

4

Cargas dinâmicas

4.1 Generalidades

Sabe-se que ao projetar um piso misto (aço-concreto) em que as suas frequências naturais, especialmente a frequência fundamental, estejam próximas das frequências da excitação, tais como aquelas referentes às atividades humanas do caminhar, pular, saltar e dançar, é provável que o sistema apresente problemas referentes a vibrações excessivas. Tendo em vista que ações corretivas após o início das atividades não é algo desejável, como também os custos, quando há necessidade de ações corretivas, serem muito elevados, torna-se imprescindível o conhecimento sobre o comportamento dinâmico das edificações, ainda na fase de projeto.

As cargas dinâmicas podem produzir elevados níveis de vibração, que podem tanto comprometer a segurança estrutural como causar alteração na sensação de conforto dos ocupantes dessas edificações. Por outro lado, essas atividades físicas têm sido consideradas na análise dinâmica de pisos de edificações de forma cada vez mais elaborada, pois a modelagem desse tipo de carregamento dinâmico é bastante complexa, devido às particularidades corporais de cada indivíduo e, bem como, a maneira que realizam um determinado tipo de ação Faisca (2003).

Nesta investigação estuda-se a resposta dinâmica de pisos mistos quando submetidos a essas ações dinâmicas humanas. Em se tratando de atividades humanas, podem-se tratar esses carregamentos como periódicos, ou seja, a variação da carga é repetida durante vários ciclos sucessivos. Desse modo as cargas dinâmicas geradas por atividades humanas podem ser classificadas em duas categorias, segundo Alves (1997). A primeira categoria se refere àquelas atividades sem a perda de contato com a estrutura, por exemplo: a caminhada e a dança de salão, a outra categoria se refere àquelas atividades em que existe a perda de contato com a estrutura, como exemplo pode-se citar a ginástica aeróbica e a corrida.

Pretende-se aqui tratar de atividades onde existe a perda de contato com a estrutura. As atividades estudadas são propriamente, a ginástica aeróbica e os saltos à vontade, como ilustradas nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Na sequência do texto, os modelos de carregamento dinâmicos desenvolvidos ao longo da tese serão descritos com mais detalhes.



Figura 4.1 – Exemplo de exercício de ginástica aeróbica, Gonçalves (2012).



Figura 4.2 – Exemplo de exercício de saltos à vontade, Gonçalves (2012).

4.2

Caracterização das ações dinâmicas

A descrição do carregamento produzido por pessoas em movimento é bastante complexa, pois envolve características próprias de cada indivíduo como a idade, o peso, a habilidade física, o tipo de calçado e ainda a forma como cada indivíduo realiza tal atividade. No caso das ações dinâmicas que envolvem a perda de contato do indivíduo com a estrutura, o movimento realizado se configura por fases alternadas de contato, ou seja, durante um determinado período o indivíduo está em contato com a estrutura e por alguns instantes ele se mantém no ar.

Entre as atividades que envolvem a perda de contato com a estrutura, pode-se citar a ginástica aeróbica e aquelas realizadas por plateias em shows e torcidas. Contudo, todas essas atividades humanas são caracterizadas pela execução de saltos e são diferenciadas principalmente pelo grau de sincronismo em que atuam os participantes. A Figura 4.3 mostra as quatro fases distintas que caracterizam essas ações.

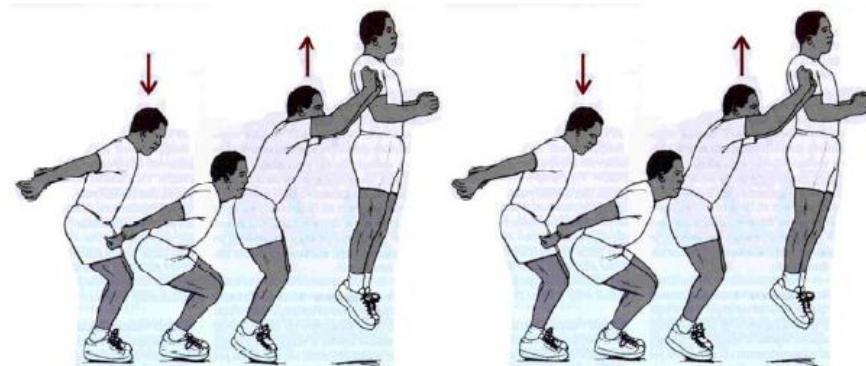


Figura 4.3 – Movimentos de um indivíduo durante um salto, Faisca (2003).

A primeira fase mostra a pessoa na posição inicial, numa fase de preparação. A segunda fase é a impulsão. Nessa fase, primeiro o indivíduo flexiona os joelhos com extensão dos membros superiores, projeta-se para frente e para cima e eleva os membros superiores a fim de impor uma velocidade inicial ao corpo. A terceira fase é a elevação, ou seja, a fase onde o corpo perde o contato com o solo e segue uma trajetória no espaço. A quarta e última fase é a aterrissagem, quando o corpo retoma o contato com o solo, ocorrendo nova flexão dos joelhos, retornando à posição inicial para o início de um novo salto.

Os saltos podem ocorrer seguidos de movimentos horizontais, e podem ser executados, estando o indivíduo inicialmente parado ou em movimento. A Figura 4.4 mostra a força aplicada em uma estrutura durante a execução de um salto.

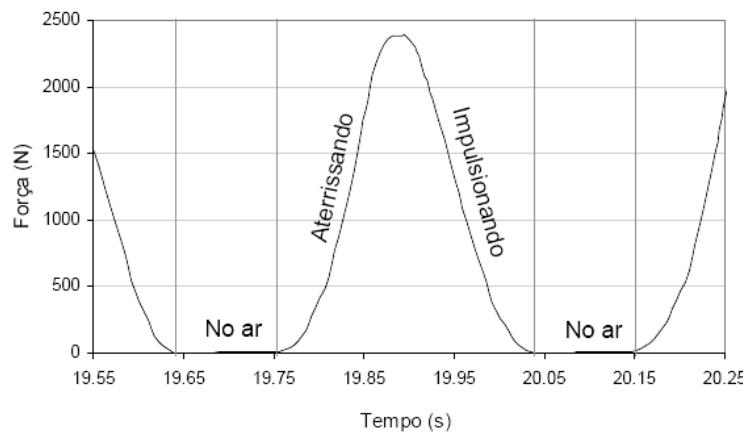


Figura 4.4 – Força aplicada numa estrutura durante um salto, Fáisca (2003).

Percebe-se através da Figura 4.4 que quando o indivíduo está no ar, à força aplicada sobre a estrutura vale zero. Na medida em que o indivíduo aterrissa, a força vai crescendo até atingir seu pico, nesse instante o indivíduo começa a impulsionar para realizar o próximo salto.

4.3 Modelo de carregamento I (MC-I)

O modelo de carregamento empregado neste trabalho foi desenvolvido para simular as excitações dinâmicas humanas rítmicas como a ginástica aeróbica e saltos à vontade. Para descrever matematicamente esse carregamento dinâmico a função Hanning foi proposta por Faisca (2003), que na modelagem considera também parâmetros experimentais.

A partir de resultados obtidos experimentalmente, verificou-se que a função semi-seno, usualmente empregada por vários autores, não é tão adequada para representar esse tipo de carregamento. Através de um estudo com várias funções, foi sugerida a função conhecida como janela Hanning Faisca (2003). Essa função foi a que melhor representou o sinal da força obtido experimentalmente. A comparação do sinal experimental com as funções semi-seno e Hanning pode ser vista na Figura 4.5.

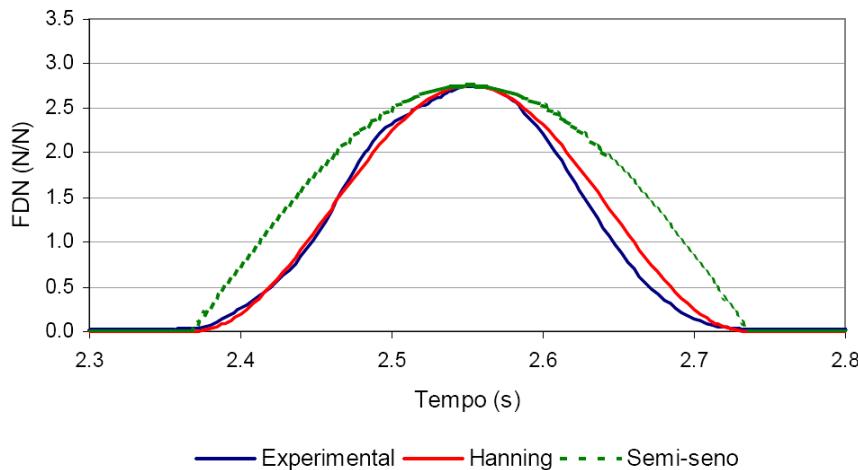


Figura 4.5 – Comparação entre o sinal experimental, e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning, Faisca (2003).

A representação matemática desse carregamento, por meio da função Hanning, é dada pela equação a seguir:

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[0,5 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\}, \text{ para } t \leq T_c \quad (4.1)$$

$$F(t) = 0, \text{ para } T_c < t \leq T$$

Em que:

$F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo (N);

CD : coeficiente de defasagem;

K_p : coeficiente de impacto;

P : peso da pessoa (N);

T : período da atividade (s);

T_c : período de contato da atividade (s);

t : tempo (s).

A Figura 4.6 facilita o entendimento da função matemática adotada, pois esta ilustra os dois intervalos de tempo significativos da referida função. Ressalta-se que a força dinâmica normalizada (FDN) é representada na ordenada dessa figura.

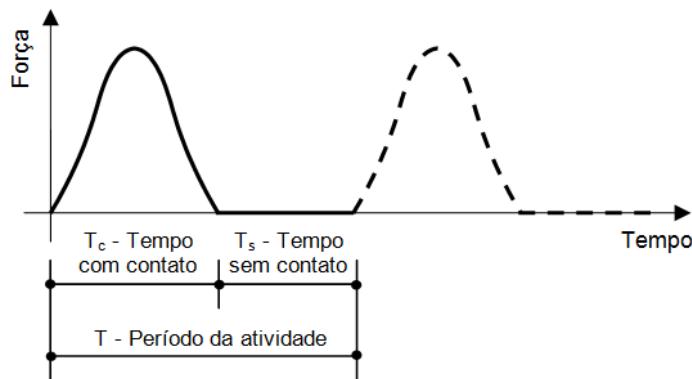


Figura 4.6 – Intervalos de tempo da função adotada, Faisca (2003).

Dos parâmetros citados anteriormente, o coeficiente de impacto (K_p) é um coeficiente de majoração da carga, que considera o impacto do salto sobre a estrutura. Já o coeficiente de defasagem (CD), é um coeficiente de ponderação da carga, determinado em função da atividade realizada e do número de pessoas que atuam. Esse parâmetro leva em consideração os efeitos de multidão, ou seja, o grau de sincronismo entre as pessoas que atuam na estrutura. Através dele são consideradas possíveis defasagens, variações de ritmo, etc., que levariam à redução do carregamento.

A Figura 4.7 apresenta o gráfico do coeficiente de defasagem (CD) para três atividades estudadas por Faisca (2003) extrapoladas para um grande número de pessoas. Isso permite que as cargas possam ser usadas para representar multidões.

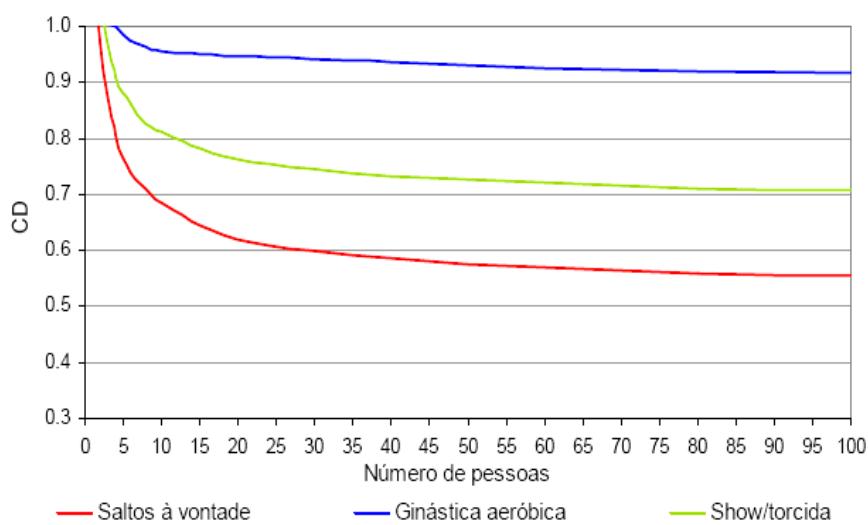


Figura 4.7 - Coeficientes de defasagem para as atividades propostas por Faisca (2003).

Percebe-se através da Figura 4.7, que o coeficiente de defasagem não varia muito para a atividade aeróbica como varia para a atividade de saltos à vontade, na medida em que o número de pessoas é aumentado. Isso ocorre porque há um maior sincronismo na atividade aeróbica, cujo CD fica entre os valores de 0,9 a 1,0. Na atividade de saltos à vontade os valores de CD estão aproximadamente entre 0,56 e 1,0.

$$CD = \frac{\text{Pico do sinal da soma}}{\sum_{i=1}^n K_{pi}} \quad (4.2)$$

A Tabela 4.1 foi montada a partir das curvas mostradas na Figura 4.5, onde são apresentados os valores numéricos de CD relacionados com o número de pessoas que será aplicado nesta investigação, de acordo com cada atividade (ginástica aeróbica e saltos à vontade).

Tabela 4.1 – Valores de CD, Faisca (2003).

Nº Pessoas	CD	
	Ginástica aeróbica	Saltos à vontade
1	1	1
2	1	0,88
4	0,98	0,76
8	0,96	0,70
12	0,95	0,67
16	0,94	0,64
24	0,93	0,62
32	0,92	0,60

A partir das diferentes situações estudadas por Faisca (2003) que avaliaram a influência da flexibilidade da estrutura nas respostas, foram obtidos diferentes resultados para os parâmetros que caracterizam cada atividade. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores das médias e desvios-padrão dos parâmetros T , T_c e K_p adotados neste trabalho para representar as atividades mencionadas.

Tabela 4.2 – Parâmetros experimentais utilizados por Faisca (2003).

Atividade	T (s)	T _c (s)	K _p
Saltos à vontade	0,44 ± 0,15	0,32 ± 0,09	3,17 ± 0,58
Ginástica aeróbica	0,44 ± 0,09	0,34 ± 0,09	2,78 ± 0,60
Show/torcida	0,37 ± 0,03	0,37 ± 0,03	2,41 ± 0,51

De forma a ilustrar a modelagem do carregamento dinâmico utilizado ao longo dessa tese (ginástica aeróbica e saltos à vontade), a Figura 4.10 apresenta exemplos de sinais da força no tempo e o espectro de frequência da força para diferentes valores dos parâmetros T, T_c, K_p e CD, variando na faixa dos dados experimentais propostos por Faisca (2003). O peso de cada indivíduo (P) é considerado igual a 800N Bachmann e Ammann (1987) e o amortecimento estrutural foi considerado como sendo igual a 1% ($\xi = 1\%$) Murray *et al.* (2003).

Para este trabalho foram considerados valores médios para os parâmetros T, T_c e K_p, no que tange ao carregamento dinâmico gerado por ginástica aeróbica e saltos à vontade, variando-se apenas o parâmetro CD de acordo com o número de pessoas. Mais precisamente, para o carregamento dinâmico gerado por ginástica aeróbica foram considerados os seguintes valores: T= 0,44s, T_c= 0,34s e K_p= 2,78 e para o carregamento dinâmico gerado por atividade de saltos à vontade fora utilizado T= 0,44s, T_c= 0,32s e K_p= 3,17, sendo para ambos variando-se apenas o parâmetro CD de acordo com o número de pessoas analisadas no carregamento, conforme Tabela 4.1.

De forma a ilustrar a modelagem deste tipo de carregamento dinâmico e utilizando-se os dados experimentais propostos por Faisca (2003), a Figura 4.8 apresenta exemplos de sinais da força no tempo correspondente à ginástica aeróbica.

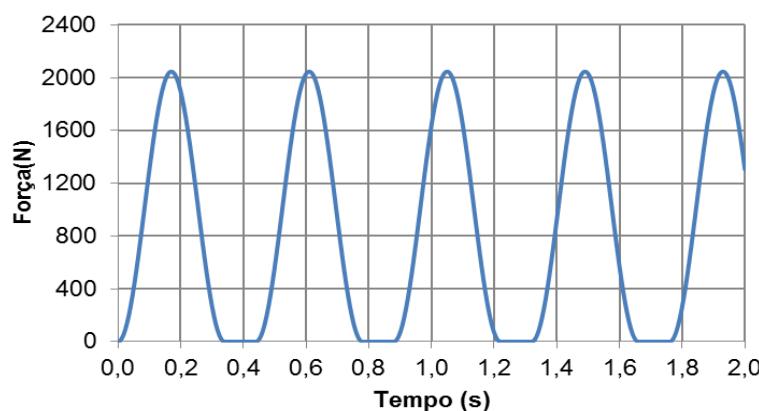


Figura 4.8 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica (T=0,44s, T_c=0,34, K_p=2,78 e CD= 0,92).

A Figura 4.9 apresenta alguns sinais no tempo da força correspondente a atividade de saltos à vontade. Ressalta-se que para a esse carregamento dinâmico à vontade a função de carregamento é a mesma, somente os parâmetros T , T_c , K_p e CD são modificados.

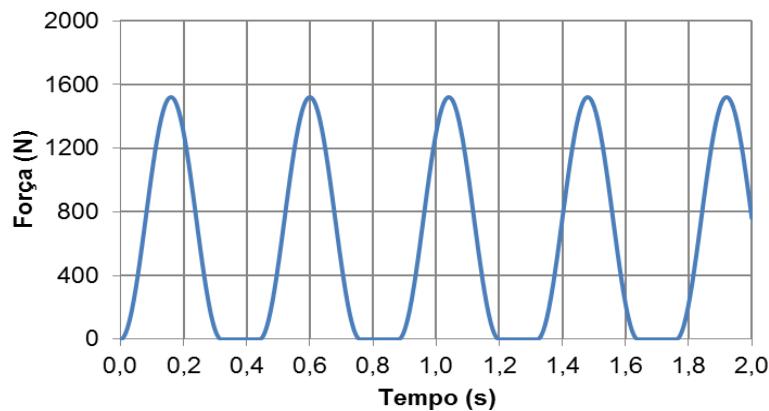


Figura 4.9 – Sinais de força no tempo para saltos à vontade
($T=0,44s$, $T_c=0,32$, $K_p=3,17$ e $CD= 0,60$).

Foram calculadas as transformadas Rápidas de Fourier (TRF) Brigham (1988), $F(\omega)$ da função associada ao modelo de carregamento I (MC-I), para diferentes parâmetros de T , T_c e K_p . Em todos os espectros de frequência foi verificada a presença de vários picos representativos da atividade, correspondentes aos seus harmônicos. A Figura 4.10 apresenta o gráfico da função de tempo da carga dinâmica, $F(t)$, e sua respectiva transformada no domínio da frequência, $F(\omega)$.

Convém chamar a atenção do leitor, para o fato de que a ação dinâmica proveniente da ginástica aeróbica apresenta três harmônicos, perfeitamente identificados na Figura 4.8, de acordo com a variação do período da atividade desenvolvida pelo ser humano sobre o piso. Ou seja, quando se considera, por exemplo, $T = 0,35s$, o primeiro harmônico da carga, no domínio da frequência, associa-se ao pico com frequência de 2,9 Hz, de acordo com a Figura 4.10. Ressalta-se que para outros valores de T , T_c e de K_p , mudam a frequência da atividade e seus harmônicos, mas a configuração do espectro é semelhante ao apresentado na Figura 4.10.

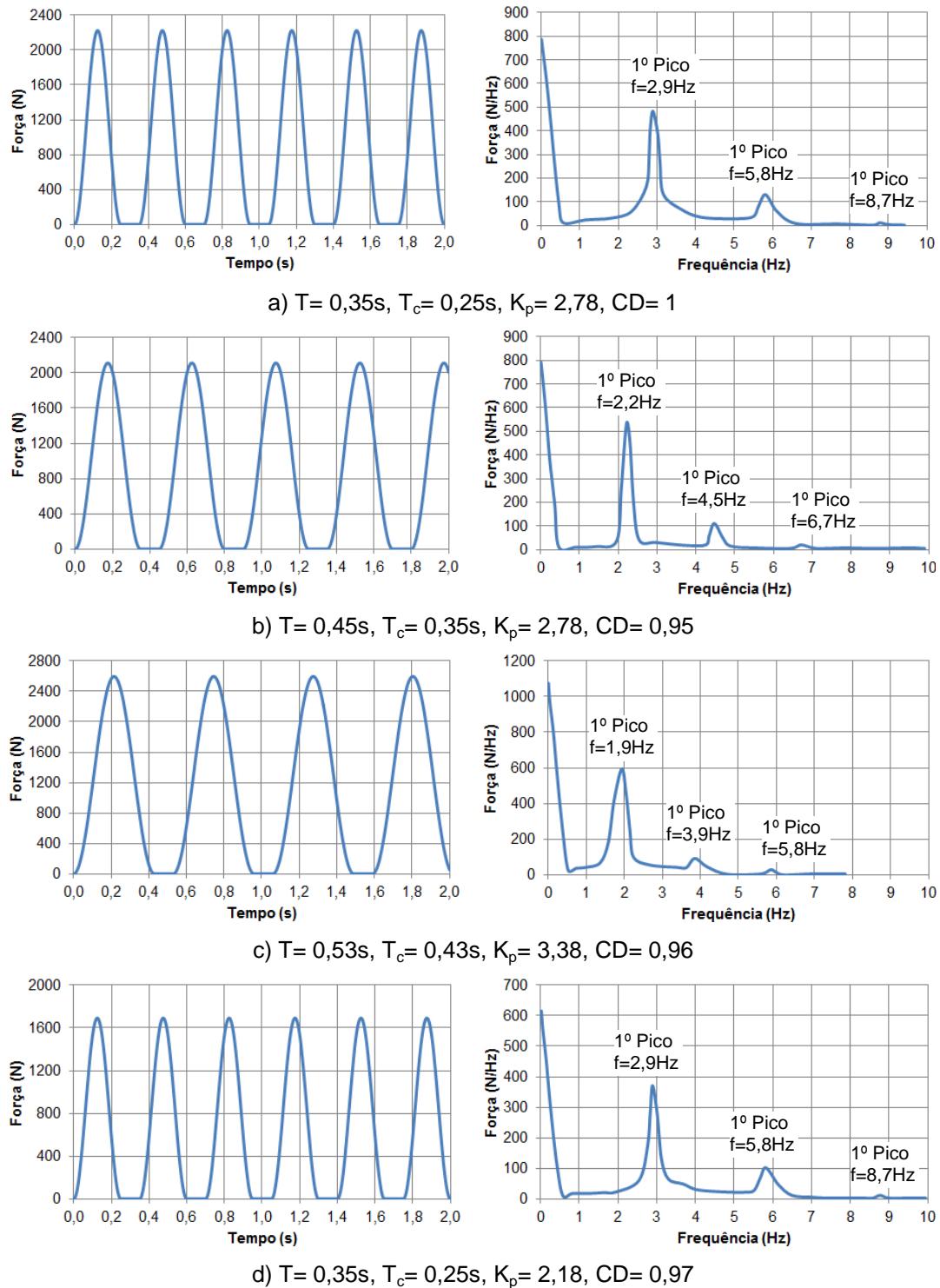


Figura 4.10 – Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica.

4.4 Modelo de carregamento II (MC-II)

O segundo modelo de carregamento utilizado nesta investigação foi proposto por Murray *et al.* (2003), e tem por objetivo simular a excitação dinâmica produzida por atividades humanas. Essa formulação propõe a

representação do carregamento através de uma série de Fourier com três termos, como definida a seguir. Considera-se aqui uma componente harmônica se igualar à frequência natural da estrutura, na tentativa de causar o fenômeno da ressonância.

$$F(t) = P + P \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(2\pi i f_p t + \phi_i) \right] \quad (4.3)$$

Onde:

- $F(t)$: representação matemática para o carregamento no tempo (N);
 P : peso da pessoa (N);
 n : número de harmônicos para representar a atividade humana;
 α_i : coeficiente dinâmico do i -ésimo harmônico da frequência da força;
 i : número do i -ésimo harmônico da frequência da força;
 f_p : frequência do passo da atividade;
 t : tempo (s);
 ϕ_i : ângulo de fase entre o i -ésimo e o primeiro harmônico.

Nessa formulação os valores recomendados para os coeficientes dinâmicos e as respectivas faixas de frequências para cada harmônico são fornecidas pela Tabela 4.3. Os valores dos ângulos de fase utilizados nas análises correspondem a $\phi_1=\phi_2=\phi_3=0$. Esses valores levaram à forma mais próxima do carregamento estudado, correspondente a ginástica aeróbica e saltos à vontade.

Tabela 4.3 - Coeficientes dinâmicos e harmônicos, Murray *et al.* (2003)

Harmônico i	Atividade aeróbica	
	f_p (Hz)	α_i
1	2,0 a 2,75	1,5
2	4,0 a 5,5	0,6
3	6,0 a 8,25	0,1

Utilizando os dados apresentados anteriormente, são mostrados na Figura 4.11 exemplos do sinal da força no tempo, utilizando o carregamento o modelo de carregamento II (MC-II), correspondente à atividade aeróbica.

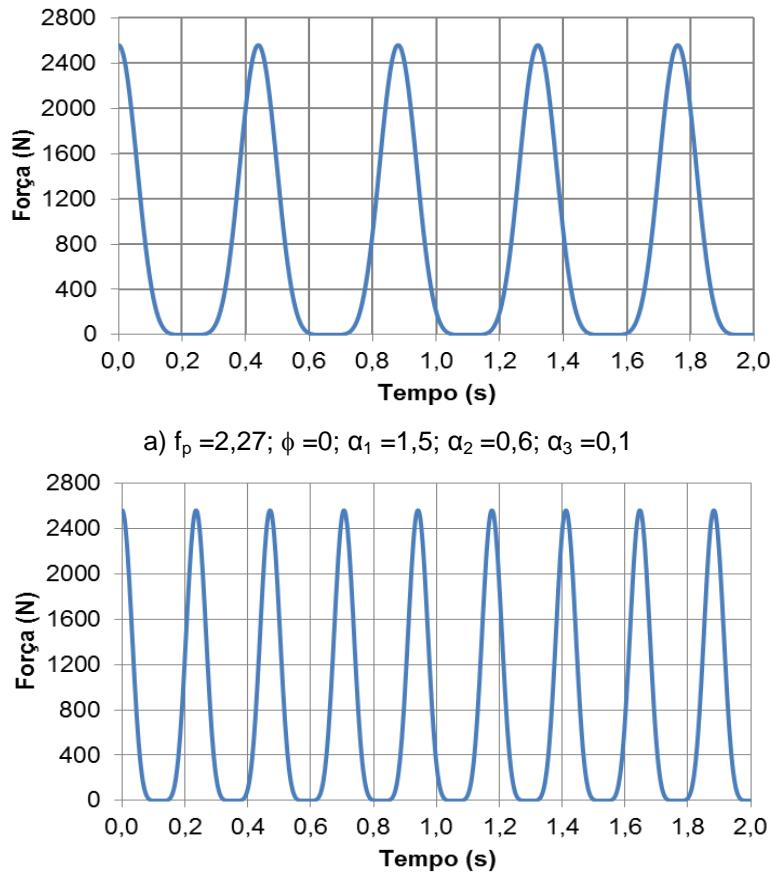


Figura 4.11 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica (MC-II).

4.5 Modelo de carregamento III (MC-III)

O terceiro modelo utilizado para representar a ação dinâmica humana foi proposto pelo CEB (1993), sendo expresso, também, por meio de uma série de Fourier com três termos associados às componentes de três harmônicos, ou seja:

$$F(t) = P_0 + \sum \Delta_i P_0 \sin(2i\pi f_p t - \phi_i) \quad (4.4)$$

Em que:

$F(t)$: função de carregamento variando no tempo;

P_0 : peso de uma pessoa (N);

Δ_i : coeficiente de Fourier para o harmônico;

$\Delta_i P_0$: amplitude da Força do harmônico;

f_p : frequência do passo humano;

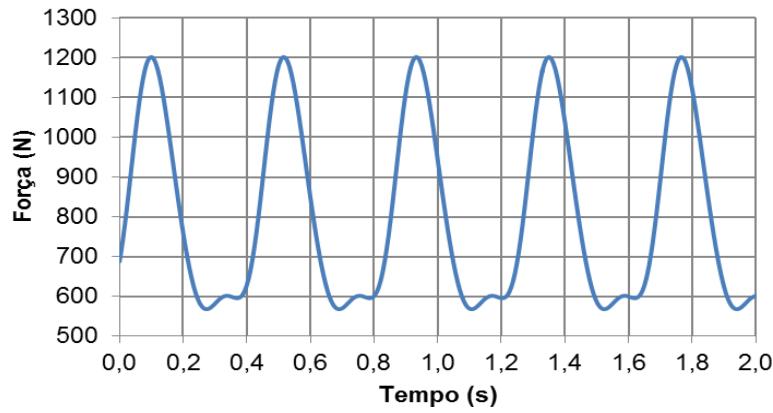
ϕ_i : ângulo de fase para o harmônico i ;
 t : tempo.

A formulação proposta pelo CEB (1993) considera apenas três harmônicos na composição da ação dinâmica. Os coeficientes dinâmicos associados a esses harmônicos estão expressos na Tabela 4.4.

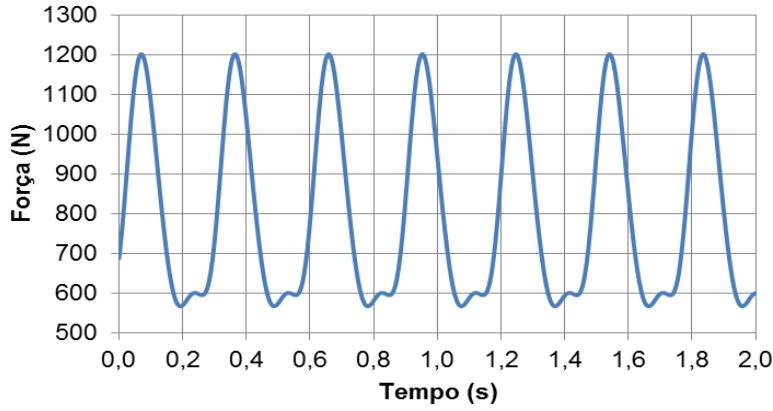
Tabela 4.4 – Coeficientes dinâmicos (CEB 1993)

Harmônico i	Coeficiente Dinâmico (α_i)	Ângulo de Fase (ϕ_i)
1	0,38	0
2	0,12	$\pi/2$
3	0,02	$\pi/2$

Apresenta-se na Figura 4.12 exemplos do sinal da força no tempo, utilizando na modelagem do carregamento III (MC-III).



a) $f_p = 2,40$; $\phi_1 = 0$; $\phi_2 = 1,571$; $\phi_3 = 1,571$ $\alpha_1 = 0,38$; $\alpha_2 = 0,12$; $\alpha_3 = 0,02$



b) $f_p = 3,40$; $\phi_1 = 0$; $\phi_2 = 1,571$; $\phi_3 = 1,571$ $\alpha_1 = 0,38$; $\alpha_2 = 0,12$; $\alpha_3 = 0,02$

Figura 4.12 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica (MC-III)

4.6

Comparação das funções de carregamento

As três funções de carregamento estudadas neste capítulo, referentes a função Hanning proposta por Faisca (2003), a função proposta por Murray *et al.* (2003) e a equação proposta pelo CEB (1993), foram representadas em um único gráfico para melhor entendimento das ações dinâmicas humanas rítmicas, simuladas por forças harmônicas variando ao longo do tempo, conforme a Figura 4.13. Para tal, foram consideradas 32 pessoas praticando atividades aeróbicas.

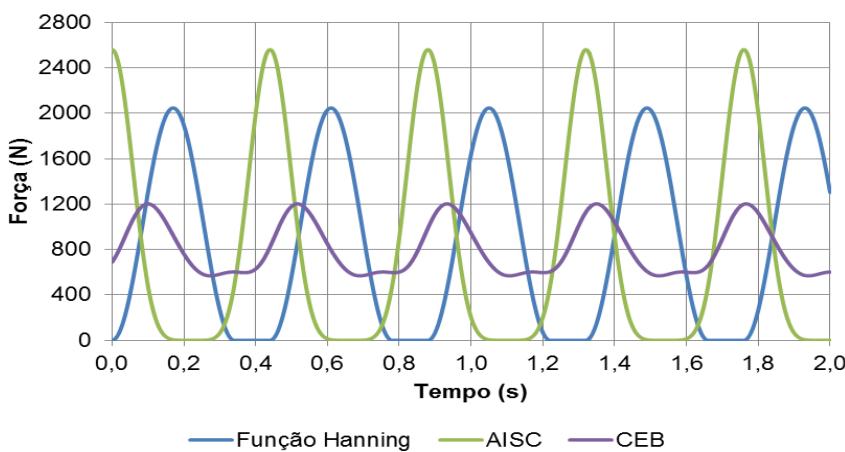


Figura 4.13 – Comparação dos sinais de força no tempo para atividades aeróbicas

Observado a Figura 4.13, percebe-se claramente que a função de carregamento proposta por Murray *et al.* (2003), atinge níveis de variação ao longo do tempo superiores aos modelos propostos por Faisca (2003) e pelo CEB (1993). Neste trabalho de pesquisa a função de carregamento mais utilizada foi à função Hanning proposta por Faisca (2003), pois a mesma, além de atingir níveis intermediários de variação ao longo do tempo (entre a função proposta por Murray *et al.* (2003) com níveis de variações mais altas e a proposta pelo CEB (1993) com níveis mais baixos), é uma função cujos parâmetros foram medidos e avaliados experimentalmente. Além disso, fornece uma proposta mais econômica e, dependendo de cada caso, mais realista na avaliação de sistemas estruturais.

No próximo capítulo serão apresentados os modelos estruturais analisados no presente estudo e suas respectivas características, bem como o esquema de aplicação das cargas dinâmicas.