4
Cargas Dinâmicas

4.1
Introdução

Carregamentos dinâmicos, por definição, são carregamentos em que a magnitude, a direção e a posição podem variar ao longo do tempo. Consequentemente, as respostas da estrutura, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, também variam ao longo do tempo. Várias são as fontes geradoras de carregamentos dinâmicos, como por exemplo: a ação dinâmica do vento; a atuação de equipamentos sobre sistemas estruturais; as ações sísmicas; o tráfego de veículos; as ações causadas por atividades humanas como caminhar, dançar e pular; entre outras.

Para análise dos efeitos causados por cargas dinâmicas, o primeiro passo é conhecer e descrever corretamente as cargas que irão atuar no sistema estrutural. Em se tratando de atividades humanas, pode-se tratar esses carregamentos como periódicos, ou seja, a variação da carga é repetida durante vários ciclos sucessivos.

De acordo com Alves [49], as cargas geradas por atividades humanas podem ser classificadas em duas categorias. A primeira categoria refere-se àquelas atividades sem a perda de contato com a estrutura, como a caminhada e a dança de salão.

A outra categoria refere-se àquelas atividades em que existe a perda de contato com a estrutura, como a ginástica aeróbica e a corrida. Neste capítulo, são apresentadas as hipóteses de modelagem do carregamento humano utilizados neste trabalho nas quais se consideram modelos de carregamento com e sem a perda de contato da pessoa com a estrutura.

A metodologia de aplicação da carga e a sua modelagem matemática são os principais objetivos desta seção da tese.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

4.2
Modelos de carregamento

4.2.1
Caminhar humano - modelo de carregamento I

O primeiro modelo de carregamento baseia-se numa publicação realizada em 1989, no Design Guide on the Vibration of Floors [46], em que se apresenta um registro experimental típico da variação no tempo da força de contato com uma superfície rígida produzida por um passo expresso pela correspondente medição da reação resultante do piso.

A representação matemática da reação do piso é aproximada por uma série de Fourier com três termos que considera a parcela estática associada ao peso da pessoa e três ou quatro componentes harmônicos da excitação. Esses harmônicos surgem devido à interação entre a carga crescente representada por um pé e pelo simultâneo descarregamento do outro pé. A Figura 4.1 demonstra graficamente a função representativa do caminhar.

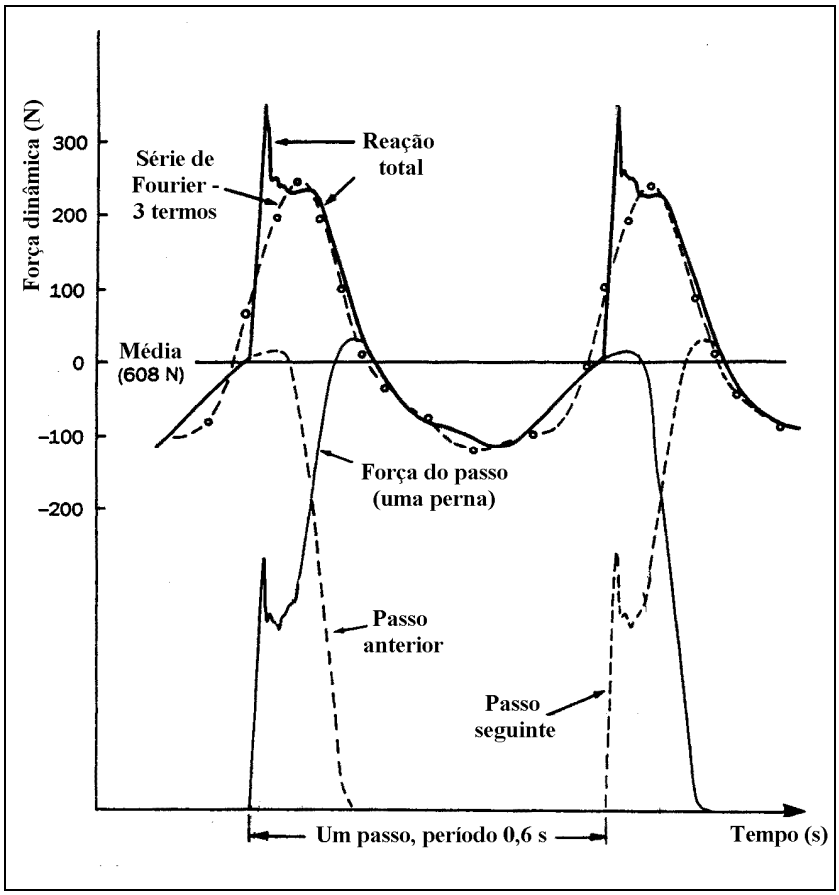


Figura 4.1 – Força de contato do passo e reação do piso devido à caminhada [46]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

A partir desses estudos que permitiram registrar a reação total do piso gerada durante uma caminhada sobre plataformas rígidas (Figura 4.1), Varela [51] propôs uma equação matemática que pudesse representar a magnitude dessa reação. A função de carregamento dinâmico proposta por Varela [51] não foi somente representada pela série de Fourier de três termos, como visto na Figura 4.1, mas também foi acompanhada de um fator importante, e geralmente ignorado, que considera o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso. A aproximação matemática proposta por Varella [51] definiu-se por uma equação determinada segundo 5 (cinco) trechos, que podem ser vistos na Figura 4.2, e representados matematicamente, trecho a trecho, segundo as equações (4.1) à (4.5):

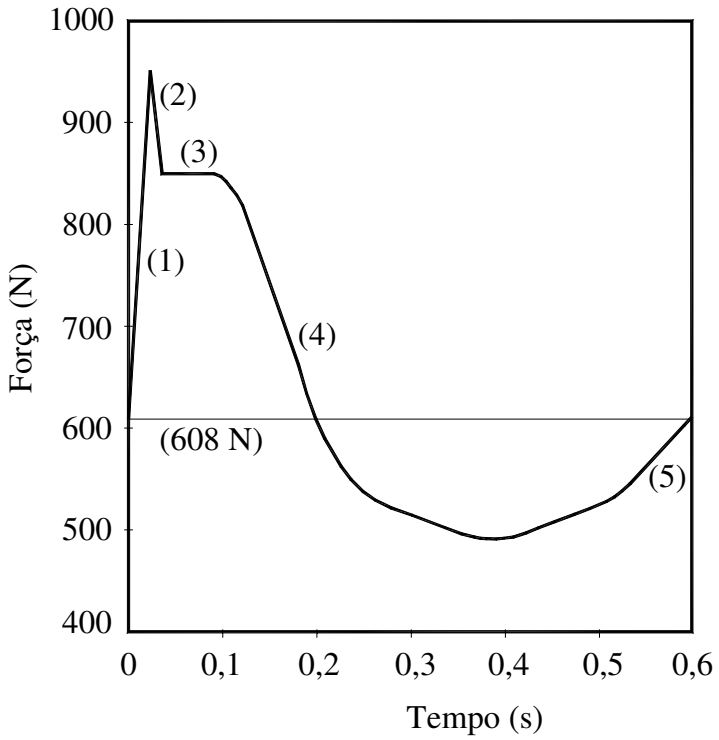


Figura 4.2 – Função de carregamento proposta por Wendell [51]

Para o trecho “1”, tem-se:

$$\left(P(t) = \left(\left(\frac{f_{mi} F_m - P}{0{,}04\, T_p} \right) \right) t + P \right) \qquad \text{se } 0 \;\; ¡Üt < 0{,}04\, T_p \qquad (4.1)$$

Para o trecho “2”:

$$\left[\left[\left[P(t) = \left[f_{mi} F_m \left[\left[\frac{C_1 \left(t \;\; 0{,}04\, T_p \right)}{0{,}02\, T_p} \right] \right] + 1 \right] \right] \right] \right] \quad \text{se } 0{,}04\, T_p \;\; ¡Üt < 0{,}06\, T_p \qquad (4.2)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

Para o trecho “3”:

$$P(t) = F_m \qquad \text{se } 0{,}06\,T_p \leq t < 0{,}15\,T_p \qquad (4.3)$$

Para o trecho “4”:

$$P(t) = P + \sum_{i=1}^{nh} P\,\alpha \operatorname{sen}\left[2\pi\, i\, f_p\,(t + 0{,}1\,T_p) + \phi_i\right] \qquad \text{se } 0{,}15\,T_p \leq t < 0{,}90\,T_p \qquad (4.4)$$

Para o trecho “5”:

$$P(t) = 10\,(P - C_2)\left(\frac{t}{T_p} - 1\right) + P \qquad \text{se } 0{,}90\,T_p \leq t < T_p \qquad (4.5)$$

Onde:

P(t) : representação matemática aproximada da força da reação do piso ao caminhar;

t : instante de tempo (s);

P : peso da pessoa (N);

i : número do i-ésimo harmônico da freqüência fundamental da força;

nh : números de harmônicos considerados para representar a força, ou seja, números de termos da série de Fourier representativa da atividade humana;

αi: coeficiente dinâmico do i-ésimo harmônico da série de Fourier (nesse caso foi tomado como 0,5, 0,2, 0,1 e 0,05, respectivamente, conforme apresentados na Tabela 4.1;

Tabela 4.1 – Harmônicos do passo [53]

Harmônico	Pessoa caminhando		
i	f_p	α	φ_i
1	1,6 a 2,2	0,5	0
2	3,2 a 4,4	0,2	π/2
3	4,8 a 6,6	0,1	π/2
4	6,4 a 8,8	0,05	π/2

$P\alpha_i$: amplitude do i-ésimo harmônico da frequência fundamental da força;

f_p : frequência do passo do caminhar humano;

φ_i : ângulo de fase entre o i-ésimo e o primeiro harmônico. Os ângulos de fase são $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi/2, \varphi_3 = \pi$, e por extrapolação $\varphi_4 = 3\pi/2$;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

F_m : fator máximo da série de Fourier, que é dado pela equação (4.6) :

$$F_m = P\left((1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i)\right) \tag{4.6}$$

f_{mi} : fator de majoração do impacto do calcanhar, ou seja, é a relação entre o valor do pico transiente do calcanhar e o valor máximo da série de Fourier (F_m); Neste caso o fator de majoração do impacto do calcanhar foi tomado igual a 1,12, mas esses valores podem variar consideravelmente de uma pessoa para outra;

C_1 e C_2 : coeficientes dados pelas equações e (4.7) e (4.8):

$$C_1 = \left(\left(\frac{1}{f_{mi}} - 1\right)\right) \tag{4.7}$$

$$C_2 = \begin{cases} P\left(1 - \alpha_2\right) & \text{se } nh = 3 \\ P\left(1 - \alpha_2 + \alpha_4\right) & \text{se } nh = 4 \end{cases} \tag{4.8}$$

Considera-se nesse modelo de carregamento, a variação da posição da carga com o tempo. Para tal, uma descrição espacial e temporal é adotada permitindo uma representação mais realista do carregamento gerado em uma caminhada. A modelagem deste carregamento pode ser vista na Figura 4.3, em que a carga é constantemente aplicada na estrutura a certa velocidade. Esta carga "P" é representada pelas equações (4.1) à (4.5) apresentadas anteriormente.

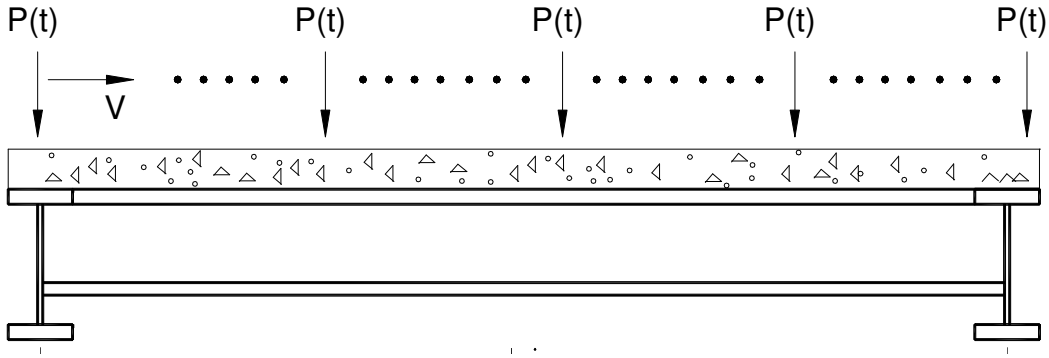


Figura 4.3 – Representação da carga durante a caminhada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

Para aplicar a carga desta forma, a malha de elementos finitos teria que ser muito refinada. Assim, para representar esta variação espacial sobre o piso, foi adotada a seguinte simplificação: aplica-se a carga de 0,20m em 0,20m e, dependendo da distância a ser percorrida, divide-se o intervalo referente ao passo do ser humano por certo número de cargas: P1, P2, P3, P4, etc. Essas cargas ficariam aplicadas durante certo intervalo de tempo no nó da estrutura. Entretanto, as cargas não seriam aplicadas simultaneamente. A primeira carga aplicada seria P1 regida pelas equações (4.1) à (4.5) em certo intervalo de tempo. Ao final desse tempo, a carga P1 passa a ser "0" e a carga P2 entra em ação. Assim, sucessivamente, todas as cargas seriam aplicadas, varrendo a estrutura de um lado a outro, como mostra a Figura 4.4.

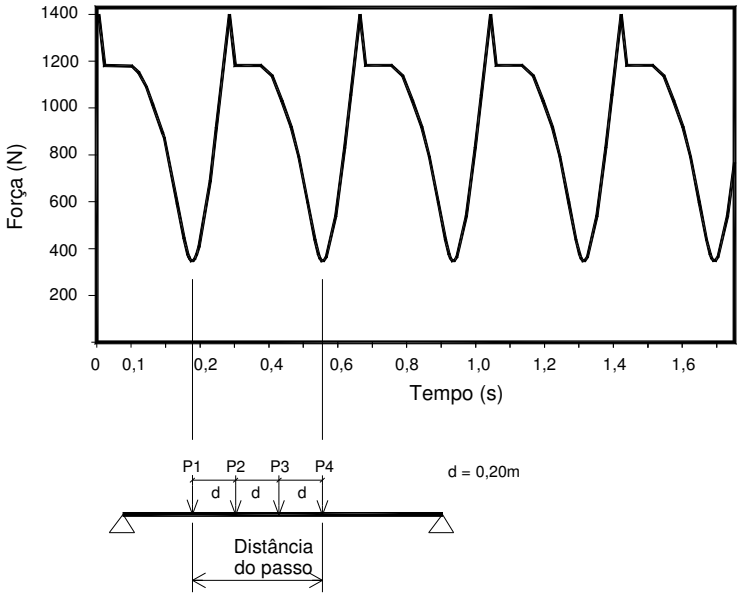


Figura 4.4 – Variação espacial da carga

O intervalo de tempo da aplicação da carga no nó da estrutura depende da distância e da frequência do passo que podem ser definidos pela Tabela 4.2, a seguir:

Tabela 4.2 – Característica do passo humano.

Atividade	Velocidade (m/s)	Distância do passo (m)	f_p (Hz)
Caminhada lenta	1,1	0,6	1,7
Caminhada normal	1,5	0,75	2,0
Caminhada rápida	2,2	1,0	2,3

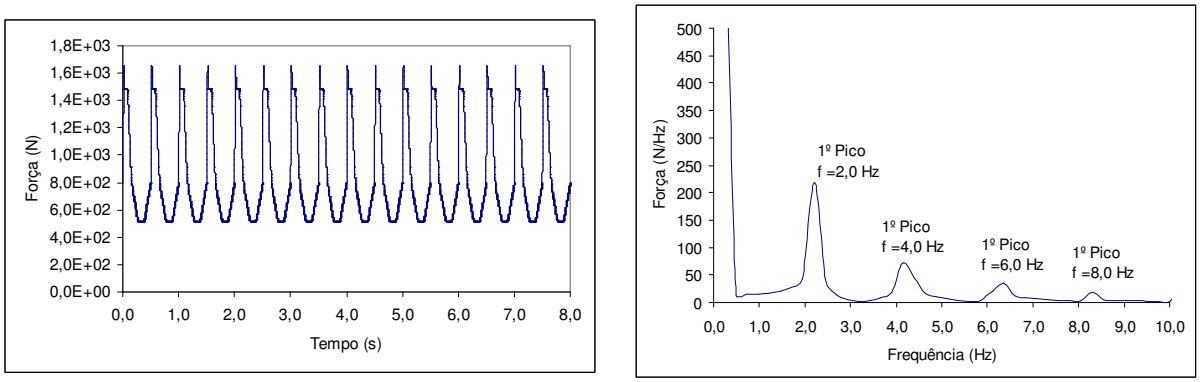
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

Nota-se que, à medida que a frequência do passo aumenta, a distância das passadas também aumenta. Para valores intermediários de frequência do passo, é necessário realizar uma interpolação linear a fim de se descobrir a distância e a velocidade do passo.

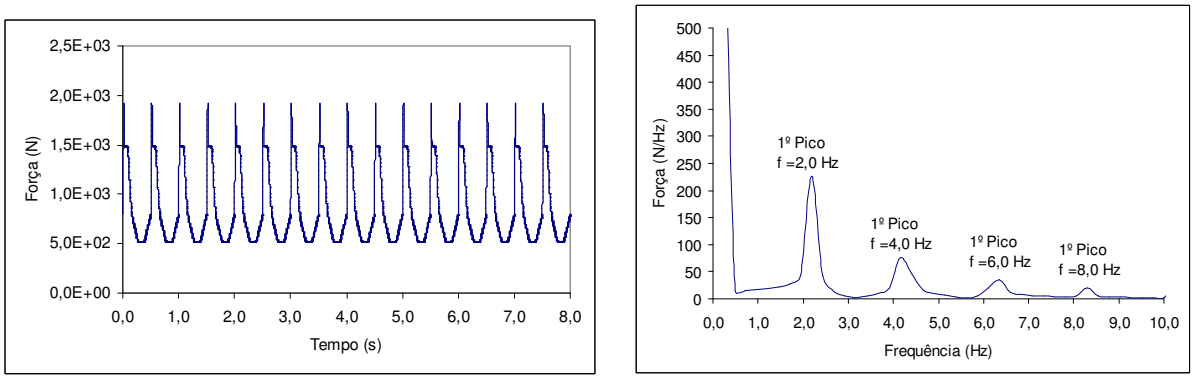
A solicitação dinâmica deste modelo de carregamento foi modelada conforme procedimento simplificado recomendado pelo AISC [53]. Neste procedimento, considera-se como força dinâmica uma componente harmônica, dependente do tempo, que se iguala à frequência natural da estrutura, com o objetivo de produzir o fenômeno físico da ressonância.

As transformadas de Fourier F(w) da função associada ao modelo de carregamento I e o respectivo sinal de força no tempo para níveis distintos de fmi (fator de majoração do impacto do calcanhar), podem ser vistos na Figura 4.5 a seguir. Em todos os espectros de freqüência, foi verificada a presença de vários picos representativos da atividade, correspondentes aos seus harmônicos.

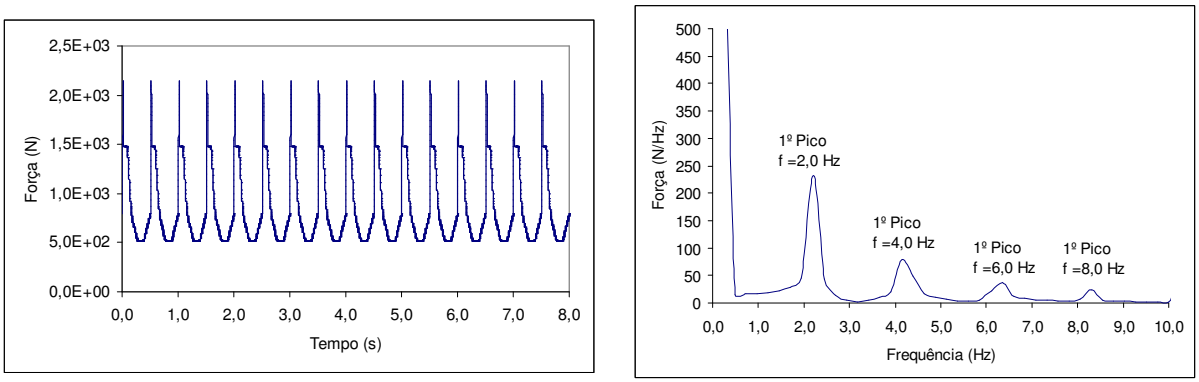
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA



a) fmi = 1,12



b) fmi = 1,30



c) fmi = 1,45

Figura 4.5 – Sinal de força no tempo e espectro de frequência referente ao caminhar humano

4.2.2
Atividade rítmica - modelo de carregamento II

O segundo modelo de carregamento proposto é ainda mais complexo que o primeiro, pois procura descrever o carregamento produzido por pessoas em movimento. Este modelo de carregamento está associado a ações dinâmicas que envolvem a perda de contato do indivíduo com a estrutura. Para tal, 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 platéias em shows e torcidas. Todas, porém, são caracterizadas pela execução de saltos e são diferenciadas, principalmente, pelo grau de sincronismo em que atuam os participantes. Em se tratando dos saltos, observam-se quatro fases distintas que caracterizam essa ação (Figura 4.6).

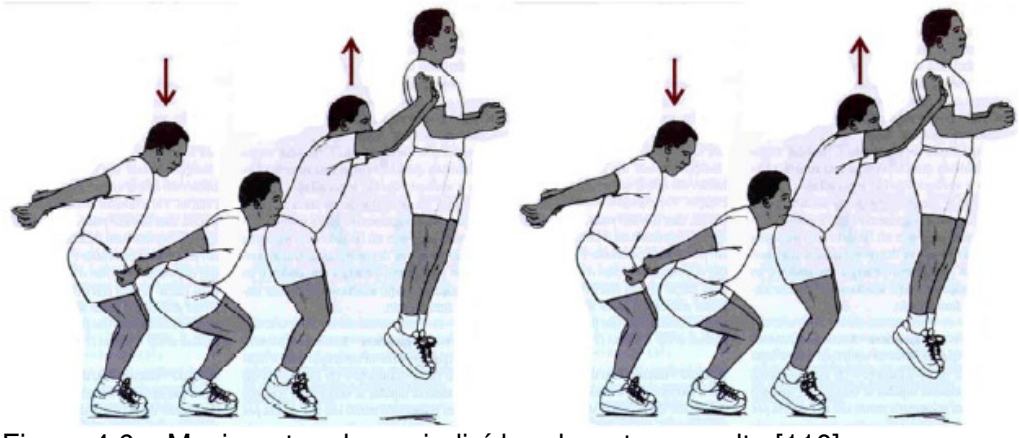


Figura 4.6 – Movimentos de um indivíduo durante um salto [110]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

A primeira fase mostra a pessoa na posição inicial, em preparação. A segunda fase é a impulsão. Nessa fase, o indivíduo, primeiramente, 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 em que 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, e retorna 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 4.7 mostra a força aplicada em uma estrutura durante a execução de um salto.

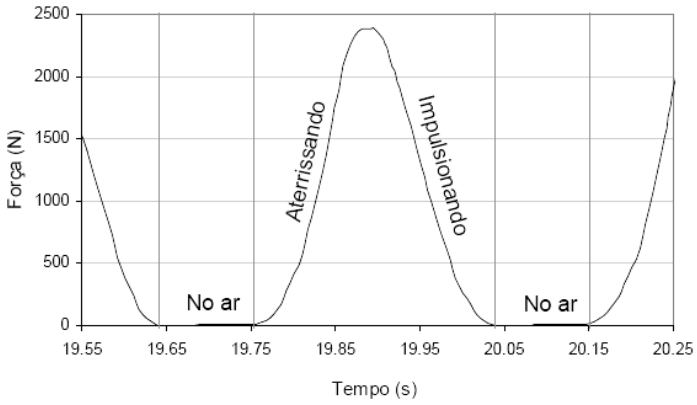


Figura 4.7 – Força aplicada em uma estrutura durante um salto [50]

Percebe-se através da Figura 4.7, que, quando o indivíduo está no ar, a força aplicada sobre a estrutura vale zero. Na medida em que o indivíduo toca o chão, a força vai crescendo até atingir seu pico. Nesse instante, o indivíduo começa a impulsionar para realizar o próximo salto.

Para tal, a função Hanning [72], muito utilizada em processamentos de sinais, foi proposta por Faisca [50] para descrever matematicamente esses carregamentos. Essa modelagem é respaldada por parâmetros experimentais também realizados por Faisca [50]. Em sua investigação, Faisca [50] observou que para diferentes atividades, como: saltos à vontade, ginástica aeróbica e show/torcida, os gráficos da *força x tempo* apresentaram características bem semelhantes, ocorrendo variações apenas na amplitude máxima e no período das atividades. Isto possibilitou o emprego de uma única metodologia para o processamento dos sinais. A partir dos 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

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

estudo com várias funções, foi sugerida a função conhecida como janela Hanning [72]. 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 4.8.

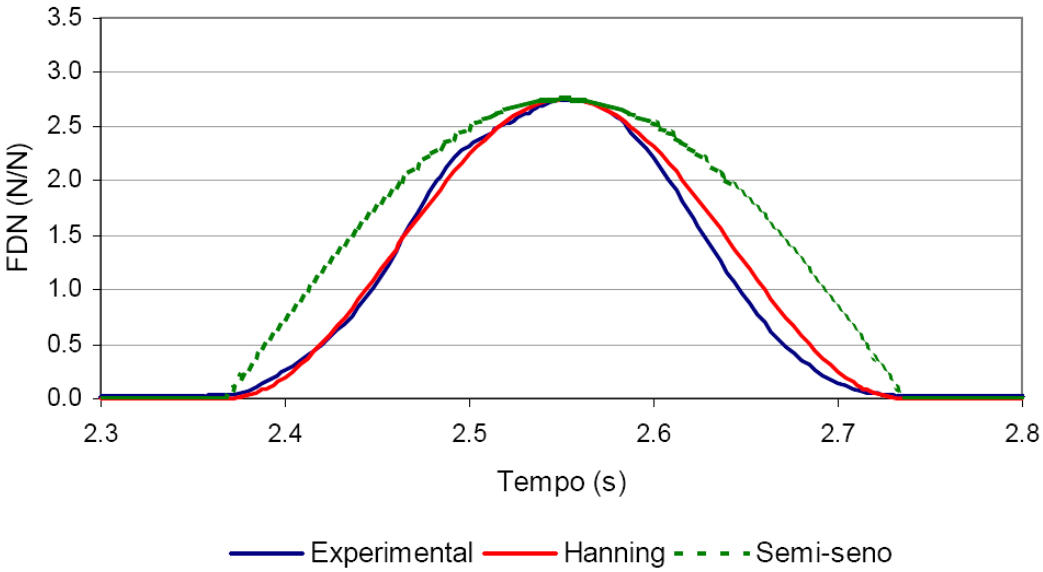


Figura 4.8 – Comparação entre o sinal experimental e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning [50]

A representação matemática desse carregamento, por meio da função Hanning, é dada pela equação (4.9), a seguir:

$$F(t) = CD\left\{K_p P\left[0{,}5 - 0{,}5\cos\left(\frac{2\pi}{T_c}t\right)\right]\right\}, \text{para } t \le T_c$$
$$F(t) = 0, \text{para } T_c < t \le T \qquad (4.9)$$

Onde:

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

CD: coeficiente de defasagem;

Kp: coeficiente de impacto;

P: peso da pessoa (N);

T: período da atividade (s);

Tc: período de contato da atividade (s);

t: tempo (s).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

A Figura 4.9 facilita o entendimento da função adotada. Ela mostra os dois intervalos de tempo significativos da função.

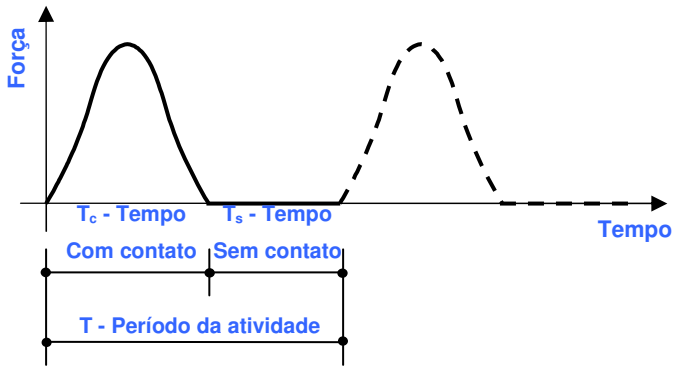


Figura 4.9 – Intervalos de tempo da função adotada

Dos parâmetros citados anteriormente, o coeficiente de impacto (Kp) 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 4.10 apresenta o gráfico do coeficiente de defasagem (CD) para três atividades estudadas por Faisca [50] extrapoladas para um grande número de pessoas. Isso permite que as cargas possam ser usadas para representar multidões.

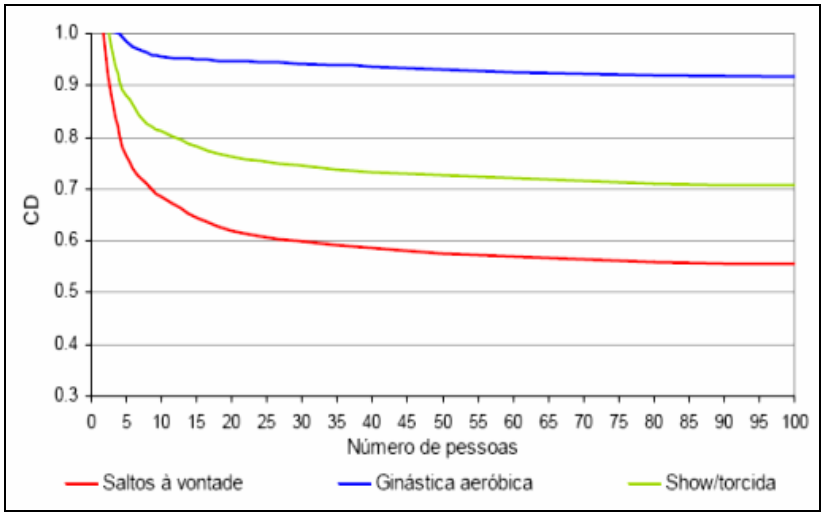


Figura 4.10 – Coeficientes de defasagem para as atividades propostas [50].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

Percebe-se, através da Figura 4.10, 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. Isto 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 situados entre 0,56 e 1,0. A partir das curvas mostradas na Figura 4.10 foi montada a Tabela 4.3, em que são apresentados os valores numéricos de CD relacionados ao número de pessoas que será aplicado nesta investigação, de acordo com cada atividade (ginástica aeróbica e saltos à vontade).

Tabela 4.3 – Valores de CD utilizados nas análises [50].

Nº Pessoas	CD	
	Ginástica aeróbica	Saltos à vontade
1	1	1
3	1	0,88
6	0,97	0,74
9	0,96	0,70
12	0,95	0,67

A partir das diferentes situações estudadas por Faisca [50], que avaliaram a influência da flexibilidade da estrutura nas respostas, foram obtidos diferentes resultados para os parâmetros que caracterizam cada atividade. Na Tabela 4.4 são apresentados os valores das médias e desvio-padrão dos parâmetros T, T_c e K_p para representar as atividades mencionadas.

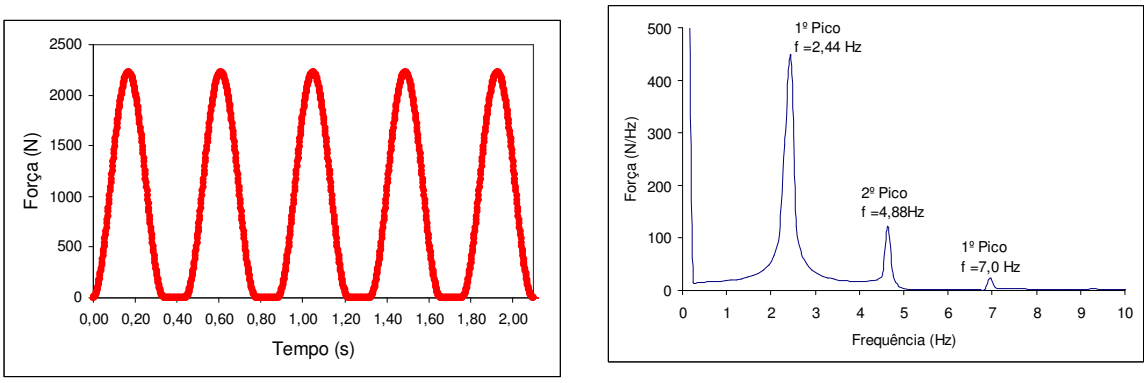
Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados nas análises [9].

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

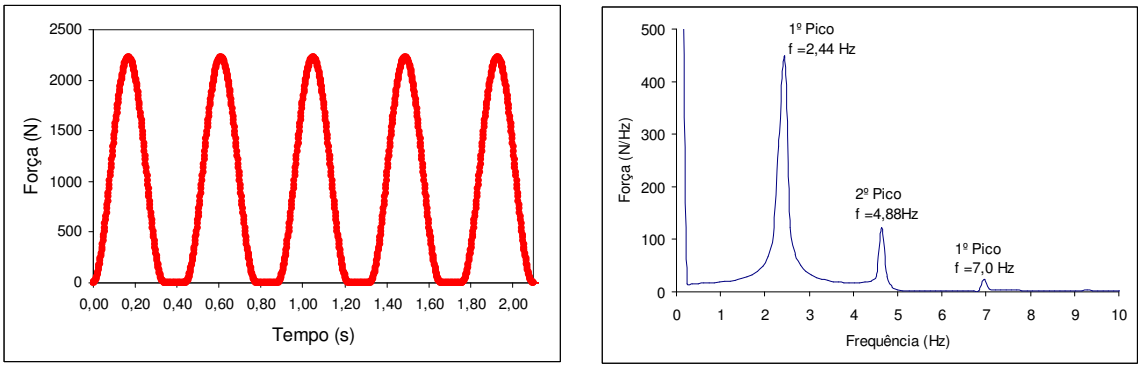
De forma a ilustrar a modelagem deste tipo de carregamento dinâmico e utilizando-se os dados experimentais propostos por Faisca [50], a Figura 4.11 apresenta exemplos de sinais da força no tempo correspondente à ginástica aeróbica e suas respectivas transformadas de Fourier F(w) associadas ao

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA

modelo de carregamento II para diferentes parâmetros de T, Tc e Kp. O peso de cada indivíduo (P) é considerado igual a 800N [6]. Em todos os espectros de freqüência, foi verificada a presença de vários picos representativos da atividade, correspondentes aos seus harmônicos.



a) T= 0,44s, Tc= 0,34s, Kp= 2,78, CD= 1 - (1pessoa)

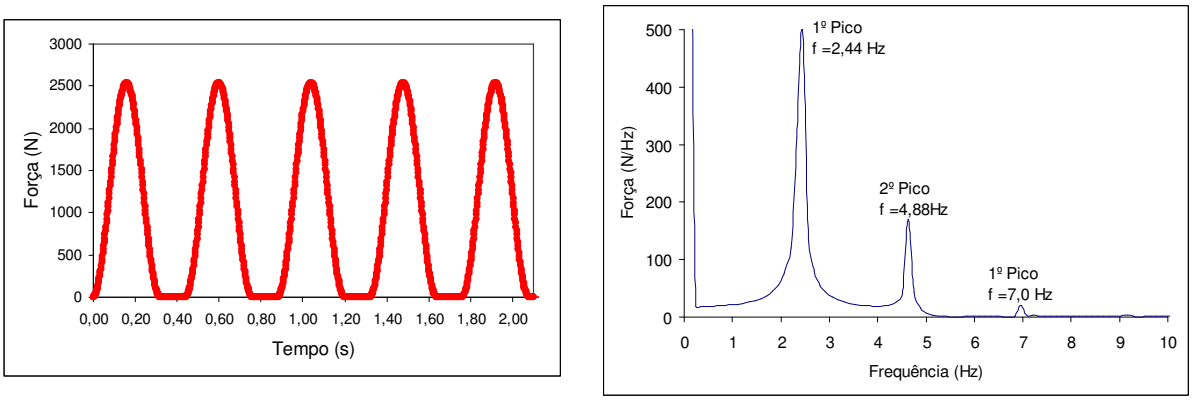


b) T= 0,44s, Tc= 0,34s, Kp= 2,78, CD= 1 - (3 pessoas)

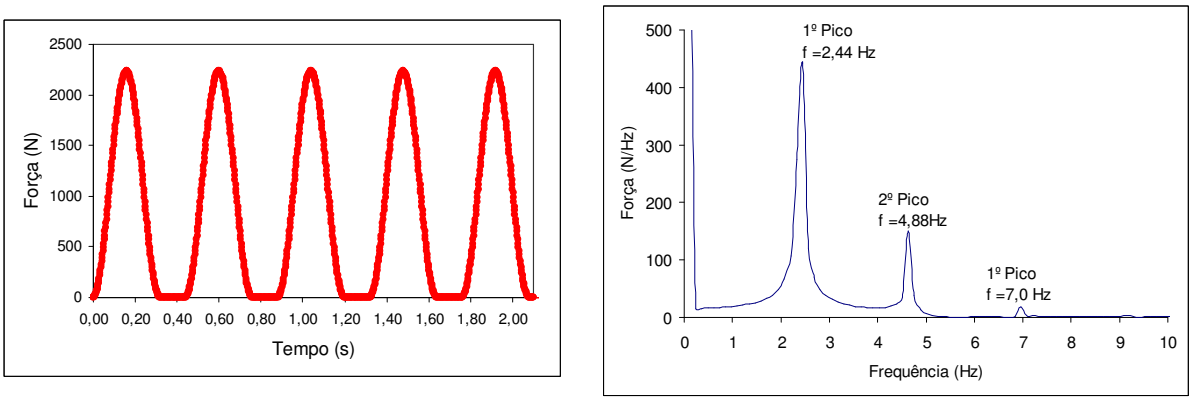
Figura 4.11 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica.

A Figura 4.12 apresenta alguns sinais no tempo da força correspondente à atividade de saltos à vontade e suas respectivas transformadas de Fourier F(w) associadas ao modelo de carregamento II para diferentes parâmetros de T, Tc e Kp. O peso de cada indivíduo (P) é considerado igual a 800N [6]. Em todos os espectros de freqüência, foi verificada a presença de vários picos representativos da atividade, correspondentes aos seus harmônicos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA



c) T= 0,44s, Tc= 0,32s, Kp= 3,17, CD= 1,0 - (1pessoa)



d) T= 0,44s, Tc= 0,32s, Kp= 3,17, CD= 0,88 - (3 pessoas)

Figura 4.12 – Sinais de força no tempo para atividade de salto à vontade.

Para outros valores de T_c e de T, mudam a frequência da atividade e seus harmônicos, mas a configuração do espectro é semelhante ao apresentado na Figura 4.12.

No Capítulo 5 descreve-se as características fisicas e geométricas dos modelos estruturais utilizados nesta tese.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521524/CA