

HISTÓRICO DO PROJETO DE PLATAFORMAS DE FORÇAS UTILIZADAS EM APLICAÇÕES BIOMECÂNICAS

Marcelo André Toso¹, Herbert Martins Gomes², Guilherme Cortelini da Rosa³,
Ronaldo Cesar Tremarin⁴

Resumo: O corpo humano pode interagir com as estruturas e estas interações são desenvolvidas por meio da aplicação de forças devido ao seu movimento. Uma estrutura pode sofrer alterações no seu comportamento dinâmico quando sujeita a cargas. Para mensurar esses esforços, utilizam-se plataformas de forças. Estes dispositivos permitem a avaliação da força de ação/reação exercida pelos pés sobre uma superfície de contato. O presente trabalho fornece uma análise dos projetos mais representativos de plataformas de forças utilizadas em aplicações biomecânicas, apresentando suas vantagens, desvantagens, evoluções e metodologias de instrumentação. Essa revisão do estado da arte é apresentada em ordem cronológica.

Palavras-chave: Biomecânica. Plataforma de forças. Instrumentação. Projeto mecânico.

1 INTRODUÇÃO

Em tarefas cotidianas, como caminhar, correr e pular, o corpo humano exerce força contra o solo, frequentemente por meio dos pés. O estudo desses movimentos pode ser realizado pela interpretação de variáveis mecânicas obtidas com a utilização de instrumentos denominados plataformas de forças. Plataformas de forças são equipamentos projetados para medir as forças exercidas por um corpo em uma superfície externa, ou seja, a superfície de contato. Esses dispositivos são constituídos basicamente de uma placa apoiada em pontos previamente definidos e seu princípio de funcionamento é tal que a força exercida sobre a sua superfície é transmitida aos transdutores, que são dispositivos capazes de gerar um nível de tensão elétrica correspondente à força sobre eles aplicada. Essa correspondência entre força e tensão elétrica é geralmente linear na região de operação para a qual o transdutor é projetado, permitindo estabelecer uma constante de proporcionalidade, convertendo-se a tensão elétrica mensurada pelos transdutores em níveis apropriados de força. Uma das variáveis mais comumente investigadas durante a caminhada humana é a Força de Reação do Solo (FRS), a qual é mensurada com o uso de plataformas de forças. A 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.

De acordo com Silva e Pimentel (2011), estruturas de concreto armado podem apresentar alterações em seu comportamento dinâmico quando ocupadas por pessoas, uma vez que o corpo humano tem massa e também dissipa energia de vibração. As frequências naturais da uma

1 Mestre em Engenharia Mecânica. Professor da Univates. marcelo.toso@univates.br

2 Doutor em Engenharia Civil. Professor da UFRGS. herberte@mecanica.ufrgs.br

3 Mestre em Engenharia Mecânica. Professor da Univates. guilherme.rosa@univates.br

4 Mestre em Engenharia de Processos de Fabricação. Professor da Univates. ronaldokt@univates.br

estrutura são alteradas quando ocupadas. Barker e Mackenzie (2008) chamam a atenção para estudos sugerindo que, em situações de multidão de pedestres, o amortecimento da estrutura pode aumentar, reduzindo a resposta estrutural. Os referidos estudos fornecem evidências de que em estruturas sujeitas ao fluxo de pedestres a dinâmica do corpo humano deve ser considerada, a fim de definir a carga de projeto ou investigar seus efeitos corretamente. Nesse sentido se utilizam plataformas de forças para quantificar os esforços gerados durante a caminhada humana.

Existem diversos modelos de plataformas de forças comercialmente disponíveis, para análise da marcha, equilíbrio e análises esportivas. Porém, uma dificuldade quanto ao uso de plataformas comerciais está relacionada ao seu custo. Para estudos relacionados à marcha humana, no mínimo duas plataformas comerciais são necessárias para capturar os dados da caminhada humana, dificultando seu uso, pois se tem um aumento significativo nos valores de projeto. Sendo assim, dependendo da aplicação e dos estudos a serem realizados, a construção de uma plataforma de forças torna-se uma alternativa que deve ser considerada, diminuindo dessa forma os custos envolvidos no projeto desse equipamento frente aos dispositivos comercialmente disponíveis.

2 INSTRUMENTAÇÃO DAS PLATAFORMAS DE FORÇAS

Basicamente existem dois tipos de metodologias que podem ser usadas para a construção das plataformas de forças: (i) uso de *strain gauges* para a instrumentação dos transdutores ou (ii) a utilização de materiais piezoelétricos.

De acordo com Fialho (2007), dentre os diferentes procedimentos existentes para converter deformações mecânicas em sinais elétricos proporcionais, o mais conhecido é o que utiliza elementos cuja resistência varia em função de pequenas deformações longitudinais. Esses elementos são pequenas células extensométricas coladas na superfície do corpo de prova, formando um conjunto solidário, e recebem o nome de *strain gauges* (medidores de deformação). Esses sensores possibilitam determinar a deformação mecânica de uma estrutura quando sujeita à ação de uma força por meio da variação da resistência elétrica, a qual é diretamente proporcional à força aplicada. Quanto às vantagens dessa técnica de instrumentação, citam-se o baixo custo, em comparação com materiais piezoelétricos, e a facilidade de condicionamento de sinal. Quanto às desvantagens, mensuram-se somente esforços estáticos. Este artigo trata com mais detalhes essa metodologia de instrumentação, pois atualmente é a técnica mais comumente utilizada em aplicações biomecânicas.

Já a piezoeletricidade é uma propriedade encontrada em determinados materiais na natureza (ou construídos pelo homem), como, por exemplo, nas cerâmicas de titanato de bário e nos cristais de quartzo. Esses materiais são capazes de gerar elevadas tensões elétricas alternadas quando submetidos a esforços de compressão ou tração alternados. Esse fenômeno pode ser causado por bater ou torcer o material apenas o suficiente para deformar o seu cristal, sem fraturá-lo. O efeito também funciona no modo oposto, pois o material pode deformar-se ligeiramente quando uma pequena corrente elétrica é aplicada. A instrumentação de plataformas de força usando materiais piezoelétricos apresenta algumas vantagens se comparado com o uso de *strain gauges*: alta frequência natural, linearidade, repetibilidade e baixa histerese. Plataformas que utilizam materiais piezoelétricos normalmente apresentam maior custo se comparado com *strain gauges*, pois essas plataformas são mais elaboradas e as células de carga são mais eficientes, fornecendo maior precisão nas medidas realizadas. Quanto ao carregamento, cargas estáticas não podem ser medidas usando esses materiais, pois, quando a pressão sobre o cristal é retirada, a polarização desaparece, voltando à condição inicial. Essa metodologia de instrumentação é aplicável somente com grandezas que variam com o tempo. Esta limitação torna-se um fator determinante que deve ser considerado nas etapas iniciais do projeto.

Na seção subsequente é apresentado breve histórico do projeto de plataformas de forças utilizadas em biomecânica. São vários os trabalhos que tratam desse tema. Essa revisão do estado da arte é apresentada em ordem cronológica.

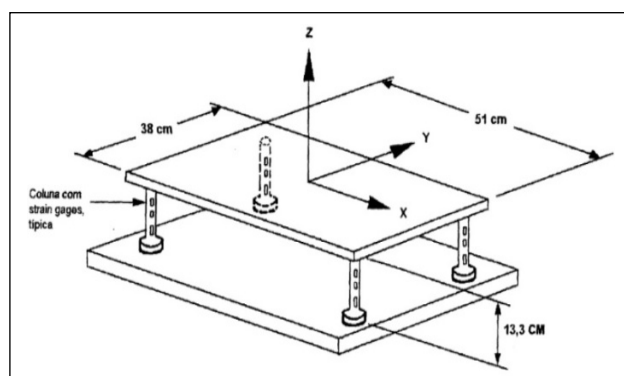
3 HISTÓRICO DO PROJETO DE PLATAFORMAS DE FORÇAS

No ano de 1895 surge a primeira plataforma de forças para utilização em biomecânica. Ela consistia de tubos espirais de borracha que foram montados em uma estrutura de madeira, com o objetivo de medir o componente vertical da força exercida pelos pés contra o solo durante saltos verticais.

Enquanto essa plataforma mensurava somente esforços verticais, Elftman (1938) construiu uma plataforma para medir os esforços verticais e horizontais do caminhar humano. Essa plataforma possuía uma base fixa suportada por quatro molas lineares, que, quando solicitadas, permitiam certo deslocamento, sendo esse deslocamento medido opticamente por meio de um ponto fixo, permitindo, dessa forma, calcular os esforços envolvidos.

A primeira plataforma utilizando *strain gauge* como metodologia para instrumentação dos transdutores de força foi projetada e construída por Cunningham e Brown (1952). Essa plataforma possuía uma base de aço e quatro colunas cilíndricas, possuindo cada coluna (transdutor) possuía seis extensômetros que tinham como função medir os esforços nos três eixos (x,y,z). Uma placa de alumínio era utilizada na parte superior da plataforma, enquanto uma placa de aço fixava a plataforma ao solo (superfície inferior). Quanto ao seu funcionamento, solicitações verticais eram transmitidas aos transdutores axialmente, sendo assim os quatro elementos comprimidos, enquanto para solicitações horizontais os transdutores sofriam flexão. A Figura 1 apresenta a plataforma desenvolvida por ambos os pesquisadores.

Figura 1 – Plataforma de forças de Cunningham e Brown



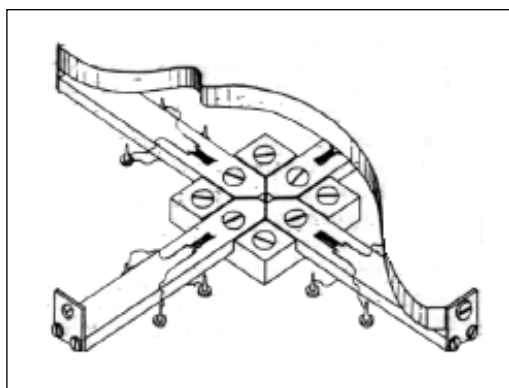
Fonte: Cunningham e Brown (1952).

No ano de 1959 surge a primeira plataforma de forças utilizando sensores do tipo transformador linear diferencial variável (LVDT) de funcionamento indutivo. O LVDT é constituído de bobinas e um núcleo interno. O deslocamento do núcleo no interior da bobina induz a circulação de corrente proporcional ao deslocamento. Essa plataforma foi desenvolvida por Greene e Morris (1959).

Petersen (1964) confeccionou uma plataforma de forças composta por quatro vigas engastadas na forma de cruz, com as extremidades fixas na base e o centro fixo na superfície de contato, ou seja, consiste de uma placa quadrada com os cantos suportados pela extremidade livre de vigas em

balanço instrumentadas. Essa plataforma possuía alta linearidade e utilizava ponte de Wheatstone completa. A resposta de saída era independente do ponto de aplicação da carga sobre a superfície de contato. Quanto a desvantagens cita-se o fato de que somente esforços verticais eram mensuráveis. O posicionamento dos *strain gauges* e o modelo da plataforma podem ser vistos na Figura 2.

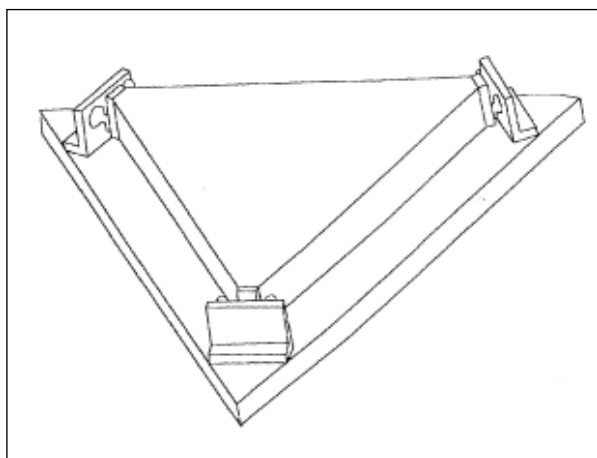
Figura 2 – Plataforma de forças de Petersen



Fonte: Petersen (1964).

Surgiu, então, um novo conceito de plataforma de forças, em que Gola (1980) mostrou que a plataforma poderia ser suspensa. Nesse projeto, ao invés de a plataforma se apoiar sobre os elementos transdutores, ela é suspensa por eles. Gola classificou as plataformas em dois grupos: plataformas suportadas e plataformas suspensas. Forças e momentos nos três eixos podem ser medidos com esse tipo de plataforma. A grande vantagem desse modelo é que os esforços envolvidos podem ser separados em diferentes eixos, com bastante eficácia. Lâminas são utilizadas para colagem dos extensômetros sem problema de flambagem ou instabilidade dinâmica. Porém, tem-se como desvantagens a dificuldade de fabricação e alinhamento das estruturas laterais. Essa plataforma é triangular equilátera com 620 mm de lado, conforme observado na Figura 3. Quanto aos transdutores, segundo Gola (1980), eles foram especialmente projetados para essa aplicação, de maneira a fornecer as saídas desejadas. As vantagens obtidas com a utilização desses elementos é que suas posições no espaço não são afetadas pela deformação da placa superior, não sendo submetidas à flexão. Teoricamente não ocorrem interferências entre os transdutores.

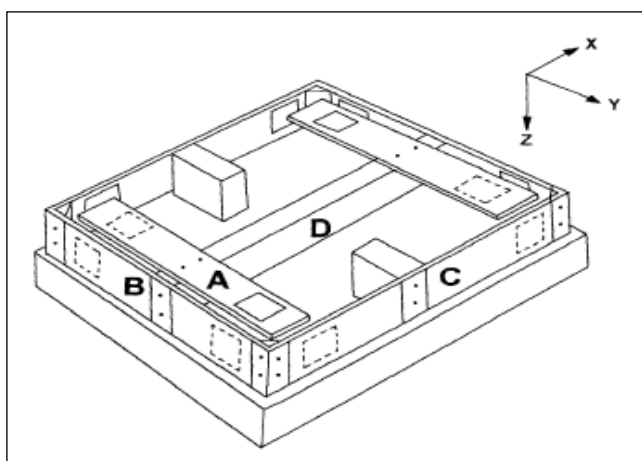
Figura 3 – Plataforma de força de Gola



Fonte: Cerutti (2003).

Lywood *et al.* (1987) construíram uma plataforma de forças para pesquisa e monitoração da postura de pequenos animais. A plataforma mede forças nos três eixos ortogonais. Segundo Roesler (1997), para componentes horizontais, este sistema emprega o princípio de transferência dos componentes de forças por meio de um membro não ativo suspenso, relativamente rígido para membros ativos suspensos colocados perpendicularmente (F_x) e paralelamente (F_y) a esse membro rígido. Assim os membros ativos funcionam como vigas que se deformam no plano vertical. A plataforma é composta por uma base na qual são engastados os blocos "C". Estes são unidos aos elementos "B", que ligam a viga "D" e as barras "A". Nos elementos "A", "B" e "C" são colados os extensômetros para medição dos esforços. Essa plataforma é apresentada na Figura 4, bem como o posicionamento dos *strain gauges* colados na estrutura.

Figura 4 – Plataforma de força de Lywood *et al.*



Fonte: Lywood *et al.* (1987).

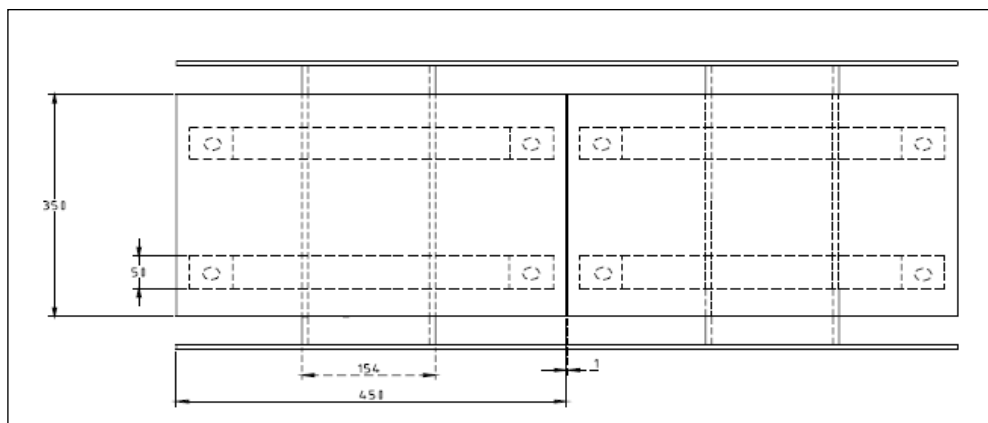
Facilidade de instrumentação, posicionamento dos sensores, saídas individuais para cada variável medida de acordo com as direções preferenciais de deformações e linearidade são algumas das vantagens que podem ser citadas para esse tipo de plataforma de força.

Na década de 90 vários trabalhos surgiram, devido à evolução da tecnologia. Com o acesso a transdutores de forças e a outros métodos de aquisição de dados tornou-se mais fácil realizar estudos envolvendo plataformas de forças. Dessa forma a qualidade das medidas também foi significativamente melhorada. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul contribuiu bastante durante essa década, podendo-se citar vários trabalhos que surgiram nesse período.

Um projeto de duas plataformas montadas em tandem foi proposto por Silveira Filho (1997). Ele utilizou plataformas com dimensões de 350 mm x 450 mm de aço carbono. Essas duas plataformas foram montadas uma em frente da outra num estrado (tandem), tendo assim um comprimento de passada de 900 mm. As duas plataformas foram utilizadas para instrumentalizar uma esteira ergométrica comercial, permitindo assim uma análise dinâmica de impactos na marcha humana. A vantagem desse tipo de instrumentação é o estudo de impactos da marcha sem alterar o padrão do passo, com velocidade da esteira constante, podendo-se com facilidade alterar os parâmetros de velocidade e inclinação da esteira (SILVEIRA FILHO, 1997). Somente forças na direção F_z (vertical) foram consideradas nesse projeto. Para o projeto da estrutura da plataforma, seguiram-se os princípios gerais propostos por Lywood *et al.* (1987), sendo a estrutura dimensionada para uma carga maior. Os extensômetros foram colados nas travessas longitudinais, onde ocorre o maior momento fletor das barras, ou seja, o mais próximo possível das travessas axiais de 154 mm. Foram colados quatro extensômetros nos pontos de máxima deformação, dois na parte superior e dois na parte inferior, formando uma ligação em ponte de Wheatstone completa. Segundo Silveira Filho (1997), houve um superdimensionamento da capacidade de carga máxima da plataforma (5000 N). Na prática essas cargas nunca seriam atingidas por pessoas normais. O autor concluiu que um melhor dimensionamento da carga máxima (2000 N, por exemplo) possibilitaria um aumento de sensibilidade da plataforma de força.

A Figura 5 mostra uma vista superior das duas plataformas montadas em tandem.

Figura 5 – Plataformas de forças montadas em tandem – vista superior

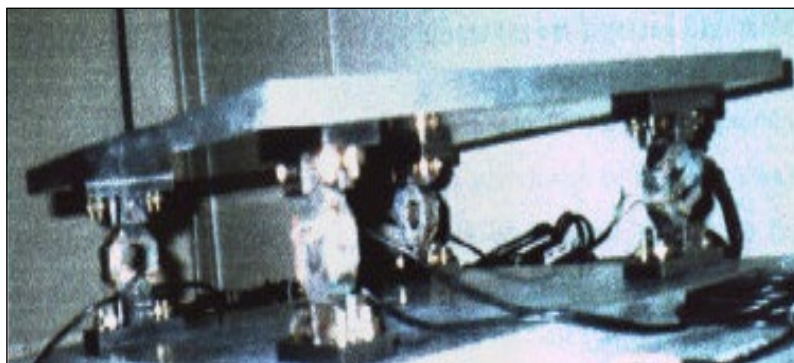


Fonte: Silveira Filho (1997).

Uma plataforma utilizada para medições de saltos de nadadores foi desenvolvida por Bagesteiro (1996). Essa plataforma possuía as dimensões de 500 mm x 500 mm e era apoiada em quatro transdutores, possibilitando a medição de forças e momentos nas direções x , y e z . As células de carga eram octogonais e cada célula possuía oito extensômetros de resistência elétrica, ligados em duas pontes de Wheatstone, apresentando um comportamento eficiente quanto ao desacoplamento das forças vertical e horizontal. Bagesteiro encontrou dificuldades relacionadas à união dos transdutores nas placas superior e inferior, visto que os transdutores eram parafusados

nessas placas, ocasionando problemas com a rigidez desse acoplamento. A Figura 6 ilustra essa plataforma de forças.

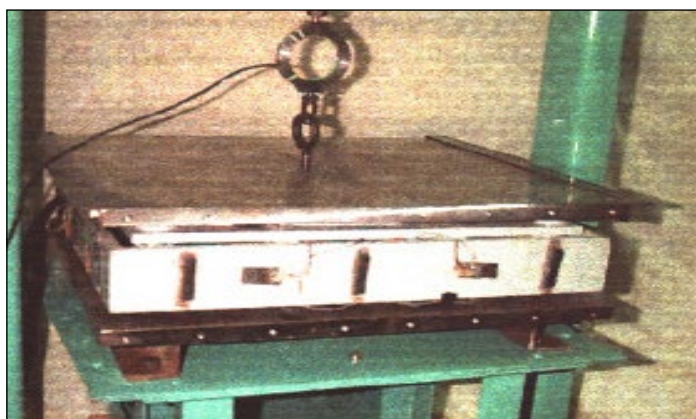
Figura 6 – Plataforma de forças de Bagesteiro



Fonte: Bagesteiro (1996).

Roesler (1997) utilizou a geometria proposta por Lywood *et al.* (1987), porém sua plataforma era capaz de medir os momentos nas direções x , y e z , esforços que não eram mensurados no trabalho de Lywood *et al.* (1987). A estrutura foi redimensionada para possibilitar cargas exercidas por seres humanos. Sendo assim, a plataforma mede forças e momentos nos três eixos. Cada direção de força ou momento era medido por uma ponte completa de Wheatstone. Essas medições eram independentes, evitando, dessa forma, operações entre os canais de medições. Seu desenvolvimento destinava-se para o uso subaquático e também para aplicações de biomecânica em geral. A Figura 7 apresenta a plataforma construída por Roesler em fase de calibração.

Figura 7 – Plataforma de forças de Roesler durante a calibração

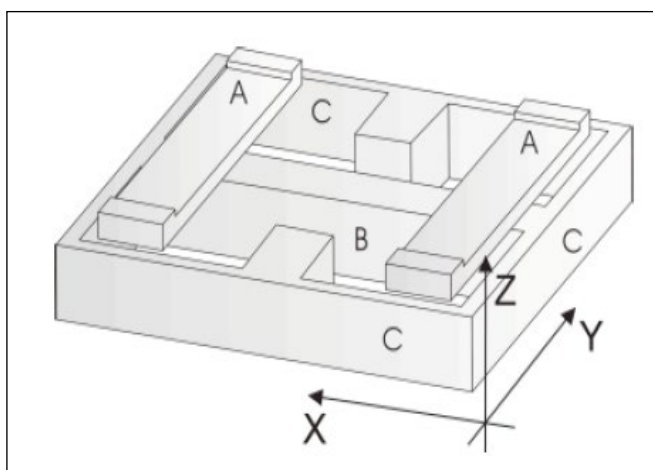


Fonte: Roesler (1997).

Embora o trabalho de Cerutti (2003) não seja utilizado em pesquisas biomecânicas, ele é avaliado pois, com a realização de um redimensionamento estrutural, a plataforma pode ser utilizada nesse tipo estudo. Cerutti (2003) desenvolveu uma plataforma para avaliar os esforços do vento, com dimensões de 160 mm x 160 mm e capacidade de medir as seis componentes (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) do esforço do vento resultantes na base de um modelo reduzido quando ensaiado em túneis de vento. Seu projeto levou em consideração o modelo de Lywood *et al.* (1987) e também

o utilizado por Roesler (1997). De acordo com Cerutti (2003), plataformas de forças devem ter seus esforços bem desacoplados, ou seja, o carregamento em um eixo não pode ocasionar distorções no carregamento de outro eixo. Chamado de interferência entre componentes (*cross talk*), os acoplamentos de forças e momentos devem ser minimizados por meio de um projeto mecânico cuidadoso. Nesse projeto foi considerada uma ponte de Wheatstone completa para cada direção, sendo dois pontos solicitados à tração e dois pontos solicitados à compressão para cada eixo ou componente. O autor cita ainda a importância de levar em consideração fatores como temperatura, pressão e umidade durante o dimensionamento de uma plataforma, para que esses fatores não venham interferir nos resultados das medições experimentais. Durante o desenvolvimento de seu projeto foram encontrados problemas com a sensibilidade do equipamento. Alterações foram realizadas no projeto original, pois durante os ensaios dinâmicos verificou-se que o sistema estava rígido em demasia. As alterações contribuíram para uma melhor precisão do equipamento. A Figura 8 apresenta o projeto da plataforma de forças proposto por Cerutti (2003).

Figura 8 – Plataforma de forças de Cerutti



Fonte: Cerutti (2003).

Para finalizar esta revisão bibliográfica, é citado o trabalho realizado por Urquiza (2005) na Universidade Federal de Uberlândia. Urquiza construiu uma plataforma que utilizou quatro células de cargas instrumentadas com *strain gauges*, podendo medir esforços em três direções ortogonais. Destaca-se em seu trabalho a preocupação em que as frequências naturais da plataforma serem superiores às frequências dos sinais a serem medidos. Nesse sentido tentam-se produzir superfícies com máxima rigidez aliada à mínima massa. Quanto às células de carga, esse trabalho utilizou as geometrias básicas dos transdutores utilizados por Bagesteiro (1996), efetuando-se alterações quanto à fixação, raios, espessura entre outras. A Figura 9 apresenta a plataforma de forças projetada por Urquiza.

Figura 9 – Plataforma de forças de Urquiza



Fonte: Urquiza (2005).

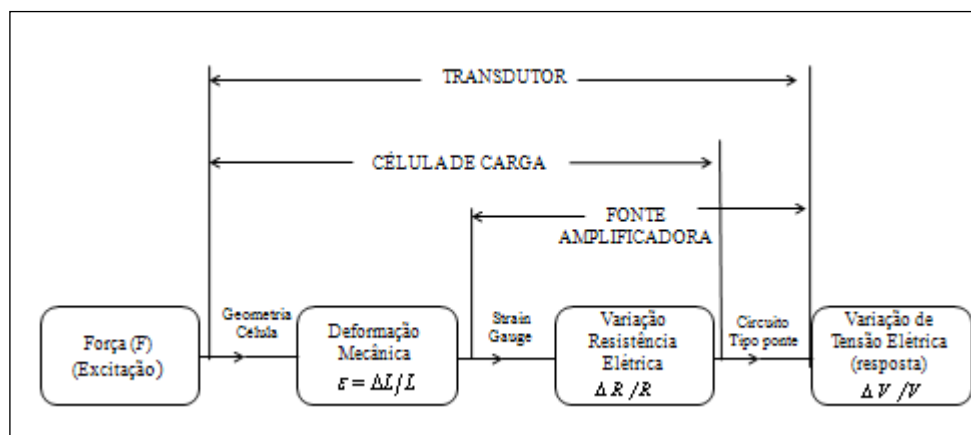
Após realizar esta revisão bibliográfica, pode-se concluir que os diversos modelos de plataformas de forças citados possuem características em comum e novos projetos surgem com o uso de estudos já realizados no passado. Segundo Roesler (1997), as plataformas são compostas no mínimo de dois componentes: (i) a superfície que faz a interface entre o instrumento de medição e o objeto que exerce a ação a ser mensurada, denominada superfície de contato, e (ii) o projeto dos transdutores instalados na superfície e o contato com o solo.

3.1 Transdutores de força

Transdutores são dispositivos que, quando excitados por força, fornecem uma resposta (saída) proporcional à excitação (entrada). A grandeza que se quer medir, no caso a força, é processada pelo transdutor que a transforma em uma grandeza de outra natureza. São equipamentos eletromecânicos que medem cargas estáticas ou dinâmicas nas situações que não ocorrem grandes deslocamentos, e as convertem em sinais elétricos para posterior análise.

O princípio de funcionamento dos transdutores de força ou carga é baseado na deformação que sofre o material quando submetido à aplicação de uma força. Ou seja, por meio de materiais como *strain gauges*, dispostos em um pequeno conjunto mecânico, mede-se a deformação, convertendo o sinal elétrico em força ou carga. Outra definição similar foi estabelecida por Dally (1993): “Transdutores são dispositivos eletromecânicos que convertem uma alteração mecânica, como deslocamento ou força, em uma alteração em um sinal elétrico que pode ser monitorado depois de um apropriado condicionamento”. A Figura 10 apresenta esquematicamente o funcionamento de um transdutor de forças.

Figura 10 – Diagrama simplificado de um transdutor de força utilizando extensômetros



Fonte: Roesler (1997).

Conforme Cauduro (1992), o elemento elástico de um transdutor extensométrico pode estar simultaneamente sob a ação de grandezas mecânicas, efeitos de temperatura e perturbações diversas, provocando cada uma dessas ações deformações em pontos da superfície do elemento elástico. Os valores dessas deformações superficiais dependem do ponto considerado sobre o elemento elástico e da orientação considerada sobre a superfície do elemento elástico. Na prática, a orientação da deformação será definida pela orientação da grade dos extensômetros, o qual medirá uma deformação média que estará ocorrendo sobre a superfície na qual ele está colado.

3.1.1 Características gerais dos transdutores

Em geral, deseja-se que os transdutores mecânicos de força possuam: (i) elevada rigidez mecânica; (ii) boa linearidade; (iii) baixa histerese; (iv) boa capacidade de repetição; (v) alta sensibilidade com boa resolução; (vi) trabalho em condições adversas:

Rigidez mecânica: a rigidez de uma estrutura é a medida de como essa estrutura se distorce pela ação de cargas atuando sobre ela;

Linearidade: é a aproximação com a qual uma curva de calibração acompanha uma reta ideal;

Histerese: é a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou. É definida como a máxima diferença entre as saídas lidas para a mesma carga aplicada, uma leitura sendo realizada com o aumento da carga de zero ao valor máximo e outra leitura pela diminuição desse valor máximo até zero;

Repetibilidade: é a diferença máxima entre os sinais de saída para aplicações de uma mesma grandeza em iguais condições ambientais e de aplicação de grandeza;

Sensibilidade: é a variação da resposta do transdutor de medição dividida pela correspondente variação de seu estímulo. É restringida pela rigidez necessária mínima para manter as tensões máximas e a frequência fundamental da estrutura dentro de limites admissíveis, assim como a linearidade desejável.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção de uma plataforma de forças para necessidades específicas de medição de faixa e componentes torna-se uma alternativa a ser considerada frente aos dispositivos comercialmente

disponíveis. Dessa forma, este artigo apresentou um histórico dos projetos mais representativos no desenvolvimento de plataformas de forças utilizadas em aplicações biomecânicas. Realizou-se uma avaliação de cada plataforma com o objetivo de apresentar suas vantagens, desvantagens e evoluções. Nos últimos anos o progresso das técnicas de medições, armazenamento e processamento de dados contribuíram enormemente para a análise do movimento humano e, por tratar-se de uma questão com alta dependência de resultados experimentais, é necessário que a biomecânica preocupe-se com critérios relacionados às medições, confiabilidade e incertezas. Somente dessa forma é possível buscar métodos e medidas mais acurados e precisos para a modelagem do movimento humano. Nesse sentido, deve-se realizar uma correta calibração do equipamento desenvolvido, eliminando incertezas frente às variáveis mensuradas.

Destaca-se ainda a importância de se conhecer e caracterizar as Forças de Reação do Solo (FRS) avaliadas com o uso de plataformas de forças, informações estas que são necessárias para inúmeros projetos de engenharia que vão desde edificações a próteses utilizadas em cirurgias reparatórias.

REFERÊNCIAS

- BAGESTEIRO, L. B. **Desenvolvimento de uma plataforma para análise de forças produzidas por pessoas**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- BARKER, C.; MACKENZIE, D. Calibration of the UK National Annex. **Footbridge, Proceedings of the International Conference**. Porto, Portugal, 2008.
- CAUDURO, C. R. **Uma metodologia para auxílio ao projeto de transdutores extensométricos**. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- CERUTTI, M. V. **Desenvolvimento de um sistema para medição do carregamento devido ao vento em edificações alteadas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- CUNNINGHAM, D. M.; BROWN, G. W. Two devices for measuring the force acting on the human body during walking. **Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis**, 9, p. 75-90, 1952.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. 2. edição. Iowa: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- ELFTMAN, H. The force exerted by the ground in walking. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**, v. 10, n. 5, p. 477- 491, 1938.
- FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial**. 5. edição. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2007.
- GOLA, M. M. Mechanical design, construction details and calibration of a new force plate. **Journal of Biomechanics**, v. 13, p. 113-128, 1980.
- GREENE, J. H.; MORRIS, Z. The design of a force platform for work measurement. **The journal of Industrial Engineering**, v. 10, p. 312-317, 1959.
- LYWOOD, D. W.; VANEYKEN, A.; MACPHERSON, J. M. Small, triaxial force plate. **Medicine & Biology Engineering and Computations**, v. 25, 1987.

PETERSEN, W. A. A strain-gauge platform for force measurements. **Journal of Applied Physiology**, v. 20, 1964.

ROESLER, H. **Desenvolvimento de plataforma subaquática para medições de forças e momentos nos três eixos coordenados para utilização em biomecânica**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

SILVA, F. T.; PIMENTEL R. L. **Biodynamic walking model for vibration serviceability of footbridges in vertical direction**. In: Eurodyn 2011 8th International Conference on Structural Dynamics, 2011, Leuven/ Belgium. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics Eurodyn, v.1. p. 1090-1096, 2011.

SILVEIRA FILHO, E. D. **Plataformas de força montadas em esteira ergométrica para análise de marcha humana**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

URQUIZA, M. A. **Desenvolvimento de uma plataforma de força multiaxial para instrumentação biomédica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.