
Modo 5	0,10	10,16	63,83
Modo 6	0,09	11,37	71,44
Modo 7	0,09	11,48	72,10
Modo 8	0,09	11,66	73,27
Modo 9	0,08	13,09	82,22
Modo 10	0,07	13,71	86,13
Modo 11	0,07	13,82	86,81
Modo 12	0,07	13,86	87,07

Observa - se que a frequência fundamental do modelo simplificado 5,03 Hz é maior comparativamente a frequência do modelo estrutural 4,92 Hz. Como se pretende estudar o modelo simplificado, a frequência fundamental utilizada nas seguintes análises é 5,03 Hz.

Na Figura 6-2 à Figura 6-7, são apresentados os modos de vibrações representativos para este estudo.

De notar que a única translação activa é a vertical, considerando que as ligações entre os elementos verticais e horizontais são suficientemente rígidos, para cargas dinâmicas humanas a que a estrutura está sujeita.

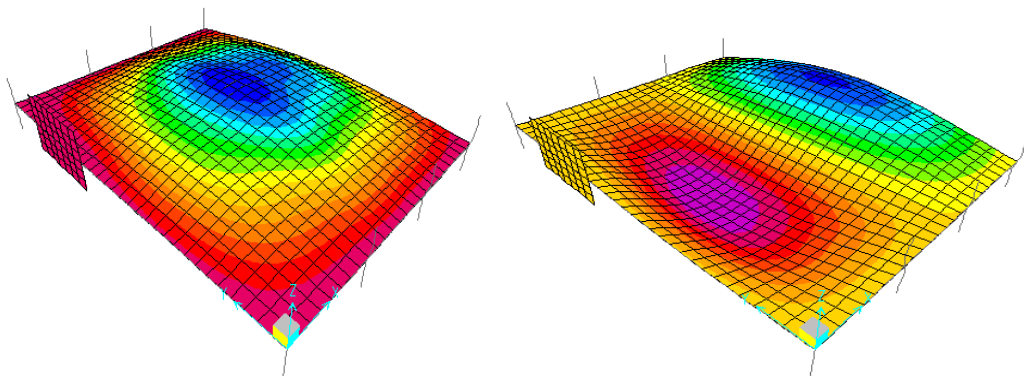


Figura 6-2 - Modo de vibração referente ao a) modo 1 e b) modo 2

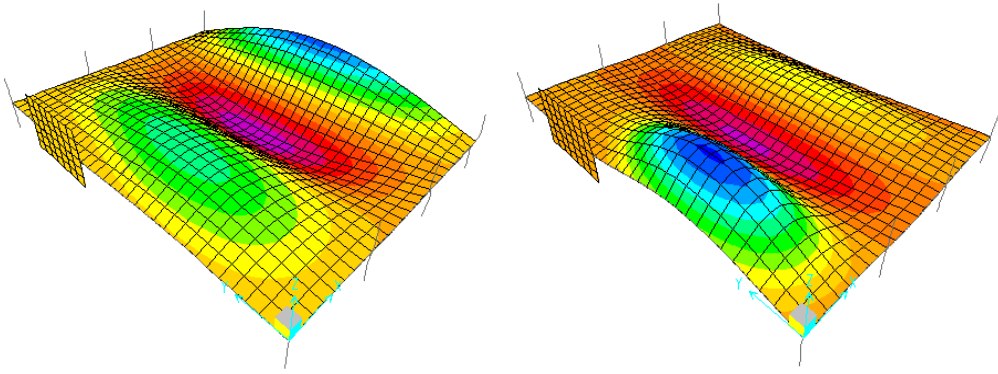


Figura 6-3 - Modo de vibração referente ao a) modo 3 e b) modo 4

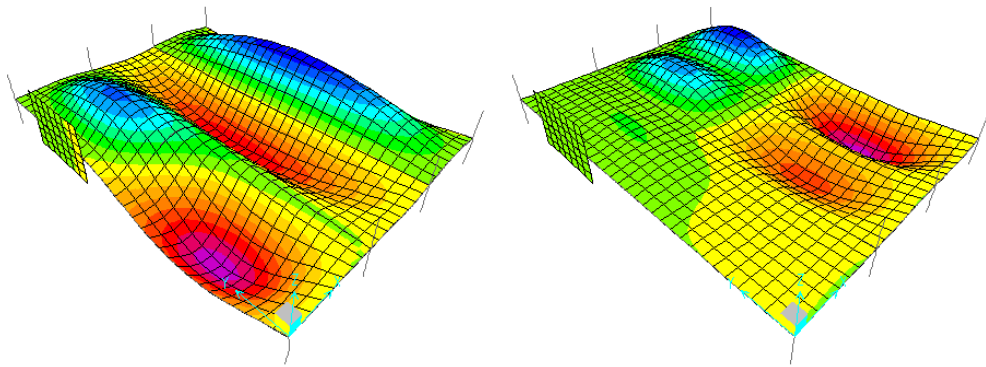


Figura 6-4 - Modo de vibração referente ao a) modo 5 e b) modo 6

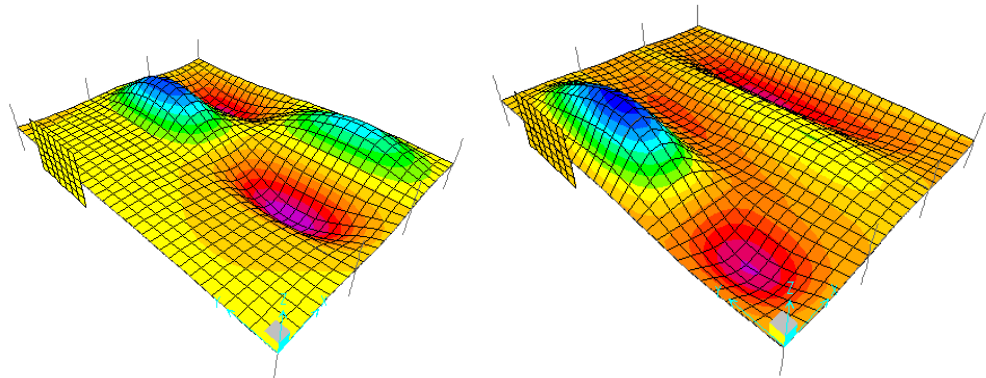


Figura 6-5 - Modo de vibração referente ao a) modo 7 e b) modo 8

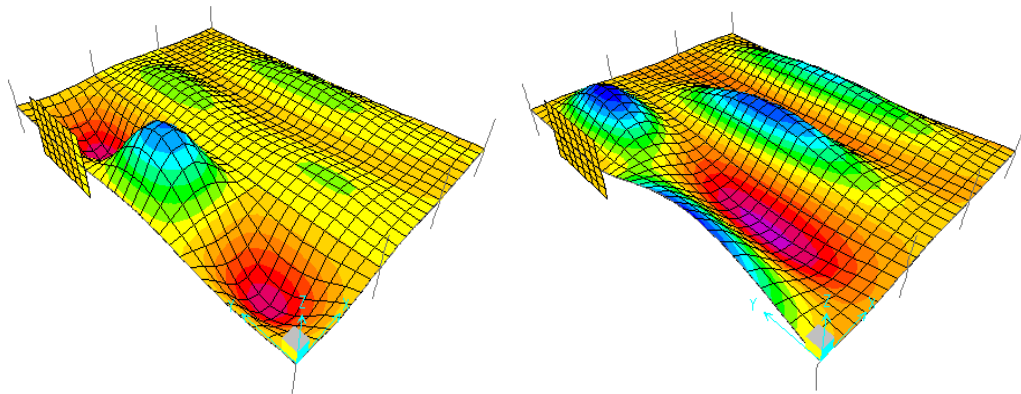


Figura 6-6 - Modo de vibração referente ao a) modo 9 e b) modo 10

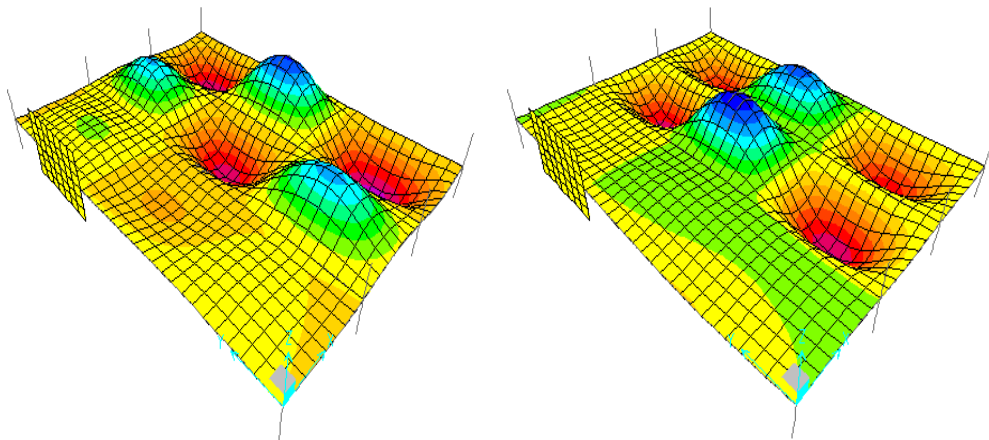


Figura 6-7 - Modo de vibração referente ao a) modo 11 e b) modo 12

6.2 ESCOLHA PONTOS CRÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO MÁXIMA

Como foi referido atrás, Figura 6-1, os três primeiros modos são os mais importantes, por participarem significativamente no deslocamento vertical da laje.

Identificaram-se através da análise modal os nós da laje com maiores deslocamentos verticais para os três primeiros modos de vibração. Os nós da laje foram escolhidos para posterior análise comparativa das acelerações destes relativamente às acelerações limites de alguns regulamentos encontrados na literatura.

Para o primeiro modo de vibração identificaram-se quatro pontos para a análise dos resultados. Os pontos são enumerados automaticamente pelo programa sap2000, sendo eles o nó 8815, nó 8814, nó 8937 e nó 8830, espera-se que os deslocamentos, velocidades e acelerações sejam máximos nestes pontos, Figura 6-8.

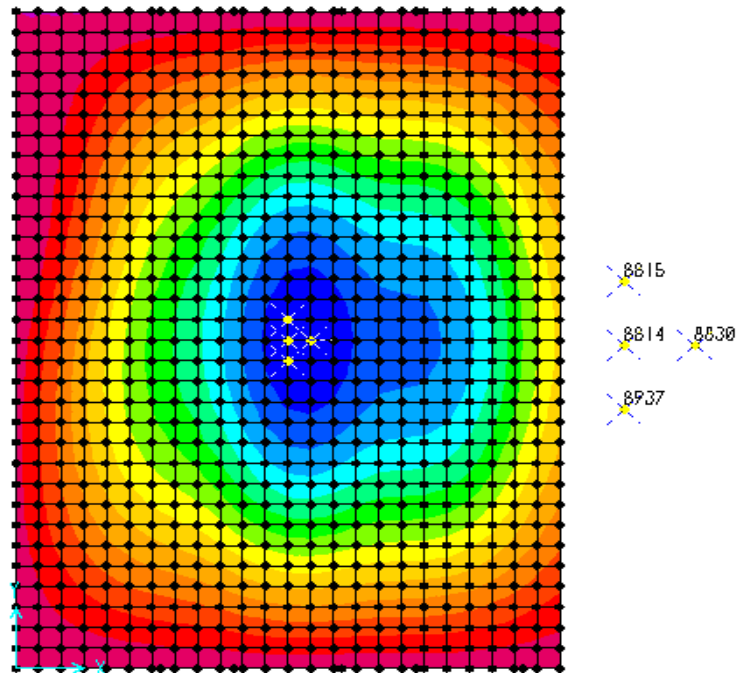


Figura 6-8 - Pontos escolhidos para o primeiro modo de vibração

Para o segundo modo de vibração identificaram-se nove pontos para a análise dos resultados. Os pontos são enumerados automaticamente pelo programa sap2000, sendo eles o nó 8721, nó 8736, nó 8615, nó 8631, nó 8614, nó 8630, nó 8629, nó 8472, nó 8488, à semelhança do primeiro modo, estes pontos são os mais críticos, Figura 6-9.

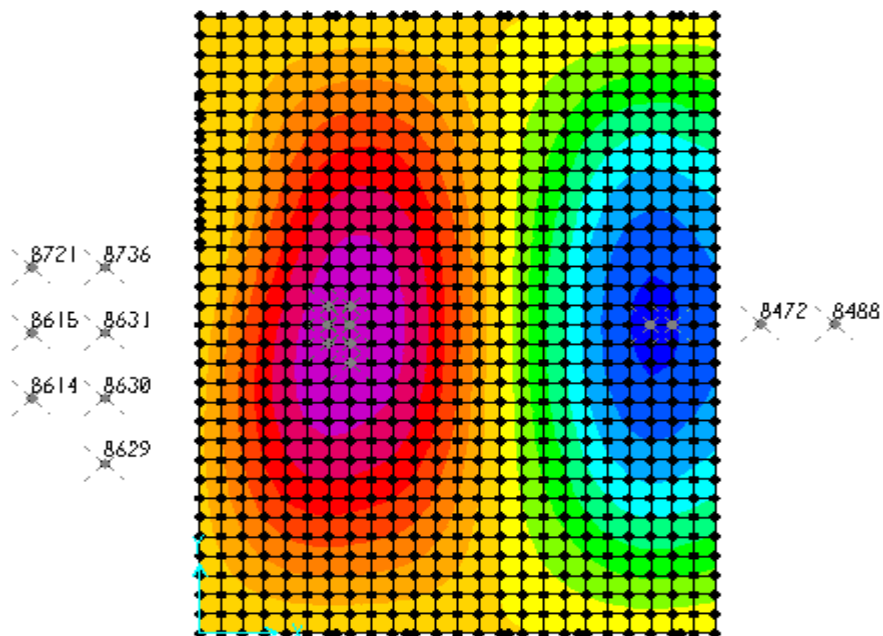


Figura 6-9 - Pontos escolhidos para o segundo modo de vibração

Para o terceiro modo de vibração identificaram-se sete pontos para a análise dos resultados. Os pontos são enumerados automaticamente pelo programa sap2000 sendo nó 8597, nó 8596, nó 8864, nó 8863, nó 8862, nó 5986, nó 8982, nó 24 Figura 6-10.

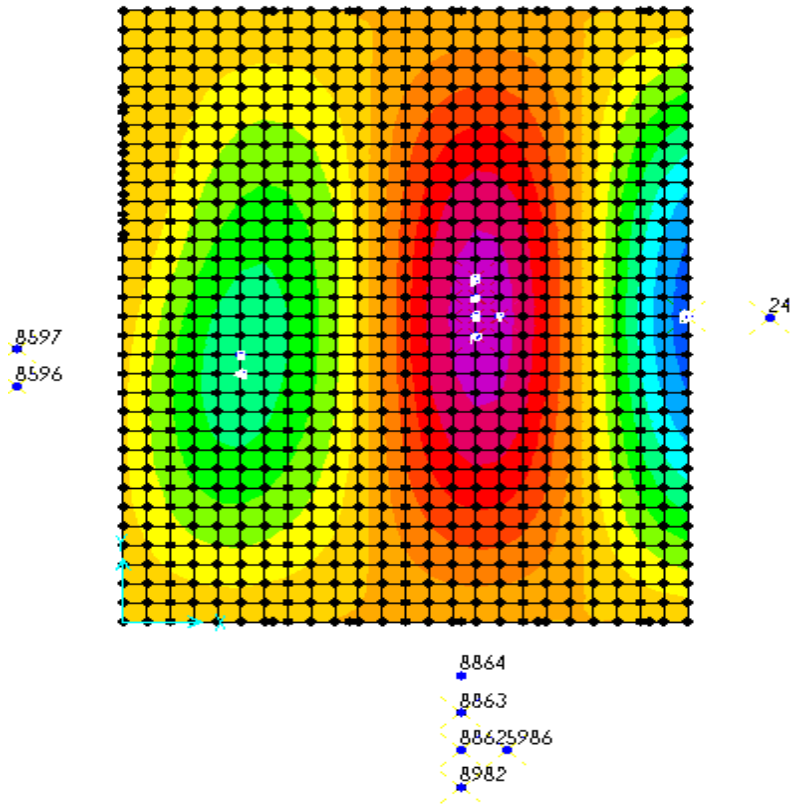


Figura 6-10 - Pontos escolhidos para o terceiro modo de vibração

6.3 Representação da Acção Dinâmica no SAP2000

A função seno é definida no programa SAP2000, Figura 6-11, de acordo com a relação

$$f(t) = G \sin\left(\frac{\pi}{T_p} t\right) \quad 6.3.5$$

Onde G é peso da pessoa (considerado igual a 700 N) e $t = t_i + \Delta t$ onde $t_i = 0$, $\Delta t = 0,05$ e $i = 1, \dots, 20$

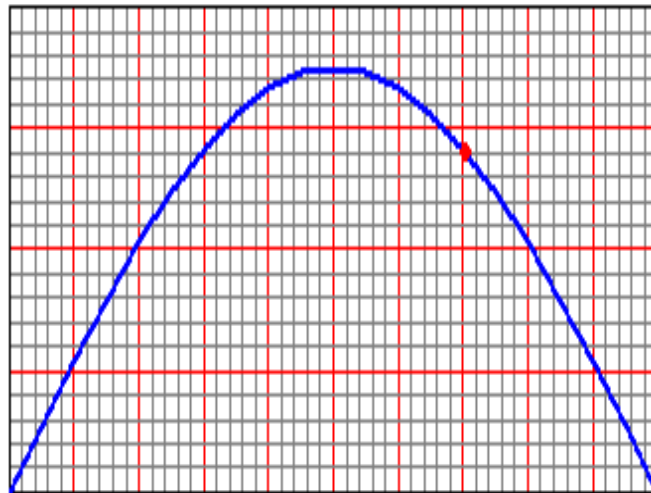


Figura 6-11 - Função salto - rítmico definida no SAP2000

Os dados da carga definida no SAP2000 para a análise linear são introduzidos tendo em conta a variação temporal "Time History". O tipo de resposta considerado é o "Transient" devido ao amortecimento inerente à estrutura, e esta é obtida através da sobreposição modal.

Os tempos de contacto que definem a função variam com o factor de impacto Figura 6-12.

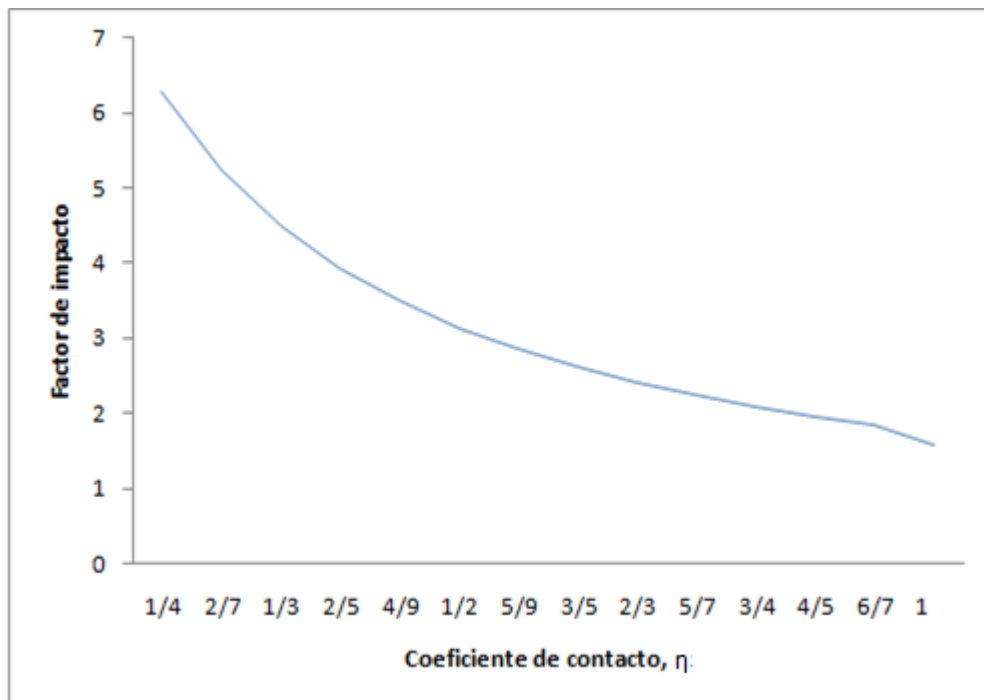


Figura 6-12 - Variação do factor de impacto com o incremento do coeficiente de contacto

Os coeficientes de contacto para os saltos rítmicos usualmente considerados são $\eta_1=1/3$, $\eta_2=1/4$, $\eta_3= 1/2$, $\eta_4=2/3$

Na definição da carga no programa SAP2000 foi considerada a função de acordo com a frequência da força a analisar, o "Scale factor" k_p , o "Time factor" α e o "Arrival time" $0 + T_{pi} + T_{pn}$ com $i = 1, \dots, n$, n - número total de passo ou salto, Figura 6-13.

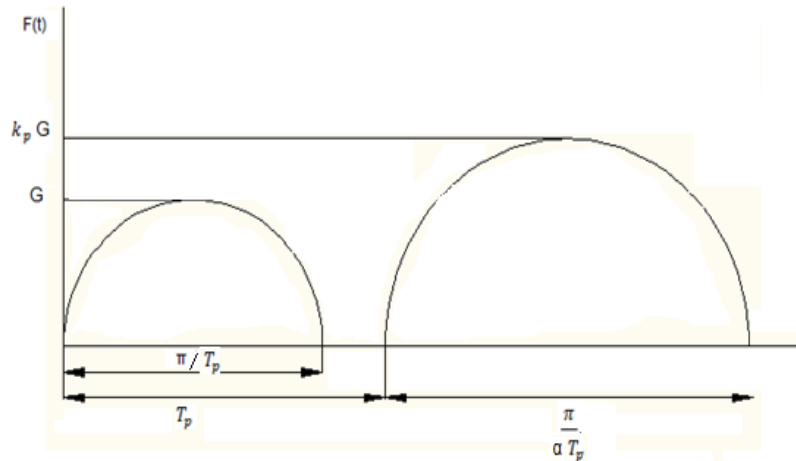


Figura 6-13 - Função seno, sem e com os coeficientes de amplificação

A função da Figura 6-13, foi definida de acordo com:

$$\begin{cases} F(t) = Gk_p \sin\left(\pi \frac{1}{t_p} t\right), & t < t_p \\ F(t) = 0, & t_p < t < T_p \end{cases} \quad 6.3.6$$

sendo o tempo de contacto $t_p = \alpha T_p$

6.4 RESULTADOS DA ANÁLISE

Começou-se por obter as acelerações para o mínimo de quatro pessoas. As acelerações foram obtidas no ponto de maior deslocamento modal e de maior aceleração máxima, nó 8814. As cargas são inicialmente aplicadas no nó 8890, nó 8920, nó 8950 e nó 8980, de acordo com a Figura 6-14.

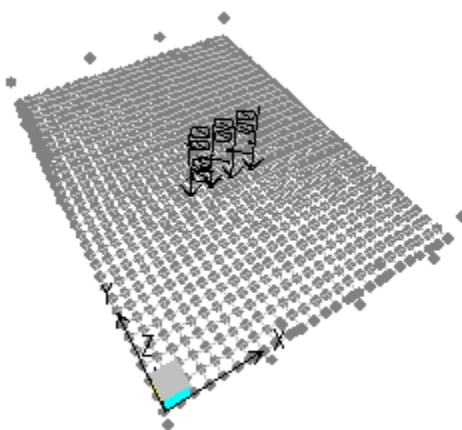


Figura 6-14 - Representação de quatro cargas aplicadas na laje, Sap 2000.

Com o aumento do número de pessoas a aceleração no nó 8814 também aumenta, Figura 6-15 e Figura 6-16.

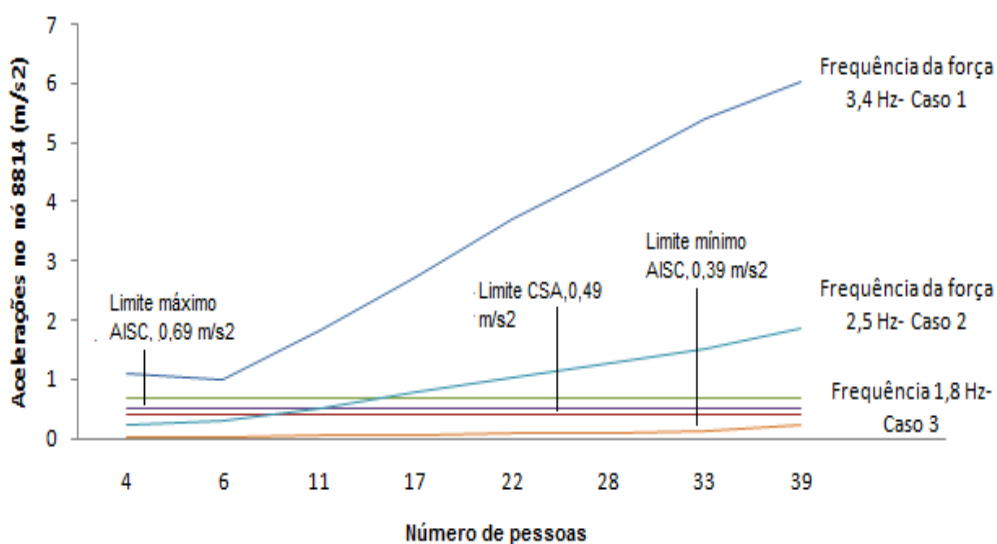


Figura 6-15 - Variação da aceleração no nó 8814, aceleração de pico

Verifica-se que os valores das acelerações de pico recomendados pelo guia prático AISC e CSA são excedidos para o caso 1, em que o salto rítmico tem frequência 3,4 Hz.

No caso 2, em que a actividade rítmica tem frequência 2,5Hz, o valor da aceleração limite máximo pelo AISC é excedido para o número aproximado de 15 (quinze) pessoas. O valor limite de CSA é excedido para o número aproximado de 12 (doze) pessoas.

No caso 3, a actividade rítmica tem frequência 1,8Hz, a actividade não transmite energia suficiente para que os níveis de percepção especificados pelos critérios AISC e CSA sejam excedidos.

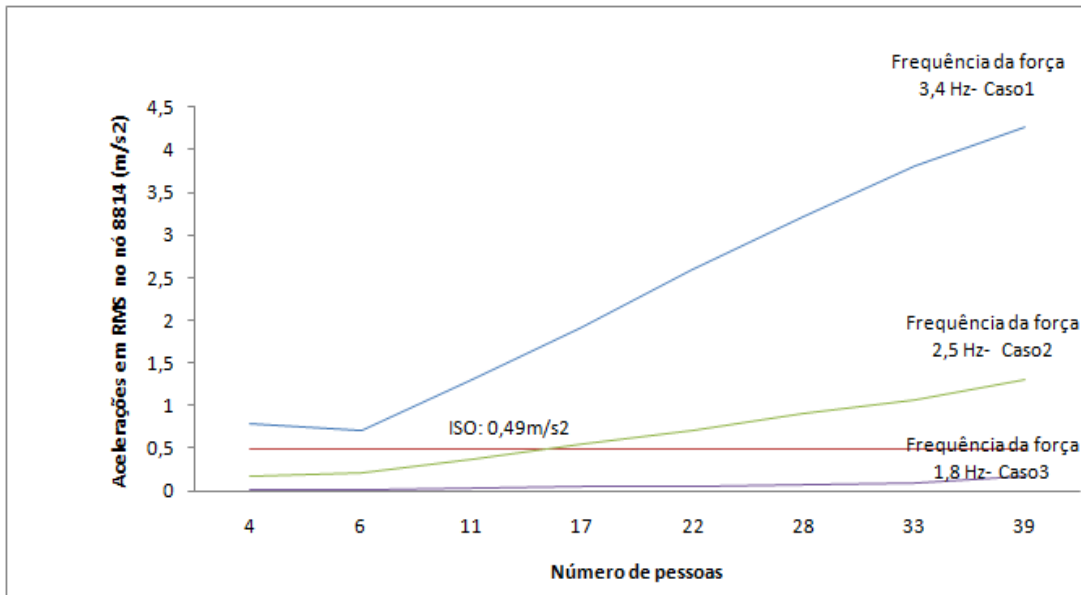


Figura 6-16 - Variação da aceleração no nó 8814 (aceleração em RMS)

Para acelerações limites em RMS o número de pessoas a praticarem actividades rítmicas para que uma pessoa se sinta desconfortável é aproximadamente 15 (quinze) para actividades rítmicas com frequências 2,5 Hz.

O salto rítmico com frequência de 3,4 Hz provoca acelerações superiores aos estabelecidos pela ISO, para o número mínimo de 4 (quatro) pessoas.

A actividade rítmica com frequência 1,8 Hz causa acelerações não superiores às dos critérios de conforto para o limite de 39 (trinta e nove) pessoas.

O número médio de pessoas num compartimento do edifício em estudo é cerca de 39 (trinta e nove) pessoas. Verifica-se que as acelerações aumentam a medida que o número de pessoas aumenta. Uma vez que a aceleração média máxima regulamentar: guia prático AISC – Série 11, ISO 2631-2: 1989 e CSA – Norma S16.1 – 1974 é excedida, pretende-se reduzir o valor da aceleração máxima para um número médio de pessoas actuando na laje. A localização das pessoas é representada pela Figura 6-17.

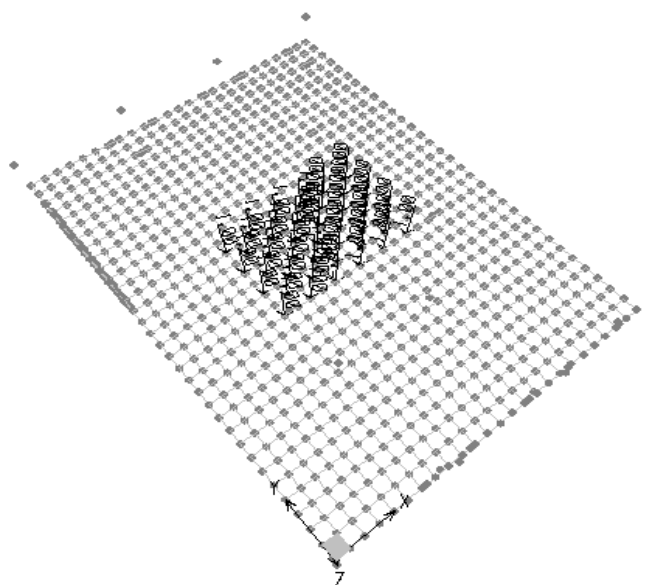


Figura 6-17 - Representação de 39 cargas aplicadas na laje, Sap 2000.

As cargas foram aplicadas a partir de pontos próximos do meio vão, com incrementos de um para o ponto imediatamente à esquerda e à direita; as linhas posteriores tem cinco a seis elementos, perfazendo os 39 (trinta e nove) elementos.

São aplicadas seis cargas em cada ponto, descrevendo o salto rítmico com seis passos; as respostas a partir dos seis saltos são aproximadamente iguais, ou seja, não há aumento significativo da aceleração a partir do sexto salto, como se determinou em estudos prévios feitos neste modelo.

6.4.1 Caso 1

O primeiro caso analisado tem frequência de salto $f_s = 3,4$ Hz, coeficiente de contacto $\eta=1/4$ e factor de impacto $k_p = 6,28$. O coeficiente de contacto foi escolhido de modo a que o factor de impacto fosse o máximo. A função introduzida no sap2000 é a definida na Figura 6 -11, função "salto rítmico", o factor de escala é igual ao factor de impacto, e o factor de tempo introduzido no programa tem o valor do coeficiente de contacto. Dada a frequência do salto obtém-se o período do salto, $T_p = 0,29$ s e o tempo de contacto $t_p = 0,074$ s.

Os restantes parâmetros são introduzidos na janela mostrada pela Figura 6-18. A duração da carga é de 1,74 s. Devido ao número reduzido de modos de vibração, 12 modos, considerou-se amortecimento constante de 0,02 [32].

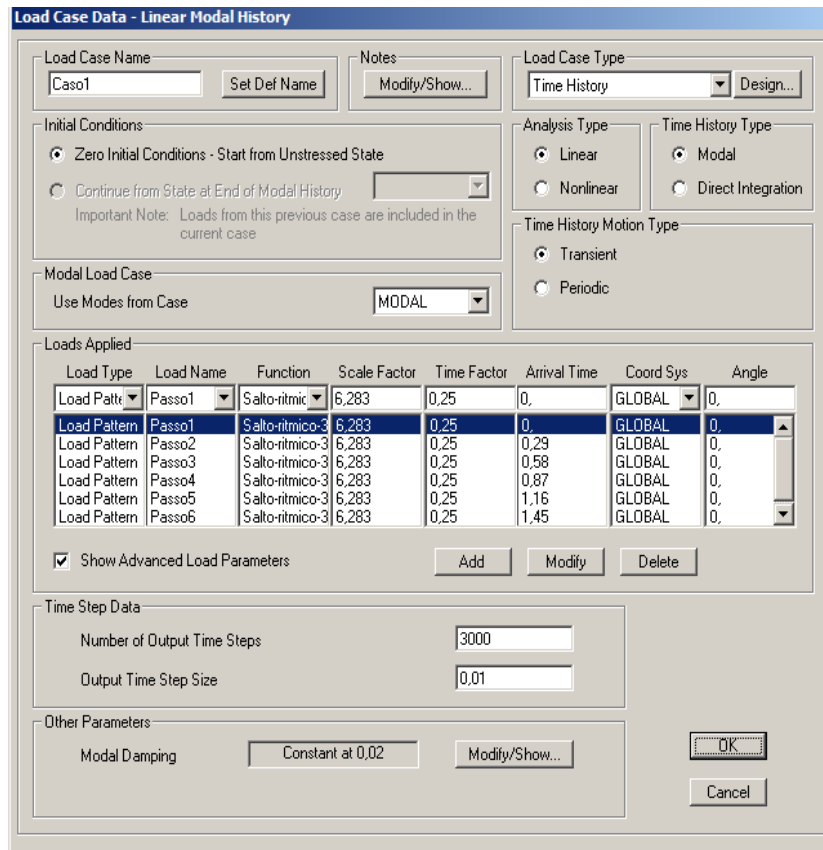


Figura 6-18 - Definição do factor de escala, factor de tempo e tempo de chegada para cada passo no sap2000 para a função salto – rítmico, Sap 2000.

A forma gráfica da força com seis saltos é representada pela Figura 6-19.

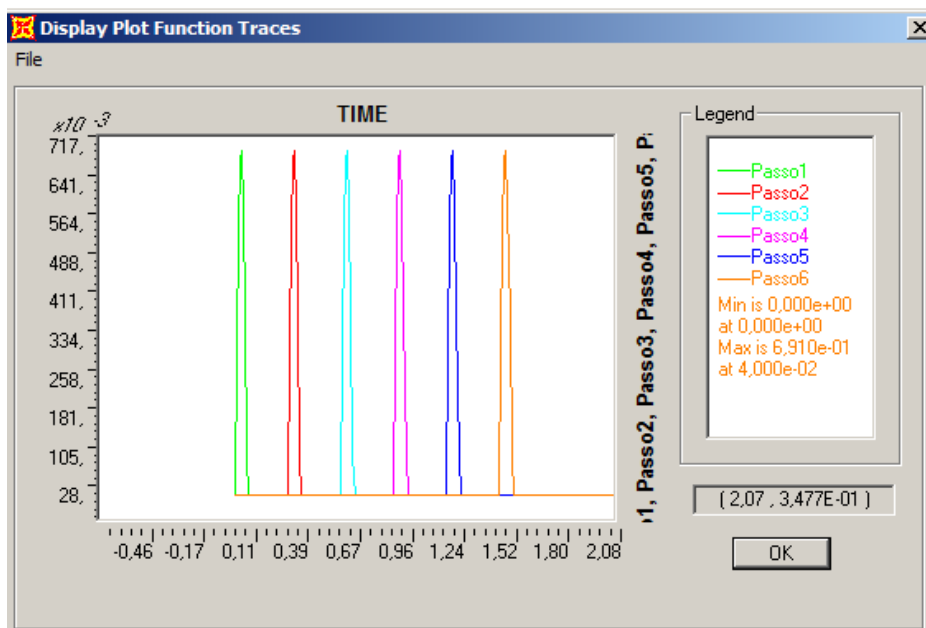


Figura 6-19 - Carga aplicada num ponto, para seis passos com frequências de 3,4 HZ e tempo de contacto de 0,0735 s

Verifica-se graficamente que o tempo de contacto é pequeno comparado com o período do salto. Esta forma gráfica representa uma actividade em que ambos os pés não se sobrepõem, como por exemplo o salto rápido e a corrida rápida.

A análise é efectuada considerando o número médio de trinta e nove pessoas actuando na laje do piso.

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos para os pontos de maiores acelerações.

Tabela 8 - Valores de aceleração máxima e mínima, em m/s², para os nós críticos para o caso 1

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	5,43
116	Caso1	LinModHist	Min	5,19
8798	Caso1	LinModHist	Max	5,28
8799	Caso1	LinModHist	Max	5,09
8814	Caso1	LinModHist	Max	6,04
8814	Caso1	LinModHist	Min	5,71
8815	Caso1	LinModHist	Max	5,83
8815	Caso1	LinModHist	Min	5,54
8816	Caso1	LinModHist	Max	5,27
8816	Caso1	LinModHist	Min	5,07
8824	Caso1	LinModHist	Max	5,13
8830	Caso1	LinModHist	Max	5,37
8830	Caso1	LinModHist	Min	5,31
8831	Caso1	LinModHist	Max	5,18
8831	Caso1	LinModHist	Min	5,15
8922	Caso1	LinModHist	Max	5,16
8937	Caso1	LinModHist	Max	5,91
8937	Caso1	LinModHist	Min	5,60
8952	Caso1	LinModHist	Max	5,26
8952	Caso1	LinModHist	Min	5,21

Os pontos 8814,8815,8830 são pontos com deslocamento modal máximo.

Os pontos 8814,8922,8952 são pontos em que está uma pessoa a praticar o salto rítmico. Verifica-se que as respostas máximas são dadas pelo nó 8814, e estas são representadas graficamente pela Figura 6-20 e Figura 6-21.

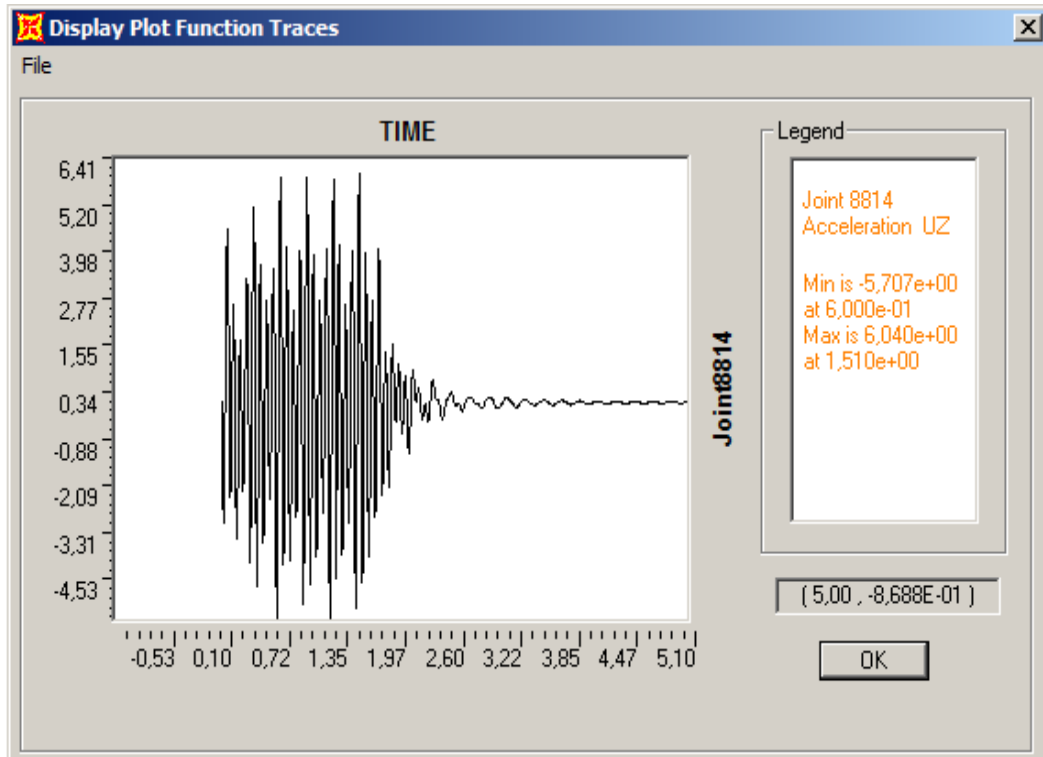


Figura 6-20 - Resposta da aceleração em unidades m/s², nó 8814

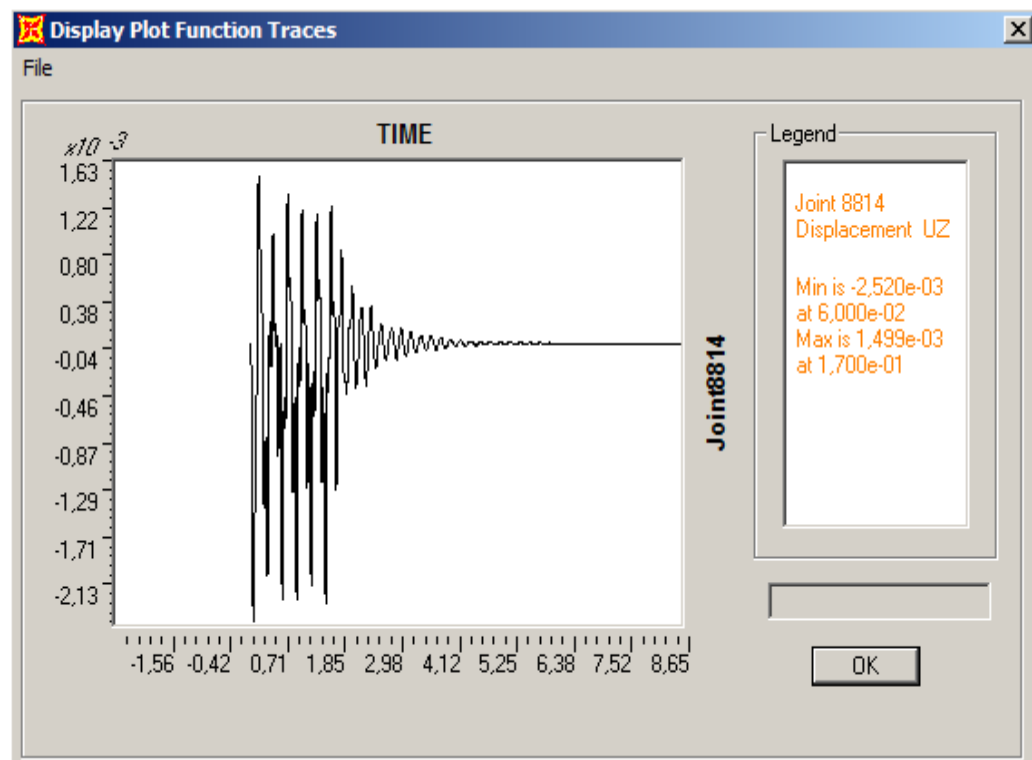


Figura 6-21 - Resposta do deslocamento em unidades m, nó 8814

6.4.2 Caso 2

O segundo caso analisado tem frequência de salto $f_s = 2,5$ Hz, coeficiente de contacto $\eta=1/2$ e factor de impacto $k_p = 3,14$. O coeficiente de contacto foi escolhido de modo a que o factor de impacto seja metade do analisado no caso 1. Alterou-se a frequência do salto para ser possível descrever uma actividade que transmite menor energia à estrutura. A função introduzida no sap2000 é a função "modelo 2,5hz", o factor de escala é igual ao factor de impacto, e o factor de tempo introduzido no programa tem o valor do coeficiente de contacto. Dado a frequência do salto obtém-se o período do salto, $T_p = 0,4$ s e o tempo de contacto $t_p = 0,2$ s.

Os parâmetros são introduzidos na janela mostrada pela Figura 6-22. A duração da carga é de 2,4 s.

Load Case Data - Linear Modal History

Load Case Name: caso 2

Load Case Type: Time History

Initial Conditions: Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Analysis Type: Linear

Time History Type: Modal

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Time History Motion Type: Transient

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Load Pattern	Passo1	Modelo 2.5 H	3,142	0,5	0,	GLOBAL	0,
Load Pattern	Passo2	Modelo 2.5 H	3,142	0,5	0,4	GLOBAL	0,
Load Pattern	Passo3	Modelo 2.5 H	3,142	0,5	0,8	GLOBAL	0,
Load Pattern	Passo4	Modelo 2.5 H	3,142	0,5	1,2	GLOBAL	0,
Load Pattern	Passo5	Modelo 2.5 H	3,142	0,5	1,6	GLOBAL	0,
Load Pattern	Passo6	Modelo 2.5 H	3,142	0,5	2,	GLOBAL	0,

Time Step Data: Number of Output Time Steps: 3000, Output Time Step Size: 0,01

Modal Damping: Constant at 0,02

Figura 6-22 - Definição do factor de escala, factor de tempo e tempo de chegada para cada passo no sap2000 para a função Modelo 2.5 Hz, Sap2000.

A forma gráfica da força com seis saltos é representada pela Figura 6-23.

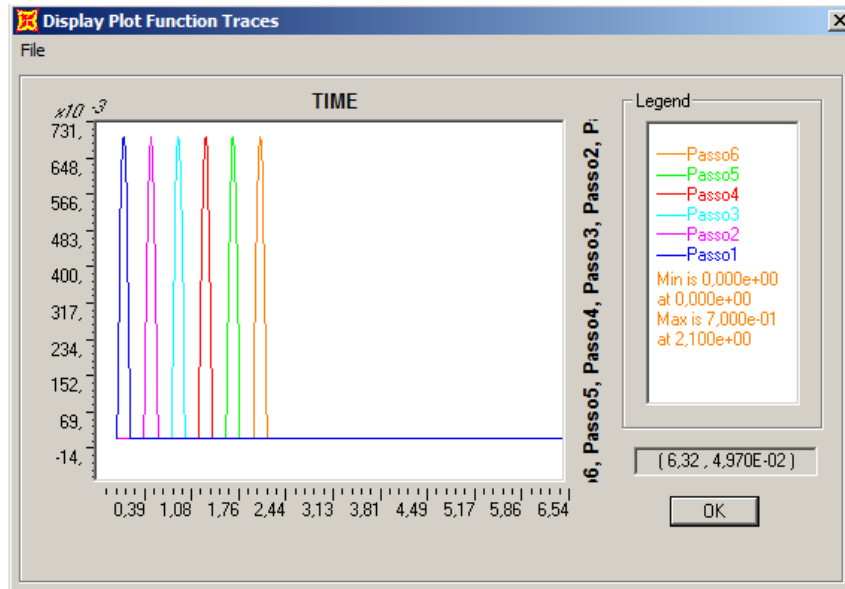


Figura 6-23 - Carga aplicada num ponto, para seis passos com frequências de 2,5 HZ e tempo de contacto de 0,2 s

Verifica-se graficamente que o tempo de contacto é metade do período do salto, esta forma gráfica representa uma actividade em que ambos os pés não se sobrepõem, mas a energia transmitida à estrutura é metade da energia transmitida pelo caso 1.

A análise é também efectuada considerando o número médio de trinta e nove pessoas actuando na laje do piso.

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos para os pontos de maiores acelerações.

Tabela 9 - Valores de aceleração máxima e mínima, em m/s², para os nós críticos para o caso 2

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
8798	caso 2	LinModHist	Min	1,75
8799	caso 2	LinModHist	Min	1,73
8814	caso 2	LinModHist	Max	1,75
8814	caso 2	LinModHist	Min	1,86
8815	caso 2	LinModHist	Min	1,84
8816	caso 2	LinModHist	Min	1,78
8830	caso 2	LinModHist	Min	1,78
8831	caso 2	LinModHist	Min	1,76
8922	caso 2	LinModHist	Min	1,74
8937	caso 2	LinModHist	Max	1,73
8937	caso 2	LinModHist	Min	1,84
8952	caso 2	LinModHist	Min	1,76

Para o ponto de maior aceleração máxima, nó 8814, verifica-se que para este caso a aceleração é cerca de 30,8% da aceleração obtida para o caso 1. Ocorre assim uma redução significativa da aceleração, dependendo do tipo de actividade em causa.

Os pontos 8814,8815,8830 são pontos com deslocamento modal máximo.

Os pontos 8814,8922,8952 são pontos em que está uma pessoa a praticar o salto rítmico. Verifica-se que as respostas máximas são dadas pelo nó 8814, e esta é representada graficamente pelas Figura 6-24 e Figura 6-25. O nó 8814 localiza-se a meio vão da laje.

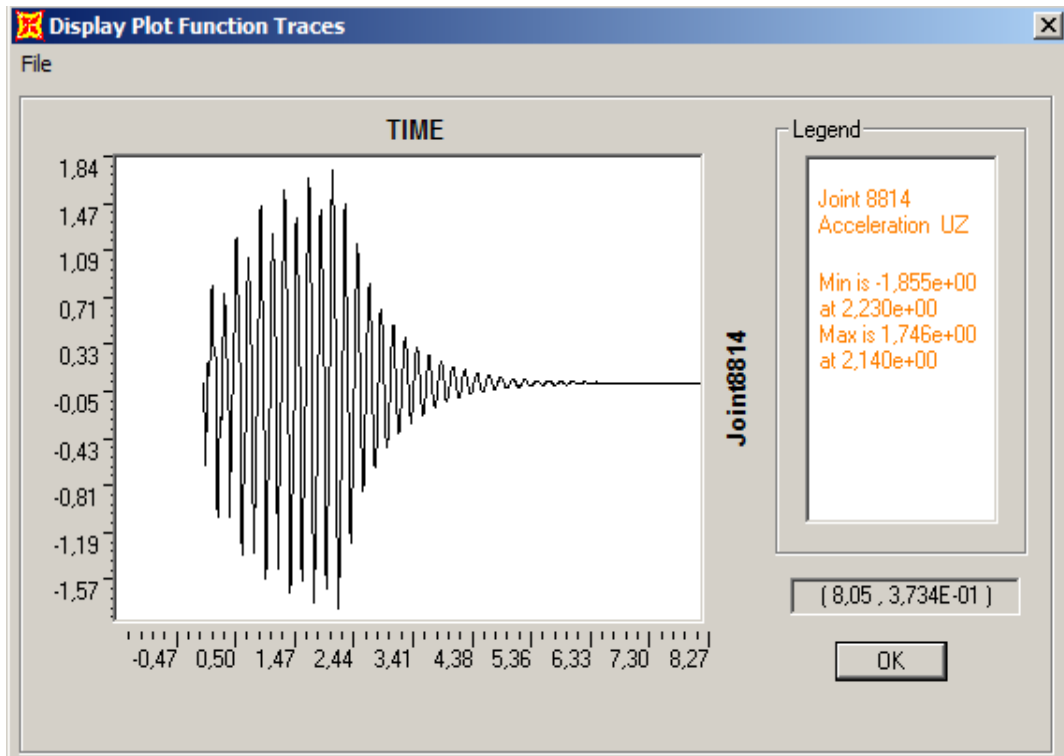


Figura 6-24 - Resposta da aceleração do nó 8814

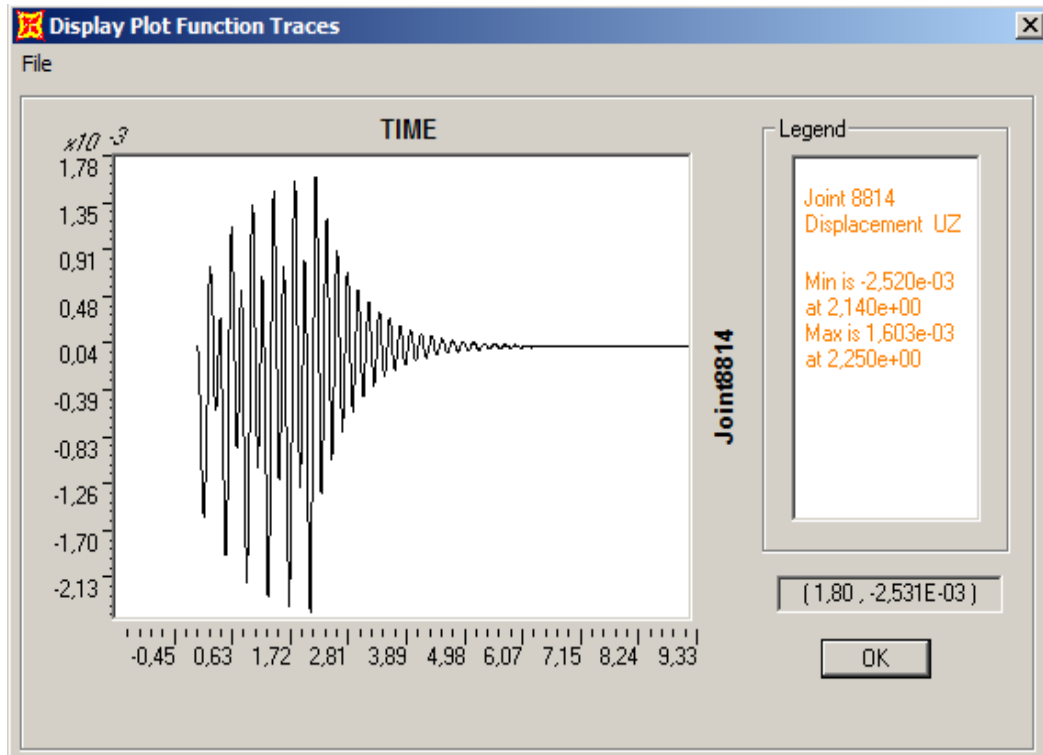


Figura 6-25 - Resposta do deslocamento do nó 8814

6.4.3 Caso 3

O terceiro caso analisado tem frequência de salto $f_s = 1,8$ Hz, coeficiente de contacto $\eta=1$ e factor de impacto $k_p = 1,57$. O coeficiente de contacto foi escolhido de modo que a actividade descrita seja a dança normal. Alterou-se a frequência do salto para ser possível descrever a actividade de dança normal, uma vez que esta tem frequência inferior às referidas anteriormente. A função introduzida no sap2000 é a função "modelo 1,8 Hz", o factor de escala é igual ao factor de impacto, e o factor de tempo introduzido no programa tem o valor do coeficiente de contacto. Dado a frequência do salto obtém-se o período do to, $T_p = 0,56$ s e o tempo de contacto $t_p = 0,56$ s.

Os restantes parâmetros são introduzidos na janela mostrada pela Figura 6-26. A duração da carga é de 3,3 s.

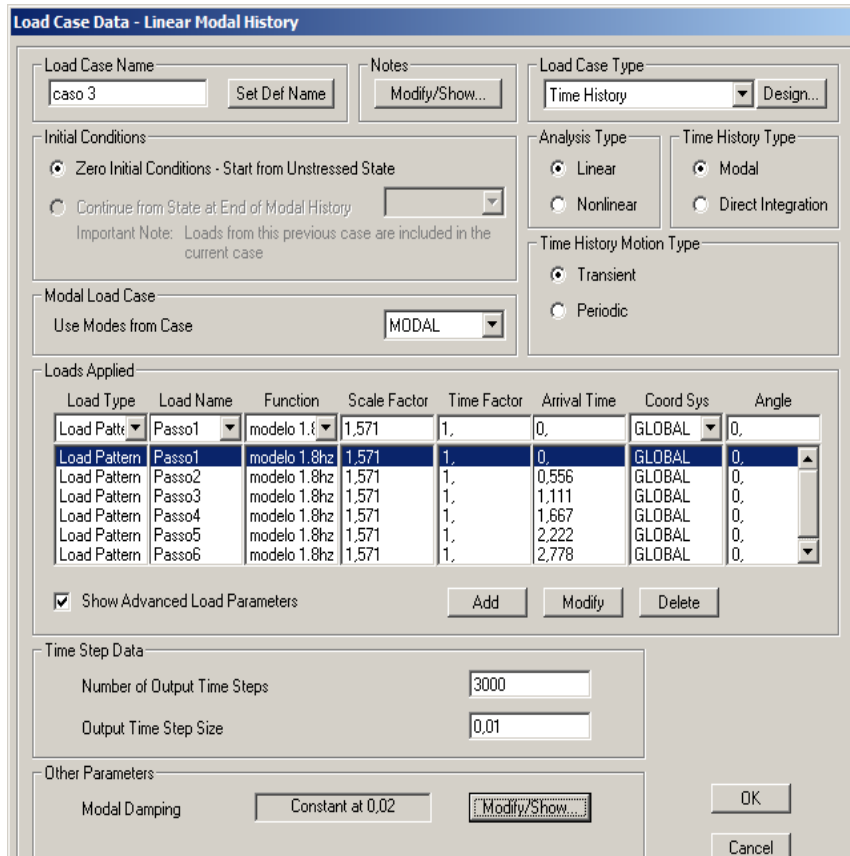


Figura 6-26 - Definição do factor de escala, factor de tempo e tempo de chegada para cada passo no sap2000 para a função Modelo 1.8 Hz.

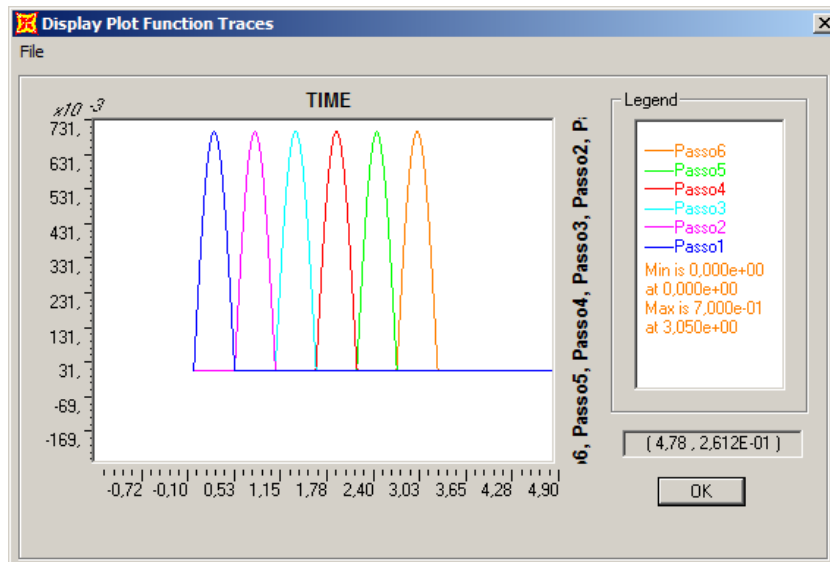


Figura 6-27 - Carga aplicada num ponto, para seis passos com frequências de 1,8 Hz e tempo de contacto de 0,556 s

Verifica-se graficamente que o tempo de contacto é igual ao período do salto, esta forma gráfica representa uma actividade em que ambos os pés encontram-se em contacto com

pavimento num determinado período. Para se ter a noção do ritmo de dança em causa, imagine-se por exemplo, uma pessoa a andar lentamente sem variar de posição.

A análise é também efectuada considerando o número médio de trinta e nove pessoas actuando na laje do piso.

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos para os pontos de maiores acelerações.

Tabela 10 - Valores de aceleração máxima e mínima, m/s², para os nós críticos para o caso 3

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	caso 3	LinModHist	Min	0,21
8798	caso 3	LinModHist	Min	0,21
8799	caso 3	LinModHist	Min	0,21
8814	caso 3	LinModHist	Min	0,23
8815	caso 3	LinModHist	Min	0,22
8816	caso 3	LinModHist	Min	0,21
8830	caso 3	LinModHist	Min	0,21
8831	caso 3	LinModHist	Min	0,20
8922	caso 3	LinModHist	Min	0,21
8937	caso 3	LinModHist	Min	0,23
8952	caso 3	LinModHist	Min	0,20

Para o ponto de maior aceleração máxima, nó 8814, verifica-se que para este caso a aceleração é cerca de 3,8% da aceleração obtida para o caso 1.

Os pontos 8814,8815,8830 são pontos com deslocamento modal máximo.

Os pontos 8814,8922,8952 são pontos em que está uma pessoa a praticar o salto rítmico. Verifica-se que as respostas máximas são dadas pelo nó 8814, e esta é representada graficamente pela Figura 6-28 e Figura 6-29. Verifica-se também pelo gráfico 6-28 que a estrutura dissipa rapidamente a energia antes do próximo salto rítmico ser aplicado, mostrando que a frequência do salto rítmico não é próxima da frequência da estrutura.

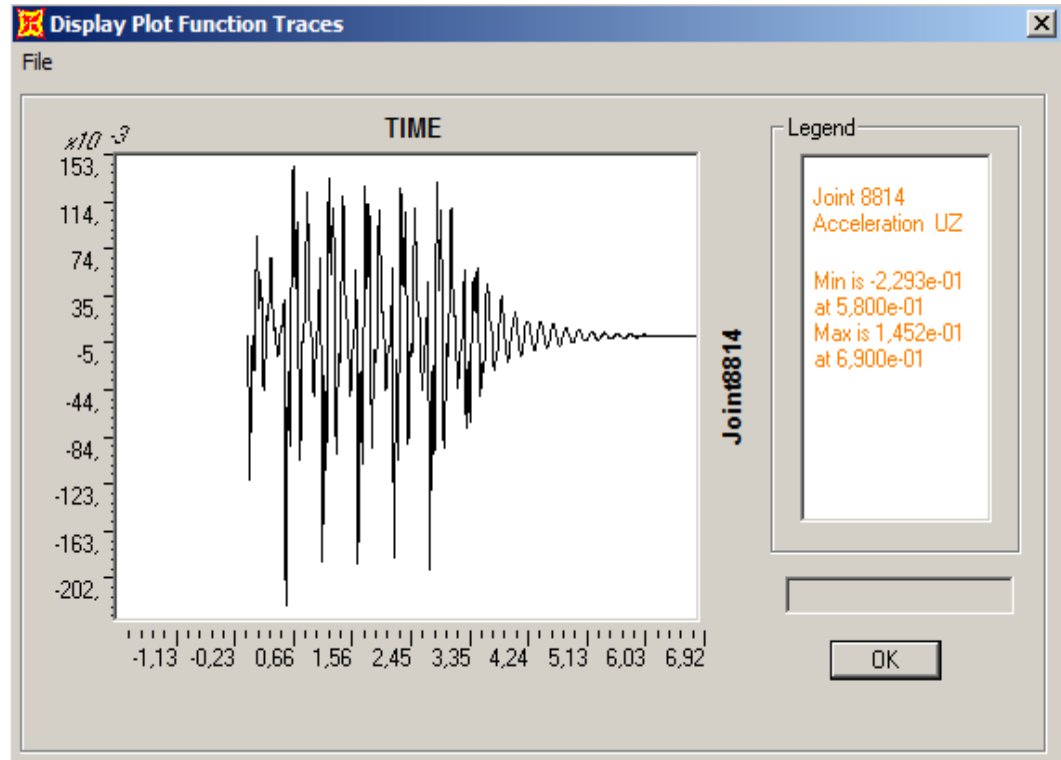


Figura 6-28 - Resposta da aceleração do nó 8814

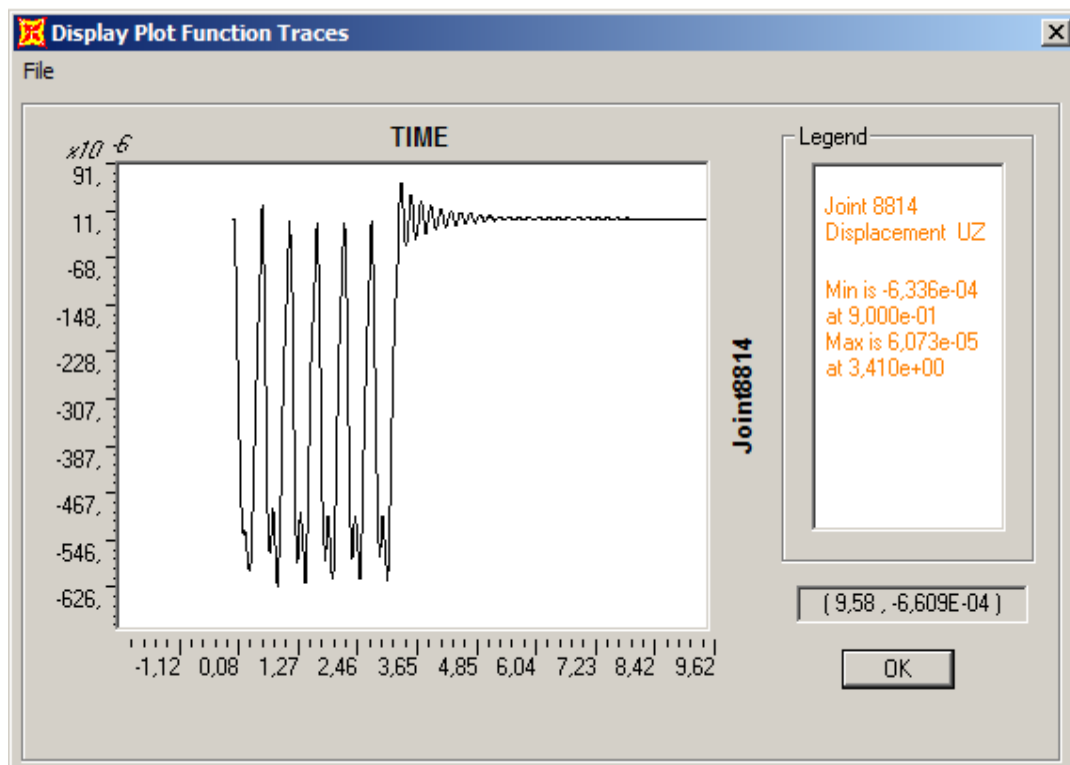


Figura 6-29 - Resposta do deslocamento do nó 8814

Analisando os três casos de solicitação, verifica-se que o mais crítico está relacionado com a actividade de salto rítmico. A energia transmitida por esta actividade aumenta significativamente a resposta dinâmica do piso, e os pontos 8814, 8830 e 8952 são os escolhidos por terem maiores respostas dinâmicas em todos os casos.

Valores de acelerações de pico e em RMS são apresentados na Tabela 11, esses são os valores mais críticos que se pretende reduzir utilizando uma solução de TMD's.

Tabela 11 - Acelerações máximas de pico e em RMS

Nó	Caso	Análise	Aceleração Pico m/s²		Aceleração RMS (m/s²)
8814	Caso1	LinModHist	Max	6,04	4,27
8830	Caso1	LinModHist	Max	5,37	3,80
8952	Caso1	LinModHist	Max	5,26	3,72

Capítulo 7

Aplicação do Controlo Passivo

Pretende-se reduzir as acelerações máximas nos nós da laje e, para isso, faz-se a utilização de TMD's com parâmetros óptimos calculados pelo método de Jangid em que estes são aplicados em pontos previamente seleccionados. Após a aplicação de TMD's nos pontos críticos, analisou-se o comportamento dinâmico da laje. Deparou-se com a necessidade de se aumentar o número de TMD's de modo a reduzir as acelerações para os valores pretendidos. Portanto efectuou-se uma análise dinâmica incrementando o número de TMD's.

Para ser possível modelar os TMD's no SAP2000 [29], foi necessário definir vigas sem massas e rigidez ao longo dos pontos necessários para que os amortecedores funcionassem efectivamente. O modelo dos amortecedores é genericamente representado pela Figura 7-1, em que se ligou o nó "j" do elemento *Damper* definido no sap2000 ao nó "q" da laje do piso.

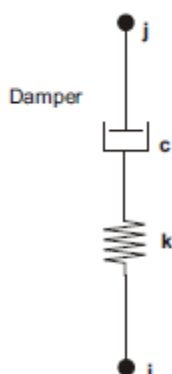


Figura 7-1 - Modelo de um TMD, sap2000 [29]

As propriedades dos elementos são definidas de acordo com a janela mostrada na Figura 7-2, em que para o tipo de ligação escolheu-se a opção *Damper*. A massa de cada amortecedor é definida de acordo com o rácio de massa de 10% da massa modal, para que a frequência do amortecedor seja aproximadamente igual à frequência da laje [7][19],[30]. No amortecedor é activo um grau de liberdade U1, que representa o deslocamento vertical deste. Assim garante-se que o amortecedor funciona efectivamente nesta direcção.

Figura 7-2 - Janela de inserção das propriedades do TMD

As propriedades da rigidez e do amortecimento dos TMD's são definidas tendo em conta a análise linear.

7.1 DIMENSIONAMENTO DO TMD

Definidas as propriedades através do método de Jangid, estas são introduzidas na janela do sap2000 representada na Figura 7-3.

Figura 7-3 - Janela de inserção das características dinâmicas do TMD

As massas modais obtidas para os dois primeiros modos utilizados para o controlo de vibração, são $m_1=111,46$ toneladas e $m_2= 116,90$ toneladas. A massa total da laje é calculada pelo somatório das massas de cada nó do elemento, $M=656,71$ toneladas.

Os valores dos deslocamentos dos modos de vibração são retirados do sap2000 seleccionando todos os nós que pertencem a laje. A massa generalizada calculada pelo programa é unitária, para se obter o valor normalizado da massa foi necessário dividir os deslocamentos modais pelo valor do maior deslocamento modal e aplicar a relação $\theta^T.M.\theta$. Em que M é a massa total da laje.

7.1.1 1ª Proposta

Nesta situação, para o controlo de vibração foram inicialmente utilizados dois TMD's localizados no nó 8814 (TMD1) e no nó 8952 (TMD2). Os pontos foram escolhidos por apresentarem maiores acelerações máximas. As propriedades dos amortecedores aplicados nos dois pontos são determinadas utilizando o método de Jangid, controlando o primeiro modo de vibração. Os amortecedores são sintonizados para a frequência $\omega=31,58$ rad/s.

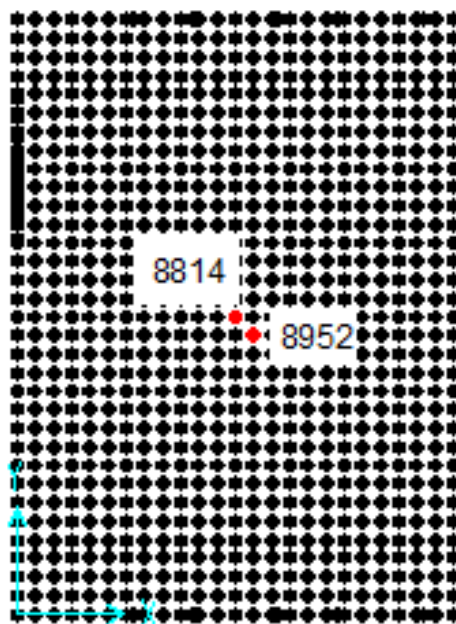


Figura 7-4 - Posição de dois TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades de dois TMDs , controlo do 1º modo pelo método de Jangid

Aplicação do Controlo Passivo

ξ	β_L	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ω_t (rad/s)	k (kN/m)	mi (Toneladas)	westrutura(rad/s)	Ci (kN.s/m)
0,0389	0,0629	0,9904	30,29	0,01	0,0611	31,28	1090,32	1,19	31,58	4,397
			32,26					1,05		4,129

De notar que estas propriedades foram calculadas considerando o número de amortecedores $n=2$, e estas variam à medida que o número dos amortecedores aumenta.

A resposta para os pontos de maiores acelerações é dada na Tabela 13.

Tabela 13 - Acelerações nos pontos de análise, para dois TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	4,20
116	Caso1	LinModHist	Min	-4,04
8814	Caso1	LinModHist	Max	4,59
8814	Caso1	LinModHist	Min	-4,38
8830	Caso1	LinModHist	Max	4,25
8830	Caso1	LinModHist	Min	-4,18
8939	Caso1	LinModHist	Max	1,51
8939	Caso1	LinModHist	Min	-1,28
8952	Caso1	LinModHist	Max	4,26
8952	Caso1	LinModHist	Min	-4,19

A utilização de dois TMD's não é suficiente para reduzir as respostas dos nós escolhidos para a análise da aceleração, de acordo com os critérios de conforto regulamentares indicados na Tabela 14.

Tabela 14 - Critérios regulamentares

	Aceleração de pico m/s ²		Aceleração RMS m/s ²
ISO 2631-2:1989			0,49
Guia AISC	Min	0,39	
	Máx	0,69	
CSA-S16-1-1974		0,49	

Na Figura 7-5 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 2ª proposta.

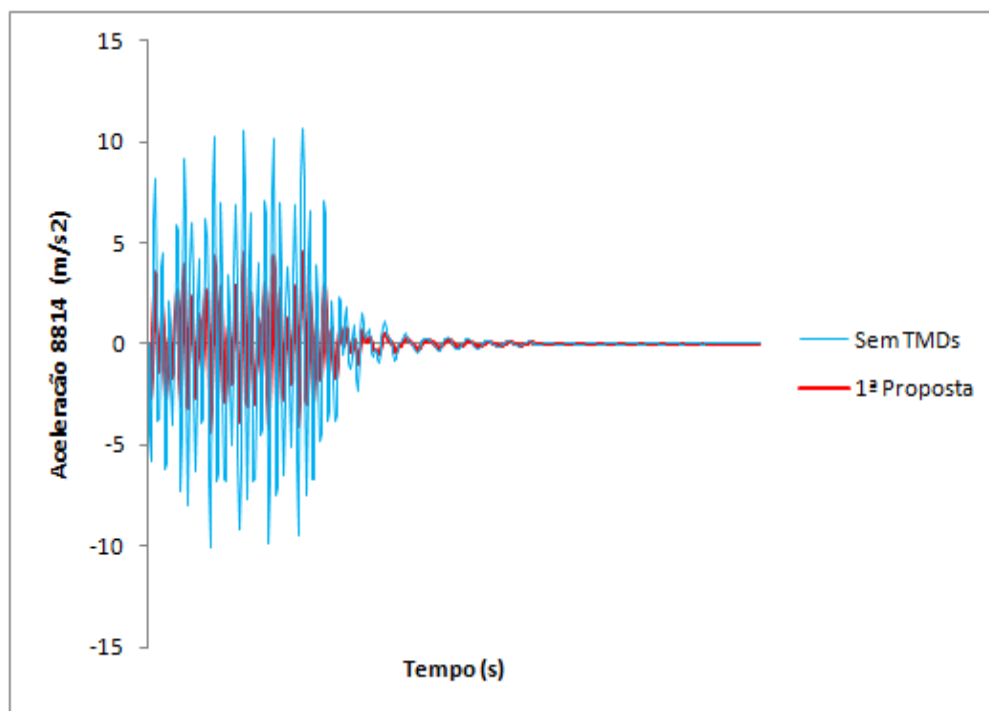


Figura 7-5 - Resposta do nó 8814 para 1ª Proposta e sem TMDs

A solução é aumentar o número de TMD's na laje para que as acelerações desta sejam minimizadas. Para o efeito, sugere-se a 2ª proposta.

7.1.2 2ª Proposta

Visto que na 1ª Proposta os objectivos não são atingidos, procede-se à análise para três TMD's. As propriedades dos TMD's são calculadas para $n=3$, e os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos dois primeiros TMD's (TMD1 no nó 8814 e no TMD2 nó 8952). O terceiro ponto, nó 8440, foi escolhido por ser um ponto "flexível" localizado na linha que intersecta o ponto médio da laje.

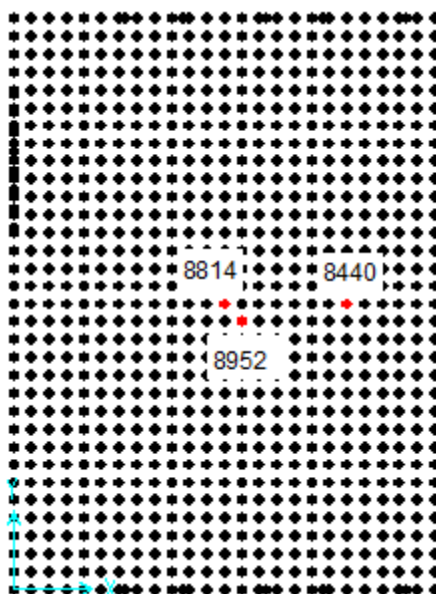


Figura 7-6 - Posição de três TMD's para o controlo das vibrações

As novas propriedades dos amortecedores são obtidas pelo método de Jangid, Tabela 15.

Tabela 15 - Propriedades de três TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ'	βL	α	$\omega_i(\text{rad/s})$	μ	ϵ	$\omega_t(\text{rad/s})$	$k(\text{kN/m})$	$m_i(\text{Toneladas})$	$\omega_{\text{estrutura}}(\text{rad/s})$	$C_i(\text{kN.s/m})$
0,030	0,088	0,991	29,922	0,010	0,061	31,31	1092,46	1,22	31,58	4,461
			31,307					1,11		4,263
			32,691					1,02		4,083

As respostas são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Acelerações nos pontos de análise, para três TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²
116	Caso1	LinModHist	Max 2,73
116	Caso1	LinModHist	Min -1,94
8814	Caso1	LinModHist	Max 2,76
8814	Caso1	LinModHist	Min -1,99
8830	Caso1	LinModHist	Max 2,65
8830	Caso1	LinModHist	Min -2,01
8939	Caso1	LinModHist	Max 0,45
8939	Caso1	LinModHist	Min -0,30
8952	Caso1	LinModHist	Max 2,66
8952	Caso1	LinModHist	Min -2,02

Na Figura 7-7 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 2ª proposta.

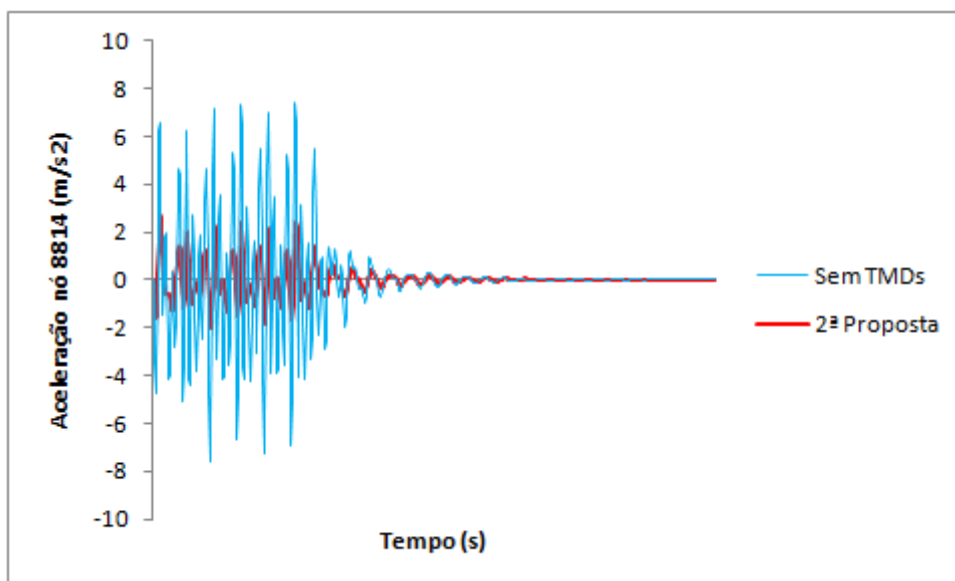


Figura 7-7 - Resposta do nó 8814 para 2ª Proposta e sem TMDs

A redução da aceleração não é suficiente, prossegue-se para a 3ª Proposta.

7.1.3 3ª Proposta

Dado que a condição de conforto não se verifica, procede-se à análise para quatro TMD's. As propriedades dos TMD's são calculadas para $n=4$, e os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos três primeiros TMD's (TMD1 no nó 8814, TMD2 no nó 8952 e TMD 3 no nó 8440). O quarto ponto, nó 8395, foi escolhido por ser um ponto "flexível" e estar relativamente distante dos outros pontos.

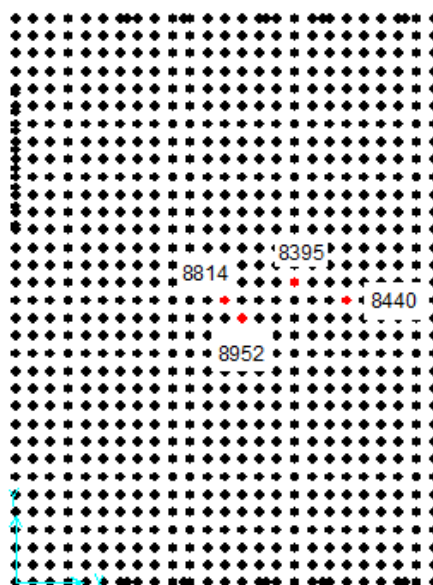


Figura 7-8 - Posição de quatro TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na seguinte Tabela 17.

Tabela 17 Propriedades de quatro TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ'	βL	α	$\omega_i(\text{rad/s})$	μ	ϵ	$\omega t(\text{rad/s})$	$k(\text{kN/m})$	$m_i(\text{Toneladas})$	$\omega_{\text{estrutura}}(\text{rad/s})$	$C_i(\text{kN.s/m})$
0,0260	0,1028	0,9918	29,71	0,010	0,061	31,32	1093,57	1,24	31,58	4,496
			30,79					1,15		4,340
			31,86					1,08		4,194
			32,93					1,01		4,057

As respostas são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Acelerações nos pontos de análise, para quatro TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	2,27
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,40
8814	Caso1	LinModHist	Max	2,28
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,44
8830	Caso1	LinModHist	Max	2,08
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,42
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,40
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,23
8952	Caso1	LinModHist	Max	2,09
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,43

Na Figura 7-9 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 3ª proposta.

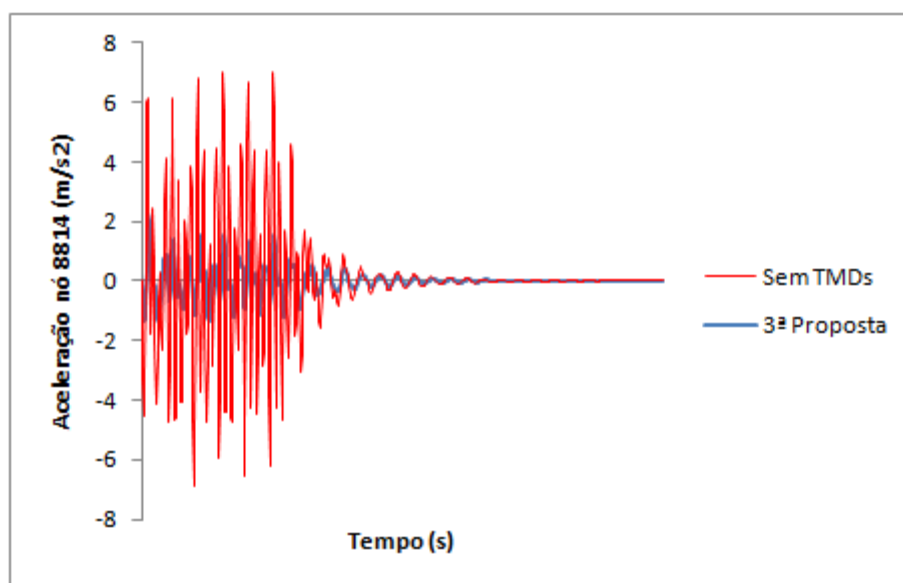


Figura 7-9 - Resposta do nó 8814 para 3ª Proposta e sem TMDs

A redução da aceleração não é suficiente, prossegue-se para a 4ª Proposta.

7.1.4 4ª Proposta

Procede-se a análise para cinco TMD's, as propriedades destes são calculadas para $n=5$, e os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos quatro primeiros TMD's (TMD1 no nó 8814, TMD2 no nó 8952, TMD3 no nó 8440 e TMD4 no nó 8395). O quinto ponto, nó 113, foi escolhido por ser um ponto "flexível" e estar relativamente distante dos outros pontos.

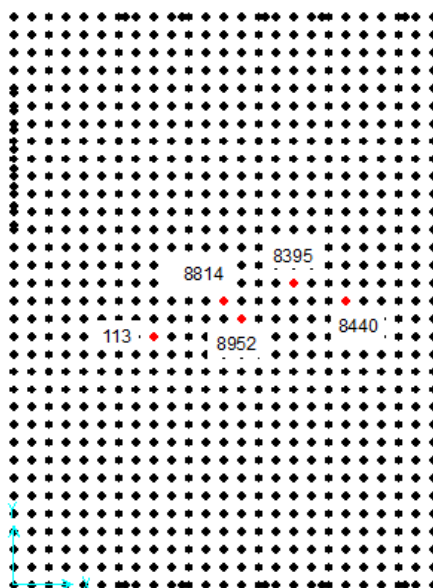


Figura 7-10 - Posição de cinco TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na seguinte Tabela 19.

Tabela 19 - Propriedades de cinco TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ'	βL	α	$\omega_i(\text{rad/s})$	μ	ϵ	$\omega_t(\text{rad/s})$	$k(\text{kN/m})$	$m_i(\text{Toneladas})$	$\omega_{\text{estrutura}}(\text{rad/s})$	$C_i(\text{kN.s/m})$
0,0233	0,1120	0,9922	29,58	0,010	0,061	31,33	1094,25	1,25	31,58	4,520
			30,45					1,18		4,390
			31,33					1,11		4,267
			32,21					1,05		4,151
			33,09					1,00		4,040

As respostas são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Acelerações nos pontos de análise, para cinco TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	2,23
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,34
8814	Caso1	LinModHist	Max	2,25
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,39
8830	Caso1	LinModHist	Max	2,03
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,36
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,37
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,21
8952	Caso1	LinModHist	Max	2,04
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,36

Na Figura 7-11 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 4ª proposta.

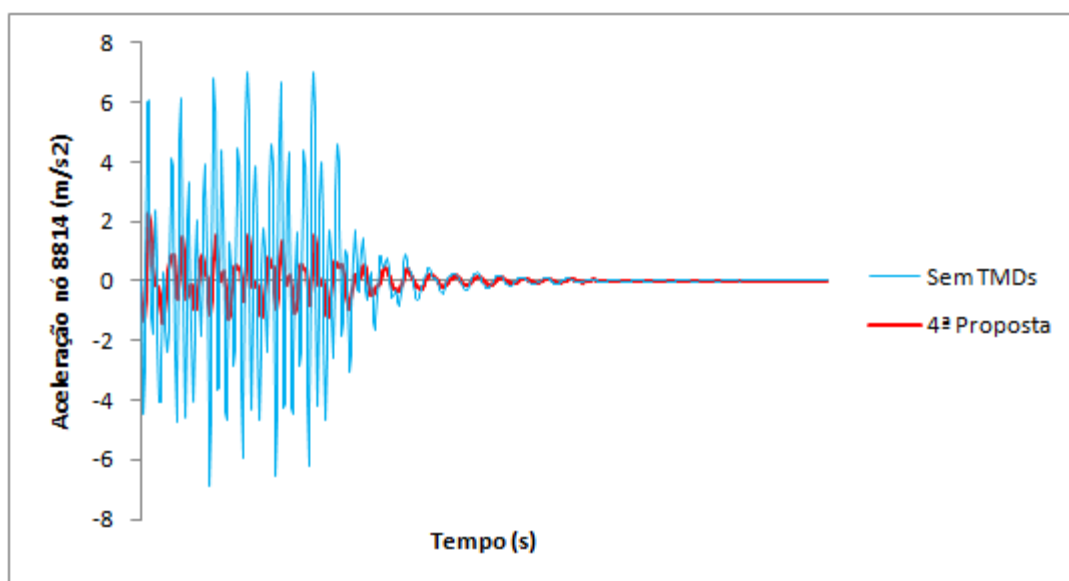


Figura 7-11 - Resposta do nó 8814 para 4ª Proposta e sem TMDs

As condições não se verificam, optou – se por parar o controlo do primeiro modo de vibração pelo facto de o aumento de números de TMD's conduzir ao aumento das acelerações nos pontos críticos. Os resultados não são aqui apresentados por não satisfazerem as condições regulamentares de conforto e serem superiores aos da solução apresentada.

7.1.5 5ª Proposta

Nesta situação o procedimento é diferente dos anteriores, embora mantendo-se as propriedades da situação 4. O objectivo é controlar o segundo modo de vibração, visto que o controlo do primeiro modo já estar contemplado na situação 4. Aumentando o número de TMD's, apenas aumentava as acelerações nos nós críticos.

Procedeu-se à análise mantendo os cinco TMD's com as mesmas propriedades, e acrescentaram-se dois TMD's calculados pelo método de Jangid sintonizados à frequência do segundo modo, $\omega=91,49$ rad/s.

Os pontos escolhidos para o controlo do segundo modo são TMD1 no nó 8639 e TMD2 no nó 111, por serem pontos de inflexão da configuração do segundo modo de vibração e estarem localizados em pontos afastados do centro da laje de modo a evitar a concentração de massas.

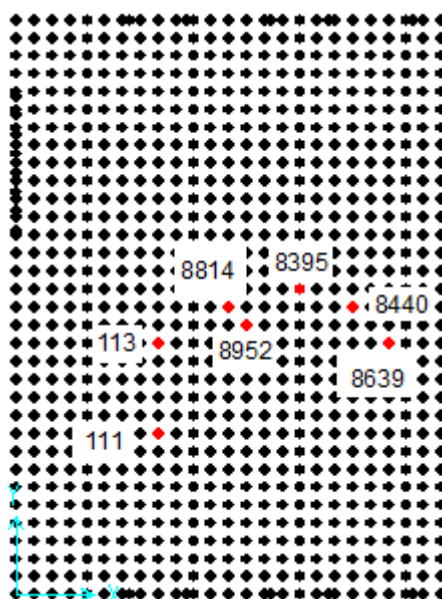


Figura 7-12 - Posição de sete TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na seguinte Tabela 21.

Tabela 21 - Propriedades de dois TMDs, controlo do 2º modo pelo método de Jangid

ξ	βL	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ω_t (rad/s)	k (kN/m)	m_i (Toneladas)	$\omega_{estrutura}$ (rad/s)	C_i (kN.s/m)
0,0389	0,0629	0,9904	33,22	0,010	0,061	34,30	1375,01	1,25	34,63	5,057
			35,38					1,10		4,749

As respostas são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Acelerações nos pontos de análise, para sete TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	2,17
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,37
8814	Caso1	LinModHist	Max	2,27
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,43
8830	Caso1	LinModHist	Max	2,09
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,37
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,35
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,23
8952	Caso1	LinModHist	Max	2,07
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,37

Na Figura 7-13 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 5ª proposta.

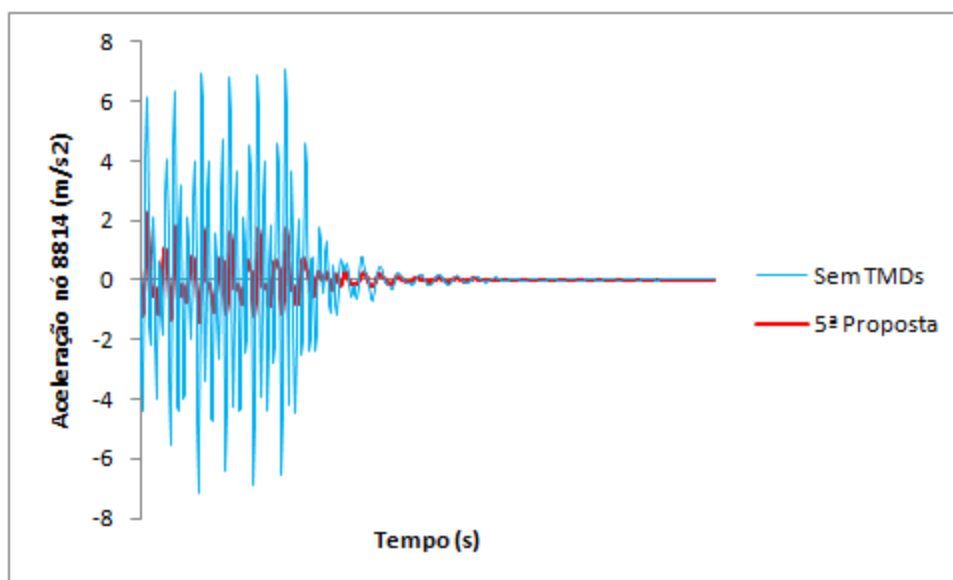


Figura 7-13 - Resposta do nó 8814 para 5ª Proposta e sem TMDs

Alterou-se a posição e o número de TMD's com o objectivo de se alcançar os resultados pretendidos, mas não foram satisfatórios. Portanto, manteve – se o controlo do segundo modo para os dois TMD's e na 6ª Proposta controlar – se – á o primeiro modo.

7.1.6 6ª Proposta

Esta proposta controla o primeiro modo de vibração, visto que o segundo modo é controlado na 5ª Proposta.

Procede-se a análise para oito TMD's e as propriedades destas são calculadas para n=6, mantendo constante as propriedades dos dois TMD's dimensionados para o segundo

modo. Os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos cinco primeiros TMD's (TMD1 nó 8814, TMD2 nó 8952, TMD3 nó 8440, TMD4 nó 8395, TMD5 nó 113). O sexto ponto, nó 8472, foi escolhido por ser um ponto "flexível" e pertencer a linha que interseca o centro da laje.

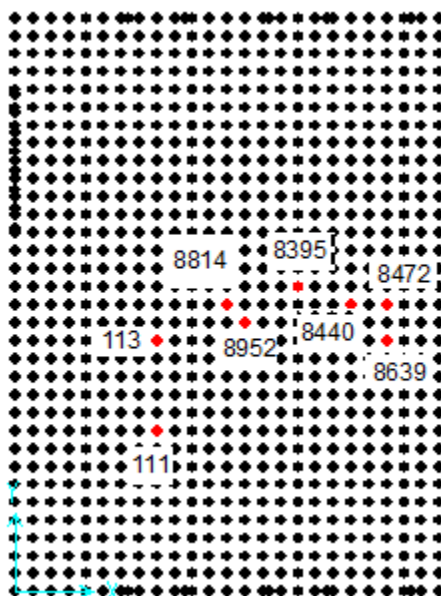


Figura 7-14 - Posição de oito TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na Tabela 23 e Tabela 24.

Tabela 23 - Propriedades de seis TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ'	βL	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ω_t (rad/s)	k (kN/m)	m_i (Toneladas)	$\omega_{estrutura}$ (rad/s)	C_i (kN.s/m)
0,0214	0,1186	0,9924	29,48	0,010	0,061	31,34	1094,86	1,26	31,58	4,537
			30,23					1,20		4,425
			30,97					1,14		4,319
			31,71					1,09		4,218
			32,46					1,04		4,121
			33,20					0,99		4,029

Tabela 24 - Propriedades de dois TMDs, controlo do 2º modo pelo método de Jangid

ξ'	βL	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ω_t (rad/s)	k (kN/m)	m_i (Toneladas)	$\omega_{estrutura}$ (rad/s)	C_i (kN.s/m)
0,0389	0,0629	0,9904	33,22	0,010	0,061	34,30	1375,01	1,25	34,63	5,057
			35,38					1,10		4,749

As respostas são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 - Acelerações nos pontos de análise, para oito TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	1,77
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,54
8814	Caso1	LinModHist	Max	1,84
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,62
8830	Caso1	LinModHist	Max	1,75
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,55
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,31
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,25
8952	Caso1	LinModHist	Max	1,74
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,55

Na Figura 7-15 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 6ª proposta.

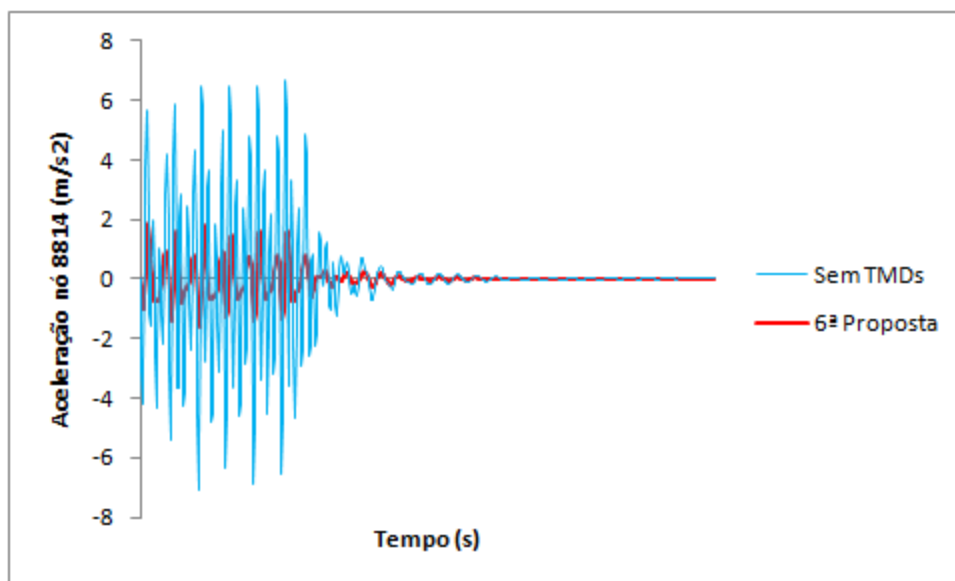


Figura 7-15 - Resposta do nó 8814 para 6ª Proposta e sem TMDs

Visto que a redução não é suficiente, prossegue-se para a 7ª Proposta.

7.1.7 7ª Proposta

Procede-se a análise para sete TMD's e as propriedades destes são calculadas para $n=7$, mantendo constante as propriedades dos dois TMD's dimensionados para o segundo modo. Os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos seis primeiros TMD's (TMD1 nó 8814, TMD2 nó 8952, TMD3 nó 8440, TMD4 nó 8395, TMD5 nó 113,

TMD 6 8472). O sétimo ponto, nó 8449, foi escolhido por ser um ponto “flexível” e estar distante do centro da laje.

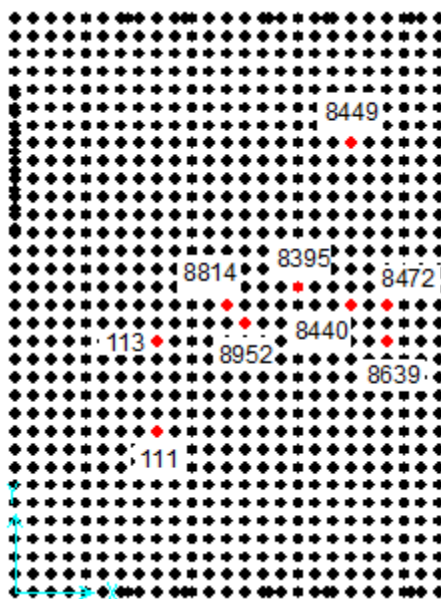


Figura 7-16 Posição de nove TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na Tabela 26.

Tabela 26 - Propriedades de sete TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ	βL	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ω_t (rad/s)	k (kN/m)	m_i (Toneladas)	$\omega_{estrutura}$ (rad/s)	C_i (kN.s/m)
0,0200	0,1235	0,9925	29,41	0,010	0,061	31,35	1095,19	1,27	31,58	4,549
			30,06					1,21		4,452
			30,70					1,16		4,358
			31,35					1,11		4,269
			31,99					1,07		4,183
			32,64					1,03		4,100
			33,28					0,99		4,020

As respostas são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Acelerações nos pontos de análise, para nove TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	1,50
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,18
8814	Caso1	LinModHist	Max	1,55
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,24
8830	Caso1	LinModHist	Max	1,58
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,27
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,26
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,19
8952	Caso1	LinModHist	Max	1,58
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,28

O nó 8814 como referido é o mais crítico, observa-se pela Tabela 28 que as acelerações não são verificadas para a Norma ISO 2631-2 e o Guia prático AISC.

Tabela 28 - Verificação dos critérios de aceleração no nó 8814

	Aceleração de pico m/s ²	Aceleração RMS m/s ²	Nó 8814 (m/s ²)	Verificação
ISO 2631-2:1989		0,49	1,10	Não verifica
Guia AISC	0,69		1,55	Não verifica
CSA-S16-1-1974	0,49		1,55	Não verifica

Na Figura 7-17 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 7ª proposta.

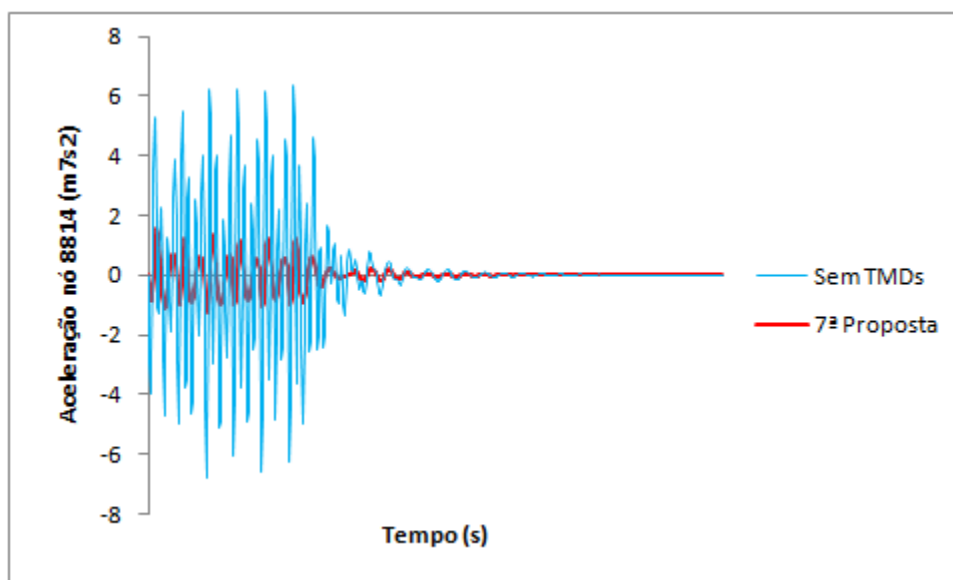


Figura 7-17 - Resposta do nó 8814 para 7ª Proposta e sem TMDs

Visto que a redução não é suficiente, prossegue-se para a 8ª Proposta.

7.1.8 8ª Proposta

Procede-se a análise para dez TMD's e as propriedades destes são calculadas para $n=8$, mantendo constante as propriedades dos dois TMD's dimensionados para o segundo modo. Os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos sete primeiros TMD's (TMD1 nó 8814, TMD2 nó 8952, TMD3 nó 8440, TMD4 nó 8395, TMD5 nó 113, TMD 6 nó 8472 e TMD 7 nó 8849). O oitavo ponto, nó 8991, foi escolhido por ser um ponto "flexível" e estar distante do centro da laje.

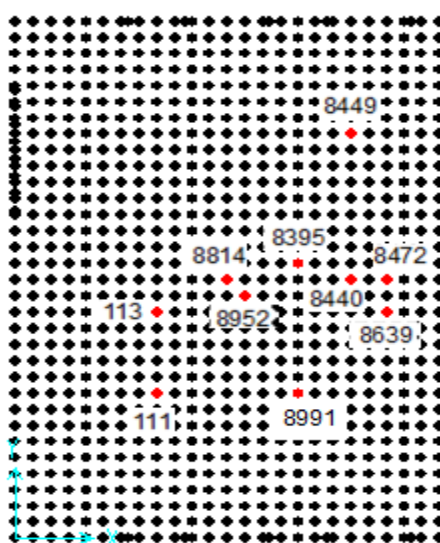


Figura 7-18 - Posição de dez TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na Tabela 29.

Tabela 29 - Propriedades de oito TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ'	βL	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ω_t (rad/s)	k (kN/m)	m_i (Toneladas)	$\omega_{estrutura}$ (rad/s)	C_i (kN.s/m)
0,0190	0,1272	0,9926	29,35	0,010	0,061	31,35	1095,45	1,27	31,58	4,559
			29,92					1,22		4,472
			30,49					1,18		4,389
			31,06					1,14		4,308
			31,63					1,09		4,231
			32,20					1,06		4,156
			32,77					1,02		4,084
			33,34					0,99		4,014

As respostas são apresentadas na Tabela 30.

Tabela 30 - Acelerações nos pontos de análise, para dez TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	1,58
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,10
8814	Caso1	LinModHist	Max	1,64
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,17
8830	Caso1	LinModHist	Max	1,52
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,08
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,34
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,25
8952	Caso1	LinModHist	Max	1,52
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,09

Na Figura 7-19 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 8ª proposta.

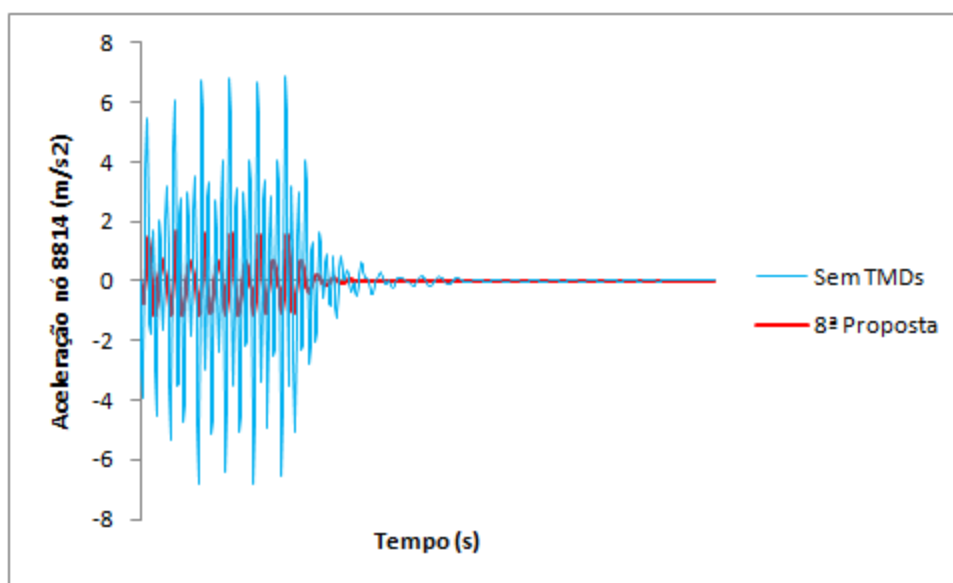


Figura 7-19 - Resposta do nó 8814 para 8ª Proposta e sem TMDs

Visto que a redução não é suficiente, prossegue-se para a 9ª Proposta.

7.1.9 9ª Proposta

Procede-se a análise para nove TMD's e as propriedades destes são calculadas para $n=9$, mantendo constante as propriedades dos dois TMD's dimensionados para o segundo modo. Os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos oito primeiros

TMD's (TMD1 nó 8814, TMD2 nó 8952, TMD3 nó 8440, TMD4 nó 8395, TMD5 nó 113, TMD 6 nó 8472, TMD 7 nó 8849 e TMD 8991). O nono ponto, nó 439, foi escolhido por ser um ponto flexível e estar distante no bordo da laje.

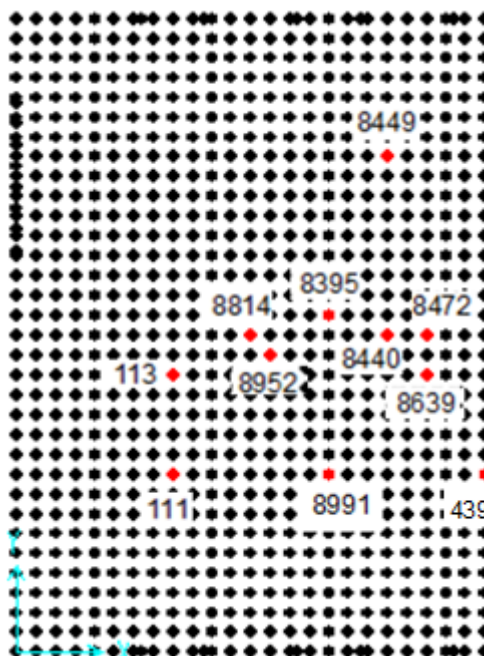


Figura 7-20 - Posição de onze TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na Tabela 31.

Tabela 31 - Propriedades de oito TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ	βL	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ω_t (rad/s)	k (kN/m)	m_i (Toneladas)	$\omega_{estrutura}$ (rad/s)	C_i (kN.s/m)
0,0182	0,1302	0,9927	29,31	0,010	0,061	31,35	1095,64	1,28	31,58	4,567
			29,82					1,23		4,489
			30,33					1,19		4,413
			30,84					1,15		4,340
			31,35					1,11		4,269
			31,86					1,08		4,201
			32,37					1,05		4,135
			32,88					1,01		4,071
			33,39					0,98		4,008

As respostas são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 - Acelerações nos pontos de análise, para 11 TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	1,59
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,16
8814	Caso1	LinModHist	Max	1,66
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,23
8830	Caso1	LinModHist	Max	1,55
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,16
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,33
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,24
8952	Caso1	LinModHist	Max	1,55
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,17

Na Figura 7-21 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 9ª proposta.

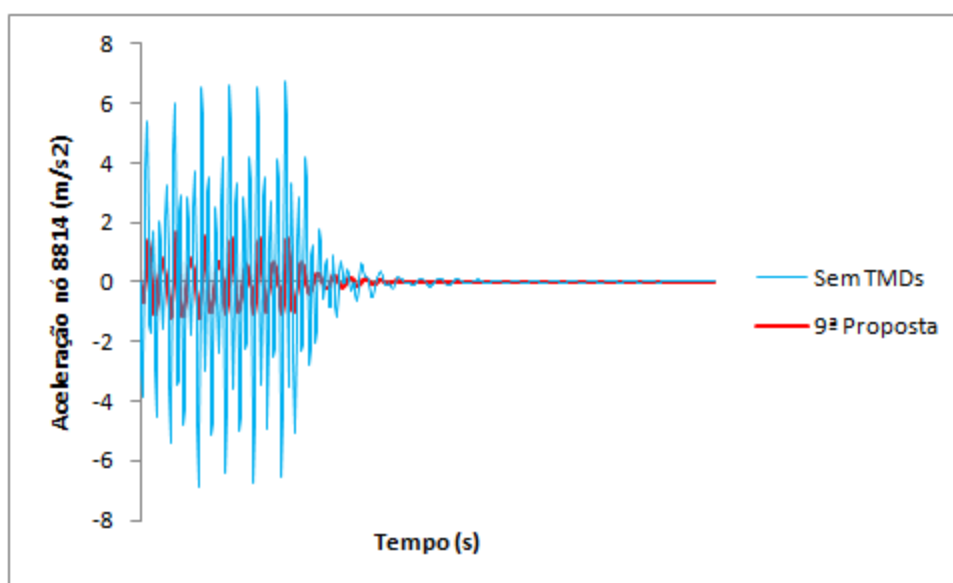


Figura 7-21 - Resposta do nó 8814 para 9ª Proposta e sem TMDs

Visto que a redução não é suficiente, prossegue-se para a 10ª Proposta.

7.1.10 10ª Proposta

Procede-se a análise para dez TMD's e as propriedades destes são calculadas para $n=10$, mantendo constante as propriedades dos dois TMD's dimensionados para o segundo modo. Os seus novos valores são introduzidos mantendo a posição dos nove primeiros

TMD's (TMD1 nó 8814, TMD2 nó 8952, TMD3 nó 8440, TMD4 nó 8395, TMD5 nó 113, TMD 6 nó 8472, TMD 7 nó 8849, TMD8 8991 e TMD9 439). O décimo ponto, nó 9040, foi escolhido por ser um ponto "flexível" da laje.

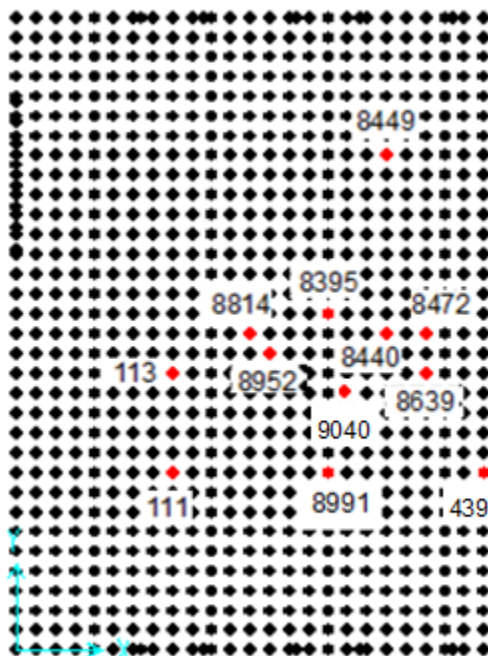


Figura 7-22 - Posição de doze TMD's para o controlo das vibrações

As propriedades dos amortecedores são mostradas na Tabela 33.

Tabela 33 - Propriedades de oito TMDs, controlo do 1º modo pelo método de Jangid

ξ	βL	α	ω_i (rad/s)	μ	ϵ	ωt (rad/s)	k (kN/m)	m_i (Toneladas)	$\omega_{estrutura}$ (rad/s)	C_i (kN.s/m)
0,0176	0,1326	0,9928	29,27	0,010	0,061	31,35	1095,80	1,28	31,58	4,573
			29,74					1,24		4,502
			30,20					1,20		4,433
			30,66					1,17		4,366
			31,12					1,13		4,301
			31,59					1,10		4,239
			32,05					1,07		4,177
			32,51					1,04		4,118
			32,97					1,01		4,060
			33,43					0,98		4,004

As respostas são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 - Acelerações nos pontos de análise, para 12 TMD's

Nó	Caso	Análise	Aceleração m/s ²	
116	Caso1	LinModHist	Max	1,54
116	Caso1	LinModHist	Min	-1,13
8814	Caso1	LinModHist	Max	1,61
8814	Caso1	LinModHist	Min	-1,20
8830	Caso1	LinModHist	Max	1,49
8830	Caso1	LinModHist	Min	-1,13
8939	Caso1	LinModHist	Max	0,31
8939	Caso1	LinModHist	Min	-0,22
8952	Caso1	LinModHist	Max	1,50
8952	Caso1	LinModHist	Min	-1,14

Na Figura 7-23 é representada graficamente a resposta do nó 8814 para a laje sem amortecedores e para a 10ª proposta.

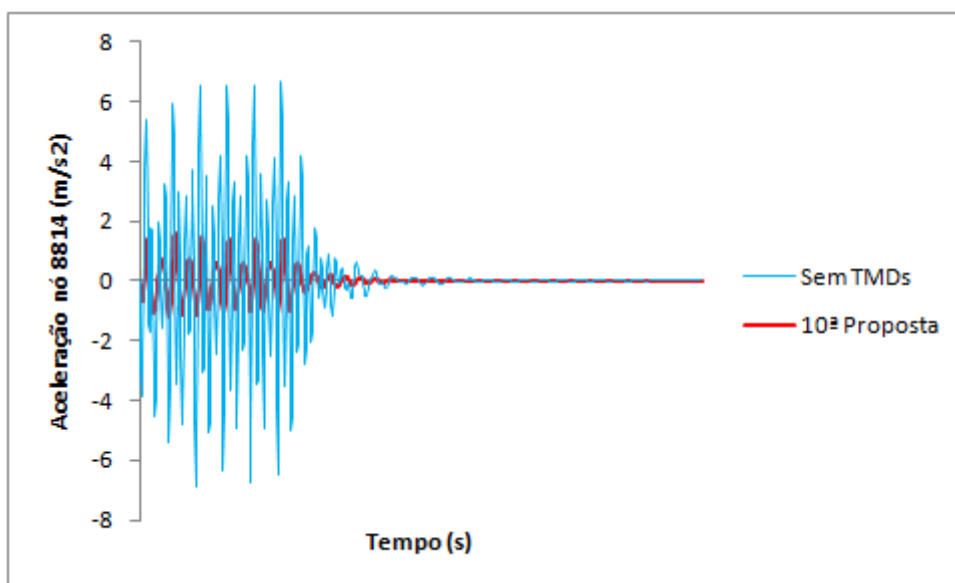


Figura 7-23 - Resposta do nó 8814 para 10ª Proposta e sem TMDs

De acordo com a Figura 7-24, observa-se o comportamento dos nós de maiores acelerações quando estes são controlados com o aumento do número de TMD's. O incremento do número de TMD's e a escolha de outros pontos "flexíveis" não conduz a diminuição da aceleração naqueles pontos, podendo ainda aumentar as acelerações noutros pontos mas para valores inferiores aos dos nós críticos. Tendo em conta esta observação, verifica-se que a partir de 9 (nove) TMD's instalados a redução da aceleração mantém-se constante.

Optou-se por terminar a análise para 12 (doze) TMD's, visto que a diminuição da aceleração não era significativa.

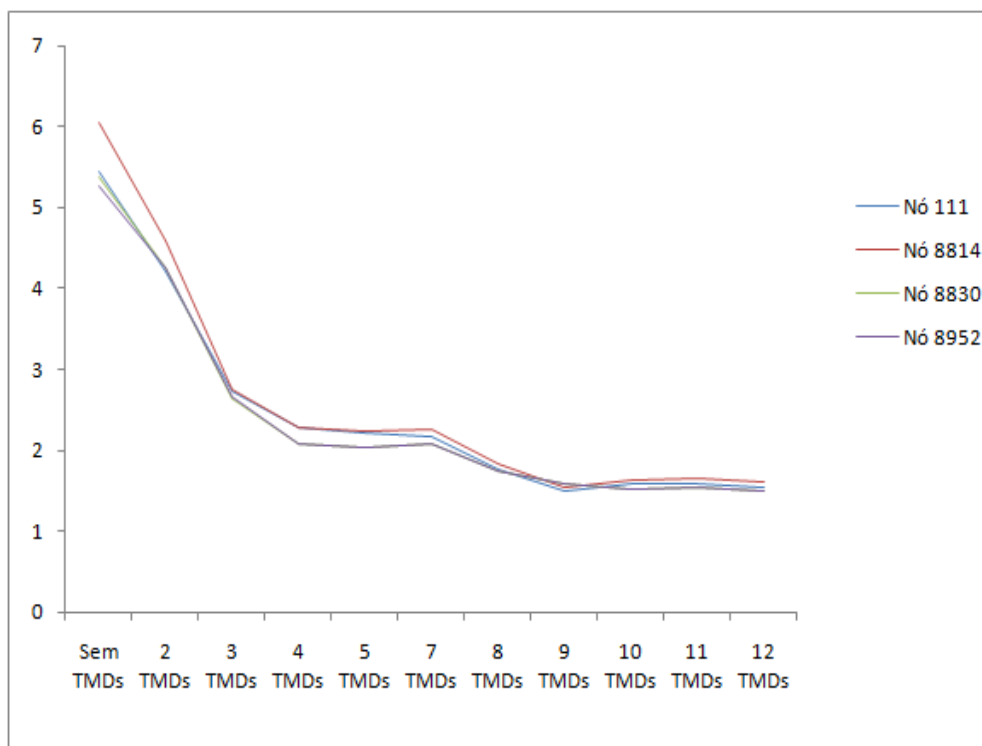


Figura 7-24 - Evolução das acelerações com o incremento de TMDs

Os critérios de conforto também não são verificados para 39 (trinta e nove) pessoas a actuar na laje com TMD's instalados, Tabela 35. O estudo seguinte pretende determinar o número médio de pessoas que podem actuar na laje para que estes critérios sejam verificados.

Tabela 35 - Comparação das acelerações nos pontos de análise.

	Aceleração de pico m/s ²	Aceleração RMS m/s ²	Nó 8814 (m/s ²)	Nó 8830 (m/s ²)	Nó 8952 (m/s ²)	Nó 111(m/s ²)
ISO 2631-2:1989		0,49	1,09	1,06	1,06	1,09
Guia AISC	0,69		1,54	1,50	1,50	1,54
CSA-S16-1-1974	0,49		1,54	1,50	1,50	1,54

7.2 AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DAS ACELERAÇÕES

Pretende-se diminuir o número de pessoas a actuar na laje de modo a que as acelerações limites não sejam excedidas. Teve-se em consideração os três casos de carga, em que cada um varia com a frequência da força. Na actividade rítmica com frequência de 3,4 Hz, foram considerados quatro pontos importantes, nó 8814, nó 8830, nó 116 e nó 8952 seleccionados previamente. A diminuição do número de pessoas conduziu à diminuição

da aceleração nos respectivos pontos. As acelerações nestes pontos convergem para um valor constante à medida que o número de pessoas diminui. Neste caso é permitido no máximo o número médio de 17 (dezassete) pessoas de acordo com o Guia AISC e 11 (onze) pessoas para o critério CSA-S16-1-1974.

Na actividade rítmica com frequência de 2,5Hz, foram considerados quatro pontos, nó 8830, nó 8814, nó 8922 e nó 8937. As acelerações nos referidos nós diminuem gradualmente com a diminuição do número de pessoas, de acordo com a Figura 7-25. A utilização de 12 (doze) TMDs diminui as acelerações nos nós da laje e estas respeitam as condições dos critérios CSA-S16-1-1974, ISO 2631-2:1989 e Guia AISC.

Na actividade rítmica com frequência de 1,8Hz, foram considerados três pontos críticos, nó 8814, nó 8798 e nó 116. Verifica-se também que as acelerações dos nós críticos diminuem a medida que número de pessoas diminui. Os critérios de conforto verificam-se para este caso de carga e a variação da aceleração nos referidos pontos é mínima evidenciando que não necessário o uso de TMD's para este caso.

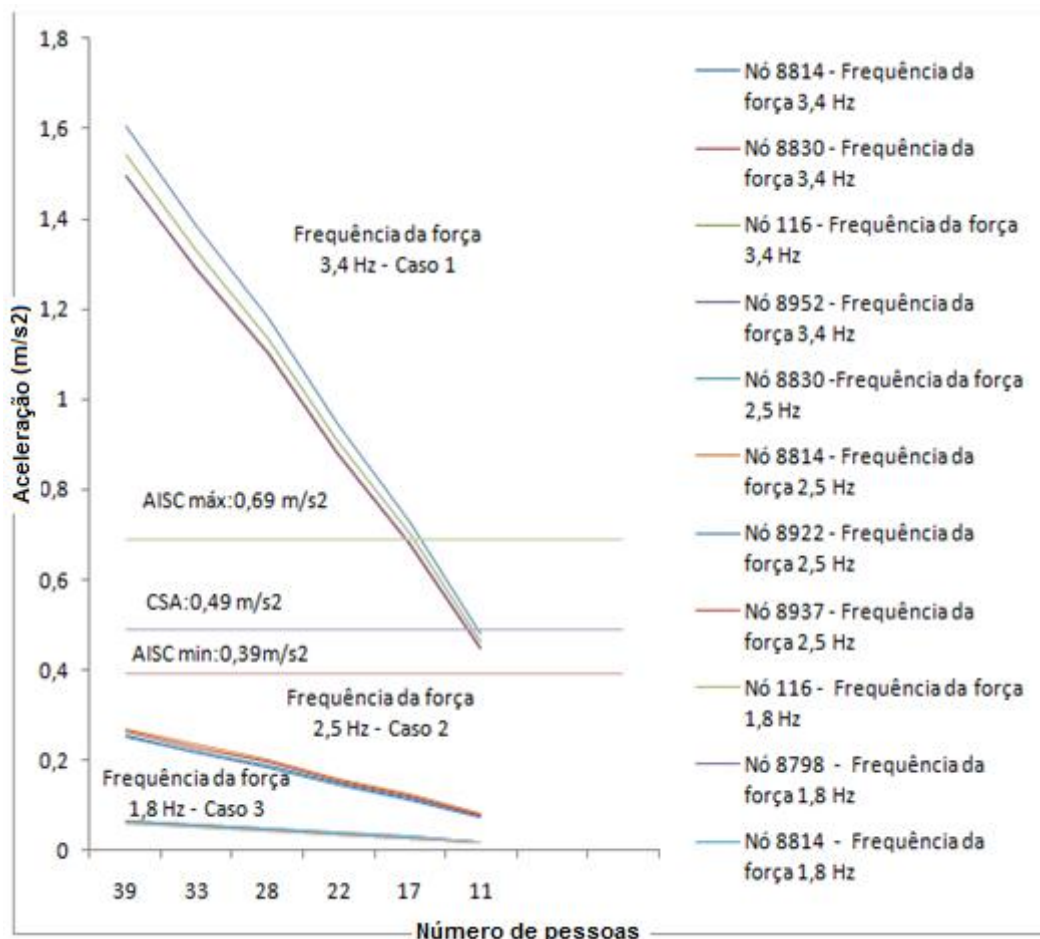


Figura 7-25 - Evolução das acelerações com a diminuição do número de pessoas

Foram utilizados doze TMD's representados na Figura 7-26, correspondente a massa 11,21 toneladas. A massa total do piso aumenta em 1,7% e distribui-se na laje. Os deslocamentos máximos dos TMD's são dados na Tabela 36, o valor máximo corresponde ao TMD ligado ao nó 8814 da laje.

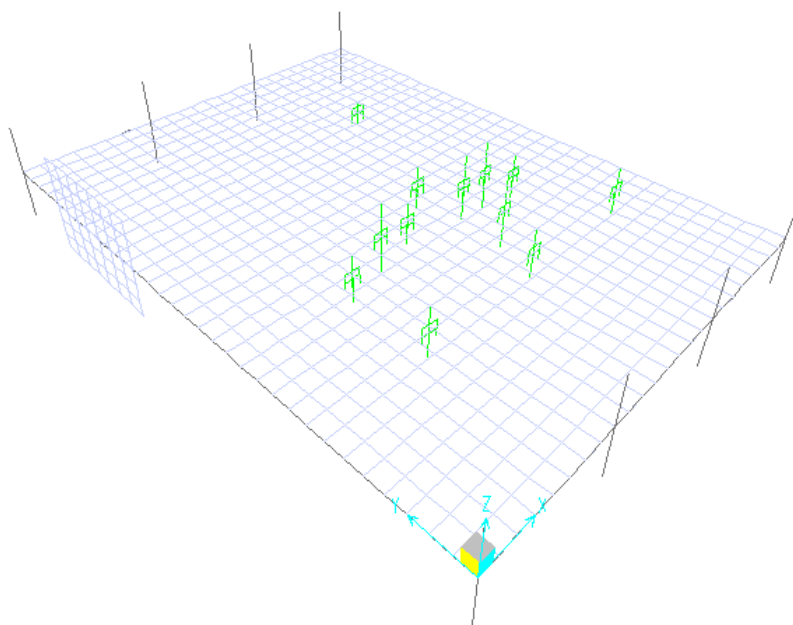


Figura 7-26 - Representação dos doze TMDs aplicados à estrutura

Tabela 36 - Deslocamentos das massas dos TMDs.

Nó Laje	Nó TMD	Caso	Análise	Deslocamentos (mm)	
8472	89	Caso1	LinModHist	Max	1,7
8440	90	Caso1	LinModHist	Max	2,0
111	93	Caso1	LinModHist	Min	1,3
8639	94	Caso1	LinModHist	Max	1,4
8952	100	Caso1	LinModHist	Min	3,5
8395	101	Caso1	LinModHist	Max	1,7
113	107	Caso1	LinModHist	Max	2,3
8991	125	Caso1	LinModHist	Min	1,1
8814	135	Caso1	LinModHist	Max	3,8
439	139	Caso1	LinModHist	Min	0,4
9040	145	Caso1	LinModHist	Min	1,5
8449	119	Caso1	LinModHist	Max	1,2

Observa-se que o deslocamento máximo do TMD é 3,8mm e a massa deste TMD é de 1,28 toneladas. Fisicamente é possível utilizar os TMDs devido ao deslocamento reduzido destes. Os TMD's podem ser instalados, ligados a vigas ou a lajes e se podem utilizar tectos falsos de modo a não tornar visíveis os respectivos TMD's.

Capítulo 8

Conclusão

No presente trabalho é apresentado um estudo relativo ao comportamento de uma laje submetida a acções dinâmicas induzidas por actividades rítmicas típicas de ginásios e salões de dança. A estrutura em estudo é um ginásio localizado em Lisboa, em que a laje superior é solicitada por grupos de pessoas que praticam actividades rítmicas, tais como dança e saltos rítmicos.

Começou-se por caracterizar as acções dinâmicas provenientes de actividades humanas com os tipos de danças divididos em duas categorias para se ter em conta a variabilidade do tempo de contacto. Este parâmetro descreve as várias actividades e incrementa a força dinâmica para tempos de contactos curtos. A função semi – sinusoidal foi a escolhida por representar o impulso de cada pé, característico dos tipos de dança de maiores energias.

Descreveram-se em resumo as normas utilizadas neste trabalho, as normas CAN – S16-M18, ISO 2631/2: 1989 e o Guia prático AISC- série 11. As duas normas e o guia prático são atendidos para o caso mais severo da actividade rítmica, com frequência da força de 3,4Hz, em que actuam o número máximo de 17 pessoas de acordo com o Guia AISC e 11 pessoas para o critério CSA-S16-1-1974 e ISO 2631-2:1989. Para os restantes casos, frequência da força de 1,8 Hz e 2,5Hz, os critérios de conforto acima referidos são verificados, não havendo nenhuma restrição quanto ao número de pessoas a praticarem as actividades rítmicas.

Foram aplicadas seis cargas em cada ponto da laje, descrevendo os seis saltos rítmicos de cada pessoa. Chegou – se a conclusão que seis cargas são suficientes, porque a aceleração não se alterou para números de saltos superiores. Para um total de 39 pessoas na laje, é aplicado um total de 234 cargas. Este é um procedimento trabalhoso comparado com a aproximação da função semi – seno por desenvolvimento em série de Fourier em que se aplicavam apenas 39 cargas.

Dos três casos de cargas analisados, em que cada um descreve a respectiva actividade rítmica, o caso 1 com frequência da força igual a 3,4Hz é o mais severo. As respostas da estrutura são maiores para este caso de carga, evidenciando que o salto rítmico em pavimentos é o mais importante devido à elevada quantidade de energia que este transmite.

Os valores de aceleração obtidos excedem os máximos admissíveis pelas normas e guia prático aplicados neste trabalho, o que conduziu ao uso de um método de controlo estrutural para a redução destas acelerações. O controlo passivo de vibrações pelo uso de

TMD's em que os parâmetros são otimizados pelo método de Jangid é implementado neste trabalho. Os parâmetros são definidos para 10 propostas de aplicação dos TMD's em que para cada proposta se mantém o número anterior de TMD's aplicados nos pontos, variando apenas as características destes. A escolha dos pontos para a aplicação dos TMD's é dificultada pelo facto de não existir um critério específico para aplicação destes dispositivos. A aplicação em pontos de maiores deslocamentos modais pode conduzir ao incremento de acelerações máximas. Os TMD's são sintonizados para cada modo de vibração, sendo difícil saber o número exacto de TMD's necessários para controlar cada um. Tendo em conta estes aspectos, uma optimização mais eficiente poderia ser satisfatória diminuindo o incremento da massa total para valores inferiores ao alcançado, 1,7% da massa total.

A aplicação de TMD's conduziu à redução das acelerações máximas. No salão de dança em estudo sugere-se o número máximo de 11 (onze) pessoas a praticarem actividades rítmicas de elevada energia. É de notar que as 11 (onze) pessoas encontram-se próximas do centro da laje. A posição de cada TMD é fundamental para a redução de vibrações tornando a aceleração muito sensível a alterações nos casos em que não são correctamente aplicados. Há necessidade de estudo de outros métodos de optimização dos parâmetros de TMD's para que estes sejam eficientemente sintonizados. Quanto às normas aplicadas conclui-se que há certa subjectividade na aplicação destas devido a parâmetros que podem afectar o comportamento do ser humano durante uma vibração.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.G.S. Da Silva, P.C.G. Vellasco, S.A.L. De Andrade, F.J. Soeiro, e R.N. Werneck, "An evaluation of the dynamical performance of composite slabs," *Computers & Structures*, vol. 81, 2003, pp. 1905–1913.
- [2] A. Mello, J. da Silva, P.D.S. Vellasco, S. de Andrade, e L. de Lima, "Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, Out. 2008, pp. 1142-1151.
- [3] A. Longinow e W.R. Hannen, "Floor Vibrations in Buildings," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 14, 2009, pp. 143–145.
- [4] R.C. Battista e W.D. Varela, "Medidas Corretivas para Vibrações de Painéis Contínuos de Lajes de Edifícios," *XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasil, 2002*.
- [5] M.D. Santos, "Análise numérica do controle de vibrações em lajes de edifícios utilizando amortecedores de massa sintonizados," 2009.
- [6] A.C. Webster e R. Vaicaitis, "Application of tuned mass dampers to control vibrations of composite-floor systems," *Engineering Journal of the American Institute of Steel Construction*, vol. 29, 1992, pp. 116–124.
- [7] F. Sadek, B. Mohraz, A.W. Taylor, e R.M. Chung, "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 26, 1997, pp. 617–635.
- [8] C. Moutinho, "Controlo de Vibrações em Estruturas de Engenharia Civil," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [9] "Hivoss (Human Induced Vibrations of Steel Structures): Vibrações em pavimentos - Documento Base," Set. 2008.
- [10] M.J. Griffin, *Handbook of human vibration*, Elsevier, 1996.
- [11] T. Ji e B.R. Ellis, "Floor vibration induced by dance-type loads: theory," *Structural Engineer*, vol. 72, 1994, pp. 37–37.
- [12] A.V. Mello, "Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas," 2005.
- [13] D.E. Allen e J.H. Rainer, "Vibration criteria for long-span floors," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 3, 2010, pp. 165–173.
- [14] T.M. Murray, D.E. Allen, e E.E. Ungar, "Steel design guide series# 11: Floor vibrations due to human activity," *American Institute of Steel Construction, Chicago*, 1997.
- [15] J.G.S. Da Silva, P.C.G. Vellasco, S.A.L. De Andrade, F.J. Soeiro, e R.N. Werneck, "An

-
- evaluation of the dynamical performance of composite slabs,” *Computers & Structures*, vol. 81, 2003, pp. 1905–1913.
- [16] H. Bachmann, “Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations,” *Journal of structural engineering*, vol. 118, 1992, p. 631.
- [17] H. Bachmann e W. Ammann, *Vibrations in structures: induced by man and machines*, IABSE, 1987.
- [18] T. Ji e B.R. Ellis, “Floor vibration induced by dance-type loads: verification,” *The Structural Engineer*, vol. 72, 1994, pp. 45–50.
- [19] D.V. Lima, “Controle de vibrações induzidas em uma laje de academia de ginástica com a utilização de amortecedores de massa sintonizados (AMS),” 2007.
- [20] W.D. Varela, “Modelo Teórico Experimental para Análise de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando Sobre Lajes de Edifícios,” Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Brasil, 2004.
- [21] C. Moutinho, “Controlo Passivo e Activo de Vibrações em Pontes de Peões,” Faculdade de Engenharia da U.P. - Departamento de Engenharia Civil, 1998.
- [22] BSI, “British Standard BS6399: Loading for Buildings, Part 1: Code of practice for dead and imposed loads,” 1996.
- [23] Canadian Standards Association, C.-S.-M. (1984). *Steel Structures for Buildings - Limits States Design*. In Appendix G: Guide on Floor Vibrations. Canada
- [24] International Organization for Standards, “Evaluation of human exposure to whole-body vibration --Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz),” International Standard ISO-2631/2-1989(E).
- [25] F. Naeim e S.C.O. California, *Design practice to prevent floor vibrations*, Steel Committee of California, 1991.
- [26] A. Ebrahimpour e R.L. Sack, “A review of vibration serviceability criteria for floor structures,” *Computers & Structures*, vol. 83, 2005, pp. 2488–2494.
- [27] D.E. Allen, “Building vibrations from human activities,” *Concrete International: Design and Construction*, vol. 12, 2010, pp. 66–73.
- [28] C.J. Middleton e J.M.W. Brownjohn, “Response of high frequency floors: A literature review,” *Engineering Structures*, vol. 32, 2010, pp. 337–352.
- [29] E.L. Wilson e A. Habibullah, “SAP2000, Structural Analysis Program,” *Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA*, 1995.
- [30] L. Valencia, “Controle de vibrações em distintas configurações de vigas metálicas utilizando amortecedores de massa sintonizados. 2007,” Dissertação de mestrado—

Universidade de Brasília, Brasília.

- [31] J.H. Bonsel, R.H.B. Fey, e H. Nijmeijer, "Application of a dynamic vibration absorber to a piecewise linear beam system," *Nonlinear Dynamics*, vol. 37, 2004, pp. 227–243.
- [32] O. Hechler, M. Feldmann, C. Heinemeyer, e F. Galanti, "Design Guide For Floor Vibrations," *Proceedings of the 5th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel*, 2008, pp. 3–5.