

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA PLATAFORMA DE  
FORÇAS EXTENSOMÉTRICA COM APLICAÇÃO ESPECÍFICA NA DECOLAGEM PARA  
O SALTO EM DISTÂNCIA

por

Carlos Rodrigo de Mello Roesler

Dissertação para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 12 de março de 2001

Desenvolvimento teórico e análise numérica de uma plataforma de forças extensométrica  
com aplicação específica na decolagem para o salto em distância

Carlos Rodrigo de Mello Roesler  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao corpo Docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Mecânica dos sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignácio Iturrioz

Coorientador: Prof. Dr. Milton Antônio Zaro

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. Luis Fernando Martins Krueh

Prof. PhD. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Dr. Alberto Tamagna

Prof. Dr. Alberto Tamagna  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 12 de março de 2001

## AGRADECIMENTOS

No desenvolvimento deste trabalho reconheço a importância da troca de idéias com todos os membros do GMAp. Em particular agradeço o humor e a compreensão do Humberto (dentro e fora do laboratório), a paciência do Tiago, a prontidão de conhecimentos do Rato, a serenidade e ampla visão do Jun, o companheirismo do Carlos, o senso crítico do Gertz, a atenção do Carlinhos, a memória do Laranja e a disposição do Lenz. Igualmente importante foi o entusiasmo e credibilidade de meus amigos/irmãos/UFRGS, os Crivellaro, o primo de todos Dudu, Bica, Schneider, Tavares, amenizando quando a pressão tendia para o infinito.

Na base da empreitada do mestrado lembro e agradeço o amigo Hélio, que abriu e continua abrindo portas, a experiência e incentivo, sem precedentes, do Zaro, e a irreverente inteligência e incondicional apoio do Tamagna. Pelo desenrolar da empreitada, meu profundo e respeitoso agradecimento ao Ignácio, que orientou-me com atenção, parcimônia e segurança. Pelas palavras exatas e necessárias, em qualquer momento, agradeço ao Riera.

Pela formação de minha capacidade e coragem e pela possibilidade do estudo ininterrupto, dedico esta realização aos meus pais, Élio e Cliane. Um *valeu* às minhas irmãs que influenciaram e foram influenciadas pelo caminho que escolhi.

Por fim, meu sincero agradecimento à Daisy, que viveu comigo este trabalho, ensinando-me tudo o que nenhuma teoria cobre.

## RESUMO

Na realização de atividades físicas o corpo humano exerce forças contra o solo. Em atividades tais como correr e saltar as forças são exercidas através dos pés. Atualmente, sabe-se que estudos da magnitude e direção destas forças, e das maneiras de suas mudanças no tempo, fornecem valiosas informações sobre a performance alcançada no movimento, podendo indicar medidas corretivas que possam aprimorá-la. Na obtenção destas variáveis determinantes no desempenho do movimento utilizam-se instrumentos denominados plataformas de forças, capazes de medir a força de ação realizada 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 ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) simultaneamente. Este trabalho descreve o desenvolvimento teórico de uma plataforma de forças específica para aplicação na decolagem do salto em distância, bem como as alternativas de projeto geradas neste desenvolvimento. Foram buscadas soluções para a realização dos experimentos sob condições naturais de treinamento, visando a construção do instrumento e sua instalação na pista de saltos atléticos. Para isso é proposta a substituição da tábua de impulsão original pela plataforma de forças desenvolvida. Nas alternativas geradas foi utilizado o princípio extensométrico resistivo de medição de forças, que representa uma diminuição substancial no custo de manufatura estimado frente às unidades comercialmente avaliadas. Nestas alternativas, os sensores resistivos “strain gages” são localizados estrategicamente em estruturas metálicas que sustentam uma tampa de material composto com a função de superfície de contato. Para a análise estrutural das alternativas estudadas foi utilizado o Método dos Elementos Finitos. Para comparar e escolher a melhor entre as diversas alternativas, foram propostos índices de desempenho. Ao final do trabalho são apresentadas conclusões sobre a metodologia empregada no estudo realizado e sobre o novo modelo de plataforma de forças desenvolvido.

## ABSTRACT

In physical activities realization the human body exerts forces against the ground. In activities as running and jumping these forces are exert through the feet. Actually, it is known that magnitude and direction studies of these forces, and the ways they change in time supply valuable information about the performance obtained in movement. This information can indicate corrective measures to improve the movement better. Force platforms are instruments used to obtain this information, able to measure the action force exerted about its contact surface and the respective torque, allowing the determination of three orthogonal forces components ( $F_z$ ,  $F_y$ ,  $F_x$ ) and torque around the three orthogonal axes ( $M_z$ ,  $M_y$ ,  $M_x$ ) simultaneously. This work describes alternative designs created along the development of a specific six components force platform to long jump takeoff movement applications. Solutions for experiments under natural conditions were searched, looking for the construction and installation of this instrument in a athletic jump runway. Hence, the substitution of authentic impulsion wooden board by the developed force platform is proposed. The resistive extensometric force measurement principle is used in the created alternatives, which represents a estimated manufacture cost reduction if compared with available commercial units. In these alternatives the strain gages resistive sensors were strategically placed in metallic structures that support the contact surface, a composite material plate. The Finite Elements Method was used for structural analysis of studied alternatives. Performance indexes were proposed to compare and choose the best among the created alternatives. The conclusions obtained about the employed methodology in developed study and about the new force platform model developed are shown at the end of this work.

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivação do trabalho .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Formulação do problema .....	2
1.4	Metodologia empregada.....	3
1.5	Estrutura do trabalho .....	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>7</b>
2.1	O movimento em estudo: a decolagem do salto em distância .....	7
2.2	A utilização de plataformas de força em estudos do salto em distância .....	10
2.3	A utilização de sensores extensométricos resistivos com capacidade de medição de três componentes de força e três momentos.....	14
2.4	Histórico do projeto de plataformas de forças utilizadas em biomecânica.....	14
2.5	Estado da arte em projeto de plataformas de forças com princípio extensométrico .....	15
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>42</b>
3.1	Caracterização do problema.....	42
3.2	A função de excitação do sistema -.....	43
3.2.1	Magnitude das forças de reação do solo durante a decolagem .....	44
3.2.2	Espectro de frequências presentes no movimento .....	44
3.2.2.1	Identificação do conteúdo de frequências presentes na excitação do sistema .....	45
3.3	A função de saída desejada .....	48
3.4	Características necessárias para o adequado funcionamento do sistema.....	50
3.4.1	Características estáticas.....	50
3.4.2	Características dinâmicas .....	50
3.5	Ferramentas utilizadas na solução do problema .....	53
3.5.1	Índices de desempenho .....	54
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇAS EXTENSOMÉTRICA UTILIZANDO SENSORES RESISTIVOS</b> .....	<b>55</b>
4.1	Considerações básicas de projeto de plataformas de forças .....	55
4.2	A viabilidade de utilização de princípio extensométrico resistivo .....	56
4.3	A viabilidade econômica.....	57
4.4	Discussão sobre possíveis soluções .....	59
4.5	Formulação de linhas de projeto de plataformas de forças .....	61

<b>5</b>	<b>ALTERNATIVAS GERADAS NO PROCESSO DE SOLUÇÃO .....</b>	<b>64</b>
5.1	Desenvolvimento da superfície de contato .....	64
5.1.1	Escolha dos materiais e da forma geométrica para a superfície de contato .....	64
5.1.2	Discretização da superfície de contato .....	67
5.1.2.1	Simplificações utilizadas no método numérico .....	68
5.1.3	Análise estática .....	69
5.1.4	Cálculo das propriedades dinâmicas da superfície de contato (frequências naturais e modos de vibração) .....	72
5.1.5	Crítica da superfície de contato desenvolvida.....	74
5.2	Desenvolvimento do transdutor .....	74
5.2.1	Premissas básicas para o transdutor .....	74
5.2.2	Escolha do material para o elemento transdutor .....	75
5.2.3	Escolha da forma geométrica do transdutor.....	76
5.2.4	Adaptação da configuração original da estrutura- transdutor aos novos propósitos.....	80
5.2.5	Discretização da nova estrutura-transdutor.....	83
5.2.6	Identificação de pontos passíveis de alteração na estrutura-transdutor .....	84
5.2.6.1	Avaliação da seção transversal do elemento central $D$ .....	87
5.2.6.2	Avaliação da dimensão longitudinal do elemento de fixação ao solo.....	89
5.2.7	A composição da solução inicial.....	90
5.2.8	Crítica da solução inicial.....	93
5.2.9	Alternativas de transdutor derivadas da configuração inicial .....	94
<b>6</b>	<b>A SOLUÇÃO FINAL ENCONTRADA .....</b>	<b>99</b>
6.1	Análise estrutural estática: .....	104
6.2	Cálculo das propriedades dinâmicas da plataforma de forças (frequências naturais e modos de vibração) .....	109
6.3	Análise harmônica.....	113
6.4	Análise transiente .....	117
6.5	Crítica do projeto .....	122
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>124</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>126</b>
<b>9</b>	<b>APÊNDICE I .....</b>	<b>130</b>
9.1	Análise estrutural estática- .....	130
9.2	Cálculo das propriedades dinâmicas da estrutura .....	130

9.3	Resposta em frequência: análise harmônica .....	131
9.4	Análise transiente .....	132
9.5	Superposição Modal: cálculo dos coeficientes de participação modal e dos coeficientes modais .....	132
<b>10</b>	<b>APÊNDICE II.....</b>	<b>134</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS

- A Área da seção transversal [ $m^2$ ];
- A/D Placa conversora analógico/digital;
- c Distância entre a linha média e as fibras mais externas de uma viga estrutural;
- [C] Matriz de amortecimento estrutural;
- CM Centro de massa;
- CP Centro de pressão;
- E Módulo de elasticidade longitudinal [ $N/m^2$ ];
- Ex Módulo de elasticidade longitudinal na direção X [ $N/m^2$ ];
- Ey Módulo de elasticidade longitudinal na direção Y [ $N/m^2$ ];
- Ez Módulo de elasticidade longitudinal na direção Z [ $N/m^2$ ];
- {f} Vetor de forças;
- $f_i$  Frequências naturais [Hz];
- f(t) Função de excitação do sistema;
- {F<sup>a</sup>} Vetor de cargas aplicadas;
- $F_i$  Função de excitação no grau de liberdade i;
- Fz Componente vertical da força de ação exercida sobre a superfície da plataforma [N];
- Fy Componente horizontal da força de ação, na direção do movimento, exercida sobre a superfície da plataforma [N];
- Fx Componente vertical da força de ação, na direção perpendicular ao movimento, exercida sobre a superfície da plataforma [N];
- G Módulo de elasticidade transversal [ $N/m^2$ ]
- g(t) Função representativa do comportamento do sistema;
- Gxy Módulo de corte no plano XY [ $N/m^2$ ];
- Gxz Módulo de corte no plano XZ [ $N/m^2$ ];
- Gyz Módulo de corte no plano YZ [ $N/m^2$ ];
- $H_{ij}$  Função de ganho do sistema;
- I Momento de inércia [ $m^4$ ];
- [K] Matriz de rigidez global;
- [M] Matriz de massa;
- Mf Momento fletor [Nm];
- Mz Momento de força em torno do eixo vertical (Z) da plataforma [Nm];

$M_y$	Momento de força em torno do eixo horizontal (Y) da plataforma [Nm];
$M_x$	Momento de força em torno do eixo horizontal (X) da plataforma [Nm];
$P$	Carga concentrada aplicada [N];
$R_j$	Resposta no grau de liberdade j
$S_x$	Extensômetros encarregados de medir o esforço horizontal $F_x$ ;
$S_y$	Extensômetros encarregados de medir o esforço horizontal $F_y$ ;
$S_z$	Extensômetros encarregados de medir o esforço horizontal $F_z$ ;
$S_{mx}$	Extensômetros encarregados de medir o momento em torno do eixo horizontal X;
$S_{my}$	Extensômetros encarregados de medir o momento em torno do eixo horizontal Y;
$S_{mz}$	Extensômetros encarregados de medir o momento em torno do eixo vertical Z;
$S_{xy}$	Tensão de resistência ao corte da lâmina no plano XY [ $N/m^2$ ];
$S_{yz}$	Tensão de resistência ao corte da lâmina no plano YZ [ $N/m^2$ ];
$S_{xz}$	Tensão de resistência ao corte da lâmina no plano XZ [ $N/m^2$ ];
$t$	Tempo [s];
$t^*$	Tempo médio de carregamento [s];
$T$	Período de oscilação na frequência fundamental [s];
$\{u\}$	Vetor de deslocamentos nodais;
$\{ú\}$	Vetor de velocidade nodal;
$\{ü\}$	Vetor de aceleração nodal;
$x(t)$	Função de saída do sistema;
$X$	Eixo horizontal da plataforma perpendicular à direção do movimento;
$X_c$	Tensão compressiva de ruptura da lâmina na direção X [ $N/m^2$ ];
$X_t$	Tensão de ruptura à tração da lâmina na direção X [ $N/m^2$ ];
$Y$	Eixo horizontal da plataforma paralelo à direção do movimento;
$Y_c$	Tensão compressiva de ruptura da lâmina na direção Y [ $N/m^2$ ];
$Y_t$	Tensão de ruptura à tração da lâmina na direção Y [ $N/m^2$ ];
$Z$	Eixo vertical da plataforma;
$Z_c$	Tensão compressiva de ruptura da lâmina na direção Z [ $N/m^2$ ];
$Z_t$	Tensão de ruptura à tração da lâmina na direção Z [ $N/m^2$ ];
$\rho$	Densidade [ $Kg/m^3$ ];
$\gamma$	Coefficiente de participação modal;
$\nu$	Coefficiente de Poisson;
$\zeta$	Valor do critério de falha de Tsai-Wu para materiais compostos;
$\epsilon$	Deformação mecânica relativa [ $\mu m/m$ ];

- $\sigma_t$  Tensão de resistência à tração [ $\text{N/m}^2$ ];
- $\sigma_e$  Tensão de escoamento [ $\text{N/m}^2$ ];
- $\sigma_c$  Tensão de resistência ao cisalhamento [ $\text{N/m}^2$ ];
- $\sigma_r$  Tensão de ruptura [ $\text{N/m}^2$ ];
- $\Delta t$  Intervalo de integração [s];
- $\phi_i$  Autovetor do modo  $i$ ;
- $\omega_i$  Frequência natural circular do modo  $i$ ;

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Esquema representativo do problema proposto. Adaptado de Hay, 1993.....	3
Figura 2.1 – Parte final da pista de saltos da SOGIPA mostrando a tábua de impulsão e a caixa de areia .....	7
Figura 2.2 – Tábua de impulsão e camada de massa (Fonte: Regras Oficiais de Atletismo – CBAAt) .....	8
Figura 2.3 – Forma típica das curvas força vs tempo referentes às componentes de força vertical e antero-posterior presentes na decolagem do salto em distância. Extraído de Bosco, 1976. ....	11
Figura 2.4 – Formas características das curvas força vs tempo registradas por plataforma de forças na decolagem de um salto em distância. Extraído de Hay, 1986 .....	13
Figura 2.5 – Versão da plataforma de forças de Cunningham e Brown feita por Paul em 1967. Extraída de Gola, 1980.....	16
Figura 2.6- Esquema da transmissão de cargas verticais .....	17
Figura 2.7- Esquema da transmissão de cargas horizontais .....	17
Figura 2.8– Plataforma de forças de Whitney. Extraído de Ramey, 1973 .....	20
Figura 2.9 – Esquema da transmissão de cargas verticais.....	21
Figura 2.10 – Esquema da transmissão de cargas horizontais. ....	21
Figura 2.11– Plataforma de forças de Carlsöö. Extraído de Carlsöö, 1962 .....	23
Figura 2.12 – Esquema da transmissão de cargas verticais.....	24
Figura 2.13 – Esquema da transmissão de cargas horizontais .....	24
Figura 2.14 – Plataforma de força de Petersen. Extraído de Petersen, 1965 .....	25
Figura 2.15 – Esquema da transmissão de cargas verticais.....	26
Figura 2.16 – Esquema da transmissão de cargas horizontais .....	26
Figura 2.17 – Plataforma de forças de Ramey. Extraído de Ramey, 1973 .....	27
Figura 2.18 – Esquema da transmissão de cargas horizontais .....	28
Figura 2.19 – Esquema da transmissão de cargas horizontais .....	28
Figura 2.20 – Plataforma de força de O’Leary. Extraído de O’Leary,1970 .....	29
Figura 2.21 – Plataforma de força de Bonde-Petersen. Extraído de Bonde-Petersen, 1975 .....	30
Figura 2.22 – Plataforma de força de Lywood et al. Extraído de Roesler, 1997 .....	30
Figura 2.23 – Esquema da transmissão de cargas verticais.....	31
Figura 2.24 – Esquema da transmissão de cargas horizontais .....	32
Figura 2.25 – Plataforma de forças de Hull, Brewer e Hawkins. No detalhe o modelo de célula de	

carga utilizado. ....	33
Figura 2.26 – Plataforma de forças de Paul, 1967 e McLeish, 1972. Extraída de Gola, 1980 .....	35
Figura 2.27 – Plataforma de forças de Gola. Extraída de Gola, 1980.....	35
Figura 2.28 – Plataforma de forças de Bagesteiro, 1996. Extraído de Roesler, 1997.....	37
Figura 2.29 – Plataforma de forças de Roesler durante processo de calibração. Extraído de Roesler, 1997.....	39
Figura 3.1 – Decomposição da força atuante na superfície da plataforma de forças. Adaptado de Silveira Filho, 1997 .....	43
Figura 3.2 – Sapatilha com crivas utilizada em saltos atléticos .....	44
Figura 3.3 – Plataforma de forças extensométrica utilizada .....	45
Figura 3.4 – Representação temporal da três componentes de força, $F_z$ , $F_y$ e $F_x$ , respectivamente.....	46
Figura 3.5 – Sinal $F_z$ concatenado com sua forma inversa e expandido periodicamente e resultado da transformação FFT, respectivamente. (a componente de frequência de aproximadamente 3 Hz, correspondente ao sinal gerado, foi excluída do resultado apresentado para a transformação FFT) .....	47
Figura 3.6 – Sinal $F_z$ expandido periodicamente e transformação FFT, respectivamente. (a componente de frequência de aproximadamente 0,7 Hz, correspondente ao sinal gerado, foi excluída do resultado apresentado para a transformação FFT).....	48
Figura 3.7- Representação esquemática do princípio de funcionamento de transdutores instrumentados com extensômetros de resistência elétrica. Extraído de Todeschini, 1999..	49
Figura 3.8 – Representação esquemática da função de ganho do sistema .....	51
Figura 3.9 – Funcionamento desejado para a plataforma de forças. O gráfico mais à direita da figura representa a resposta pseudo-estática do sistema, sem distorção .....	52
Figura 3.10 – Situação não desejada para a plataforma de forças. O gráfico mais à direita representa a distorção da resposta fornecida pelo sistema ao ser solicitado por excitação com frequência próxima de uma das suas frequências ressonantes .....	52
Figura 4.1 – Representação esquemática da linha de projeto 1 .....	61
Figura 4.2 – Representação esquemática da linha de projeto 2 .....	62
Figura 5.1 – Tecido de fibra de carbono e parte interna do miolo estrutural (Honeycomb sem manta) para confecção da superfície de contato.....	65
Figura 5.2 – Inserção metálica para a união entre a superfície de contato e o transdutor.....	66
Figura 5.3 – Localização dos pontos destinados aos insertos metálicos da superfície de contato. Cotas em centímetros. ....	67

Figura 5.4 – Vista das camadas internas e respectivos materiais que compõem cada elemento utilizado na discretização da placa composta.....	68
Figura 5.5 – Discretização da placa com aplicação do carregamento crítico e restrições. Os carregamentos estão aplicados simultaneamente nas três direções ortogonais da placa, na região central da placa. A visualização mostra uma representação equivalente destas três componentes.....	70
Figura 5.6 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.....	70
Figura 5.7 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.....	71
Figura 5.8 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.....	71
Figura 5.9 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.....	72
Figura 5.10 – Primeira forma modal ( $f_1 = 606,16$ ). Modo de flexão transversal em torno do eixo Y .....	73
Figura 5.11 – Segunda forma modal ( $f_2 = 1077$ ). Modo de flexão em torno do eixo Y e torção em torno do eixo X.....	73
Figura 5.12 – Terceira forma modal ( $f_3 = 1816,6$ ). Modo de flexão em torno do eixo longitudinal X e dupla flexão em torno do eixo transversal Y .....	73
Figura 5.13 – A configuração do transdutor original (y = direção do movimento). Extraído de Roesler, 1998.....	77
Figura 5.14 – Posição dos extensômetros e circuito tipo ponte de Wheatstone para carga vertical $F_z$ .....	78
Figura 5.15 – Posição dos extensômetros e circuitos tipo ponte de Wheatstone para medição das forças horizontais .....	79
Figura 5.16 – Posição de colagem para os extensômetros encarregados da medição de $M_z$ , e correspondente montagem do circuito tipo ponte de Wheatstone.....	80
Figura 5.17 – Posição de colagem para os extensômetros encarregados da medição de $M_x$ e $M_y$ , e correspondentes montagens dos circuitos tipo ponte de Wheatstone.....	80
Figura 5.18 – Resultado da análise dedicada do membro estrutural A .....	83
Figura 5.19 – Discretização da nova estrutura-transdutor.....	84
Figura 5.20 – Formas deformadas resultantes da aplicação de $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ respectivamente. As três primeiras formas modais encontradas para esta nova estrutura-transdutor são	

coincidentes, respectivamente, à estas três formas deformadas.....	85
Figura 5.21 – Vista superior da deformação ocasionada pela aplicação de carregamento horizontal $F_x$ .....	85
Figura 5.22 – Vista superior da deformação ocasionada pela aplicação de carregamento horizontal $F_y$ . .....	86
Figura 5.23 – Aplicação de carregamento vertical: deslocamento vertical do elemento central e consequentemente giro induzido nos elementos laterais $B$ .....	86
Figura 5.24 – Formas geométricas da seção transversal do elemento central $D$ utilizadas na avaliação realizada .....	88
Figura 5.25 – Seção transversal vs deslocamento vertical .....	88
Figura 5.26 – Seção transversal vs deslocamento horizontal $Y$ .....	88
Figura 5.27 – Seção transversal vs deslocamento vertical .....	89
Figura 5.28 – Geometria deformada e deslocamento máximo igual a $0,933e^{-4}m$ para carregamentos direcional mínimo $F_x$ .....	91
Figura 5.29 – Geometria deformada e deslocamento máximo igual a $0,457e^{-4}m$ para carregamentos direcional mínimo $F_y$ .....	91
Figura 5.30 – Geometria deformada e deslocamento máximo igual a $0,180e^{-3}m$ para carregamentos direcional mínimo $F_z$ .....	91
Figura 5.31 – Primeira forma modal. Modo de translação horizontal na direção perpendicular à direção do movimento, $f_1 = 124,4$ Hz;.....	92
Figura 5.32 – Segunda forma modal. Modo de translação horizontal na direção paralela à direção do movimento, $f_2 = 293,3$ Hz; .....	92
Figura 5.33 – Terceira forma modal. Modo de flexão vertical; $f_3 = 354$ Hz .....	92
Figura 5.34 – Discretização da configuração estrutural do transdutor alterado 1. Reforço a $45^\circ$ .	94
Figura 5.35 – Transdutor alterado 2 .....	95
Figura 5.36 – Transdutor alterado 3 .....	96
Figura 5.37 – Transdutor alterado 4 .....	97
Figura 6.1 – Discretização do transdutor da solução final .....	99
Figura 6.2 – Discretização da solução final .....	99
Figura 6.3 – Apresentação do modelo final de transdutor da plataforma desenvolvido.....	102
Figura 6.4 – Cortes feitos para apresentação da plataforma .....	102
Figura 6.5 – Corte A-A. Vista lateral da plataforma.....	103
Figura 6.6 – Corte B-B. Vista lateral da plataforma .....	103
Figura 6.7 – Corte C-C. Vista lateral da plataforma .....	103

Figura 6.8 – Corte D-D. Vista frontal da plataforma .....	103
Figura 6.9 – Corte E-E. Vista frontal da plataforma .....	103
Figura 6.10 – Representação esquemática da localização dos extensômetros (em vermelho) para solicitações horizontais .....	104
Figura 6.11 – Formas deformadas da plataforma sob carregamento $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ , respectivamente .....	105
Figura 6.12 –Aplicação de carregamento nas direções horizontais $F_x$ e $F_y$ , respectivamente, e identificação das posições onde ocorrem as máximas deformações mecânicas relativas para cada direção horizontal.....	105
Figura 6.13 – Identificação da seção crítica do transdutor.....	106
Figura 6.14 – Primeira forma modal; $f_1 = 432$ Hz. Modo horizontal na direção X.....	109
Figura 6.15 – Segunda forma modal $f_2 = 470$ Hz. Modo horizontal na direção Y.....	109
Figura 6.16 – Terceira forma modal $f_3 = 480$ Hz. Modo vertical, direção Z.....	110
Figura 6.17 – Contribuição fornecida ao deslocamento na direção X pelos primeiros três modos excitados.....	110
Figura 6.18 – Contribuição fornecida ao deslocamento na direção Y pelos primeiros três modos excitados.....	111
Figura 6.19 – Contribuição fornecida ao deslocamento na direção Z pelos primeiros três modos excitados.....	111
Figura 6.20 – Coeficiente de participação modal apresentado pela quarta forma modal com relação a cada uma das três direções ortogonais da plataforma (direção 1= direção X, direção 2= direção Y, direção 3= direção Z).....	112
Figura 6.21 –Valor do coeficiente modal correspondente às posições ocupadas pelos extensômetros $S_x$ . Deslocamento tomado na direção que produz a deformação mecânica relativa na direção da grade do extensômetro (direção X global e $u_x$ local). .....	112
Figura 6.22 –Valor do coeficiente modal correspondente às posições ocupadas pelos extensômetros $S_y$ . Deslocamento tomado na direção que produz a deformação mecânica relativa na direção da grade do extensômetro (direção Y global e $u_y$ local). .....	113
Figura 6.23 –Valor do coeficiente modal correspondente às posições ocupadas pelos extensômetros $S_z$ . Deslocamento tomado na direção que produz a deformação mecânica relativa na direção da grade do extensômetro (direção Z global e $u_z$ local). .....	113
Figura 6.24 – Resposta em frequência tomada em um dos nós do elemento (nó 1795) que abriga um sensor ( $S_z$ ) encarregado da medição da força vertical. (deslocamentos em metros e frequências em Hz).....	114



Figura 6.25 – Resposta em frequência tomada em um dos nós do elemento (nó 1403) que abriga um sensor (Sy) encarregado da medição da força horizontal $F_y$ (deslocamentos em metros e frequências em Hz).....	115
Figura 6.26 – Resposta em frequência tomada em um dos nós do elemento (nó 1303) que abriga um sensor (Sx) encarregado da medição da força horizontal $F_x$ (deslocamentos em metros e frequências em Hz).....	116
Figura 6.27 – Linearização do registro da força vertical exercida na decolagem para o salto em distância.....	117
Figura 6.28 – Deslocamento vertical na posição de um dos sensores Sz resultante da aplicação de carregamento vertical no nó central da superfície de contato da plataforma de forças (deslocamentos em metros e tempo em décimos de segundo).....	118
Figura 6.29 – Posições da aplicação das cargas verticais sobre a plataforma de forças .....	118
Figura 6.30 – Deslocamento vertical (na posição de um dos sensores Sz) resultante da primeira parcela da aplicação de carregamento vertical sobre a superfície de contato da plataforma de forças em uma área anterior à linha que corta transversalmente esta superfície através de seu centro geométrico (deslocamentos em metros e tempo em décimos de segundo).....	119
Figura 6.31 – Deslocamento vertical (na posição de um dos sensores Sz) resultante da primeira parcela da aplicação de carregamento vertical sobre a superfície de contato da plataforma de forças em uma área posterior à linha que corta transversalmente esta superfície através de seu centro geométrico (deslocamentos em metros e tempo em décimos de segundo). .....	120
Figura 6.32 – Deformação ocorrida em um dos sensores Sz quando da aplicação de carregamento simultâneo (deformações em $\mu\text{m}/\text{m}$ e tempo em décimos de segundo).....	121
Figura 6.33 – Deformação ocorrida em um dos sensores Sy quando da aplicação de carregamento simultâneo (deformações em $\mu\text{m}/\text{m}$ e tempo em décimos de segundo).....	121
Figura 6.34 – Deformação ocorrida em um dos sensores Sx quando da aplicação de carregamento simultâneo (deformações em $\mu\text{m}/\text{m}$ e tempo em décimos de segundo).....	122
Figura 10.35 – Estrutura genérica sob sollicitação.....	134
Figura 10.36 – Região estática ( zona de trabalho).....	135

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Forças de reação do solo- adaptado de Hay, 1986.....	12
Tabela 3.1 - Valores da componente vertical de força do salto amostrado.....	46
Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas encontradas para os materiais utilizados na confecção da placa (Fontes: Eurocomposites <sup>1</sup> –URL <a href="http://www.eurocomposites.com">http://www.eurocomposites.com</a> , Jones <sup>2</sup> , 1975; Callister <sup>3</sup> , 1997 DuPont Kevlar® <sup>4</sup> ).....	65
Tabela 5.2 – Propriedades de resistência mecânica dos materiais das camadas do composto utilizadas na aplicação do critério de falha. Os valores de compressão não fornecidos são tomados iguais aos respectivos valores de tração. (Fontes: Eurocomposites <sup>1</sup> –URL <a href="http://www.eurocomposites.com">http://www.eurocomposites.com</a> , Jones <sup>2</sup> , 1975; Callister <sup>3</sup> , 1997, Weingaertner <sup>4</sup> , 1951, DuPont Kevlar®, <sup>5</sup> ).....	69
Tabela 5.3 – Valores das frequências naturais encontradas na discretizações realizadas, indicadas por D1 (elementos com 2cm de lado), D2 (elementos com 1cm de lado) e D3 (elementos com 0,5cm de lado). .....	72
Tabela 5.4 – Propriedades Físicas Típicas do Al6061-T6 (Fonte Weingaertner, 1951).....	75
Tabela 5.5 – Propriedades Mecânicas Típicas do Al6061-T6* (Fonte Weingaertner, 1951).....	76
Tabela 5.6 – Valores dos momentos de inércia e área das seções utilizadas na comparação .....	87
Tabela 5.7 – Comprimento da fixação ao solo vs frequência de vibração .....	89
Tabela 6.1 – Verificação do acoplamento mecânico da configuração final.....	107
Tabela 6.2 – Distribuição das cargas no tempo utilizada na análise transiente simultânea .....	120

## 1 INTRODUÇÃO

Uma plataforma de força é um instrumento projetado para medir as forças exercidas por um corpo em uma superfície externa, a superfície de contato. Em plataformas de forças que utilizam princípio extensométrico resistivo de medição de forças, o sistema plataforma de forças inclui, de modo geral, os transdutores, os amplificadores, e o equipamento de aquisição dos sinais gerados. O transdutor converte uma grandeza mecânica (força) em outra forma mensurável (elétrica). O sinal gerado pelo transdutor quando a estrutura da plataforma de forças é solicitada por algum carregamento deve ser processado através de um condicionador de sinais e transformado por um conversor analógico/digital (A/D) em um sinal digital para sua aquisição e processamento.

Plataformas de força ou dinamométricas são comumente utilizadas em laboratórios de biomecânica para medir as forças de reação do solo envolvidas no movimento humano ou animal. Em um modelo de corpos rígidos, as forças de reação do solo medidas por plataformas de forças refletem acelerações do centro de massa do indivíduo. Em muitos aspectos, esteja-se lidando diretamente com células ou sistemas complexos como o homem em movimento, um importante objetivo em biomecânica do esporte é a melhora do desempenho. Segundo Grabiner e Garhammer, 1991, esta melhora, seja a de um atleta de elite ou de um indivíduo recuperando-se de alguma lesão traumática, pode ser alcançada pelo menos de três maneiras:

1. melhorando o indivíduo - por exemplo, aumentando a função e interação musculares;
2. aprimorando equipamentos utilizados na execução - por exemplo, modificando a roupa protetora para esportes de contato;
3. melhorando a execução da tarefa - por exemplo para atender melhor às limitações fisiológicas ou estruturais do indivíduo;

*A melhora de qualquer um ou de todos os fatores acima ocorre como uma função de algum tipo de análise após algum tipo de medição.*

### 1.1 Motivação do trabalho

Conforme Dyatchkov, 1968, “a utilização de uma plataforma de forças como instrumento de medição em atividades atléticas auxilia o treinador na identificação de falhas, indicando o caminho para o desenvolvimento de novas maneiras de realizar o evento”. Isto permite que o treinador oriente o atleta na melhora da execução da tarefa, acarretando a desejada melhora do desempenho. Particularmente em pesquisas do salto em distância, não existem registros de

plataformas de forças projetadas para substituir a tábua de impulsão utilizada nos treinamentos, como a que se deseja desenvolver. Desta forma, os experimentos vêm sendo realizados em condições diferentes da situação normal de treinamento, utilizando-se plataformas convencionais. Porém, apesar de unidades completas de plataformas poderem ser encomendadas comercialmente, de acordo com as necessidades específicas da atividade em estudo, o custo para pequenos clubes é proibitivo, uma vez que apenas empresas do mercado exterior fabricam este tipo de equipamento. Assim, tem-se que o estudo e a geração de alternativas mais econômicas para o projeto de unidades específicas do referido instrumento de medição apresenta-se como um atraente objeto de pesquisa.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo maior a geração e desenvolvimento teórico de uma alternativa viável para o projeto de uma plataforma de forças extensométrica com aplicação específica na medição das forças de contato presentes na realização da decolagem do salto em distância. A diminuição do custo deste instrumento e a aplicação de tecnologia nacional em seu desenvolvimento norteiam este objetivo.

Para que o objetivo principal seja alcançado, diversas etapas deverão ser cumpridas, cada qual visando a obtenção de fundamentos teórico-práticos capazes de conduzir à uma solução adequada para o problema proposto. Estes fundamentos constituem os objetivos particulares do trabalho, quais sejam:

- fazer uma revisão das diferentes topologias estruturais de plataformas de forças;
- fazer uma análise crítica das topologias estruturais consideradas mais representativas;
- compreender os processos de medição de força utilizando princípio extensométrico resistivo;
- aplicar o método dos Elementos Finitos como ferramenta na análise de plataformas de forças;

## 1.3 Formulação do problema

No presente desenvolvimento teórico 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 mecânica relativa, dentro de valores limites pré-estabelecidos, na posição de colagem dos sensores extensométricos.

Um problema no qual são conhecidas as características da função de excitação  $[f(t)]$  e, além disso, deseja-se saídas pré-estabelecidas  $[x(t)]$ , com valores compreendidos dentro de limites admissíveis, pode ser classificado como problema de síntese (Riera, 1996). 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 (figura 1.1).

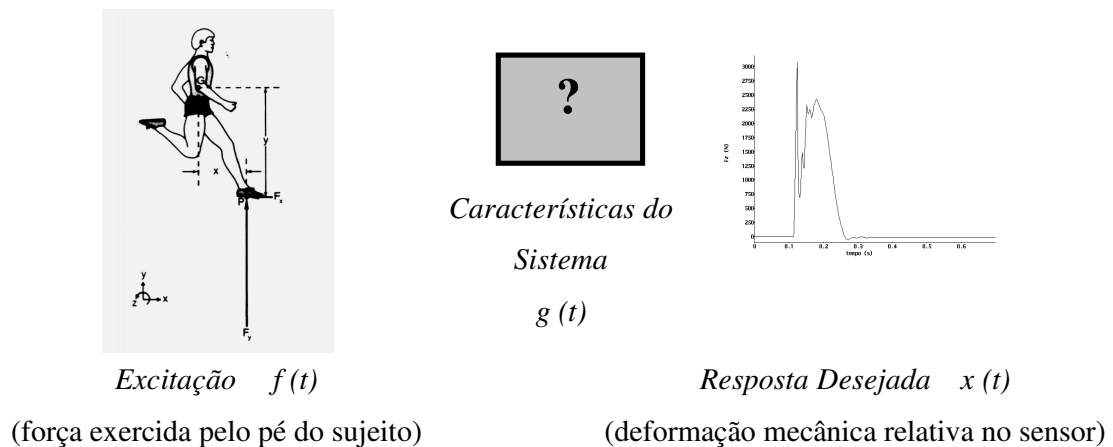


Figura 1.1- Esquema representativo do problema proposto. Adaptado de Hay, 1993

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 figura 1.1.

#### 1.4 Metodologia empregada

A procura da melhor solução para uma dada situação configura um problema de otimização. Em problemas de Otimização Estrutural tem-se que o objetivo é encontrar os melhores valores para as variáveis envolvidas no projeto, satisfazendo todas as restrições impostas ao mesmo. Este objetivo é alcançável através da maximização ou minimização da função objetivo estabelecida para o problema. Conceitos referentes à teoria de Otimização

Estrutural podem ser encontrados em Haftka e Gürdal, 1996.

Porém, para utilização do auxílio fornecido pela otimização matemática faz-se necessária a definição rigorosa do problema em estudo. Em sistemas complexos, como o sistema que está sendo estudado globalmente, é praticamente impossível realizar esta definição sem ver-se obrigado a optar por hipóteses simplificativas muito fortes, as quais dificultariam a obtenção de resultados práticos utilizáveis em forma direta, isto é, achar a melhor plataforma a ser construída. Isto porque, visando encontrar como solução diretamente um sistema com construção realizável, nenhum fator influente em seu desempenho poderia ser hipotético. Assim, optou-se pela realização de uma abordagem heurística de otimização para o presente desenvolvimento. Desta forma, a metodologia empregada consistiu em realizar uma extensiva revisão do estado da arte do assunto de interesse para compor uma base de dados relacionada a *projetos existentes* de plataformas de forças que utilizam princípio extensométrico e *características da aplicação específica* desejada para a plataforma em desenvolvimento. Posteriormente estabeleceu-se a linha de projeto a ser seguida, com a qual foram geradas formas geométricas básicas representando alternativas de solução para o problema em estudo. Através da variação de parâmetros geométricos como dimensão das seções transversais dos membros componentes e posições relativas entre membros componentes, estas formas básicas foram habilitadas para exercer a função de plataforma de forças adequadas ao presente desenvolvimento. Então, para quantificar o mérito de cada uma destas formas básicas geradas, foram utilizados índices de desempenho, os quais indicaram a melhor alternativa. Finalmente, esta solução foi submetida a uma avaliação que caracterizou seu desempenho.

De forma não ortodoxa, de acordo com a aplicação prevista para a plataforma, na presente abordagem tem-se que a *função objetivo* diz respeito à maximização da rigidez da plataforma de forças, respeitando todas restrições necessárias para o adequado funcionamento do sistema. As *variáveis envolvidas no projeto* basicamente dizem respeito:

1. aos parâmetros prescritos, neste caso representados pelas pré-estabelecidas dimensão e geometria da superfície de contato da plataforma, pelas tensões máximas suportadas pelos materiais utilizados, pelas dimensões mínimas necessárias aos elementos transdutores, pela área mínima de fixação da plataforma ao solo;
2. às variáveis de projeto, neste caso representadas pela forma geométrica e dimensões do transdutor, bem como pelos materiais da superfície de contato e do transdutor;
3. às variáveis de estado que representam o comportamento estrutural do sistema, neste caso, fundamentalmente a frequência fundamental do mesmo e sua resistência mecânica.

Como restrições impostas ao projeto configuram inúmeros limites, tais como:

1. restrições laterais; dimensões máximas para a confecção dos componentes da plataforma devido à disponibilidade de matéria prima; valor máximo de massa da estrutura;
2. restrições de comportamento; neste caso fundamentalmente o funcionamento do sistema em regime linear obedecendo a Lei de Hooke, a obtenção de um sistema com frequência fundamental algumas vezes maior que a frequência de excitação prevista; a ocorrência de deformação mecânica relativa compreendida entre limites preestabelecidos na superfície de alguns de seus membros; a forma dos modos de oscilação da estrutura;

A partir destas considerações estabeleceu-se o espaço de solução para o problema, considerando a função objetivo buscada e as restrições existentes. Este espaço é denominado espaço das soluções admissíveis para o projeto, abrigando em seu domínio todas as soluções viáveis que contemplem tanto a função objetivo quanto as restrições do problema. Assim, este espaço indiretamente representa os limites aos quais qualquer tomada de atitude no desenvolvimento da plataforma deve se enquadrar.

### 1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho se organiza da seguinte maneira:

- o capítulo 1 apresenta o contexto no qual o trabalho está inserido, definindo os objetivos buscados e a motivação encontrada para a realização do mesmo. Posteriormente se apresenta a formulação do problema analisado e metodologia empregada na busca da solução;
- o capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, com o estado da arte pertinente ao movimento a que o sistema se destina, e ao sistema propriamente dito. Após realiza-se um estudo crítico dos projetos mais relevantes, apontando-se características estruturais, características dos elementos transdutores utilizados, características construtivas e de custo;
- o capítulo 3 configura os Fundamentos Teóricos, da seguinte maneira:
  - (a) define-se o problema, de forma a habilitar a *geração* de alternativas de solução;
  - (b) apresenta-se as ferramentas utilizadas no *desenvolvimento* e na *avaliação* das alternativas geradas;
- o capítulo 4 inicia com a discussão das possibilidades de solução para o problema, enfocando igualmente as características funcionais e de construção para o sistema solução. Após,

considerando as possibilidades delineadas, são formuladas duas linhas para desenvolvimento de projetos de plataformas de forças;

- no capítulo 5 é feita a escolha da linha a ser seguida e após apresentada sucintamente a geração, o desenvolvimento e avaliação destas alternativas, que indicarão a solução final buscada;
- o capítulo 6 apresenta a alternativa final encontrada, mostrando os índices de desempenho utilizados na sua seleção, e avaliação desta alternativa;
- o capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para continuidade do trabalho;



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão está dividida nos seguintes sub-itens:

- as características básicas do movimento de decolagem no salto em distância,
- a utilização de plataforma de forças no estudo deste movimento,
- a utilização de sensores extensométricos resistivos com capacidade de medição de três componentes de força e três momentos;
- breve histórico do projeto de plataformas de força utilizadas em biomecânica,
- o estado da arte no projeto de plataformas de força com princípio extensométrico e a análise crítica dos projetos considerados mais representativos,

### 2.1 O movimento em estudo: a decolagem do salto em distância

De acordo com Hay, 1993, o salto em distância consiste na cuidadosa medida da velocidade na corrida de aproximação, seguida de uma explosiva decolagem a partir de uma tábua de madeira com 20 cm de largura e um vôo através do ar, finalizando com a aterrissagem em uma caixa de areia. O treinamento de saltos atléticos, assim como as competições, é realizado em ambiente aberto, na pista de saltos (figura 2.1). Este ambiente, normalmente, constitui-se de uma longa pista linear de atletismo que, em um de seus limites extremos, possui uma tábua de impulsão, a qual, logo após é seguida por uma caixa de areia destinada à aterrissagem dos saltadores.

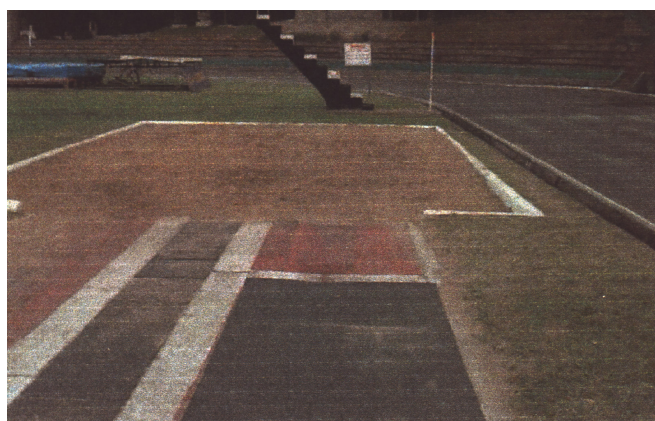


Figura 2.1 – Parte final da pista de saltos da SOGIPA mostrando a tábua de impulsão e a caixa de areia

Conforme as Regras Oficiais de Atletismo da CBAAt – Confederação Brasileira de

Atletismo, a tábua de impulsão deve estar enterrada ao nível da pista e da superfície da caixa de areia. A borda que fica mais próxima da caixa de areia é chamada “linha de medição”, devendo a tábua ser colocada a 1 metro, no mínimo, da caixa de areia. Imediatamente à frente desta linha coloca-se uma camada de massa ou outro material apropriado para o registro das marcas dos pés dos competidores quando cometerem faltas. A tábua de impulsão pode ser construída de madeira ou outro qualquer material rígido adequado, devendo medir 1210 a 1220mm de comprimento, por 198 a 202mm de largura e 100mm de altura máxima, com pode ser observado na figura 2.2.

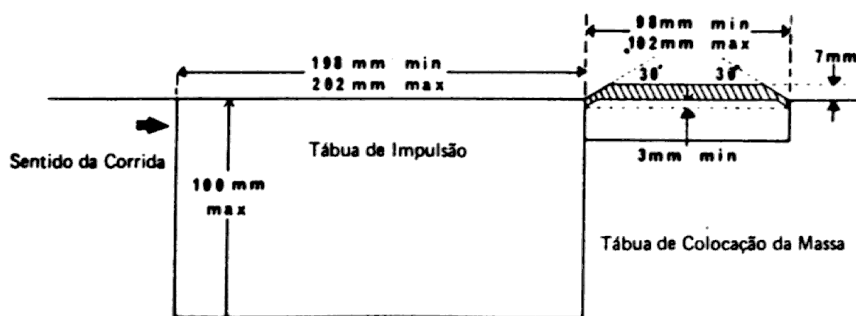


Figura 2.2 – Tábua de impulsão e camada de massa (Fonte: Regras Oficiais de Atletismo – CBAt)

Em todo o salto o atleta se confronta com as leis físicas de seu meio ambiente, tendo de desenvolver, com suas próprias forças, uma certa quantidade de energia que lhe permita vencer as forças exteriores (atritos e resistência do solo), contrariar a força da gravidade e mover-se no ar durante um certo intervalo de tempo. Lees, 1994, aponta que a distância saltada é largamente determinada pela distância do voo, e esta é determinada pela altura, velocidade, e ângulo de projeção do centro de massa (CM) na decolagem. A velocidade e o ângulo de projeção são determinados pela combinação das velocidades horizontal e vertical. A velocidade horizontal é desenvolvida através da corrida de aproximação, a qual é usualmente feita em uma distância tal que o atleta alcance a máxima velocidade na tábua de impulsão. A velocidade vertical é gerada durante o contato com a tábua. A decolagem (*takeoff*) a partir da tábua de impulsão, compreendida entre o toque na tábua até o instante em que o contato pé/tábua é desfeito, é o movimento no qual o atleta tenta desenvolver a maior velocidade vertical possível sem uma apreciável perda na velocidade horizontal desenvolvida durante a corrida de aproximação. Já em 1973, Ramey, M. R. afirmou que no salto em distância a fase mais crítica geralmente ocorre durante a decolagem, na tábua de impulsão, pois é nesta etapa que o atleta deve transferir o impulso horizontal que tem desenvolvido na corrida de aproximação em impulsos horizontal e vertical de decolagem.

Segundo Hay, 1986, há controvérsias na literatura com relação ao contato inicial entre o pé e o apoio na realização da decolagem, particularmente do salto em distância. Alguns afirmam que o contato inicial é feito com o calcanhar ou descrevem uma seqüência de contato do calcanhar aos dedos (*heel-ball-toe*) (Doherty, 1963; Rodda, 1978; Tiupa, 1980; Epskamp, 1982 e Hay, 1985). Outros insistem que uma seqüência de ação deste tipo diminui a velocidade horizontal do atleta e defendem que o contato inicial se dá em uma maior superfície do pé ou, ao menos, no calcanhar e outro arco (Schmolinsky, 1978; Parker, 1980 e Doolittle, 1982). Conforme Hay, 1986, nenhum, destes citados, oferece evidências convincentes de suas posições.

De acordo com Schmolinsky, 1982, a descrição completa da decolagem para o salto em distância, pode ser subdividida em três fases principais:

1. *“a colocação do pé de chamada na tábua de impulsão - há um assentamento ativo do pé, de forma que o saltador não espera que o pé toque o solo; antes move a perna para baixo e para trás em rápido movimento de “patada”;*
2. *amortecimento* – nesta fase, as forças resultantes do assentamento ativo do pé impulsor são absorvidas por ligeira flexão das articulações do tornozelo, do joelho e da anca, objetivando a preparação de um impulso eficaz para diante e para cima;
3. *extensão ativa da chamada* – a extensão da perna impulsora começa imediatamente depois da colocação do pé na tábua. Nesse momento a coxa da perna livre já executou metade do seu balanço para diante e para cima. A extensão dá-se em seguida, primeiro lentamente e depois de forma explosiva, quando se diminui o ângulo de apoio e quando a perna de chamada é aliviada (entre outros fatores) pela transferência do movimento do membro inferior de balanço e dos braços para o tronco. Os braços são assimetricamente levantados mas rapidamente travados, e os cotovelos devem orientar-se ligeiramente para fora para permitir a elevação dos ombros e conservar o equilíbrio. Logo que os pés perdem o contato com o solo (*instant of takeoff*) estão criadas as condições adequadas ao vôo”.

A composição de forças ao efetuar-se a chamada, também conforme Schmolinsky, 1982, pode ser descrita, à luz das duas posições características (inicial e final), assim:

*‘ao efetuar-se a chamada para a elevação, as forças de extensão muscular e as forças centrífugas dos movimentos de balanço têm como resultante a força muscular de ação (componente vertical e componente de força correspondente ao movimento antero-posterior do pé). Na zona de apoio, o solo oferece a esta força muscular resultante uma força reativa, dita “reação do apoio”, que a iguala em valor absoluto – tendo, porém, sentido oposto. Como, ao mesmo tempo, tem de haver equilíbrio de forças no terreno, esta reação do solo é equilibrada*

*por outras forças: a força de resistência vertical do solo e a força do atrito, tangencial. Para haver chamada, a resistência vertical do solo e a força de atrito terão, pelo menos, de igualar as correspondentes componentes da reação à força muscular.’*

Esta descrição deveria levar em consideração o fato de a força muscular resultante não passar, regra geral, pelo centro de gravidade do corpo do atleta e de, por conseqüência, haver um momento de rotação que deveria ser considerado. Mas esta descrição simplificada só considera os efeitos dinâmicos mais importantes do processo de elevação. Além disso, uma vez que o pé humano tem formato tridimensional, aparece uma componente de força perpendicular ao plano de movimento que não consta da descrição acima, conhecida como componente médio-lateral, atribuída ao desequilíbrio lateral durante a decolagem.

## 2.2 A utilização de plataformas de força em estudos do salto em distância

Ramey, em 1970 e em 1973, investigando os fatores que mais influenciavam a performance final do salto em distância, utilizou uma plataforma de forças extensométrica. Ao final do trabalho, enfatizou a importância das curvas força vs tempo características das fases de contato, positiva e negativa, na decolagem do salto em distância (Luthanem, 1979). Em 1979, Luthanem, utilizou plataforma de forças na quantificação da potência mecânica e das contribuições segmentais para a força de impulso na realização da decolagem do salto em distância.

Bosco, 1976, ao utilizar plataforma de forças no estudo da cinética do salto em distância, teve como propósito especial a identificação de possíveis fatores significantes para a obtenção de uma boa performance. Neste estudo, apresentou uma diferenciação dos valores do tempo de contato, para atletas de alto nível e atletas de nível ordinário; afirmando que o tempo médio de contato na decolagem para o salto em distância de atletas de alto nível ficou compreendido em  $0,110 \pm 0,004s$  e, para atletas de nível ordinário em  $0,130 \pm 0,004s$ . Durante este tempo, as forças e momentos apresentam formas temporais características, nas quais nota-se claramente a variação ocorrida em suas magnitudes no decorrer do fenômeno. As formas características da componente vertical e da componente antero-posterior (*forward-backward*) da força podem ser observadas na figura 2.3 abaixo. Como resultado deste estudo, Bosco apontou que o período de contato na plataforma pareceu ser de importância no sucesso da atividade, sendo a primeira metade desta fase a parte de maior influencia na execução.

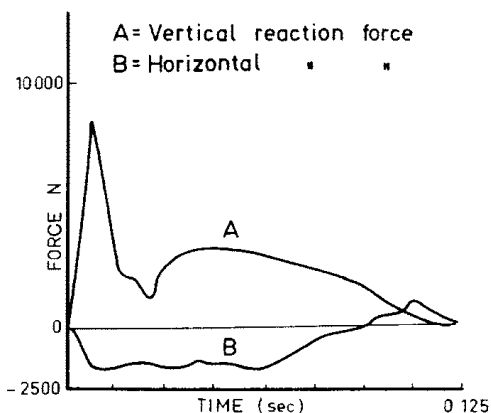


Figura 2.3 – Forma típica das curvas força vs tempo referentes às componentes de força vertical e antero-posterior presentes na decolagem do salto em distância. Extraído de Bosco, 1976.

Segundo o definido por Nigg, 1998, “em locomoção humana, forças ativas são aquelas forças geradas por um movimento que é inteiramente controlado pela atividade muscular” e “forças de impacto são forças que resultam de uma colisão entre dois objetos e que alcançam seu máximo valor aproximadamente 50 milissegundos após o primeiro contato dos dois objetos”. Então, na representação acima, nota-se que inicialmente ocorre o *impacto* entre a primeira parte do pé que encontra a superfície de apoio, provavelmente o calcanhar, e a tábua de impulsão. Esta é denominada fase passiva do movimento. O valor máximo de força vertical apresentado nesta fase é denominado pico de impacto. Em seguida ocorre uma diminuição, devido a transição entre a parte do pé encarregada de promover o contato inicial e aquela encarregada de promover o *impulso* vertical necessário para o início da fase de vôo, e conseqüente aumento na magnitude desta força vertical. Este aumento define a fase ativa do movimento. O valor máximo alcançado nesta fase é denominado pico ativo de força vertical.

Em 1999, Seyfarth, afirmou ser impossível evitar o impacto durante este primeiro contato (o denominado *touch-down*) indicando, entretanto, que os atletas tomam vantagem deste pico passivo gerado durante o impacto. Isto porque, apesar do fato de que a geração deste pico absorve energia, tem-se que a partir da reação elástica induzida pelo organismo humano esta fase de impacto aumenta o impulso vertical do atleta, o qual é importante para alcançar longas distâncias de salto.

A partir da década de 80, James Hay tornou-se o maior pesquisador da atividade atlética salto em distância. Em 1986, como parte de seus estudos do salto em distância, agrupou em um trabalho os resultados dos valores da magnitude da força de reação do solo exercida no atleta durante a decolagem do salto em distância, mensurados por diferentes pesquisadores utilizando plataformas de forças. A tabela 2.1 é uma adaptação desta referida coletânea realizada por Hay. Ressalta-se que estas forças de reação do solo ocorrem no período em que o pé do atleta

encontra-se em contato com a tábua de impulsão (representada pela plataforma de forças).

Tabela 2.1 - Forças de reação do solo- adaptado de Hay, 1986

Fonte	Atletas X = distância do salto [ m ]	Componente vertical de força		Componente antero- posteriorde força		Componente médio-lateral de força [ kN ] (max)
		[ kN ]		[ kN ]		
		Impacto (max)	Impulso (max)	Impacto (max)	Impulso (max)	
Bedi & Cooper ‡	8 homens X = 5.87 – 6.50	3.2 – 4.9		2.7 – 3.3	0.2 – 0.7	0.6 – 1.1
Bosco et al. ‡ ‡	1 homem X = 6.85	8.4	3.2	1.6		
Fischer	11 homens X = 6.40 – 7.58	7.16 - 11.77	2.55– 3.92	2.55- 8.63		
Karas et al. ‡ ‡		3.2	3.2	2.0	0.5	
Luhtanen & Komi	4 homens X = 6.95	8.16	3.5	3.35	1.02	
	6 homens X = 5.92	5.80	2.0	1.74	0.86	
Mikhailov et al.	8 homens	10.75	3.2 – 4.3			
	5 mulheres	9.42	2.2 – 3.3			
Nigg	Homens	4.9 – 7.8		2.5 – 4.9		0.9 – 2.9
	Mulheres	3.2 – 5.6		1.5 – 2.9		-1.5 – 2.5
Popov	nível ordinário	Homens 2.9 – 3.4 mulheres 2.0 – 2.7				
	profissionais	homens > 3.9 mulheres > 2.9				
Popov	Homens		< 3.92			
	Mulheres		< 2.94			
Ramey ‡	3 homens X = 3.2 – 4.2		1.8 – 3.3			
Ratov & Muravyov		< 8.82		4.41		

‡ Sujeitos usaram aproximação curta;

‡ ‡ Valores estimados baseados nos gráficos publicados;

Com relação aos dados de força de reação do solo, coletados com plataforma de força, Hay, 1986, observa que:

- os valores máximos e médios da componente vertical das forças de reação do solo

durante a fase de impulso são bem correlacionados com a distância do salto;

- durante a decolagem, “há uma rápida passagem do *ponto de aplicação da força* (o centro de pressão, CP) a partir da sola do pé para os dedos (ponta do pé)”. O deslocamento do CP na direção frontal é igual a 1/2 até 2/3 do comprimento do pé e é negativamente correlacionado com a distância do salto.

Com relação a variável tempo de contato, Hay, 1986, observou que os resultados indicaram que quanto mais rápida a corrida de aproximação, menor o tempo de decolagem e maior a distância do salto;

Em 1986, Hay apresentou a sua versão da forma das curvas representativas das componentes de força presentes na decolagem para o salto em distância (figura 2.4), incluindo então a componente médio-lateral (*sideward*), comumente relacionada com o desequilíbrio do atleta durante a decolagem, o qual implica em uma indesejada perda de energia para a realização da tarefa.

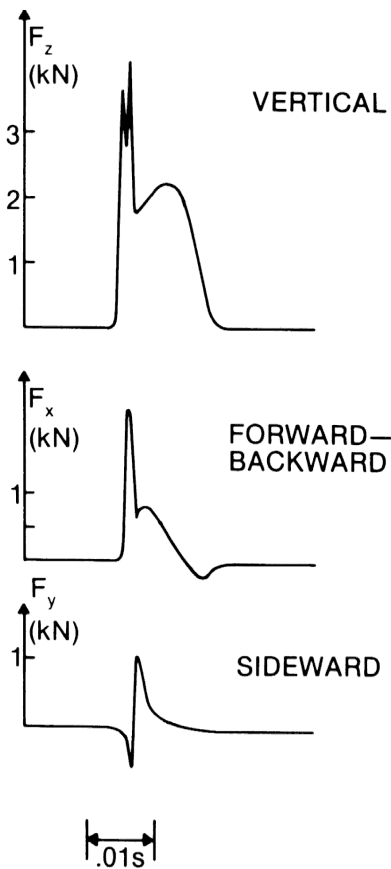


Figura 2.4 – Formas características das curvas força vs tempo registradas por plataforma de forças na decolagem de um salto em distância. Extraído de Hay, 1986

### 2.3 A utilização de sensores extensométricos resistivos com capacidade de medição de três componentes de força e três momentos

Fora do campo da biomecânica sensores extensométricos de seis componentes, capazes de captar três componentes de forças ortogonais e três momentos ou torque, como são as plataformas de forças de princípio extensométrico resistivo atuais, têm seu uso difundido em pesquisas aerodinâmicas, processos de fabricação como usinagem, na indústria automobilística, na indústria robótica, entre outros.

Em aerodinâmica estes sensores, denominados balanças de força, são empregados em ensaios de modelos reduzidos em túneis de vento. Na indústria automobilística as aplicações referem-se a estudos de impacto e colisões de automóveis. Os sensores aplicados em robótica têm o intuito de monitorar e controlar a ação de robôs, sendo que a diferença fundamental entre a concepção destes sensores e as plataformas de forças propriamente ditas, utilizadas em biomecânica, reside no fato de que nestas plataformas a força excitadora do sistema é aplicada apenas através de sua superfície superior, ou superfície de contato, ao passo que os sensores para robôs são habilitados para receberem excitação através de ambas superfícies, superior e inferior. Isto se deve à necessidade de acoplá-los internamente na montagem dos robôs, de forma a fazerem parte do sistema.

Além do trabalho de Tschanz, 1982, onde os requerimentos para a utilização de extensômetros de resistência elétrica em medições de natureza dinâmica são detalhadamente apontados, a maior contribuição encontrada nestas publicações fora do campo da biomecânica diz respeito ao trabalho de Kim, 1999, que desenvolveu um transdutor que funciona à flexão e é tratado por “plate-beam” por não enquadrar-se, dimensionalmente, nas teorias clássicas que definem o comportamento de vigas nem de placas. O desacoplamento deste sensor é do tipo mecânico-elétrico, onde a ligação dos circuitos tipo ponte determina a leitura apenas da variável desejada. Com isso, o nível de acoplamento presente neste projeto é menor que 2%.

### 2.4 Histórico do projeto de plataformas de forças utilizadas em biomecânica

Em 1895 Marey construiu a primeira plataforma de força para utilização em biomecânica, que consistia de tubos espirais de borracha instalados em uma estrutura de madeira. Anteriormente, 1873, este mesmo pesquisador havia desenvolvido um sistema pneumático portátil que quantificava forças entre os pés e a superfície de apoio, porém não utilizava placa como superfície de contato. Após estes desenvolvimentos pioneiros, Amar em 1920, e Elftman,



1938, desenvolveram dispositivos puramente mecânicos que foram utilizados como plataformas de forças.

A década de 50 aparece como um período de grande evolução e inovações tecnológicas no projeto de plataformas. Em 1952 Cunningham e Brown desenvolveram o sistema baseado em sensores do tipo extensômetros de resistência elétrica (strain gages) que é, provavelmente, o mais versátil e mais utilizado em projetos de plataformas de força. Hearn, 1968, relatou que uma plataforma utilizando strain gages estava em desenvolvimento na metade da década de 50, no Departamento de Anatomia da Universidade de Oxford. No final da década, ano de 1959, Greene e Morris desenvolveram uma plataforma de força utilizando um sensor do tipo transformador linear diferencial variável – LVDT, de funcionamento indutivo.

Em 1962, Carlöö, apresentou o desenvolvimento de uma plataforma de força com princípio extensométrico capaz de captar e registrar as forças nos três eixos coordenados e o momento em torno destes eixos. Como conseqüência da demanda por este instrumento, no final da década de 60 apareceu a primeira versão comercial de plataforma de força com propósitos biomecânicos. No ano de 1969, em Zurique (Suíça), a Companhia Kistler lançou a primeira plataforma de força comercialmente avaliada, a qual diferenciava-se de todas as demais devido a utilização de sensores do tipo cristais piezoelétricos (quartzo), capazes de promover rigidez superior e, conseqüentemente, maiores valores de frequência fundamental para as plataformas, em detrimento da capacidade de realizar medidas estáticas. Em contrapartida, no ano de 1976, a empresa Advanced Mechanical Technology Incorporation – AMTI, com sede em Boston (USA), lançou no mercado a primeira versão comercial de plataforma de força utilizando sensores strain gages. Estes projetos comerciais não são disponibilizados para conhecimento público.

As pesquisas em desenvolvimento e aprimoramento de tecnologia continuaram, voltando-se principalmente ao projeto direcionado para utilização específica e minimização dos custos envolvidos. Em 1997, Brad Waught fez a última inovação de projeto registrada, apresentando uma plataforma de força instrumentada com sensores do tipo filme piezoelétrico. Por tratar-se de algo realmente inovador, suas características de comportamento ainda não foram totalmente estabelecidas.

## 2.5 Estado da arte em projeto de plataformas de forças com princípio extensométrico

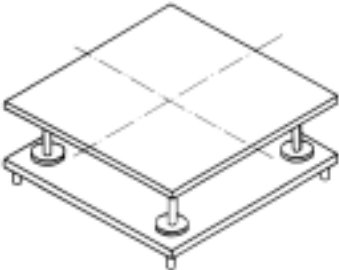
O Estado da Arte apresentado ficou restringido aos *projetos pioneiros de plataformas de forças extensométricas utilizadas em Biomecânica*. De acordo com Gola, 1980, a forma da conexão entre o elemento transdutor utilizado e a superfície de contato da plataforma classifica

os projetos de plataformas de forças em plataformas *suportadas* ou *suspensas*:

- plataformas de forças suportadas - a superfície de contato repousa sobre uma estrutura metálica instrumentada, ou transdutores independentes;
- plataformas de forças suspensas - a superfície de contato aparece suspensa por elementos em tensão.

Os projetos encontrados estão sucintamente descritos e caracterizados nos quadros abaixo, sendo que os projetos considerados mais representativos têm sua apresentação seguida de uma análise crítica a seu respeito. Os quadros 1 a 9 apresentam plataformas de forças suportadas enquanto os quadros 10 e 11 apresentam plataformas de forças suspensas. As variáveis medidas dizem respeito às componentes de força e aos momentos de força que são medidos pela plataforma, referentes ao seu próprio sistema de coordenadas cartesianas.

Quadro 1 – Plataforma de Forças de Cunningham e Brown, 1952

<i>Descrição-</i>		
Este projeto pioneiro é composto por quatro colunas cilíndricas instrumentadas ( <i>beam-columns</i> ), uma superfície de contato, e uma base. A superfície de contato é uma placa de alumínio que repousa nas colunas. Estas colunas são flangeadas em ambas extremidades e servem como transdutores e como suporte das cargas aplicadas a partir da placa superior. O elemento base é uma placa de aço, que fixa a plataforma ao chão através de quatro pontos de apoio (um em cada canto).		
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	38 x 51
	<i>Variáveis Medidas</i>	Fz, Fx, Fy Mz
	<i>Aplicação</i>	Estudo da caminhada de amputados com perna artificial
<p>Figura 2.5 – Versão da plataforma de forças de Cunningham e Brown feita por Paul em 1967. Extraída de Gola, 1980</p>		

*Configuração estrutural –*

*Considerando a superfície de contato rígida à flexão, solicitações verticais são transmitidas aos transdutores axialmente, tal que os quatro elementos são comprimidos. Para solicitações horizontais ocorre a flexão lateral dos*

transdutores, a placa superior pode ser vista como um corpo rígido. De acordo com a geometria dos elementos transdutores, as resistências mecânicas longitudinal e transversal são diferentes. Este fato acarreta a diferenciação entre a rigidez vertical e horizontais da plataforma, ficando claro que para carregamentos no plano da plataforma a rigidez é menor. Isto implica que as frequências fundamentais dos modos horizontais são mais baixas que a vertical. Para o primeiro modo vertical a frequência de vibração ficou em 140Hz. Acredita-se que este valor só foi alcançado devido à ausência de desvios à transmissão de cargas verticais apresentada por esta configuração, conforme descrito a seguir.

A transmissão de cargas- considerando a placa superior suficientemente rígida e carregamento ideal na região central, a transmissão de cargas pode ser descrita da seguinte maneira:

1. para carregamento vertical (figura 2.6) as forças aplicadas caminham do centro da placa superior até as extremidades, onde estão situados os quatro pontos de apoio; então, as forças aplicadas atravessam diretamente os quatro transdutores e são distribuídas na placa de base; a partir da placa de base as cargas alcançam os pontos de fixação ao solo e sofrem a reação deste;

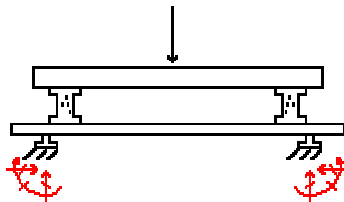


Figura 2.6- Esquema da transmissão de cargas verticais

2. para carregamentos horizontais (figura 2.7), a flexão dos transdutores é induzida pelo deslocamento horizontal da superfície de contato e, através dos pontos de apoio da placa base, a reação do solo é alcançada.

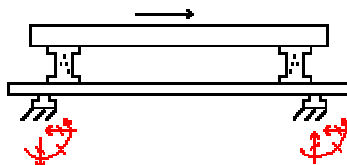


Figura 2.7- Esquema da transmissão de cargas horizontais

*O fato de que uma carga vertical aplicada no centro da superfície de contato deverá ser transmitida através desta superfície até alcançar os quatro pontos de suporte, nos quatro cantos, indica a flexão bi-direcional desta placa. Este tipo de solicitação é indesejado por induzir acoplamento entre componentes verticais e horizontais de forças. Para que a placa que representa a superfície de contato não se deformasse foi necessário reforçá-la em sua superfície inferior, deixando-a mais pesada e, conseqüentemente, baixando a frequência fundamental de todo o conjunto. O fato de os pontos de fixação ao solo estarem localizados nos quatro cantos da placa base indica outro indesejado aumento de peso estrutural, uma vez que desta forma esta segunda placa necessita maior rigidez à flexão.*

*Aspectos do Elemento Transdutor- devido ao fato de que nesta configuração os transdutores são arranjados para suportar e instrumentar a plataforma, as considerações sobre estes elementos podem ser estendidas ao sistema como um todo. O elemento viga-coluna é capaz de capturar deformações superficiais axiais e transversais. A compressão da coluna representa a resistência vertical, enquanto a flexão representa a resistência horizontal. Em compressão (solicitação axial) este membro apresenta alta rigidez, sendo a carga transmitida diretamente através dele, sem desvios. Neste tipo de solicitação o fator limitante é a flambagem. Para solicitações transversais, a carga deve ser desviada através deste elemento, indicando uma redução de sua eficiência estrutural. Esta configuração de elemento transdutor está submetida a efeitos de segunda ordem devido à cargas aplicadas fora de seu eixo longitudinal, tendo reputação de inerente não-linearidade (Strain Gage Transducer, 1988). Assim, cuidados devem ser tomados para isolar a saída de carga axial destes efeitos. Podem acontecer não-linearidade e interferências entre os transdutores se a placa superior não é suficientemente rígida, pois a indução de flexão bidirecional dos elementos transdutores em direção ao centro da plataforma, causada por um carregamento vertical, não representa a aplicação de forças horizontais. Este elemento transdutor, conforme o estabelecido pelo princípio de Saint Vénant, deve ser feito relativamente longo, com respeito à sua seção transversal, tal que um campo uniforme de*

*deformações, não afetado pelas condições de contorno, seja estabelecido na posição dos sensores. Atenção deve ser dada para garantir o alinhamento dos sensores, pois neste tipo de elemento pequenos desvios indicam grandes erros na leitura da variável medida. Com relação à fixação entre os transdutores e as placas, os flanges são uma boa alternativa pois assim estas duas placas são suportadas em maiores áreas.*

*Aspectos de Construção-* esta plataforma é simples em concepção. Sua fabricação pode ser realizada em quatro passos: 1) confecção da placa superior; 2) confecção dos quatro transdutores; 3) confecção da placa de base; 4) confecção dos pontos de fixação. No segundo passo, atenção deve ser dada ao alívio das tensões residuais causadas pelos processos de manufatura pois, caso contrário, deformações residuais poderiam ser induzidas aos transdutores. Durante a construção a maior atenção deve ser com a interconexão entre os elementos elásticos e as placas, de forma a resultar uma conexão rígida e com um mínimo de micromovimentos nas interfaces. Uniões utilizando parafusos, como a usada nesta plataforma, permitem atrito seco, de forma que os transdutores possam reagir de diferentes maneiras para a mesma aplicação de carga, pois o mecanismo de atrito é desconhecido. Além disto, prevenir micromovimentos é importante para alcançar melhor precisão de medida, desde que a ocorrência destes movimentos pode se manifestar como aparente histeresse (Hull, Brewer e Davis, 1995). Isto pode ser feito utilizando-se flanges integrais com, por exemplo, a colocação de uma fina camada de epóxi entre as duas placas e os elementos transdutores, na montagem. Ao colocar as placas juntas, deve-se assegurar perfeito paralelismo na união.

*Aspectos de Custo-* de acordo com o relatado, os custos envolvidos tendem a ser pequenos. Isto se deve principalmente ao fato desta configuração estrutural permitir a confecção isolada de cada parte componente. Assim, processos comuns de fabricação mecânica podem ser usados. Os maiores custos estão relacionados à instrumentação dos transdutores, devido ao tempo despendido nesta tarefa.

*Julgamento-* este trabalho tem o grande mérito de ser o projeto pioneiro em

*plataformas de forças extensométrica. A simplicidade conceitual do arranjo é apreciável. As principais limitações encontradas são indicadas a seguir:*

- *baixa rigidez horizontal;*
- *na direção vertical duas placas podem vibrar, caracterizando assim um sistema translacional de duas molas em série ;*
- *os mesmos elementos elásticos servem como sensor para as três direções, indicando uma não desejável interferência inerente;*
- *pequena área de fixação ao solo;*

Quadro 2 – Plataforma de Forças de Whitney, 1958

<p><i>Descrição-</i></p> <p>Nesta plataforma a superfície de contato foi suportada verticalmente e restringida horizontalmente por cabos a partir de vigas em balanço montadas em uma caixa metálica. As vigas fixadas em um extremo servem como transdutores mecânicos bem como suporte às cargas aplicadas na superfície de contato. Forças exercidas na plataforma são transmitidas à estes elementos e os resultantes momentos fletores são medidos por meio de strain gages colados nas superfícies inferior e superior destas vigas, próximo aos seus extremos fixos. O elemento base é uma caixa metálica que fixa a plataforma ao chão.</p>	
	<p><i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i></p> <p>120 x 120</p>
	<p><i>Variáveis Medidas</i></p> <p><math>F_x, F_y, F_z</math> <math>M_z</math></p>
	<p><i>Aplicação</i></p> <p>Análise da resistência em levantamentos de peso</p>

Figura 2.8– Plataforma de forças de Whitney.  
Extraído de Ramey, 1973

*Configuração Estrutural – para solicitações verticais o comportamento estrutural é ditado pela junção da placa superior e as quatro vigas em balanço que a sustentam. Para solicitações horizontais, o comportamento estrutural é o de quatro vigas em balanço atuando em série. As frequências*

*naturais de vibração da placa superior, isoladamente, são diminuídas devido às leves restrições em suas extremidades.*

*A transmissão de cargas- usando uma placa superior rígida à flexão, a transmissão de cargas através da plataforma pode ser descrita da seguinte maneira:*

- 1. para carregamento vertical (figura 2.9), as forças aplicadas caminham do centro da placa superior até suas bordas, alcançando as extremidades “livres” das vigas em balanço; então, as forças aplicadas atravessam longitudinalmente os transdutores e, a partir da extremidade fixa destes elementos, as cargas alcançam um pórtico estrutural e o atravessam, sendo reagidas pelo solo;*

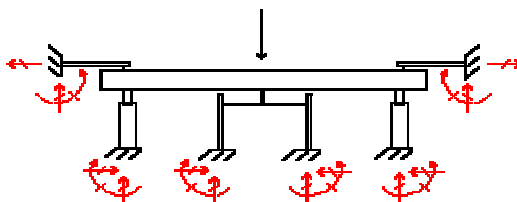


Figura 2.9 – Esquema da transmissão de cargas verticais

- 2. para carregamentos horizontais (figura 2.10) as forças aplicadas atravessam longitudinalmente os transdutores; a partir da extremidade fixa destes elementos as cargas alcançam o pórtico, atravessam-no e, finalmente, alcançam e são reagidas pelo solo;*

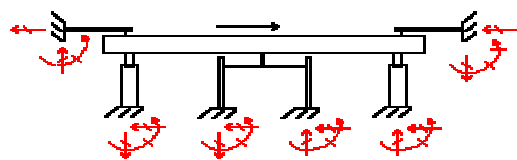


Figura 2.10 – Esquema da transmissão de cargas horizontais.

*Aspectos do Elemento Transdutor- a viga em balanço é a mais simples configuração de viga para um transdutor flexional. Neste elemento elástico, a única função realizada pela maior parte de seu comprimento é converter a carga aplicada em momento fletor na área do sensor. Ao mesmo tempo, entretanto, esta porção do comprimento da viga contribui significativamente na deflexão do ponto de aplicação da carga, e na massa submetida ao deslocamento. Como resultado, o elemento elástico tende a possuir inerente*

*baixa frequência natural (Strain Gages Transducer, 1988). Outras características deste elemento transdutor são:*

- *o máximo deslocamento de uma viga em balanço sempre ocorre em sua extremidade livre, a máxima deformação associada, para vigas de seção transversal constante em ambos planos, ocorre junto a extremidade engastada;*
- *a viga deve ser feita longa suficiente com respeito à suas extremidades, tal que um campo de deformações uniforme, não afetado pelas condições de contorno, seja estabelecido na posição dos sensores;*

*Aspectos de Construção- esta plataforma permite a manufatura independente de cada componente, porém sua montagem é dispendiosa devido às possíveis dificuldades de alinhamento entre transdutores. A fixação das vigas à estrutura suporte deve ser rígida, sendo que as uniões parafusadas utilizadas deveriam ser evitadas. O uso de ligas de alumínio ao invés de aço como material das vigas resultaria em menores deslocamentos e maior frequência natural para uma viga de mesmas largura e comprimento, exibindo o mesmo nível de deformação na área sensoriada (Strain Gages Transducer, 1988).*

*Aspectos de Custos- processos de fabricação comuns podem ser utilizados na confecção da placa e dos transdutores. O elemento transdutor utilizado é facilmente instrumentado. A montagem do sistema indica dispêndio de tempo, porém ainda assim, os custos gerais envolvidos tendem a ser pequenos.*

*Julgamento- a idéia utilizada neste trabalho é de simples concepção. Os aspectos positivos desta configuração são:*

- *a existência de membros com deformação preferencial para cada direção de carga;*
- *interferências são evitadas, pois a montagem dos sensores em circuito ponte é tal que saídas indesejadas são canceladas;*

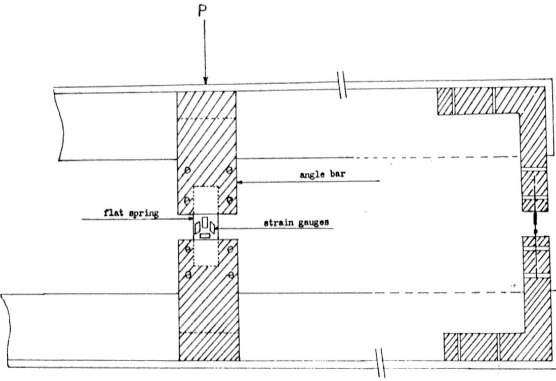
*Os aspectos negativos-*

- *a placa superior foi feita robusta para assegurar rigidez, devido à localização extrema dos seus pontos de suporte;*
- *comportamento estrutural resultante suscetível à todas direções de carga*



*pois nenhum contato direto entre uma carga aplicada à superfície de contato e o solo está presente nesta configuração, tal que o sistema tem tendência a permanecer vibrando depois do fim da aplicação da carga. Isto implica na incapacidade do sistema para medições dinâmicas.*

Quadro 3 – Plataforma de Forças de Carlsöö, 1962

<i>Descrição-</i>		
Esta plataforma é suportada por quatro colunas que encontram-se entre duas placas metálicas similares. Cada coluna é feita de duas barras em forma de 'L', unidas através de um elemento elástico laminar.		
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	50 x 100
	<i>Variáveis Medidas</i>	$F_x, F_y, F_z$ $M_x, M_y, M_z$
	<i>Aplicação</i>	Perda de equilíbrio na caminhada humana
<p>Figura 2.11– Plataforma de forças de Carlsöö. Extraído de Carlsöö, 1962</p>		

*Configuração Estrutural – para solicitações verticais o comportamento estrutural desta configuração é ditado pela junção entre duas placas, superior e inferior, e quatro lâminas que fazem a ligação entre estas placas. Solicitações horizontais induzem a flexão das lâminas, duas lateralmente e duas transversalmente (encarregadas da medição).*

*A transmissão de cargas- novamente considerando a utilização de uma placa superior rígida à flexão, a transmissão de cargas através da estrutura pode ser brevemente descrita assim:*

- 1. forças verticais aplicadas (figura 2.12) movem-se do centro da placa superior até suas extremidades, atravessam axialmente as lâminas de união alcançando a placa base solidária ao solo;*

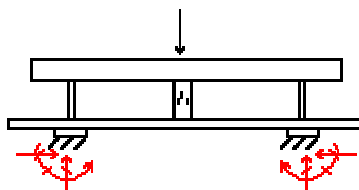


Figura 2.12 – Esquema da transmissão de cargas verticais

2. *forças horizontais (figura 2.13) solicitam, através da superfície de contato, as lâminas com flexão, sendo reagidas através das extremidades fixas de tais elementos (localizadas na placa base que é solidária ao solo).*

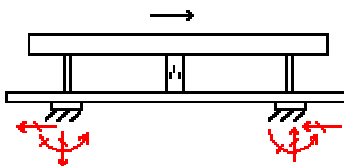


Figura 2.13 – Esquema da transmissão de cargas horizontais

*Aspectos do Elemento Transdutor- novamente, os transdutores servem também como membros estruturais, de forma que sua sensibilidade é condicionada à função de resistência mecânica que estes elementos devem exercer. Estes elementos transdutores não são de uso tradicional, de forma que seu comportamento é pouco conhecido. Notadamente, a possibilidade de flambagem destes elementos deve ser considerada.*

*Aspectos de Construção- esta configuração requer cuidadosa manufatura montagem devido ao fato de que vários elementos são utilizados em conjunto. A instrumentação dos transdutores é simples.*

*Aspectos de Custos- processos de fabricação comuns podem ser utilizados na confecção desta configuração, envolvendo baixos custos. Sua montagem indica maior dispêndio de tempo.*

*Julgamento- o destaque positivo deste projeto é a capacidade para medição de seis componentes;*

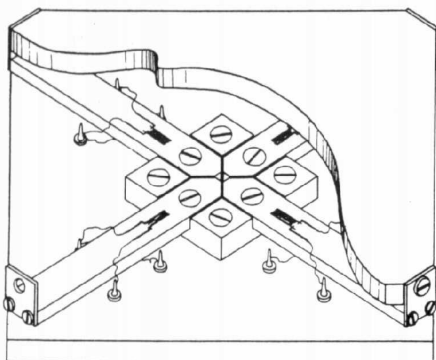
*Como aspectos negativos, são apontados:*

- *susceptibilidade dos elementos transdutores à cargas horizontais;*
- *na direção vertical, devido ao paralelismo entre placa base e placa*

*superior, duas placas podem vibrar;*

- *dificuldades em manufatura e montagem;*
- *número de membros componentes;*

Quadro 4 – Plataforma de Forças de Petersen et al. 1965

<i>Descrição-</i>		
Esta plataforma aplica o princípio o peso total de uma mesa é equivalente a soma das forças exercidas por suas pernas ao chão. A plataforma consiste de uma placa quadrada com os cantos suportados pela extremidade livre de vigas em balanço instrumentadas.		
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	11,43 x 11,43
	<i>Variáveis Medidas</i>	Fz
	<i>Aplicação</i>	Estudos de estabilidade postural em cachorros
<p>Figura 2.14 – Plataforma de força de Petersen. Extraído de Petersen, 1965</p>		

*Configuração Estrutural – para solicitações verticais o comportamento estrutural desta configuração é ditado pela junção entre a placa superior e as vigas em balanço que a sustentam. Utilizando as bordas como locais de suporte, o vão livre da placa superior torna-se maior, indicando aumento do peso estrutural desta placa. Solicitações horizontais induzem o aparecimento de um par de forças na extremidade das vigas instrumentadas, podendo causar interferências na medida da componente vertical de força. Mesmo utilizando transdutores extensométricos com funcionamento à flexão, esta plataforma de forças, que possui dimensões reduzidas, alcançou o valor de 126Hz para sua frequência fundamental.*

*A transmissão de cargas- novamente considerando a utilização de uma placa superior flexuralmente rígida o suficiente, a transmissão de cargas através da estrutura pode ser brevemente descrita como segue:*

1. *forças verticais aplicadas movem-se do centro da placa superior até suas extremidades; então, a partir da extremidade “livre” dos elementos transdutores estas forças devem atravessá-lo, retornando à região central da estrutura. Esta região central é solidária ao solo, promovendo o equilíbrio estrutural buscado (figura 2.15);*

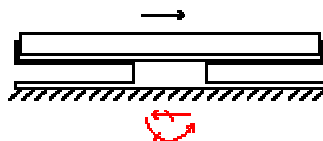


Figura 2.15 – Esquema da transmissão de cargas verticais

2. *forças horizontais (figura 2.16) solicitam, através da superfície de contato, os extremos ‘livres’ dos elementos transdutores com flexão e carga axial combinadas, sendo reagidas através das extremidades fixas de tais elementos.*

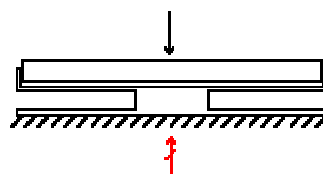


Figura 2.16 – Esquema da transmissão de cargas horizontais

*Aspectos do Elemento Transdutor- novamente, os transdutores servem também como membros estruturais, de forma que as considerações sobre o comportamento destes podem ser estendidas para a estrutura com um todo. Os transdutores utilizados são do mesmo tipo daqueles utilizados por Whitney, variando as dimensões.*

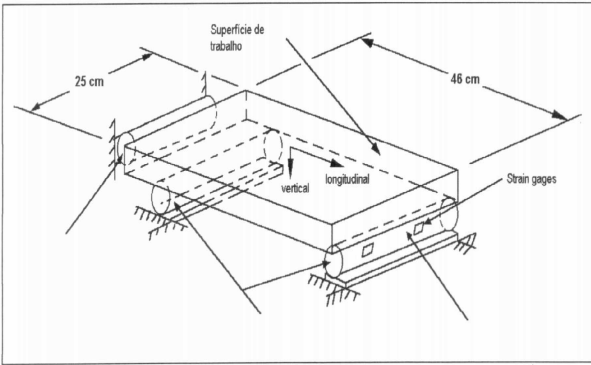
*Aspectos de Construção- sendo de simples concepção, esta configuração difere das demais por utilizar locais pré-usinados para abrigar os elementos transdutores, indicando maior tempo de usinagem.*

*Aspectos de Custos- processos de fabricação comuns podem ser utilizados na confecção desta configuração, envolvendo baixos custos. Um maior tempo deve ser despendido no processo de usinagem e posterior alívio de tensões.*

*Julgamento- os aspectos considerados positivos deste projeto são:*

- a linearidade alcançada com a utilização de circuito tipo ponte completa na instrumentação;
  - resposta independente do ponto de aplicação da carga sobre a superfície de contato;
  - a utilização de locais pré-usinados para abrigar os transdutores;
- Como aspectos negativos, são apontados:
- o fato desta plataforma ser capaz de captar apenas solicitações verticais;
  - a demasiada utilização de ligações parafusadas.

Quadro 5– Plataforma de Forças de Ramey, 1970

<p><i>Descrição-</i></p> <p>Esta plataforma foi suportada verticalmente por dois tubos de parede fina, e restrita longitudinalmente por um tubo. Strain gages foram colocados em uma configuração que permitia a medição a partir de mudanças na forma dos tubos.</p>	
	<p><i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i></p> <p>25 x 46</p>
	<p><i>Variáveis Medidas</i></p> <p>Fz, Fy</p>
	<p><i>Aplicação</i></p> <p>Análise das características de força vs tempo na decolagem do salto em distância</p>
<p>Figura 2.17 – Plataforma de forças de Ramey. Extraído de Ramey, 1973</p>	

*Configuração Estrutural-* esta configuração tem uma superfície de contato com seus dois menores lados horizontais suportados inteiramente pelos transdutores. Isto torna esta placa suscetível à flexão na direção longitudinal. A frequência fundamental de vibração dos modos de oscilação desta configuração, na direção vertical, são diminuídos pela inexistência de restrições em suas dimensões horizontais longitudinais. Para carregamentos horizontais a placa superior pode ser vista como um corpo rígido e o comportamento estrutural é de acordo com a deformação induzida aos elementos transdutores que a suportam.

*Transmissão de cargas- novamente considerando a superfície de contato rígida à flexão, tem-se;*

1. *um carregamento aplicado no centro da placa superior deverá atravessá-la, longitudinalmente, até encontrar os elementos transdutores que estão em contato rígido com o solo (figura 2.18);*

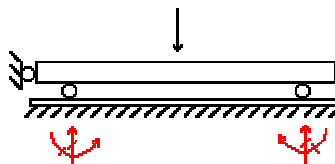


Figura 2.18 – Esquema da transmissão de cargas horizontais

2. *um carregamento horizontal (figura 2.19) é diretamente transmitido aos transdutores solidários ao solo;*

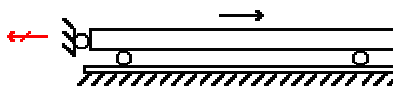


Figura 2.19 – Esquema da transmissão de cargas horizontais

*Aspectos dos Elementos Transdutores- nesta configuração o conceito de tubos circulares diametralmente carregados foi utilizado. Assim, problemas relacionados com aplicação fora do eixo, existentes ao utilizar transdutores do tipo colunas, são evitados. A flexão destes elementos é dificultada, evitando a possibilidade de ocorrência de interferências entre medidas. Este transdutor pode ser facilmente confeccionado mas possui a desvantagem de não ser hábil para a medição de forças transversalmente aplicadas (carregamento vertical).*

*Aspectos de Construção- o ponto crítico na construção desta plataforma diz respeito à fixação e alinhamento dos sensores, com relação à placa superior e ao solo. Isto porque uma linha inteira deve ser utilizada nesta função, de forma a fornecer uma maior área de fixação ao solo, indicando a utilização de soldagem. A solda, entretanto, pode induzir indesejadas tensões residuais.*

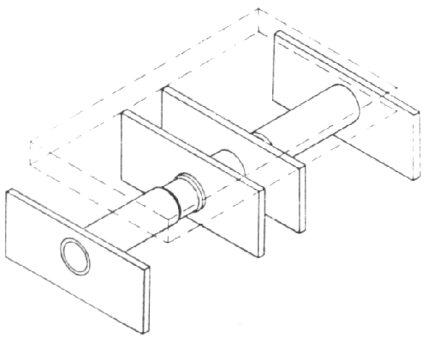
*Aspectos de Custos- processos de fabricação comuns podem ser utilizados na confecção desta configuração, envolvendo baixos custos. Um maior tempo deve ser despendido no processo de montagem da plataforma.*

*Julgamento- os aspectos considerados positivos para esta configuração são:*

- *o fato de a placa superior ser suportada por linhas ao invés de pontos;*
- *a existência de transdutores independentes para as duas direções de medição;*

*Como aspecto negativo, cita-se a impossibilidade de medição de carregamentos verticais e torques;*

Quadro 6– Plataforma de Forças de O’Leary, 1970

<i>Descrição-</i>		
Nesta plataforma o elemento sensor é um tubo de alumínio, com espessura de parede reduzida nos locais destinados à colocação dos sensores. Este tubo é suportado em suas extremidades por placas de alumínio. A superfície de contato é colocada na região central da estrutura. O relato deste projeto não forneceu subsídios para sua análise.		
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	26 x 62
	<i>Variáveis Medidas</i>	Fx, Fy, Fz
	<i>Aplicação</i>	Estudos de aspectos posturais do movimento humano
<p>Figura 2.20 – Plataforma de força de O’Leary. Extraído de O’Leary, 1970</p>		

Quadro 7– Plataforma de Forças de Bonde-Petersen, 1975

<i>Descrição-</i>
Esta plataforma consiste de uma placa composta de aço, Rockwool ® e concreto, na qual quatro anéis de Aço foram colocados, na superfície inferior, em cada canto. Cada anel foi instrumentado com apenas um sensor, dois em superfícies externas e dois em superfícies internas. O relato deste projeto não forneceu subsídios para sua análise.

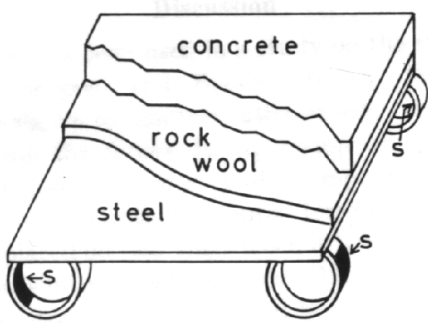
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	90 x 70
	<i>Variáveis Medidas</i>	Fz
	<i>Aplicação</i>	Estudos de locomoção humana

Figura 2.21 – Plataforma de força de Bonde-Petersen. Extraído de Bonde-Petersen, 1975

#### Quadro 8– Plataforma de Forças de Lywood et al, 1987

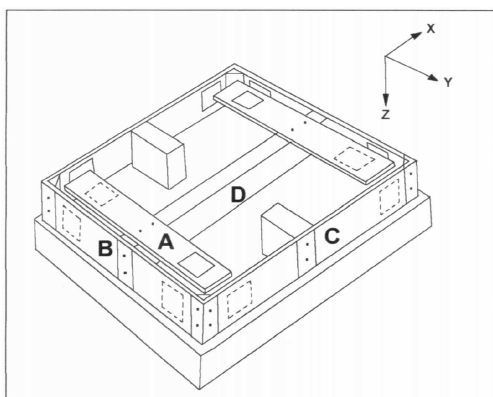
<p><i>Descrição-</i></p> <p>Neste projeto, os sensores da força vertical são similares aqueles utilizados por Petersen et al., 1965. Para as componentes horizontais, este sistema emprega o princípio de transferência das componentes de força através de um membro não ativo suspenso, relativamente rígido para membros ativos suspensos colocados perpendicularmente (<math>F_x</math>) e paralelamente (<math>F_y</math>) à este membro rígido. Desta forma, estes membros ativos funcionam como vigas que defletem no plano vertical.</p>		
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	6 x 6
	<i>Variáveis Medidas</i>	Fz, Fy, Fx
	<i>Aplicação</i>	Estudos do controle postural de pequenos animais

Figura 2.22 – Plataforma de força de Lywood et al. Extraído de Roesler, 1997

*Configuração Estrutural-* para carregamentos verticais, considerando a placa superior flexuralmente rígida, o comportamento estrutural é ditado pela associação desta placa com os elementos transdutores, no caso, quatro vigas



em balanço atuando em paralelo. Para solicitações horizontais esta plataforma responde como um pórtico estrutural. Para carregamentos na direção horizontal X, as vigas B podem ser consideradas como vigas biapoiadas solicitadas em sua região central. Para solicitação na direção horizontal Y, as vigas C agem como vigas engastadas, fixadas ao solo através de blocos centrais localizados a meia distância da dimensão horizontal X. A rigidez equivalente, e conseqüentemente os valores de frequência correspondentes aos modos de oscilação desta configuração, nas direções horizontais, podem ser deduzidos das considerações apresentadas acima. Esta plataforma de forças, ressaltando-se ser de dimensões reduzidas, alcançou frequência fundamental vertical de 500 Hz e horizontais de 200Hz.

*Transmissão de Carga- novamente considerando a placa superior rígida à flexão, tem-se:*

1. *para solicitações verticais as cargas (figura 2.23), aplicadas na região central da plataforma, movem-se para os pontos de apoios localizados próximos aos cantos da placa superior; então flexionam transversalmente e atravessam longitudinalmente os transdutores tipo viga em balanço, transmitem-se através do elemento central D, atravessam os elementos B e retornam à região central pelos elementos C, alcançando a reação do solo nos blocos;*

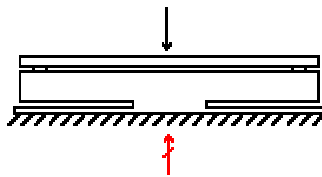


Figura 2.23 – Esquema da transmissão de cargas verticais

2. *para solicitações horizontais na direção X a diferença, com relação ao carregamento vertical, é que a flexão dos elementos A é lateral, a transmissão dos esforços através do elemento central D é axial, a flexão dos elementos B é lateral e os elementos C são solicitados axialmente; Solicitações horizontais na direção Y (figura 2.24), por sua vez, solicitam axialmente os elementos A, flexionam lateralmente o elemento central D, transmitem-se axialmente através dos elementos laterais B, flexionando*

*lateralmente os elementos C e sendo reagidos pelos blocos solidários ao solo;*

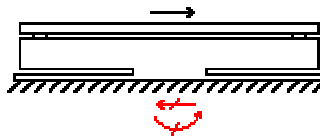


Figura 2.24 – Esquema da transmissão de cargas horizontais

*Aspectos dos Elementos Transdutores- todos elementos transdutores funcionam como vigas. Para as vigas que funcionam em balanço, A e C, as considerações encontradas em Whitney e Petersen podem ser utilizadas. Para o elemento B, o qual é solicitado em sua região central, estando apoiado em suas duas extremidades vale ressaltar que, diferentemente do elemento tipo viga em balanço, o ponto de máxima deformação coincide com o ponto de máximo deslocamento, localizando-se exatamente no local de aplicação do carregamento.*

*Aspectos de Construção- com a concepção de construção apresentada por Lywood, esta configuração necessita muitas uniões para sua construção, de forma que vários componentes diferentes deverão ser confeccionados separadamente. Com isso, sua montagem é problemática.*

*Aspectos de Custo- o número de componentes indica alto custo de manufatura, mesmo utilizando-se processo comuns de fabricação mecânica.*

*Julgamento- o maior mérito desta configuração diz respeito à simplicidade do princípio de funcionamento utilizado. Outros aspectos positivos são apontados abaixo:*

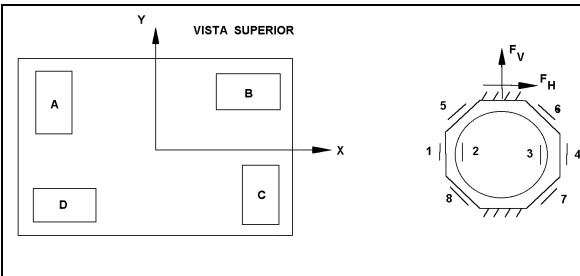
- *facilidade de instrumentação e posicionamento dos sensores;*
- *saídas individuais para cada variável medida, de acordo com direções preferenciais de deformação;*
- *linearidade dos transdutores utilizados;*
- *possibilidade de providenciar rigidez, separadamente para cada direção,*

de acordo com a aplicação prevista;

Como aspectos negativos, cita-se:

- ocorrência de desvios na transmissão de cargas verticais e horizontais;

Quadro 9– Plataforma de Forças de Hull, Brewer e Hawkins, 1995

<p><i>Descrição-</i></p> <p>Esta plataforma é essencialmente um versão aumentada do pedal dinamométrico para bicicletas apresentado originalmente por Hull e Davis em 1981. Este projeto incorpora quatro anéis como elementos elásticos, os quais ligam a superfície de contato à placa base que é fixada ao chão. O conjunto destas quatro células é utilizado para obtenção de todos os esforços e todos os momentos da plataforma. Como cada anel utiliza oito extensômetros, a plataforma toda utiliza trinta e dois.</p>	
 <p>Figura 2.25 – Plataforma de forças de Hull, Brewer e Hawkins. No detalhe o modelo de célula de carga utilizado.</p>	<p><i>Dimensões da Superfície de Contato</i></p> <p>0,6096m<sup>2</sup></p>
	<p><i>Variáveis Medidas</i></p> <p>Fz, Fx, Fy Mx, My, Mz</p>
	<p><i>Aplicação</i></p> <p>Estudos da cinética humana</p>

*Configuração Estrutural-* praticamente as mesmas considerações utilizadas na crítica à plataforma de Cunningham podem ser reutilizadas aqui, pois a diferença entre elas reside na configuração dos transdutores utilizados que, no primeiro caso eram vigas-colunas e, no presente caso, são células octogonais. Tendo rigidez diferentes para as duas direções horizontais, os transdutores do tipo anel devem ser posicionados diferentemente junto às placas que constituem a plataforma, introduzindo uma não simetria inexistente na configuração com vigas-colunas idênticas. Esta não simetria, porém, contribui para o aumento da rigidez em ambas direções horizontais. Com isso, esta plataforma de forças alcançou frequência fundamental vertical de 260 Hz e

*horizontais de 120Hz, conforme Hull, 1995.*

*A transmissão de cargas repete o apresentado em Cunningham, 1952.*

*Aspectos do Elemento Transdutor- a célula octogonal sob solicitação diametral é um dos mais utilizados esquemas para construção de células de carga, tanto para solicitações estáticas quanto dinâmicas. Sua instrumentação é simples, desde que adequadas dimensões sejam preservadas para isto. Para o desacoplamento das componentes de força faz-se necessário pós-processamento matemático, uma vez que a solicitação em uma única direção ocasiona deformações em ambas direções de medida.*

*Aspectos de Construção- diferenciam de Cunningham apenas com relação à confecção do transdutor.*

*Aspectos de Custo- a manufatura dos elementos transdutores representa o maior custo de manufatura desta configuração de plataforma de forças.*

*Julgamento- a grande melhoria adotada no presente caso diz respeito à fixação ao solo ter sido realizada em mais do que quatro pontos. Outros aspectos positivos desta configuração são sua simplicidade de manufatura, a pequena quantidade de material utilizada e a possibilidade de otimização da posição dos apoios da superfície de contato;*

*Como aspectos negativos, cita-se a necessidade de pós-processamento matemático intrínseca e a utilização de ligações parafusadas diretamente sobre os elementos transdutores;*

#### Quadro 10 – Plataforma de Forças de Paul, 1967 e Mcleish 1972

*Descrição-*

Esta plataforma foi suspensa com lâminas de aço instrumentadas, capazes de capturar as deformações ocasionadas pela aplicação de forças na superfície de contato. Não foram encontrados os relatos destes dois desenvolvimentos, de forma que apenas os apontamentos feitos por Gola, 1980 e Roesler, 1997, foram utilizados nesta sucinta apresentação.

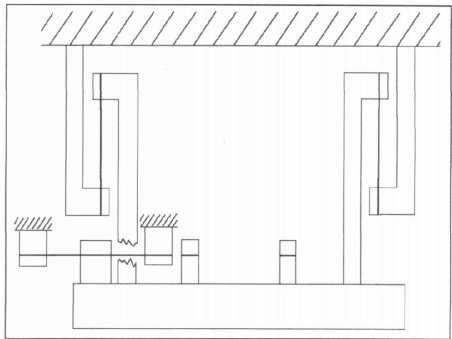
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	
	<i>Variáveis Medidas</i>	
	<i>Aplicação</i>	Análise das forças humanas nas juntas do quadril

Figura 2.26 – Plataforma de forças de Paul, 1967 e McLeish, 1972. Extraída de Gola, 1980

Quadro 11 – Plataforma de Forças de Gola, 1980

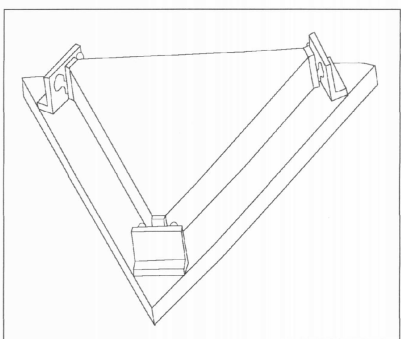
<p><i>Descrição-</i></p> <p>Nesta plataforma de forças, a superfície de contato suspensa tem a forma de um triângulo equilátero, feito de um composto com honeycomb entre chapas de alumínio. Esta superfície é suspensa em seis pontos, dois em cada vértice, por elementos elásticos instrumentados. Esta plataforma diferencia-se de todas as demais por ser uma configuração estrutural estaticamente determinada.</p>		
	<i>Dimensões da Superfície de Contato (cm)</i>	62 x 62 x 62
	<i>Variáveis Medidas</i>	Fz, Fy, Fx Mz, My, Mx
	<i>Aplicação</i>	Análise de várias atividades, incluindo as atléticas

Figura 2.27 – Plataforma de forças de Gola. Extraída de Gola, 1980

*Configuração Estrutural-* esta plataforma consiste de uma placa triangular suspensa por dois pontos em cada vértice, os quais representam células de carga especialmente confeccionadas para esta aplicação. Este arranjo torna esta configuração estrutural estaticamente determinada, ao contrário de todas

*as demais plataformas que se tem conhecimento. Para solicitações horizontais o sistema pode ser visto com um corpo rígido com todos os movimentos restringidos. Para solicitações verticais, o comportamento do sistema é ditado pela placa superior e seus respectivos suportes. Sendo confeccionada de material composto, a frequência de vibração vertical desta configuração ficou em 190Hz. Acredita-se que o posicionamento dos suportes da placa superior contribuíram na obtenção deste valor de frequência fundamental.*

*A transmissão de cargas, novamente considerando a superfície de contato rígida à flexão, pode ser brevemente descrita assim:*

- 1. para solicitações verticais, as cargas aplicadas no centro da superfície de contato movem-se através desta superfície até alcançarem seus vértices, onde o equilíbrio estrutural é processado.*
- 2. Para cargas horizontais a superfície de contato atua com um corpo rígido, induzindo esforços normais aos elementos transdutores.*

*Aspectos do Elemento Transdutor- estes elementos foram especialmente projetados para esta aplicação, de maneira a fornecer as saídas desejadas. De acordo com Gola, 1980, a vantagem obtida com a utilização destes elementos é que suas posições no espaço não são afetadas pela deformação da placa superior, não sendo submetidas a flexão, de forma que, em um primeiro grau de aproximação, teoricamente não ocorrem interferências entre os transdutores. Praticamente, este comportamento foi comprovado.*

*Aspectos de Construção- a maior atenção deve ser em relação à manufatura dos elementos transdutores pois sua geometria é incomum. Os outros componentes são de simples manufatura. Outro ponto fundamental é a interconexão entre os elementos transdutores e a superfície de contato, pois esta conexão é feita proximamente aos sensores, de forma que qualquer micromovimento introduzirá não-linearidade ao sistema.*

*Aspectos de Custo- com exceção aos elementos transdutores, todos componentes são de fácil confecção e baixo custo. A placa de material composto, os elementos transdutores e a montagem do sistema tendem a*

*aumentar o custo devido ao tempo de requerido.*

*Julgamento- os aspectos positivos desta configuração são:*

- *A utilização de elementos transdutores especialmente projetados para esta utilização;*
- *pequena quantidade de material utilizada;*

*Como aspectos negativos, cita-se:*

- *dificuldades na calibração;*
- *necessidade de utilização de superfície de contato com formato triangular;*

Além destes projetos pioneiros, foram estudados projetos de plataformas de forças advindos destas idéias fundamentais. Dentre estes, o trabalho desenvolvido na UFRGS por Bagesteiro, 1996, teve o mérito de utilizar com sucesso os conceitos desenvolvidos por Hull, 1995. Para isto, além do redimensionamento das células de carga e placas (superfície de contato e base) necessário para a aplicação desejada, que consistia na medição das variáveis envolvidas durante a realização do movimento de partida em natação, fez-se necessária a concepção de um software que fizesse o pós-processamento dos registros obtidos por diferentes canais de medição. Apenas após este processamento os valores assumidos pelas variáveis medidas ficavam conhecidos.

Tendo utilizado superfície de contato e placa base de alumínio (figura 2.28) com dimensões de 500 x 500mm, ao final da construção de sua plataforma Bagesteiro obteve um instrumento com frequência fundamental igual a 205Hz, indicando a não ocorrência de erros apreciáveis nas medidas propostas. Conforme havia sido salientado por Hull, 1995, Bagesteiro também encontrou dificuldades relacionadas à união entre os transdutores e as placas superior (superfície de contato) e inferior (base).

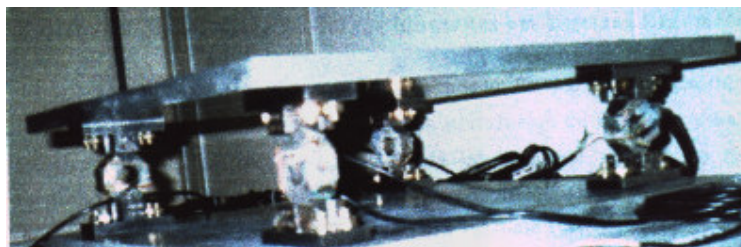


Figura 2.28 – Plataforma de forças de Bagesteiro, 1996. Extraído de Roesler, 1997

Após este desenvolvimento, acompanhada de outros pesquisadores do Laboratório de Vibrações e Dinâmica Estrutural do Departamento da Engenharia Mecânica da UFRGS,

Bagesteiro promoveu, através de análise numérica, a comparação entre resultados numéricos e os resultados experimentais obtidos em seu desenvolvimento. Com isso, comprovou-se que as hipóteses assumidas na discretização realizada na análise numérica de sua plataforma eram admissíveis e demonstrou-se que a fixação do instrumento ao solo é uma variável fundamental para a resposta dinâmica do instrumento.

Outro projeto desenvolvido na UFRGS foi o de Hélio Roesler 1997, que destacou-se por ter implementado a capacidade de captação dos três momentos de força presentes na superfície de contato para uma plataforma subaquática, a partir do projeto base de Lywood et al. De forma similar ao realizado por Lywood para as componentes de força, todos os três momentos de força implementados eram fornecidos por circuitos tipo ponte de Wheatstone independentes, evitando operações entre canais de medição. Neste desenvolvimento, Roesler redimensionou a configuração de Lywood para cargas exercidas por seres humanos realizando atividades em piscinas, tais como hidroginástica. Diferentemente de Lywood, para melhorar o desempenho da modelo final (confeccionado após a comprovação de funcionamento da configuração escolhida através da montagem de um protótipo), Roesler utilizou um elemento central ( $D$ ) constituído por duas vigas de seção retangular. De qualquer forma, sendo que este desenvolvimento utilizou o mesmo princípio de funcionamento de Lywood, as mesmas considerações feitas anteriormente com relação à configuração de Lywood podem ser reutilizadas aqui, sem perdas. A frequência fundamental obtida para o modelo final de Roesler, com superfície de contato com dimensões de 500 x 500mm e utilizando aço como matéria prima para todos os componentes com função mecânica, foi de 35 Hz, adequada às aplicações subaquáticas previstas.

Com relação às limitações encontradas, Roesler afirmou: “em projetos de plataformas de forças extensométricas o caso ideal seria alta sensibilidade associada com alta rigidez, em ordem de aumentar a frequência fundamental de vibração. Desde que sensibilidade é inversamente relacionada com a rigidez, este caso ideal não pode ser obtido”. Além do ganho em valor fornecido ao instrumento pela implementação de capacidade de medição dos momentos e capacidade de utilização em ambiente aquático, ao final do trabalho, Roesler forneceu um instrumento com custo de fabricação inferior aos poucos similares internacionais avaliados e níveis de desempenho compatíveis com estes similares comerciais. A figura 2.29 apresenta a plataforma de forças construída por Roesler em fase de calibração.



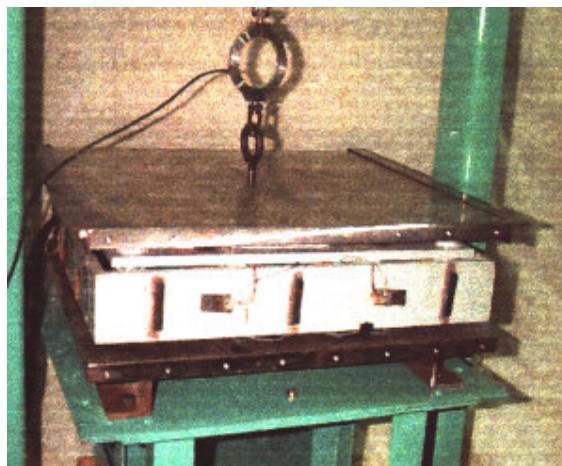


Figura 2.29 – Plataforma de forças de Roesler durante processo de calibração. Extraído de Roesler, 1997

As faixas de freqüência e componente vertical de força nas quais cada plataforma apresentada pode ser usada podem ser estimadas de acordo com cada aplicação. A Tabela 2.2 abaixo relaciona as referidas informações para os projetos que tiveram estes dados publicados. As direções X, Y e Z são referentes ao sistema de coordenadas cartesianas próprio de cada plataforma.

Tabela 2.2 - Faixas de utilização- valores em freqüência e força ( Fontes: Cunningham e Brown, 1952; Petersen, 1965; Bonde-Petersen, 1975; Gola, 1980; Hull, Brewer e Hawkins, 1995; Laranja, 1997; Lywood et al., 1997; Roesler, 1998)

Projeto	Faixa de forças (N)	Faixa de freqüência (Hz)	Freqüências fundamentais (Hz)		
			X	Y	Z
Cunningham e Brown, 1952		0 – 70	105*	105*	140*
Petersen, 1965	0 - 200	0 – 65			126
Bonde-Petersen, 1975		0 – 25			50
Gola, 1980		0 – 80	≥190	≥190	190
Hull, Brewer e Hawkins, 1995		0 – 130	120	120	260
Bagesteiro, 1996	0 - 10000	0 – 100			205
Lywood et al., 1997	0 - 40	0 - 300	200	200	500
Roesler, 1997	0 - 4000	0 – 20			35

\*na publicação de Cunningham e Brown os valores de freqüências alcançados são referidos como: “... *The force plate has a low natural frequency, 105 cycles per second in shear, and 140 cycles per second in torque.*”

Ao final da pesquisa do Estado da Arte em projeto de plataformas de forças extensométricas verifica-se que todas as plataformas reportadas cientificamente são compostas de um mínimo de dois componentes:

1. 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*;
2. o(s) transdutor (es) propriamente dito (s);

de forma que estes projetos têm um mínimo de duas conexões a serem efetuadas, quais sejam:

- entre a superfície de contato e o transdutor;
- entre o (s) transdutor (es) e o solo;

A respeito das configurações estruturais utilizadas vê-se que, primordialmente, plataformas de forças foram constituídas a partir de uma placa ligada à elementos transdutores extensométricos de uso difundido, de forma que as características destes elementos determinam o desempenho da plataforma. A atitude de Gola em projetar um transdutor específico foi considerada completamente adequada para o desenvolvimento de um instrumento com aplicações específicas como é o caso de uma plataforma de forças. Por outro lado, Lywood inovou ao fazer com que os elementos transdutores de sua configuração constituíssem uma estrutura independentemente da fixação à superfície de contato de sua plataforma, o que resultou na obtenção da maior frequência fundamental dentre todos os projetos reportados (devendo-se considerar ser o protótipo desenvolvido por Lywood de dimensões reduzidas).

De acordo com os relatos, as formas de desacoplar as componentes de medida dividem-se em desacoplamento através de pós-processamento matemático e desacoplamento através da utilização de um circuito tipo ponte para cada variável medida (cancelando saídas indesejadas). Esta última forma é considerada mais adequada por dispensar a concepção de um software com função de agrupar e tratar os dados obtidos por diferentes canais de medição e, só então, fornecer a saída para cada variável medida.

Com relação às características dinâmicas obtidas pelas configurações apresentadas ressalta-se que para uniões entre componentes padronizou-se a utilização de ligações parafusadas, as quais deveriam ser evitadas. A utilização de materiais mais leves como alumínio e materiais compostos para diminuição de massa estrutural teve suas vantagens evidenciadas, respectivamente, nos desenvolvimentos de Hull, 1995 e Gola, 1980. Por outro lado, a necessidade de rigidez da fixação da plataforma ao solo foi evidenciada pelo trabalho de Bagesteiro, 1997, posterior ao seu desenvolvimento.

Um último apontamento dentro da revisão do estado da arte em projetos de plataformas de forças realizada diz respeito à mudança das características dinâmicas de uma plataforma de

forças durante sua utilização. Payne, 1968, afirma que o corpo humano na plataforma não altera a frequência natural da plataforma na mesma proporção da massa corporal, pois o corpo humano não é uma massa rígida fixada na plataforma. De forma concordante, Marsden & Montgomery, 1972, afirmam que quando a pessoa encontra-se sobre a plataforma a massa do sistema mecânico é aumentada de um valor pertinente à massa da pessoa sobre a plataforma. Como consequência deste aumento de massa total (corpo + plataforma) é apontada a redução do valor do coeficiente de amortecimento e da frequência natural do sistema, sendo esta redução mais pronunciada em plataformas de pequenas dimensões, onde a razão entre a massa da pessoa e a massa da plataforma é maior.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica do presente trabalho inicialmente caracteriza o problema, e após o define, revelando:

1. os aspectos condicionantes do problema, que dizem respeito:
  - à função de excitação exercida sobre o sistema plataforma de forças;
  - ao comportamento necessário aos elementos elásticos a serem utilizados;
2. as características necessárias para o adequado funcionamento do sistema;
3. limitações básicas relatadas em projeto e construção de plataformas de forças;

Ao final são apresentadas as ferramentas juntamente com os procedimentos utilizados no desenvolvimento e avaliação das alternativas geradas na solução do problema.

#### 3.1 Caracterização do problema

Sistemas mecânicos em geral, quando submetidos a ações variáveis no tempo apresentam respostas (deslocamentos, velocidades, acelerações) variáveis no tempo. De acordo com Riera, 1996, quando as forças de inércia atuantes no sistema são pequenas frente às demais forças atuantes diz-se que o problema é pseudo-estático. Para possibilitar a caracterização do problema em estudo como pseudo-estático utilizou-se a seguinte relação, de acordo com Juvinall, 1967:

- se o tempo requerido para aplicar a carga, isto é, o aumento de carga do zero até o seu valor máximo, é menor que metade do período fundamental da estrutura, o carregamento deve ser considerado de impacto e as forças de inércia não podem ser negligenciadas;
- se o tempo de carregamento é maior do que três vezes o período fundamental da estrutura, os efeitos dinâmicos são negligenciados, e o comportamento estático pode ser assumido;

Para que uma destas relações fosse comprovada a frequência natural do sistema de medição deveria ser conhecida. Então, no intuito de estabelecer a relação definida por Juvinall, atribuiu-se o valor hipotético de 400Hz para a frequência fundamental da plataforma de forças. Por outro lado, o tempo médio de carregamento pode ser estimado em 0.0087s a partir dos dados publicados por Bosco, Luthanem e Komi, 1976. A relação é então estabelecida:

$$\begin{aligned}
 t^* &= 0,0087s \\
 f_1 = 400 \text{ Hz} &\Rightarrow T = 0,0025s \\
 3T &= 0,0075s
 \end{aligned}$$

$$t^* > 3T$$

onde:

$t^*$  = tempo médio de carregamento (s);

$f_1$  = frequência fundamental (Hz);

$T$  = período de oscilação na frequência fundamental (s);

O resultado obtido permite que os efeitos dinâmicos deste carregamento sejam negligenciados e, para fins de projeto estrutural, comportamento estático seja assumido.

### 3.2 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 saltos atléticos. 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 chão. Este vetor de força é tridimensional e para o propósito de análise, é comumente dividido em suas componentes (Laranja, 1997). O vetor força que atua na superfície de contato da plataforma é idêntico ao vetor de força de reação do chão, 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 ( $F_x$ ) (figura 3.1). 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 3.1 – 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.

### 3.2.1 Magnitude das forças de reação do solo durante a decolagem

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 100 ms até mais de 1 s (Baumann, 1981, McClay et al, 1994) (Hennig, 1998). Conforme apresentado por 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 (figura 3.2).



Figura 3.2 – Sapatilha com crivas utilizada em saltos atléticos

### 3.2.2 Espectro de frequências presentes no movimento

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. Payne, 1968, afirma que “a taxa de mudança da força em muitos movimentos humanos normais corresponde a aproximadamente 20 ciclos por segundo”, ou seja, a 20Hz. Porém, continua o referido autor, “em algumas atividades esportivas este valor pode ser consideravelmente maior”. 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.

### 3.2.2.1 Identificação do conteúdo de frequências presentes na excitação do sistema

A tentativa deu-se a partir de registros experimentais de um ensaio onde tentou-se reproduzir a realização de um salto em distância utilizando-se uma plataforma de forças extensométrica comercial, marca AMTI, como tábua de impulsão. Os registros correspondem às três componentes de força presentes na fase de contato pé – superfície de contato da plataforma durante a decolagem para o salto em distância de uma atleta profissional recrutada junto à Sociedade Ginástica de Porto Alegre (SOGIPA). Os equipamentos utilizados no experimento estão listados abaixo:

#### 1. Plataforma de forças extensométrica (figura 3.3):

*Marca AMTI- Advanced Mechanical Technology, Inc.*

*Modelo OR6-7 1000*

Capacidade Fx, Fy (N)	2225
Capacidade Fz (N)	4450
Frequência natural Fx, Fy (Hz)	300
Frequência natural Fz (Hz)	480
Peso (Kg)	32



Figura 3.3 – Plataforma de forças extensométrica utilizada

#### 2. Sistema de Aquisição de sinais Peak Performance, equipado com micro computador e software de Aquisição de Dados SAD32. O SAD32 é um software de aquisição e processamento de sinais desenvolvido por Luciano Maciel e Milton Antônio Zaro no Laboratório de Medições Mecânicas pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS (Manual do usuário, 1997).

O ensaio foi realizado da seguinte maneira:

- a plataforma, localizada no interior de um pavilhão esportivo (*indoor*), foi colocada em uma posição tal que a atleta pudesse tomar velocidade a partir da parte externa do ginásio, e, através de uma grande porta, entrasse correndo no ginásio;

- a plataforma foi recoberta por uma manta sintética (*tartam*);
- colchões de espuma foram localizados na área destinada à aterrissagem da atleta;
- a atleta foi instruída a reproduzir o mais fielmente possível a situação real de salto;

Os registros obtidos para as componentes de força podem ser visualizados na figura 3.4 abaixo.

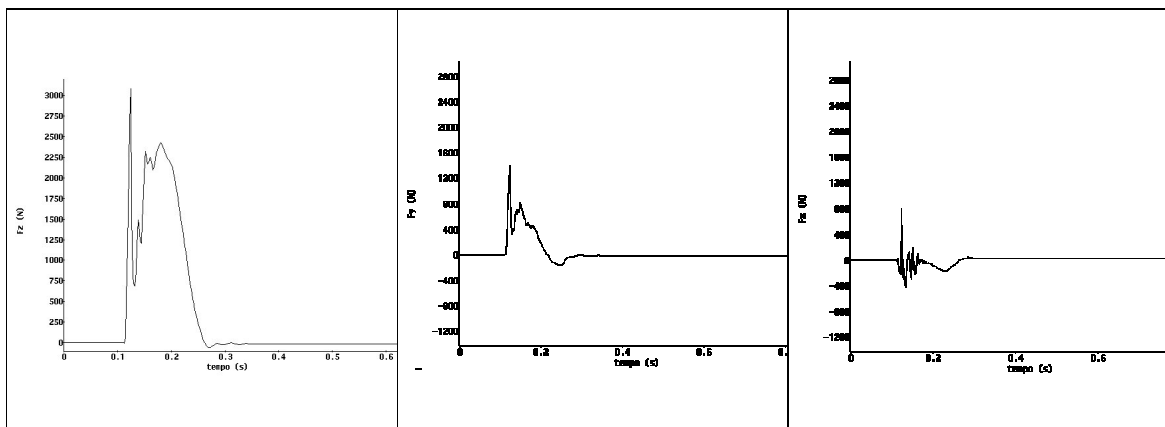


Figura 3.4 – Representação temporal da três componentes de força,  $F_z$ ,  $F_y$  e  $F_x$ , respectivamente.

A atividade em estudo caracteriza um fenômeno transiente. A componente de maior influencia na realização do movimento é a componente de força vertical. Esta componente e a componente antero-posterior possuem o menor tempo de carregamento, 0,012s, que é o tempo requerido para a carga aumentar a partir do zero até seu valor máximo. 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. Os valores da componente vertical de força para os cinco picos positivos do sinal adquirido são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 3.1 - Valores da componente vertical de força do salto amostrado

nº pico	tempo (s)	força (N)
1	0,124	3082
2	0,138	1492
3	0,152	2323
4	0,160	2246
5	0,180	2417

O sinal adquirido durante a realização do evento em estudo pode ser representado de duas formas: no domínio tempo ou no domínio frequência. A segunda maneira representa o sinal pelas frequências que o compõem, baseando-se na transformada de Fourier, através da utilização do



algoritmo numérico de transformada rápida de Fourier (FFT). Características sobre esta transformação podem ser encontradas em qualquer livro clássico de tratamento de sinais, como Bendat e Piersol, 1971. Como o sinal é transiente, uma maneira de tratá-lo utilizando transformada de Fourier é expandi-lo periodicamente e, então, aplicar a transformação. Foram utilizadas duas abordagens para a expansão: na primeira, a parte do sinal correspondente ao tempo de contato sobre a plataforma foi invertida e após concatenada com a curva normal original, sendo então feita a expansão periódica deste sinal gerado. Na segunda abordagem fez-se a expansão periódica dos sinais originais considerando um período de repouso entre eles. O período de repouso utilizado inicialmente corresponde a 3 vezes o valor do período de duração do sinal transiente ( $3T$ ), após utilizou-se  $5T$  e  $7T$  como repouso na tentativa de confirmar e refinar o resultado obtido. Este tratamento deu-se através da utilização do software SAD-32.

As maiores frequências excitadas pelo movimento foram encontradas na componente vertical da força. O tratamento para identificação do conteúdo de frequências presentes no sinal registrado, para a componente vertical da força, é apresentado nas figura 3.5 e figura 3.6.

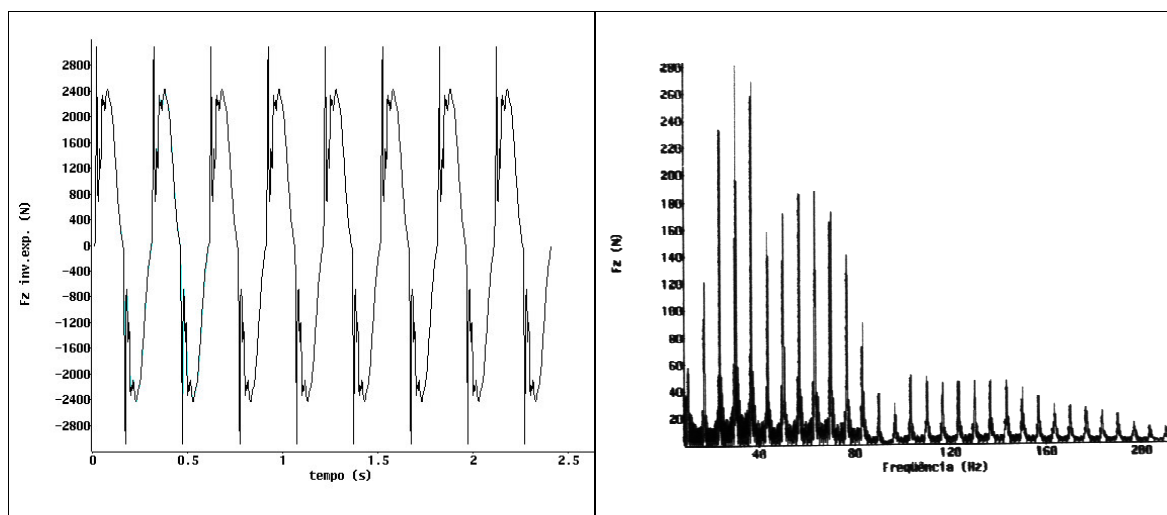


Figura 3.5 – Sinal  $F_z$  concatenado com sua forma inversa e expandido periodicamente e resultado da transformação FFT, respectivamente. (a componente de frequência de aproximadamente 3 Hz, correspondente ao sinal gerado, foi excluída do resultado apresentado para a transformação FFT)

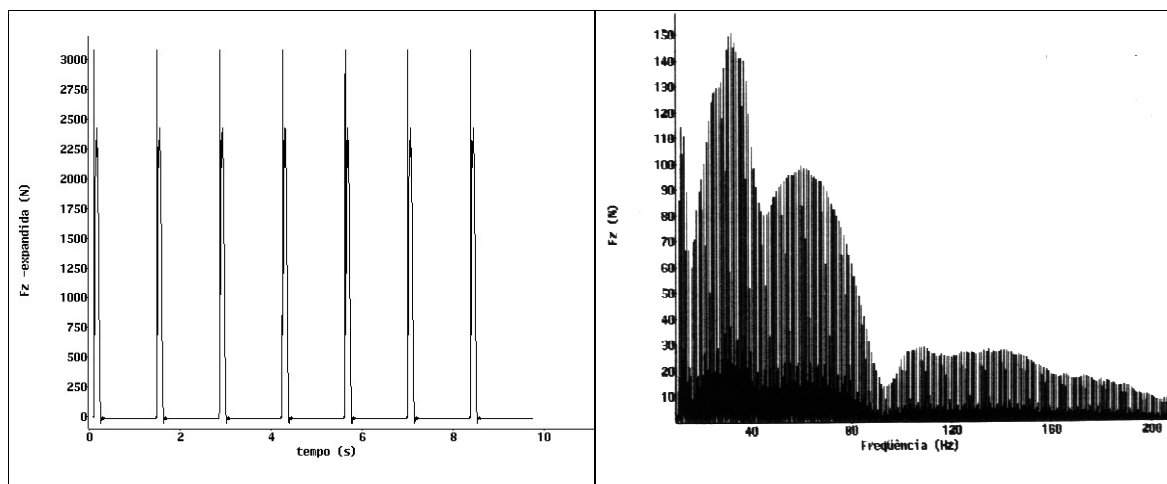


Figura 3.6 – Sinal Fz expandido periodicamente e transformação FFT, respectivamente. (a componente de frequência de aproximadamente 0,7 Hz, correspondente ao sinal gerado, foi excluída do resultado apresentado para a transformação FFT)

Com o tratamento realizado através da utilização de duas abordagens distintas, os mesmos valores para as frequências presentes na excitação foram obtidos. Com isso pode-se afirmar que acima de 200Hz nenhuma componente significativa de frequência é excitada pois é taxativo o decaimento na magnitude do sinal da transformação a partir de 150Hz (ver figura 3.5 e figura 3.6).

As limitações encontradas nesta identificação aproximada do conteúdo de frequência da excitação são listadas abaixo:

- o fato dos ensaios terem sido realizados dentro de um ginásio, em condições grandemente diferentes das condições de treinamento normal, fez com que a atleta demonstrasse receio em saltar. Mesmo assim, a forma das curvas das componentes vertical e antero-posterior adquiridas está de acordo com a literatura especializada do ramo. A componente médio-lateral mostra uma certa diferenciação, talvez devido à referida falta de similaridade entre a situação normal de treinamento e a situação de realização do ensaio.
- Utilizou-se uma baixa taxa de amostragem, igual a 500Hz. Mesmo assim a identificação foi considerada válida pois a partir de 150Hz o desaparecimento das componentes de frequência está evidenciado.

### 3.3 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 níveis de deformação que deverão ser buscados no projeto estão

compreendidos entre  $100 - 500 \mu\epsilon$ , pois assim trabalha-se integralmente na região linear do circuito tipo ponte 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;

O princípio de operação de extensômetros de resistência elétrica está baseado na relação entre a deformação mecânica e a resistência elétrica de condutores elétricos. Os extensômetros, que apresentam uma dimensão finita, quando colados nas regiões apropriadas, converterão a média das deformações mecânicas relativas, dos diversos pontos da superfície em que foram posicionados, em um sinal de saída elétrico com o auxílio da ponte de Wheatstone. A figura 3.7 apresenta uma representação esquemática do princípio de operação de transdutores que utilizam extensômetros de resistência elétrica. Uma detalhada análise deste princípio de funcionamento é encontrada em Leuckert, 2000.

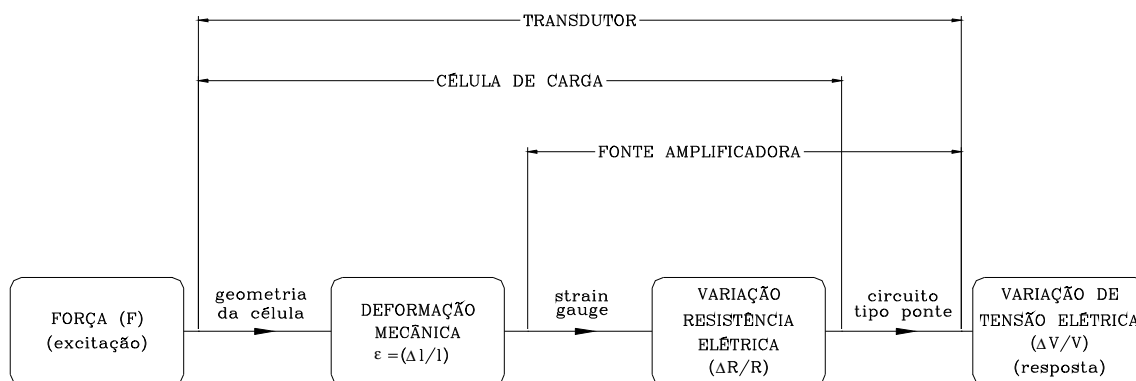


Figura 3.7- Representação esquemática do princípio de funcionamento de transdutores instrumentados com extensômetros de resistência elétrica. Extraído de Todeschini, 1999.

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, sendo que cada uma destas ações provoca deformações em pontos da superfície do elemento elástico. Os valores destas deformações superficiais dependem da posição 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, e a posição dos pontos considerados é a região ocupada pelo extensômetro. Particularizando, ainda conforme Cauduro, as deformações relativas que ocorrem na superfície do elemento elástico devidas à tração, compressão, flexão, torção, tensões residuais ou tensões térmicas, podem ser divididas em dois grupos, quais sejam:

- deformações devidas a tensões normais;
- deformações devidas a tensões normais de cisalhamento.

### 3.4 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.

#### 3.4.1 Características estáticas

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.

A plataforma deve suportar os esforços induzidos por pessoas de grande massa corporal, ( $70 \pm 10$  Kg para os atletas da Sociedade Ginástica Porto Alegre) realizando movimentos que envolvem ação explosiva de força muscular sobre sua superfície. Então, à força soma-se a massa corporal do sujeito ao solicitar a plataforma, indicando a necessidade de uma estrutura com alta resistência mecânica para suportar os esforços induzidos.

#### 3.4.2 Características dinâmicas

Conforme Gola, 1980, 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 equação 3.1 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 num determinado ponto em 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. Matematicamente esta excitação poderia ser representada pela *função delta de Dirac*.

Na figura 3.8 é apresentado um esquema para representar a forma que poderia ter esta função de ganho no domínio da frequência.

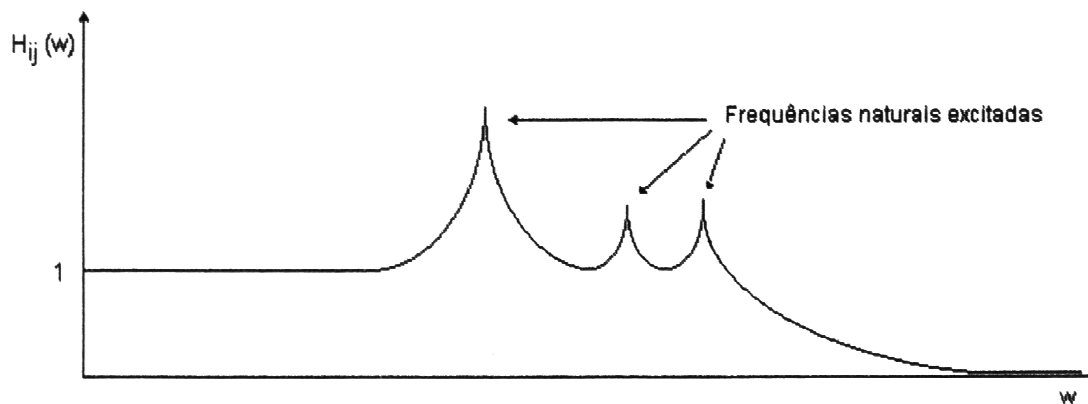


Figura 3.8 – Representação esquemática da função de ganho do sistema

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, representada pela primeira parte da representação esquemática da figura 3.8, onde  $H_{ij}(\omega)$  é constante. Esta região é denominada zona estática do sistema. Trabalhando-se na zona estática do sistema 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. Os funcionamentos desejável e indesejável para o sistema plataforma de forças são representados esquematicamente na figura 3.9 e na figura 3.10 abaixo.

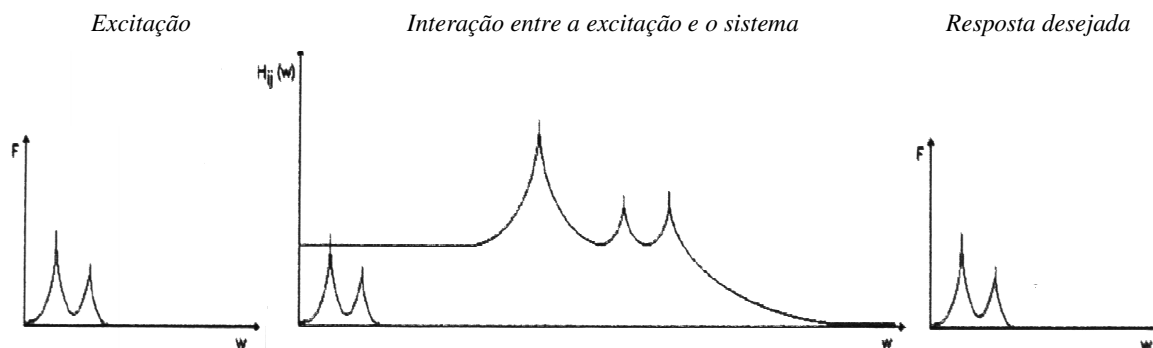


Figura 3.9 – Funcionamento desejado para a plataforma de forças. O gráfico mais à direita da figura representa a resposta pseudo-estática do sistema, sem distorção

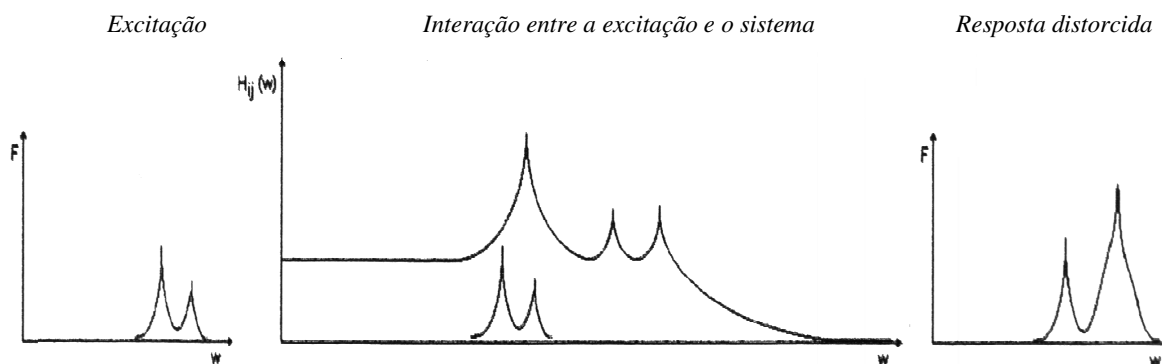


Figura 3.10 – Situação não desejada para a plataforma de forças. O gráfico mais à direita representa a distorção da resposta fornecida pelo sistema ao ser solicitado por excitação com frequência próxima de uma das suas frequências ressonantes

Uma ótima análise analítica da frequência natural de vibração mínima necessária para que a plataforma de força não tenha uma resposta dinâmica ressonante pode ser vista em Roesler, 1998.

De acordo com o estudo da excitação fornecida à plataforma na realização do movimento de decolagem para o salto em distância, especificamente, estima-se razoável projetar uma plataforma de forças com frequência natural vertical de aproximadamente 500Hz, e o máximo valor possível para as demais direções.

### 3.5 Ferramentas utilizadas na solução do problema

A geração, o desenvolvimento e a avaliação das alternativas de solução foram realizadas com o auxílio do Método dos Elementos Finitos que é extensamente utilizado em problemas de engenharia em geral, e em análise estrutural em particular. Inúmeras são as publicações que tratam dos aspectos teóricos do método, sendo um clássico Zienkiewicz, 1981. As aplicações foram feitas no sistema comercial ANSYS 5.5 que permite combinar diversos tipos de análises e elementos, com grande flexibilidade em pré e pós processamento.

As ferramentas numéricas utilizadas na solução do problema são listadas abaixo sendo que uma detalhada descrição destas pode ser encontrada no Apêndice I.

1) Análise estrutural estática – com esta análise foram calculados os efeitos de condições estacionárias de carregamento, as quais não induzem efeitos significantes de inércia ou amortecimento, e efeitos da resposta na estrutura, basicamente tensões e deformações. No contexto do presente trabalho, as análises estáticas dizem respeito à;

- comprovação da resistência mecânica dos componentes da plataforma, através da avaliação dos esforços induzidos aos membros componentes da estrutura e da avaliação dos valores de tensão nas seções críticas da estrutura;
- comprovação do funcionamento extensométrico da alternativa em desenvolvimento, através da comprovação da ocorrência de deformações mecânicas relativas dentro dos limites preestabelecidos nas posições dos extensômetros;

2) Cálculo das propriedades dinâmicas da estrutura (frequências naturais e modos de vibração) - os modos e frequências naturais de excitação de um sistema são, no caso de sistemas lineares, propriedades dinâmicas do sistema que fisicamente expressam as formas e as frequências nas quais a estrutura tem facilidade para vibrar;

3) Resposta em frequência: análise harmônica - esta técnica de análise foi utilizada somente na alternativa final escolhida, no intuito de determinar uma função equivalente à função de ganho do sistema, para uma determinada excitação e resposta determinada;

4) Análise transiente - esta técnica foi utilizada na alternativa final, para a determinação da resposta dinâmica de uma estrutura sob a ação de qualquer carga variando no tempo, de forma que os efeitos de inércia e amortecimento da estrutura são considerados importantes;

5) Superposição modal: cálculo dos coeficientes de participação modal e dos coeficientes modais- para poder quantificar a contribuição de um dado modo na resposta estrutural define-se o coeficiente de participação modal e, alternativamente, o coeficiente modal;

### 3.5.1 Índices de desempenho

Os índices de desempenho foram utilizados sobre as soluções propostas, apenas após a confirmação da ocorrência, sob carregamento mínimo esperado, de deformação mecânica relativa de aproximadamente  $100 \mu\text{m/m}$  nas posições dedicadas à colagem dos extensômetros. Estes índices estão listados abaixo, em ordem decrescente de importância:

- valor da frequência fundamental: é a quantidade determinante da habilidade do instrumento em realizar sua função primordial de medição de forças; devendo ser o maior valor possível, respeitando o requerimento de sensibilidade estabelecido pelo nível de deformação mecânica relativa nas posições dos sensores; Este índice é global, sendo diretamente identificado através da análise modal da configuração estrutural.
- coeficientes de participação modal : conforme definido, estes coeficientes permitem identificar qual a percentagem da resposta da estrutura é responsabilidade de cada um dos modos apresentados.
- valor de deformação mecânica relativa de interferência: mesmo considerando a possibilidade de utilização da técnica de desacoplamento mecânico-elétrico deve-se procurar uma configuração estrutural que dissocie o mais possível as deformações captadas pelos extensômetros nas direções ortogonais da plataforma diferentes da direção da solicitação. Isto porque, assim, o desacoplamento mecânico-elétrico torna-se mais eficiente. Este índice é identificado, para cada uma das três direções de solicitação, através do valor de deformação mecânica relativa registrado nas posições dedicadas aos sensores, na direção de deformação condizente com a orientação de cada extensômetro.



## 4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇAS EXTENSOMÉTRICA UTILIZANDO SENSORES RESISTIVOS

Após a apresentação das considerações básicas para o desenvolvimento de uma plataforma de forças discute-se a viabilidade de desenvolver uma plataforma de forças com alta frequência fundamental utilizando princípio extensométrico resistivo. Na seqüência, as possibilidades de soluções para o sistema, abordando aspectos de construção da plataforma são consideradas. Ao final do capítulo, duas linhas de projeto capazes de serem seguidas são apresentadas.

### 4.1 Considerações básicas de projeto de plataformas de forças

A plataforma deve ser projetada para acomodar o contato do pé com a mínima necessidade de mirar sua superfície de contato. Para providenciar medidas válidas de força deve possuir as seguintes características:

- adequada sensibilidade; é a taxa de mudança no sinal de saída (elétrico) para uma mudança na entrada mecânica. É restringida pela rigidez necessária para maximizar a frequência fundamental da estrutura
- alta linearidade. Um método para quantificar a linearidade baseia-se no desvio máximo do sinal de saída do transdutor em relação a uma linha reta ideal que relaciona a excitação mecânica e a saída elétrica do transdutor.
- baixa histerese. Para um transdutor de forças, 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 permitido por especificações e a outra pela diminuição desde este valor máximo até zero; É tipicamente expressada como percentagem desta maior diferença com respeito ao fundo de escala da saída
- baixa interferência entre os diferentes eixos;
- cuidados especiais devem ser tomados para eliminar as interferências associadas com aberrações nos cabos, condutância elétrica, e variações de temperatura e humidade;
- o amplificador deve ser estável, linear, e proporcionar adequado ganho;
- a escolha do sistema de aquisição deve ser adequada com o fenômeno a ser

mensurado;

- a estrutura da plataforma deve ser relativamente leve e projetada de maneira a providenciar alta rigidez e uma suficientemente elevada frequência natural
- o tempo de resposta deve ser o menor possível. Este tempo é prejudicado quando utiliza-se elementos de grandes dimensões e massa.

#### 4.2 A viabilidade de utilização de princípio extensométrico resistivo

A utilização da plataforma de forças é dependente de sua habilidade para medir cargas dinâmicas precisamente. Desde que os sensores extensométricos resistivos possuem massa extremamente pequena, de forma que o contato com a superfície de teste conduz a medições precisas mesmo para deformações transientes de rápida variação, nenhuma dificuldade é antecipada por esta fonte. As fontes de erro que permanecem possíveis, são as características oscilatórias do sistema elétrico, do sistema eletrônico e do sistema mecânico:

- o sistema elétrico, composto pelos sensores e respectivos circuitos tipo ponte, tem alta frequência natural e seguirá acuradamente as taxas de mudança de deformação ou corrente ocorridas;
- o sistema eletrônico (condicionador de sinais e conversor A/D) responde a taxas elevadas de oscilação, com grandeza variando entre 1 e 5 KHz ( $10^3$  Hz);

O ponto crítico do projeto vem a ser a resposta vibratória do sistema mecânico que compõe a plataforma, uma vez que a resposta do sistema é distorcida para frequências de excitação próximas da frequência fundamental do sistema de medida. Assim, a rigidez é de importância fundamental neste tipo de instrumento para medições dinâmicas. Porém, sabe-se que no projeto de plataformas de forças há um compromisso entre resposta em frequência do sistema e sua sensibilidade, sendo que:

- a resposta em frequência é limitada pela frequência natural do primeiro modo ressonante, que é uma função direta da massa e rigidez do sistema;
- alta rigidez acarreta redução de efeitos cinemáticos na estrutura, fornecendo alta frequência fundamental;
- a sensibilidade é geralmente uma função apenas da rigidez;

Em muitas aplicações o compromisso consiste em minimizar a massa da plataforma, permitindo então a utilização de menor rigidez, e assim maior sensibilidade para a resposta em frequência requerida. Porém, para o presente desenvolvimento, considerando a primordial necessidade da alta resposta em frequência da plataforma, adota-se o compromisso fixado por Tschanz, 1982 de

que para medições dinâmicas concessões na sensibilidade podem ser feitas, de forma a viabilizar a utilização de princípio extensométrico resistivo.

Conclui-se que construir plataformas sob estes requisitos é de fato possível, devendo serem apontadas as falhas inerentes:

- o requerimento de pouca massa é severamente restringido pela resistência mecânica necessária para garantir segurança ao sistema;
- as amplitudes de vibração nos primeiros modos de vibração são significantes (Cook, 1983);
- o nível de sinal elétrico resultante dos circuitos tipo ponte utilizados é pequeno.

Com respeito à compensação de temperatura necessária aos extensômetros de resistência elétrica 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.

Uma consideração final é feita por tratar-se do projeto de uma plataforma multicomponente, ou seja, uma plataforma capaz de medir mais de uma componente de força ou momento de forças, relacionadas aos eixos coordenados que compõe o sistema. Neste tipo de plataformas, é essencial que as forças detectadas em cada plano sejam independentes de qualquer outra força ou movimento, não devendo ocorrer nenhuma *interação* entre força ao longo de um eixo ortogonal e aquelas de outro. Quando presente, esta interação é denominada interferência ou acoplamento. Para evitar a referida interferência, nas utilizações de princípio extensométrico, freqüentemente lança-se mão de uma técnica a qual optou-se denominar de desacoplamento mecânico-elétrico, que consiste no cancelamento das saídas de deformações para as direções não desejadas. Para isto deve-se montar os circuitos de leitura das deformações, pontes de Wheatstone, de forma que para direções diferentes da direção de medida o desbalanço da ponte seja nulo. As maiores dificuldades em sua aplicação dizem respeito ao correto posicionamento e alinhamento dos sensores na colagem.

#### 4.3 A viabilidade econômica

Fez-se uma estimativa dos custos envolvidos na fabricação e posterior instalação da plataforma de forças, supondo-se que esta fosse feita em Alumínio e placa de material composto, conforme apresentado abaixo:

Material / Fabricação/Instalação	Custo
<i> Materiais</i>	
Plataforma de força	
Sensores Strain Gages e acessórios de montagem	U\$ 300,00
Metal para transdutores e estrutura	U\$ 250,00
Fibra de Carbono e Epoxi para tampa	U\$ 500,00
Componentes mecânicos para montagem e calibração	U\$ 150,00
Condicionamento do sinal	
Condicionador multicanal – sem multiplexação	U\$ 2.900,00
Placa de aquisição A/D – Ampla Resposta em Frequência	U\$ 1.300,00
Acessórios elétricos e componentes para montagem	U\$ 50,00
<i>Total em Materiais</i>	<b>U\$ 5.450,00</b>
<i> Fabricação</i>	
Usinagem da estrutura e transdutores	U\$ 650,00
Laminação da tampa	U\$ 300,00
<i>Total em Fabricação</i>	<b>U\$ 950,00</b>
<i> Instalação</i>	
Preparação do local para instalação (mão de obra)	U\$ 50,00
Concretagem da base de apoio (mão de obra + material)	U\$ 75,00
Fixação do instrumento e canais para cabos de transmissão	U\$ 25,00
Acabamento	U\$ 50,00
<i>Total em Instalação</i>	<b>U\$ 200,00</b>
<u><i>Custo Total</i></u>	<b><u>U\$ 6.600,00</u></b>

Sabendo-se que os preços das plataformas de forças comerciais fabricadas no mercado exterior está compreendido entre U\$15.000,00 e U\$ 50.000,00 entendeu-se como economicamente viável desenvolver o referido instrumento. As empresas consultadas foram: Panambra Técnica - sensores e acessórios de montagem; Aeromot - metal, fibra de carbono e epoxi, usinagem e laminação da tampa; LR informática - condicionador multicanal, placa de aquisição, acessórios elétricos e componentes para montagem.

#### 4.4 Discussão sobre possíveis soluções

Ao utilizar-se princípio extensométrico na medição de forças, automaticamente surge a condição de que algum elemento elástico esteja colocado em série com a grandeza física a ser medida. Para uma plataforma de força que, obrigatoriamente, deverá apresentar-se externamente através apenas de sua superfície de contato, este elemento deverá estar posicionados abaixo desta superfície, suportando-a. Então, estando abaixo da superfície de contato o elemento elástico possivelmente atuará como transdutor de força e suporte material para a transmissão do carregamento através do instrumento até o solo. Ou seja, ocorre a indesejável situação onde o papel estrutural e o papel de instrumento de medição devem ser prontamente atendidos pelo mesmo instrumento. Para contornar esta situação, uma alternativa seria prover a estrutura com membros capazes de promover o equilíbrio estrutural e, paralelamente à estes membros, posicionar os elementos elásticos responsáveis pela medição. De qualquer maneira, a sensibilidade dos elementos elásticos estaria sujeita às restrições de deformação impostas pelos membros estruturais utilizados.

No item anterior estabeleceu-se que concessões na sensibilidade em prol das características dinâmicas da plataforma aparecem como uma alternativa a ser seguida. Neste sentido, fez-se uma consulta técnica a um especialista em instrumentação, Dr Renato Brito, professor no Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS, tomando-se conhecimento dos seguintes aspectos:

- é plenamente admissível trabalhar-se com deformações mecânicas relativas maiores que 20  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;
- com 100  $\mu\text{m}/\text{m}$  de deformação mecânica relativa pode-se condicionar o sinal de forma a filtrar praticamente todo ruído presente;
- a sensibilidade pode ser melhorada a partir de um criterioso condicionamento do sinal;
- os níveis de ruídos comuns em instrumentação correspondem, em deformação, a aproximadamente 2  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;

Assim, de acordo com a situação procurada, pode-se utilizar uma solução onde os níveis de deformação ocorrentes estejam abaixo dos níveis médios usualmente utilizados em extensometria.

Conforme outra consulta técnica informal, realizada com o professor do Departamento de Engenharia Civil, Jorge Daniel Riera, para alcançar alta frequência fundamental de oscilação em

uma estrutura metálica, a melhor solução seria criar projeto criterioso que permita a fabricação da plataforma em um bloco monolítico, com os sensores instalados. Com isso, uniões e seus inconvenientes (atrito seco e conseqüente amortecimento, indução de micro-movimentos e aparente histerese) seriam evitadas. Porém, para fabricar a superfície de contato juntamente com o transdutor da plataforma, ambos teriam de advir de um bloco metálico de grandes dimensões, e por outro lado, o processo de fabricação indicado seria eletro-erosão, de custo alto e difícil acesso. Com isso vislumbrou-se outra alternativa, que consiste na confecção da superfície de contato separadamente do transdutor, sendo este último confeccionado em uma peça só. Com a concepção de um transdutor com forma geométrica relativamente simples, pode-se utilizar usinagem para a fabricação, sendo que o transdutor pronto deveria ser encaminhado para um posterior alívio de tensões induzidas na manufatura. O fato de ter-se apenas um bloco transdutor ainda evitaria diferenças advindas da fabricação de células de carga individuais tradicionalmente utilizadas nos projetos de plataformas de forças.

Inerente à utilização de um bloco monolítico como transdutor é a ocorrência de acoplamento mecânico, ou seja, ao ser solicitada, toda a estrutura exerce esforço para suportar a solicitação, de forma que deformações são ocasionadas. Porém, conforme apresentado anteriormente, a técnica de desacoplamento mecânico-elétrico pode ser empregada.

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, para que o requisito de alta frequência fundamental não seja penalizado, deve-se utilizar uma configuração estrutural na qual esteja presente apenas a massa indispensável para promover a resistência mecânica que garanta a segurança de utilização do equipamento. A alternativa óbvia é utilizar, para o transdutor, metal menos denso que o aço, porém com características de resistência mecânica comprovadas. Algumas ligas de alumínio podem aliar leveza com alta resistência mecânica. Mesmo com o módulo de elasticidade significativamente menor do que o aço, a densidade do alumínio permite trabalhar com mais volume de material na busca de seções com momentos de inércia maiores. Para a superfície de contato pode-se utilizar materiais que aliem propriedades antagônicas como rigidez e resistência mecânica com pouca massa, ou seja, materiais compostos que atuem sob o princípio da ação combinada. A frequência fundamental da superfície de contato pode ainda ser maximizada através do posicionamento dos pontos de união com o transdutor, os quais representam a fixação desta superfície.

De acordo com o apresentado, deve-se buscar uma plataforma com o menor número de componentes. Para as uniões indispensáveis, deve-se observar a adaptabilidade do material do

parafuso e da base. Para garantir que o instrumento comporte-se da mesma maneira sob diferentes carregamentos, pode-se calcular a protensão que garanta a não suscetibilidade do instrumento para com a excitação, mesmo sendo esta excitação de natureza dinâmica. As implicações seriam que protensões altas comprometem a vida útil da peça (devido à fadiga); a presença de protensões relaxadas aumenta significativamente o amortecimento do sistema, e o nível de protensão pode variar com a temperatura.

#### 4.5 Formulação de linhas de projeto de plataformas de forças

De acordo com a discussão de possibilidades apresentadas, qualquer concepção física considerada plausível deverá obrigatoriamente atender os seguintes aspectos:

- vincular a superfície de contato sobre o transdutor da plataforma;
- vincular o transdutor da plataforma ao chão;

Considerando estes aspectos, os desenvolvimentos com funcionamento prático já comprovado, as idéias e sugestões ocorridas no decorrer deste trabalho, foram formuladas duas linhas de projeto que podem ser seguidas.

A *primeira linha de projeto* formulada diz respeito à conveniente utilização de um bloco monolítico como transdutor que suporte a superfície de contato e seja capaz de possuir direções preferenciais de deformação. Uma representação esquemática para este caso é apresentada abaixo, na figura 4.1.

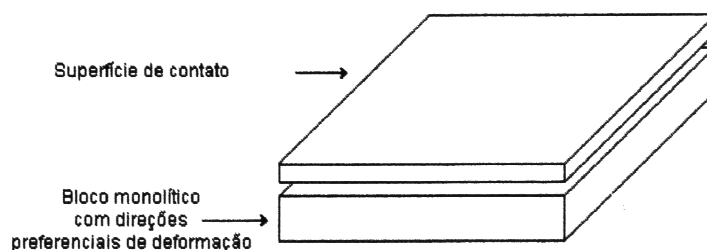


Figura 4.1 – Representação esquemática da linha de projeto 1

A concepção física adotada pressupõe que, a partir da transmissão do carregamento externo através da superfície de contato, o transdutor deforme-se preferencialmente, em pontos pré-determinados, para cada uma das três direções. Há registros de utilização com sucesso de transdutores que possuem a referida deformação preferencial por direção, como o de Roesler, 1998, porém nenhum foi feito em uma só peça metálica. Nesta concepção, utilizando-se um circuito ponte de Wheatstone completa para cada direção, pode-se fazer com que o sistema

forneça diretamente a parcela de carga pertinente a cada direção, dispensando pós-processamentos. A construção do transdutor em uma só peça evita a necessidade de um terceiro elemento de base que garanta o paralelismo solo/superfície de contato. As vantagens e desvantagens desta abordagem estão sucintamente listadas abaixo:

- | Vantagens   | Desvantagens   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• a confecção de um transdutor em um bloco monolítico, possibilitando a utilização de ligas metálicas e providenciando melhor repetibilidade,</li> <li>• a rigidez direcional adequada com a solitação externa esperada é possibilitada;</li> <li>• princípio de funcionamento simples;</li> <li>• funcionamento prático da deformação preferencial por direção comprovado;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• transdutor deve possuir no mínimo uma região de menor rigidez em cada uma das três direções;</li> <li>• dificuldades relativas ao processo de fabricação de um bloco monolítico;</li> </ul> |

A *segunda linha de projeto* seria basicamente uma superfície de contato suportada em um bloco metálico monolítico deformável, porém sem a necessidade de possuir direção preferencial para as deformações. A representação esquemática desta linha é apresentada na figura 4.2 abaixo.

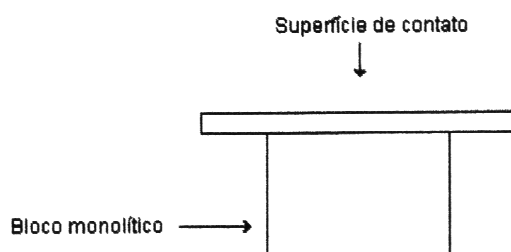


Figura 4.2 – Representação esquemática da linha de projeto 2

Seu funcionamento dar-se-ia a partir do conhecimento da resposta do sistema às seis componentes de excitação possíveis, ou seja, três forças e três momentos. Neste sentido, deve-se estudar as contribuições que cada uma destas componentes ofereceria ao estado de deformação em determinados pontos da estrutura. Este estudo pode ser realizado utilizando-se o método da superposição modal, através da identificação de coeficientes de participação modal, os quais são



representados, para cada grau de liberdade do sistema, pelo coeficiente modal, conforme apresentado no Apêndice II. Nesta abordagem torna-se desnecessária a busca por desacoplamento mecânico do transdutor, uma vez que a partir dos valores registrados pode-se determinar a fração de contribuição de carga em cada direção. Com isso é também desnecessária a flexibilidade estrutural nas três direções de medida, contribuindo para a confecção de sensores extensométricos de alta frequência fundamental. As vantagens e uma desvantagem desta abordagem estão sucintamente listadas abaixo:

#### Vantagens

- a confecção de um transdutor em um bloco monolítico, possibilitando a utilização de ligas metálicas e providenciando melhor repetibilidade,
- Necessidade de menor número de pontos deformáveis distribuídos de acordo com o propósito buscado;
- Transmissão de cargas entre superfície de contato e solo possivelmente direta;

#### Desvantagem

- Funcionamento ainda não testado na prática;

## 5 ALTERNATIVAS GERADAS NO PROCESSO DE SOLUÇÃO

Considerando que pretende-se contar com uma alternativa viável para a construção da plataforma de forças, fez-se a opção pela utilização da primeira linha de projeto, pois esta linha de desenvolvimento já foi seguida, mostrando funcionamento prático comprovado.

Inicialmente é apresentado o desenvolvimento da superfície de contato, isoladamente, e após são apresentadas as alternativas desenvolvidas para o transdutor. Na seqüência, dentre as várias alternativas de transdutor testadas, aquelas com funcionamento considerado adequado foram providas da superfície de contato desenvolvida, compondo as soluções propostas. No decorrer de seus desenvolvimentos, estas soluções são constantemente avaliadas através da utilização de índices de desempenho. Ressalta-se que o desenvolvimento das duas etapas iniciais, quais sejam, o desenvolvimento da superfície de contato e o desenvolvimento do transdutor, foi feito simultaneamente.

### 5.1 Desenvolvimento da superfície de contato

As premissas básicas adotadas para a superfície de contato 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 = 12000N = 1200Kgf;

(c) ter freqüência fundamental acima de 500Hz;

#### 5.1.1 Escolha dos materiais e da forma geométrica para a superfície de contato

Decidiu-se pela confecção da superfície de contato em material composto, caracterizando uma placa sanduíche, devido ao fato de que assim propriedades antagônicas como a diminuição de massa e o aumento da sua rigidez são obtidas. Nesta placa há duas lâminas, com 1mm de espessura cada, de tecido de fibras de carbono com 200g/m<sup>2</sup> (figura 5.1) e epóxi, orientado nas direções longitudinal e transversal do plano da placa (0 e 90<sup>0</sup>), 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 (figura 5.1). 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 no mercado local. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na confecção da placa são apresentadas na Tabela 5.1.

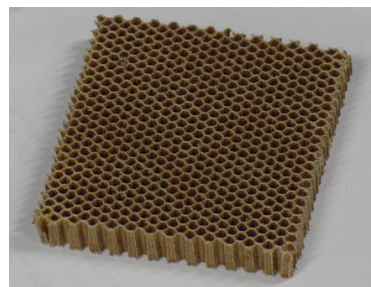
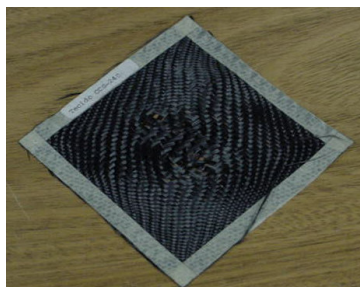


Figura 5.1 – Tecido de fibra de carbono e parte interna do miolo estrutural (Honeycomb sem manta) para confecção da superfície de contato

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas encontradas para os materiais utilizados na confecção da placa (Fontes: Eurocomposites <sup>1</sup> –URL <http://www.eurocomposites.com>, Jones <sup>2</sup>, 1975; Callister <sup>3</sup>, 1997 DuPont Kevlar® <sup>4</sup>)

	Tecido de carbono reforçando matriz epóxi	Manta de Kevlar	Miolo de Kevlar Honeycomb
Ex (Gpa)	206 <sup>2</sup>	76 <sup>3</sup>	0.138 <sup>1</sup>
Ey (Gpa)	5,17 <sup>2</sup>	1.9 (estimado)	0.098 <sup>1</sup>
Ez (Gpa)	5,17 <sup>2</sup>	1.9 (estimado)	200 <sup>4</sup>
Gxy (Gpa)	2,57 <sup>2</sup>	5.5 <sup>3</sup>	0.028 <sup>4</sup>
Gxz (Gpa)	-		0.028 <sup>4</sup>
Gyz (Gpa)	-		13800 <sup>1</sup>
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1380 <sup>2</sup>	1450 <sup>3</sup>	200 <sup>1</sup>
$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	0.25 <sup>2</sup>	0.35 <sup>4</sup>	0.27, 0.5, 0.5 <sup>1</sup>
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 esperas. 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 união à placa composta. Um exemplo de união com colagem largamente utilizado na confecção de estruturas com materiais compostos é apresentado na figura 5.2. No presente caso um alojamento maciço deveria ser pré-fixado na placa para abrigar a inserção.

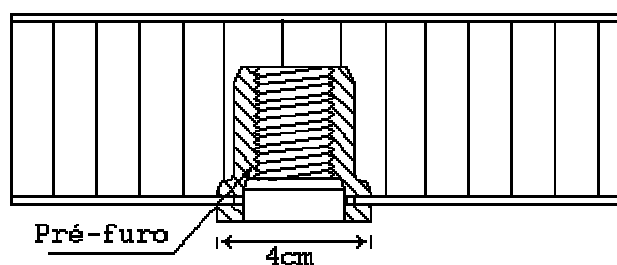


Figura 5.2 – Inserção metálica para a união entre a superfície de contato e o transdutor

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, conforme estabelecido nas premissas básicas. Na direção do movimento este requerimento é prontamente atendido, tendo a superfície de contato 200mm de comprimento. Perpendicularmente à direção de movimento não faz-se necessário reproduzir os 1200 mm da tábua original, sendo razoável prover a superfície de contato com uma dimensão que sirva como um alvo relativamente fácil para o saltador. De acordo, esta dimensão foi escolhida ser de 400mm.

O princípio de funcionamento, para carregamentos verticais, de todas as alternativas geradas conforme a linha de projeto adotada é o mesmo, implicando na compressão dos quatro pontos de apoio da superfície de contato independentemente do local de aplicação do carregamento sobre esta superfície, para que os circuitos tipo ponte componentes do sistema apresentem saída apenas na direção de medição. Desta forma, a superfície de contato deve ser apoiada ao transdutor através de quatro pontos localizados o mais próximo possível de suas bordas. A localização dos pontos destinados à união entre a superfície de contato e o transdutor pode ser visualizada na figura 5.3

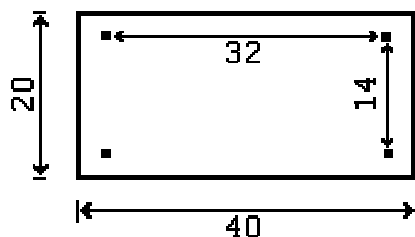


Figura 5.3 – Localização dos pontos destinados aos insertos metálicos da superfície de contato. Cotas em centímetros.

Com as dimensões adotadas, considerando-se a utilização de insertos metálicos com base igual a  $0,0016\text{m}^2$ , tem-se 2 cm de espaçamento entre a borda dos insertos e os extremos da placa, em ambas direções de seu plano horizontal.

Para a posterior calibração da plataforma de forças, tanto a inicial quanto as calibrações periódicas necessárias, é prevista a colagem, com cola estrutural, de um tarugo metálico na região central da lâmina externa da superfície de contato (colagem alumínio-alumínio), deixando um ponto de espera, sem cola, destinado à sua posterior remoção.

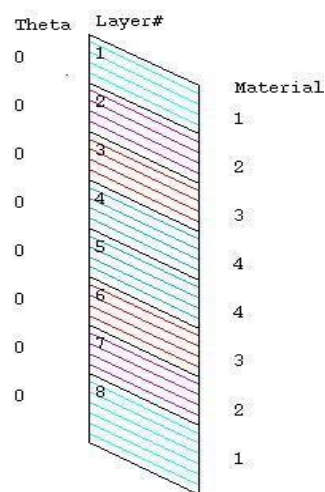
Estabelecida a forma geométrica deste elemento estrutural partiu-se para seu dimensionamento inicial, baseando-se na resistência mecânica necessária para suportar o carregamento vertical máximo já registrado na atividade a que a plataforma se destina. A espessura da placa ficou em 20mm, provendo este componente de uma massa de  $22,6\text{ Kg /m}^2$ . 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.

### 5.1.2 Discretização da superfície de contato

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. Assim, garante-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 2 cm de lado.

Através da definição das constantes reais de cada uma das camadas constituintes da placa faz-se com que o elemento seja subdividido, internamente, nestas camadas que representam as várias lâminas do material composto. Assim, para cada camada, deve-se definir as propriedades materiais, a orientação da camada e sua espessura. Para evitar acoplamentos entre esforços cisalhantes e de flexão, faz-se a estrutura de placa simétrica em relação ao plano médio. Para isso, o miolo, que fisicamente constitui uma só peça de Kevlar Honeycomb, deve ter suas propriedades definidas separadamente em duas camadas centrais do composto.

Do centro da placa até sua superfície inferior as constantes reais foram definidas para os materiais listados abaixo, como pode-se visualizar na figura 5.4



Material 4  $\Rightarrow$   $\frac{1}{2}$  miolo Kevlar Honeycomb = 4mm;

Material 3  $\Rightarrow$  1 camada de tecido de Kevlar = 1mm;

Material 2  $\Rightarrow$  2 camadas de tecido de carbono = 2mm;

Material 1  $\Rightarrow$  1 camada externa de alumínio = 3mm;

Figura 5.4 – Vista das camadas internas e respectivos materiais que compõem cada elemento utilizado na discretização da placa composta

A aplicação das restrições é feita através da prescrição de deslocamentos nulos nos pontos geométricos destinados às inserções, caracterizando uma situação de engastamento. Os carregamentos são aplicados diretamente nos elementos, sob a forma de pressão ou carga superficial.

#### 5.1.2.1 Simplificações utilizadas no método numérico

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. Este fato pode ser visualizado na figura 5.6.

### 5.1.3 Análise estática

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 tensão, compressão e corte das camadas individuais. Uma revisão deste método é encontrada em Pandey e Reddy, 1987. As propriedades mecânicas utilizadas na aplicação do critério, para cada camada, são apresentadas na Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2 – Propriedades de resistência mecânica dos materiais das camadas do composto utilizadas na aplicação do critério de falha. Os valores de compressão não fornecidos são tomados iguais aos respectivos valores de tração. (Fontes: Eurocomposites<sup>1</sup> –URL <http://www.eurocomposites.com>, Jones<sup>2</sup>, 1975; Callister<sup>3</sup>, 1997, Weingaertner<sup>4</sup>, 1951, DuPont Kevlar®,<sup>5</sup>)

	Al6061T6	Tecido de Carbono	Manta de Kevlar®	Kevlar Honeycomb
X <sub>T</sub> (MPa)	310 <sup>4</sup>	124 <sup>3</sup>	138 <sup>5</sup>	26.6 <sup>1</sup>
X <sub>C</sub> (MPa)	310 <sup>4</sup>	689.4 <sup>3</sup>		
Y <sub>T</sub> (MPa)	310 <sup>4</sup>	41.36 <sup>2</sup>	30 <sup>5</sup>	2.7 <sup>1</sup>
Y <sub>C</sub> (MPa)	310 <sup>4</sup>	117.21 <sup>2</sup>		
Z <sub>T</sub> (MPa)	310 <sup>4</sup>	20 <sup>3</sup>	15 <sup>5</sup>	13.5 <sup>1</sup>
Z <sub>C</sub> (MPa)	310 <sup>4</sup>			
S <sub>xy</sub> (MPa)	205 <sup>4</sup>	68.94 <sup>2</sup>	550 <sup>5</sup>	28 <sup>1</sup>
S <sub>yz</sub> (MPa)	205 <sup>4</sup>	620 <sup>3</sup>	50 <sup>5</sup>	28 <sup>1</sup>
S <sub>xz</sub> (MPa)	205 <sup>4</sup>	620 <sup>3</sup>	50 <sup>5</sup>	28 <sup>1</sup>

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.. A estrutura discretizada com os carregamentos e condições de contorno pode ser visualizada na figura 5.5.

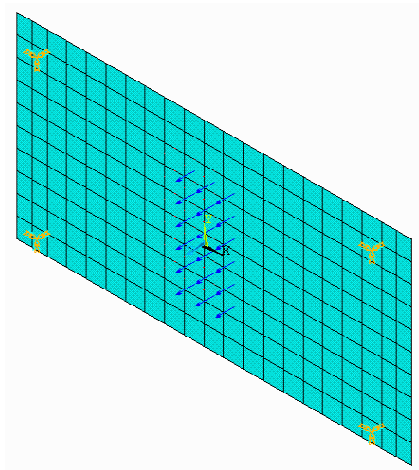


Figura 5.5 – Discretização da placa com aplicação do carregamento crítico e restrições. Os carregamentos estão aplicados simultaneamente nas três direções ortogonais da placa, na região central da placa. A visualização mostra uma representação equivalente destas três componentes.

O resultado do critério de falhas é fornecido através da determinação do valor do critério adotado,  $\xi_3$  no caso de Tsai-Wu. Este valor é 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  $\xi_3 < 1$ .

Os resultados da aplicação do critério de falha para materiais compostos, para cada uma das oito camadas, são apresentados nas figuras abaixo.

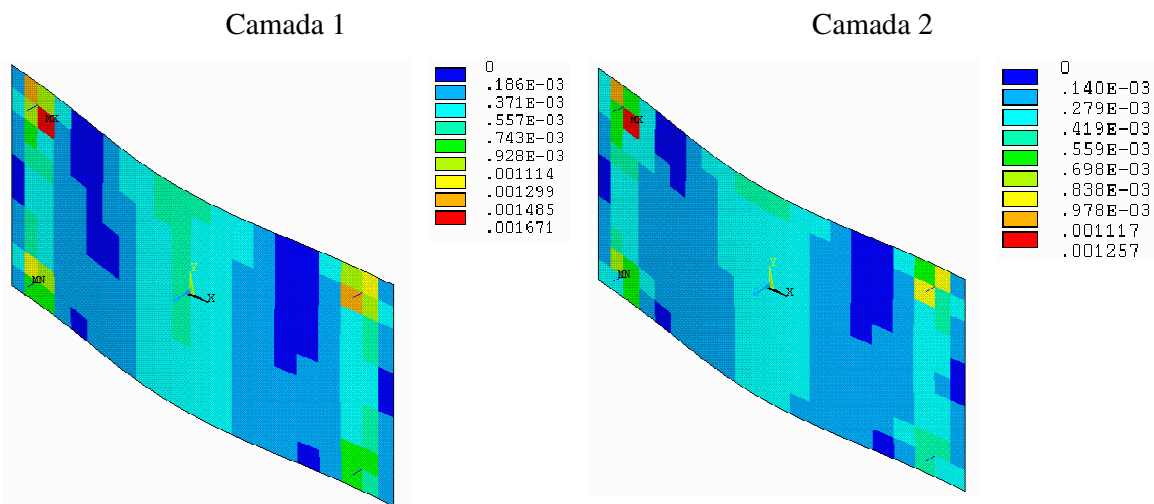


Figura 5.6 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.



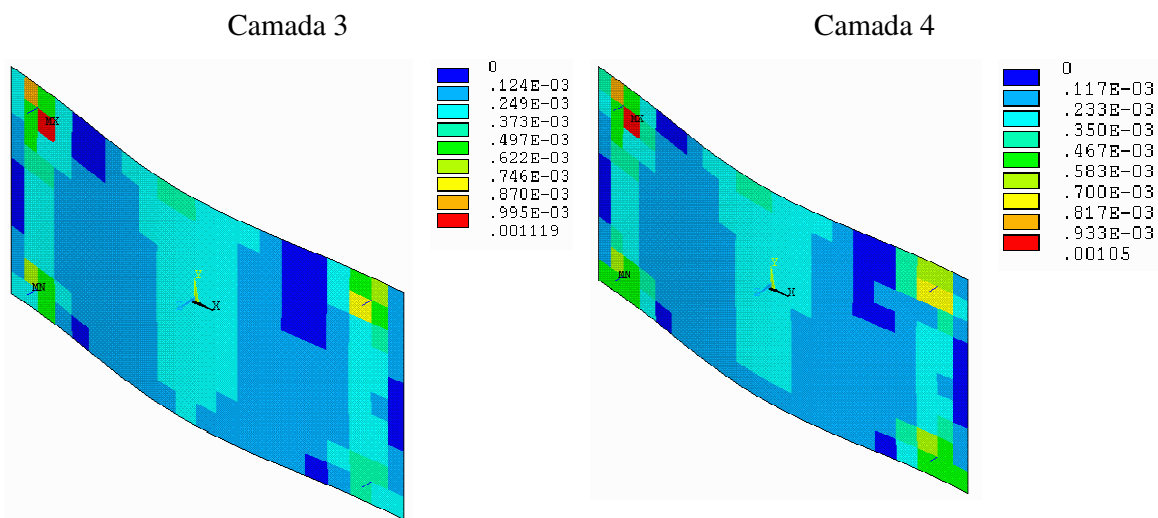


Figura 5.7 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.

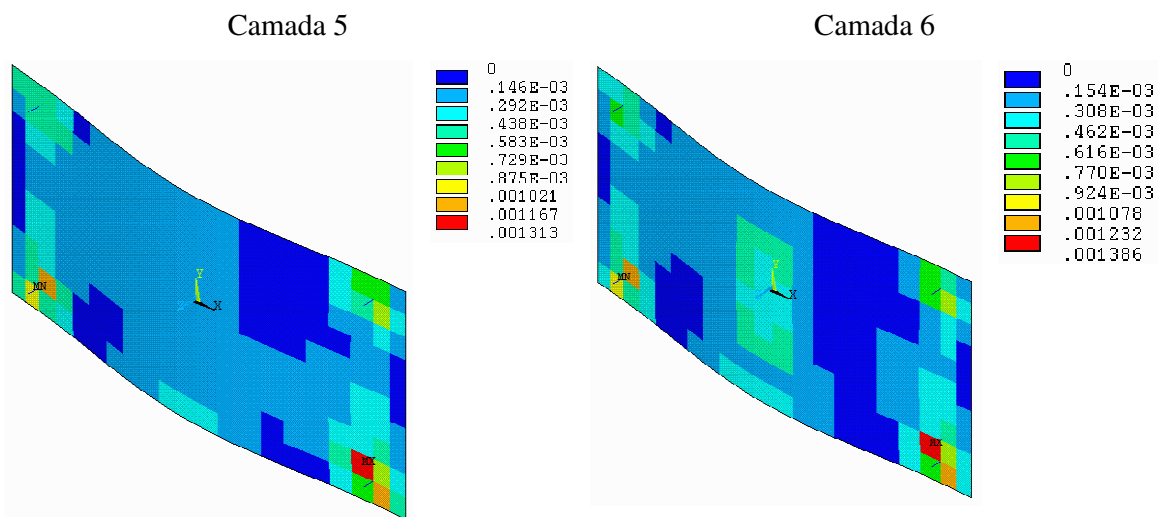


Figura 5.8 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.

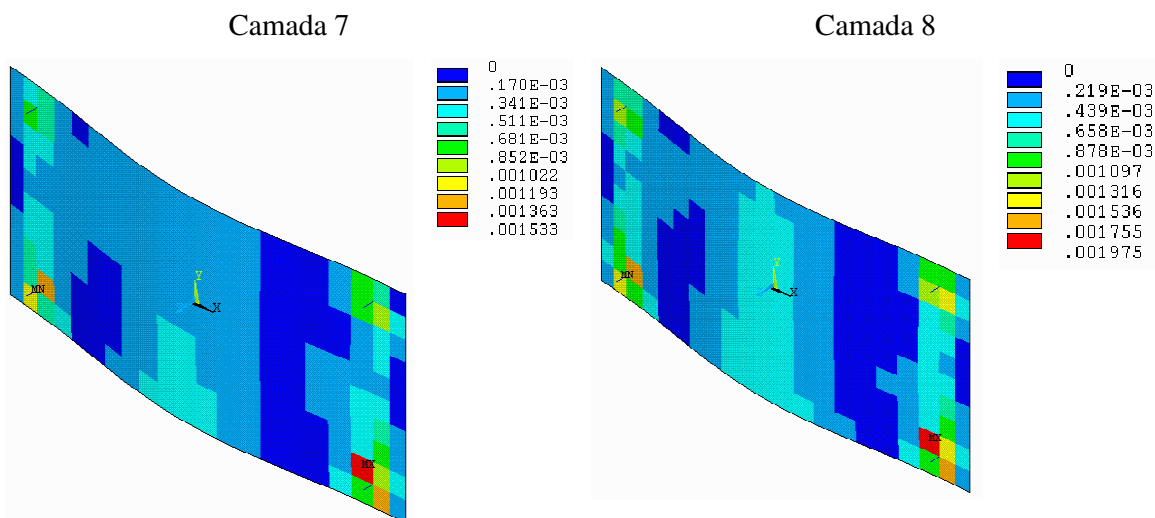


Figura 5.9 – Valores obtidos para o critério de falha utilizado na análise estática da superfície de contato da plataforma. O valor do critério adotado( $\xi_3$ ) é apresentado na legenda.

De acordo com estes resultados, a placa não falha. A camada mais solicitada é a camada externa superior, sobre a qual o carregamento é aplicado.

#### 5.1.4 Cálculo das propriedades dinâmicas da superfície de contato (frequências naturais e modos de vibração)

Com os valores de densidade por material componente das camadas da placa e a razão entre a massa e a área superficial da placa procede-se a análise modal deste componente.

Os valores para as três primeiras frequências obtidos na análise modal para três diferentes discretizações são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores das frequências naturais encontradas na discretizações realizadas, indicadas por D1 (elementos com 2cm de lado), D2 (elementos com 1cm de lado) e D3 (elementos com 0,5cm de lado).

Número do modo de Vibração	Frequência (Hz)		
	D1	D2	D3
1	606,16	587,88	563,80
2	1077	1058,90	1041,80
3	1815,60	1786,90	1752

As formas modais correspondentes aos autovalores, para a discretização inicial, D1, são apresentadas abaixo. Estas formas são idênticas àquelas obtidas com as demais discretizações.

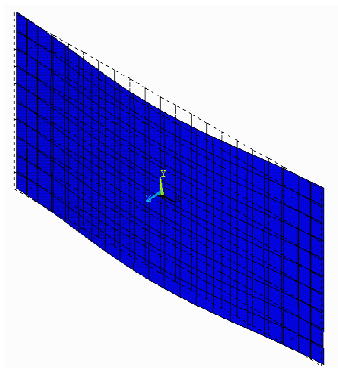


Figura 5.10 – Primeira forma modal ( $f_1 = 606,16$ ). Modo de flexão transversal em torno do eixo Y

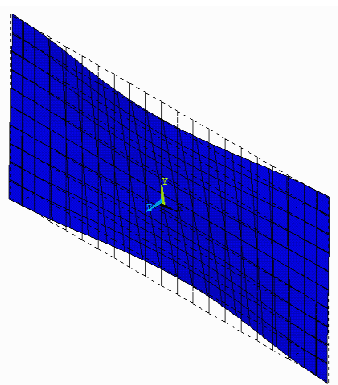


Figura 5.11 – Segunda forma modal ( $f_2 = 1077$ ). Modo de flexão em torno do eixo Y e torção em torno do eixo X

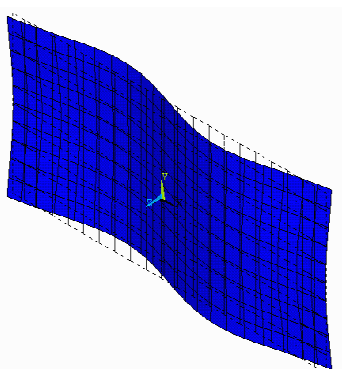


Figura 5.12 – Terceira forma modal ( $f_3 = 1816,6$ ). Modo de flexão em torno do eixo longitudinal X e dupla flexão em torno do eixo transversal Y

### 5.1.5 Crítica da superfície de contato desenvolvida

Através da utilização de uma chapa metálica nas faces externas da superfície de contato preveniu-se a perfuração desta superfície pelas crivas das sapatilhas dos atletas, aumentando seu período de vida útil. Porém a similaridade de atrito superficial buscada entre a tábua de impulsão original e esta superfície foi desta forma penalizada, de forma que em sua utilização o usual recurso de recobrir a plataforma com uma manta sintética deverá ser utilizado.

A utilização de várias camadas dificultará a confecção desta placa, porém este foi o meio encontrado para promover a rigidez necessária a este componente, de forma que a estrutura metálica do transdutor tenha frequência fundamental mais baixa que a da placa.

## 5.2 Desenvolvimento do transdutor

O elemento transdutor concebido por Lywood, 1987, e aprimorado por Roesler, 1998, serviu de base para a formulação da linha de projeto seguida, de forma que esta é a configuração inicialmente estudada para o transdutor da plataforma em desenvolvimento. Esta opção deveu-se fundamentalmente ao fato de esta configuração de transdutor poder ser confeccionada em um bloco monolítico. Inicialmente acreditou-se que a mudança de materiais componentes, da forma de fabricação e das dimensões e posicionamento dos membros deste transdutor poderia fornecer uma configuração que cumprisse os requerimentos estabelecidos. Então, primeiramente será apresentada a descrição de funcionamento deste transdutor e sua adaptação a função atual e, após, conhecido seu funcionamento, são avaliadas mudanças em pontos considerados críticos nesta configuração.

O resultado destas avaliações permite que a primeira solução seja montada, através da união entre este transdutor original e a placa composta anteriormente definida. A partir desta solução inicial faz-se o desenvolvimento dos transdutores derivados e subsequente montagem da solução intermediária e final.

### 5.2.1 Premissas básicas para o transdutor

- (a) medir forças verticais até 12kN;
- (b) medir forças horizontais até 8,5kN
- (c) 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.

- (d) ter frequência fundamental, nas três direções ortogonais, acima de 400Hz;
- (e) estar posicionado sob a superfície de contato

### 5.2.2 Escolha do material para o elemento transdutor

Para a confecção do transdutor optou-se pela utilização de liga de alumínio com alta resistência mecânica. O bloco com as maiores dimensões encontradas foi da liga Al6061T6, medindo 31cm x 61cm x 5,7cm. 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.

Verifica-se que o material encontrado para a confecção do transdutor 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. Sendo tratável termicamente, esta liga possibilita a realização de alívio de tensões após a usinagem. Suas propriedades físicas e mecânicas típicas são apontadas na Tabela 5.4 e Tabela 5.5, respectivamente.

Tabela 5.4 – Propriedades Físicas Típicas do Al6061-T6 (Fonte Weingaertner, 1951)

Alumínio 99,5%	Liga para Usinagem 6061-T6
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,70
Coefficiente de dilatação térmica (°C <sup>-1</sup> x 10 <sup>-6</sup> ) t: 36 a 100 °C	23,6
Intervalo de fusão (°C)	582 – 648

Tabela 5.5 – Propriedades Mecânicas Típicas do Al6061-T6\* (Fonte Weingaertner, 1951)

	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)	Coefficiente De Poisson	Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade Longitudinal (MPa)	Módulo de Elasticidade Transversal (MPa)
Símbolo	$\sigma_t$	$\sigma_c$	$\nu$	$\sigma_e$	E	G
Valor	310	205	0.32	275	$0.7 \times 10^5$	$0.28 \times 10^5$

\* T6 indica liga solubilizada e envelhecida artificialmente

Conforme apresentado anteriormente, para a confecção deste transdutor em bloco monolítico pode-se utilizar usinagem e posterior alívio de tensões. Então, todas configurações de elementos transdutores foram geradas sob considerações de espaço de trabalho para a fabricação (fundamentalmente posicionamento e colagem dos sensores), considerando processos de corte, fresagem e desbaste do bloco.

### 5.2.3 Escolha da forma geométrica do transdutor

A geometria adotada para a configuração inicial de transdutor é derivada, conforme anunciado anteriormente, da configuração de Lywood (figura 5.13). Assim, a configuração inicial de transdutor desenvolvida consistiu basicamente no redimensionamento da configuração de Lywood para a situação em estudo. Conforme as premissas estabelecidas, paralelamente à este redimensionamento é feita a adaptação desta configuração à superfície de contato, pois, através da definição das dimensões da superfície de contato ficaram estabelecidos os pontos que servem para a união entre esta superfície e o transdutor. Desse modo, estando estas posições pré-fixadas, o transdutor deve adequar-se à esta imposição. Conforme pode-se verificar na descrição de seu funcionamento apresentada a seguir, esta imposição é de caráter funcional.

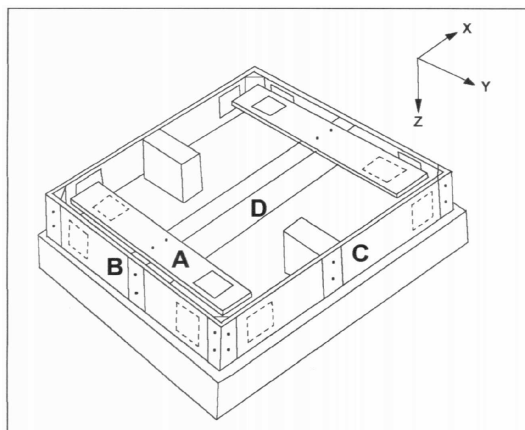


Figura 5.13 – A configuração do transdutor original ( $y$  = direção do movimento). Extraído de Roesler, 1998.

Abaixo da superfície de contato, não apresentada na figura 5.13, encontra-se a estrutura metálica encarregada de promover o suporte estrutural e a medição proposta, atuando como estrutura e transdutor simultaneamente. Devido à dupla função desenvolvida pela estrutura metálica, no presente texto esta configuração será tratada por estrutura-transdutor. Então, conforme visualizado na mesma figura 5.13, esta estrutura-transdutor é apoiada e fixada ao solo através de suportes no centro dos elementos elásticos  $C$ , os quais são afastados do solo, ou seja, suspensos através de suas extremidades engastadas. A outra extremidade destes elementos elásticos  $C$  é unida aos elementos elásticos  $B$  que, por sua vez, são ligados entre si através do elemento estrutural central  $D$ , o único elemento que não exerce função de medição. Sobre este elemento  $D$ , por sua vez, situam-se os elementos elásticos  $A$  que têm suas extremidades livres fixadas à superfície de contato da plataforma, e devem funcionar em compressão, para que os quatro ramos componentes do circuito tipo ponte, ligados dois a dois nas superfícies superior e inferior do elemento, respectivamente, forneçam o mesmo desbalanço independentemente do local de aplicação do carregamento sobre a superfície de contato. A posição e função dos elementos elásticos componentes da estrutura-transdutor é definida da seguinte forma:

→ 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;

→ 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;

→ 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;

De acordo com seu funcionamento mecânico, esta configuração tem o grande mérito de possibilitar a utilização, de maneira simplificada, da técnica de desacoplamento mecânico-elétrico. Os locais de colagem dos extensômetros para esta configuração de transdutor são evidentes, mesmo porque estudos de simulação numérica já foram realizados, indicando tais posições. Para forças verticais ( $F_z$ ) posiciona-se um extensômetro próximo ao extremo fixo de cada viga *A*. Para que a ligação em ponte seja completa (figura 5.14), capaz de providenciar um sinal de saída individual para esta variável, dois extensômetros são colocados na superfície superior dos elementos *A* e dois nas inferiores. Desta forma, considerando uma carga vertical de cima para baixo, a parte superior dos elementos elásticos *A* sofrem tração e sua parte inferior, compressão. Assim, os extensômetros localizados em ramos opostos do circuito ponte, atuam ambos em tração ou ambos em compressão. De maneira satisfatória, para carregamentos horizontais na direção *X* a deformação nos sensores  $S_z$  são mínimas, devidas apenas à influência do coeficiente de Poisson. Além disso, tem-se que para os quatro pontos de medição, as deformações relativas são de mesmo sentido, todas provocando a mesma variação nas resistências elétricas do circuito tipo ponte utilizado, de forma a provocar um desbalanço elétrico nulo. Na direção *Y* os extensômetros  $S_z$  de ramos opostos sofrem deformações com sentidos opostos, novamente anulando a saída da ponte.

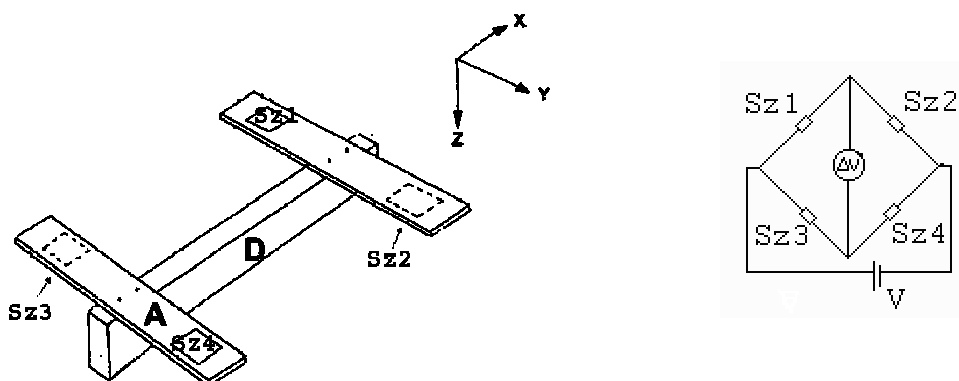


Figura 5.14 – Posição dos extensômetros e circuito tipo ponte de Wheatstone para carga vertical  $F_z$

A parte da estrutura responsável pela medição das forças horizontais  $F_x$  e  $F_y$  constitui



uma estrutura do tipo caixão. A posição de colagem, para que os extensômetros formem uma ponte de Wheatstone completa para cada direção horizontal de medida, pode ser visualizada na figura 5.15. Todos os extensômetros são posicionados na parte externa desta estrutura, de forma a facilitar sua colagem, reduzindo a necessidade de prover a configuração de espaçamentos internos, difíceis de serem confeccionados com precisão.

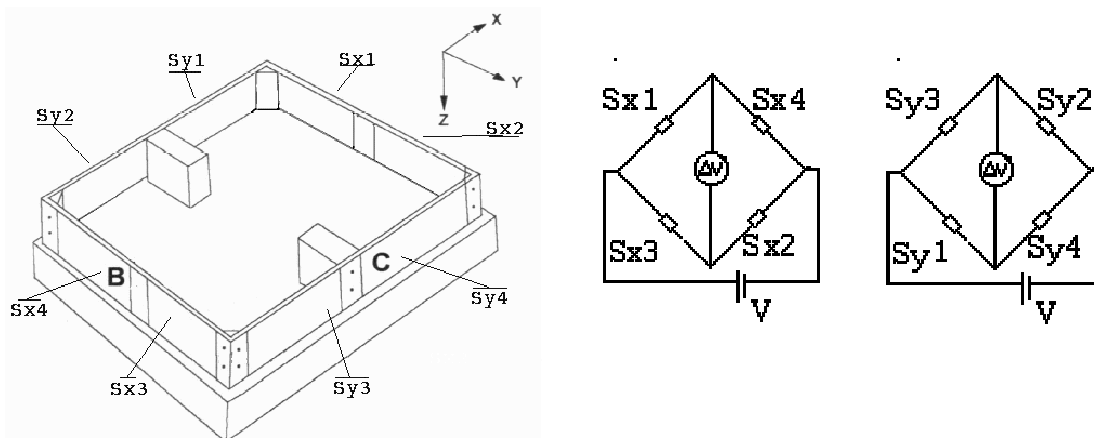


Figura 5.15 – Posição dos extensômetros e circuitos tipo ponte de Wheatstone para medição das forças horizontais

Para carregamento no sentido positivo do eixo X os extensômetros  $S_{x1}$  e  $S_{x2}$  sofrem tração, enquanto  $S_{x3}$  e  $S_{x4}$  sofrem compressão, fornecendo máxima leitura da ponte. Por outro lado, para um carregamento no sentido positivo do eixo Y, os sensores  $S_{x2}$  e  $S_{x3}$  sofrem compressão e os sensores  $S_{x1}$  e  $S_{x4}$  compressão (de igual magnitude), de forma que a ponte permanece em balanço para qualquer carga, não gerando sinal. Uma carga no sentido positivo do eixo Y traciona os sensores  $S_{y4}$  e  $S_{y3}$ , comprimindo os sensores  $S_{y2}$  e  $S_{y1}$ . Assim, a saída da ponte é completa. Carregamentos no outro eixo horizontal, devido à geometria utilizada para o transdutor, não geram desbalanço na ponte.

Esta mesma estrutura, responsável pela medição das forças horizontais, é encarregada da medição do momento ou torque ao redor do eixo vertical (Z) da plataforma (figura 5.16). Para momento no sentido positivo do eixo Z os extensômetros  $S_{mz1}$  e  $S_{mz4}$  sofrem tração, estando então posicionados em ramos opostos do circuito. Os outros dois extensômetros sofrem compressão e completam a ponte para esta variável.

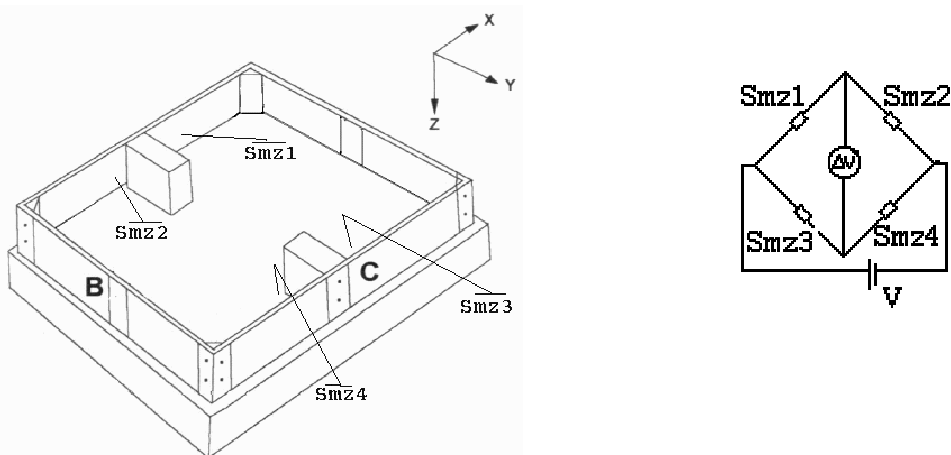


Figura 5.16 – Posição de colagem para os extensômetros encarregados da medição de  $M_z$ , e correspondente montagem do circuito tipo ponte de Wheatstone

A estrutura utilizada para medição de  $F_z$  serve para a medição dos restantes dois momentos, um em torno do eixo horizontal X, e outro do eixo horizontal Y (figura 5.17). Para momento positivo no eixo X,  $S_{mx1}$  e  $S_{mx2}$  sofrem compressão enquanto  $S_{mx3}$  e  $S_{mx4}$  sofrem tração. Para o outro eixo horizontal tem-se que, para um torque em seu sentido positivo,  $S_{my2}$  e  $S_{my4}$  sofrem compressão e  $S_{my1}$  e  $S_{my3}$ , tração.

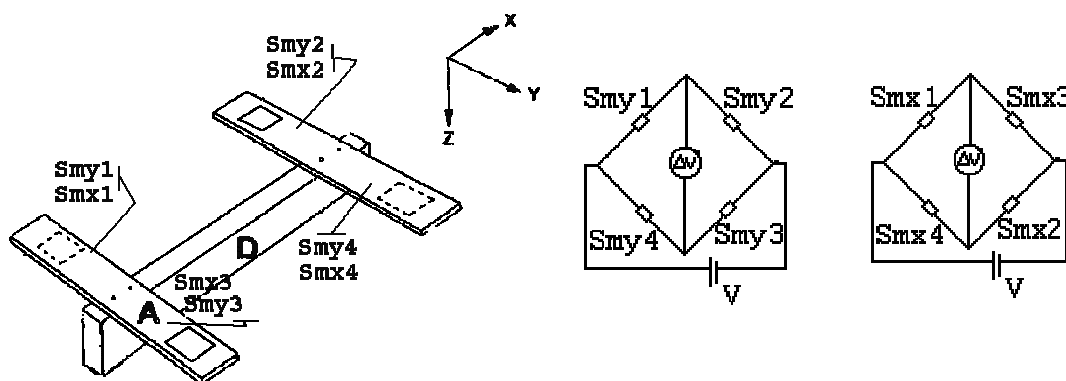


Figura 5.17 – Posição de colagem para os extensômetros encarregados da medição de  $M_x$  e  $M_y$ , e correspondentes montagens dos circuitos tipo ponte de Wheatstone

Estas considerações demonstram o funcionamento teórico da técnica de desacoplamento denominada mecânico-elétrica.

#### 5.2.4 Adaptação da configuração original da estrutura- transdutor aos novos propósitos

Para que a premissa básica de posicionar a estrutura-transdutor sob a superfície de contato fosse cumprida, a forma geométrica da configuração original foi alterada, passando da forma quadrada para a forma retangular. Então, fez-se um redimensionamento inicial, visando a

obtenção de uma estrutura-transdutor que servisse de ponto de partida para as variações realizadas iterativamente utilizando-se o Método dos Elementos Finitos. Neste redimensionamento inicial, visando o funcionamento do sistema no regime elástico-linear de comportamento do material, considerou-se a seguinte condição:

$$CS = \frac{\sigma_{esc}}{\sigma_{adm}} \quad (2)$$

onde

C.S. = coeficiente de segurança

$\sigma_{esc}$  = tensão de escoamento

$\sigma_{adm}$  = tensão admissível

Considerando coeficiente de segurança igual a 1.5, tem-se:

$$1.5 = 275 \text{ MPa} / \sigma_{adm}$$

$$\sigma_{adm} = 183,33 \text{ MPa}$$

Respeitando este valor tem-se que a estrutura será solicitada apenas dentro do limite elástico. As fórmulas utilizadas no redimensionamento inicial, com respeito à ocorrência ideal de apenas deformações superficiais de flexão nos elementos elásticos *A*, *B* e *C* (figura 5.13) da estrutura-transdutor foram:

$$\sigma_{max} = E \epsilon_{max} \quad (3)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot c}{I} \quad (4)$$

onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = tensão normal máxima (N/ m<sup>2</sup>)

$\epsilon_{m\acute{a}x}$  = máxima defomação elástica de flexão (m/m)

$M_{m\acute{a}x}$  = momento fletor máximo (Nm)

*c* = metade da altura da seção transversal considerada (m)

*I* = momento de inércia de área da seção considerada (m<sup>4</sup>)

Para a situação de carregamento axial e flexão devido à aplicação descentrada de cargas horizontais, através das inserções, aos elementos elásticos *A* utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{M_{\max} \cdot c}{I} \quad (5)$$

onde:

$P$  = carga concentrada aplicada (N)

$A$  = área da seção transversal ( $m^2$ )

As dimensões encontradas para os elementos elásticos  $A$ , ao final do redimensionamento, ultrapassaram o limite da relação entre dimensões de base, altura e comprimento imposto para a utilização de teoria de vigas curtas. Desta forma, estes elementos tiveram a sua classificação como elementos transdutores de viga descaracterizada.

Porém, qualquer forma estrutural que apresente local superficial com campo de deformações uniforme, pode ser utilizada como elemento elástico. Para comprovar o funcionamento destes elementos elásticos resultantes do redimensionamento, realizou-se uma análise dedicada através da discretização destes, utilizando elementos finitos quadriláteros de 8 nós com interpolação linear (brick45 do ANSYS). A malha foi gerada com densidade tal que os lados dos elementos ficaram com 5mm.

Nesta discretização, o engaste entre o elemento elástico  $A$  e o elemento estrutural  $D$  foi representado através da prescrição de deslocamentos nulos sobre toda a área destinada à este engaste. Com isso, o modelo discretizado foi dotado de maior rigidez do que no caso real, pois, inevitavelmente, no engaste real ocorrem deformações que não são consideradas na aproximação feita. O carregamento aplicado foi uma carga distribuída sobre uma área aproximadamente igual a área destinada à fixação dos insertos metálicos da superfície de contato. O módulo da carga, aplicada como carga de superfície, é equivalente a  $\frac{1}{4}$  do máximo carregamento vertical já registrado na decolagem para o salto em distância, ou seja, 3000N.

Para que este elemento elástico apresentasse um melhor desempenho do ponto de vista extensométrico, possuindo deformação no local de colagem dos sensores com pequeno gradiente, sua seção transversal foi feita variável, trapezoidal no plano perpendicular à direção da força aplicada. A dimensão longitudinal do elemento analisado é de 0.05m, sua dimensão de base no extremo dedicado ao engaste é de 0.04m e no extremo oposto, livre, 0,02m. Sua altura, para facilitar sua confecção, foi mantida constante e igual a 0,02m. O resultado obtido nesta análise dedicada, apresentado na forma de tensão equivalente de Von Mises nos elementos, indica a existência de regiões de baixo gradiente de deformação na superfície do membro estrutural  $A$ . (figura 5.18).

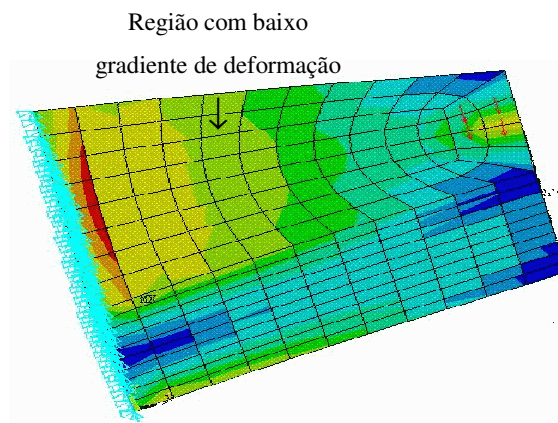


Figura 5.18 – Resultado da análise dedicada do membro estrutural A

### 5.2.5 Discretização da nova estrutura-transdutor

Estando comprovada, através da análise dedicada, a possibilidade de utilização dos elementos elásticos A (figura 5.13) com as dimensões consideradas apropriadas partiu-se para a discretização da nova estrutura-transdutor com a finalidade de conhecer seu comportamento estrutural. Optou-se por representá-la através de 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. A densidade da malha gerada foi tal que cada elemento ficou com 1cm de comprimento.

A geometria da nova estrutura-transdutor foi representada através das linhas médias de seus membros componentes (figura 5.19). A condição de contorno relativa ao engaste foi representado por uma linha com todos os deslocamentos prescritos e iguais a zero. A aplicação de carga, nesta aproximação inicial que considera apenas a estrutura-transdutor, é pontual, porém com módulo equivalente à aplicação real, feita através dos pontos de fixação da placa ao transdutor.

Uma vez que, utilizando-se elementos de pórtico plano representados através da linha média dos componentes estruturais, a espessura dos componentes é suprimida da representação, optou-se por reforçar as regiões correspondentes às espessuras com membros mais robustos, na tentativa de reproduzir a existência das referida espessuras. A resposta ocasionada por esta tomada de atitude está evidenciada na figura figura 5.21, onde nota-se que a deformação lateral produzida pelo carregamento ocorre apenas nos elementos B .

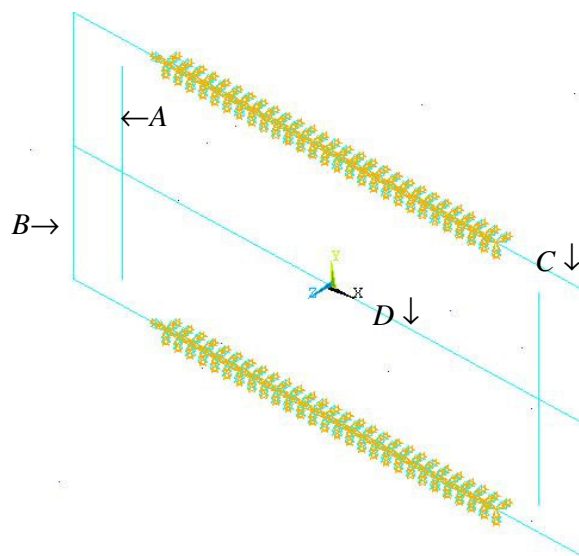


Figura 5.19 – Discretização da nova estrutura-transdutor

#### 5.2.6 Identificação de pontos passíveis de alteração na estrutura-transdutor

Com as análises estática e de determinação de modos e frequências naturais de vibração da nova estrutura-transdutor pode-se tomar conhecimento de seu comportamento estrutural. Tratando-se de um sistema linear e considerando-se que cada efeito é diretamente proporcional à carga que o produziu e que a deformação causada por qualquer dos carregamentos é pequena e não afeta as condições de aplicação dos outros carregamentos; o Princípio da Superposição dos Efeitos foi utilizado na análise estática, de forma que os carregamentos para cada uma das três direções foram aplicados independentemente.

As formas deformadas desta estrutura-transdutor para aplicação de força horizontal na direção perpendicular ao movimento ( $F_x$ ), força horizontal na direção paralela ao movimento ( $F_y$ ) e força vertical ( $F_z$ ) são coincidentes, respectivamente, com os três primeiros modos de vibração da estrutura (figura 5.20).

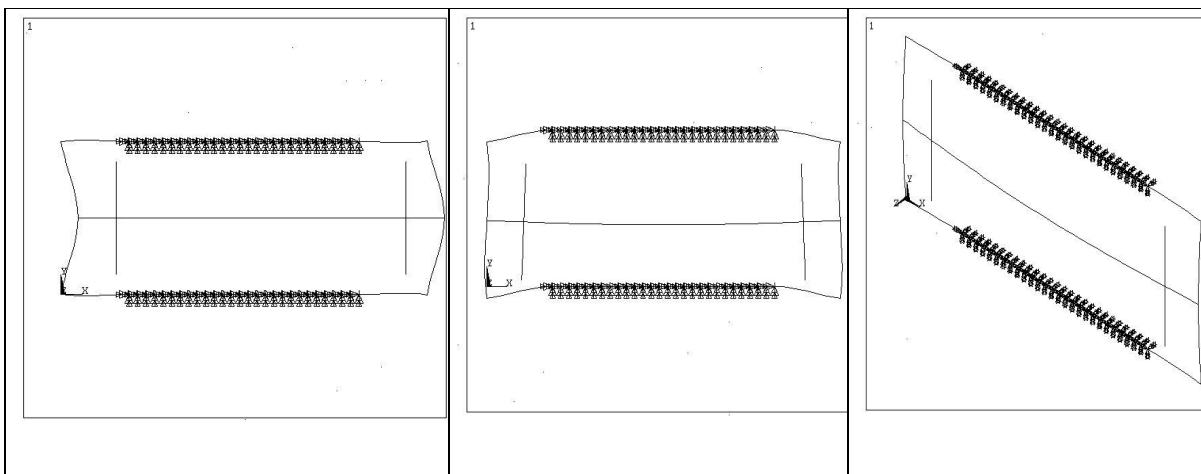


Figura 5.20 – Formas deformadas resultantes da aplicação de  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  respectivamente. As três primeiras formas modais encontradas para esta nova estrutura-transdutor são coincidentes, respectivamente, à estas três formas deformadas.

A análise estática forneceu, além das configurações deformadas para cada direção de solicitação, uma quantificação dos esforços induzidos sobre cada membro estrutural para cada uma das solicitações, deixando claro que:

- ao ser solicitada na direção horizontal perpendicular à direção do movimento, esta configuração induz o aparecimento de esforços de flexão, devidos à transmissão do giro, nos membros da direção horizontal não solicitada (figura 5.21);

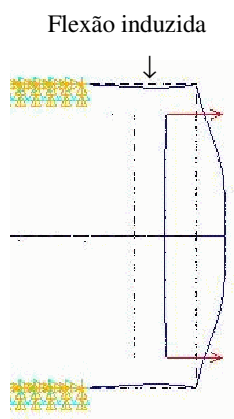


Figura 5.21 – Vista superior da deformação ocasionada pela aplicação de carregamento horizontal  $F_x$

- ao ser solicitada por uma força horizontal  $F_y$ , o elemento  $D$  central, que deveria apenas transmitir a solicitação aos elementos  $B$ , é flexionado lateralmente, induzindo com isso a rotação, em torno do eixo vertical da estrutura, no ponto central dos elementos  $B$ . Assim, estes elementos são flexionados (figura 5.22).

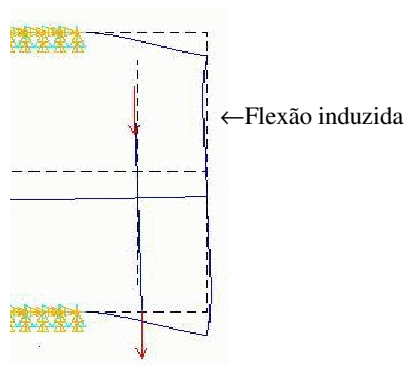


Figura 5.22 – Vista superior da deformação ocasionada pela aplicação de carregamento horizontal  $F_y$ .

- sob a ação de carregamento vertical, o elemento  $D$  é flexionado transversalmente, induzindo, com isso, a torção dos elementos laterais  $B$ , através da rotação destes elementos elásticos em torno do eixo horizontal  $y$  da estrutura (figura 5.23).

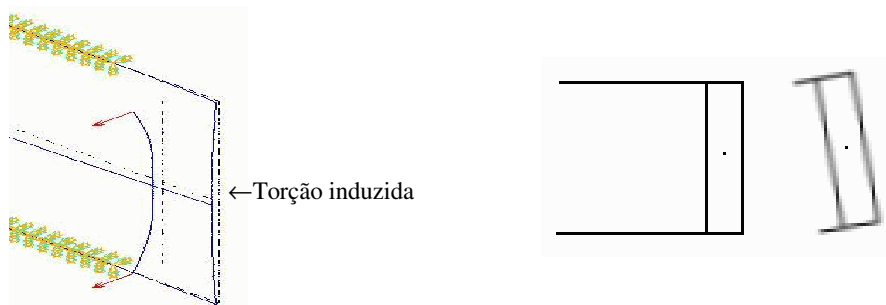


Figura 5.23 – Aplicação de carregamento vertical: deslocamento vertical do elemento central e consequentemente giro induzido nos elementos laterais  $B$

Destas constatações iniciais concluiu-se que o tamanho do vão livre ao qual o elemento central  $D$  (figura 5.13) está submetido é inconveniente tanto estática quanto dinamicamente, constituindo o primeiro ponto passível de alteração detectado. Estaticamente devido à indução de esforços diferentes dos esperados, como apontado acima, indicando a plena ocorrência de acoplamento mecânico. Dinamicamente devido ao fato de que este elemento, de massa considerável, posicionado sobre um vão livre, fica suscetível à vibrações verticais, indicando a redução do valor da frequência fundamental da estrutura. A ocorrência de vibração vertical e diminuição da frequência fundamental da estrutura é ainda agravada ao considerar que, sob solicitações verticais em seus dois pontos de carregamento, este elemento é deformado em sua primeira forma modal.

O segundo ponto para alteração da estrutura diz respeito à área de fixação ao solo. Sabendo-se que esta variável é fundamental na obtenção das características dinâmicas desejadas, e que sua dimensão é limitada pela dimensão mínima necessária para o funcionamento do



elemento elástico  $C$ , respeitando o Princípio de Saint-Venant, entendeu-se que a procura pelo comprimento ideal para este apoio poderia ser um caminho na melhoria das características desta configuração.

#### 5.2.6.1 Avaliação da seção transversal do elemento central $D$

Procedeu-se a avaliação da seção transversal do elemento central  $D$  (figura 5.13) com a finalidade de identificar, dentre as seções transversais possivelmente confeccionadas, considerando tanto a forma quanto as dimensões, qual seria a seção que apresentasse menor suscetibilidade aos carregamentos, de forma a transmitir os esforços mais diretamente. A forma de avaliação consistiu em quantificar, para cada direção de carregamento, o deslocamento ocasionado ao nó central do elemento  $D$ . Então, este deslocamento, foi tomado como indicativo da suscetibilidade deste elemento central para a direção do carregamento imposto. A dimensão de base do elemento central é limitada pelo mínimo comprimento necessário ao funcionamento dos elementos elásticos  $A$ . Para as formas geométricas da seção transversal do elemento central  $D$  passíveis de confecção, procurou-se manter o valor de área aproximadamente igual. Estes valores de área, juntamente com os respectivos momentos de inércia são apresentados na Tabela 5.6. A figura 5.24 mostra a forma geométrica de cada seção utilizada.

Tabela 5.6 – Valores dos momentos de inércia e área das seções utilizadas na comparação

Seção transversal	$I_{zz}$ ( $m^4$ )	$I_{yy}$ ( $m^4$ )	$I_{xx}$ ( $m^4$ )	$A(m^2)$
a) retangular	$2.21e^{-6}$	$9.37e^{-7}$	$3.75e^{-6}$	.00416
b) viga dupla	$2.20e^{-6}$	$8.20e^{-7}$	$3.0e^{-6}$	.00364
c) seção I	$1.72e^{-6}$	$9.29e^{-7}$	$2.60e^{-6}$	.00356
d) seção T	$1.61e^{-6}$	$7.40e^{-7}$	$2.35e^{-6}$	.00356
e)seção U invertido	$2.19e^{-6}$	$8.20e^{-7}$	$3.0e^{-6}$	.00372
f) seção H	$2.20e^{-6}$	$8.21e^{-7}$	$3.0e^{-6}$	.00376

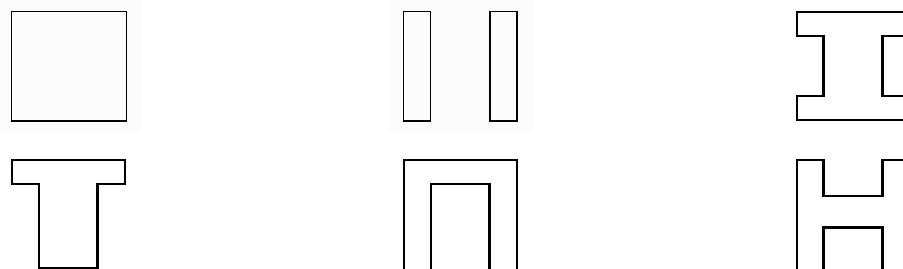


Figura 5.24 – Formas geométricas da seção transversal do elemento central  $D$  utilizadas na avaliação realizada

Os valores de deslocamento resultantes para a aplicação dos mesmos carregamentos para cada direção de solicitação em cada um dos transdutores discretizados com a respectiva seção transversal são apresentados nos gráficos abaixo (Figura 5.25 a Figura 5.27).

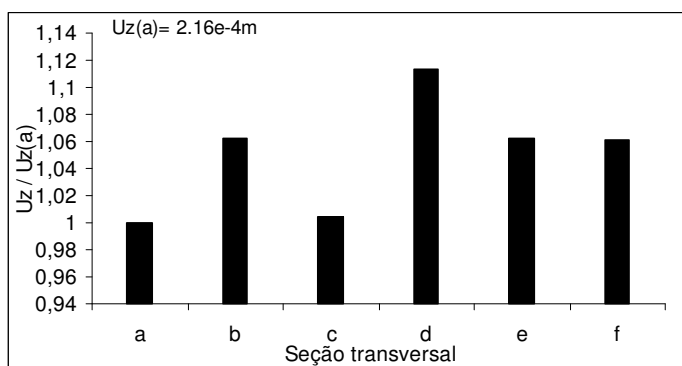


Figura 5.25 – Seção transversal vs deslocamento vertical

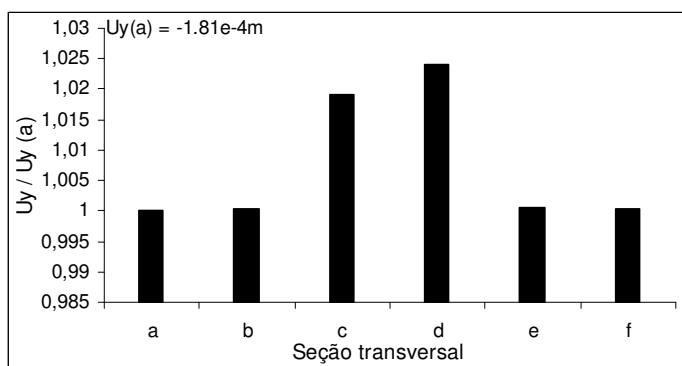


Figura 5.26 – Seção transversal vs deslocamento horizontal Y

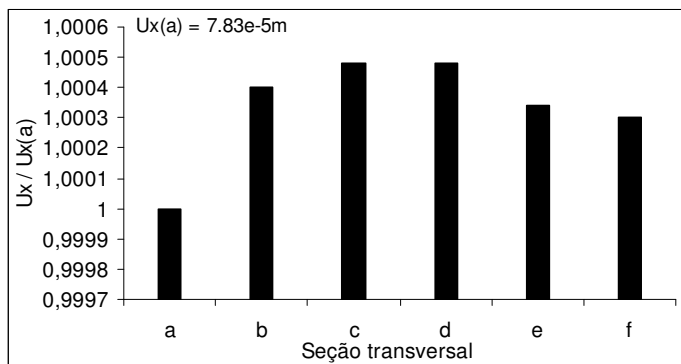


Figura 5.27 – Seção transversal vs deslocamento vertical

O resultado desta avaliação indicou que a seção transversal retangular cheia é a que apresenta menor suscetibilidade às três direções de carga, devendo pois ser utilizada. Ademais, esta é a seção mais facilmente confeccionada.

#### 5.2.6.2 Avaliação da dimensão longitudinal do elemento de fixação ao solo

Nesta etapa, o comportamento dinâmico da estrutura com relação ao comprimento do apoio ao solo ( $L$ ), e conseqüentemente à área de fixação ao solo, foi avaliado. Esta avaliação deu-se através da atribuição de cinco diferentes valores para a dimensão longitudinal do elemento de fixação ao solo componente da nova estrutura-transdutor e posterior análise modal. Todos os valores desta dimensão longitudinal foram atribuídos respeitando o limite superior anteriormente estabelecido. Então, foram identificados os valores de frequência fundamental obtidos por cada configuração, bem como as respectivas formas modais. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 5.7 abaixo. Neste ponto é importante ressaltar que a configuração utilizada nesta e na anterior avaliação posteriormente mostrou-se superdimensionada, de maneira que os valores encontrados serviram apenas como indicativos de tomadas de atitude para a seqüência no desenvolvimento do transdutor da plataforma de forças.

Tabela 5.7 – Comprimento da fixação ao solo vs frequência de vibração

	$f_1$ (Hz)	$f_1(\cdot) / f_1(a)$	$f_2$ (Hz)	$f_2(\cdot) / f_2(a)$	$f_3$ (Hz)	$f_3(\cdot) / f_3(a)$
(a) $L=0.23m$	263.70	1	298.30	1	366.80	1
(b) $L=0.24m$	281.40	1.06	300.60	1	374.60	1.02
(c) $L=0.25m$	301	1.14	303	1.01	381	1.03
(d) $L=0.26m$	305.40	1.15	323.30	1.08	388.90	1.06
(e) $L=0.27m$	308	1.16	348	1.16	395	1.07

Os resultados evidenciam a anteriormente prevista relação entre área de fixação ao solo e os valores de frequência alcançados pela estrutura. Preferencialmente, deve-se utilizar a maior dimensão disponível para a fixação ao solo. Para valores de  $L$  menores que 0,23m as formas modais são alteradas, distanciando-se da ordenação buscada.

### 5.2.7 A composição da solução inicial

Através dos estudos já apresentados, tendo-se determinado a forma da seção do elemento central e o comprimento da fixação ao solo a utilizar, obteve-se propriedade para encaminhar a solução do problema proposto. No estabelecimento da forma geométrica da nova estrutura-transdutor apenas uma idéia aproximada do funcionamento extensométrico da configuração foi obtida, de forma que, ao unir esta estrutura-transdutor à superfície de contato, seu comportamento deve ser reavaliado. Então, a realização da composição entre a estrutura-transdutor e a superfície de contato habilita a comprovação do funcionamento esperado para esta configuração de plataforma de forças.

O procedimento padrão adotado na comprovação do funcionamento para todas as soluções encontradas consistiu em; após unir superfície de contato à estrutura-transdutor; *variar manualmente as dimensões dos membros componentes da estrutura-transdutor, e, caso necessário, a geometria desta estrutura-transdutor através da variação de posições nodais, até encontrar a configuração estrutural que apresentasse, para a situação de mínima carga em cada uma das três direções ortogonais, o valor pré-estabelecido de deformação mecânica relativa igual a  $100\mu\text{m}/\text{m}$  nas posições de instrumentação do transdutor.* Paralelamente, procedeu-se a determinação da ordenação dos três primeiros modos de vibração da estrutura. Com os modos ordenados, realizava-se a avaliação da configuração, caso contrário, o processo de variação de parâmetros era retomado.

Para os elementos elástico  $A$  (Figura 5.13) os valores de deformação foram tomados a 2,5cm de seu engaste; para os elementos elásticos  $B$ , a 2cm do elemento central  $D$ , e para o elemento elástico  $C$  valores são tomados a 2cm do elemento de fixação da estrutura-transdutor ao solo. Estas posições respeitam o Princípio de Saint Vénant.

As cargas mínimas aplicadas têm magnitude 20% menor do que as magnitudes registradas no experimento com a atleta mais leve do clube que requisitou o desenvolvimento da plataforma de forças, esperando-se com isso habilitar o instrumento para utilização com atletas infanto-juvenis. Então, tem-se

$$F_{z_{\min}} = 2560\text{N}$$

$$F_{y_{\min}} = 1200\text{N}$$

$$F_{x_{\min}} = 480\text{N}$$

Estas cargas foram aplicadas como cargas superficiais, diretamente nos elementos centrais constituintes da superfície de contato. Os resultados para deslocamentos são fornecidos em metros. As geometrias deformadas e os modos encontrados para a solução inicial podem ser visualizadas nas figuras abaixo.

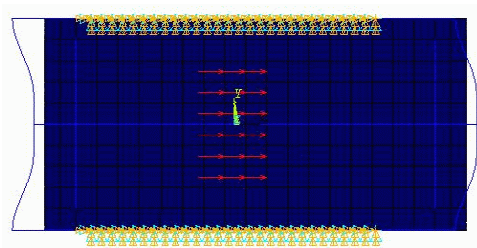


Figura 5.28 – Geometria deformada e deslocamento máximo igual a  $0,933e^{-4}$  m para carregamentos direcional mínimo  $F_x$

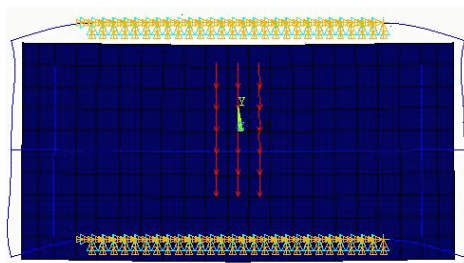


Figura 5.29 – Geometria deformada e deslocamento máximo igual a  $0,457e^{-4}$  m para carregamentos direcional mínimo  $F_y$

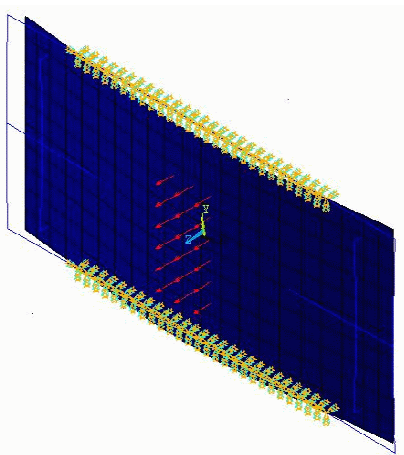


Figura 5.30 – Geometria deformada e deslocamento máximo igual a  $0,180e^{-3}$  m para carregamentos direcional mínimo  $F_z$

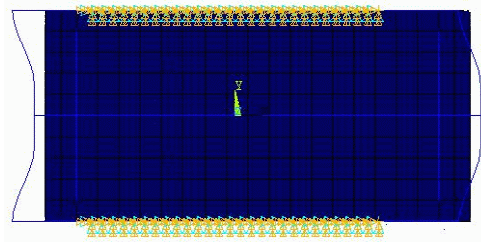


Figura 5.31 – Primeira forma modal. Modo de translação horizontal na direção perpendicular à direção do movimento,  $f_1 = 124,4$  Hz;

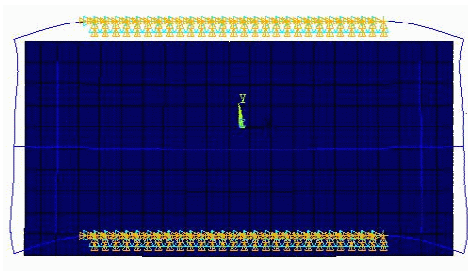


Figura 5.32 – Segunda forma modal. Modo de translação horizontal na direção paralela à direção do movimento,  $f_2 = 293,3$  Hz;

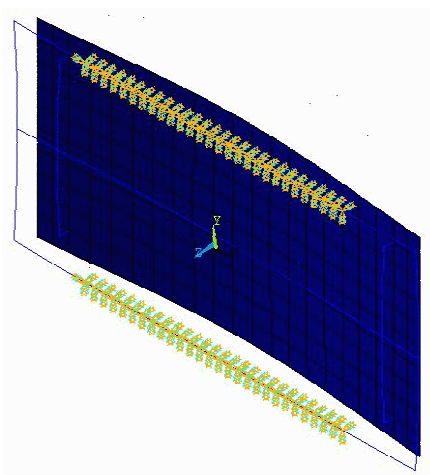


Figura 5.33 – Terceira forma modal. Modo de flexão vertical;  $f_3 = 354$  Hz

Encontrado o nível de deformação pretendido e modos ordenados, procede-se a análise estática desta solução através da aplicação da condição crítica de carregamento. Esta condição é dada pela aplicação combinada de aproximadamente os máximos valores de cargas nas três direções ortogonais já registrados na atividade a que a plataforma se dedica:

$$Fz_{\max} = 12\text{kN}$$

$$Fy_{\max} = 8\text{kN}$$

$$Fx_{\max} = 6\text{kN}$$

A partir da aplicação da condição crítica faz-se a determinação das tensões máximas nas

seções da estrutura-transdutor, visando a confirmação da permanência das tensões abaixo da tensão admissível adotada. A seção crítica foi identificada no encontro dos elementos *C*, com o elemento central *D*. Uma vez que para elementos de viga, como os utilizados, o valor de tensão máxima é calculado apenas considerando tensões normais, os valores de tensão provocados pelos esforços de corte e torção foram averiguados através da determinação individual de tais esforços na seção crítica encontrada. A partir dos resultados obtidos na determinação da tensão máxima sobre toda a estrutura bem como na averiguação das tensões induzidas pelos esforços suportados pela seção crítica verifica-se que a estrutura apresenta valores de tensão abaixo do valor tomado como admissível; viabilizando sua utilização.

### 5.2.8 Crítica da solução inicial

O aspecto mais positivo desta solução inicial diz respeito à simplicidade com que esta configuração pode ser confeccionada partindo-se de um bloco monolítico. A ocorrência de deformações com módulos semelhantes entre os locais destinados à medição de cada variável também figura como aspecto positivo alcançado.

Como aspectos negativos cita-se:

- o baixo valor alcançado para a frequência fundamental da estrutura;
- a limitação de carregamento a que esta configuração está submetida, basicamente devida ao fato de que os elementos elásticos devem atuar também como membros estruturais, de forma que, para alcançar a sensibilidade mínima necessária, estes elementos devem ser feitos o mais esbeltos possível;
- a ocorrência de torção em todos os elementos elásticos utilizados, de forma que os extensômetros devem ser colados exatamente sobre a linha média lateral destes elementos, onde a deformação devida à torção é teoricamente nula;
- o grande vão sobre o qual o elemento *D* atua;
- a ocupação de mais espaço do que destinado ao transdutor, de forma que, longitudinalmente, o transdutor é maior do que a superfície de contato, indicando a necessidade de confecção de uma tampa que o recubra durante a utilização;
- o resultado obtido para a frequência fundamental desta estrutura não permite que os efeitos dinâmicos deste carregamento sejam negligenciados, de forma que comportamento estático não poderia ter sido assumido;

Com isso, primordialmente devido ao baixo valor de frequência fundamental alcançado, tem-se que uma nova configuração para o transdutor da plataforma deve ser buscada.

### 5.2.9 Alternativas de transdutor derivadas da configuração inicial

Tendo-se constatado as carências da configuração inicial, parte-se para a geração de novas alternativas para o transdutor da plataforma de forças. Como os elementos elásticos verticais (elementos *A* da figura 5.13) têm suas posições pré-fixadas e apresentaram comportamento adequado, sua configuração foi mantida inalterada.

As alterações na forma geométrica do transdutor, então, dizem respeito exclusivamente à configuração adotada para os elementos encarregados dos sensoriamentos horizontais necessários à plataforma, ou seja, sensor de  $F_x$  ( $S_x$ ), sensor de  $F_y$  ( $S_y$ ) e sensor de  $M_z$  ( $S_{mz}$ ). Estas alterações, as quais são intermediárias entre a solução inicial e a solução final encontrada, são apresentadas sucintamente abaixo.

O transdutor alterado1 diz respeito à configuração apresentada na figura 5.34abaixo.

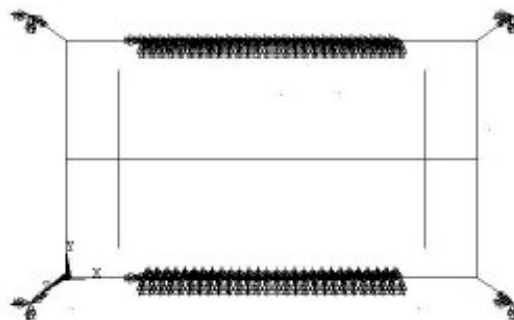


Figura 5.34 – Discretização da configuração estrutural do transdutor alterado 1. Reforço a 45°.

Nesta alternativa procurou-se suprir a configuração inicialmente utilizada (figura 5.13) com elementos estruturais que fossem capazes de absorver parte da energia de deformação que é transmitida através dos cantos do pórtico da configuração inicial, e que induzem acoplamento através da solicitação dos elementos elásticos *C* (figura 5.21e figura 5.22). Os novos elementos foram acrescentados de forma que:

- para solicitações verticais auxiliassem a transmissão do carregamento ao solo, diminuindo a torção induzida aos elementos *C* e *B* (símbolos relativos à figura 5.13);
- para solicitações horizontais perpendiculares à direção do movimento, agissem como reforços aos apoios representados pelos elementos *C*, diminuindo o giro induzido (este giro é evidenciado na figura 5.21),
- para solicitações horizontais paralelas à direção do movimento, formassem uma configuração de viga bi-apoiada com os elementos *C*, novamente para diminuir a indução de giro entre *C* e *B*.



Fez-se a variação da posição angular dos novos reforços utilizados, sendo que a posição a  $0^\circ$  foi considerada a mais adequada entre posições angulares do reforço variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , conforme a resposta fornecida à aplicação de cargas. Assim, esta alteração apresentou os níveis de deformações buscados para os locais de colagem dos extensômetros e o desejado ordenamento das três primeiras formas modais, na seção crítica da estrutura foi verificada a não ocorrência da tensão tomada como admissível para o caso em estudo. Ainda verificou-se diminuição dos níveis de acoplamento mecânico ocorrentes; porém, considerando-se a utilização da técnica de desacoplamento mecânico-elétrica, esta contribuição é pouco significativa. O aumento no valor da frequência fundamental da estrutura conseguido foi igual a 45%.

A par destes resultados, partiu-se para o transdutor alterado 2, que constituiu uma tentativa na qual buscou-se fundamentalmente reduzir o vão livre a que o elemento central *D* (novamente referenciando a figura 5.13) é submetido. Isto foi feito através da inserção de membros estruturais ligando os elementos *C* e *D*, sem função de medição, conforme apresentado na figura 5.35 abaixo.

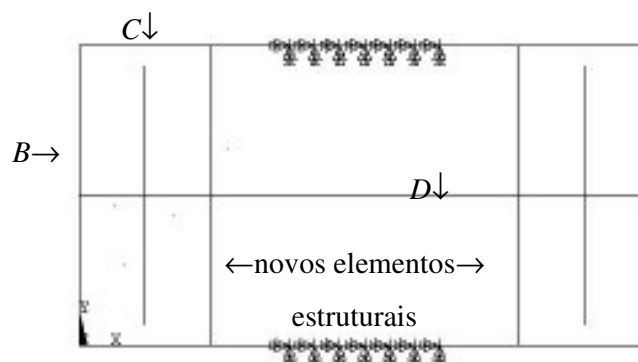


Figura 5.35 – Transdutor alterado 2

Esta redução do vão faz com que os indesejados efeitos de flexão, tanto transversal quanto longitudinal (figura 5.22 e figura 5.23), do elemento central *D* sejam minimizados. Porém, esta tomada de atitude, visto que as distâncias tanto longitudinal quanto transversal dos apoios da superfície de contato ao transdutor não podem ser alterados, implicou na diminuição do comprimento do elemento destinado à fixação da plataforma ao chão. Mesmo assim, seus modos continuaram ordenados como desejado, habilitando sua utilização. A frequência fundamental alcançada foi 60% maior do que a alcançada inicialmente. Porém, também nesta configuração ocorre o inconveniente de os mesmos elementos atuarem como estrutura e elementos elásticos, de forma que a frequência fundamental alcançada fica fortemente condicionada à sensibilidade requerida.

Findada esta tentativa constatou-se que, além de desempenharem a função de transmissão de esforços prevista em sua concepção, os cantos dos transdutores já analisados (ligação entre os elementos *B* e *C* da figura 5.13 e figura 5.35) atuam como agentes indutores de acoplamento mecânico (através das suas rotações). Frente à isso, e sabendo-se que tais cantos não desempenham função de medição, foi proposta uma configuração na qual estes cantos são suprimidos (figura 5.36).

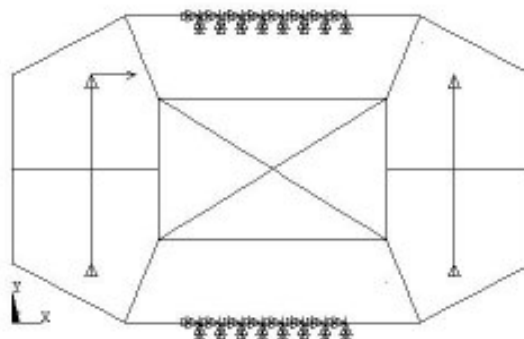


Figura 5.36 – Transdutor alterado 3

Desta forma procurou-se fazer com que os esforços, entre as direções horizontais, fossem parcialmente transmitidos de forma axial. Esta configuração apresentou o menor nível de acoplamento mecânico entre direções horizontais registrado, igual a 5%. Para as solicitações verticais a melhoria deveu-se novamente à utilização de um membro estrutural intermediário capaz de diminuir o vão livre enfrentado pelo elemento central *D*, o qual teve sua forma descaracterizada. Este desenvolvimento foi abandonado novamente devido ao inconveniente de os mesmos elementos atuarem como estrutura e elementos elásticos, restringindo sua frequência fundamental (em torno de 70% maior do que a obtida inicialmente).

Como os elementos estruturais utilizados para diminuir o vão livre do elemento central *D* (figura 5.35) eram deformados sob a aplicação de carregamentos horizontais perpendiculares à direção do movimento surgiu a idéia de instrumentá-los. Com isso, os antigos elementos *B* perderam a função que lhes era destinada, sendo suprimidos na nova alternativa em estudo. Esta tomada de atitude, porém, não contornou o problema ocasionado pela dupla função estrutura/transdutor desempenhada pelos componentes desta nova configuração. *Este problema passou a ser considerado essencial na busca pela configuração capaz de fornecer alta frequência fundamental à plataforma de forças.*

Então, fez-se a tentativa de prover a tentativa em estudo de elementos transdutores dispostos paralelamente aos elementos estruturais, com a finalidade de dissociar parcialmente as funções estruturais e extensométricas. A discretização deste transdutor alterado 4 é

apresentada na figura 5.37.

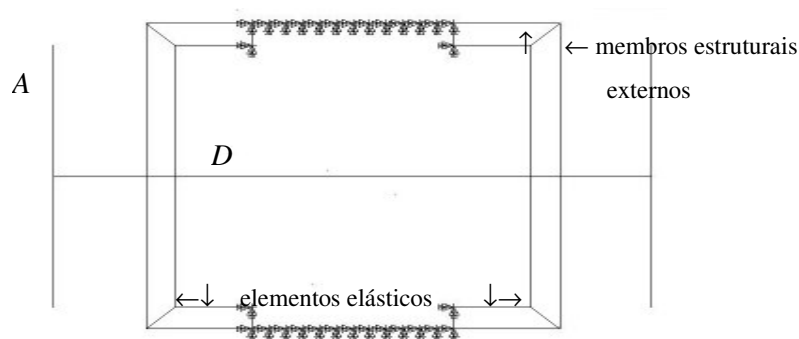


Figura 5.37 – Transdutor alterado 4

Esta tentativa logo mostrou-se promissora pois, através da redução da seção *na região central de cada um dos novos elementos elásticos horizontais*, e acerto nas dimensões dos demais componentes, conseguiu-se fazer com que a máxima deformação mecânica relativa, para cada uma das direções horizontais de solicitação, fosse registrada exatamente nestes locais, os quais são destinados à colagem dos extensômetros. Ou seja, ficou evidenciado que havia uma relação entre as dimensões dos elementos elásticos que permitia que alguns pontos superficiais destes elementos pudessem ser localmente mais deformados do que qualquer outro ponto da estrutura. Para a solicitação vertical o comportamento permaneceu inalterado, sendo a deformação máxima registrada próxima ao engaste. Pela primeira vez, então, o local de máxima deformação, sob solicitações horizontais, não encontrava-se nas regiões extremas dos membros estruturais encarregados do sensoriamento, ou seja, encontrou-se uma relação dimensional e de posição na qual a maior rigidez dos membros externos não impedia a ocorrência de maiores níveis de deformação em elementos posicionados paralelamente à eles.

Este desfecho encontrado originou-se de ponderações a respeito de amplificação da deformação de um membro estrutural de viga (simplificação utilizada para este estudo de amplificação). Considerou-se que, *quanto maior a dimensão transversal da viga paralela à direção de carregamento, maior é a distância entre a linha neutra da viga e as fibras mais externas*( $c$ ). Isto indica que um maior valor de esforço de flexão e conseqüentemente, maiores valores de tensão e deformação ocorrem nesta fibras quando o membro é solicitado. Então, passou-se a aumentar a referida dimensão transversal, porém, surpreendentemente, a deformação não aumentou. Atentando para as variáveis envolvidas no fenômeno, identificou-se que o motivo para a manutenção dos valores de deformação era o fato de que, na mesma medida em que as fibras mais externas eram afastadas da linha neutra, aumentava também o volume do membro estrutural e, conseqüentemente seu momento de inércia ( $I$ ). Ou seja, o aumento de  $c$ , diretamente proporcional ao aumento da deformação, era compensado pelo aumento do  $I$ , que é inversamente

relacionado com a deformação (para a situação em estudo). Assim, a tarefa de encontrar a deformação amplificada nos pontos desejados resumiu-se a variações dimensionais que consideravam a razão de aumento da distância  $c$  frente à razão de aumento do momento  $I$ , sendo assim alcançada máxima deformação nas posições de colagem dos extensômetros. A máxima amplificação obtida com esta técnica foi de 30%

Porém, a análise modal deste transdutor alterado 4 mostrou a ocorrência de um terceiro modo de vibração indesejado, de forma torcional, induzido pela massa em balanço representada por cada um dos elementos elásticos  $A$  (figura 5.37). Supondo que este modo poderia ser evitado através do aumento do momento de inércia da seção transversal do elemento central  $D$  (figura 5.37) passou-se a aumentar as dimensões desta seção. Por mais que estas dimensões fossem aumentadas, inclusive atribuindo-se valores inalcançáveis para o momento de inércia da seção do elemento central  $D$ , este modo não foi substituído.

Com isso teve-se que proceder um retrocesso na solução, que consistiu em retomar os antigos elementos  $B$  e os complementos dos membros laterais anteriormente suprimidos. Assim, chegou-se à configuração que atendeu os propósitos iniciais do desenvolvimento deste trabalho, a qual é apresentada no capítulo 6.

## 6 A SOLUÇÃO FINAL ENCONTRADA

A solução final encontrada diz respeito à configuração composta pela superfície de contato apoiada sobre uma estrutura suporte que possui porções metálicas adjacentes deformáveis. Esta idéia foi apresentada dentro da discussão sobre as possíveis soluções para o problema, item 4.3. Além da função de transmissão do carregamento até o solo, a estrutura suporte continua sendo encarregada do sensoriamento do carregamento vertical ( $F_z$ ) e dos momentos em torno dos eixos horizontais ( $M_x$  e  $M_y$ ), ao passo que os elementos adjacentes deformáveis passam a ser encarregados do sensoriamento dos carregamentos horizontais, em ambas direções ( $F_x$  e  $F_y$ ), e do momento em torno do eixo vertical ( $M_z$ ).

Deste modo, as funções estrutural e extensométrica foram apenas parcialmente dissociadas, pois a denominada estrutura suporte, mesmo que de maneira reduzida, atende ainda a função extensométrica, enquanto os elementos criados apenas para cumprir a função de transdução, estando ligados à estrutura suporte, também são solicitados como membros estruturais. O transdutor discretizado desta configuração é apresentado na figura 6.1 abaixo. A discretização da solução composta pela superfície de contato mais o transdutor é apresentada na figura 6.2.

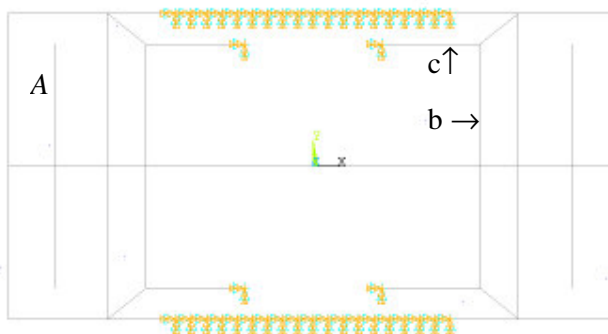


Figura 6.1 – Discretização do transdutor da solução final

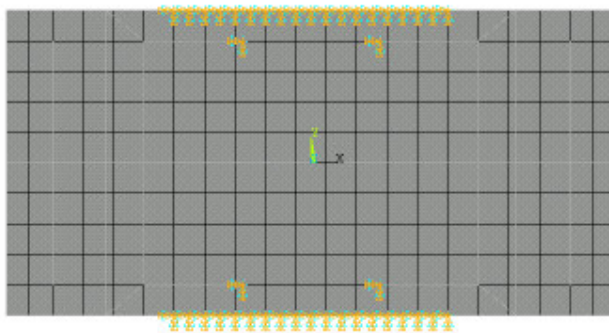


Figura 6.2 – Discretização da solução final

Esta solução aparece como a evolução natural do objeto em estudo. Visto que o comportamento ideal do elemento central (elemento *D* na figura 5.13), ou seja, altíssima rigidez, não pode ser alcançado devido à limitações de volume de material e massa, alternativas para sua utilização tiveram de ser desenvolvidas. Então, conforme desenvolvido para o *transdutor alterado 2*, o conceito de redução do vão livre sobre o qual o elemento central atua foi também utilizado nesta solução final

A utilização dos elementos intermediários, encarregados de diminuir o vão livre sobre o qual o elemento central atua, acarreta uma indesejável redução da área destinada à fixação da plataforma ao solo. Porém, com a introdução dos elementos elásticos horizontais em paralelo com a estrutura suporte, novos pontos de fixação da plataforma ao solo são introduzidos, de maneira que a inconveniente redução da área de fixação é amenizada. Consequentemente, a colocação dos elementos elásticos horizontais na região central da plataforma também auxilia a transmissão de carregamento entre os pontos de contato transdutor-superfície de contato e o solo pois parte da carga aplicada sobre a plataforma pode transmitir-se diretamente do ponto de apoio ao solo sem precisar contornar toda a estrutura (como acontece na configuração *original*). Este fato representa uma melhor eficiência estrutural desta configuração frente às demais.

Os elementos suportes mais externos que já eram utilizados na configuração que originou a linha de desenvolvimento seguida, tratados anteriormente por *antigos elementos B*, foram reutilizados na composição da solução final. Isto porque, conforme constatado no desenvolvimento do *transdutor alterado 4*, a ausência destes elementos externos notadamente diminui a resistência da configuração à torção. A utilização destes elementos externos então, faz com que a solução final configure uma estrutura tipo caixa, sabidamente resistente à esforços torcionais.

O elemento elástico do transdutor que promove a ligação transdutor-superfície de contato (elemento elástico *A* na figura 5.13) foi mantido com praticamente as mesmas dimensões utilizadas na sua análise dedicada. Os demais elementos elásticos, ou seja, os novos elementos (*b* e *c* da figura 6.1) tiveram suas dimensões determinadas a partir do estudo de amplificação de deformação realizado no desenvolvimento da alternativa *transdutor alterado 4*. De acordo com a razão entre suas dimensões, estes elementos não podem ser tratados como transdutores do tipo viga, configurando elementos elásticos do tipo “plate-beam”, como definido por Kim, 1999. Disto resulta que a característica de inerente baixa frequência dos elementos transdutores do tipo viga ficou pouco pronunciada nestes elementos elásticos utilizados.

O transdutor, como um todo, foi projetado de maneira a poder ser confeccionado a partir de um bloco monolítico, tendo sido então respeitadas as dimensões limitadas do bloco metálico

avaliado para sua construção. A utilização de alumínio liga de alta resistência mecânica permitiu o emprego de maior volume de material em comparação à utilização de aço. Com isso seções transversais com maiores momentos de inércia puderam ser utilizadas. A liga utilizada, Al60616, é fornecida pelo fabricante com uma camada de óxido de proteção para utilização em ambiente aberto. Os locais posteriormente usinados devem ser novamente protegidos, ao passo que os locais trabalhados para colagem dos extensômetros devem ser recobertos com silicone.

A utilização de material composto na superfície de contato permitiu aliar rigidez, resistência mecânica e pouca massa. A espessura adotada para este elemento, em seu desenvolvimento, foi função principalmente da disponibilidade de matéria prima para seu miolo. Porém, após o referido desenvolvimento, tomou-se conhecimento da disponibilidade de miolos de Kevlar Honeycomb com maiores espessuras, de forma que torna-se possível aumentar ainda mais a rigidez obtida para o elemento de placa. Com relação à chapa fina de alumínio, utilizada para recobrir a placa composta, cita-se que para diminuição de massa sua topologia pode ser feita descontínua, apresentando pequenos furos circulares em toda a sua área, pois, de qualquer forma, uma manta sintética deverá recobrir esta chapa nos experimentos. Evidentemente as crivas das sapatilhas irão degradar mais e mais, com o passar do tempo, as lâminas de carbono-epóxi da placa. Porém, sendo a superfície de contato da plataforma o componente de menor vida útil estimada, devido principalmente à sua higroscopia, este componente poderá ser periodicamente substituído.

Conforme abordado nas considerações sobre o desenvolvimento da plataforma, concessões de sensibilidade foram feitas em prol da rigidez estrutural desta configuração final. Com relação às interferências, a geometria adotada permite a utilização da técnica de desacoplamento mecânico-elétrica de forma similar àquela apresentada para a configuração original.

De acordo com a geometria encontrada para a solução final, sua manufatura, utilizando usinagem, será dispendiosa. Porém, tratando-se de um sensor de seis componentes, esta é uma situação comumente enfrentada. Após a manufatura e alívio de tensões, pode-se instrumentar o transdutor da plataforma, utilizando os espaçamentos reservados para esta realização. Para a montagem do instrumento em local previamente preparado para sua instalação, a seqüência de passos abaixo é sugerida:

- nivelamento e fixação rígida de parafusos de espera no solo;
- união transdutor-superfície de contato através das inserções metálicas;
- posicionamento e colocação da plataforma através dos parafusos de espera;
- utilizando uma chave de 'boca', pode-se proceder o aperto dos parafusos a partir das

laterais da plataforma;

Periodicamente o nível de aperto dos parafusos de fixação ao solo deverão ser verificados.

Após a montagem, pode-se proceder a calibração, diretamente no local de utilização do instrumento, conforme apontado no item 5.1.2.

O modelo final do transdutor da plataforma desenvolvida é apresentado na figura 6.3. Algumas vistas laterais e frontais da plataforma são apresentadas em corte (ver figura 6.4) nas figuras seguintes.

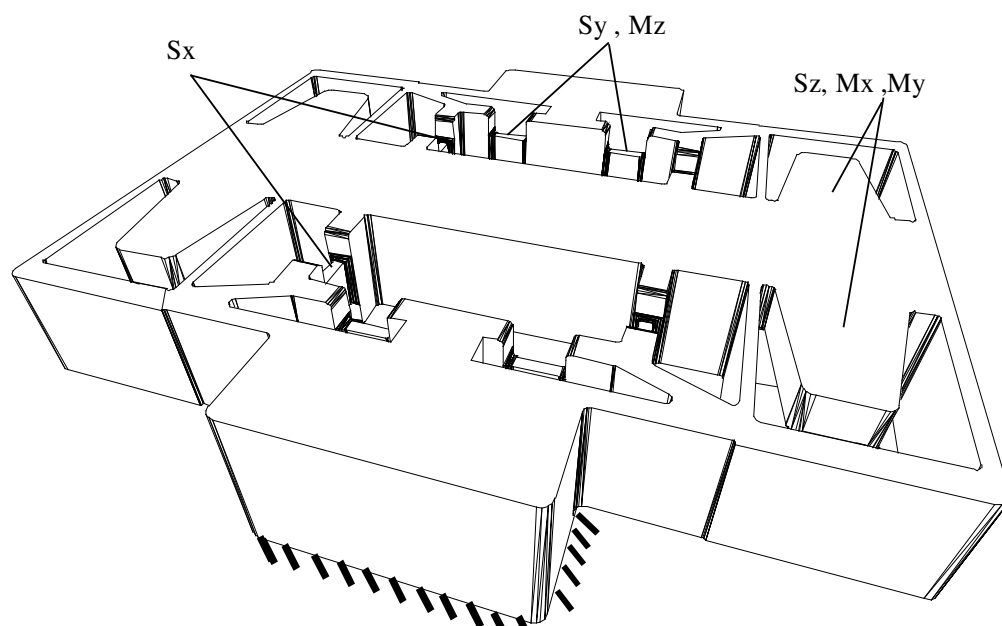


Figura 6.3 – Apresentação do modelo final de transdutor da plataforma desenvolvido

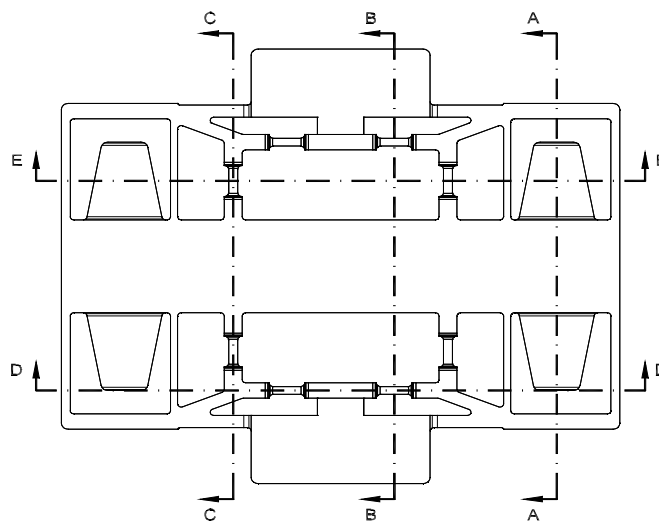


Figura 6.4 – Cortes feitos para apresentação da plataforma



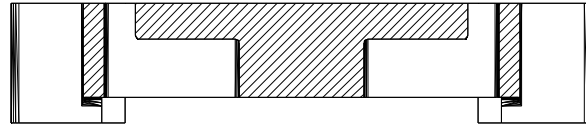


Figura 6.5 – Corte A-A. Vista lateral da plataforma

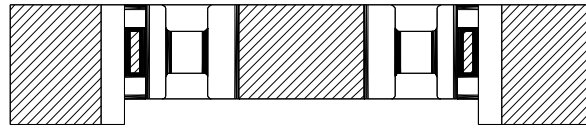


Figura 6.6 – Corte B-B. Vista lateral da plataforma

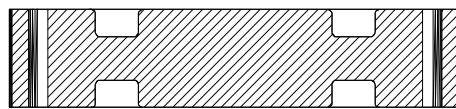


Figura 6.7 – Corte C-C. Vista lateral da plataforma

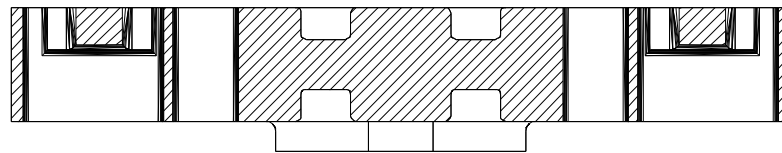


Figura 6.8 – Corte D-D. Vista frontal da plataforma

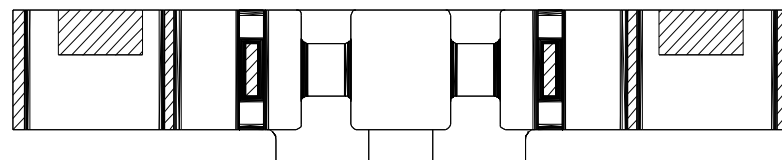


Figura 6.9 – Corte E-E. Vista frontal da plataforma

Seu funcionamento para carregamentos horizontais é esquematizado na figura 6.10.

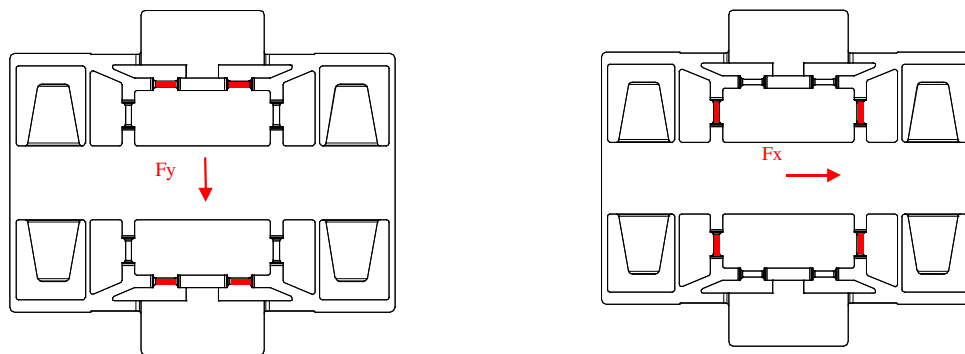


Figura 6.10 – Representação esquemática da localização dos extensômetros (em vermelho) para solicitações horizontais

Esta configuração, após ter sido munida da superfície de contato, foi avaliada da mesma forma seqüencial adotada anteriormente, tal que:

1. o valor de deformação pré-fixado para cada uma das direções de carregamento foi alcançado,
2. a possibilidade de utilização da técnica de desacoplamento mecânico-elétrica foi comprovada;
3. as formas modais apresentadas corresponderam ao ordenamento buscado;
4. o valor da frequência fundamental ultrapassou o mínimo estabelecido;
5. a seção crítica da estrutura foi identificada após a aplicação do carregamento crítico inicialmente previsto e sua permanência abaixo da tensão admissível comprovada;

Então, tendo cumprido a todas as premissas básicas, esta configuração foi submetida a análises suplementares, tal que:

- 1 a faixa de frequências para a utilização do instrumento foi estabelecida;
- 2 a resposta da estrutura a carregamentos transientes situados dentro de sua faixa de utilização foi comprovada;

A seguir, cada uma destas etapas é apresentada e comentada através das análises pertinentes realizadas.

#### 6.1 Análise estrutural estática:

Novamente, esta análise serviu para comprovar a resistência mecânica desta configuração e comprovar a ocorrência da deformação com níveis pré-determinados nos locais sensoriados.

As formas deformadas, para cada direção de carregamento, são apresentadas abaixo.

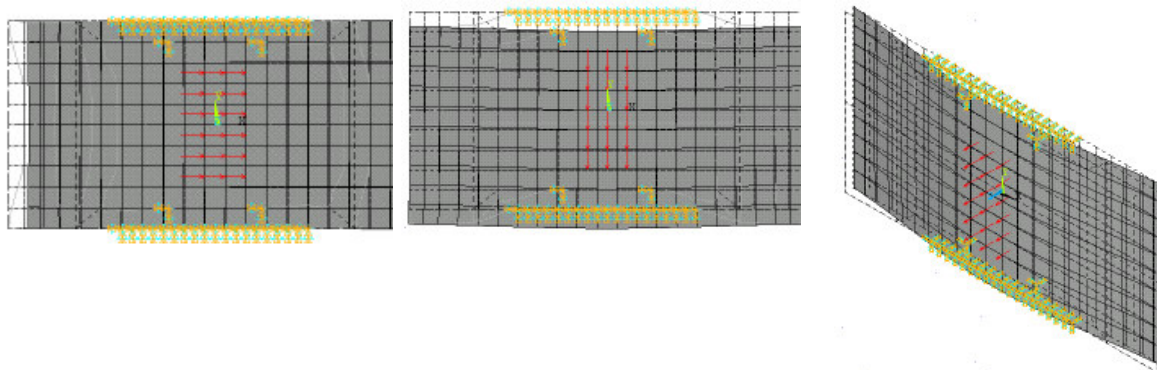


Figura 6.11 – Formas deformadas da plataforma sob carregamento  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , respectivamente

Com esta análise conclui-se:

-os valores de deformação máxima, nas direções horizontais, situaram-se na posição destinada aos extensômetros (figura 6.12);

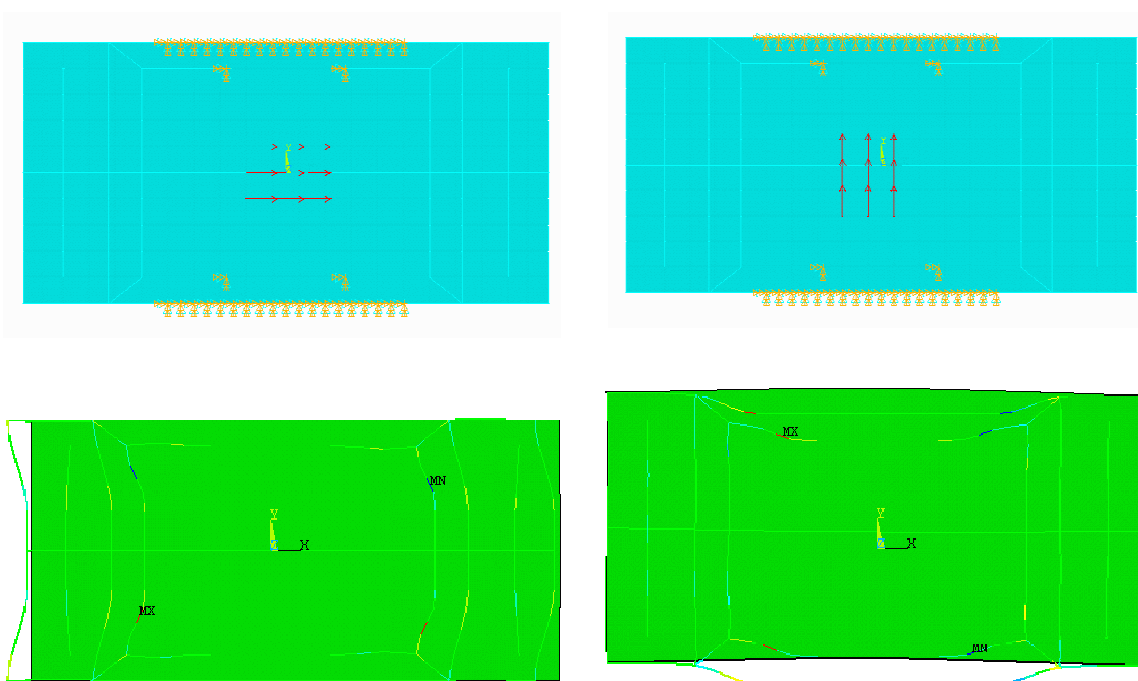


Figura 6.12 –Aplicação de carregamento nas direções horizontais  $F_x$  e  $F_y$ , respectivamente, e identificação das posições onde ocorrem as máximas deformações mecânicas relativas para cada direção horizontal

- a direção de menor rigidez, como procurado, é a direção horizontal X, a qual apresentou deformações com magnitudes 40% maiores que as deformações para a outra direção horizontal, sob mesmo valor de carga.
- após a aplicação do carregamento crítico ( $F_z = 12\text{kN}$ ,  $F_y = 8,6\text{kN}$  e  $F_x = 3\text{kN}$  simultaneamente aplicados nos elementos do centro da superfície de contato) a tensão na

seção crítica foi identificada, estando localizada no elemento elástico b (figura 6.13). Considerando apenas tensões de tração a tensão nesta seção ficou em 144MPa, 20% abaixo da tensão tomada como admissível.

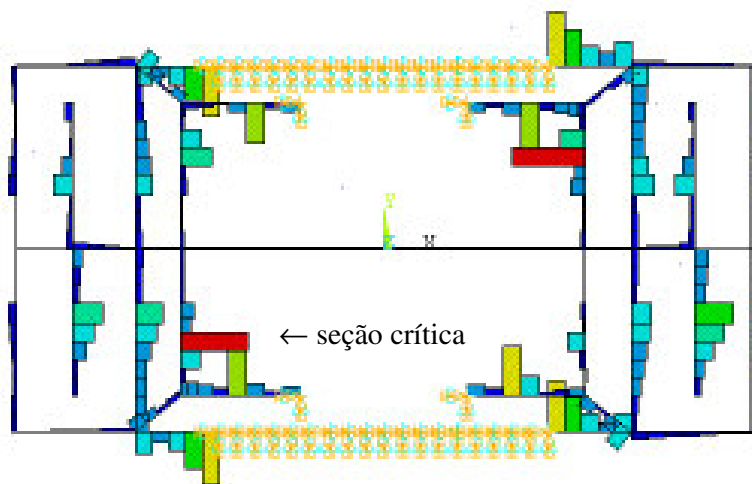


Figura 6.13 – Identificação da seção crítica do transdutor.

Para verificar se as tensões de corte ocasionadas pelo esforço cortante e momento torçor também estão abaixo do limite admissível estes esforços foram avaliados na seção crítica. Após, contando com o valor da área da seção transversal nesta seção crítica, as tensões induzidas foram calculadas, comprovando-se a resistência mecânica da configuração final. Através desta determinação de esforços também constatou-se a diminuição dos níveis destes esforços nos elementos sensores horizontais.

É necessário analisar a deformação nas posições dos extensômetros para as seis componentes capazes de excitar a plataforma, constituídas pelas três componentes de força, aplicadas na região central da superfície de contato e por três momentos, resultantes da aplicação de forças descentradas sobre a superfície de contato da plataforma. Assim, a verificação da ocorrência de acoplamentos mecânicos entre diferentes eixos de medição foi feita aplicando-se carregamento em um eixo e coletando-se os valores de deformação nos sensores dos demais eixos, considerando a direção da grade de cada sensor. A aplicação de momentos foi feita utilizando-se binários de força com valores correspondentes às forças diretas ( $F_z$ ,  $F_y$  e  $F_x$ ) exercidas normalmente, de forma que o comportamento da plataforma para carregamentos diferentes do ideal também foi avaliado.

A posição dos sensores horizontais  $F_y$  e  $M_z$  é 30mm distante do seu engaste ao solo; do sensor  $F_x$  é 25mm distante do elemento central. Para os verticais,  $F_z$ ,  $M_x$  e  $M_y$ , distante 25 mm da extremidade fixa. A Tabela 6.1 mostra os resultados das deformações relativas, quando a

carga de trabalho, situada entre os valores mínimo e máximo esperados, é aplicada sobre a superfície da plataforma. Sua leitura deve ser feita utilizando os circuitos ponte de Wheatstone apresentados no item 5.2.3, considerando que:

-os extensômetros  $Sx_1$ ,  $Sx_2$ ,  $Sx_3$  e  $Sx_4$  passaram dos elementos  $B$  (figura 5.13) aos elementos  $b$  (figura 6.1);

-os extensômetros  $Sy_1$ ,  $Sy_2$ ,  $Sy_3$ ;  $Sy_4$ ;  $Smz_1$ ,  $Smz_2$ ,  $Smz_3$  e  $Smz_4$  passaram dos elementos  $C$  (figura 5.13) aos elementos  $c$  (figura 6.1);

Então, com os resultados de deformação na posição de cada extensômetro para cada aplicação de carga, pode-se compor as variações de resistência ocorridas em cada circuito tipo ponte componente da plataforma e verificar se o único circuito que apresenta desbalanço é mesmo aquele correspondente à carga aplicada.

Tabela 6.1 – Verificação do acoplamento mecânico da configuração final

Força(N)ou Momento (Nm)		Deformações( $\mu\text{m}/\text{m}$ )				Deformações de interferência ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )							
$F_z=5480$	gage	$Sz_1$	$Sz_2$	$Sz_3$	$Sz_4$	$Sx_1$	$Sx_2$	$Sx_3$	$Sx_4$	$Sy_1$	$Sy_2$	$Sy_3$	$Sy_4$
	MEF	137	-137	-137	137	3.47	-4.2	-4.2	3.47	–	1.2	1.2	–
$F_y=2600$	gage	$Sy_1$	$Sy_2$	$Sy_3$	$Sy_4$	$Sx_1$	$Sx_2$	$Sx_3$	$Sx_4$	$Sz_1$	$Sz_2$	$Sz_3$	$Sz_4$
	MEF	-170	-112	112	170	78	-43	-43	78	28.5	-28.5	28.5	-28.5
$F_x=1490$	gage	$Sx_1$	$Sx_2$	$Sx_3$	$Sx_4$	$Sy_1$	$Sy_2$	$Sy_3$	$Sy_4$	$Sz_1$	$Sz_2$	$Sz_3$	$Sz_4$
	MEF	137	167	-167	-137	-25	51	51	-25	1.1	1.1	-1.1	-1.1
$M_z=-84.9$	gage	$Smz_1$	$Smz_2$	$Smz_3$	$Smz_4$	$Sx_1$	$Sx_2$	$Sx_3$	$Sx_4$	$Sz_1$	$Sz_2$	$Sz_3$	$Sz_4$
	MEF	-208	150	150	-208	-200	-223	-223	-200	32	32	32	32
$M_y=-380$	gage	$Smy_1$	$Smy_2$	$Smy_3$	$Smy_4$	$Sy_1$	$Sy_2$	$Sy_3$	$Sy_4$	$Sx_1$	$Sx_2$	$Sx_3$	$Sx_4$
	MEF	109	-109	109	-109	–	–	–	–	–	–	–	–
$M_x=2.31$	gage	$Smx_1$	$Smx_2$	$Smx_3$	$Smx_4$	$Sy_1$	$Sy_2$	$Sy_3$	$Sy_4$	$Sx_1$	$Sx_2$	$Sx_3$	$Sx_4$
	MEF	-242	-242	271	271	–	–	–	–	6.8	11	-9	-6.8

A partir destes valores conclui-se que pode-se utilizar a técnica de desacoplamento mecânico-elétrica com sucesso nesta plataforma, pois as deformações surgidas nos locais dos extensômetros são bem relacionadas. A quantificação do nível de acoplamento residual após a utilização desta técnica só pode ser determinada experimentalmente.

Para verificar se a plataforma de forcas mediria carregamentos verticais independentemente do ponto de aplicação da carga sobre sua superfície, tratou-se de aplicar

cargas verticais sobre todos os pontos da superfície de contato e verificar o somatório das deformações ocasionadas nos locais de medição dos elementos elásticos *A* (figura 6.1). A maior diferença encontrada foi de 5%, registrada em uma aplicação da carga na borda lateral da superfície de contato, região central. Em todos os demais pontos a diferença ficou abaixo de 1,5%. O motivo da grande diferença registrada ao aplicar a carga na borda lateral não foi identificado. Para os elementos elásticos horizontais as diferenças no somatório das deformações, frente a aplicação de cargas em diferentes pontos da superfície de contato, são menores que 1%.

A sensibilidade desta configuração para a direção vertical de carregamento pode ser avaliada considerando-se, simplificadamente, o elemento elástico *A* uma viga engastada. Ao ser solicitado, em sua extremidade livre, através dos pontos de apoio da superfície de contato, a deformação específica na posição de colagem do extensômetro seria:

$$\varepsilon = \frac{6.F.x}{E.b.h^2} \quad (6)$$

sendo

F = a força aplicada ao extremo do elemento elástico *A*

x = a distância entre o ponto de aplicação da carga e o ponto de colagem do extensômetro;

Na aplicação de uma força *F* unitária, considerando-se o ponto de aplicação da carga distante 1cm do extremo livre do elemento elástico *A* e a dimensão de base igual a média entre a dimensão de base no engaste e a dimensão de base na extremidade livre deste elemento elástico, tem-se:

$$\varepsilon = 6.1.0,02 / 0,7. 10^{11}. 0,045.0,017^2 = 0.131 10^{-6} \text{ (m/m)}$$

Com a montagem dos extensômetros em ponte de Wheatstone completa, a variação relativa da voltagem é igual a variação relativa da resistência elétrica, de forma que:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta R}{R} \quad (7)$$

A deformação sofrida pelos extensômetros, por sua vez, se relaciona com a variação da resistência pela expressão

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (8)$$

sendo *K* o fator gage, característico do strain gage utilizado. Com um extensômetro da marca Kyowa, modelo KFG-2-350-C1-23, para alumínio, o fator gage seria 2,1.

Considerando-se que a carga aplicada sobre a plataforma é dividida entre os quatro elementos

elásticos  $A$ , tem-se:

$$\Delta V = \frac{V.K.\varepsilon}{4} = 0,34\mu\text{V}$$

De forma que para cada Newton aplicado sobre a plataforma, tem-se a variação de  $0,34\mu\text{V}$  na saída da ponte (se alimentada com uma tensão de  $5\text{V}$ ). Utilizando-se um condicionador de sinais com sensibilidade de  $2,5\mu\text{V}$  poder-se ia ler aproximadamente  $7,3\text{N}$ .

## 6.2 Cálculo das propriedades dinâmicas da plataforma de forças (frequências naturais e modos de vibração)

Procedeu-se esta análise para identificação das formas modais, e respectivos valores de frequências naturais, apresentadas pela plataforma desenvolvida. Os resultados encontrados são apresentados nas figuras abaixo.

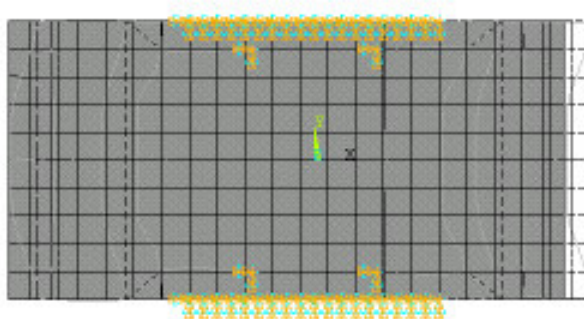


Figura 6.14 – Primeira forma modal;  $f_1 = 432\text{ Hz}$ . Modo horizontal na direção X

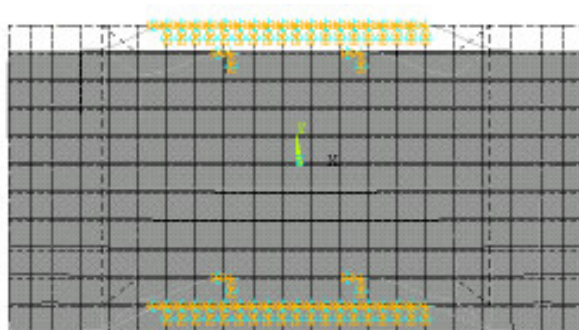


Figura 6.15 – Segunda forma modal  $f_2 = 470\text{ Hz}$ . Modo horizontal na direção Y

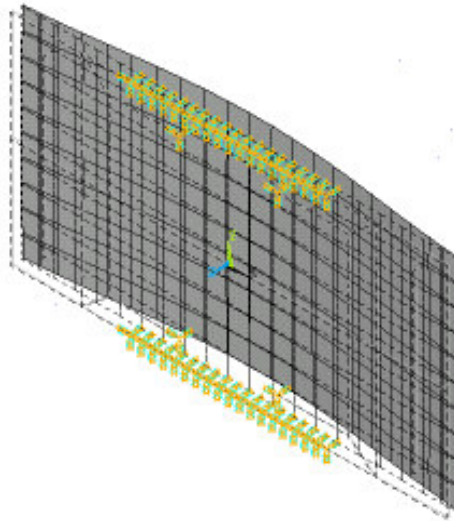


Figura 6.16 – Terceira forma modal  $f_3 = 480$  Hz. Modo vertical, direção Z

Na tentativa de aproximar mais a situação real, repetiu-se este cálculo considerando a plataforma fixada ao solo em apenas cinco pontos, ou seja, substituiu-se a linha engastada por três pontos (dois extremos e um central) representando parafusos. A variação nos valores de frequências naturais obtidos foi menor que 2%.

Com a finalidade de identificar o ordenamento e a composição dos modos, quantificando com isso as interações entre as direções de deslocamento assumidas em cada forma modal utilizou-se o Método da Superposição Modal, através do conceito de coeficiente (ou fator) de participação modal ( $\gamma_i$ ) (ver item 3.3.5). Então, avaliou-se a parcela de contribuição que cada modo induz sobre cada uma das três direções ortogonais da plataforma. Os resultados obtidos, para cada uma das três direções, são apresentados nas figuras abaixo.

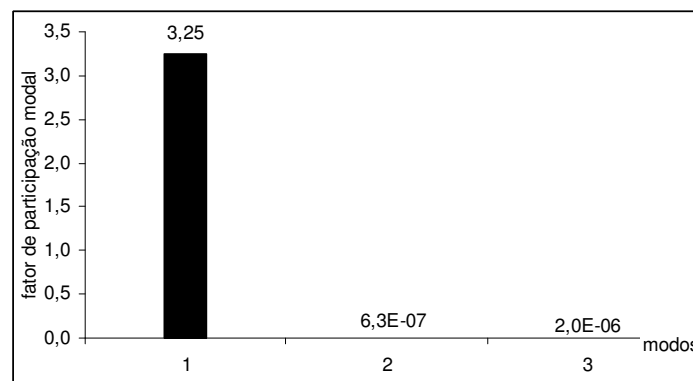


Figura 6.17 – Contribuição fornecida ao deslocamento na direção X pelos primeiros três modos excitados



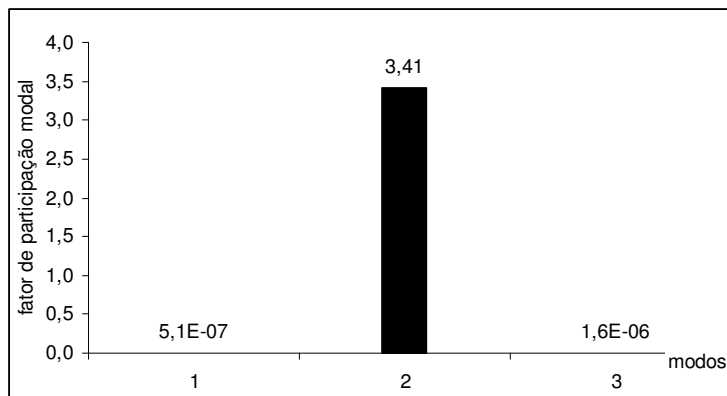


Figura 6.18 – Contribuição fornecida ao deslocamento na direção Y pelos primeiros três modos excitados

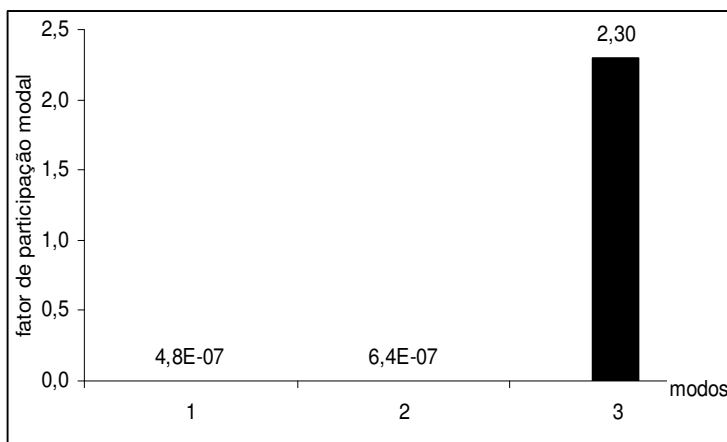


Figura 6.19 – Contribuição fornecida ao deslocamento na direção Z pelos primeiros três modos excitados

Notadamente os três primeiros modos são praticamente limpos ou desacoplados, tal que cada qual induz deslocamento predominantemente em uma direção ortogonal específica da plataforma.

Para mostrar o acoplamento entre os deslocamentos induzidos nas demais formas modais apresentadas pela plataforma de forças desenvolvida se apresenta a continuação o valor do coeficiente de participação modal para a quarta forma modal, com relação a cada uma das três direções ortogonais da plataforma, é apresentado (figura 6.20).

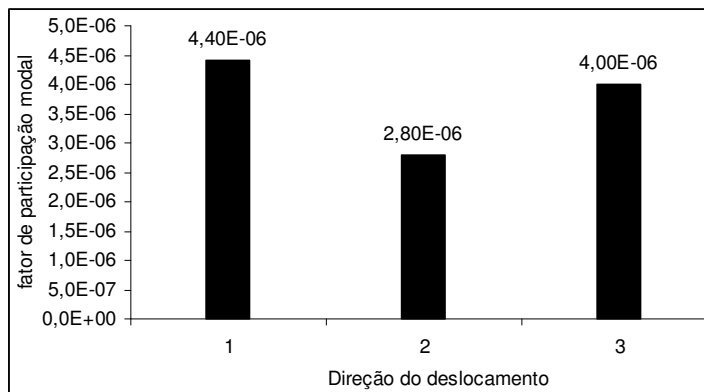


Figura 6.20 – Coeficiente de participação modal apresentado pela quarta forma modal com relação a cada uma das três direções ortogonais da plataforma (direção 1= direção X, direção 2= direção Y, direção 3= direção Z)

Para avaliar a influência que cada modo exerce nos deslocamentos de cada ponto de medição utilizado na plataforma de forças desenvolvida empregou-se a definição de coeficiente modal. As figuras abaixo apresentam o valor assumido por este coeficiente nos três primeiros modos da estrutura, para a posição dos extensômetros  $S_x$ ,  $S_y$  e  $S_z$ , respectivamente. Ressalta-se que os extensômetros utilizados na medição dos momentos presentes ocupam posições similares às posições de  $S_z$  e  $S_y$ .

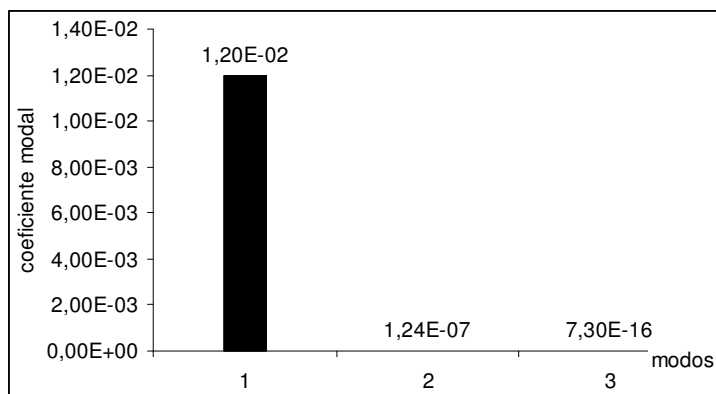


Figura 6.21 – Valor do coeficiente modal correspondente às posições ocupadas pelos extensômetros  $S_x$ . Deslocamento tomado na direção que produz a deformação mecânica relativa na direção da grade do extensômetro (direção X global e  $u_y$  local).

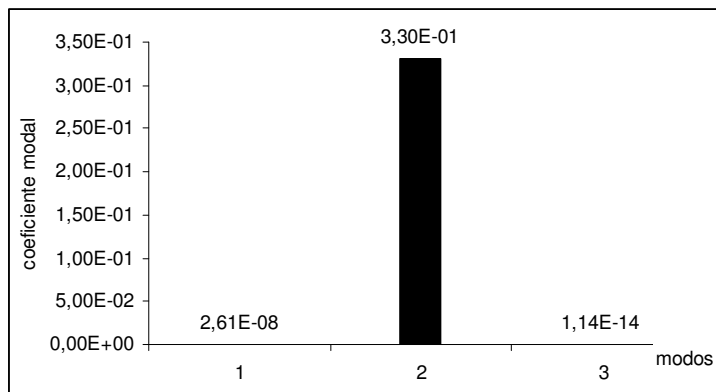


Figura 6.22 –Valor do coeficiente modal correspondente às posições ocupadas pelos extensômetros Sy. Deslocamento tomado na direção que produz a deformação mecânica relativa na direção da grade do extensômetro (direção Y global e uy local).

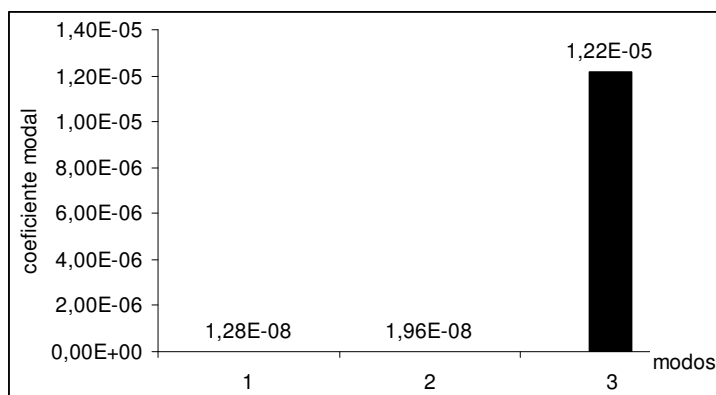


Figura 6.23 –Valor do coeficiente modal correspondente às posições ocupadas pelos extensômetros Sz. Deslocamento tomado na direção que produz a deformação mecânica relativa na direção da grade do extensômetro (direção Z global e uz local).

Com o intuito de compreender melhor o funcionamento do sistema em estudo, a seguir são apresentadas análises que permitem ver o objeto de estudo sob outros pontos de vista, partindo de premissas diferentes.

### 6.3 Análise harmônica

Através desta análise numérica foi determinada a forma da função de ganho da configuração final encontrada para o sistema estrutural *plataforma de forças*. O procedimento consistiu em excitar a plataforma em frequências compreendidas entre 0–1000Hz, buscando-se identificar os valores que provocavam resposta ressonante à estrutura. Desta forma pode-se identificar a região de ganho unitário do sistema, a qual indica a faixa de frequências de utilização da plataforma de forças desenvolvida.

Sendo que a presente análise tem caráter de comprovação do funcionamento do sistema optou-se por verificar a resposta da estrutura apenas nos pontos destinados aos sensores extensométricos. A direção da resposta à excitação foi tomada de acordo com a variável a ser medida pelo extensômetro correspondente ao ponto que é avaliado. Assim, no caso de monitoramento da força vertical  $F_z$ , por exemplo, tomou-se a resposta na direção vertical Z para um nó correspondente à posição de um dos sensores de  $F_z$ .

Em todas as análises a excitação à plataforma foi exercida em um nó do centro da superfície de contato, através da aplicação de força em uma determinada direção

Então, considerando a situação de carregamento vertical tomou-se a resposta em frequência em um dos nós do elemento que abriga um dos quatro sensores Sz. Este resultado, em termos de deslocamento absoluto (eixo vertical) na direção vertical Z, pode ser visualizado na figura 6.24 abaixo. Ressalta-se que o deslocamento correspondente à deformação que será mensurada pelo extensômetro Sz é o deslocamento na direção z das coordenadas locais do elemento considerado, que neste caso coincidem com a direção Z global.

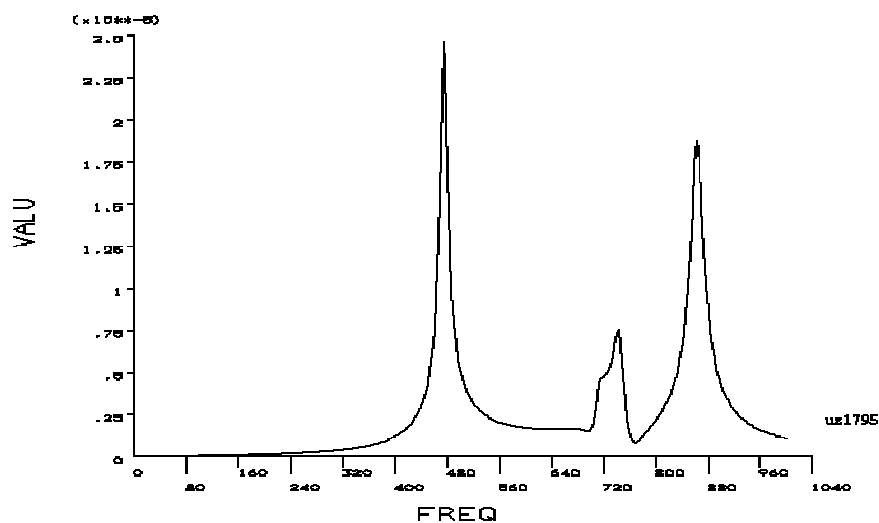


Figura 6.24 – Resposta em frequência tomada em um dos nós do elemento (nó 1795) que abriga um sensor (Sz) encarregado da medição da força vertical. (deslocamentos em metros e frequências em Hz)

Nitidamente o nó considerado atinge um primeiro estado de ressonância na direção vertical z aproximadamente em torno de 480Hz, viabilizando a configuração estrutural que abriga os sensores Sz.

Considerando a situação de carregamento horizontal na direção Y, paralela à direção do movimento, tomou-se a resposta em frequência em um dos nós do elemento que abriga um dos quatro sensores Sy. Este resultado, em termos de deslocamento absoluto (eixo vertical) na

direção horizontal Y, pode ser visualizado na figura 6.25 abaixo. Ressalta-se que o deslocamento correspondente à deformação que será mensurada pelo extensômetro  $S_y$  é o deslocamento na direção local y do elemento considerado.

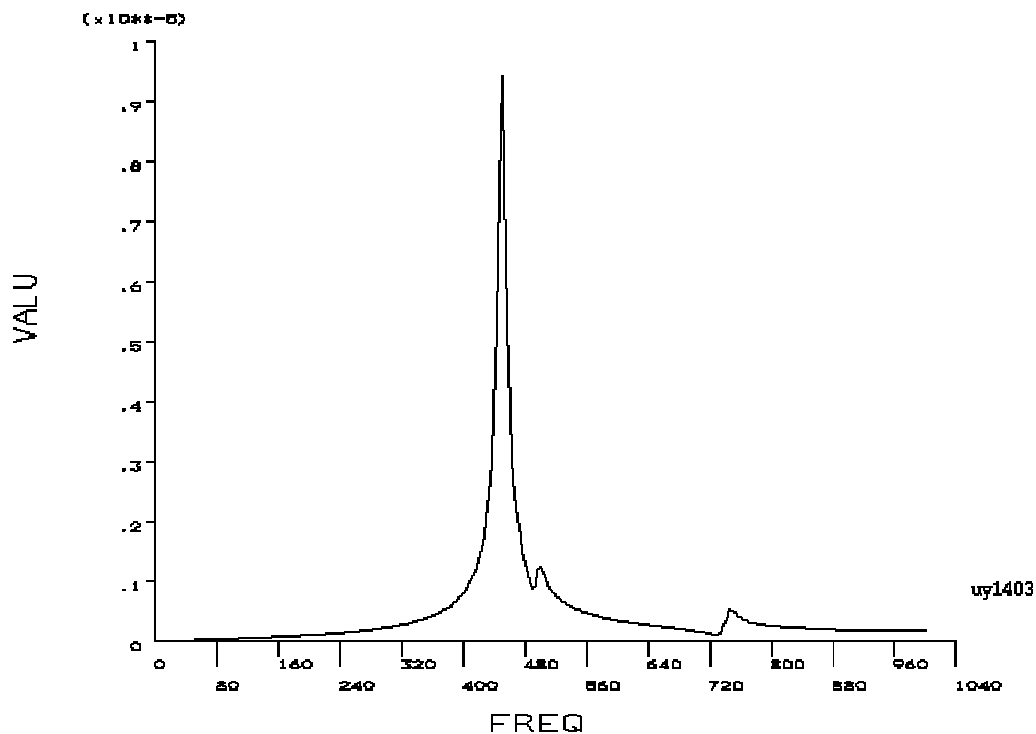


Figura 6.25 – Resposta em frequência tomada em um dos nós do elemento (nó 1403) que abriga um sensor ( $S_y$ ) encarregado da medição da força horizontal  $F_y$  (deslocamentos em metros e frequências em Hz)

Considerando por último a situação de carregamento horizontal na direção X, perpendicular à direção do movimento, novamente tomou-se a resposta em frequência em um dos nós do elemento que abriga um dos quatro sensores  $S_x$ . Este resultado, em termos de deslocamento absoluto (eixo vertical) na direção horizontal X, pode ser visualizado na figura 6.26 abaixo. Ressalta-se que o deslocamento correspondente à deformação que será mensurada pelo extensômetro  $S_x$  é o deslocamento na direção local y do elemento considerado.

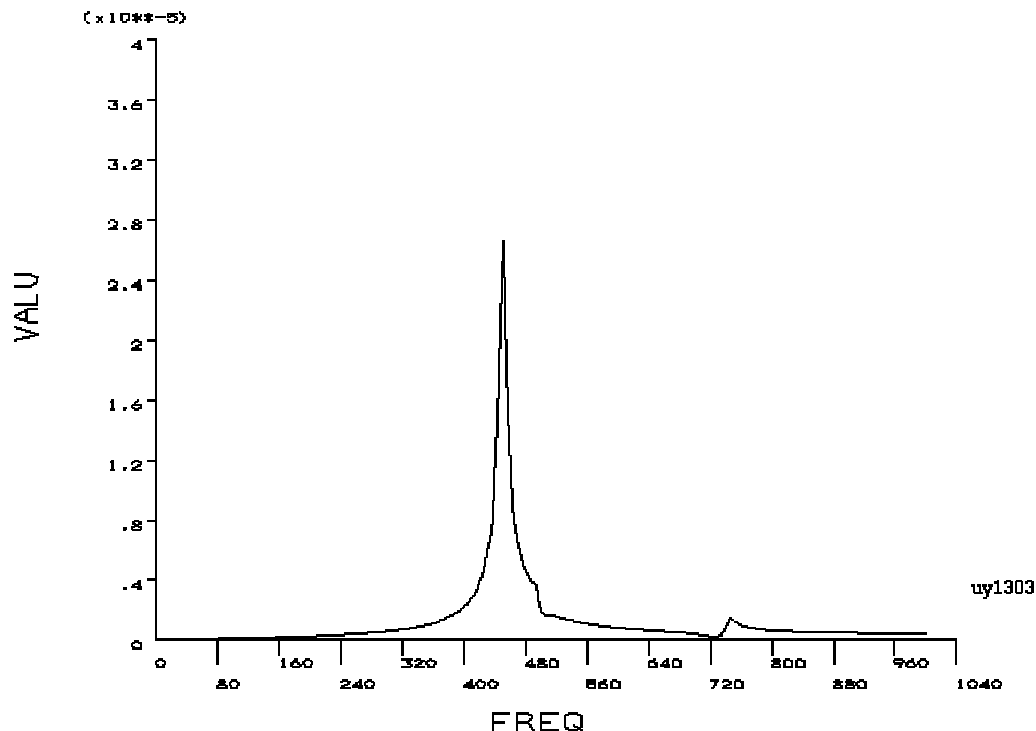


Figura 6.26 – Resposta em frequência tomada em um dos nós do elemento (nó 1303) que abriga um sensor (Sx) encarregado da medição da força horizontal  $F_x$  (deslocamentos em metros e frequências em Hz)

Em todas as respostas encontradas nas análises harmônicas realizadas a função de ganho partiu, erroneamente, da origem do sistema de coordenadas adotado. Os valores iniciais destas funções deveriam ser constantes e diferentes de zero, pois, do contrário, o sistema não responde a baixas frequências de excitação. A ocorrência deste inconveniente deveria ser estudada mais profundamente, com vista à possíveis imposições numéricas atuantes nas análises realizadas. Por outro lado, os picos de ressonância correspondentes às frequências naturais da estrutura encontrados nestas análises coincidem com os autovalores encontrados na determinação das propriedades dinâmicas do sistema realizada através da análise modal.

Destas análises conclui-se que a faixa de utilização da plataforma desenvolvida está compreendida entre 0-250Hz. Considerando que um desvio de 5% no comportamento linear 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.

## 6.4 Análise transiente

Através desta análise procurou-se comprovar a habilidade da plataforma projetada em medir fenômenos transientes que excitem frequências compreendidas dentro da zona de ganho unitário do sistema. Inicialmente foram feitas análises apenas para a componente vertical de força e, após, foi realizada um análise considerando as três componentes de forças ( $F_z$ ,  $F_y$  e  $F_x$ ) atuando simultaneamente.

Nestas análises é necessário estimar um valor de amortecimento, para que o sistema dissipe energia e volte à posição inicial (repouso). Foi considerado amortecimento estrutural de 1%.

A primeira análise consistiu na aplicação, sobre um nó central da superfície de contato da plataforma de forças, do sinal da força vertical coletado durante a decolagem para o salto em distância na plataforma da ESEF. Para esta implementação, o registro foi linearizado conforme apresentado na figura 6.27.

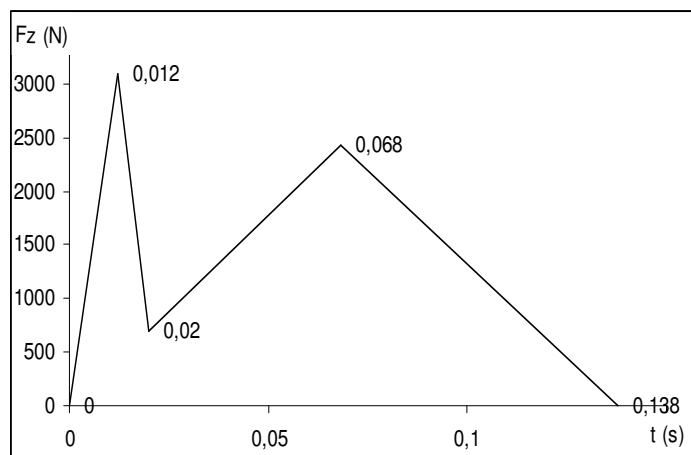


Figura 6.27 – Linearização do registro da força vertical exercida na decolagem para o salto em distância

Sendo um carregamento vertical, a resposta, em termos de deslocamento absoluto, foi tomada junto a um nó correspondente à posição de um dos quatro sensores verticais (figura 6.28).

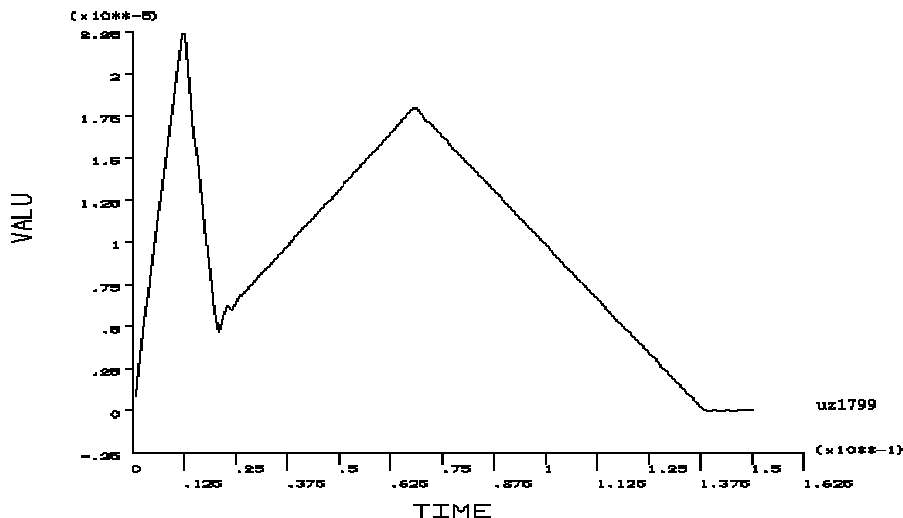


Figura 6.28 – Deslocamento vertical na posição de um dos sensores Sz resultante da aplicação de carregamento vertical no nó central da superfície de contato da plataforma de forças (deslocamentos em metros e tempo em décimos de segundo).

O resultado apresentado mostra que a resposta do sistema, no ponto considerado, segue a excitação. Como esperado, os instantes onde ocorrem os picos de carga apresentam uma pequena defasagem devido à inércia apresentada pela estrutura. Este tempo corresponde ao tempo de resposta do sistema.

A seguinte análise, considerando apenas solitação vertical, deu-se através da divisão do tempo de contato na plataforma em duas partes. A parte inicial diz respeito à tratada fase passiva do movimento, onde o calcanhar do atleta encontra a superfície de contato. Nesta fase, compreendida entre 0 e 1,2 segundos, o carregamento foi aplicado em um nó anterior à linha que corta transversalmente a superfície de contato através de seu centro geométrico (ponto 1 da figura 6.29). A segunda parte do carregamento, tratada como parte ativa do movimento, foi aplicada no intervalo de tempo de 1,2 a 13,8 segundos em um nó posterior a referida linha (ponto 2 da figura 6.29). Nesta fase a região metatarsal do pé do atleta é impelida contra a superfície de contato da plataforma, gerando o impulso para o salto.

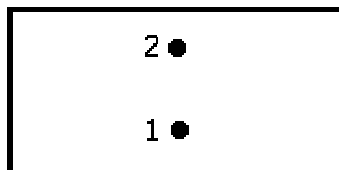


Figura 6.29 – Posições da aplicação das cargas verticais sobre a plataforma de forças

A resposta obtida com esta análise evidencia a necessidade de quatro sensores formando uma ponte completa de Wheatstone para a variável medida. Isto porque os sensores Sz



posicionados anteriormente à linha que corta transversalmente a superfície de contato através de seu centro geométrico apresentam maior deslocamento, e conseqüente deformação, durante a primeira parte do carregamento, ao passo que os outros dois sensores, posicionados além da referida linha, apresentam maior deslocamento justamente na segunda parte da aplicação da carga. Então, a composição em ponte de Wheatstone completa serve para compor o sinal gerado pelo carregamento aplicado, reproduzindo-o.

Tendo comprovado o funcionamento da plataforma para medição de carregamento vertical aplicado em dois locais pontuais distintos sobre a superfície de contato, resolveu-se aplicar este mesmo carregamento sobre áreas representativas da região de contato pé/plataforma de forças. Então, seguindo a mesma distribuição arbitrária da carga no tempo, o carregamento inicial (fase passiva) foi aplicado em uma área de  $0,0024\text{m}^2$  anterior à linha que corta transversalmente a superfície de contato através de seu centro geométrico e a parte final (fase ativa) em uma área equivalente a  $0,0028\text{m}^2$ . O carregamento foi aplicado como força superficial sobre elementos da placa.

Os resultados obtidos estão de acordo com as considerações feitas acima sobre a parcela da aplicação da carga que cada sensor capta. Os resultados, em deslocamento vertical absoluto, para um nó anterior à linha divisória sendo utilizada (nó 1799) e outro posterior (nó 1795) são apresentados na figura 6.30 e na figura 6.31, respectivamente.

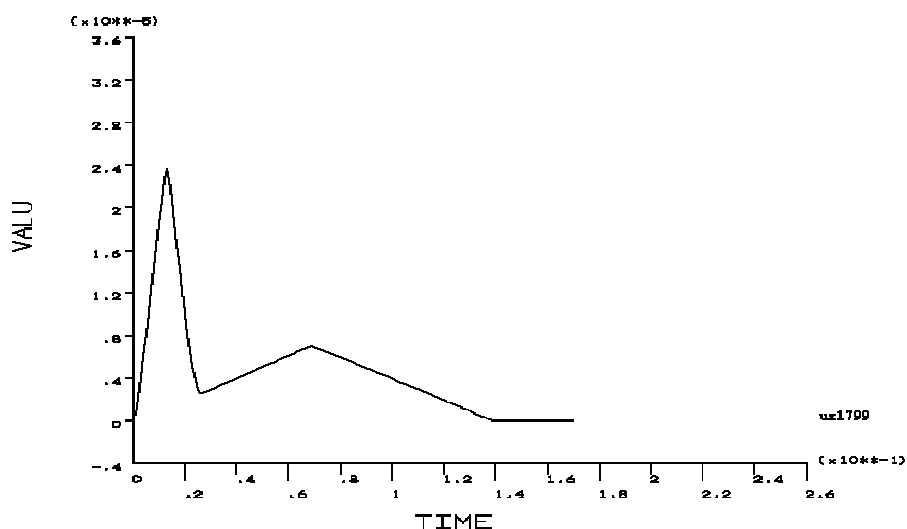


Figura 6.30 – Deslocamento vertical (na posição de um dos sensores Sz) resultante da primeira parcela da aplicação de carregamento vertical sobre a superfície de contato da plataforma de forças em uma área anterior à linha que corta transversalmente esta superfície através de seu centro geométrico (deslocamentos em metros e tempo em décimos de segundo).

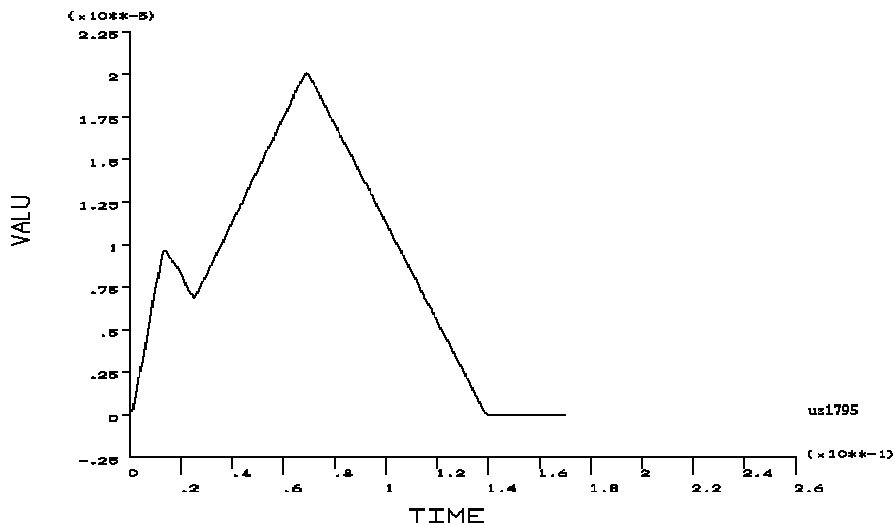


Figura 6.31 – Deslocamento vertical (na posição de um dos sensores Sz) resultante da primeira parcela da aplicação de carregamento vertical sobre a superfície de contato da plataforma de forças em uma área posterior à linha que corta transversalmente esta superfície através de seu centro geométrico (deslocamentos em metros e tempo em décimos de segundo).

Como forma de comprovar o funcionamento da plataforma para as três direções de carregamento realizou-se a aplicação simultânea de  $F_z$ ,  $F_y$  e  $F_x$ . Porém, de maneira simplificada, esta aplicação foi feita sobre o nó central da superfície, uma vez que, de acordo com as análises anteriores, este resultado é válido para os propósitos de comprovação do funcionamento buscados.

Para viabilizar a aplicação simultânea criou-se novamente uma distribuição arbitrária das cargas no tempo de contato sobre a superfície da plataforma, da seguinte maneira:

Tabela 6.2 – Distribuição das cargas no tempo utilizada na análise transiente simultânea

Tempo (s)		Carregamento (N)		
inicial	final	$F_z$	$F_y$	$F_x$
0	0,012	0 - 5480	0 - 2600	0 - -500
0,012	0,02	5480 - 1232	2600 - 619	-500 - 1500
0,02	0,04	1232- 4287	619 - 1516	1500 - 0
0,04	0,068	4287 - 0	1516 - 0	0
0,068	0,138	0	0	0

Desta vez os resultados foram tomados em termos de deformação relativa ocorrida sobre os elementos representativos dos sensores. Estes resultados são apresentados nas figuras abaixo:

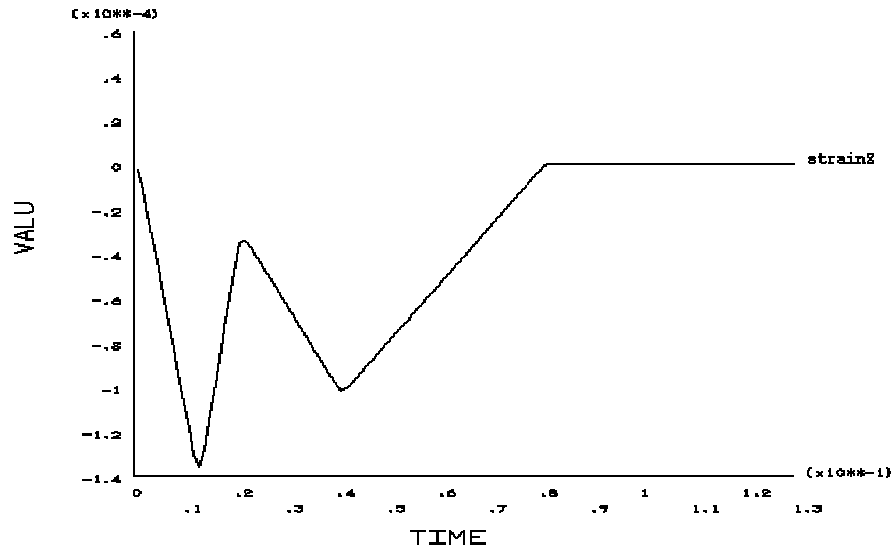


Figura 6.32 – Deformação ocorrida em um dos sensores Sz quando da aplicação de carregamento simultâneo (deformações em  $\mu\text{m}/\text{m}$  e tempo em décimos de segundo)

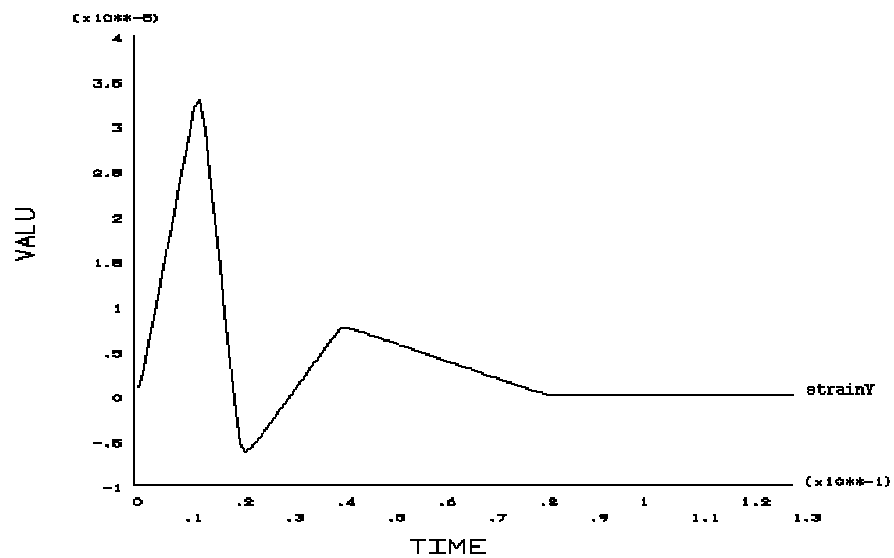


Figura 6.33 – Deformação ocorrida em um dos sensores Sy quando da aplicação de carregamento simultâneo (deformações em  $\mu\text{m}/\text{m}$  e tempo em décimos de segundo)

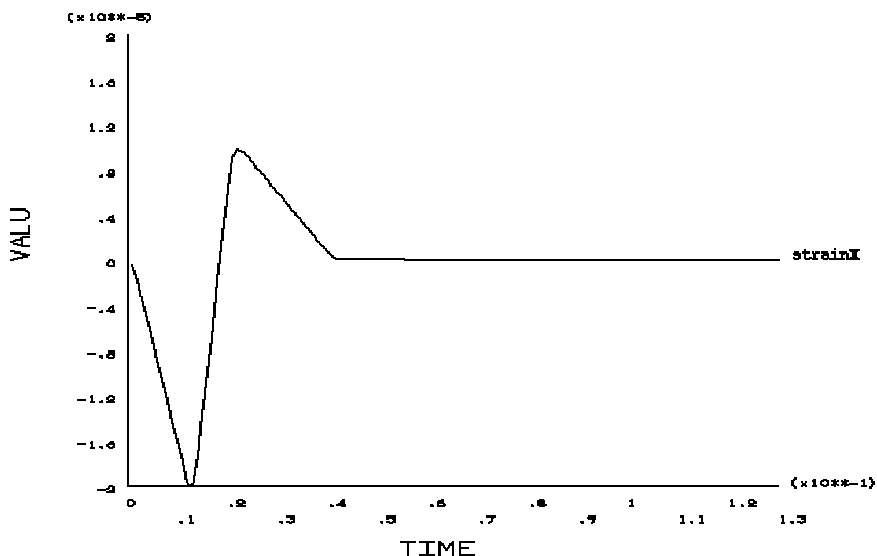


Figura 6.34 – Deformação ocorrida em um dos sensores Sx quando da aplicação de carregamento simultâneo (deformações em  $\mu\text{m}/\text{m}$  e tempo em décimos de segundo)

Os resultados comprovam a capacidade do sistema em captar a forma temporal do carregamento aplicado, para cada uma das três direções ortogonais da plataforma. O valor de deformação para a força vertical está de acordo com o valor alcançado na análise estática para este carregamento.

Para os carregamentos horizontais os valores de deformação estão menores do que os esperados. Acredita-se que este fato deva-se à interação ou acoplamento entre as componentes de força horizontal, ou seja, a deformação devida à aplicação de carga na própria direção de medição é diminuída pela deformação resultante da aplicação de carga na outra direção horizontal ortogonal. De qualquer forma, o desbalanço gerado com a utilização de circuito tipo ponte completa corresponde a quatro vezes o valor de deformação registrado por cada extensômetro. De acordo com o estabelecido no item de discussão sobre possíveis soluções para o presente problema baixos valores de deformação podem ser captados e filtrados com um criterioso condicionamento dos sinais gerados.

Ressalta-se que para obter-se a reprodução do sinal gerado seria necessário, para cada variável medida, captar as deformações em todos nos quatro extensômetros que compõe o circuito tipo ponte e avaliar o desbalanço gerado durante o tempo de duração do carregamento.

## 6.5 Crítica do projeto

A configuração final, sendo a evolução natural das soluções anteriormente desenvolvidas, utiliza novos conceitos que auxiliam a confecção de transdutores dinâmicos. Dentre estes

conceitos, a busca pela dissociação entre função de suporte (ou estrutural) e função de medição (ou de transdução) aparece como o mais promissor, seguido pela busca de amplificação de deformações. Entende-se que esta configuração pode ser utilizada como um indicativo nas direções a seguir em novos desenvolvimentos, bem como ponto de partida para a aplicação de técnicas de otimização visando a melhora de suas características.

A utilização de materiais com capacidade de aliar propriedades antagônicas, sob o princípio da ação combinada (os compostos), e a utilização de uma liga metálica menos densa do que o aço aparecem como pontos fundamentais para a obtenção das características de desempenho do instrumento desenvolvido.

Mesmo tendo derivado de um projeto original de baixa frequência, acredita-se que os melhoramentos traçados serviram ao propósito de projetar uma plataforma com mais alta frequência, de modo que se confirmaram as premissas de projeto assumidas. Assim, de maneira menos satisfatória, aparece a complexidade geométrica resultante da aplicação destes conceitos, indicando dispêndio de tempo em sua manufatura. De qualquer maneira, a confecção em um bloco monolítico é viável. As dificuldades na instrumentação provavelmente estarão no nível padrão enfrentado na confecção de transdutores. A sensibilidade alcançada para carga vertical representa aproximadamente 0,1% da carga de trabalho para esta direção.

## 7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma nova topologia para plataforma de forças extensométrica de seis componentes. O comportamento estrutural estático do modelo desenvolvido assegura sua utilização. O comportamento dinâmico deste modelo comprova sua capacidade para a medição das variáveis físicas presentes na execução da decolagem para o salto em distância, ou seja, ao final do desenvolvimento obteve-se um transdutor extensométrico com alta frequência fundamental, para a aplicação desejada.

A partir da consideração, na concepção deste modelo, da utilização de matérias primas disponíveis e de aspectos de manufatura e posterior montagem da plataforma de forças desenvolvida, tem-se que sua construção é viável. Uma vez que o modelo final da plataforma manteve inalterada a estimativa de custo realizada anteriormente ao seu desenvolvimento, resulta que o referido desenvolvimento representa redução no custo de aquisição da plataforma.

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, sendo, desta forma, habilitado para substituir a referida tábua na pista de treinamentos. Com isso, após construído, este modelo de plataforma de forças terá uma aplicação prática de realização de experimentos sob condições naturais que justifica seu desenvolvimento.

No transcurso do trabalho foi possível concluir:

- com relação à metodologia empregada:

a metodologia utilizada serviu aos objetivos propostos, mostrando-se dispendiosa e ao mesmo tempo acertada. Dispendiosa porque a cada tomada de atitude no desenvolvimento todos os parâmetros influentes do desempenho do instrumento tinham de ser analisados novamente, constituindo uma tarefa metódica demorada. Acertada porque, em se tratando da geração de um modelo teórico com construção prevista, por nenhum instante do desenvolvimento os aspectos influentes de seu desempenho poderiam ser hipotetizados, como se havia previsto durante a formulação da metodologia para o presente desenvolvimento;

- com relação ao aspecto econômico:

o instrumento desenvolvido tem custo estimado algumas vezes menor do que os instrumentos similares comerciais;

- com relação a topologia final de plataforma de forças obtido:

-é uma nova topologia para plataforma de forças, desenvolvida utilizando novos conceitos para projeto de transdutores, tais como:

a)utilização de elementos elásticos diferentes dos usuais;

- b) dissociação parcial das funções de transdução e medição;
  - c) busca por amplificação de deformação;
  - d) utilização de um bloco monolítico para o transdutor, indicando similaridade entre as análises numéricas e o comportamento real deste transdutor;
- este modelo apresenta viabilidade de construção e de utilização para os propósitos estabelecidos;
- 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 que sofrem a maior deformação para solicitações horizontais. Este tipo de ocorrência não pode ser identificado através da análise simplificada com elementos de pórtico realizada.

Como proposta de continuação para o trabalho cita-se:

- discretizar o modelo desenvolvido em elementos finitos sólidos;
- implementar uma rotina que, a partir dos valores de deformação nos locais dos extensômetros, forneça o valor de desbalanço ocasionado em cada uma das seis pontes presentes no modelo desenvolvido;
- conduzir a construção do instrumento, resolvendo os problemas advindos desta etapa;

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bagesteiro, L. B., 1996. “Desenvolvimento de uma plataforma para análise de forças produzidas por pessoas”, **Dissertação de mestrado**, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Bathe, K-J, Wilson, E.L., 1976. “**Numerical Methods in Finite Element Analysis**”, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.

Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1971. “**Random Data: analysis and measurement procedures**”, Wiley-Interscience, New York.

Bonde-Petersen, F., 1975. “A simple force platform”, **European Journal of Applied Physiology**, vol. 34, pp. 51-54.

Bosco, C., Luthanen, P., Komi, P. V., 1976. “Kinetics and kinematics of the take-of in the long jump”, **Biomechanics V-B**, .pp.174-180.

Callister, W., 1997. “**Materials Science and Engineering- An Introduction**”, John Willey & Sons, Inc, 4<sup>a</sup> Ed.

Carlsöö, S., 1962. “A method for studying walking on different surfaces”, **Ergonomics**, vol.5, pp.271-274.

Cauduro, C.R., 1992. “Uma metodologia para auxílio ao projeto de transdutores extensométricos”, **Dissertação de mestrado**, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CBAAt- Confederação Brasileira de Atletismo, 1984, “**Regras Oficiais de Atletismo**”, Palestra Edições, Rio de Janeiro.

Clough, R. W., Penzien, J., 1975. “**Dynamics of Structures**”, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo.

Cook, N. J., 1983. “A sensitive 6-component high-frequency-range balance for building aerodynamics”, **Journal of Physics Scientific Instruments**, vol.16(5), pp390-393.

Cunningham, D. M., Brown, G. W., 1952. “Two devices for measuring the forces acting on the human body during walking”, **Procedures of Society Experimental Stress Analysis**, vol. 9, pp. 75-90.

DuPont Advanced Fibers Systems, “**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.

Greene, J.H., Morris, W.H.M., 1959. "The design of a force platform for work measurement", **The Journal of Industrial Engineering**, vol.10, pp.312-317.

Haftka, T.R., Gürdal, Z., 1996. "**Elements of Structural Optimization**". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

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.

Hearn, N.K.H., Konz, S., 1968. "An improved design for a force platform", **Ergonomics**, vol.2(4), pp.383-389.

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.

Hull, M.L., Brewer, R., Hawkins, D., 1995, "A new force plate design incorporating octagonal strain rings", **Journal of Applied Biomechanics**, vol.11, pp.311-321.

Jones, R.M., 1975. "**Mechanics of composite materials**", Scripta Book Company, Washington, D.C.

Juvinall, R.C., 1967. "**Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength**", McGraw-Hill Book Company, New York.

Kim, G-S., Kang, D-I, Rhee, S-H, 1999. "Design and fabrication of a six component force/moment sensor", **Sensors and Actuators**, vol.77(1999), pp.209-220.

Laranja, R.A.C., Bagesteiro, L.B., Tamagna, A., 1997. "Análise numérica e experimental de uma plataforma de forças". **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**.

Less, A., Graham-Smith, P., Fowler, N., 1994. "A biomechanical analysis of the last stride, touchdown, and takeoff characteristics of the men's long jump", **Journal of Applied Biomechanics**, vol.10, pp.61-78.

Leuckert, C., 2000. "Sistema portátil de aquisição de dados para análise de estruturas mecânicas", **Dissertação de mestrado**, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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.

Luhtanen, P., Komi, P.V., 1979. "Mechanical power and segmental contribution to force impulse in long jump take-off", **European Journal of Applied Physiology**, vol.41, pp.267-274.

Marsden, J.P., Montgomery, S.R., 1972. "An analysis of the dynamic characteristics of a

force plate”, **Measurement and Control**, vol.5(3), pp. 102-106.

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.

O’leary, J.P., 1970. “A strain-gauge force platform for studying human movement”. **Perceptual and motor skills**, vol.30(3), pp. 698.

Payne, A.H., Slater, W.J., Telford, T., 1968. “The use of a force platform in the study of athletic activities. A preliminary investigation”, **Ergonomics**, vol.11(2), pp. 123-143.

Petersen, W.A., Brookhart, J.M., Stone, S.A., 1965. “A strain-gage platform for force measurements”, **Journal of Applied Physiology**, vol.20, pp.1095-1097.

Ramey, M. R., 1973. “Use of Force Plates for Long Jump Studies”, **Medicine and Sport**, vol.8, pp.370-380.

Ramey, M.R., 1975. “Force Plate Design and Applications”, **Exercise Sport Science**, vol.3, pp.303-319.

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.

Roesler, H., Fonseca, J.C.P., Tamagna, A., 1998. “Development of an underwater platform for measurements on all coordinate axes for biomechanical applications”, **Proceedings I of International Society Biomechanics**, pp.559-562.

SAD2 VERSÃO 2.5,1997. “Sistema de aquisição de dados – Manual do usuário”, **Caderno técnico da Engenharia Mecânica**, DEMEC, UFRGS.

Schmolinsky, G., 1982. “**Atletismo**”, Editora Estampa, Lisboa.

Seyfarth, A., Friedrichs, A., Wank, V., Blickhan, R., 1999. “Dynamics of the long jump”, **Journal of Biomechanics**, vol.32, pp.1259-1267.

Silveira Filho, E.D., 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.

Swanson Analysis Systems, Inc., 1993. “ANSYS Theory Manual”. Vol. I, II, III e IV, Houston.

Timoshenko, S.P., Gere, J.E., 1983. “Mecânica dos Sólidos, V.1”, Livros técnicos e científicos editora, Rio de Janeiro, Brasil.

Todeschini, H., 1999. “Projeto e Desenvolvimento de um Torquímetro com o Uso de Strain Gauges”, **Trabalho de Diplomação**, DEMEC, UFRGS.

Tschanz, T., 1982. “Development of a five components balance for wind tunnel tests”, Doctoral thesis, University of Western Ontario, Canada.

Zienkiewicz, O.C., 1981 “**El método de los elementos finitos**”, Editora Reverté, Barcelona.

Weingaertner, W.L., Schroeter, R.B., 1951. “Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas”, Alcan Alumínio do Brasil, 1ª edição- 1990, São Paulo, Brasil.

Whitney, R.J., 1958, “The strength of the lifting action in man”, **Ergonomics**, vol.1(2), pp.101-128.

## 9 APÊNDICE I

### 9.1 Análise estrutural estática-

As análises estruturais estáticas foram realizadas sob hipóteses de Elasticidade Linear, assumindo-se comportamento elástico-linear dos materiais através da utilização da relação constitutiva linear. Como relação cinemática utiliza-se o tensor de deformações infinitesimais. As soluções para a análise estrutural estática são alcançadas através da solução direta das equações de equilíbrio que governam o comportamento dos membros em análise. A aproximação por elementos finitos reduz o problema em análise à solução de um sistema de equações algébricas que pode ser representado da seguinte maneira:

$$[K] \{u\} = \{f\} \quad (9)$$

onde

$[K]$  = matriz de rigidez global

$\{u\}$  = vetor de deslocamentos nodais

$\{f\}$  = vetor de forças

### 9.2 Cálculo das propriedades dinâmicas da estrutura

O cálculo das frequências naturais e modos de vibração estrutural foram realizados resolvendo um problema de autovalores. Assumindo que a estrutura tem rigidez e massa constantes, não tem amortecimento e nenhuma força ou deslocamento variando no tempo, tem-se que a equação do movimento expressada em forma matricial é:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (10)$$

onde

$[K]$  = matriz de rigidez

$[M]$  = matriz de massa

$\{\ddot{u}\}$  = vetor de aceleração nodal

$\{u\}$  = vetor de deslocamento nodal

Para um sistema linear, em condição de vibrações livres, o vetor deslocamento pode ser expressado como segue:

$$\{u\} = \{\phi_i\} \cos \omega_i t \quad (11)$$

onde

$\{\phi_i\}$  = autovetor do modo  $i$

$\omega_i$  = frequência natural circular do modo i

t = tempo

Desta forma, a equação 3 fica:

$$(-\omega_i^2 [M] + [K]) \{\phi_i\} = \{0\} \quad (12)$$

A equação acima só é satisfeita se cada  $\{\phi_i\} = \{0\}$  ou se o determinante de  $([K] - \omega^2 [M])$  é zero. A primeira opção é a solução trivial, ao passo que para encontrar a solução da segunda opção deve-se resolver o problema de autovalores, que na forma matricial pode ser expressado como:

$$|[k] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (13)$$

onde  $| |$  indica determinante;

A resolução da equação 6 consiste em achar as n raízes de grau n em  $(\omega^2)$ , sendo cada um dos  $\omega_i$  os autovalores do sistema em análise, ou seja, as frequências naturais de vibração, com i variando de 1 a n, onde n é o número de graus de liberdade. Substituindo um a um os valores de  $\omega_i$  na equação 5 é possível achar os autovetores  $\{\phi_i\}$  associados a cada autovalor.

Á vários métodos para a obtenção de autovalores, nas aplicações realizadas utilizou-se o método da iteração por subespaços que se encontra explicado em Bathe, 1976.

### 9.3 Resposta em frequência: análise harmônica

As equações de movimento dependentes do tempo, para estruturas lineares sob vibrações estacionárias são resolvidas, assumindo-se que a estrutura tem rigidez e massa constantes e que todas cargas e deslocamentos variam de forma senoidal na mesma frequência mas não necessariamente em fase. A equação de movimento utilizada é:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (14)$$

onde

$[C]$  = matriz de amortecimento estrutural

$\{F^a\}$  = vetor de cargas aplicadas

$\{\dot{u}\}$  = vetor de velocidade nodal

Através da excitação da estrutura em um pré-determinando intervalo de frequências pode-se identificar, no eixo das frequências, a localização dos picos de ressonância da estrutura e com isso, fixar o limite da região linear da resposta dinâmica da estrutura. Então, esta análise possibilita o estabelecimento da faixa de utilização da plataforma projetada. A excitação deve ser feita sobre os graus de liberdade da estrutura destinados à aplicação de carregamentos externos

quando da utilização do instrumento. A teoria utilizada neste tipo de análise numérica pode ser encontrada nos Manuais Teóricos do software ANSYS, 1993.

#### 9.4 Análise transiente

Assume-se que as condições iniciais do problema em questão são conhecidas. A equação básica do movimento resolvida, em qualquer tempo  $t$  dado é:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F(t)\} \quad (15)$$

onde

$\{F(t)\}$  = vetor de carga

O procedimento utilizado para a solução desta equação linear é o método de integração direta de Newmark, que utiliza expansão de diferenças finitas em intervalos de tempo  $\Delta t$  pré-definidos. Este método é adequado para análise de curta duração. Maiores informações sobre o procedimento adotado são encontradas em Bathe, 1976.

#### 9.5 Superposição Modal: cálculo dos coeficientes de participação modal e dos coeficientes modais

Utilizando a propriedade algébrica de ortogonalidade dos modos de vibração com respeito à matriz de massa e à matriz de rigidez é possível aplicar o método de superposição modal para transformar um sistema de  $n$  graus de liberdade acoplados em  $n$  sistemas de um grau de liberdade, desacoplados. Detalhes sobre os fundamentos do método são encontrados em Clough e Penzien, 1975, ou qualquer livro básico de dinâmica.

Aplicando o referido método, o vetor deslocamento que representa a resposta de um sistema de  $n$  graus de liberdade pode ser escrito

$$\vec{u}(t) = \vec{\phi}_1 Y_1(t) + \vec{\phi}_2 Y_2(t) + \vec{\phi}_3 Y_3(t) + \dots \quad (16)$$

sendo  $\vec{\phi}_i$  o vetor que contém a forma do modo  $i$  e  $Y_i$  a resposta de um dos  $n$  sistemas desacoplados de um grau de liberdade obtidos com a aplicação do método da superposição modal.

É possível demonstrar que para a maioria das estruturas e maioria dos tipos de carregamentos as contribuições de vários modos geralmente são maiores para as menores frequências e tendem a decrescer na medida que as frequências aumentam. Para poder quantificar a contribuição de um dado modo na resposta define-se o coeficiente de participação

modal ( $\gamma_i$ ) através da seguinte relação:

$$\gamma_i = \vec{\phi}_i \cdot M \cdot \vec{D} \quad (17)$$

onde

$\gamma_i$  = coeficiente de participação modal;

$\vec{\phi}_i$  = vetor modal;

$M$  = matriz de massa do sistema;

$\vec{D}$  = vetor que indica a direção na qual a excitação atua

Também pode-se definir o coeficiente modal  $A_i$  como o produto do coeficiente de participação modal ( $\gamma_i$ ) e a resposta do sistema  $i$  de um grau de liberdade  $Y_i$ .

$$A_i(t) = \gamma_i Y_i(t) \quad (18)$$

onde

$Y_i$  = resposta em termos de deslocamento;

$\gamma_i$  = coeficiente de participação modal;

$A_i$  = coeficiente modal;

Em uma estrutura como a plataforma de forças a excitação aplicada deve atuar como estática, tal que

$$Y_i = Y_{est} \cdot FCD = Y_{est} \quad (19)$$

onde

$Y_{est}$  = deslocamento estático;

$FCD$  = fator de carga dinâmico: igual a 1 na região de ganho unitário;

sendo então possível escrever

$$A_i = \gamma_i \cdot Y_i \quad (20)$$

de maneira que um valor extremo da resposta da estrutura em termos de deslocamento é dado por

$$u = A_1 \phi_1 \cdot \text{sen}(\omega_1 t + \theta_1) + A_2 \phi_2 \cdot \text{sen}(\omega_2 t + \theta_2) + \dots \quad (21)$$

onde  $\theta_i$  são as fases e  $\omega_i$  as frequências naturais circulares.

Considerando apenas a magnitude de cada termo

$$u \leq |A_1 \phi_1| + |A_2 \phi_2| + |A_3 \phi_3| + \dots \quad (22)$$

Então, os coeficientes definidos  $\gamma_i$  e  $A_i$  podem ser utilizados para conhecer melhor a forma em que a plataforma absorve a excitação aplicada.

## 10 APÊNDICE II

*Considerações sobre o desenvolvimento de transdutores conforme a 2ª linha de projeto apresentada-*

A figura 10.35 apresenta uma estrutura de forma genérica sob a qual é aplicada uma excitação que pode ser decomposta em seis componentes (três forças ao longo dos três eixos coordenados e três momentos em torno destes eixos).

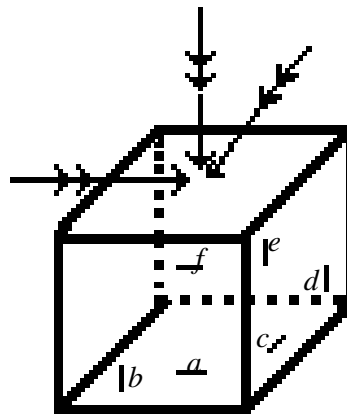


Figura 10.35 – Estrutura genérica sob sollicitação

Considerando a presença de seis sensores extensométricos nesta estrutura (sensores  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$ ) e considerando que as frequências excitadas pela sollicitação encontram-se na zona estática do sistema (região onde a função de ganho possui valor unitário, denominada zona de trabalho – Figura 10.36), é possível escrever, de acordo com o método da superposição modal, que a resposta do sistema e termos de deformação será

$$\mathcal{E}_a \leq |\omega_1^2 A_1 \phi_{1a}| + |\omega_2^2 A_2 \phi_{2a}| + |\omega_3^2 A_3 \phi_{3a}| + \dots \quad (23)$$

$$\mathcal{E}_b \leq |\omega_1^2 A_1 \phi_{1b}| + |\omega_2^2 A_2 \phi_{2b}| + |\omega_3^2 A_3 \phi_{3b}| + \dots \quad (24)$$



onde

$\omega_i^2$  são as frequências circulares naturais de excitação do sistema;

$A_i$  é o coeficiente modal, que neste caso pode ser expressado como

$$A_i = \gamma_i R_i \quad (25)$$

sendo  $R_i$  = resposta de um sistema de um grau de liberdade submetido à ação de 6 excitações vinculadas, e  $\phi_{ia}$  é a ordenada modal do modo  $i$  correspondente ao sensor  $a$ .

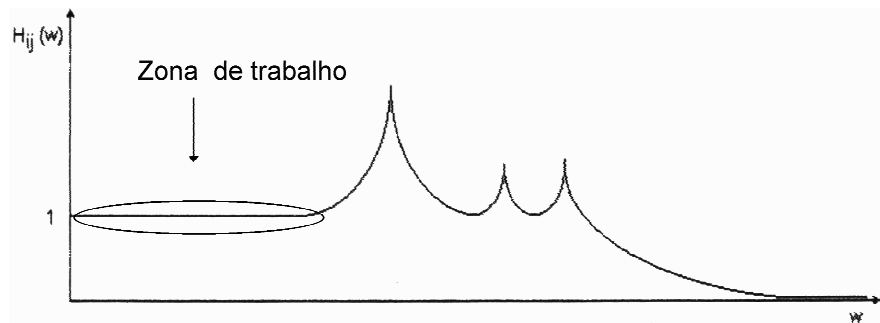


Figura 10.36 – Região estática ( zona de trabalho)

É possível escrever o coeficiente modal  $A_i$  como uma superposição de coeficientes modais, sendo cada qual devido a uma solicitação. Então:

$$A_i = A_i(F_x) + A_i(F_y) + A_i(F_z) + A_i(M_x) + A_i(M_y) + A_i(M_z) \quad (26)$$

e substituindo a equação 26 na equação 23

$$\mathcal{E}_a \leq \omega_1^2 [A_1(F_x) + A_1(F_y) + A_1(F_z) + A_1(M_x) + \dots] \phi_{1a} + \omega_2^2 [A_2(F_x) + A_2(F_y) + \dots] \phi_{2a} \dots \quad (27)$$

$$\mathcal{E}_b \leq \omega_1^2 [A_1(F_x) + A_1(F_y) + A_1(F_z) + A_1(M_x) + \dots] \phi_{1b} + \dots \quad (28)$$

reordenando os termos pode-se escrever:

$$\mathcal{E}_a \leq [\alpha_{11a}^2 A_1(F_x) + \alpha_{21a}^2 A_2(F_x) + \alpha_{31a}^2 A_3(F_x) + \dots] + [\alpha_{11a}^2 A_1(F_y) + \alpha_{12a}^2 A_2(F_y) + \dots] \phi_{2a} \dots \quad (29)$$

Sendo possível separar as forças dos demais coeficientes pode-se escrever, para cada posição  $A, B, \dots$ :

$$\mathcal{E}_A \leq \alpha_{IA} F_x + \alpha_{IA} F_y + \alpha_{IA} F_z + \alpha_{IA} M_x + \alpha_{IA} M_y + \alpha_{IA} M_z \quad (30)$$

$$\mathcal{E}_b \leq \alpha_{Ib} F_x + \dots \quad (31)$$

Em forma matricial fica:

$$\vec{\mathcal{E}} \leq \alpha \vec{F} \quad (32)$$

de forma que, conhecendo-se o vetor  $\vec{\mathcal{E}}$  e a matriz  $\alpha_{6 \times 6}$  que caracteriza o sistema é possível calcular o vetor  $\vec{F}$  que se quer obter.

Este procedimento sugerido deve ser trabalhado em forma mais extensiva para determinar-se as chances de sua aplicação prática.