



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

UTILIZAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇAS PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS CINÉTICOS E CINEMÁTICOS DA CAMINHADA HUMANA

Marcelo André Toso, marcelo.toso@yahoo.com.br¹
Herbert Martins Gomes, herbert@mecanica.ufrgs.br²

^{1,2} Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil.

Resumo: Em tarefas cotidianas, como caminhar, correr e pular, o corpo humano exerce força contra o solo, por meio dos pés. O estudo desses movimentos pode ser realizado com a utilização de instrumentos denominados plataformas de forças. A carga devido à ação de um pedestre sobre uma estrutura tem sido obtida de investigações em plataformas de forças, esteiras comerciais instrumentadas ou mesmo em protótipos de passarelas. Neste trabalho, realizam-se medições experimentais utilizando duas plataformas de forças independentes devidamente instrumentadas, posicionadas lado a lado. Cada plataforma possui três células de carga. O projeto da plataforma prevê a avaliação de apenas forças verticais, na qual é a componente que possui maior magnitude frente aos outros esforços da marcha humana. Quando o indivíduo caminha sobre a plataforma de forças (plataforma esquerda e direita), a força exercida sobre ela é detectada por células de carga, gerando sinais elétricos que são amplificados e registrados por um sistema de aquisição de dados. Estes sinais permitem avaliar a posição e a força resultante aplicada sobre a estrutura, para cada travessia do pedestre. As medições experimentais tiveram a participação de 54 pessoas. Analisando qualitativamente a componente vertical da força de reação do solo observa-se que a mesma é caracterizada por dois picos e um vale. O primeiro pico é observado durante a primeira metade do período de apoio e caracteriza parte do apoio quando a perna está recebendo o peso corporal, logo após o contato do pé com o solo. O segundo pico é observado no final do período de apoio e representa o impulso contra o solo para iniciar o próximo passo. O vale entre os dois picos é menor em magnitude que o peso corporal e ocorre quando o pé se encontra na posição plana em relação ao solo. Durante os testes experimentais, cada indivíduo move-se com sua própria taxa de passos. Os sinais adquiridos são registrados para passagens repetidas do pedestre (10 repetições). Para cada travessia, os seguintes parâmetros são obtidos: velocidade do pedestre, taxa de passos, comprimento do passo e largura do passo. Durante a corrida, uma fase de voo ocorre, enquanto que em situações de caminhada, o pedestre está em contato permanente com o solo, alternando fases de apoio bipodal e unipodal. Também é avaliada a velocidade unipodal e bipodal do pedestre. Os parâmetros cinemáticos são medidos para as direções lateral e longitudinal da caminhada. Observa-se que durante o apoio unipodal a velocidade é pequena, porém, esta velocidade é elevada na fase bipodal, ou seja, durante a marcha, o aumento da distância percorrida ocorre especialmente durante a fase de apoio duplo. As magnitudes dos parâmetros cinéticos e cinemáticos estão em concordância com os resultados apresentados por outros pesquisadores.

Palavras-chave: medições de vibrações, plataforma de forças, biomecânica, vibrações no corpo humano, interação homem-estrutura

1. INTRODUÇÃO

Problemas dinâmicos tem em comum a possibilidade da ocorrência de ressonância, devido à coincidência ou proximidade entre as frequências de excitação e as frequências naturais do sistema. Muitas passarelas têm frequências naturais próximas ou coincidentes com as frequências dominantes do carregamento dinâmico dos pedestres e, portanto, elas têm um potencial para sofrer vibrações excessivas. Altos níveis de vibrações estruturais também estão associados a baixos coeficientes de amortecimento. Esses níveis de vibrações podem ter valores acima do desejável, seja com relação à segurança estrutural ou em função do conforto dos usuários, causando incômodo direto ou indireto para os pedestres. Humanos são bastante sensíveis às vibrações e as pessoas podem reagir de forma diferente frente às mesmas condições de vibração estrutural. Desta forma, os pedestres tendem a mudar o seu comportamento dinâmico (enrijecimento de pernas ou mudança do padrão de caminhada, por exemplo) quando percebem estas oscilações em ambas as direções: vertical e horizontal, essa última sendo transversalmente ou longitudinalmente. De acordo com Zivanovic *et al.* (2005),

a interação pedestre-estrutura é um tema importante e tem suma importância no projeto de estruturas esbeltas e flexíveis dinamicamente excitadas por seres humanos. O ato de caminhar, correr ou pular em passarelas produz forças dinâmicas as quais podem gerar vibrações excessivas. Essas vibrações podem causar desconforto para os pedestres bem como deterioração da integridade estrutural da passarela e em casos extremos, o colapso da estrutura. Kala *et al.* (2009) e Hauksson (2005), afirmam que passarelas que apresentam problemas de operacionalidade devido à vibração são estruturas de baixa frequência ou com frequências naturais dentro da faixa de frequência da caminhada humana. Neste sentido que Dang e Zivanovic (2013), relatam que problemas de vibrações em passarelas modernas sob o tráfego de pedestres geralmente é motivo de preocupação se a estrutura tem um dos modos de vibração na faixa de frequência típica da taxa de passos humana, compreendida entre 1,5 a 2,4 Hz.

As vibrações induzidas por pedestres ao utilizar passarelas têm sido por longa data reconhecida como um problema de projeto. Passarelas são estruturas destinadas essencialmente ao tráfego de pedestres, sendo o caminhar a atividade típica mais comumente estudada e usualmente adotada pelas normas de projeto. Os problemas de vibrações tornam-se cada vez mais importantes devido à frequente necessidade de se otimizar os projetos das estruturas. Nas últimas décadas os materiais utilizados no projeto de estruturas tais como passarelas, têm mudado significativamente. A presença de materiais de construção de alta resistência, sistemas estruturais cada vez mais esbeltos, flexíveis com menor massa e amortecimento contribuem para esse novo contexto de projeto. Como consequência, estas estruturas tornam-se susceptíveis a vibrações quando sujeitas a carregamentos dinâmicos. A maioria das passarelas atuais são longas e leves. Essas estruturas podem enfrentar problemas devido à vibração excessiva ou até mesmo se tornarem pouco atrativas o seu uso, devido à insegurança que podem trazer aos seus usuários. Segundo Zivanovic *et al.* (2005), este tipo de interação afeta estruturas de aço, madeira, concreto, materiais compósitos entre outros.

Para o entendimento destas interações não basta um modelo preciso das estruturas, também é necessário caracterizar de forma adequada as ações humanas que atuam. Neste sentido, a geração de um modelo biodinâmico que corretamente avalia estas forças e ações que atuarão na estrutura faz-se necessário. Isto se obtém com medições das características destas forças e interações e em última análise a construção de um modelo com parâmetros biodinâmicos que permitam sua utilização em normas e códigos de projeto de estruturas esbeltas e flexíveis. Neste trabalho, realizam-se testes experimentais utilizando uma plataforma de forças para avaliação de parâmetros cinéticos e cinemáticos de diversos indivíduos. Cinquenta e quatro pedestres participaram dos testes experimentais, sendo que cada um deles cruzou a plataforma de forças dez vezes. Os parâmetros a serem caracterizados são: fatores dinâmicos de carga, taxa de passos do pedestre, velocidade do indivíduo, comprimento e largura do passo. Os parâmetros cinemáticos são avaliados nas direções lateral e longitudinal da caminhada, considerando o apoio unipodal e bipodal dos pedestres.

2. LOCOMOÇÃO HUMANA E A VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS DA MARCHA

A marcha é uma sucessão de movimentos rítmicos e alternados dos membros e do tronco, que provocam um deslocamento do centro de gravidade do corpo. O ser humano se movimenta constantemente, uma das formas mais comuns de se movimentar é por meio da locomoção. Dentre as várias formas de locomoção, o andar é uma das que mais chama a atenção dos pesquisadores da área de comportamento motor, provavelmente por ser a forma de locomoção natural mais utilizada (Barela, 2005). Segundo Inman *et al.* (1981) o andar humano é um processo de locomoção em que o corpo ereto e em movimento é sustentado primeiramente por uma perna e em seguida pela outra perna, permanecendo pelo menos um pé em contato com o solo. A marcha é composta por ciclos repetidos de passos e passadas. Um ciclo do andar é caracterizado pelo início de um determinado evento por um membro e continuação até que o mesmo evento se repita novamente com o mesmo membro. Um passo se refere ao início de um evento por um membro até o início do mesmo evento com o membro contralateral. Este parâmetro corresponde à distância entre dois pontos consecutivos de carregamento na passarela. A passada se refere a um ciclo completo do andar, ou seja, início de um evento por um membro até o início do mesmo evento com o mesmo membro. Uma passada corresponde a dois passos. A largura do passo é determinada pela distância entre a linha média de um pé e a linha média do outro pé, estando relacionada com a manutenção do equilíbrio corporal. A marcha é caracterizada por duas fases: i) fase de apoio (60 a 65% do ciclo) onde o pé encontra-se em contato com o solo e sustenta o peso do corpo. Esta fase pode ser dupla (bipodal) onde os dois pés estão em contato com solo simultaneamente; ii) fase de balanço (30 a 40% do ciclo) ocorre quando o pé não está mais sustentando o peso corporal e se move para frente.

2.1. Força de Reação do Solo (FRS)

A Força de Reação do Solo (FRS) é uma força que atua do solo para o corpo que está em contato, representando uma resposta às ações musculares e ao peso corporal transmitido por meio dos pés. Durante a marcha, os dois pés ficam em contato com o piso, simultaneamente, em cerca de $\frac{1}{4}$ do tempo. Os efeitos no centro de massa do corpo resultam da soma das forças de reação que atuam em ambos os pés. Durante os $\frac{3}{4}$ de tempo restantes, apenas a força de reação nesse pé influencia o movimento do centro de massa do corpo (Meglan e Todd, 1994). A Fig. 1 ilustra uma curva característica da FRS vertical com dois picos e um vale, membro inferior direito e membro inferior esquerdo respectivamente.

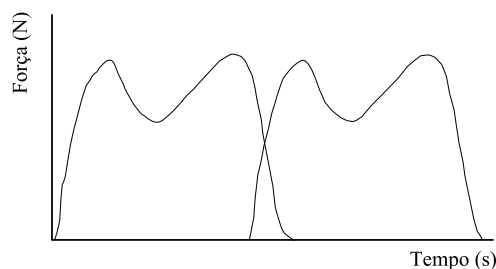


Figura 1. Típica Força de Reação do Solo referente ao membro inferior direito e membro inferior esquerdo para indivíduo um caminhando.

2.2. Fator Dinâmico de Carga (FDC)

O Fator Dinâmico de Carga (FDC) é a razão entre a amplitude da força dinâmica da componente de um harmônico particular pelo peso estático do pedestre. Esses harmônicos correspondem ao padrão de caminhada de cada indivíduo, caracterizando um aumento de carga devido a um pé e o descarregamento simultâneo do outro pé, e variações na amplitude da força entre as pernas. Estes fatores são avaliados a partir do espectro de força no domínio da frequência para cada travessia do pedestre sobre a plataforma de forças. Vários pesquisadores propuseram quantificar estes valores: Blanchard *et al.* (1977), indicam um modelo simples de força de caminhada considerando o fenômeno de ressonância. Utiliza-se um FDC de 0,257 considerando o primeiro harmônico, para um pedestre com peso estático de 700 N. Este FDC é indicado para passarelas com frequência fundamental estrutural de até 4,0 Hz. Para frequências naturais compreendidas entre 4,0 e 5,0 Hz, utilizam-se fatores de redução em virtude das baixas amplitudes de forças do segundo harmônico. Segundo os autores, esta faixa de frequência não pode ser excitada pelo primeiro harmônico de caminhada. Bachmann e Ammann, (1987), recomendam valores de FDC para as direções vertical, lateral e longitudinal. Para o primeiro harmônico na direção vertical esses valores são compreendidos entre 0,4 e 0,5. Para o segundo e terceiro harmônicos indica-se um FDC de 0,1 considerando a taxa de passos próxima a 2,0 Hz. Yoneda (2002) apresenta uma função para a determinação dos FDC's para caminhada e corrida, considerando a taxa de passos e a velocidade de caminhada, conforme a Fig. 2.

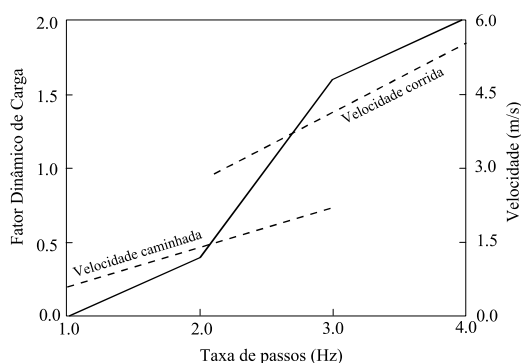


Figura 2. FDC's e velocidade do pedestre como uma função da taxa de passos. (Adaptada de Yoneda, 2002).

Rainer *et al.* (1988), avaliam o Fator Dinâmico de Carga (FDC) para situações de pedestres caminhando, correndo e pulando na direção vertical. Os resultados da Fig. 3 referem-se a um único indivíduo caminhando normalmente, considerando os quatro primeiros harmônicos da caminhada. Os autores concluem que os FDC's dependem fortemente da taxa de passos do pedestre.

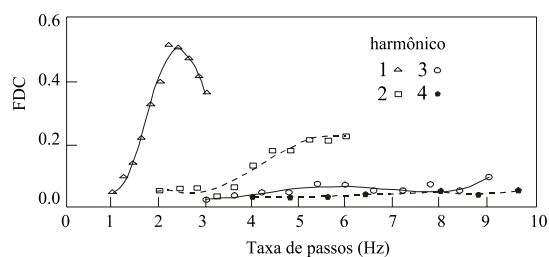


Figura 3. FDC's para os primeiros quatro harmônicos da caminhada. (Adaptada de Rainer *et al.* 1988).

Enquanto que Young (2001) propõe FDC para os primeiros quatro harmônicos correlacionados com a taxa de passos (f_p) do pedestre; se considera que esta varia de 1,0 até 2,8 Hz. Esta função é expressa pela Eq. (1):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0,41(f_p - 0,95) \leq 0,56; & f_p &= 1 \sim 2,8 \text{ Hz} \\ \alpha_2 &= 0,069 + 0,0056 f_p; & f_p &= 2 \sim 5,6 \text{ Hz} \\ \alpha_3 &= 0,033 + 0,0064 f_p; & f_p &= 3 \sim 8,4 \text{ Hz} \\ \alpha_4 &= 0,013 + 0,0065 f_p; & f_p &= 4 \sim 11,2 \text{ Hz}\end{aligned}\quad (1)$$

3. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DE FORÇAS

Para efetuar as medições experimentais utilizam-se duas plataformas de forças independentes devidamente instrumentadas. Cada plataforma possui três células de carga com capacidade nominal de 200 kg. Utilizando esta configuração e equações do equilíbrio estático, é possível obter as variáveis de interesse (força resultante e posicionamento da mesma). Uma vez que as plataformas são posicionadas lado a lado, para garantir a estabilidade estrutural durante a travessia do pedestre, as células de carga são fixadas na plataforma conforme indicado na Fig. 4. Além das plataformas instrumentadas, utilizam-se duas placas adicionais denominadas plataformas de aceleração e desaceleração (não estão instrumentadas) utilizadas apenas para estabilizar a marcha e minimizar a influência de flutuações na cadência do passo do pedestre. Desta forma, tem-se um comprimento total de 6 metros, permitindo que o pedestre se desloque livremente. As plataformas fornecem um sinal elétrico proporcional à força aplicada. O projeto da plataforma prevê a avaliação de apenas forças verticais, na qual é a componente de força que possui maior magnitude frente aos outros tipos de esforços. A transformação da plataforma para a medição das outras cinco componentes (F_x , F_y , M_x , M_y , M_z) é relativamente simples (através da troca das células de carga por outras projetadas para este fim). A Fig. 4 apresenta as principais dimensões da plataforma de forças utilizada para mensurar a força de reação do solo dos pedestres.

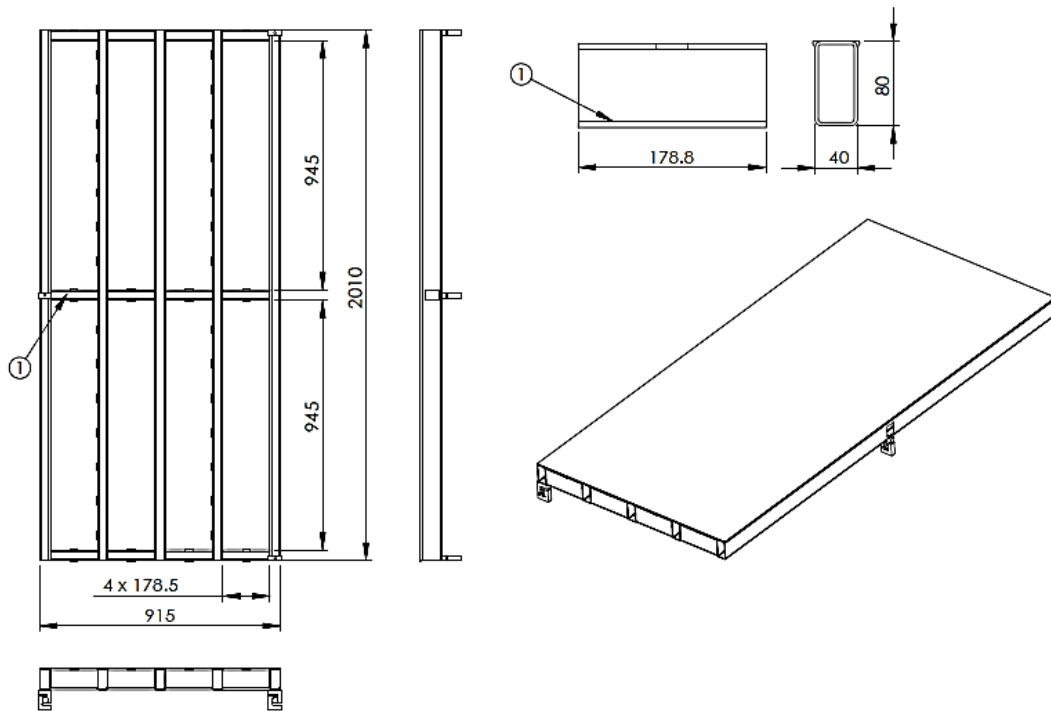


Figura 4. Principais dimensões da plataforma de forças (unidades em milímetros).

Quando um pedestre caminha sobre a plataforma de forças (plataforma esquerda e direita), a força exercida sobre ela é detectada pelas células de carga, gerando sinais elétricos que são amplificados e registrados pelo sistema de aquisição de dados. Estes sinais permitem avaliar a posição da força e sua intensidade em cada placa. Detalhes adicionais do projeto de desenvolvimento da plataforma de forças encontram-se em Toso *et al.* (2016). A calibração completa da plataforma de forças utilizando redes neurais artificiais é apresentada em Toso e Gomes (2016).

3.1. Célula de Carga, Condicionador de Sinais, Circuito de Filtragem e Placa de Aquisição de Dados

Para a instrumentação da plataforma de forças, utilizam-se seis células de carga modelo TS com capacidade de 200 kg e sensibilidade de 2,0 mV/V (+/- 10%). As células de carga são calibradas individualmente com uso de uma máquina

de ensaios de tração (EMIC modelo DL 2000) aplicando cargas crescentes até o limite do transdutor. De acordo com as curvas de calibração, todas as células de carga apresentam coeficientes de correlação superiores a 0,99 indicando a linearidade do transdutor bem como a estabilidade do sistema condicionador/amplificador de sinais.

O condicionador de sinais projetado possui seis canais, com um amplificador por canal, alimentado pela rede elétrica 110/220 V AC. O condicionador utiliza uma fonte chaveada como regulador de tensão para alimentação dos amplificadores operacionais e tensão de 5,0 V corrente DC para alimentação da ponte de Wheatstone. O circuito possui resistores variáveis sendo possível realizar manualmente o balanceamento da ponte de Wheatstone. No entanto, é essencial o desenvolvimento de um circuito de filtragem, permitindo apenas que as componentes de frequência na faixa de interesse permaneçam no sinal. Neste sentido, projetou-se um filtro passa baixa, formado por um resistor em série com o sinal e um capacitor em paralelo. Além dessa filtragem física, são utilizados ainda filtros digitais para melhorar a qualidade do sinal processado juntamente ao software de processamento de sinais, minimizando a presença de eventuais ruídos ou distorções decorrentes do processo de digitalização ou interferências eletromagnéticas. Uma placa de aquisição de dados modelo USB 1616FS (*Measurement Computing*) é utilizada para adquirir os sinais elétricos.

3.2. Pedestres Participantes dos Experimentos

As medições experimentais tiveram a participação de 54 pessoas de ambos os sexos, várias faixas etárias, buscando desta forma uma maior variabilidade de biótipos de pessoas com seus respectivos padrões de caminhada. A Tab. 1 apresenta um resumo dos pedestres analisados, enquanto que a Fig. 5 apresenta a distribuição de frequências da massa corporal e altura dos indivíduos participantes.

Tabela 1. Resumo dos pedestres analisados.

	Massa (kg)	Altura (m)
Máximo	125,70	1,91
Mínimo	49,40	1,55
Média	76,02	1,77
Desvio Padrão	14,31	0,07

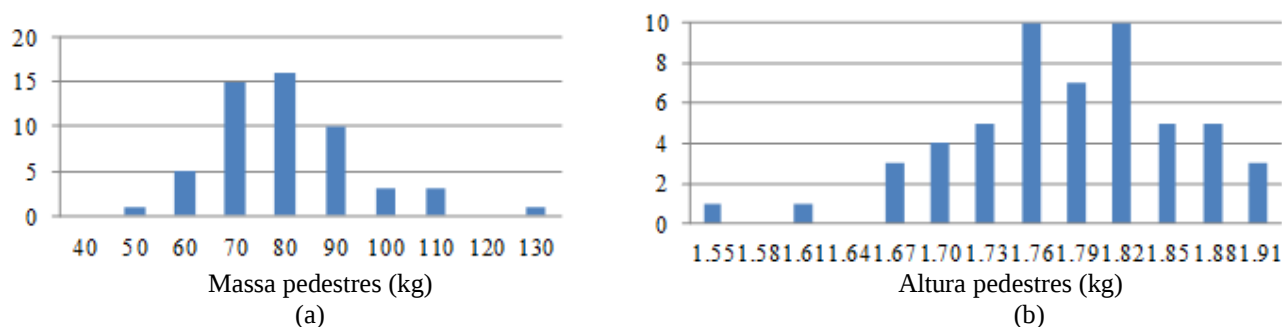


Figura 5. Distribuição de frequência dos pedestres participantes: a) massa corporal; b) altura dos pedestres.

Observa-se que a massa corporal predominante da população está compreendida entre 70 e 90 kg; enquanto que a altura predominante é 1,76 e 1,82 m.

3.3. Medição da Força de Reação do Solo Vertical Utilizando a Plataforma de Forças Desenvolvida

As duas plataformas (esquerda e direita) são colocadas lado a lado em relação ao sentido de caminhada, de modo que cada uma possa capturar os registros da força de cada pé do indivíduo separadamente. Uma pessoa caminhando normalmente pisa uma vez com um pé em uma plataforma e duas vezes na outra. Deve-se salientar que o uso de pequenas plataformas comerciais montadas em série (por exemplo, o modelo comercial Kistler 9285BA tem dimensões de 400 x 600 mm) faz com que o haja probabilidade de que o indivíduo altere os padrões normais da marcha, devido ao posicionamento das plataformas.

Durante a aquisição de dados nas plataformas de força, é importante observar se o pé em consideração pisa sobre a plataforma como um todo, sem que parte do mesmo pise na superfície que não seja a plataforma instrumentada. Esse cuidado deve ser tomado, pois as plataformas de aceleração e desaceleração (que não estão instrumentadas) estão muito próximas das plataformas instrumentadas. Caso uma medição ocorra na união de ambas as plataformas (instrumentada e não instrumentada) essa aquisição de dados deverá ser desconsiderada, pois os dados obtidos estarão subestimados, não representando os reais esforços envolvidos na dinâmica do pedestre.

A Fig. 6 apresenta resultados típicos das forças de reação do solo vertical correspondente ao pé esquerdo (F_e) e direito (F_d) do pedestre coletados durante as medições realizadas, considerando uma pessoa com massa corporal de 75 kg e 1,81 m de altura, caminhando normalmente, possuindo uma amplificação dinâmica de aproximadamente 25 % em relação aos picos de força de cada pé do indivíduo.

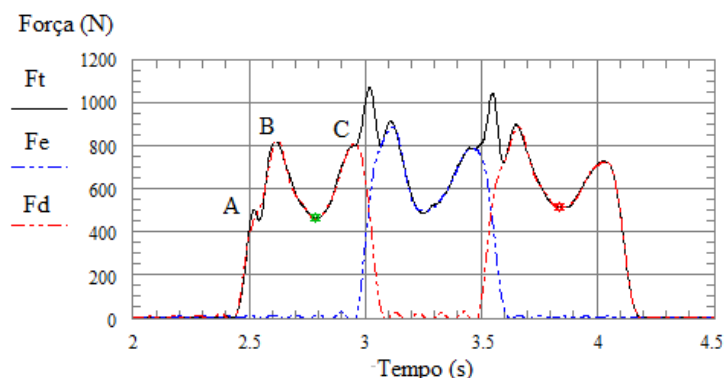


Figura 6. Dados da componente vertical da força de reação do solo (FRS).

Analisando qualitativamente a componente vertical da força de reação do solo (FRS) observa-se que a mesma é caracterizada por dois picos e um vale. O primeiro pico (B) é observado durante a primeira metade do período de apoio e caracteriza parte do apoio quando a perna está recebendo o peso corporal, logo após o contato do pé com o solo (Larish *et al.* 1988). Este pico é o início do apoio médio (apoio unipodal), esta força é maior que o peso corporal, pois se adiciona o efeito de aceleração ao peso do indivíduo. O segundo pico (C) é observado no final do período de apoio e representa o impulso contra o solo para iniciar o próximo passo. Esta força também é maior que o peso estático do pedestre, pois adiciona o efeito de aceleração ao peso corporal. De acordo com Hamill e Knutzen (1999), o vale entre os dois picos é menor em magnitude que o peso corporal e ocorre quando o pé se encontra na posição plana em relação ao solo. O vale é acentuado pelo balanço do membro contralateral que alivia a carga na plataforma de forças. Ainda, segundo Nigg e Herzog (2007), as componentes da FRS apresentam um pico nos primeiros milissegundos do período de apoio, sendo que este pico nem sempre é evidente em análises da marcha, este se refere à força de impacto (A), esta força resulta da colisão entre dois corpos: o pé e o solo. A magnitude do pico da força de impacto pode sofrer influências de fatores como a velocidade de locomoção, tipo de calçado, entre outros.

No entanto, a ação dinâmica total exercida pelo pedestre corresponde a uma sequência de passos, existindo um intervalo de tempo em que a força é aplicada simultaneamente em dois pontos da plataforma, afastados do comprimento do passo. A variação da força para a ação total do pedestre durante uma caminhada normal é apresentada na Fig. 7, em um diagrama resultante a partir dos dados mensurados da caminhada de um pedestre. Portanto, durante a caminhada existe um curto período de tempo em que ambos os pés estão em contato com o solo (apoio bipodal), resultando na superposição das forças geradas por cada pé do indivíduo. Nesta figura, F_t corresponde a força total, F_e é a força do pé esquerdo e F_d a força do pé direito.

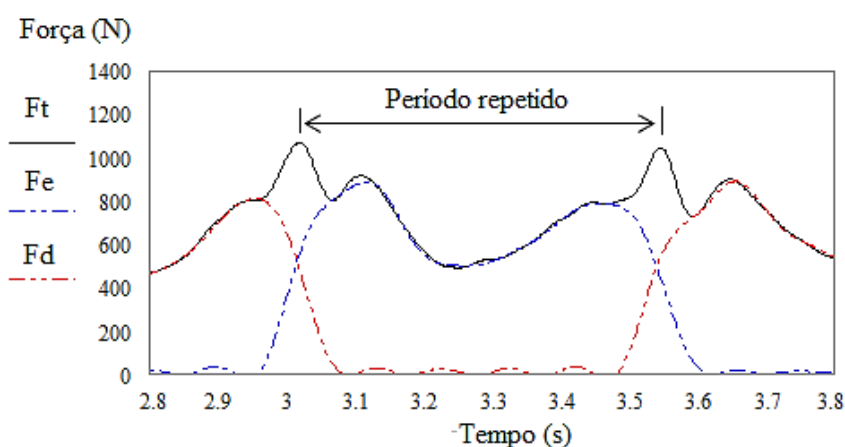


Figura 7. Força aplicada pelos dois pés durante a caminhada.

A Fig. 8 apresenta a força de reação do solo (FRS) avaliada de forma tridimensional no espaço (posição de aplicação). Isto se torna importante para a obtenção dos parâmetros cinemáticos dos pedestres. Em vermelho observa-se o deslocamento da força resultante vertical quando ambos os pés estão em contato com solo. Em azul a força de cada pé

de maneira individual (na fase em que apenas 1 deles encontra-se em contato com o solo), e em verde, a magnitude da força quando o pé se encontra na posição plana em relação ao solo (completo apoio plantar).

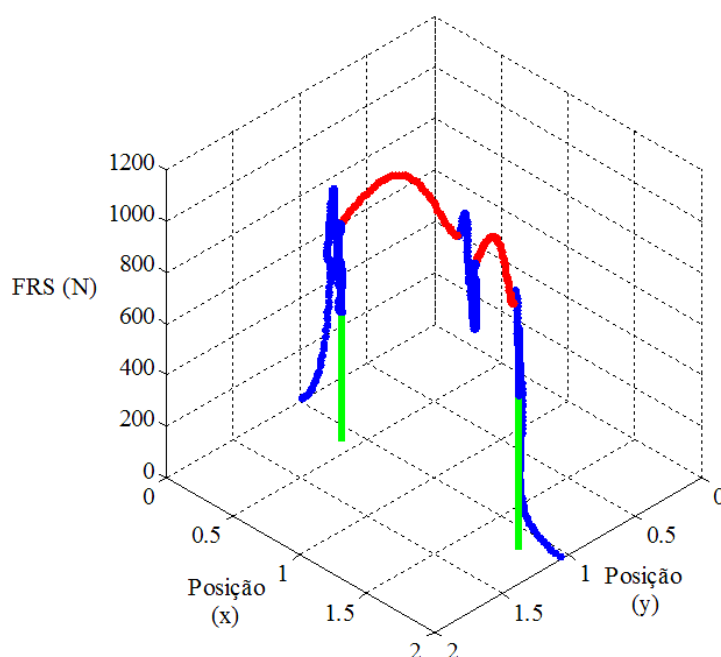


Figura 7. Representação em perspectiva da força de reação do solo vertical.

Através dos resultados da Fig. 7, percebe-se claramente que a aplicação da componente vertical não ocorre em linha reta (eixo x), mas em um padrão oscilatório neste eixo. Há ainda a questão temporal (não observada neste gráfico) onde o tempo de ocorrência de cada um dos trechos é diferenciado (vermelho, ocorrendo em curto intervalo de tempo e o azul em um intervalo de tempo maior). Todos os tempos de contato com o solo na fase bipodal e unipodal assim como distâncias e larguras de passadas são obtidas automaticamente através do software de aquisição e disponibilizados para cada passada do pedestre. Informações adicionais sobre o movimento humano podem ser encontradas em Vaughan *et al.* (1992); Winter (2009) e Hamill e Knutzen (1999).

Os resultados da Tab. 2 apresentam um resumo dos Fatores Dinâmicos de Carga (FDC), considerando os três primeiros harmônicos da caminhada humana, mensurados com plataforma de forças, considerando 54 pedestres, sendo que cada um deles cruzou a plataforma de forças 10 vezes.

Tabela 2. Resumo dos Fatores Dinâmicos de Carga.

	FDC 1	FDC 2	FDC 3
Máximo	0,38	0,11	0,10
Mínimo	0,15	0,01	0,01
Média	0,24	0,04	0,04
Desvio Padrão	0,04	0,02	0,02

Normalmente, os primeiros três harmônicos são considerados como potencialmente ressonantes.

4. PARÂMETROS CINEMÁTICOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

Medições experimentais são realizadas com 54 indivíduos, movendo-se com a sua própria taxa de passos, seguindo a instrução de caminhar em seu próprio padrão natural. Cada participante caminha na direção longitudinal sobre a plataforma de forças começando e terminando cada travessia em repouso, mas de forma que sobre as plataformas instrumentadas esteja completamente em regime de caminhar. Os sinais de forças são gravados para passagens repetidas de cada pedestre (10 repetições). As repetições para cada indivíduo visam capturar as variabilidades do caminhar de uma mesma pessoa.

Para cada travessia, os seguintes parâmetros são obtidos: velocidade média do pedestre (V_p), taxa de passos (f_p), comprimento do passo (l_s) e largura do passo (w_s). Durante a corrida, uma fase de voo ocorre, enquanto que em situações de caminhada, o pedestre está em contato permanente com o solo, alternando fases de apoio bipodal (d_s) e

unipodal (s_s). Além disso, avaliam-se também a velocidade unipodal (s_{ss}) e velocidade bipodal (d_{ss}). Estes parâmetros são medidos para as direções lateral e longitudinal da caminhada.

A Fig. 8 apresenta os efeitos da velocidade da marcha do pedestre. Durante o apoio unipodal a velocidade é pequena, porém, esta velocidade é elevada na fase bipodal, ou seja, durante a marcha, o aumento da distância percorrida ocorre especialmente durante a fase de apoio duplo.

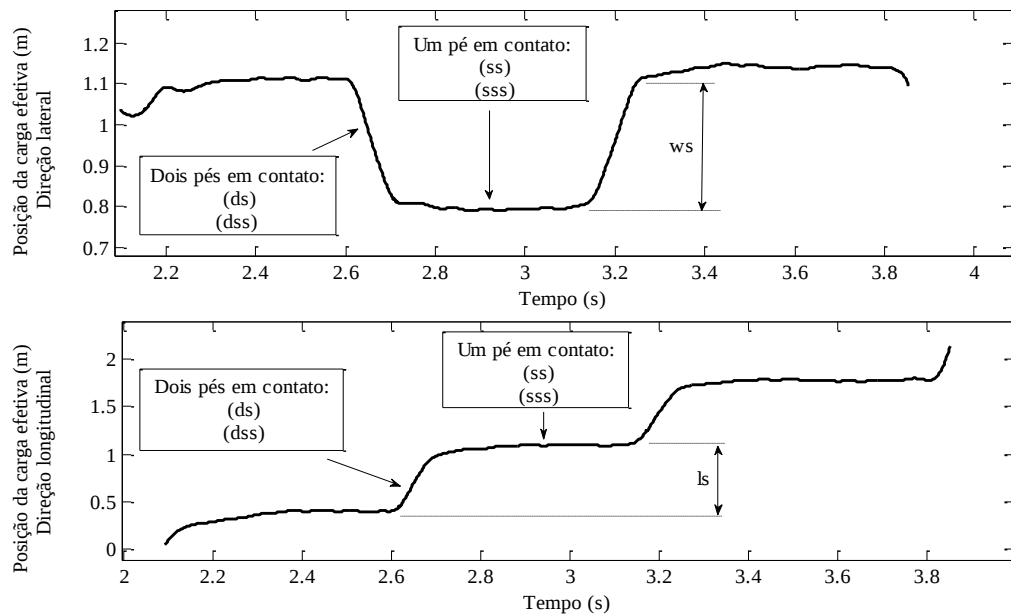


Figura 8. Efeitos da velocidade da marcha: direção lateral e longitudinal.

A Fig. 9 representa as posições da força resultante (no espaço) para a caminhada de um indivíduo, considerando as direções lateral e longitudinal.

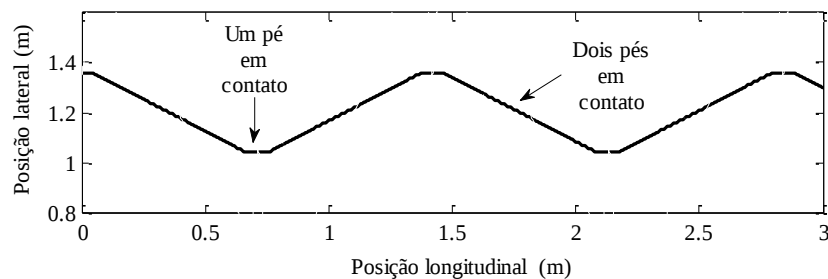


Figura 9. Posicionamento da força resultante do pedestre durante a caminhada.

A Tab. 3 apresenta um resumo dos parâmetros cinemáticos dos 54 pedestres analisados, considerando valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão.

Tabela 3. Resumo dos parâmetros cinemáticos dos pedestres analisados.

	V_p (m/s)	f_p (Hz)	l_s (m)	w_s (m)	d_s (s)	s_s (s)	s_{ss} (m/s)	d_{ss} (m/s)	s_{ss} (m/s)	d_{ss} (m/s)
					Longitudinal		Lateral			
Máximo	1,51	2,10	0,81	0,39	0,24	0,51	0,48	6,03	0,16	3,22
Mínimo	1,00	1,40	0,62	0,10	0,10	0,34	0,06	2,71	0,02	0,77
Média	1,28	1,77	0,72	0,25	0,15	0,41	0,26	4,18	0,05	1,70
Desvio Padrão	0,07	0,08	0,07	0,03	0,01	0,02	0,05	0,46	0,03	0,21

As magnitudes destes parâmetros cinemáticos estão em concordâncias com os resultados de outros pesquisadores (Dang e Zivanovic, 2015; Mullarney e Archbold, 2013 e Rigas, 1984), onde também se observa uma variabilidade intra e interindivíduo.

Em uma recente publicação Toso e Gomes (2015) concluíram que o efeito adicional da espacialidade da aplicação da força e as diferentes velocidades longitudinais e laterais apresentadas durante a marcha conduz a diferenças significativas no comportamento dinâmico de uma estrutura (por exemplo, excitação de outros modos de vibração). Os autores destacam que deve haver uma melhor compreensão da hipótese que considera que as forças induzidas por pedestres são perfeitamente periódicas, normalmente aplicadas em uma posição fixa ao longo da estrutura e com velocidade constante, hipóteses estas utilizadas por vários órgãos normativos e pesquisas relacionadas com o tema em estudo.

5. CONCLUSÕES

Os modelos numéricos existentes na literatura que visam representar o carregamento dinâmico dos pedestres não são suficientemente adequados para representar os reais esforços dos pedestres. Este estudo avaliou parâmetros cinéticos e cinemáticos de pedestres para obter um modelo de carregamento mais realista que possa apresentar maior fidelidade frente às mensurações realizadas em estruturas reais. Considera-se o comprimento do passo, passada, largura do passo, magnitude da força resultante e tempo de contato desta força nas condições de apoio unipodal e bipodal. Essas informações são os dados de entrada de um modelo numérico para a realização de análises dinâmicas.

A caminhada humana é um processo complexo dependente de vários parâmetros: faixa etária, condicionamento físico, saúde física e mental entre outros. Com a análise dos parâmetros obtidos a partir do projeto e desenvolvimento de uma plataforma de forças concebida para avaliar um ciclo completo da marcha humana, foi possível caracterizar várias grandezas dinâmicas que possuem variações espaciais e temporais relacionadas à caminhada humana. Isso permitiu a coleta de um amplo conjunto de dados experimentais que caracterize o real comportamento humano em estruturas. Além disso, identificaram-se variações existentes das mesmas grandezas de modo interpessoal e intrapessoal concluindo que o mesmo pedestre pode apresentar variações significativas em caminhadas diferentes. Os dados da FRS como, picos de apoio de força, impulso e impacto demonstram a eficácia do sistema de medição e processamento de dados, e comparados com os valores da literatura tem se mostrado condizentes, apresentando acurácia compatível a de sistemas comerciais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq e CAPES na realização desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Bachmann, H. e Ammann, W., 1987, "Vibrations in Structures Induced by Man and Machines, Structural Engineering Documents", International Association of Bridge and Structural Engineering (IABSE), Vol. 3e, Zürich.
- Barela, A.M.F., 2005, "Análise biomecânica do andar de adultos e idosos nos ambientes aquático e terrestre", Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Blanchard, J., Davies, B.L. e Smith, J.W., 1977, "Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges", Proceedings of the DOE and DOT TRRL Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges, Crowthorne, England, pp. 90-106.
- Dang, H.V. e Zivanovic, S., 2013, "Modelling pedestrian interaction with perceptibly vibrating footbridges", FME Transactions, Vol. 41, No. 4, pp. 271-278.
- Dang, H.V. e Zivanovic, S., 2015, "Experimental characterization of walking locomotion on rigid level surfaces using motion capture system", Engineering Structures, Vol. 91, pp. 141-154.
- Hamill, J. e Knutzen, K.M., 1999, "Bases biomecânicas do movimento humano", Ed. Manole, São Paulo, Brasil, 532 p.
- Hauksson, F., 2005, "Dynamic behavior of footbridges subjected to pedestrian-induced vibrations", Master's Dissertation, Lund University, Lund.
- Inman, V.T., Ralston, H.J. e Todd, F., 1981, "Human Locomotion", Ed. Baltimore, London, England, 550 p.
- Kala, J., Salajka, V. e Hradil, P., 2009, "Footbridge Response on Single Pedestrian Induced Vibration Analysis", Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 5, No. 4, pp. 269-280.
- Larish, D.D., Martin, P.E. e Mungiole, M., 1988, "Characteristic patterns of gait in the health old", New York Academy of Science, Vol. 515, No. 1, pp. 18-32.
- Meglan, D. e Todd, F., 1994, "Kinetics of human locomotion", In: J. Rose; e J. G. Gamble (Ed). Human walking. Ed. Baltimore, pp. 73-99.
- Mullarney, B. e Archbold, P., 2013, "Modelling the vertical loads applied by pedestrians at a range of walking velocities", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 7, No. 5, pp. 266-277.
- Nigg, B.M. e Herzog, W., 2007, "Biomechanics of the muscle-skeletal system", Ed. Wiley, New Jersey, USA, 686 p.
- Rainer, J.H., Pernica, G. e Allen, D.E., 1988, "Dynamic loading and response of footbridges", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 15, pp. 66-71.
- Rigas, C., 1984, "Spatial parameters of gait related to the position of the foot on the ground", Prosthetics and Orthotics International, Vol. 8, pp. 130-134.
- Toso, M.A. e Gomes H.M., 2015, "Pedestrian-structure dynamic interaction based in kinetic and kinematic parameters", Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, pp. 1-8.

- Toso, M.A., Gomes, H.M., Silva, F.T. e Pimentel, R.L., 2016, "Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian-structure interaction in walking situations", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 72-73, pp. 590-606.
- Toso, M.A. e Gomes, H.M., 2016, "A smart force platform using artificial neural networks", *Measurement*, Vol. 91C, pp. 124-133.
- Vaughan, C.L., Davis, B.L.D. e O'Connor, J.C., 1992, "Dynamics of Human Gait", Ed. Kiboho, South Africa, 137 p.
- Winter, D.A., 2009, "Biomechanics and Motor Control of Human Movement", Ed. Wiley, New Jersey, USA, 370 p.
- Yoneda, M., 2002, "A simplified method to evaluate pedestrian-induced maximum response of cable-supported pedestrian bridges", *Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges*, Paris, France, pp. 255-257.
- Young, P., 2001, "Improved floor vibration prediction methodologies", *Proceeding of Arup Vibration Seminar on Engineering for Structural Vibration - Current Developments in Research and Practice*, London, England, pp. 1-13.
- Zivanovic, S., Pavic, A. e Reynolds, P., 2005, "Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, pp.1-74.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

USE OF FORCE PLATFORM TO EVALUATE KINETIC AND KINEMATIC PARAMETERS IN HUMAN WALKING

Marcelo André Toso, marcelo.toso@yahoo.com.br¹
Herbert Martins Gomes, herbert@mecanica.ufrgs.br²

^{1,2} Federal University of Rio Grande do Sul, Sarmiento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brazil.

Abstract. In everyday tasks such as walking, running and jumping, the human body exerts force against the ground through the feet. The study of these movements can be accomplished using instruments known as force platforms. The load due to the action of a pedestrian on a structure has been obtained from investigations on instrumented force platforms, commercial treadmills or even walkways prototypes. In this study, experimental measurements are carried out using two independent force platforms properly instrumented, positioned side by side. Each platform has three load cells. The deck design provides the evaluation of vertical forces, which is the component that has greater magnitude compared to the other forces of human gait. As the individual walks on the force platform (left and right platform), the exerted force thereon is detected by the load cells that generate electrical signals that are amplified and registered by the data acquisition system. These signals allow evaluating the position and force magnitude applied to the resulting structure, for each pedestrian crossing. The experimental measurements campaign gathered 54 people. In a qualitative analysis of the vertical component of the ground reaction force, one can notice that two peaks and a valley characterize it. The first peak is observed during the first half of the period and characterizes part of the support leg receiving the body weight shortly after contact of the foot with the ground. The second peak is observed at the end of the support period and represents the thrust against the ground necessary to begin the next step. The valley between the two peaks is smaller in magnitude than the body weight that occurs when the foot is in flat position on the ground. During the experimental trials, each individual moved with their own rate steps. The acquired signals were recorded to repeated crossings of pedestrians (10 repetitions). For each crossing, the following parameters were evaluated: mean speed of the pedestrian, step rate, stride length and width of the step. During running and jogging, one flight phase occurs, while in walking situations, the pedestrian is in permanent contact with the ground, alternating phases of single and double support. It is also evaluated the pedestrian's single and double support speeds. The kinematic parameters were measured for lateral and longitudinal phase directions of the walk. It is noted that during the single support phase, the longitudinal speed is small, but it is high during the double support one, i.e., during walking, the increase in the travelled distance occurs mainly during the double support phase. The magnitudes of kinetic and kinematic parameters are in agreement with findings presented by other researchers.

Keywords: vibration measurements, force platform, biomechanics, human body vibration, human-structure interaction.