

UMA PLATAFORMA DE FORÇAS COM STRAIN GAGES PARA APLICAÇÕES NO SALTO EM DISTÂNCIA

Carlos Rodrigo de Mello Roesler

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, Fundos. Porto Alegre –RS, Brasil
rroesler@grante.ufsc.br

Ignácio Iturrioz e Milton Antônio Zaro

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, Fundos. Porto Alegre –RS, Brasil
ignacio@mecanica.ufrgs.br; zaro@mecanica.ufrgs.br

Resumo. *Uma primeira aproximação numérica para o projeto de uma plataforma de forças utilizando strain gages, com aplicação prevista na decolagem para o salto em distância, é apresentada. Os sensores strain gages foram localizados estrategicamente sobre uma estrutura metálica que suporta uma tampa de material composto destinada ao contato do pé do atleta. A limitação básica no projeto é o fato de que as cargas aplicadas à plataforma são dinâmicas em natureza, de forma que a frequência fundamental da plataforma deve ser bem maior do que o conteúdo de frequências excitado. Este requerimento indica uma estrutura leve e rígida. Porém o princípio extensométrico resistivo de medição de forças exige a ocorrência de deformação mecânica relativa em um membro elástico, indicando redução de sua rigidez. Ademais, a sensibilidade do transdutor é inversamente relacionada com sua rigidez. Plataformas de força como a desenvolvida são capazes de medir a força de ação sobre sua superfície de contato e o respectivo momento, permitindo a determinação das três componentes ortogonais de força (F_x , F_y , F_z) e os momentos em torno dos três eixos ortogonais (M_x , M_y , M_z). De acordo com suas dimensões, a plataforma poderá substituir a tábua de impulsão originalmente utilizada nos treinamentos de salto em distância.*

Palavras chave: *plataforma de forças, bio-mecânica do esporte, salto em distância, decolagem, strain gage*

1. Introdução

Em bio-mecânica do esporte, um importante objetivo é a melhora do desempenho. Segundo Grabiner e Garhammer (1991), esta melhora pode ser alcançada pela melhor execução da tarefa, a qual pode ser detectada através de “algum tipo de análise após algum tipo de medição”. Plataformas de força ou dinamométricas são comumente utilizadas em laboratórios de bio-mecânica para medir as forças de reação do solo envolvidas no movimento humano.

Particularmente em pesquisas do salto em distância a utilização de uma plataforma de forças permite que o treinador oriente o atleta na melhora da execução da tarefa, acarretando a desejada melhora do desempenho. Uma vez que não existem registros de plataformas de forças projetadas para substituir a tábua de impulsão utilizada nos treinamentos, os experimentos vem sendo realizados em condições diferentes da situação normal de treinamento, utilizando-se plataformas convencionais. Ademais, apesar de unidades completas de plataformas poderem ser encomendadas comercialmente, de acordo com as necessidades específicas da atividade em estudo, uma vez que apenas empresas do mercado exterior fabricam este tipo de equipamento, o custo é proibitivo. Assim, tem-se que o estudo e posterior geração de alternativas de projeto de plataformas mais econômicas e que aproximem mais os experimentos da situação natural de treinamento apresenta-se como um atraente objeto de pesquisa em bio-mecânica do esporte.

2. Formulação do problema

No desenvolvimento do sistema de medição *Plataforma de forças*, a função que representa o comportamento deste sistema $[g(t)]$ apresenta-se como incógnita do problema. Esta função, de acordo com as características estruturais estáticas e dinâmicas requeridas para o funcionamento do sistema, determina a forma de ligação entre a excitação exercida sobre o sistema e a resposta fornecida pelo mesmo. Para um transdutor extensométrico, habilitado para funcionar no regime de comportamento elástico do material que o compõe, a relação entre a excitação e a resposta do sistema deve variar de maneira linear.

A função de excitação do sistema $[f(t)]$ é representada pela força de contato, no tempo, exercida pelo pé do atleta sobre a plataforma de força.

A função de saída ou resposta desejada $[x(t)]$, por sua vez, é a ocorrência de deformação relativa do transdutor de força (ver item 4.2) na posição de colagem dos sensores extensométricos, que deve ficar dentro dos valores limites preestabelecidos.

Conforme Riera (1996), um problema no qual são conhecidas as características da função de excitação $[f(t)]$ e, além disso, deseja-se saídas preestabelecidas $[x(t)]$, com valores compreendidos dentro de limites admissíveis, pode ser classificado como problema de síntese. Em geral, a solução desta classe de problemas de engenharia não é única, consistindo em encontrar o melhor sistema $[g(t)]$ que liga a excitação à resposta (Fig. (1)).

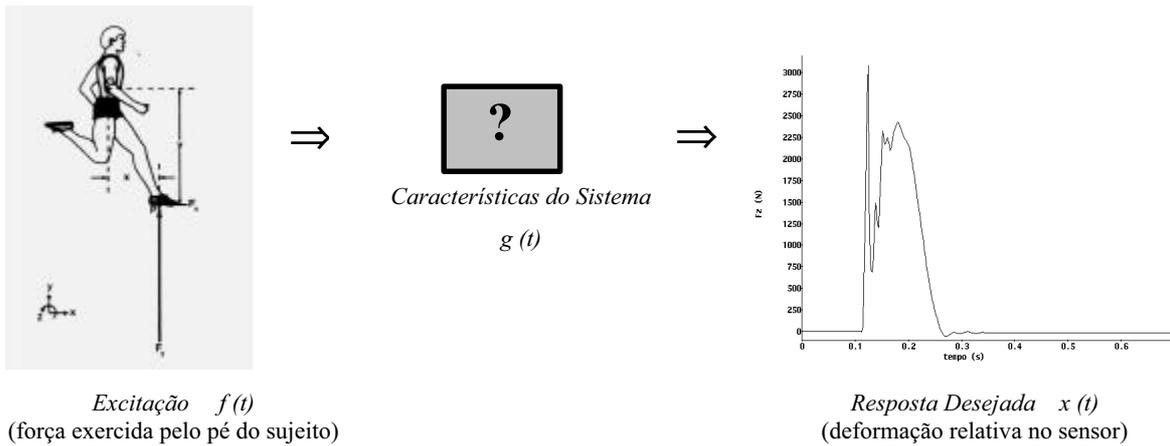


Figura 1. Esquema representativo do problema proposto. Adaptado de Hay (1993)

Em uma plataforma de forças bem projetada, as respostas estruturais desejadas permitem conhecer a distribuição da excitação no tempo, conforme pode ser observado no quadro mais à direita da Fig. (1).

2.1. A função de excitação do sistema

A função de entrada ou excitação do sistema é a composição das forças atuantes na superfície da tábua de impulsão durante a decolagem para o salto. Esta função caracteriza os limites previsíveis de carregamentos aos quais o sistema mecânico estará submetido, caracterizando uma condição de contorno fixa do problema.

Durante a realização da decolagem, a força que atua no corpo humano, além da gravidade, é a força de reação do solo. Conforme Laranja (1997), este vetor de força é tridimensional e para o propósito de análise, é comumente dividido em suas componentes. O vetor força que atua na superfície de contato da plataforma é idêntico ao vetor de força de reação do solo, porém possui sentido contrário, consistindo de uma componente vertical (F_z) adicionada a duas componentes cisalhantes que atuam ao longo da superfície da plataforma. Conforme Gola (1980), estas componentes cisalhantes são usualmente classificadas em componente antero-posterior (F_y) e componente médio-lateral (F_x) (Fig. (2)). De acordo com Nigg (1998), a componente vertical descreve a mudança no impulso do centro de massa (na direção vertical) do sujeito testado e as componentes antero-posterior e médio-lateral correspondem às mudanças nas duas direções horizontais.



Figura 2. Decomposição da força atuante na superfície da plataforma de forças. Adaptado de Silveira Filho (1997)

Em projetos de plataformas de forças, primeiramente é necessário estimar as cargas máximas nas 3 direções ortogonais, bem como determinar a máxima frequência excitada na realização do movimento.

2.1.1. Magnitude das forças de reação do solo durante a decolagem

Hennig (1998), afirma que durante atividades esportivas, os picos de força de reação do solo têm se mostrado variar entre 1 e 12 vezes o peso corporal do indivíduo praticante, com tempos de contato a partir de 100ms até mais de 1s. Conforme Hay (1986), na decolagem para o salto em distância, a componente vertical de força de reação do solo varia de 2 a 12 kN, a componente antero-posterior varia de 0,2 a 8,5 kN e a componente médio-lateral de 0,6 a 3 kN.

Uma vez que diferentes porções superficiais do pé entram em contato com a superfície de apoio, conclui-se que a força não é aplicada em um único ponto da tábua, sendo distribuída sobre toda a região na qual o pé desenvolve contato.

É importante observar que o atleta realiza a atividade calçando um tênis especial equipado com pregos encarregados de promover o agarre na superfície de contato.

2.1.2. Conteúdo de frequências excitadas no movimento de decolagem para o salto em distância

Como a excitação fornecida ao sistema é um impulso, deve-se cuidar para que se tenha um sistema com frequência de ressonância bem maior do que o conteúdo de frequências da excitação. Isto porque, ao objetivar a medição da excitação, o sistema plataforma de forças deve, na medida do possível, transformar em saída o sinal de entrada, com o mínimo de perturbações.

Na pesquisa bibliográfica e consultas técnicas realizadas não foram encontrados registros do conteúdo de frequências presente na excitação exercida quando do movimento de decolagem para o salto em distância. Desta forma, uma tentativa de identificação do referido conteúdo, visando primordialmente a determinação do maior valor de frequência excitado pelo movimento, foi realizada a partir de registros experimentais (Fig. (3)) utilizando uma plataforma de forças comercial da marca AMTI, modelo *OR6-7 1000*.

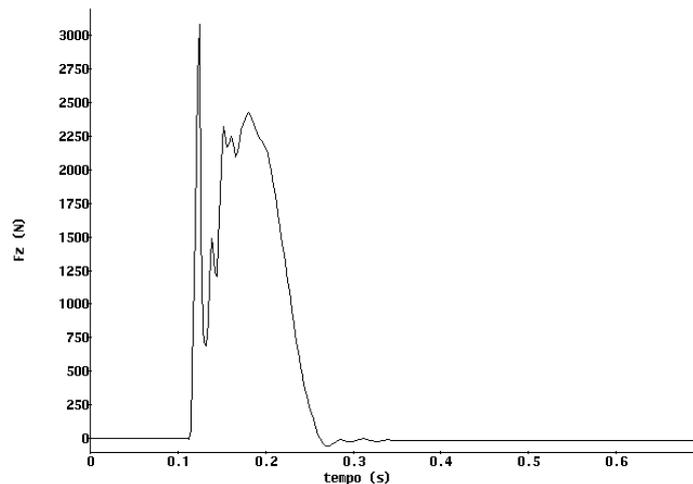


Figura 3. Registro temporal da componente vertical da força excitada na realização de uma decolagem para o salto em distância. O período de duração do fenômeno, ou seja, o tempo decorrido entre o início e o fim do contato pé/plataforma foi de 0,16s.

Sobre o sinal original foi realizada a transformada rápida de Fourier (FFT) com a finalidade de determinar o conteúdo de frequências da excitação. Sendo o sinal transitório, vários tipos de expansões periódicas sobre o sinal original foram realizadas e após transformadas ao domínio frequência via FFT. O fato de que todas as expansões apresentaram representações similares àquela obtida para o sinal original confirma o conteúdo identificado. No tratamento numérico dos dados utilizou-se o software de aquisição e processamento de sinais SAD-2 (1997), desenvolvido no Laboratório de Medições Mecânicas do Depto. de Engenharia Mecânica da UFRGS.

As maiores frequências excitadas pelo movimento foram encontradas na componente vertical da força. Através da utilização de duas abordagens distintas, os mesmos valores para o conteúdo de frequências da excitação foram obtidos, podendo-se afirmar que acima de 200Hz nenhuma componente significativa de frequência é excitada, uma vez que é taxativo o decaimento na magnitude do sinal da transformação a partir de 150Hz

2.2. A função de saída desejada

A função de saída desejada diz respeito à ocorrência de deformações mecânicas relativas em um campo de deformações isolado, e se possível uniforme, na posição onde os extensômetros são colados para medi-las. Os coeficientes de deformação (epsilon) que deverão ser buscados no projeto estão compreendidos entre 100 – 500 .10⁻⁶, pois assim trabalha-se integralmente na região linear do circuito tipo ponte de Wheatstone utilizado, sendo os ruídos atenuados a partir da escolha criteriosa do sistema de condicionamento do sinal, adequado com o fenômeno a ser mensurado. O nível de deformação foi escolhido em prol da rigidez dos membros elásticos do sistema. Com estes níveis, a utilização dos extensômetros também atende aos seguintes limites:

- o limite de linearidade do material;
- o limite de linearidade do sensor utilizado;

Com respeito à compensação de temperatura, conforme Measurements Group, Inc.(1988), cita-se que a ligação em ponte de Wheatstone completa e o uso de extensômetros autocompensados compensa qualquer variação de temperatura. Ainda, sendo o fenômeno a ser mensurado de curta duração, nenhuma mudança de temperatura poderá ocorrer durante o tempo de medição.

3. Características necessárias para o adequado funcionamento do sistema

O funcionamento do sistema é condicionado por seu comportamento estrutural estático e dinâmico quando solicitado por forças externas.

Como uma estrutura, a plataforma de forças é o suporte material para o transporte de forças entre o pé, que exerce a ação sobre sua superfície, e o solo. A superfície de contato aparece como o membro estrutural que suportará diretamente a aplicação de carga à plataforma, sendo assim, mais solicitada por forças externas do que pelas reações do solo que, por sua vez, atuarão mais diretamente nos pontos de fixação da estrutura ao chão. Na aplicação desejada a plataforma deve suportar os esforços induzidos por pessoas de grande massa corporal, geralmente 70 ± 10 Kg, realizando movimentos que envolvem ação explosiva de força muscular sobre sua superfície. Então, a força soma-se o peso corporal do sujeito ao solicitar a plataforma, indicando, a necessidade de uma estrutura com alta resistência mecânica para suportar os esforços induzidos.

Do ponto de vista dinâmico, é necessário que a plataforma seja tão leve quanto possível, e que seus elementos de suporte sejam tão rígidos quanto possível, tal que as frequências naturais da plataforma sejam suficientemente altas, de forma que as medições efetuadas pelos transdutores sigam o mais aproximadamente a distribuição da excitação com o tempo, ou seja, que as forças de inércia geradas sejam desprezíveis. Para garantir que estes requerimentos sejam cumpridos faz-se necessário calcular a função de ganho do sistema representado pela plataforma de forças. A função de ganho relaciona a excitação em um ponto da estrutura e direção determinada, com a resposta em outro ponto da estrutura e outra direção. A Eq. (1) mostra a relação existente entre a função de ganho do sistema, sua excitação e sua resposta.

$$F_i H_{ij} = R_j \quad (1)$$

onde:

F_i representa a excitação no grau de liberdade i , por exemplo, força em um determinado ponto em determinada direção; R_j é a resposta no grau de liberdade j ; por exemplo, deformação em um determinado ponto e determinada direção; H_{ij} é a chamada função de ganho do sistema (quando o sistema é linear), que depende unicamente das propriedades do sistema e representa a resposta do sistema em estudo no grau de liberdade j quando excitado no grau de liberdade i por uma excitação correspondente a um impulso de muito curta duração;

Para o caso da plataforma de forças é desejável projetar o sistema de forma que a excitação esteja inteiramente situada em sua região de ganho unitário, onde $H_{ij}(w)$ é constante. Esta região é denominada zona estática do sistema. Trabalhando-se nesta zona, tem-se que a forma da excitação exercida não é distorcida ao interagir com o sistema, sendo a resposta proporcional à excitação. Disto fica claro que no projeto de um sensor dinâmico, como é o caso da plataforma de forças, esta é a situação procurada. Assim, a curva de fator de ganho da plataforma de forças deve ter frequência fundamental, ou seja, a mais baixa frequência natural, algumas vezes maior que a máxima frequência gerada pela excitação. De acordo com o estudo da excitação específica fornecida à plataforma, estima-se razoável buscar-se uma frequência natural vertical de aproximadamente 500Hz, e o máximo valor possível para as demais direções.

4. O desenvolvimento da plataforma de forças

Inicialmente é apresentado o desenvolvimento da superfície de contato, isoladamente, e após são apresentadas as alternativas desenvolvidas para o transdutor. Por tratar-se de um instrumento dedicado à medição em uma modalidade atlética que apresenta carregamento de alta magnitude, a resistência mecânica necessária para providenciar segurança de utilização implica, inicialmente, em uma estrutura robusta. Então, com vistas ao requisito de alta frequência fundamental, deve-se utilizar apenas a massa indispensável para promover a resistência mecânica que garanta a segurança de utilização do equipamento. A alternativa óbvia foi utilizar metal menos denso que o aço para o transdutor, porém com características de resistência mecânica comprovadas. Mesmo com o módulo de elasticidade significativamente menor do que o aço, a densidade de algumas ligas de alumínio permite trabalhar com mais volume de material na busca de seções com momentos de inércia maiores. Para a superfície de contato foram utilizados materiais que aliam propriedades antagônicas como rigidez e resistência mecânica com pouca massa, ou seja, materiais compostos que atuam sob o princípio da ação combinada.

4.1. A superfície de contato

As premissas básicas adotadas para a superfície de contato da plataforma foram:

- (a) possuir características similares àquelas da tábua de impulsão original, nos seguintes aspectos:
- flexibilidade (sensação ao pisar a superfície da plataforma);
 - atrito superficial similar ao da tábua de impulsão original;

- dimensão transversal 200 +- 2 mm ;
- dimensão longitudinal de 400 mm

- (b) suportar forças verticais até 12KN;
 (c) ter frequência fundamental acima de 500Hz;

A configuração estrutural da superfície de contato caracteriza uma placa sanduíche. Nesta placa há duas lâminas, com 1mm de espessura cada, de tecido de fibras de carbono com 200g/m² e epóxi, orientado nas direções longitudinal e transversal do plano da placa (0 e 90⁰), fazendo o papel de colunas no plano superior (resistência à compressão), e outras duas fazendo o papel de fios no plano inferior (resistência à tração) sendo que, entre elas, é colocado um núcleo, relativamente fraco e bastante leve, que resiste às tensões de cisalhamento. Este miolo, com 8mm de espessura, por efeito de economia de peso, será descontínuo, constituindo a configuração denominada Honeycomb. O material deste miolo é Kevlar 49 com diâmetro de célula igual a 3,2 mm. As faces externas do miolo são cobertas por uma manta de fios de Kevlar, 1mm de espessura. As superfícies superior e inferior mais externas da placa são recobertas ainda por uma lâmina de 3mm de alumínio liga, Al6061T6, com a dupla finalidade de proteger a superfície de contato contra as crivas das sapatilhas dos atletas e auxiliar a fixação da placa ao transdutor metálico. Foi verificada a existência e disponibilidade destas matérias primas. As propriedades mecânicas dos materiais não metálicos utilizados na confecção da placa são apresentadas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades mecânicas encontradas para os materiais não metálicos utilizados na confecção da placa (Fontes: Eurocomposites ¹ -URL <http://www.eurocomposites.com>, Jones ², 1975; Callister ³, 1997 DuPont Kevlar® ⁴)

	Tecido de carbono reforçando matriz epóxi	Manta de Kevlar	Miolo de Kevlar Honeycomb
Ex (Gpa)	206 ²	76 ³	0.138 ¹
Ey (Gpa)	5,17 ²	1.9 (estimado)	0.098 ¹
Ez (Gpa)	5,17 ²	1.9 (estimado)	200 ⁴
Gxy (Gpa)	2,57 ²	5.5 ³	0.028 ⁴
Gxz (Gpa)	-		0.028 ⁴
Gyz (Gpa)	-		13800 ¹
ρ (Kg/m ³)	1380 ²	1450 ³	200 ¹
v _{xy} , v _{yz} , v _{xz}	0.25 ²	0.35 ⁴	0.27, 0.5, 0.5 ¹
Obs:	Simetria quadrada		Isotrópico no plano

Para a união da superfície de contato com o transdutor metálico deve-se dotar esta superfície de inserções metálicas que sirvam como locais de conexão (ver Fig.(4)). A placa composta pode ser confeccionada completamente pelo processo de moldagem e cura a vácuo e, após, serem feitos furos nos locais destinados à referida união. Cada um destes furos, localizados nos quatro cantos da placa, abrigará uma inserção metálica provida de pré-furos necessários para a posterior união ao transdutor. A superfície externa desta inserção deve ser feita rugosa, auxiliando com isso as características de rigidez obtidas na sua colagem à placa composta. Um exemplo de união com colagem largamente utilizado na confecção de estruturas com materiais compostos é apresentado na Fig. (4).

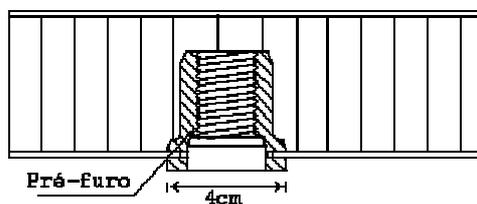


Figura 4. Inserção metálica para a união entre a superfície de contato e o transdutor

A forma geométrica da superfície de contato é retangular, para reproduzir a tábua de impulsão. As dimensões desta placa, no plano horizontal, devem estar de acordo com as dimensões da tábua de impulsão original que será substituída. Assim, a superfície de contato tem 200mm de largura (como a tábua) porém, perpendicularmente à direção de movimento considerou-se razoável prover esta superfície com uma dimensão que sirva apenas como um alvo relativamente fácil para o saltador, escolhida igual a 400mm. Baseando-se na resistência mecânica necessária para suportar o carregamento vertical máximo já registrado na atividade a que a plataforma se destina realizou-se o dimensionamento inicial do componente. A espessura da placa ficou em 20mm, provendo este componente de uma massa de 22,6 Kg /m². Com esta espessura tem-se que a relação entre as duas menores dimensões da placa é 11, próxima do limite de utilização da teoria de placas finas. Para a comprovação do funcionamento da placa composta definida a partir das matérias primas avaliadas fez-se a discretização e análise numérica de seu comportamento.

A placa foi discretizada a partir de seu plano médio com elementos estruturais de placa ortotrópicos de oito nós, com possibilidade de divisão em 16 camadas (shell91 do ANSYS). Este é um elemento finito isoparamétrico quadrático de 8 nós que utiliza a teoria estrutural de placas de Mindlin-Reissner que considera as deformações devidas ao esforço interno de corte surgido com a aplicação de carregamentos externos. Tendo-se gerado a superfície média da placa, subdivide-se esta superfície em 9 áreas através da definição de pontos geométricos nas posições destinadas às inserções, garantindo-se a existência de nós nestes pontos, quando da geração da malha. A malha foi gerada de forma que cada elemento da placa fosse quadrado com, 2cm de lado. Através da definição das constantes reais, a orientação da camada e a espessura de cada uma das camadas constituintes faz-se com que o elemento seja subdividido, internamente, nas várias lâminas do material composto. Para evitar acoplamentos entre esforços cisalhantes e de flexão, faz-se a estrutura de placa simétrica em relação ao plano médio. Visando aproximar apenas o comportamento global da placa, as inserções metálicas utilizadas para fixá-la ao transdutor metálico foram tratadas como pontuais, diferentemente da realidade. Estas restrições subestimadas desfavorecem a resposta da estrutura discretizada. Estaticamente, tem-se que a vizinhança dos pontos de apoio, onde estão localizadas as inserções, fica submetida a altos níveis de tensão, não condizentes com a realidade.

Procedeu-se a análise estática através da aplicação do critério de falhas de Tsai-Wu para materiais compostos. Este critério é macroscópico em natureza, baseado na resistência à tração, compressão e corte das camadas individuais. Uma revisão deste método é encontrada em Reddy e Pandey (1987). As propriedades mecânicas utilizadas na aplicação do critério, para cada camada, são apresentadas na Tab. (2) abaixo.

Tabela 2 – Propriedades de resistência mecânica dos materiais das camadas do composto utilizadas na aplicação do critério de falha. Os valores de compressão são tomados iguais aos respectivos valores de tração. (Fontes: Eurocomposites¹ –URL <http://www.eurocomposites.com>; Jones², 1975; Callister³, 1997, Weingaertner⁴, 1951, DuPont Kevlar®,⁵)

	Al6061T6	Tecido de Carbono	Manta de Kevlar®	Kevlar Honeycomb
X _T (MPa)	310 ⁴	124 ³	138 ⁵	26.6 ¹
X _C (MPa)	310 ⁴	689.4 ³		
Y _T (MPa)	310 ⁴	41.36 ²	30 ⁵	2.7 ¹
Y _C (MPa)	310 ⁴	117.21 ²		
Z _T (MPa)	310 ⁴	20 ³	15 ⁵	13.5 ¹
Z _C (MPa)	310 ⁴			
S _{xy} (MPa)	205 ⁴	68.94 ²	550 ⁵	28 ¹
S _{yz} (MPa)	205 ⁴	620 ³	50 ⁵	28 ¹
S _{xz} (MPa)	205 ⁴	620 ³	50 ⁵	28 ¹

O critério de falha adotado baseia-se no tensor polinomial proposto por Tsai e Tsai e Wu. O carregamento crítico aplicado corresponde a combinação dos valores aproximados das máximas forças já registrados durante a decolagem para o salto em distância, dados por: 10kN aplicados transversalmente, 8,5kN e 5kN aplicados paralelamente à superfície de contato, em sua região central. O resultado do critério de falhas é fornecido através da determinação do valor do critério adotado, ξ_3 no caso de Tsai-Wu, calculado em função das componentes de tensão surgidas com a aplicação do carregamento e dos valores de tensões de ruptura de cada camada. A falha não ocorrerá se $\xi_3 < 1$.

A estrutura discretizada com os carregamentos e condições de contorno pode ser visualizada e os resultados da aplicação do critério de falha, para a camada mais solicitada (camada mais externa inferior) são apresentados na Fig. (5). De acordo com os resultados, a falha não ocorre.

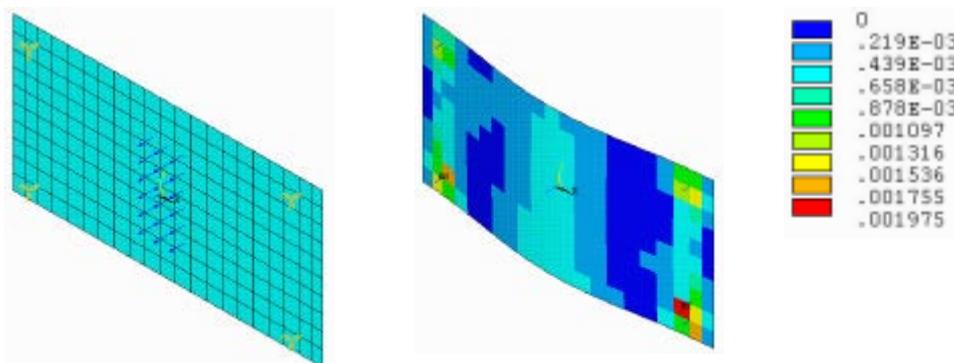


Figura 5. À esquerda, discretização da placa com aplicação do carregamento crítico e restrições (os carregamentos estão aplicados simultaneamente nas três direções ortogonais da placa, em sua região central) À direita, o resultado obtido para o critério de falha utilizado (o valor do critério adotado(ξ_3) é apresentado na legenda).

4.2. O elemento transdutor

As premissas básicas para o transdutor:

- (a) medir forças verticais até 12kN e forças horizontais até 8,5kN
- (b) ter mínima interferência entre eixos; ou seja, as forças detectadas em cada plano devem ser independentes de qualquer outra força ou movimento; de forma a não haver nenhuma interação entre força ao longo de um eixo ortogonal e aquelas de outro;
- (c) ter freqüência fundamental, nas três direções ortogonais, acima de 400Hz;
- (d) estar posicionado sob a superfície de contato;

O elemento transdutor concebido por Lywood (1987), Fig. (6), serviu como ponto de partida para o desenvolvimento do transdutor da plataforma. Esta opção deve-se fundamentalmente ao fato de esta configuração de transdutor poder ser confeccionada em um bloco monolítico, evitando com isso a utilização de uniões mecânicas de qualquer tipo entre seus componentes, as quais, inevitavelmente, acarretam reduções nas capacidades dinâmicas apresentadas. Para sua confecção optou-se pela utilização de liga de alumínio Al6061T6, a qual está de acordo com as considerações para materiais utilizados em transdutores extensométricos, tendo como principais atrativos o fato de possuir alta resistência mecânica aliada a leveza e índice de usinabilidade D, conforme Weingaertner (1990), indicando a ocorrência de cavacos contínuos e acabamento satisfatório. No estudo de viabilidade realizado, o bloco desta liga com as maiores dimensões encontradas mede 31cm x 61cm x 5,7cm, de forma que estas dimensões passaram a representar uma forte limitação dimensional para o desenvolvimento pretendido, pois, em se tratando de confeccionar o transdutor monolítico, uma de suas dimensões está limitada a 57mm.

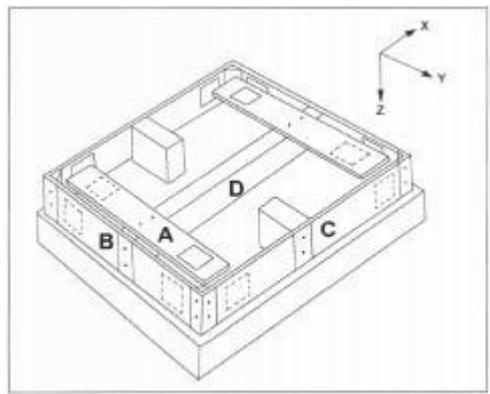


Figura 6. Configuração do transdutor original (y = direção do movimento). Extraído de Roesler (1997).

Seu funcionamento e a posição de colagem para que cada variável seja medida por uma ponte de Wheatstone completa, possibilitando desacoplamento mecânico/elétrico, apresentam-se da seguinte maneira:

→ elementos elásticos *A*- sensor vertical F_z , M_x e M_y : topo da estrutura. Uma carga vertical, idealmente, irá deformar apenas os elementos elásticos *A*, através da flexão transversal destes. Os sensores devem ser colados próximos ao engaste entre o elemento *A* e o elemento *D*.

→ elementos elásticos *B*- sensor horizontal F_x , M_z : lados direito e esquerdo da estrutura. Os lados esquerdo e direito da estrutura-transdutor constituem elementos similares à vigas bi-apoiadas solicitadas na região central. Assim, uma carga horizontal na direção horizontal perpendicular ao movimento é transmitida da superfície de contato aos elementos elásticos *A*, destes ao elemento estrutural *D* que, por sua vez, solicita os elementos elásticos *B* lateralmente, flexionando-os, sendo o ponto de máxima deformação o próprio ponto de aplicação da força. Os sensores devem ser colados próximos ao engaste entre o elemento *B* e o elemento *D*.

→ elementos elásticos *C*- sensor horizontal F_y , M_z : lados anterior e posterior da estrutura. Quando o carregamento é horizontal na direção do movimento, a transmissão de carga ocorre através da superfície de contato, dos elementos elásticos *A*, do elemento *D* e dos elementos elásticos *B*, os quais agora funcionam como elementos rígidos transmitindo os esforços axialmente para os elementos elásticos *C*, que são flexionados lateralmente. Os sensores devem ser colados próximos ao engaste entre o elemento *C* e o suporte que liga a estrutura ao solo.

A distância da posição de colagem dos sensores, a partir dos engastes, deve ser tal que o Princípio de Saint Venant seja respeitado.

Após redimensionada para o presente propósito esta configuração foi discretizada simplificada com elementos de pórtico plano (elemento finito que utiliza a teoria de viga de Timoshenko -Beam4 do ANSYS), de forma que a energia de deformação por corte é considerada. Analisada, tanto estática quanto dinamicamente, esta configuração mostrou-se incapaz de alcançar os requerimentos desejados, principalmente com relação à sua freqüência fundamental, a qual ficou em 125Hz. Partiu-se então para a identificação de seus pontos críticos e posterior alteração em sua topologia. Como principais aspectos negativos foram identificados:

- o tamanho do vão livre a que o elemento central D é submetido, pois, sendo de massa considerável, este elemento fica suscetível à vibrações verticais, indicando a redução do valor de frequência fundamental da estrutura;
- o fato de que os mesmos elementos encarregados do suporte estrutural atuam como elemento de medição, de forma que ao suprir sensibilidade ao instrumento o mesmo torna-se por demais flexível.

A saída encontrada foi então, mantendo os elementos A da configuração original, suprir a parte da configuração original encarregada das medições horizontais com elementos elásticos situados paralelamente aos elementos encarregados dos suporte estrutural da plataforma (ver Figs.(7-11)). Com isso, as funções estrutural e extensométrica foram parcialmente dissociadas. Parcialmente pois, mesmo que de maneira reduzida, os elementos criados para cumprir a função de transdução (elementos com detalhe em vermelho na Fig. (8)) , estando ligados à estrutura suporte, também são solicitados como elementos suporte.

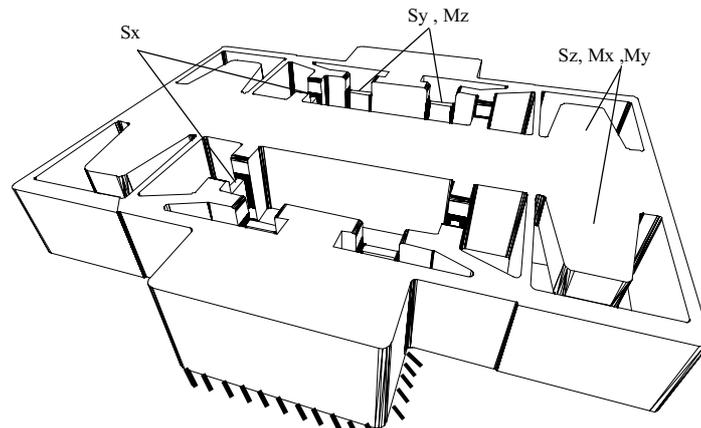


Figura 7. Topologia final encontrada (S_x , S_y e S_z indicam posições de colagens dos sensores de F_x , F_y e F_z . O mesmo princípio é seguido para os momentos)

Estes elementos foram submetidos a um estudo de amplificação da deformação ocorrente nas posições de colagem. Através de uma relação entre momento de inércia e distância entre a linha neutra e a superfície do elemento na seção de colagem, as deformações foram aumentadas em 30%. Com isso, as maiores deformações ocorrentes no transdutor sob carregamentos horizontais passaram a estar localizada exatamente nos locais destinados à colagem dos extensômetros horizontais (ver detalhe em vermelho na Fig. 8).

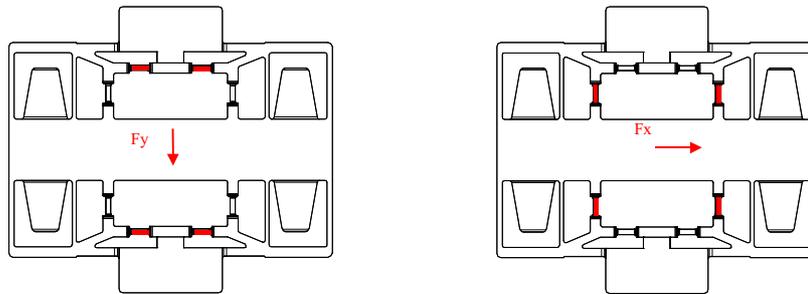


Figura 8. Vista superior da topologia final encontrada para o transdutor e locais onde ocorrem as máximas deformações mecânicas relativas para esforços horizontais

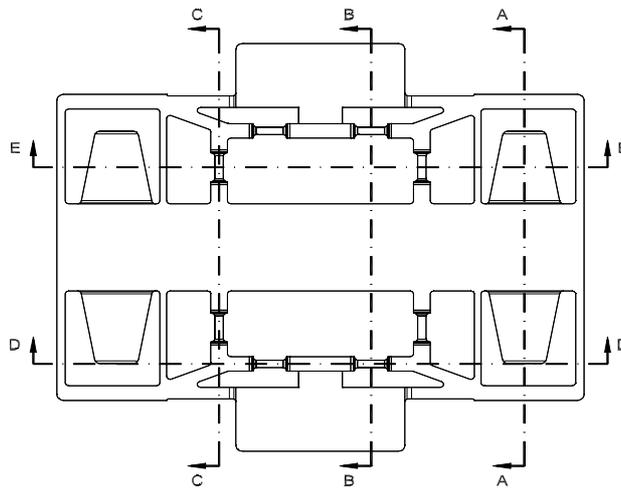


Figura 9. Cortes feitos para apresentação do transdutor da plataforma

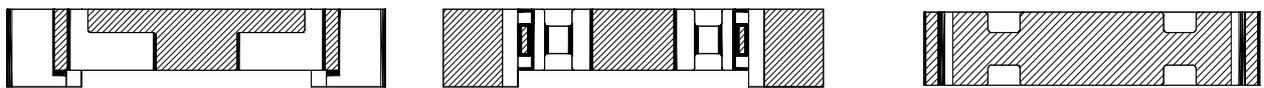


Figura 10. Corte A-A, corte B-B e corte C-C, respectivamente. Vista lateral do transdutor da plataforma

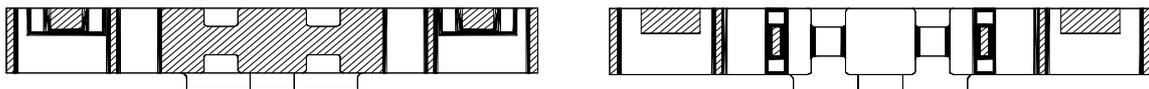


Figura 11. Corte D-D e corte E-E, respectivamente. Vista frontal do transdutor da plataforma

5. Comprovação do funcionamento da plataforma desenvolvida

Para a comprovação do funcionamento foram realizadas análises estruturais estáticas e dinâmicas sobre a plataforma desenvolvida, composta pela união entre a superfície de contato e o transdutor.

A análise estática inicialmente comprovou a resistência mecânica da estrutura, sendo que a seção crítica da estrutura, identificada sua posição ser nos extremos dos novos elementos b e c, apresenta tensão máxima 20% abaixo da tensão tomada como admissível para o material utilizado (tendo sido considerado coeficiente de segurança igual a 1,5). De maneira satisfatória, estas análises revelaram que a direção de menor rigidez da plataforma desenvolvida corresponde à direção de menor carregamento esperado (médio-lateral), sendo seguida pela direção antero-posterior. Após, os níveis de acoplamento ocorrentes para cada direção de solicitação foram avaliados, ficando comprovado o funcionamento da técnica de desacoplamento mecânico/elétrica que consiste em ligar os circuitos tipo ponte de forma que as saídas não desejadas sejam anuladas por não provocarem desbalanço no circuito. Ou seja, os ramos opostos da ponte são submetidos a deformações de igual magnitude e sentidos opostos.

A sensibilidade da plataforma foi avaliada para a direção vertical de carregamento, indicando que, com um condicionador de sinais com sensibilidade de 2,5 μV e fonte alimentadora de 5V poder-se-ia ler 7,3N.

As frequências naturais da plataforma foram determinadas através de sua análise modal, indicando 432Hz como frequência fundamental, na direção X. O segundo e o terceiro modo de vibração foram identificados estarem nas direções Y e Z, respectivamente, com valores de 450Hz e 480Hz. Estes valores foram comprovados através da análise harmônica da plataforma, na qual fez-se a estrutura vibrar harmonicamente em frequências compreendidas entre 0 e 1000Hz, resultando também a determinação da curva de fator de ganho do sistema desenvolvido. Esta análise harmônica foi realizada para cada uma das três direções ortogonais da plataforma, concluindo-se que a faixa de utilização do instrumento é compreendida entre 0-250Hz e, considerando-se que um desvio de 5% de linearidade da função de ganho representa ampliações desprezíveis da resposta dinâmica da estrutura, fenômenos que excitam frequências de até 300Hz podem ser monitorados com o instrumento desenvolvido.

Por fim, realizou-se uma análise transiente da plataforma desenvolvida, na qual, através da aplicação de carregamentos em pontos da superfície de contato da plataforma, foram monitoradas as deformações ocorrentes em cada ponto de medição do transdutor (considerando-se obviamente as direções das grades dos extensômetros responsáveis por cada variável medida). Com isso a faixa de frequências onde o instrumento pode ser utilizado foi

comprovada, uma vez que excitações com frequências de até 250Hz foram aplicadas e as deformações captadas seguiam precisamente a forma da excitação.

5. Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma nova topologia para plataforma de forças de seis componentes. A utilização do princípio extensométrico resistivo permite que a calibração do instrumento seja mantida por longos períodos de tempo, assegura facilidade de condicionamento do sinal e a ocorrência de baixos níveis de perturbações externas à medição, de forma a habilitar a utilização do instrumento em ambiente aberto, como a pista de saltos utilizada em treinamentos atléticos. Sendo que o modelo desenvolvido possui superfície de contato com largura igual a largura da tábua de impulsão utilizada na realização da decolagem para o salto em distância, a substituição da referida tábua pela plataforma é viabilizada. Com relação à similaridade no contato ressalta-se que o procedimento padrão de cobertura de plataformas de força com manta sintética (*tartam*) pode ser utilizado.

O comportamento estrutural estático do modelo desenvolvido assegura sua utilização. Seu comportamento estrutural dinâmico comprova sua capacidade para a medição das variáveis físicas envolvidas na execução do movimento de decolagem para o salto em distância.

A partir da consideração da utilização de matérias primas disponíveis e de aspectos de manufatura na concepção da plataforma desenvolvida tem-se que sua construção é viável. A única restrição diz respeito à necessidade de modelagem e discretização desta nova topologia em 3D, com elementos finitos sólidos, com vistas à comprovação da não ocorrência de flambagem local nos elementos suporte da estrutura (elementos B e C da Fig. (8)), a qual não pode ser identificada através da análise simplificada com elementos de pórtico realizada.

A estimativa de custo, indicando um custo total de R\$ 13.000,00, indica para uma alternativa econômica frente às unidades internacionais comercialmente avaliadas.

6. Referências

- Callister, W., 1997, "Materials Science and Engineering- An Introduction", John Willey & Sons, Inc, 4^a Ed.
 DuPont Advanced Fibers Systems, 2000, "Design and fabrication techniques for Honeycomb", Richmond, USA.
 Gola, M.M., 1980, "Mechanical design , constructional details and calibration of a new force plate", Journal of Biomechanics, vol.13, pp113-128.
 Grabiner , M.K., Garhammer, F.A.C.S.M., 1991, "Cinesiologia e anatomia aplicada", Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, Brasil.
 Hay, G.J., 1993, "Ciltus, altus, longius (faster, higher, longer): the biomechanics of jumping for distance", Journal of Biomechanics, vol.26, suppl.1, pp.7-21.
 Hay, G.J., 1986, "The biomechanics of the long jump", Exercise and Sports Science Reviews, vol.14, pp.401-446.
 Hennig, E.M., 1998. "Measurement and evaluation of loads on the human body during sports activities", Proceedings I of International Society Biomechanics, pp.399-402.
 Jones, R.M., 1975, "Mechanics of composite materials", Scripta Book Company, Washington, D.C.
 Laranja, R.A.C., Bagesteiro, L.B., Tamagna, A., 1997, "Análise numérica e experimental de uma plataforma de forças", Anais Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.
 Lywwod, D.W., Adams, D.J., Eyken, A., Macpherson, J.M., 1987, "Small, triaxial force plate". Medicine & Biology Engineering and Computations, vol.25, pp.698-701.
 Measurements Group, Inc., 1988. "Strain gage based transducers: their design and construction", Raleigh, North Carolina 27611, USA.
 Nigg, B., M., Herzog, W., 1998, "Biomechanics of the musculo-skeletal system", John Wiley & Sons, Canada.
 Reddy, J.N., Pandey, A.K., 1987. "A first ply failure analysis of composite laminates", Computers and Structures, vol.25(3), pp. 371-393
 Riera, J.D., 1996, "Introdução à Análise de Vibrações em Estruturas", Apostila de aula, Laboratório de Dinâmica Estrutural e Confiabilidade, CPGEC, UFRGS.
 Roesler, H., 1997, "Desenvolvimento de plataforma subaquática para medições de forças e momentos nos três eixos coordenados para utilização em biomecânica", Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
 SAD2 VERSÃO 2.5, 1997. "Sistema de aquisição de dados – Manual do usuário", Caderno Técnico da Engenharia Mecânica, DEMEC, UFRGS.
 Silveira Filho, E.D.S., 1997, "Plataformas de força montadas em esteira ergométrica para análise de marcha humana", Dissertação de mestrado submetida para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
 Weingaertner, W.L., Schroeter, R.B., 1951. "Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas", Alcan Alumínio do Brasil, 1^a edição- 1990, São Paulo, Brasil.

A STRAIN-GAUGED FORCE PLATFORM FOR LONG JUMP APPLICATIONS

Carlos Rodrigo de Mello Roesler

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, Fundos. Porto Alegre –RS, Brasil
rroesler@grante.ufsc.br

Ignácio Iturrioz e Milton Antônio Zaro

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, Fundos. Porto Alegre –RS, Brasil
ignacio@mecanica.ufrgs.br e zaro@mecanica.ufrgs.br

Abstract. *A first numerical approximation for design of a strain-gauged force-platform for long jump takeoff applications is presented. The strain gage sensors were strategically placed over a metallic structure that supports a composite material cover for the athlete foot contact. The basic limitations in design are because the loads applied to force platform are dynamic in nature, in a way that the natural frequency must be greater than the excited contents of frequencies. This high frequency requirement lead a light and rigid structure, but the principle of force measurements with strain-gauge-actuated transducers consists of placing a strain-gauge-instrumented elastic member in series with the force to be measured, which must to support elastic deformation. This lead a stiffness reduction of this members. In the other hand, transducer sensitivity is inversely related to stiffness. The developed force-platform is able for measurements of the action force about his contact surface and the respective torque, allowing the three orthogonal forces components determination (F_x , F_y , F_z) and the torque around the three orthogonal axes (M_x , M_y , M_z). According its dimensions, this platform will be able to substitute the authentic wooden board used in long jump training.*

Keywords. *force-platform, biomechanics of sports, long jump, takeoff, strain gage*