

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA ANÁLISE DE FORÇAS
PRODUZIDAS POR PESSOAS**

Léia Bernardi Bagesteiro

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

1996

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA ANÁLISE DE FORÇAS
PRODUZIDAS POR PESSOAS**

Léia Bernardi Bagesteiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica, PROMEC, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de *Mestre em
Engenharia*.

Área de Concentração : Mecânica dos Sólidos
Biomecânica

Porto Alegre

1996

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de *Mestre em Engenharia* e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador :

Prof. Dr. Alberto Tamagna, UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Antônio C. S. Guimarães, PhD , UFRGS

Prof. Jorge D. Riera, PhD, UFRGS

Prof. Milton A. Zaro, Dr., UFRGS

Prof. Dr. Horácio Vielmo

Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Porto Alegre, março 1996

“Quando alguém deseja algo,
precisa saber que está correndo riscos.
Mas é isto justamente que faz
a vida interessante.”

(Paulo Coelho)

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alberto Tamagna pela orientação, incentivo, apoio, amizade e transmissão de conhecimentos.

Aos colegas do Laboratório de Vibrações e Acústica pelo convívio e auxílio no decorrer deste trabalho, em especial aos amigos Pablo e Rafael.

Ao pessoal dos Laboratórios de Medições Mecânicas e de Ensaios Mecânicos pela colaboração prestada.

Ao professor Guimarães da ESEF-UFRGS pela ajuda e auxílio nas medições realizadas na piscina da ESEF.

Aos meus familiares, pelos momentos que mesmo separados, estávamos juntos.

A minha irmã Inara, pela amizade, confiança e estímulo sempre presentes no meu dia a dia.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
2 DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA	7
2.1 Plataforma	7
2.1.1 Montagem	9
2.1.2 Análise Estática e Dinâmica	14
2.2 Célula de carga	16
2.2.1 Análise Teórica	18
2.2.2 Análise Experimental	29
3 SISTEMA COMPLETO	35
3.1 Plataforma	36
3.2 Condicionadores de Sinal	39
3.3 Placa de Aquisição	44
4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO	45
4.1 O Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados da Plataforma (ATDP)	45
4.2 Guia de Utilização do ATDP	47
5 CALIBRAÇÃO	60
5.1 Descrição do Dispositivo de Calibração	61
5.2 Descrição do Procedimento de Calibração	63

5.3 Determinação do Erro e Interferência	69
6 APLICAÇÃO	71
6.1 O Movimento de Saída na Natação	72
6.2 Descrição da Medição	79
6.3 Resultados	83
6.4 Outras aplicações	95
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXO A - Curvas de Calibração das Células de Carga	106
ANEXO B - Valores máximos das forças e seus respectivos fatores de amplificação para os indivíduos ensaiados	110
ANEXO C - Valores das velocidades vertical, horizontal e lateral de saída, e ângulo de saída, para os indivíduos ensaiados	111

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
2.1. Representação das componentes de força na análise biomecânica	8
2.2. Representação das componentes de força e momento da plataforma	9
2.3. Disposição e denominação das células de carga na plataforma, dimensões das placas (mm)	10
2.4. Representação das componentes de força em cada célula de carga da plataforma	12
2.5. Geometria e dimensões dos suportes de fixação das células de carga (mm)	12
2.6. Visualização frontal da plataforma	13
2.7. Visualização superior da plataforma	13
2.8. Visualização lateral da plataforma	14
2.9. Espectro de frequência da resposta impulsiva da plataforma	15
2.10. Geometria e dimensões da célula de carga (mm)	17
2.11. Carregamento utilizado para análise da célula de carga	20
2.12. Condições de contorno com restrições nos furos superiores e inferiores da célula de carga	20
2.13. Condições de contorno com restrições nos furos inferiores da célula de carga	21
2.14. Discretização utilizada para análise da célula de carga	22
2.15. Distribuição de tensões equivalente (σ_{eq}) para condição de contorno 1	23
2.16. Distribuição de tensões em xy (σ_{xy}) para condição de contorno 1	24
2.17. Distribuição de tensões em x (σ_{xx}) para condição de contorno 1	24
2.18. Distribuição de tensões em y (σ_{yy}) para condição de contorno 1	25
2.19. Distribuição de tensões equivalente (σ_{eq}) para condição de contorno 2	26
2.20. Distribuição de tensões em xy (σ_{xy}) para condição de contorno 2	26

2.21. Distribuição de tensões em x (σ_{xx}) para condição de contorno 2	27
2.22. Distribuição de tensões em y (σ_{yy}) para condição de contorno 2	27
2.23. Primeiro modo de vibração da célula de carga para os dois conjuntos de condições de contorno	28
2.24. Esquema da posição dos extensômetros de resistência elétrica na célula de carga	29
2.25. Esquemas das conexões das pontes de Wheatstone na célula de carga	30
2.26. Esquema para calibração horizontal das células de carga	30
2.27. Esquema para calibração vertical das células de carga	31
3.1. Esquema do sistema completo	35
3.2. Variáveis de medição da plataforma	36
3.3. Painel frontal de um condicionador de sinal	40
3.4. Painel completo dos condicionadores de sinal	41
3.5. Visualização dos condicionadores de sinal e da plataforma de força	42
3.6. Visualização dos condicionadores de sinal juntamente com a plataforma	42
3.7. Curva padrão da resposta em frequência dos condicionadores de sinal	43
4.1. Menu Principal do sistema ATDP	48
4.2. Tela da opção < 1 > do sistema ATDP com exemplo de informações para aquisição de dados	49
4.3. Janela para seleção do arquivo a ser graficado no sistema ATDP	49
4.4. Menu Gráfico do sistema ATDP	51
4.5. Tela demonstrativa da filtragem no sistema ATDP	53
4.6. Janela de seleção dos arquivos a serem combinados no sistema ATDP	54
4.7. Tela demonstrativa de saída da operação entre arquivos no sistema ATDP	54
4.8. Janela de seleção para operação de ajuste de zero no sistema ATDP	55
4.9. Tela demonstrativa do ajuste direcionado no sistema ATDP	56

4.10. Janela de seleção de arquivo para cálculos no sistema ATDP	57
4.11. Tela demonstrativa de saída do cálculo de esforços no sistema ATDP	57
4.12. Fluxograma para operação do sistema ATDP	58
5.1. Esquema de calibração da plataforma nas direções horizontais	60
5.2. Esquema de calibração da plataforma na direção vertical	61
5.3. Vista superior do dispositivo para calibração da plataforma nas direções horizontais	62
5.4. Vista frontal do dispositivo para calibração da plataforma na direção vertical	62
5.5. Pontos de aplicação de carga para calibração	63
5.6. Esquema para aplicação da componente do momento M_y	65
5.7. Esquema para aplicação da componente do momento M_z	65
5.8. Sistema completo da plataforma com equipamento de calibração horizontal	68
5.9. Sistema completo da plataforma com equipamentos de calibração vertical	68
6.1 (A) Movimento de saída na natação	73
6.1 (B) Movimento de saída na natação	74
6.1 (C) Movimento de saída na natação	75
6.1 (D) Movimento de saída na natação	75
6.1 (E) Movimento de saída na natação	76
6.1 (F) Movimento de saída na natação	77
6.1 (G) Movimento de saída na natação	78
6.1 (H) Movimento de saída na natação	78
6.2. Estrutura de fixação e plataforma de força junto a borda da piscina	79
6.3. Vista lateral da plataforma de força e estrutura de fixação junto a borda da piscina	80
6.4. Instrumentação completa no local de ensaios	81
6.5. Representação da mudança de eixos realizada	85

6.6. Componentes da força para o movimento de saída do nadador A	89
6.7. Componentes da força para o movimento de saída do nadador B	90
6.8. Componentes do momento para o movimento de saída do nadador A	91
6.9. Componentes do momento para o movimento de saída do nadador B	91
6.10. Impulsos desenvolvidos pelo nadador A	92
6.11. Impulsos desenvolvidos pelo nadador B	92
6.12. Fase de extensão dos segmentos do corpo e impulsão em direção à água	93
6.13. Fase de extensão completa dos segmentos do corpo	94
6.14. Trajetória definida para entrada na água pelas mãos	94
6.15. Registro típico para análise da força no caminhar	96
6.16. Registro para análise da força em uma simulação da corrida de maratonista	97
6.17. Registro para análise da força em uma simulação da corrida de velocista	97

LISTA DE TABELAS

Tabela	Pág.
2.1. Principais propriedades do material das placas (Alumínio 5052 F)	11
2.2. Propriedades do material da célula de carga (Aço Inox AISI 304)	18
2.3. Valores máximos e mínimos das tensões na célula de carga para as duas condições de contorno (N/m^2)	22
2.4. Características dos extensômetros elétricos empregados na célula de carga	29
3.1. Principais especificações da plataforma	39
3.2. Fatores de amplificação dos condicionadores de sinal	43
5.1. Coeficientes de ajuste para as direções x , y e z	67
5.2. Valores de erro percentual e interferências para cada esforço	70
6.1. Características principais dos indivíduos ensaiados	81
6.2. Fatores de amplificação e desvio padrão para o movimento de saída dos nadadores	83
6.3. Valores médios dos picos das forças, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos picos das forças para o movimento de saída dos nadadores	84
6.4. Valores médios, desvio padrão, valores máximos e mínimos das velocidades e ângulo de saída	88

LISTA DE SÍMBOLOS

- b Distância entre os eixos verticais de uma célula de carga e sua respectiva transversa - m
- ca_i Coeficiente de ajuste ($i = x, y, z$)
- E Módulo de elasticidade - N/m^2
- \vec{f} Vetor da força aplicada na célula de carga - N
- \vec{F} Vetor da força total aplicada - N
- F_a Força aplicada - N
- F_o Força calculada com a matriz original da célula de carga - N
- F_x Componente na direção x da força aplicada - N
- $F_{x_{ab}}$ Componente da força na direção x na célula de carga ab - N
- $F_{x_{gh}}$ Componente da força na direção x na célula de carga gh - N
- F_y Componente na direção y da força aplicada - N
- $F_{y_{cd}}$ Componente da força na direção y na célula de carga cd - N
- $F_{y_{ef}}$ Componente da força na direção y na célula de carga ef - N
- F_z Componente na direção z da força aplicada - N
- $F_{z_{ab}}$ Componente da força na direção z na célula de carga ab - N
- $F_{z_{cd}}$ Componente da força na direção z na célula de carga cd - N
- $F_{z_{ef}}$ Componente da força na direção z na célula de carga ef - N
- $F_{z_{gh}}$ Componente da força na direção z na célula de carga gh - N
- \vec{I} Impulso - Ns
- I_x Componente do impulso na direção x - Ns
- I_y Componente do impulso na direção y - Ns
- I_z Componente do impulso na direção z - Ns
- $I_{y'}$ Impulso da força de reação na direção y' (horizontal) - Ns

I_z	Impulso da força de reação na direção z' (vertical) - Ns
I_z^d	Impulso referente a força de reação dinâmica do movimento na direção z' (vertical) - Ns
I_z^p	Impulso da força peso do nadador na direção z' (vertical) - Ns
\tilde{L}	Matriz quadrada das leituras na célula de carga da calibração estática - mV
m	Massa corporal do indivíduo - kg
\tilde{M}	Matriz dos coeficientes de calibração da célula de carga - N/mV
\bar{M}	Vetor momento total aplicado - Nm
M_x	Componente na direção x do momento aplicado - Nm
M_y	Componente na direção y do momento aplicado - Nm
M_z	Componente na direção z do momento aplicado - Nm
\bar{p}	Força peso - N
t	Tempo percorrido durante o fenômeno - s
\bar{v}	Velocidade - m/s
v_h	Velocidade horizontal de saída do nadador - m/s
v_L	Velocidade lateral de saída do nadador - m/s
v_v	Velocidade vertical de saída do nadador - m/s
\bar{V}	Vetor da leitura (resposta) na célula de carga - mV
x	Eixo coordenado na direção horizontal x da plataforma de força
X	Coordenada x do ponto de aplicação da força - m
y	Eixo coordenado na direção horizontal y da plataforma de força
Y	Coordenada y do ponto de aplicação da força - m
z	Eixo coordenado na direção vertical z da plataforma de força
α	Ângulo de inclinação da plataforma - °
β	Ângulo de saída do nadador - °
μ	Ângulo entre a força horizontal e a força vertical - °

- ν Coeficiente de Poisson
- ρ Massa específica - kg/m^3
- σ_e Tensão de escoamento - N/m^2
- σ_{eq} Tensão equivalente (Von Mises) - N/m^2
- σ_{max} Tensão máxima (Von Mises) - N/m^2
- σ_{xx} Tensão na direção x - N/m^2
- σ_{yy} Tensão na direção y - N/m^2
- σ_{xy} Tensão no plano xy - N/m^2

RESUMO

A Biomecânica usa as leis da física e os conceitos da engenharia para descrever o movimento suportado por vários segmentos do corpo e as forças atuantes nestas partes do corpo durante a realização das mais variadas atividades.

A quantificação das forças externas, transmitidas entre o corpo e o ambiente, ativas no ser humano, é de grande importância para o cálculo das cargas internas em ação neste. Em particular, as forças de reação do solo transferidas na fase de apoio em atividades motoras quase-estáticas ou dinâmicas, juntamente com a constante peso corporal, que são a causa de qualquer alteração do movimento do centro de gravidade. Um equipamento típico para a obtenção destas medidas são as plataformas de força, que permitem medir os parâmetros envolvidos na atividade em estudo.

As plataformas de força disponíveis apresentam um bom padrão tecnológico, porém não tem sua fabricação desenvolvida no país, tornando o custo deste instrumento mais elevado, o que impulsiona o projeto e desenvolvimento deste tipo de equipamento, sendo este o objetivo deste trabalho.

A plataforma de força construída conta com quatro células de carga instrumentadas com extensômetros elétricos, projetadas especificamente para este fim, e cujas saídas estão vinculadas a condicionadores de sinal e estes a um microcomputador, que faz a aquisição dos dados em função do tempo e o processamento dos mesmos de forma a obter os parâmetros de medição (força, momento e ponto de aplicação). A aquisição e tratamento dos dados foi

realizada com o auxílio de programas computacionais desenvolvidos para utilização conjunta com a plataforma.

Como ilustração de uma de suas aplicações a nível esportivo, foi analisado o movimento de saída na natação, isto é, medição das componentes da força e momento na execução deste movimento, obtendo-se os impulsos, velocidades de saída, ângulo de saída e fatores de amplificação (relação entre o valor máximo da componente da força e o peso corporal) referentes aos indivíduos ensaiados; bem como registros típicos das componentes da força, do momento e do impulso envolvidos neste movimento. Apresenta-se também alguns registros gráficos das forças no caminhar e corrida.

ABSTRACT

Biomechanics uses the laws of Physics and Engineering concepts to describe the movement suffered by various parts of the body and the forces which act upon these parts during the performance of different activities.

The quantification of external forces, transmitted between the body and the environment, acting on the human being is very important for the measurement of the internal force which act in it. Particularly, the ground reaction forces transferred during the supporting stage practicing quasi-static or dynamic mobile activities, together with the body weight, are the cause of any change in the movement of the gravity center. A typical equipment to obtain these measures are the force platforms, which allow the measurement of the parameters involved on the activity in study.

The force platforms available have a good technological standard, however are not currently manufactured in Brazil, which makes the price of this equipment very high. This is the point that impels the project and development of this work.

The force platform built has four load cells with strain gauges, designed specifically for this purpose, and signal conditioners connected to a microcomputer. This hardware is used for data acquisition and processing in order to obtain the measurement parameters (force, moment and application point). The data acquisition and analysis was performed with the aid of computer programs developed for the platform use.

As illustration of one application in the sport field, the start on swimming was analysed, measuring the components of the force and the moment during this movement, obtaining impulses, start speeds, start angle and amplification factors (relationship between the maximum value of the component force and body weight) concerned to the samples measured as well as typical registers of the components of force, moment and impulse involved in this movement. Some graphic registers of force during walking and running are also shown.

1 INTRODUÇÃO

Em muitas áreas de estudo da locomoção humana é necessário quantificar as forças externas associadas a cada movimento. Uma força envolve uma interação entre dois objetos e produz uma mudança de estado, ou seja, o movimento. Este movimento pode ser uma aceleração, mudança de direção, desaceleração ou parada.

De acordo com os princípios de Newton, um objeto se move quando sobre ele atua uma força maior que a sua resistência a este movimento. As forças são vetores e como tais ficam perfeitamente definidas por sua magnitude, direção e sentido. Possuem, ainda, duas outras características importantes: ponto de aplicação e linha de ação. O ponto de aplicação é o ponto específico em que a força está sendo aplicada no objeto, podendo ser representado por um único ponto ou por vários pontos. A linha de ação é representada por uma linha reta na direção de aplicação da força. [HAMILL, KNUTZEN, 1995]

Em todos os movimentos humanos têm-se a influência das forças de reação da superfície na qual ocorre o movimento. Para um propósito de análise de movimento, uma vez que as forças são vetores, é comum dividirmos as forças de reação em suas componentes ortogonais, distribuídas ao longo do sistema de coordenadas tridimensionais x , y (horizontais) e z (vertical). Os dados das forças de reação são utilizados em muitos estudos para investigar uma variedade de ações, e tem como objetivo conhecer a carga ou impacto desta força sobre o corpo humano.

A magnitude da força de reação é função da velocidade de locomoção e aumenta proporcionalmente com a distância superfície - corpo. Na força de reação a componente vertical é a que possui maior magnitude, sendo por isso a mais importante e

consequentemente a mais estudada, principalmente em pesquisas da área biomecânica, que visam quantificar as forças do movimento.

No final do século XIX, ocorreu a quantificação de força relacionada à questão biomecânica. Para obter esta quantificação são utilizadas as placas de força, também chamadas plataformas de força.

Em 1873, Marey desenvolveu um sistema pneumático portátil que quantificava forças entre os pés e a superfície de apoio e em 1895 construiu a primeira placa de força, que consistia de tubos espirais de borracha fixados em uma armação de madeira. Elftman, em 1938, utilizou uma placa apoiada em quatro molas que permitiam o movimento vertical, através deste deslocamento, registrado opticamente, quantificava-se a componente vertical da força de reação resultante. E, em 1964, para quantificar picos da força de impacto externa, Cavagna utilizou placas de força, as quais continuaram sendo empregadas até o final dos anos 70 em pesquisas de calçados e superfícies esportivas. [NIGG, HERZOG, 1994] Alguns outros modelos de plataforma de força foram estudados por GOLA (1980) e LYWOOD et al. (1987), estas utilizando transdutores instrumentados com extensômetros elétricos.

Uma plataforma de força pode ser considerada uma ferramenta fundamental para o estudo de um grande número de movimentos humanos. Usualmente são necessários dois tipos diferentes de dados: os deslocamentos do corpo ou segmentos do corpo; e as forças impostas no corpo ou pelo corpo e/ou segmentos do mesmo. O padrão destes dados, na maioria das vezes, é obtido através de filmagens e/ou diretamente com medidas usando algum tipo de transdutor de força.

Embora existam diferentes projetos de plataformas de força, todos baseiam-se no fato de uma plataforma de força ser um sistema de pesagem que responde a excitação através de um elemento sensível, chamado transdutor. O método empregado para perceber a excitação determina essencialmente a sensibilidade do sistema e a medida conveniente das forças desejadas. [WINTER, 1990]

As plataformas de força com propósito biomecânico disponíveis, comercialmente, no mercado foram desenvolvidas a partir de 1960. Os sensores de medida de força para estas aplicações são os piezoelétricos e as células de carga com extensômetros de resistência elétrica.

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 por Curie. O material piezoelétrico é um cristal não condutivo que, quando submetido a uma deformação mecânica, tem a propriedade de gerar carga elétrica. E, em 1931, Carlson construiu o primeiro extensômetro de resistência elétrica, que responde a deformação causada por forças externas através da variação de sua resistência elétrica. [NIGG, HERZOG, 1994]

A primeira plataforma piezoelétrica, disponível comercialmente, foi desenvolvida pela Companhia Kistler em Zurique, no ano de 1969 e em 1976 em Boston, a Companhia AMTI construiu a primeira plataforma de força utilizando extensômetros elétricos, sendo ambas empregadas para análise do caminhar em laboratórios de biomecânica.

As plataformas de força tem sido usadas principalmente na análise dos padrões do movimento básico de homens e animais, informando as forças de reação em movimentos dos mais variados tipos.

No estudo da locomoção humana, frequentemente analisa-se a caminhada e a corrida. E, normalmente na representação das forças de reação utiliza-se como unidade básica a divisão da componente da força pelo peso corporal do indivíduo. A plataforma de força é muito útil para o estudo das forças no movimento humano em áreas como: ortopedia, reabilitação, fisiologia do trabalho, esportiva, neurologia, controle de postura e atividades psicomotoras, permitindo uma análise básica de movimentos e verificação de alguma anomalia para posterior correção.

Uma aplicação de grande valor da plataforma é o ajuste de próteses em membros amputados, permitindo que a pessoa tenha um padrão de forças normal e não desequilibre o corpo, contribuindo para o processo de reabilitação. Pesquisas a nível de ortopedia e reabilitação realizadas com o emprego de plataformas de força, dentre outros equipamentos de laboratório, contribuíram significativamente para o entendimento da locomoção humana, permitindo analisar as condições de indivíduos patológicos para a realização de cirurgias corretivas e técnicas de reabilitação, tendo como resultado centenas de indivíduos habilitados para um caminhar normal.

Um propósito muito difundido para plataforma de força é o uso na biomecânica do esporte, melhorando e otimizando a técnica e o desenvolvimento de atletas, bem como minimizando e prevenindo a ocorrência de lesões musculares ou ósseas. Muitas modalidades esportivas podem ter suas técnicas analisadas, entre elas: largada de velocistas, balanço do corpo no movimento do golfe, partidas e viradas na natação, levantamento de pesos, golpes de pugilistas, movimentos básicos de ginástica olímpica e balé. Sendo empregada, também, para o desenvolvimento de projetos de calçados para aplicações esportivas.

A manutenção de uma postura normal é resultado do controle de movimentos complexos de todo o corpo pelo sistema nervoso central. O equilíbrio estático é um fenômeno dinâmico que necessita contínuos deslocamentos do corpo. Estes movimentos resultam de uma variedade de estímulos e respostas músculo-esqueléticas e são quantificados sobre períodos de tempo entre alguns segundos e poucos minutos. Uma avaliação postural pode ser realizada com o auxílio de uma plataforma de força, permitindo analisar os esforços envolvidos e sua distribuição ao longo do movimento.

Alguns dos mais diversos usos de plataforma de força tem ocorrido em ambientes industriais, principalmente nas áreas de segurança e prevenção de acidentes; como avaliação de forças produzidas por pessoas pulando, para análise de vibração em estádios de esportes; estudos de impacto e colisões de automóveis; estudos de sistemas de carregamento. Mais recentemente empregada em ambientes de trabalho, para avaliação dos fatores envolvidos no comportamento humano frente a situações diárias de trabalho, melhorando as condições de conforto e segurança do trabalhador.

Visto o grande campo de aplicações de uma plataforma de força e a sua utilidade em diferentes áreas de pesquisa, e levando-se em conta que apenas empresas do mercado exterior fabricam este tipo de equipamento, tendo este um custo bem elevado, torna-se importante o projeto deste equipamento a nível nacional, não só para obter um custo menor do produto, mas também para o desenvolvimento de novas tecnologias nacionais.

O objetivo principal deste trabalho é o projeto e construção de uma plataforma de medição de força produzida por pessoas em movimento, assim serão determinadas experimentalmente as componentes da força em função do tempo em três direções ortogonais: vertical (z), frontal (y) e lateral (x). Esta plataforma contará com células de carga

dinâmicas, instrumentadas com extensômetros elétricos, as quais serão desenvolvidas no projeto e cujo sinal de saída estará vinculado a condicionadores de sinal e a um microcomputador, que fará a aquisição dos dados em função do tempo e o processamento dos mesmos, de forma a obter as componentes da força. O processamento dos dados incluirá também, o cálculo dos momentos, impulsos, ponto de aplicação da força e coeficiente de atrito; de maneira a caracterizar os sinais provenientes das pessoas.

Neste trabalho fez-se então, o estudo e o desenvolvimento de uma plataforma de força, bem como a implementação do sistema completo para o seu funcionamento. Ao longo desta dissertação são descritas as células de carga usadas, sua análise teórica e experimental; montagem, análise estática e dinâmica da plataforma completa; a constituição do sistema completo, isto é, plataforma, condicionadores de sinal e placa de aquisição; o sistema de aquisição de dados, programas desenvolvidos e sua utilização; o esquema de calibração da plataforma, sua análise de erro; e para finalizar, devido ao grande número de aplicações da plataforma, selecionou-se um tipo de aplicação para realizar uma demonstração prática. Foram analisados os esforços referentes ao movimento de saída na natação; este assunto foi escolhido devido à existência de poucos estudos anteriores diretamente ligados a este tema e com este enfoque, e também ao interesse particular da autora em avaliar este movimento, devido a sua importância em competições de alto nível nesta modalidade de esporte.

2 DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA

Neste capítulo é realizada a análise estática e dinâmica da plataforma de força desenvolvida, descrevendo-se também a disposição e montagem das células de carga empregadas na construção desta; em seguida faz-se a análise teórica e experimental das células de carga desenvolvidas para este projeto.

2.1 Plataforma

Uma plataforma de força é constituída basicamente de uma placa retangular apoiada em quatro pontos (Figura 2.1) e tem como princípio de funcionamento a deformação estabelecida nos transdutores de força fixados em cada uma das extremidades das placas, assim fica mecanicamente estabelecido o sistema de medida descrito na figura 2.1, permitindo obter as componentes da força resultante, que em uma análise biomecânica de locomoção normalmente são denominadas [HAMILL, KNUTZEN, 1995] :

F_x = força na direção perpendicular ao movimento

(na caminhada medio-lateral)

F_y = força na direção do movimento

(na caminhada antero-posterior)

F_z = força na direção vertical

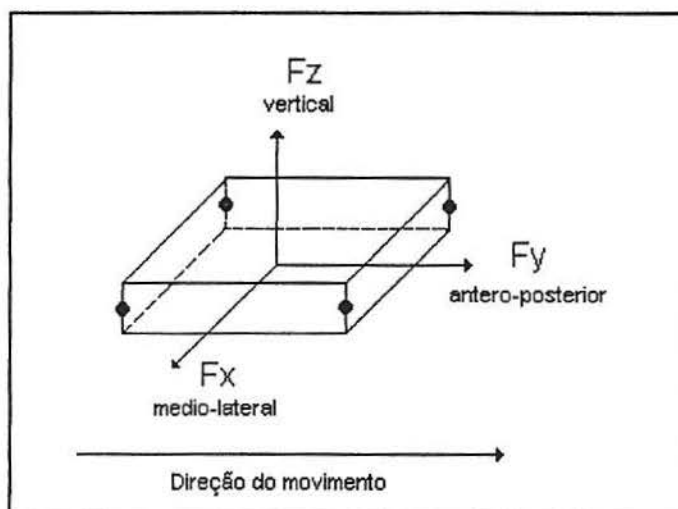


Figura 2.1 - Representação das componentes de força na análise biomecânica

Fonte: HAMILL, KNUTZEN, 1995

Para indicar a magnitude da força imposta, as plataformas de força utilizam a deformação do elemento sensível como medida da força aplicada. O elemento sensível é escolhido de forma que a força atuante no elemento seja diretamente proporcional a deformação deste. Na maioria dos sistemas a deformação é relativamente pequena, implicando no uso de elementos de grande sensibilidade para registrar a deformação ocorrida. Frente a isto, os extensômetros de resistência elétrica são largamente utilizados como sensores de deformação em sistemas para medição de forças, devido a sua versatilidade, grande variedade de formas, bem como suas características dinâmicas. [RAMEY, 1975], [NIGG, HERZOG, 1994]

2.1.1 Montagem

A plataforma de força foi especificamente projetada para realizar a medição da força de ação e o respectivo momento na superfície desta, sendo possível então encontrar as três componentes ortogonais da força ao longo dos eixos x , y e z , e também os momentos nestes três eixos (Figura 2.2).

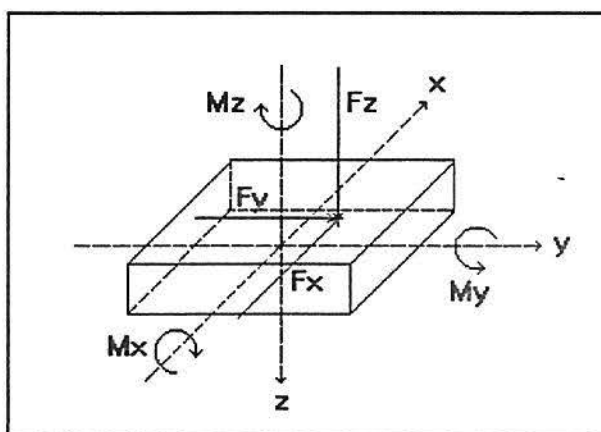


Figura 2.2 - Representação das Componentes de Força e Momento da Plataforma

O conhecimento destas seis componentes da plataforma é conseguido através da combinação de quatro células de carga octogonais, onde cada célula possui oito extensômetros de resistência elétrica, ligados em duas pontes de Wheatstone gerando duas saídas; tendo-se então com as quatro células o emprego de trinta e dois extensômetros de resistência elétrica ligados em oito pontes de Wheatstone, medindo-se oito forças, quatro horizontais e quatro verticais, que combinadas adequadamente fornecem as componentes da força e do momento aplicados.

A fim de conseguir a combinação adequada das células de carga foi realizada a montagem destas em duas superfícies de contato, ou seja, placas quadradas com 500 mm de

aresta, obedecendo a disposição mostrada na figura 2.3, onde também observa-se a denominação usada para identificar cada uma das células de carga e seu posicionamento.

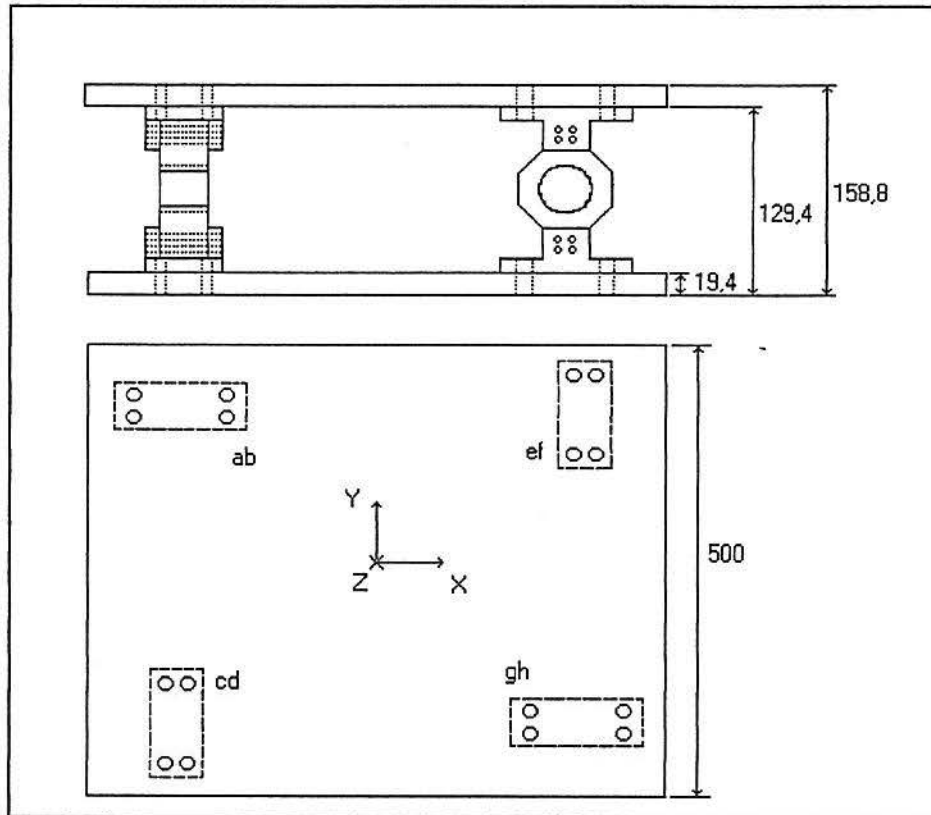


Figura 2.3 - Disposição e denominação das células de carga na plataforma, dimensões das placas (mm)

onde: eixo x paralelo a direção horizontal da página; eixo y paralelo a direção vertical da página;
eixo z entrando no plano da página

Empregou-se como material base para a confecção das superfícies de contato na montagem das quatro células de carga, placas de alumínio 5052F, cujas principais propriedades encontram-se na tabela 2.1.

Tabela 2.1 : Principais propriedades do material das placas (Alumínio 5052F)

Propriedade	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidade	E	$7,31 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	ν	0,3333
Massa específica	ρ	$2,70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Tensão de escoamento	σ_e	$8,07 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

Fonte: SAMBLANCAT, 1978

Com a disposição empregada para as células de carga nas placas de alumínio tem-se quatro componentes na direção **z**, duas componentes na direção **y** e duas na direção **x**, respectivamente paralelas a cada eixo coordenado. Estas componentes são melhor visualizadas com a figura 2.4, onde percebe-se a contribuição de cada célula de carga para a determinação das componentes em cada direção e também a representação do escalar **b**, que corresponde à distância entre os eixos verticais de uma célula de carga e sua respectiva transversa, tendo um valor de 360 mm.

Para a fixação das células nas placas de alumínio desenvolveram-se oito suportes de fixação, dois para cada célula, construídos em aço inox AISI 304, os quais tem sua geometria e dimensões mostradas na figura 2.5; estes foram fixados nas placas através de parafusos M8 de cabeça com fenda, porca e aruela de pressão. E por sua vez os suportes de fixação foram acoplados às extremidade das células de carga através de pinos de aço.

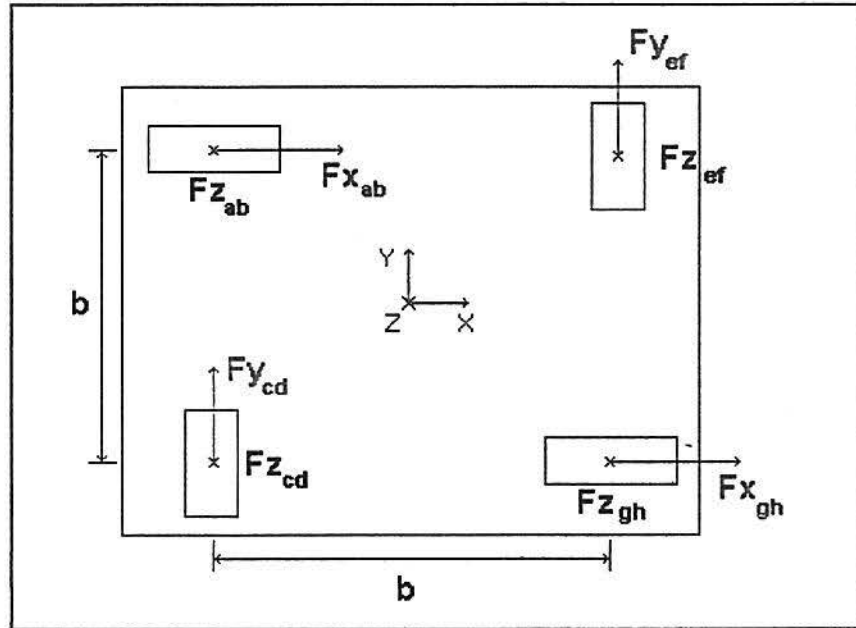


Figura 2.4 - Representação das componentes de força em cada célula de carga da plataforma

Direção x paralela a horizontal da página - Direção y paralela a vertical da página -
Direção z entrando no plano da página

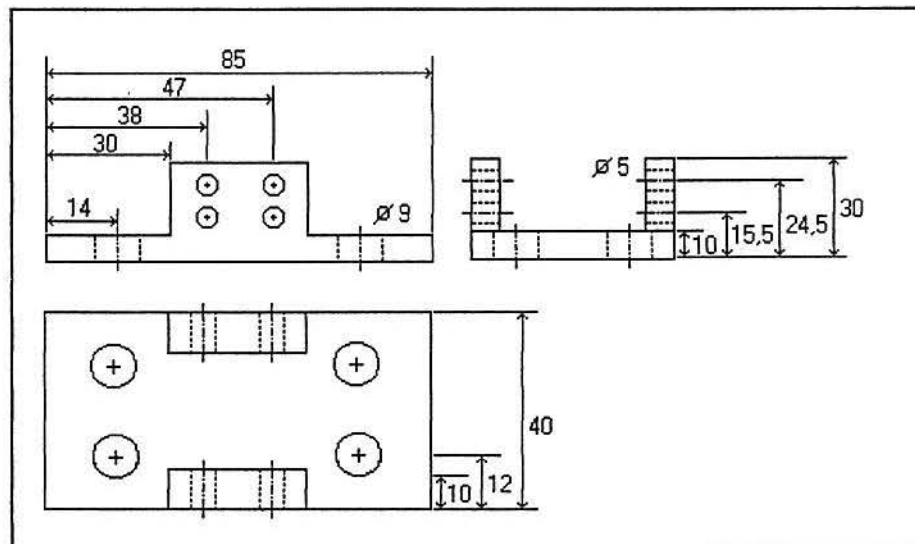


Figura 2.5 - Geometria e dimensões dos suportes de fixação das células de carga (mm)

Após o desenvolvimento completo das células de carga, dos suportes de fixação, e das placas de contato, foi possível realizar a reunião de todos os elementos constituintes da plataforma, resultando assim no equipamento mostrado nas figuras 2.6, 2.7 e 2.8, onde visualizam-se suas principais vistas, frontal, superior e lateral, respectivamente.

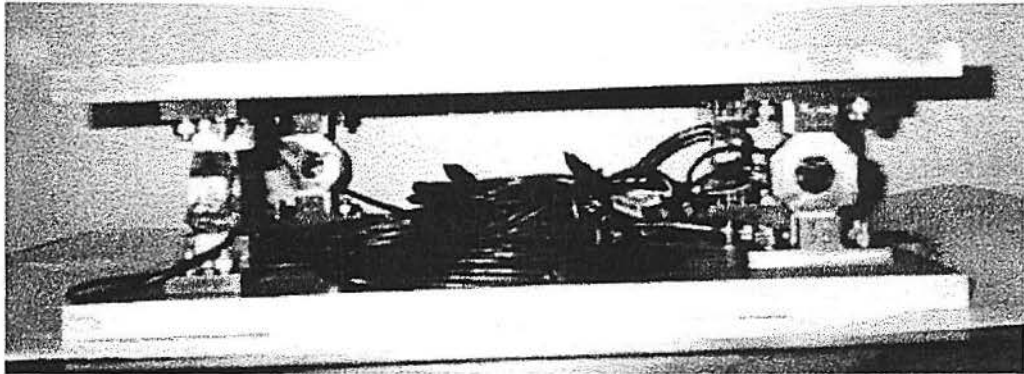


Figura 2.6 - Visualização frontal da plataforma

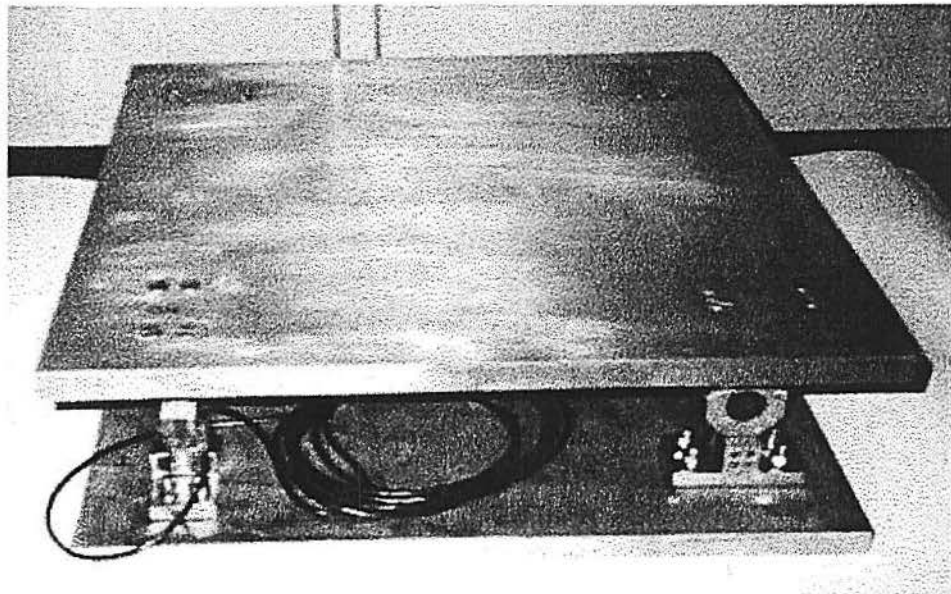


Figura 2.7 - Visualização superior da plataforma

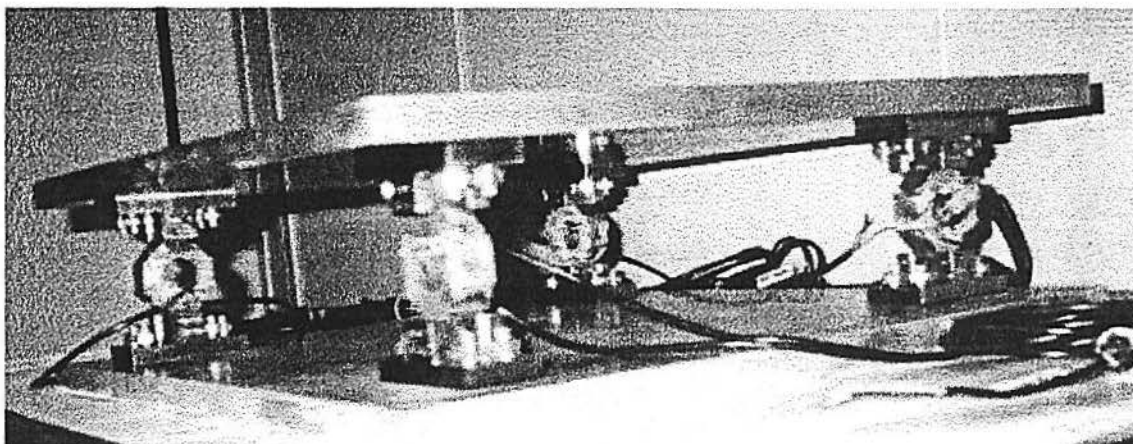


Figura 2.8 - Visualização lateral da plataforma

Com a plataforma completamente montada foi possível realizar a determinação dos parâmetros de utilização desta, ou seja, carga máxima admissível e faixa de cargas dinâmicas de utilização, sendo estes valores mostrados através da análise estática e dinâmica da plataforma encontrados no item seguinte.

2.1.2 Análise Estática e Dinâmica

Com a análise estática das células de carga, isto é, determinação das tensões máximas e resposta dinâmica (frequência natural), realizada com o auxílio de um sistema de elementos finitos, que será explicada no item 2.2.1, obteve-se a capacidade máxima teórica aproximada da plataforma, que é de 9000 N para carga vertical e de 4500 N para carga horizontal.

A análise dinâmica é realizada a fim de obter a frequência natural do equipamento, ou seja, a frequência de vibração que corresponde a elasticidade e massa do sistema sob influência de forças. A frequência natural do conjunto é determinada para verificar a

localização da zona de “quase estático” do gráfico da função de ganho, garantindo assim a linearidade em medições dinâmicas. A verificação da frequência natural da plataforma foi obtida experimentalmente, registrando-se a Transformada de Fourier da sua resposta impulsiva com uma massa de 80 kg sobre a plataforma. Na figura 2.9, mostra-se a variação do fator de amplificação em relação à frequência, onde observa-se que a menor frequência natural é 98 Hz.

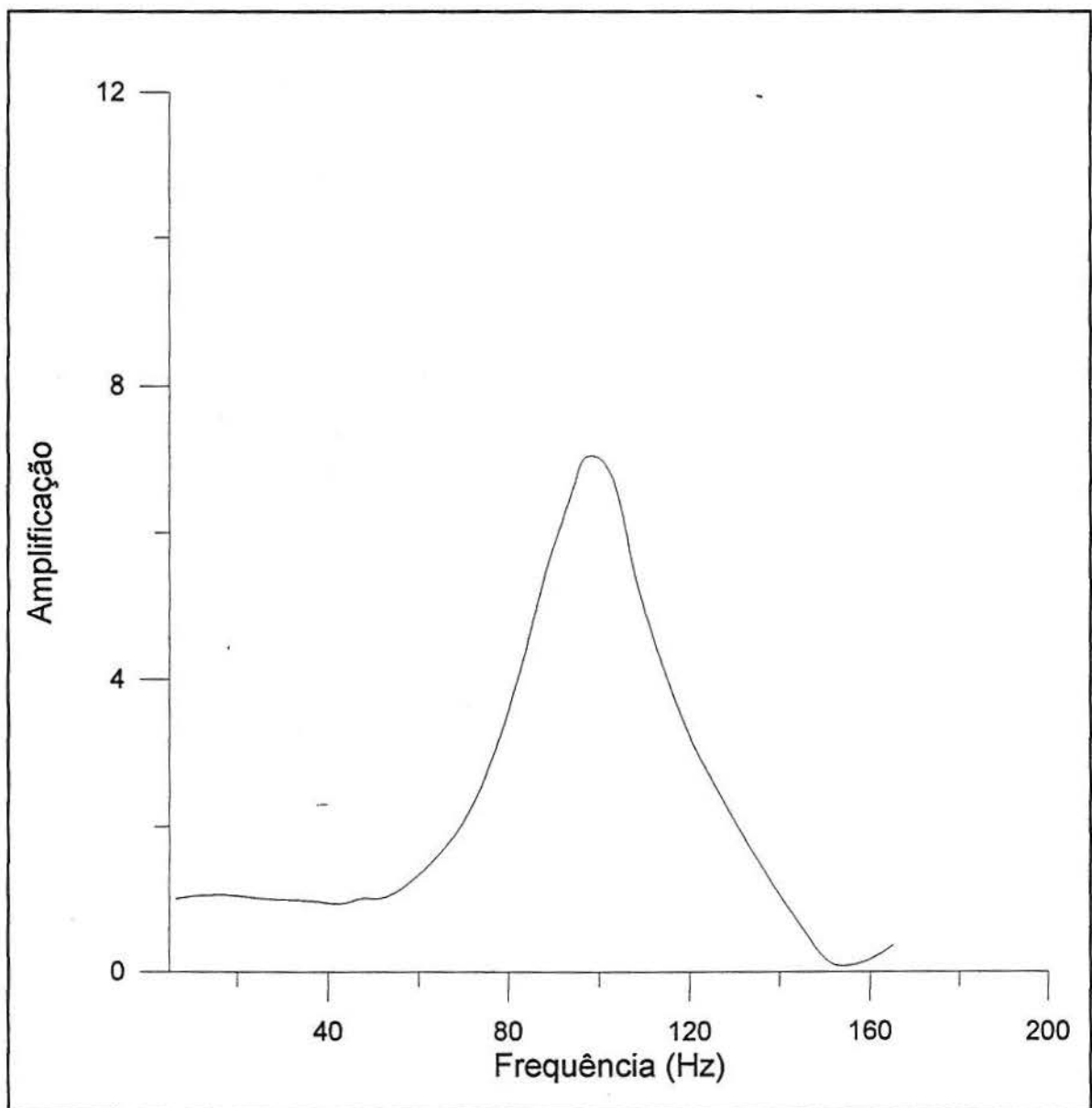


Figura 2.9 - Espectro de frequência da resposta impulsiva da plataforma na direção horizontal

Assim, como a frequência natural da plataforma é em torno de 98 Hz, pode-se determinar também, observando o gráfico da figura 2.9, sua faixa de utilização de 0 a 55 Hz, assegurando-se a linearidade dinâmica e possibilitando sua utilização como instrumento de medição para excitações provocadas por pessoas na realização de determinados movimentos com excitações inferiores a 55 Hz, sem erros apreciáveis e necessidade de correção posterior.

2.2 Célula de carga

O emprego de peças metálicas deformáveis, instrumentadas com extensômetros elétricos, está muito difundido para a medição de forças estáticas ou variáveis no tempo. Nestas aplicações são usados diversos formatos de peças: anéis, tipo S, vigas retangulares e triangulares, placas, cascas, etc. [DOZ, TAMAGNA, RIERA, 1990]

Em sistemas como balanças de túneis de vento, plataformas de força de uso geral e medição de forças de reação de pedais de bicicletas, torna-se necessário que o transdutor forneça simultaneamente o valor da força em duas direções, geralmente ortogonais. Quando se trata de medição de forças variáveis no tempo é importante que a rigidez do transdutor, nas duas direções, seja da mesma ordem para obter sensibilidade e frequências limites de utilização semelhantes.

A célula de carga empregada para a construção da plataforma de força foi do tipo octogonal, que permite a medição de forças em duas direções : horizontal e vertical, com rigidez similar em ambas direções. Este tipo de célula foi utilizada por Hull e Davis, em 1981, para medição de forças em pedais de bicicleta, para um conhecimento mais detalhado da interação das cargas entre o pedal e o pé do ciclista, permitindo com isto, prevenir lesões

muito comuns nas articulações dos joelhos de ciclistas, e melhoras na relação eficiência de pedalada - fadiga muscular.

Estes pesquisadores desenvolveram então, um pedal dinamométrico que possui quatro células de carga octogonais, operando simultaneamente para medição das forças e momentos no pé do ciclista, sendo a força vertical obtida com a soma das forças verticais das quatro células, e as forças horizontais através da combinação dos pares das forças horizontais de cada par de célula na direção respectiva.

Baseando-se no transdutor empregado no pedal dinamométrico, foi desenvolvida a célula de carga implantada na plataforma de força, observando-se é claro, que as dimensões do transdutor do pedal são bem menores que as do utilizado na plataforma, como pode-se verificar na figura 2.10, juntamente com sua geometria.

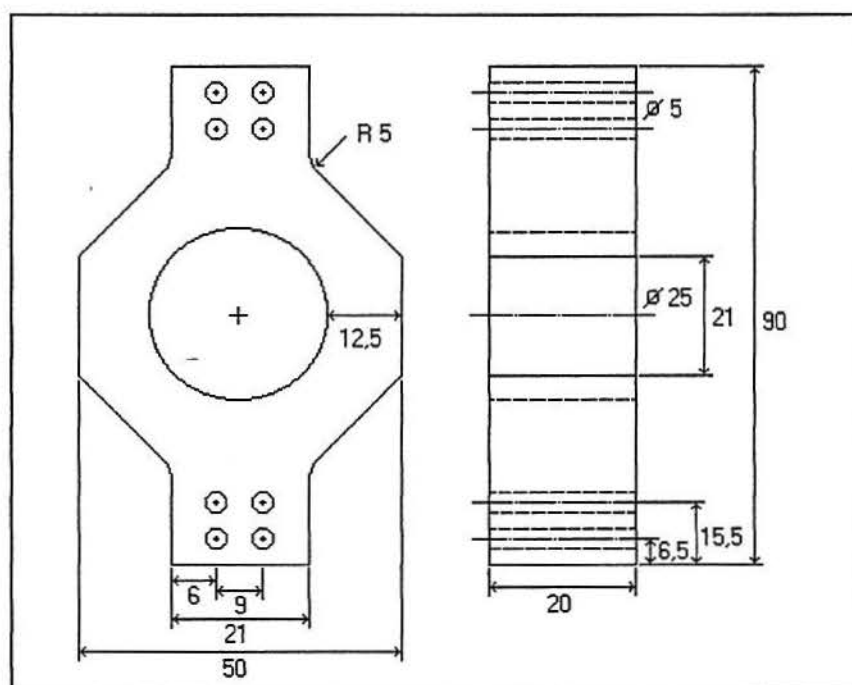


Figura 2.10 - Geometria e dimensões da célula de carga (mm)

Quanto ao princípio de funcionamento da plataforma de força este foi similar ao usado no pedal dinamométrico da bicicleta, utilizando-se também quatro células de carga octogonais.

2.2.1 Análise Teórica

Como primeiro estudo para a construção das células de carga desenvolveu-se uma célula utilizando-se como material base o alumínio 2024T3, pois este apresentava a rigidez necessária para as características dinâmicas desejadas para a célula de carga, e também possuía as propriedades mecânicas adequadas para suportar a carga de projeto pretendida para esta peça. Porém este material não estava disponível no mercado para o desenvolvimento das outras células necessárias. Sendo assim, após novas pesquisas de material escolheu-se o aço inox AISI 304 para a construção das células de carga. As principais propriedades deste material encontram-se na tabela 2.2.

Tabela 2.2. : Propriedades do material da célula de carga (Aço Inox AISI 304)

Propriedade	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidade	E	$2,10 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	ν	0,30
Massa específica	ρ	$7,85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Tensão de escoamento	σ_e	$2,75 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

Fonte: PERRY, CHILTON, 1980

A análise numérica da célula de carga foi realizada com o objetivo de fazer o levantamento do nível de tensões da peça, com um carregamento simultâneo nas duas

direções ortogonais; estimando-se assim a carga máxima admissível, bem como verificando o desacoplamento de deformações nos pontos de colagem dos extensômetros em cada uma das direções. Esta análise foi realizada com o auxílio de um sistema de elementos finitos, o programa ANSYS 5.0 [ANSYS, 1992b]

O desenvolvimento da análise numérica foi executado utilizando a hipótese de estado plano de tensões (EPT) [ANSYS, 1992a], ou seja, os esforços são obtidos a partir das relações com deformações planas para o material em estudo. Empregou-se também a definição de espessura com um elemento do tipo quadrilátero (PLANE 42) disponível na biblioteca de elementos do ANSYS 5.0. [ANSYS, 1992c]

O carregamento unitário simultâneo nas duas direções ortogonais, mostrado na figura 2.11 foi o utilizado nesta análise, quanto às condições de contorno, foram usados dois conjuntos diferentes; o primeiro restringe os deslocamentos dos furos inferiores da célula de carga em x e y , e dos furos superiores em y (Figura 2.12), enquanto que o segundo conjunto restringe apenas os deslocamentos nos furos inferiores em x e y (Figura 2.13). Cabe salientar que as condições empregadas não reproduzem exatamente o estado real de operação da peça, para uma delimitação do problema utilizaram-se os dois conjuntos de condições de contorno citados anteriormente.

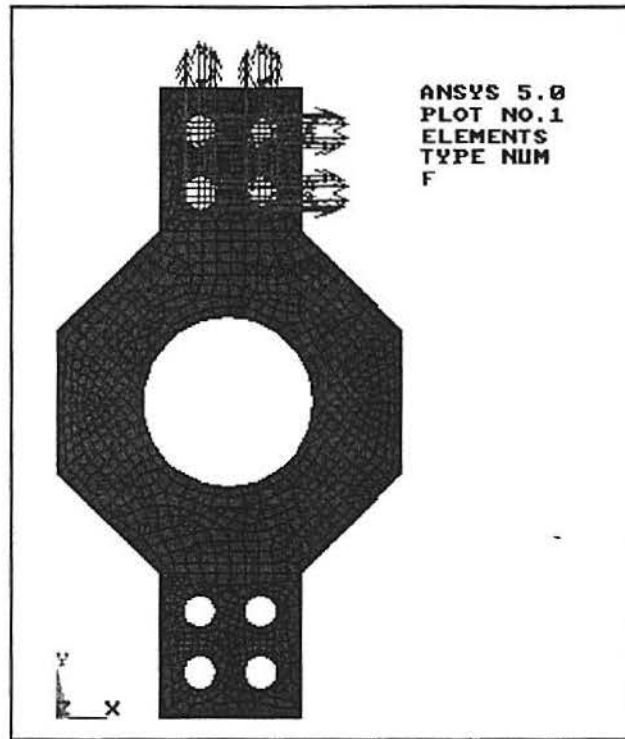


Figura 2.11 - Carregamento utilizado para análise da célula de carga

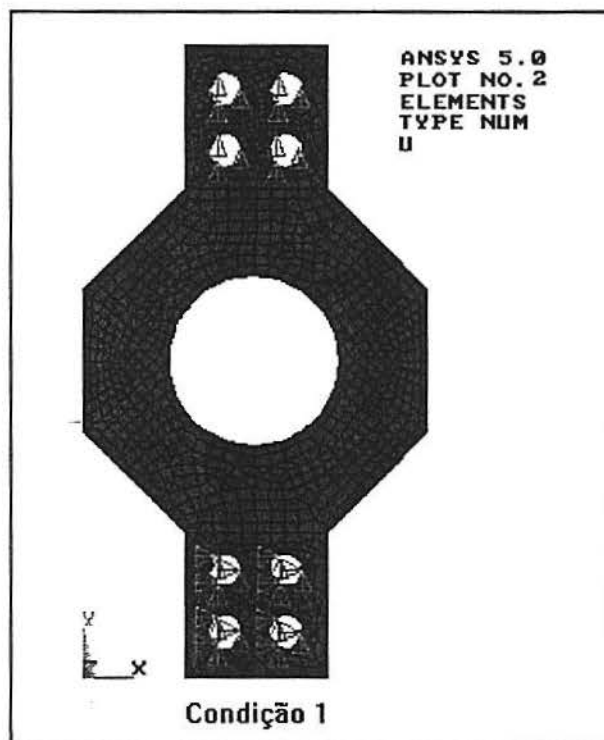


Figura 2.12 - Condições de Contorno com restrições nos furos superiores e inferiores da célula de carga

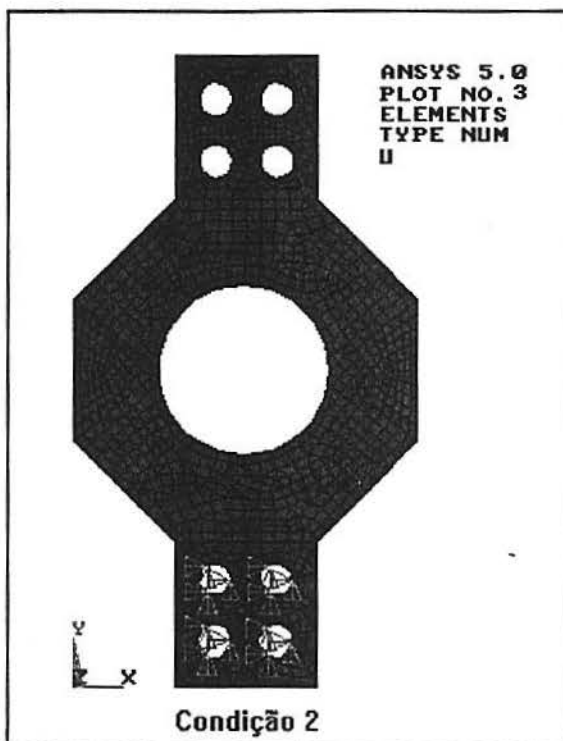


Figura 2.13 - Condições de Contorno com restrições nos furos inferiores da célula de carga

Para discretização da peça utilizou-se uma malha composta de aproximadamente 1300 elementos, visualizada na figura 2.14. Através do carregamento unitário em cada uma das direções, pode-se realizar a verificação posterior da tensão equivalente máxima (σ_{max}) de acordo com o critério de Von Mises, baseado na Teoria da Máxima Energia de Distorsão.[POPOV, 1976]

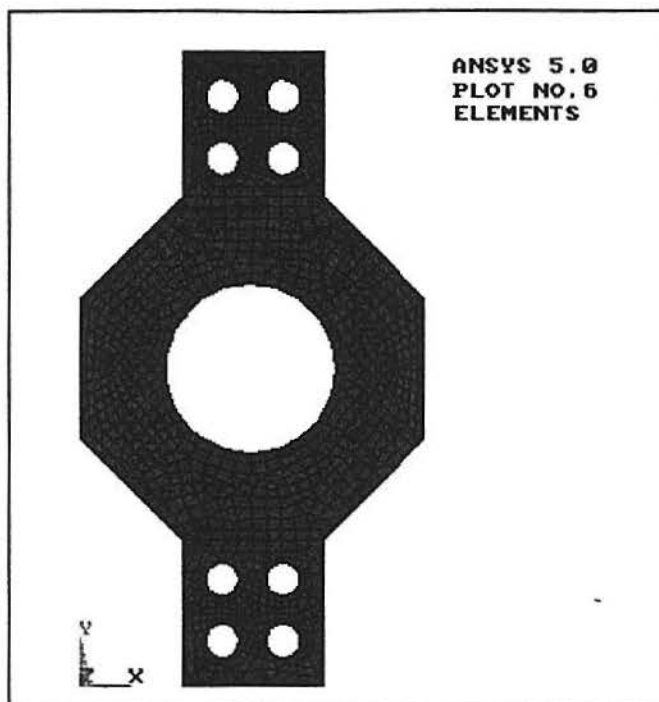


Figura 2.14 - Discretização utilizada para análise da célula de carga

Com o processamento numérico do modelo da peça de acordo com as condições de análise já apresentadas obteve-se os valores máximos e mínimos das tensões experimentadas pela célula como mostra a tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores máximos e mínimos das tensões na célula de carga para as duas condições de contorno (N/m^2)

Componente	Condição de Contorno 1		Condição de Contorno 2	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
σ_{xx}	$2,3 \times 10^4$	$-2,6 \times 10^4$	$3,6 \times 10^4$	$-4,7 \times 10^4$
σ_{yy}	$4,8 \times 10^4$	$-4,8 \times 10^4$	$5,2 \times 10^4$	$-8,6 \times 10^4$
σ_{xy}	$1,9 \times 10^4$	$-1,4 \times 10^4$	$2,9 \times 10^4$	$-2,8 \times 10^4$
σ_{eq} (Von Mises)	$4,8 \times 10^4$	$1,5 \times 10^2$	$8,4 \times 10^4$	$2,0 \times 10^2$

Considerando o estado de tensões mais crítico registrado na tabela 2.3, ou seja, $\sigma_{\max} = 8,4 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, que está sob aplicação de carga unitária nas duas direções, e a tensão de escoamento do material, apresentada na tabela 2.2, que é de $2,75 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, obtem-se a carga máxima admissível pela célula de carga. Conseguem-se um valor de carga de 2250 N, em cada uma das direções simultaneamente, utilizando um coeficiente de segurança de 1,50.

Com a análise conjunta das figuras 2.15 a 2.18 pode-se avaliar o nível de tensões existentes na célula para o caso em que a peça encontra-se com restrições nos furos inferiores e superiores (Condição de Contorno 1), nota-se que a distribuição das tensões ao longo da célula de carga desenvolve-se simetricamente, permitindo verificar os pontos para instrumentação da célula de carga.

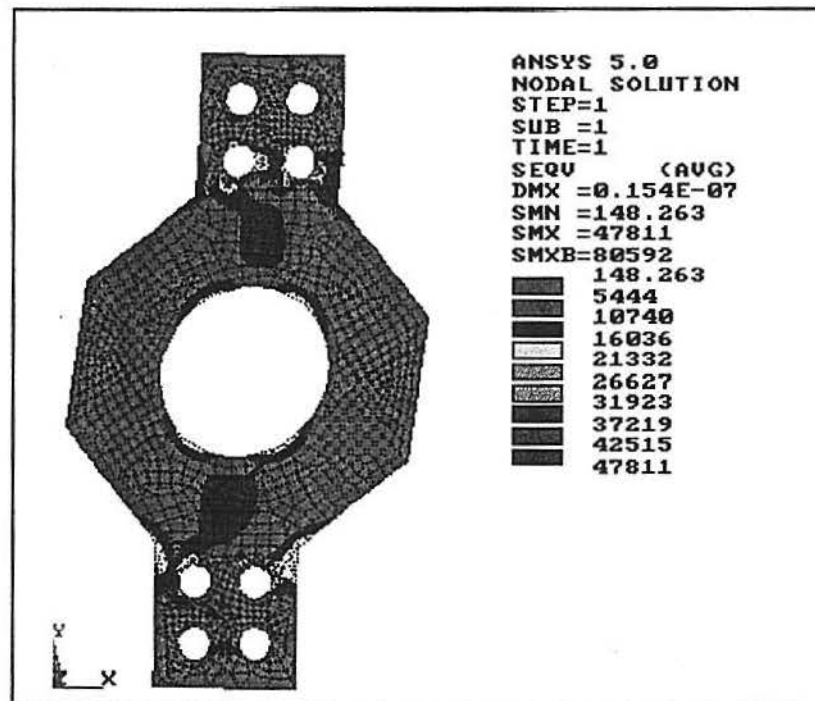


Figura 2.15 - Distribuição de tensões equivalente (σ_{eq}) para condição de contorno 1

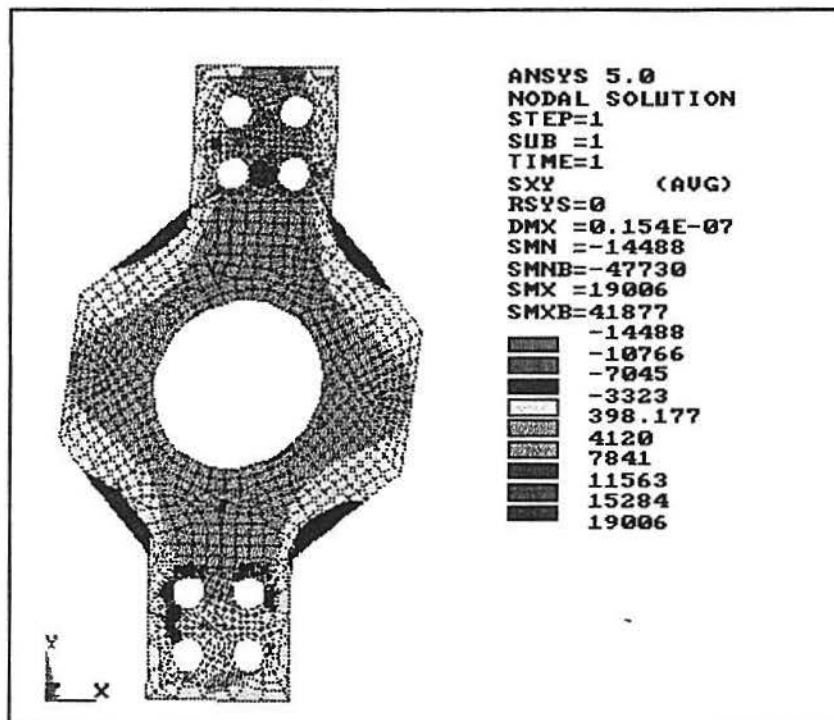


Figura 2.16 - Distribuição de tensões em xy (σ_{xy}) para a condição de contorno 1

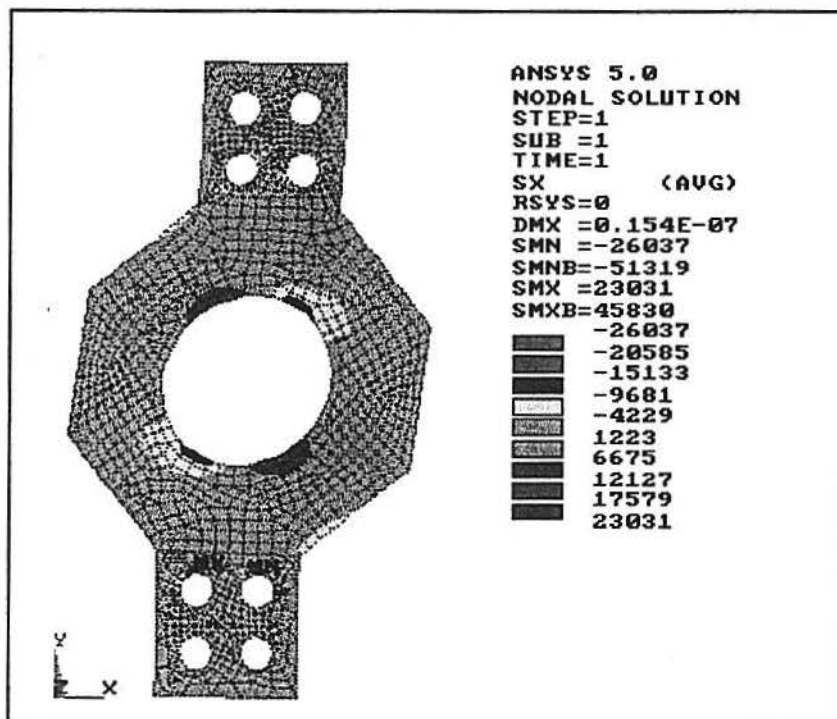


Figura 2.17 - Distribuição de tensões em x (σ_{xx}) para condição de contorno 1

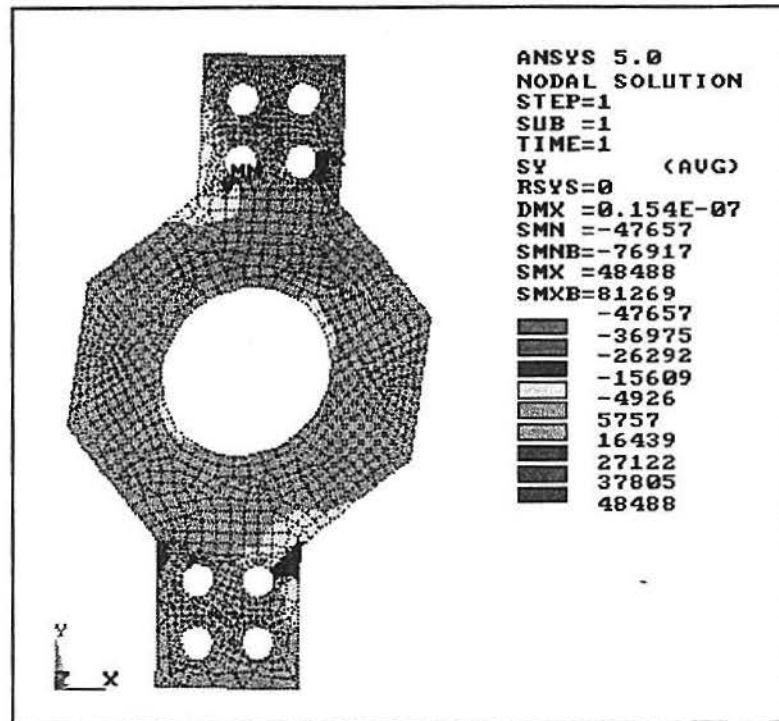


Figura 2.18 - Distribuição de tensões em y (σ_{yy}) para condição de contorno 1

Observando-se o conjunto de figuras 2.19 a 2.22, que mostram a distribuição de tensões para o segundo conjunto de condições de contorno, isto é, restrições apenas nos furos inferiores, tem-se uma representação dos pontos críticos experimentados pela peça.

Através da análise das tensões praticadas na extensão da peça, pode-se verificar os locais de interesse para posterior posicionamento dos extensômetros elétricos, como as arestas inclinadas, as faces verticais do octaédro e o interior do círculo, percebe-se os níveis de tensões similares confirmando a existência do desacoplamento das direções vertical e horizontal.

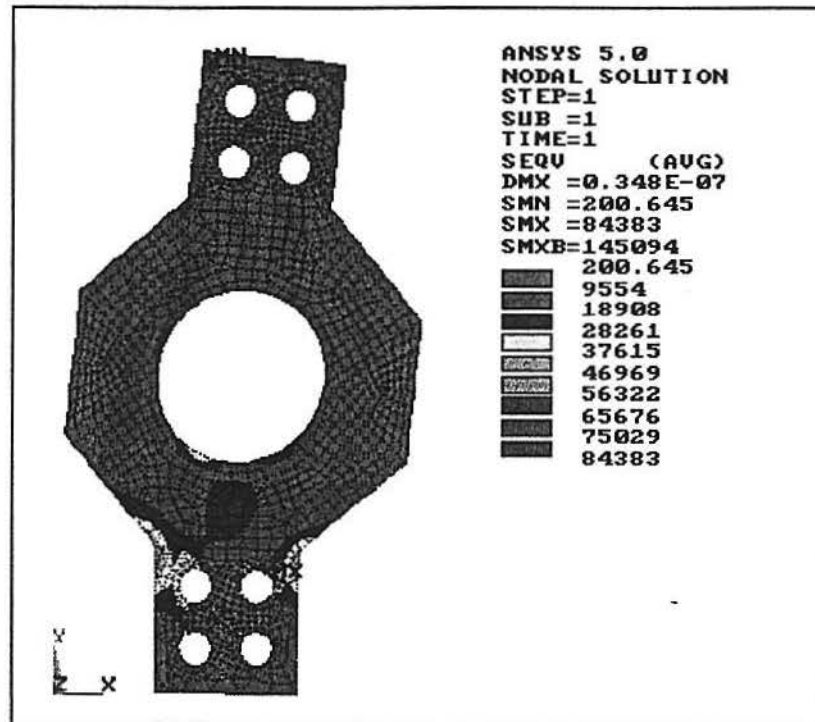


Figura 2.19 - Distribuição de tensões equivalente (σ_{eq}) para condição de contorno 2

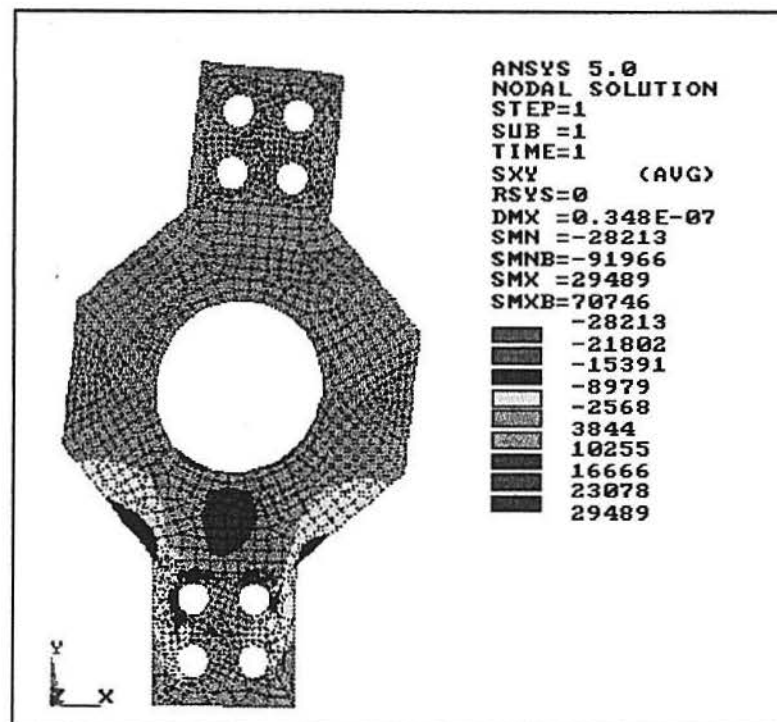


Figura 2.20 - Distribuição de tensões em xy (σ_{xy}) para a condição de contorno 2

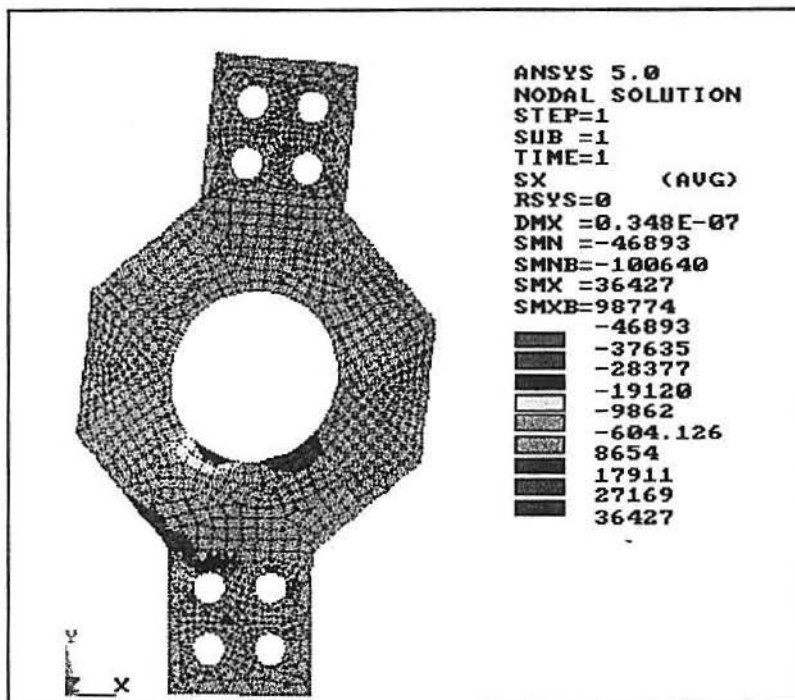


Figura 2.21 - Distribuição de tensões em x (σ_{xx}) para condição de contorno 2

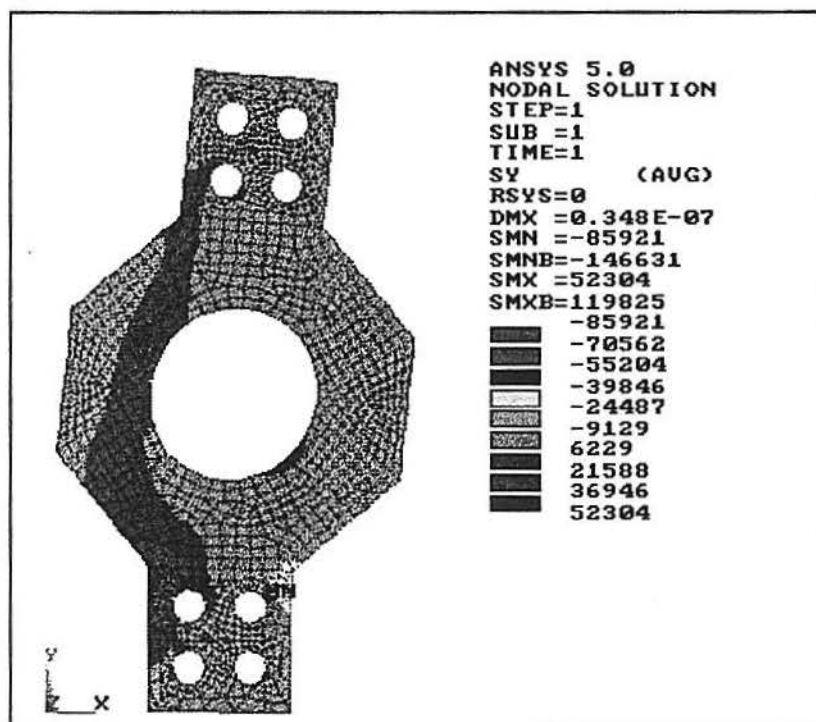


Figura 2.22 - Distribuição de tensões em y (σ_{yy}) para condição de contorno 2

A análise dinâmica foi desenvolvida para avaliar a primeira frequência natural de vibração da célula de carga, permitindo ampliar o conhecimento de suas características dinâmicas. Porém deve-se lembrar que a fixação da célula considerada no modelo numérico tem uma rigidez maior que o modelo real e que esta frequência muda com a montagem do conjunto completo, conforme pode-se notar na descrição do item 2.1.2.

As frequências encontradas na análise dinâmica teórica, foram de 3400 Hz para a condição de contorno 1, e 2500 Hz para a condição 2; com a figura 2.23 pode-se visualizar o primeiro modo de vibração da célula de carga, para cada uma das condições de contorno empregadas.

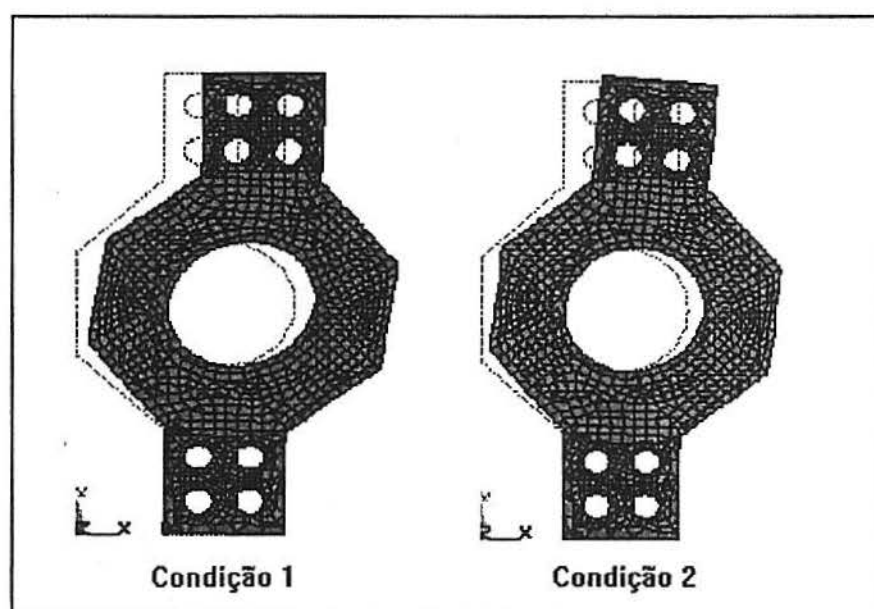


Figura 2.23 - Primeiro Modo de Vibração da célula de carga para os dois conjuntos de condições de contorno

Apesar da célula de carga apresentar valores de frequência elevados, quando efetua-se a montagem destas nas placas de fixação da plataforma, a frequência do conjunto reduz significativamente, como visto na descrição do item 2.1.2, devido as novas condições de rigidez apresentadas.

2.2.2 Análise Experimental

A célula de carga foi instrumentada com extensômetros de resistência elétrica, cujas características encontram-se na tabela 2.4, estando posicionados no transdutor de acordo com a figura 2.24 e ligados em ponte de Wheatstone completa [DALLY, RILEY, 1991], permitindo uma maior sensibilidade das células de carga e também as deformações por temperatura ficam compensadas, pois tem-se os quatro extensômetros ativos em cada uma das conexões, o esquema de ligação da ponte é apresentado na figura 2.25.

Tabela 2.4 - Características dos extensômetros elétricos empregados nas células de carga

Tipo	KFG - 5 - 120 - C1 - 11 (Kyowa)
Compensação de temperatura	Aço
Comprimento da grade	5 mm
Resistência da grade	$119,8 \pm 0,2 \Omega$
Fator Gage (K)	$2,10 \pm 1,0 \%$

Fonte: KYOWA, Japan

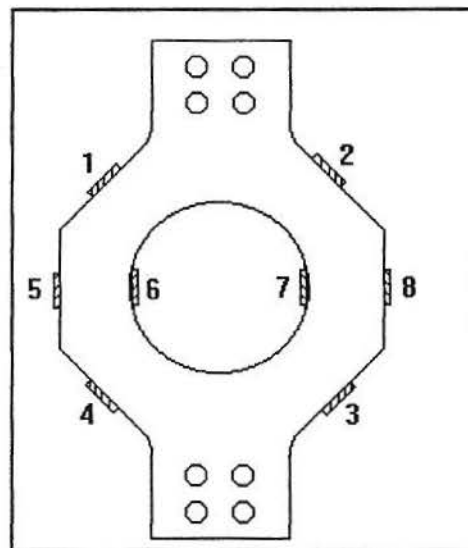


Figura 2.24 - Esquema da posição dos extensômetros de resistência elétrica na célula de carga

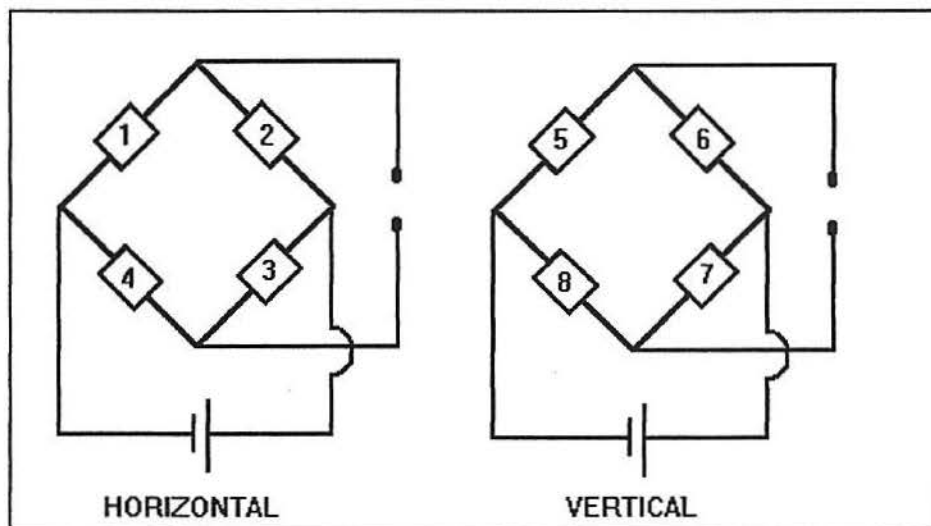


Figura 2.25 - Esquemas das conexões das pontes de Wheatstone na célula de carga

A fim de realizar a calibração estática para um carregamento horizontal foi aplicado o esquema da figura 2.26, onde observam-se os instrumentos utilizados: um dispositivo de calibração, desenvolvido especificamente para esta operação; dois condicionadores de sinal para extensometria Transdutech, configurados com uma saída em mV coincidente com a deformação em $\mu\epsilon$, e um anel dinamométrico de 588 N (60 kgf).

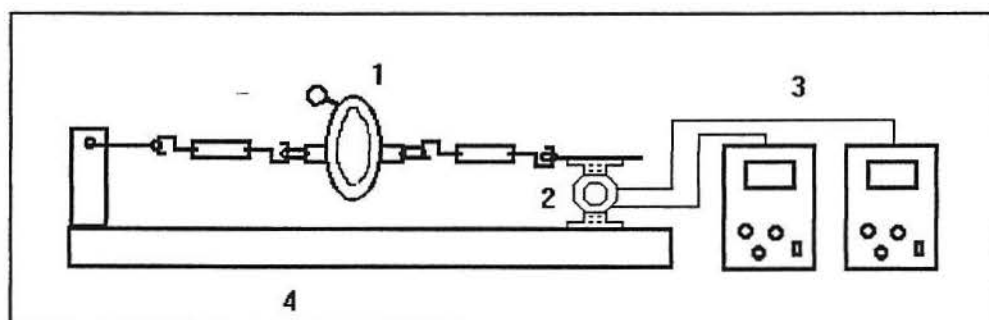


Figura 2.26 - Esquema para Calibração Horizontal das células de carga

- 1) Anel Dinamométrico; 2) Célula de Carga; 3) Condicionadores de Sinal; 4) Dispositivo de calibração

Para a calibração estática com carregamento vertical empregou-se o esquema da figura 2.27, utilizando-se uma prensa manual ZD 250, de 2452 N (250 kgf) e os mesmos condicionadores de sinal da calibração horizontal, com igual configuração de saída.

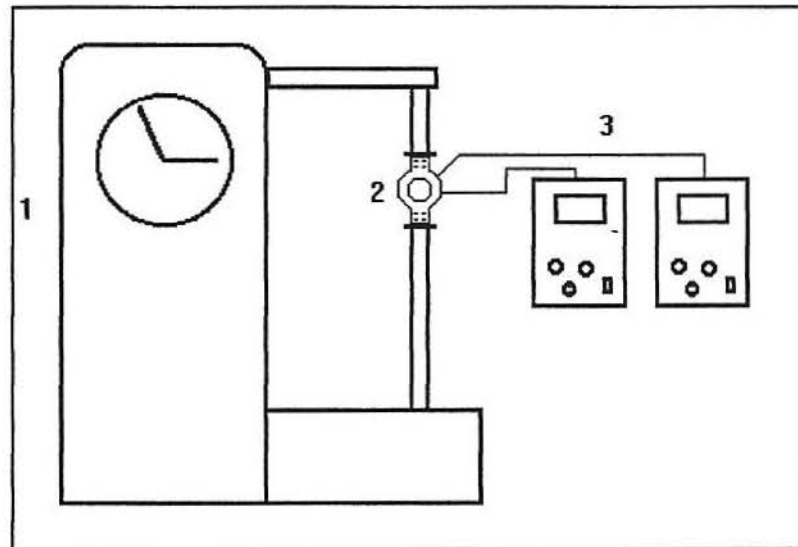


Figura 2.27 - Esquema para Calibração Vertical das células de carga

1) Prensa Manual ZD 250; 2) Célula de Carga; 3) Condicionadores de Sinal

O processo de calibração horizontal e vertical foi repetido três vezes para cada célula de carga, obtendo-se então os coeficientes de calibração médios para cada carregamento, que foram de $5,02 \pm 0,23 \text{ N}/\mu\epsilon$ para carga horizontal, e de $8,43 \pm 0,21 \text{ N}/\mu\epsilon$ para carga vertical.

Após ter realizado a calibração estática das células nas duas direções ortogonais, são obtidas tabelas que mostram os estágios de carga aplicada e seus respectivos valores em deformação para cada direção, a partir destas obtêm-se as suas curvas de calibração, apresentadas no Anexo A, onde percebe-se o nível de desacoplamento de cada célula. Pois

para cada carregamento aplicado, horizontal e vertical, têm-se leituras horizontal e vertical, o que mostra a existência de um pequeno acoplamento entre as direções.

Com o objetivo de facilitar o cálculo da carga aplicada em cada célula, optou-se pela geração de matrizes de calibração [BAGESTEIRO, TAMAGNA, 1995]. A construção de uma matriz é necessária devido à não ocorrência de um perfeito desacoplamento de efeitos na célula de carga, pois foi verificado o surgimento de um valor residual (pequena interferência) quando há aplicação de cargas horizontal e vertical, separadamente; de posse desta matriz faz-se a correção das imperfeições aparentes na célula.

A partir das curvas de calibração de cada célula de carga e dos respectivos valores tabelados, realizou-se a subtração entre cada valor de deformação para um determinado estágio de carga e seu respectivo antecessor, obtendo-se assim os valores chamados diferenças, dos quais foi calculada a média. Como para cada carregamento, horizontal e vertical, tem-se dois conjuntos de valores, isto é, um de leitura horizontal e outro de vertical; surgem assim os quatro valores que irão compor a matriz quadrada das leituras (\tilde{L}), formada na primeira linha com os valores das leituras para carregamento vertical, sendo o primeiro elemento o valor correspondente a carga vertical e o segundo elemento ao valor residual na direção horizontal; e na segunda linha para carregamento horizontal, com o primeiro elemento representando o valor residual da direção vertical e o segundo elemento correspondente a carga horizontal.

Com o conhecimento das matrizes das leituras (\tilde{L}), encontram-se as matrizes de calibração para cada célula, através das seguintes equações:

$$\tilde{L} \cdot \vec{f} = \vec{V} \quad (2.1)$$

onde \tilde{L} é a matriz obtida das respectivas leituras na calibração estática; \vec{f} é o vetor das forças, vertical e horizontal, conhecidas; e \vec{V} é o vetor da leitura (resposta) em deformação da célula;

$$\tilde{M} = \tilde{L}^{-1} \quad (2.2)$$

$$\vec{f} = \tilde{M} \cdot \vec{V} \quad (2.3)$$

onde \vec{f} é o vetor das forças aplicadas na célula; \tilde{M} é a matriz dos coeficientes de calibração, inversa da matriz \tilde{L} (\tilde{L}^{-1}); e \vec{V} é o vetor da resposta da célula frente a carga submetida.

Realizando-se as operações anteriormente descritas para cada uma das células de carga desenvolvidas obtiveram-se suas matrizes de calibração, que quando multiplicadas pelas respectivas leituras de cada célula, fornecem diretamente o valor da carga aplicada, sendo portanto expressas em N/mV.

As matrizes de calibração encontradas são as seguintes:

- Célula AB

$$\tilde{M}_{AB} = \begin{bmatrix} 8,339 \pm 0,278 & -0,170 \pm 0,170 \\ -0,170 \pm 0,127 & 5,106 \pm 0,052 \end{bmatrix}$$

- Célula CD

$$\tilde{M}_{CD} = \begin{bmatrix} 8,413 \pm 0,212 & -0,172 \pm 0,129 \\ -0,300 \pm 0,214 & 5,108 \pm 0,261 \end{bmatrix}$$

- Célula EF

$$\tilde{M}_{EF} = \begin{bmatrix} 8,342 \pm 0,487 & -0,361 \pm 0,201 \\ -0,120 \pm 0,080 & 4,813 \pm 0,023 \end{bmatrix}$$

- Célula GH

$$\tilde{M}_{GH} = \begin{bmatrix} 8,205 \pm 0,269 & -0,214 \pm 0,034 \\ -0,214 \pm 0,128 & 5,214 \pm 0,081 \end{bmatrix}$$

A vantagem da utilização de matrizes de calibração está na sua simplicidade e versatilidade de uso, facilitando também no desenvolvimento de programas, possibilitando maior rapidez na execução dos cálculos a serem processados.

3 SISTEMA COMPLETO

Dada uma excitação na plataforma, a deformação produzida pela mesma é medida pelas células de carga, através dos conjuntos de extensômetros de resistência elétrica; o sinal gerado por estes é transmitido para as pontes de Wheatstone onde é condicionado a fim de poder ser lido pela placa de aquisição, e processado no sistema de aquisição de dados utilizado para registrar o sinal obtido. Portanto, o sistema completo para operação da plataforma de força consiste nos seguintes equipamentos: plataforma de força, oito condicionadores de sinal, placa de aquisição e microcomputador; como mostra o esquema da figura 3.1.

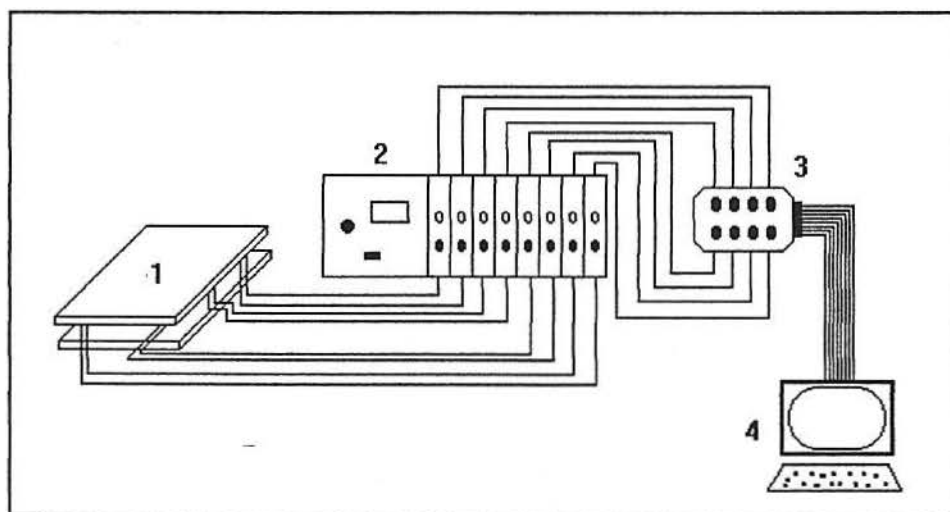


Figura 3.1 - Esquema do Sistema Completo

1) Plataforma de Força; 2) Condicionadores de Sinal; 3) Placa de aquisição; 4) Microcomputador

3.1 Plataforma

A plataforma de força, como explicado anteriormente, reúne quatro células de carga octogonais instrumentadas com extensômetros elétricos para medir oito forças, quatro verticais e quatro horizontais. Com o conhecimento destas forças é possível calcular: as três componentes F_x , F_y e F_z da força aplicada, as três componentes M_x , M_y e M_z do vetor momento relativo à origem do sistema de coordenadas, as duas coordenadas X e Y do ponto de aplicação da força na superfície da plataforma, como está mostrado na figura 3.2. Também são determinadas as componentes do impulso I_x , I_y , I_z , a força total aplicada \bar{F} , o momento total \bar{M} e o ângulo entre a força horizontal e vertical μ .

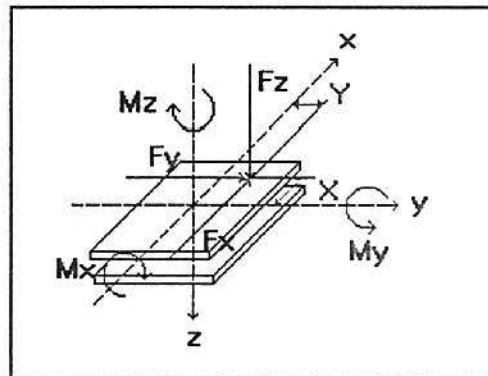


Figura 3.2 - Variáveis de medição da plataforma

As variáveis acima mencionadas são obtidas através das seguintes equações (as respectivas direções de cada componente das equações a seguir, já foram apresentadas na figura 2.4):

Componente da força horizontal na direção x

$$F_x = F_{x_{ab}} + F_{x_{gh}} \quad (3.1)$$

Componente da força horizontal na direção y

$$F_y = F_{y_{cd}} + F_{y_{ef}} \quad (3.2)$$

Componente da força vertical na direção z

$$F_z = F_{z_{ab}} + F_{z_{cd}} + F_{z_{ef}} + F_{z_{gh}} \quad (3.3)$$

Componente do momento na direção x

$$M_x = ((F_{z_{cd}} + F_{z_{gh}}) - (F_{z_{ab}} + F_{z_{ef}})) \cdot b \quad (3.4)$$

Componente do momento na direção y

$$M_y = ((F_{z_{ef}} + F_{z_{gh}}) - (F_{z_{ab}} + F_{z_{cd}})) \cdot b \quad (3.5)$$

Componente do momento na direção z

$$M_z = (F_{x_{ab}} - F_{x_{gh}}) \cdot b + (F_{y_{cd}} - F_{y_{ef}}) \cdot b \quad (3.6)$$

Coordenada do ponto de aplicação da força no eixo x

$$X = \frac{M_y}{F_z} \quad (3.7)$$

Coordenada do ponto de aplicação da força no eixo y

$$Y = \frac{M_x}{F_z} \quad (3.8)$$

Impulso na direção x

$$I_x = \int_0^1 F_x \cdot dt \quad (3.9)$$

Impulso na direção y

$$I_y = \int_0^t F_y \cdot dt \quad (3.10)$$

Impulso na direção z

$$I_z = \int_0^t F_z \cdot dt \quad (3.11)$$

Módulo da força total aplicada

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.12)$$

Módulo do momento total aplicado

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (3.13)$$

Ângulo entre a força horizontal e a força vertical

$$\mu = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \quad (3.14)$$

A fim de habilitar os futuros usuários do equipamento desenvolvido neste trabalho, são apresentadas na tabela 3.1 as principais especificações da plataforma construída. Os valores de erros percentuais mostrados na tabela 3.1 são referentes a todo o conjunto, isto é, plataforma, condicionadores de sinal e placa de aquisição. A interferência apresentada na tabela 3.1 é devida a pequenas imperfeições no desacoplamento do sistema, resultando então cargas aparentes na saída. O método para obtenção dos valores de erro percentual e interferência serão explicados no item 5.

Tabela 3.1 - Principais especificações da Plataforma

	Fz	Fy	Fx	Mz	My	Mx
Capacidade	9000 N	4500 N		3240 Nm	1620 Nm	
Erro (%)	4,5	8,6	8,9	7,5	5,0	8,7
Interferência	17 N	40 N	34 N	17 Nm	14 Nm	15 Nm
Frequência Natural (Hz)	139	98				
Massa Total (kg)	34					

3.2 Condicionadores de Sinal

Para a excitação das células de carga e amplificação do sinal de resposta foram desenvolvidos oito condicionadores de sinal baseados em um circuito de ponte de Wheatstone completa alimentada por tensão alternada senoidal. Estes condicionadores tiveram seu projeto desenvolvido no Laboratório de Medições Mecânicas, e sua execução realizada no Laboratório de Vibrações, ambos pertencentes à Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os condicionadores apresentam um ganho máximo de cento e sete vezes, tensão de saída de 10 volts, tensão de alimentação dos extensômetros de 4,65 volts RMS (senoidal) e um filtro passa-baixa com uma frequência de corte de 750 Hz, adotada com base na estimativa inicial de frequência máxima a ser mensurada (200 Hz), garantindo a não atenuação do sinal de saída pelo filtro.

Cada condicionador de sinal possui um ajuste de zero, com a finalidade de compensar o efeito produzido pela impedância dos cabos de ligação da célula de carga e também

eliminar tensões diferenciais residuais geradas pelas resistências elétricas dos extensômetros. Na figura 3.3 tem-se uma vista do painel frontal de cada condicionador de sinal e suas respectivas conexões: ajuste de zero, entrada para o cabo da célula de carga e saída do cabo para a placa de aquisição de dados.

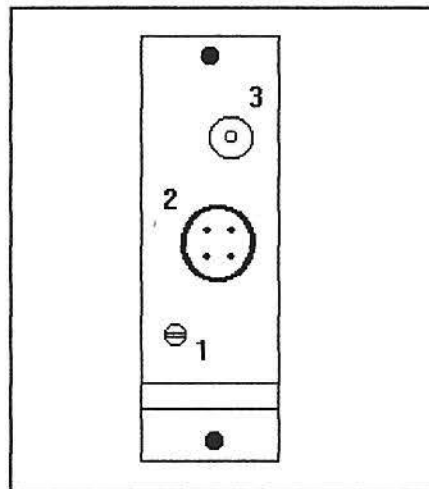


Figura 3.3 - Painel Frontal de um Condicionador de Sinal

1) Ajuste de zero; 2) Entrada tipo 4 vias para célula de carga; 3) Saída tipo BNC para placa de aquisição.

Para facilidade de manuseio e operação dos condicionadores de sinal, estes foram associados em um painel único, que é visualizado na figura 3.4; composto de uma chave seletora, empregada para escolher o condicionador a ser visualizado no indicador digital, para a realização do ajuste de zero, e de uma chave liga-desliga com indicador luminoso.

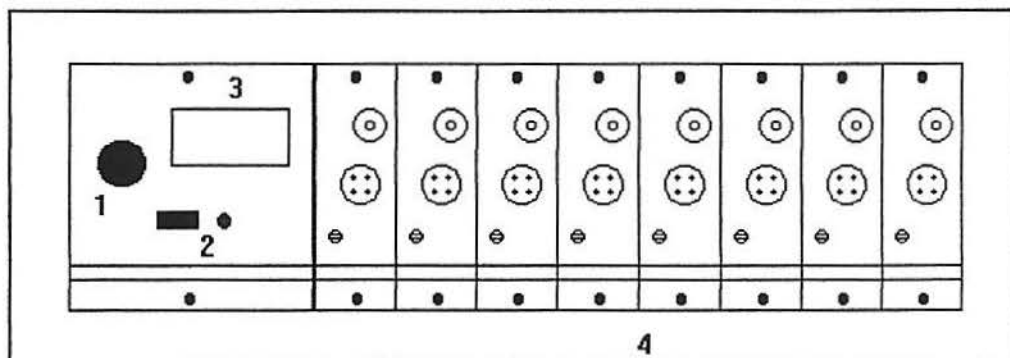


Figura 3.4 - Painel Completo dos Condicionadores de Sinal

- 1) Chave seletora dos condicionadores; 2) Chave liga-desliga e indicador luminoso;
3) Indicador digital; 4) Condicionadores

Para ajuste do ganho dos condicionadores foi necessário fazer uma estimativa da máxima deformação imposta aos extensômetros durante a operação da plataforma. Tal estimativa possibilitou o cálculo da máxima variação da resistência elétrica sofrida pelos extensômetros, dado este, utilizado para criar um desbalanceamento equivalente a esta deformação em uma célula de carga auxiliar, possibilitando assim o ajuste de ganho de maneira que o sinal de saída não fosse superior a $5V_{cc}$, valor máximo para tensão de entrada na placa de aquisição de dados.

Com o conjunto dos condicionadores completamente montado, este foi acoplado juntamente com a plataforma, como pode-se observar nas figuras 3.5 e 3.6, para a verificação de seu funcionamento conjunto. Após alguns testes de operação conjunta, verificou-se que para uma boa estabilidade de medição os condicionadores devem ser ajustados depois de percorrido um intervalo de tempo de sessenta minutos de aquecimento.

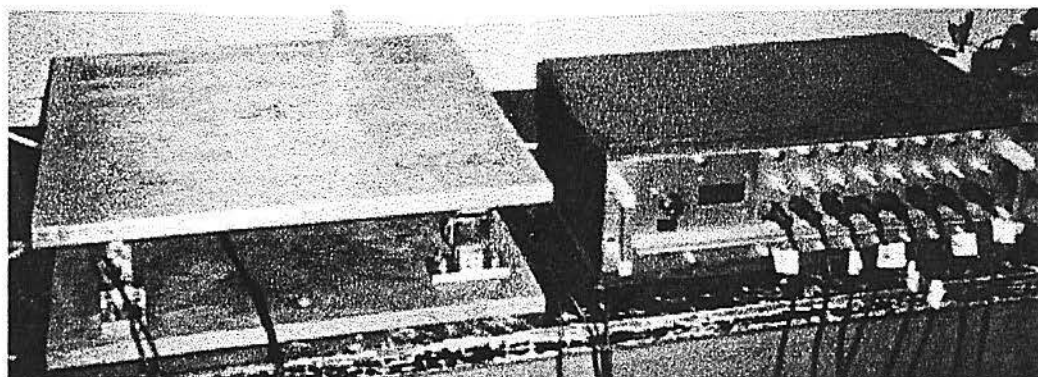


Figura 3.5 - Visualização dos condicionadores de sinal e da plataforma de força

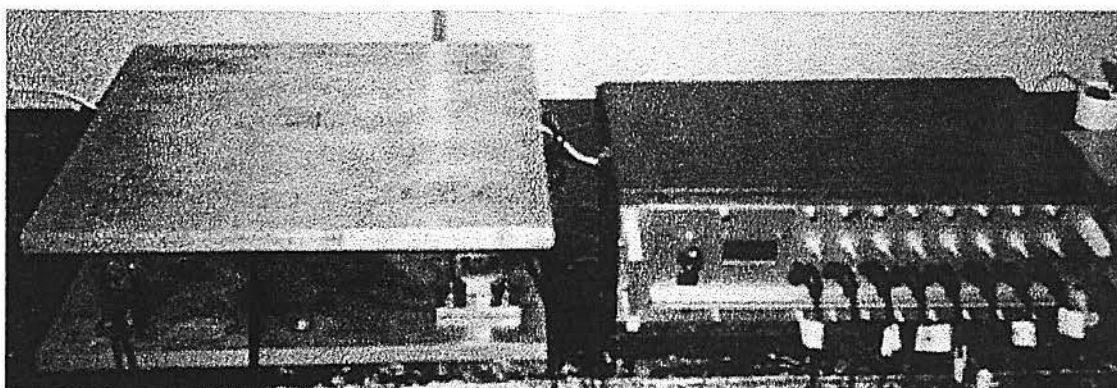


Figura 3.6 - Visualização dos condicionadores de sinal juntamente com a plataforma

Foi realizado o levantamento da curva de resposta em frequência dos condicionadores desenvolvidos, para verificação da sua linearidade, obtendo-se como resultado curvas de amplificação como a mostrada na figura 3.7. Os valores **a** e **b** para cada condicionador são vistos na tabela 3.2.

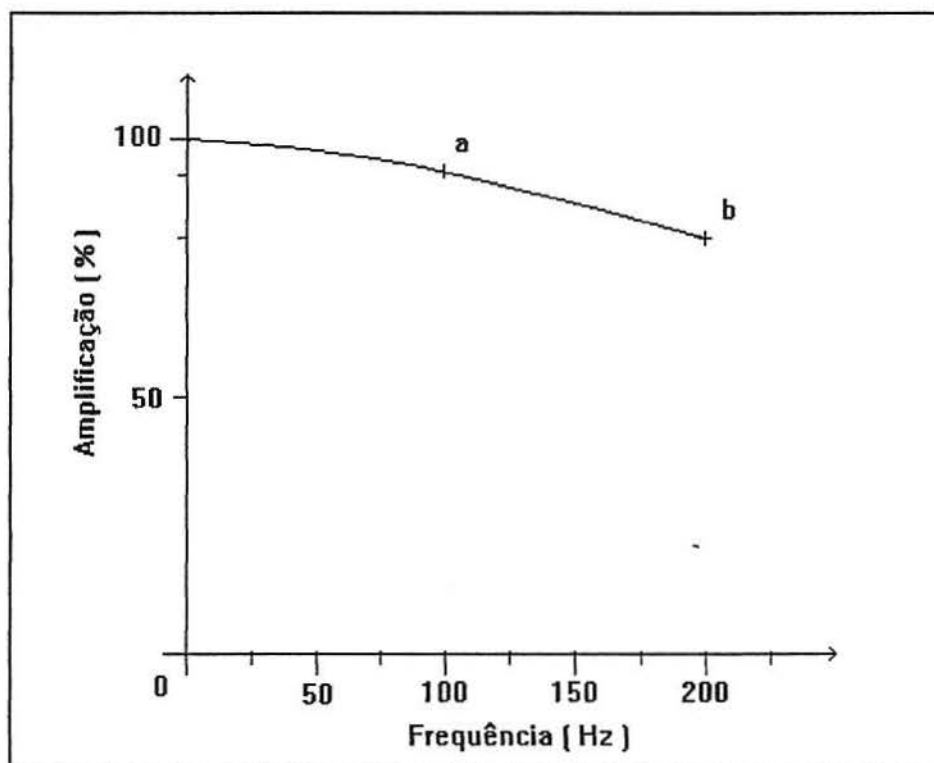


Figura 3.7 - Curva Padrão da Resposta em Frequência dos Condicionadores de Sinal

Tabela 3.2 - Fatores de Amplificação dos Condicionadores de Sinal

Condicionador	Amplificação (%)	
	100 Hz	200 Hz
1	94	83
2	96	82
3	96	85
4	96	83
5	96	83
6	94	81
7	95	84
8	95	85

Com a tabela 3.2 tem-se o comportamento dinâmico dos condicionadores de sinal, a diferença entre os valores de cada condicionador aparece devido a pequenas variações existentes nos componentes eletrônicos que compõem o circuito dos mesmos, visto que os componentes eletrônicos apresentam valores de tolerância, fornecidos pelos seus fabricantes.

3.3 Placa de Aquisição

A placa para aquisição dos dados utilizada foi a ECI - IEAR - Interface de Entradas Analógicas Rápida, comercialmente disponível, é uma placa conversora analógico/digital de 14 bits, 8 entradas, tempo de conversão 10 microsegundos; projetada para uso em computadores IBM PC compatíveis. [ECI, 1993]

As principais características mencionadas pelo fornecedor são: 8 entradas analógicas selecionáveis por programa; escalas de tensão de ± 5 V, ± 500 mV e ± 50 mV; conversor A/D de 14 bits, 10 microsegundos, conversão por aproximações sucessivas; precisão de 25 microvolts; placa de conexões externa; entrada digital de 3 bits; saída digital de 4 bits; dois temporizadores/contadores independentes de 16 bits. Esta placa foi colocada em um microcomputador 486 DLC - 40 MHz com 8 Mb de memória RAM e disco rígido de 197 Mb, utilizado para a gravação e processamento dos dados.

4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Neste capítulo é descrito o sistema de aquisição ATDP, que é um conjunto de programas computacionais que realizam as operações necessárias para o funcionamento da plataforma de força, apresentando-se também o seu modo de utilização.

4.1 O Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados da Plataforma (ATDP)

Para a aquisição e processamento dos dados da plataforma foi desenvolvido um sistema computacional chamado ATDP. Todos os cálculos de forças, momentos, ponto de aplicação, impulsos e coeficiente de atrito foram determinados com este sistema.

O programa de aquisição foi desenvolvido em linguagem C devido a maior rapidez em operação com a placa de aquisição disponível. Os valores adquiridos pelos oito canais da placa de aquisição são gravados no disco rígido todos juntos, isto é, em um mesmo arquivo, assim torna-se necessário processar a separação destes. Esta separação é feita com um programa escrito em FORTRAN, que permite a ocupação de toda memória disponível do microcomputador. Os demais programas desenvolvidos para o sistema são escritos em BASIC, devido à versatilidade desta linguagem.

O sistema ATDP é constituído dos seguintes programas principais:

1) ATDP.EXE (Basic): responsável pela tela padrão de entrada do sistema ATDP.

2) GERENP.EXE (Basic): é o gerenciador do sistema, gerando também um arquivo a ser lido pelo programa de aquisição, que contém as informações básicas da aquisição.

3) IEAR_RTC.EXE (C): realiza a aquisição dos dados, lê um arquivo com as informações básicas para aquisição, adquire os dados e grava-os no disco rígido no seguinte formato: número de pontos total, taxa total de aquisição e lista de valores ordenados por tempo de aquisição com todos os canais juntos. Este programa teve seu desenvolvimento no Laboratório de Medições Mecânicas (UFRGS).

4) CONVER.EXE (Fortran): faz a separação dos dados adquiridos em cada um dos oito canais, processando uma interpolação para unificar o tempo, e a seguir grava os arquivos de cada canal separadamente obedecendo o seguinte formato: número de pontos por canal, intervalo de tempo entre os dados e lista de valores lidos.

5) GRP.EXE (Basic): faz os gráficos dos arquivos adquiridos e processados.

6) ZECOP.EXE (Basic): realiza a operação de ajuste geral de zero entre dois conjuntos de arquivos, isto é, subtrai um conjunto de arquivos de outro para a correção da flutuação de zero dos condicionadores de sinal.

7) FORMOPP.EXE (Basic): sua tarefa é o cálculo das forças F_x , F_y e F_z ; dos momentos M_x , M_y e M_z ; do ponto de aplicação da carga (X , Y); dos impulsos I_x , I_y , I_z ; do ângulo entre a força horizontal e a força vertical μ ; da força total \bar{F} e do momento total \bar{M} dos arquivos adquiridos, obedecendo as equações apresentadas no item 3.1.

8) FILTRO3P.EXE (Basic): tem como função a filtragem digital de arquivos processados segundo a referência BENDAT, PIERSOL, 1971.

9) SECA3P.EXE (Basic): possibilita realizar operações matemáticas básicas entre arquivos.

10) POLIGONP.EXE (Basic): permite o ajuste de somente um arquivo.

Além destes programas principais, o sistema ATDP é constituído pelos seguintes programas utilitários do sistema operacional DOS:

- 1) GRAPHICS.COM
- 2) GRAPHICS.PRO
- 3) DOSXMSF.EXE
- 4) DOSXNT.EXE
- 5) DOSXNT.386

4.2 Guia de Utilização do Sistema ATDP

A inicialização do sistema de aquisição de dados é feita digitando-se ATDP; porém se houver a intenção de imprimir os resultados gráficos é necessário rodar o programa GRAPHICS com a identificação da impressora a ser utilizada. Na figura 4.1 observa-se o menu principal, onde tem-se as seguintes opções de operação:

< 1 > Adquirir;

< 2 > Graficar;

- < 3 > Filtro Passa-Baixa;
- < 4 > Combinação de Arquivos;
- < 5 > Ajuste Geral de Zero;
- < 6 > Ajuste Direcionado;
- < 7 > Esforços;
- < 8 > Sair.

UPRGS - GMap - Laboratório de Vibrações ATDP - Aquisição e Tratamento de Dados	
<p>MENU PRINCIPAL</p> <ul style="list-style-type: none"><1> Adquirir<2> Graficar<3> Filtro Passa-Baixa<4> Combinações de Arquivos<5> Ajuste Geral de Zero<6> Ajuste Direcionado<7> Esforços<8> Sair	<input type="text"/> <input type="text" value="PENSE!!!"/>

Figura 4.1 - Menu Principal do sistema ATDP

Na opção < 1 > realiza-se a aquisição de dados, devendo-se fornecer as seguintes informações:

- Número de pontos por canal (múltiplo de 2ⁿ);
- Taxa de aquisição por canal (máxima 512);
- Voltagem da placa de aquisição ($\pm 0,05$ V; $\pm 0,5$ V ou ± 5 V);
- Número de canais (8);
- Nome do arquivo de saída [. DAT] (até 4 caracteres).

A tela da opção < 1 > é mostrada na figura 4.2, onde tem-se um exemplo com as informações preenchidas.

UFRGS - GMAp - Laboratório de Vibrações ATDP - Aquisição e Tratamento de Dados	
<p>MENU PRINCIPAL</p> <p><1> Adquirir <2> Graficar <3> Filtro Passa-Baixa <4> Combinações de Arquivos <5> Ajuste Geral de Zero <6> Ajuste Direcionado <7> Esforços <8> Sair</p>	<p>Nro pontos/canal 1024 Taxa aquisição/canal 256 Voltagem placa (volt) 5 Nro canais 8 Nro pontos totais 8192 Taxa total aquisição 2048 Nome Arquivo(s/extensao) lb</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Placa : IEAR Rápida</p> <p style="border: 1px solid black; height: 20px; margin-top: 5px;"></p>

Figura 4.2 - Tela da opção < 1 > do sistema ATDP com exemplo de informações para aquisição de dados

A opção < 2 > permite graficar arquivos (.dat); deve-se fornecer o nome do arquivo a ser graficado via teclado ou selecionar na janela com as teclas de auxílio para seleção (< TAB > e ↓, ↑, ←, →), como aparece na figura 4.3.

Arquivo *.DAT	
C:\USER\LBB\ATDP	
dm31.dat	dm3ny.dat
dm32.dat	dm3mz.dat
dm33.dat	dm3iz.dat
dm34.dat	dm3iy.dat
dm35.dat	dm3ix.dat
dm36.dat	dm3mxf.dat
dm37.dat	dm3fzf.dat
dm38.dat	sat.dat
dm3x.dat	dm3fzz.dat
dm3y.dat	dm3ixz.dat
dm3f.dat	
dm3m.dat	
dm3u.dat	
dm3fz.dat	
dm3fx.dat	
dm3fy.dat	
dm3mx.dat	

Figura 4.3 - Janela para seleção do arquivo a ser graficado no sistema ATDP

Após a seleção do arquivo a ser graficado, apresenta-se na tela o menu gráfico, visualizado na figura 4.4. Tendo-se então as seguintes opções:

< 1 > Gráfico por pontos, desenha somente os pontos do arquivo;

< 2 > Gráfico traçado, desenha os pontos unindo-os por uma linha contínua;

< 3 > Ampliação do gráfico por pontos, aumenta a parte selecionada do gráfico desenhado por pontos;

< 4 > Ampliação do gráfico traçado, aumenta a seleção do gráfico desenhado pela opção < 2 >;

< 5 > Informações do arquivo, fornece os seguintes dados do arquivo: número de elementos, tempo total, intervalo de tempo, maior valor negativo, maior valor positivo;

< 6 > Outro arquivo; seleciona outro arquivo para visualização, permite até dois arquivos na memória;

< 7 > Troca arquivo de plotagem, muda o gráfico desenhado pelo outro que encontra-se presente na memória;

< 8 > Retorna ao Menu Principal.

UFRGS - GMap - Laboratório de Vibrações ATDP - Aquisição e Tratamento de Dados	
Opção : <1> Grafico por pontos <2> Grafico traçado <3> Ampliação - pontos <4> Ampliação - linha <5> Informações do arquivo <6> Outro arquivo <7> Troca arquivo plotagem <8> Menu principal	Menu Grafico : < A > :Ajuda dos itens 3) e 4) < T > :Sobrepor outro < C > :Cortar Arquivo Grafico < U > :Valores < SHIFT+PRTS CRN > : Imprimir < S > : Sair
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">ARQUIVO 1: dm31.dat</div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>

Figura 4.4 - Menu Gráfico do sistema ATDP

Com o gráfico na tela, tem-se ainda as seguintes opções:

< A > ajuda nos itens 3 e 4, tela de auxílio para a operação dos gráficos;

< F > fixação dos dois pontos para a janela do zoom (opção < 3 > e < 4 >);

< Z > visualiza o zoom, após a fixação dos pontos apresenta a amplificação selecionada;

< G > sai do zoom e volta ao gráfico normal;

< D > desmarca os pontos fixados pelo comando < F >;

< T > sobreposição de dois gráficos presentes na memória;

< V > valores dos pontos e coordenadas do gráfico apresentado na tela, para o movimento do cursor na tela tem-se como teclas de auxílio: ← , → , **PgUp**, **PgDn**, **Home**, **End**;

< L > desenha uma reta unindo os dois pontos selecionados previamente com o comando < F > ;

< ↓ > permite modificação da ordenada do ponto selecionado, deve-se digitar o novo valor;

< C > corta área selecionada do arquivo e cria novo arquivo [.DAT] , tendo-se como tecla de auxílio para fixação dos dois pontos de corte a opção < F > ;

< **SHIFT + PRTSRN** > impressão do gráfico;

< S > sai da tela gráfica.

Para visualizar as modificações realizadas no gráfico, deve-se sair < S > e retornar ao gráfico novamente. Para salvar como um novo arquivo utiliza-se a opção cortar < C > .

Com a opção < 3 > é possível processar a filtragem digital de um arquivo. O nome do arquivo para filtrar é selecionado via teclado ou na janela de seleção de arquivos com as teclas de auxílio para seleção (< **TAB** > e ↓ , ↑ , ← , →). Deve-se informar os seguintes dados: faixa de filtragem (número de pontos); frequência de corte da filtragem (Hz); quantidade de filtrações. O nome do arquivo de saída será o nome original acrescido da letra F . Na figura 4.5 tem-se uma tela com exemplos de informações para filtragem.

UFRGS - GMap - Laboratório de Vibrações ATDP - Aquisição e Tratamento de Dados											
Faixa de filtragem <ptos> 5 Frequencia de corte <Hz> 50 Numero de filtragens 3 FILTRANDO SINAIS <table> <tr> <td>N</td> <td>3</td> <td>F</td> <td>123.125200</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>64</td> <td>A</td> <td>123.232057</td> </tr> </table>	N	3	F	123.125200	I	64	A	123.232057	<table> <tr> <td>DM3MXF.DAT</td> </tr> <tr> <td>Filtrar outro arquivo [s/n]</td> </tr> </table>	DM3MXF.DAT	Filtrar outro arquivo [s/n]
N	3	F	123.125200								
I	64	A	123.232057								
DM3MXF.DAT											
Filtrar outro arquivo [s/n]											

Figura 4.5 - Tela demonstrativa da filtragem no sistema ATDP

Na opção < 4 > é possível processar operações entre arquivos. A operação a ser realizada é a seguinte:

$$AS() = A1() \cdot Fm_1 + A2() \cdot Fm_2 + Fs ; \quad (4.1)$$

onde AS() é o arquivo de saída, A1() é o primeiro arquivo a ser processado na operação, Fm₁ é um fator de multiplicação (número real) para o primeiro arquivo, A2() é o segundo arquivo a ser processado na operação, Fm₂ é o fator de multiplicação (número real) para o segundo arquivo e Fs é um fator constante (número real) a ser somado aos arquivos escolhidos para operação. Todos os nomes dos arquivos (AS, A1, A2) processados na equação 4.1 devem ser fornecidos pelo usuário, bem como os fatores Fm₁, Fm₂, Fs .

Com a figura 4.6 pode-se visualizar a janela de seleção para a opção < 4 >, assim como a equação 4.1. Na figura 4.7 tem-se a visualização da tela de saída da opção < 4 >.

COMBINAÇÃO DE ARQUIVOS		
DM31.DAT	DM32.DAT	DM33.DAT
DM35.DAT	DM36.DAT	DM37.DAT
DM3X.DAT	DM3Y.DAT	DM3F.DAT
DM3U.DAT	DM3FZ.DAT	DM3FX.DAT
DM3MX.DAT	DM3MY.DAT	DM3MZ.DAT
DM3IY.DAT	DM3IX.DAT	DM3MXF.DAT
SAT.DAT		
$AS\langle \rangle = A1\langle \rangle * Fm1 + A2\langle \rangle * Fm2 + Fs$ $A1\langle \rangle = DM31.DAT$		

Figura 4.6 - Janela de seleção dos arquivos a serem combinados no sistema ATDP

UFRGS - GMAp - Laboratório de Vibrações ATDP - Aquisição e Tratamento de Dados	
Arquivo 1: DM31.DAT Arquivo 2: DM35.DAT Arquivo de Saida: SAT.DAT	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Operar mais arquivos <S/N></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>

Figura 4.7 - Tela demonstrativa de saída da operação entre arquivos no sistema ATDP

Na opção < 5 > realiza-se a operação de ajuste geral de zero. Deve-se fornecer o nome de apenas um dos arquivos de cada conjunto a ser ajustado via teclado ou selecionar na janela de seleção (Figura 4.8) com as teclas de auxílio (< TAB > e ↓, ↑, ←, →). A operação a ser calculada obedece a seguinte equação:

$$AS() = A1() - A2(); \quad (4.2)$$

onde AS() são os arquivos de saída, que serão gravados com o mesmo nome do conjunto de arquivos A1(), que são os arquivos adquiridos com algum carregamento; A2() é o conjunto de arquivos adquiridos sem carga, ou seja o “zero” inicial do processamento.

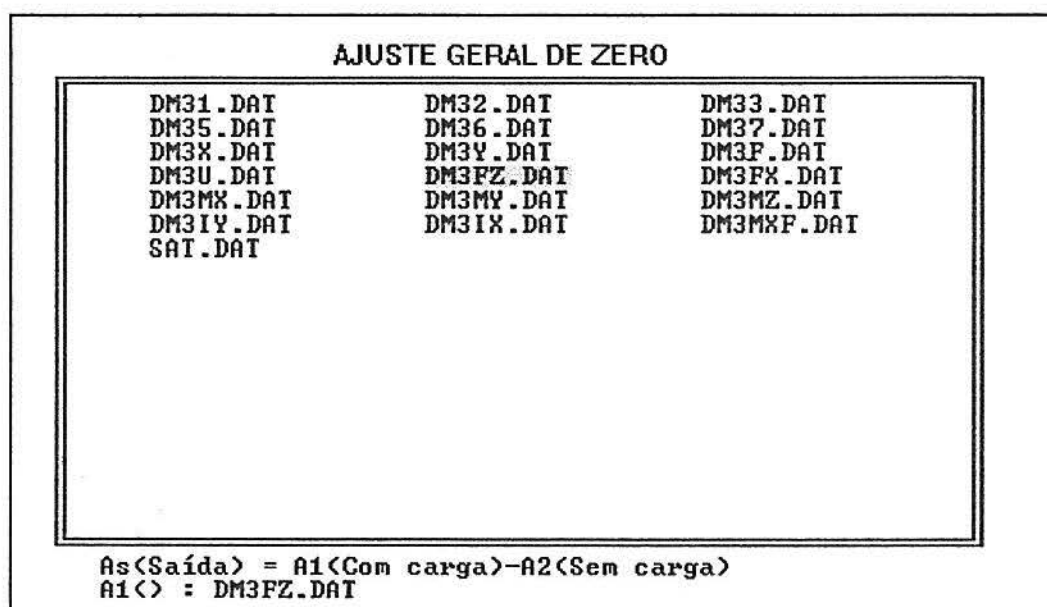


Figura 4.8 - Janela de seleção para operação de ajuste de zero no sistema ATDP

A opção < 6 > do sistema permite o ajuste direcionado de apenas um arquivo, ou seja gera uma poligonal com coordenadas definidas pelo usuário e processa a subtração das coordenadas originais com as coordenadas geradas pela poligonal, formando assim um novo arquivo. Na figura 4.9 tem-se uma tela de exemplo com as informações necessárias para o processamento, pontos da poligonal e coordenadas.

UFRGS - GMap - Laboratório de Vibrações ATDP - Aquisição e Tratamento de Dados	
Pontos do Arquivo: 64 Pontos da Poligonal:3 Ponto e Ordenada: 1,0 3,50 5,100	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">DM3IXZ.DAT</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Ajustar outro arquivo (s/n)</div>

Figura 4.9 - Tela demonstrativa do ajuste direcionado no sistema ATDP

Através da opção < 7 > o sistema realiza os cálculos para a obtenção de todas as variáveis: F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z , X , Y , I_x , I_y , I_z , μ , \bar{F} e \bar{M} ; com as equações apresentadas no item 3.1. Para tanto é necessário fornecer o nome de um dos oito arquivos do conjunto a ser processado, a seleção do arquivo é feita digitando o nome ou escolhendo na janela de seleção (Figura 4.10) com as teclas de auxílio (< TAB > e \downarrow , \uparrow , \leftarrow , \rightarrow). Após o processamento desta opção tem-se quatorze arquivos de saída com o nome original do conjunto de arquivos adicionados da extensão do respectivo esforço calculado. Uma tela demonstrativa da opção < 7 > é vista na figura 4.11, onde apresenta-se o nome do conjunto de arquivos processados.

FORÇAS E MOMENTOS		
DM31.DAT	DM32.DAT	DM33.DAT
DM35.DAT	DM36.DAT	DM37.DAT
DM3X.DAT	DM3Y.DAT	DM3F.DAT
DM3U.DAT	DM3FZ.DAT	DM3FX.DAT
DM3MX.DAT	DM3MY.DAT	DM3MZ.DAT
DM3IY.DAT	DM3IX.DAT	DM3MXF.DAT
SAT.DAT	DM3FZZ.DAT	DM3IXZ.DAT

Arquivo a ser recuperado (.Dat):

Figura 4.10 - Janela de seleção de arquivo para cálculos no sistema ATDP

UFRGS - GMap - Laboratório de Vibrações ATDP - Aquisição e Tratamento de Dados	
ESFORÇOS Arquivos: DM3 _	<input type="text"/> <input type="text"/>
	Outros arquivos (s/n)

Figura 4.11 - Tela demonstrativa de saída do cálculo de esforços no sistema ATDP

Para operação do sistema ATDP tem-se como fluxograma básico a figura 4.12.

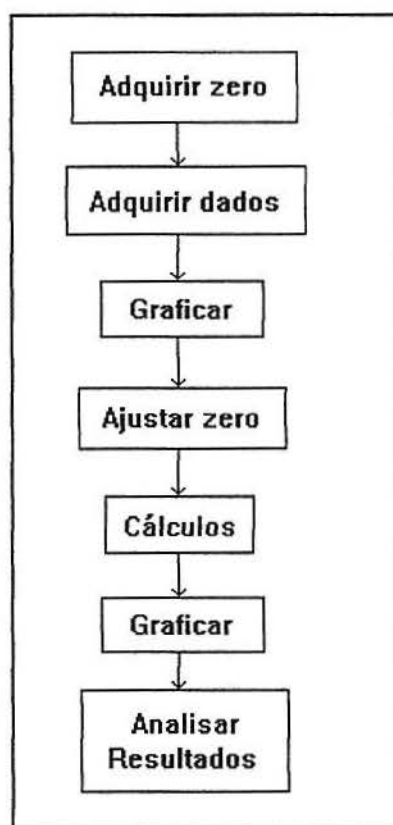


Figura 4.12 - Fluxograma para Operação do Sistema ATDP

Basicamente a operação do sistema deve ser realizada com os seguintes passos:

- a) aquisição do zero dos condicionadores de sinal, sem nenhum carregamento na plataforma, para correção posterior dos arquivos;
- b) aquisição dos dados com carregamento;
- c) graficar um arquivo adquirido, para verificar a existência de algum problema no sistema durante a aquisição dos dados, evitando perda de tempo em processamento;

d) realização da operação de ajuste geral de zero entre os arquivos com carregamento e os adquiridos sem carga;

e) operação dos cálculos de esforços disponíveis da plataforma;

f) análise dos resultados obtidos através dos gráficos e informações de arquivos.

5 CALIBRAÇÃO

A fim de determinar as relações entre milivolts e Newtons do equipamento construído procedeu-se a calibração deste, isto é, aplicação de cargas conhecidas para a determinação da saída correspondente; os esquemas de calibração usados para as duas direções horizontais (x e y) e para a direção vertical (z), podem ser visualizados nas figura 5.1 e 5.2, respectivamente; e os equipamentos utilizados nesta calibração foram:

- anel dinamométrico de 5884 N (600 kgf);
- esticador metálico modificado para aplicação de cargas;
- dispositivo de calibração (ver item 5.1).

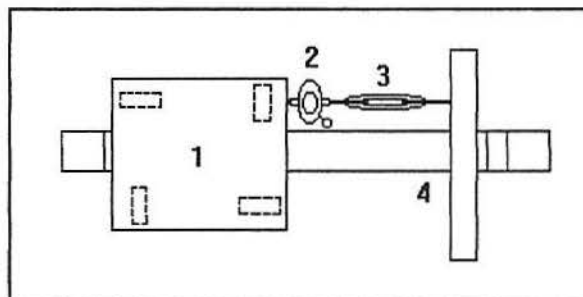


Figura 5.1 - Esquema de calibração da plataforma nas direções horizontais

1) Plataforma; 2) Anel Dinamométrico; 3) Esticador; 4) Dispositivo de Calibração

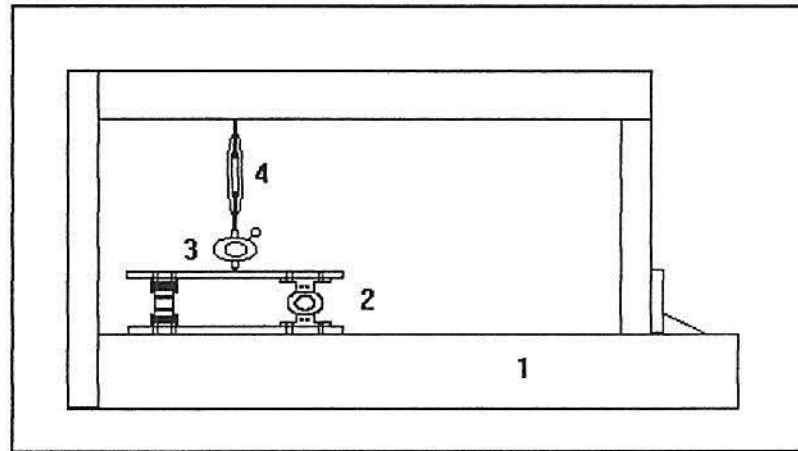


Figura 5.2 - Esquema de calibração da plataforma na direção vertical

1) Dispositivo de calibração; 2) Plataforma; 3) Anel Dinamométrico; 4) Esticador

A calibração do conjunto completo torna-se necessária para a verificação do comportamento do sistema inteiro, isto é, plataforma, condicionadores de sinal, placa de aquisição e microcomputador. Após a união de todo sistema ocorrem modificações na atuação, como por exemplo, das células de carga. Isto acontece devido a fixação das mesmas junto às placas de alumínio e à sua atividade conjunta, uma vez que para cada direção horizontal existem duas células contribuindo para o esforço na determinada direção, influenciando na rigidez da direção transversa.

5.1 Descrição do Dispositivo de Calibração

Para a calibração da plataforma foi desenvolvido um dispositivo que permitiu realizar a mesma nas três direções desejadas, segundo os eixos x , y e z . O mesmo foi construído em aço, e está basicamente formado de três peças, uma fixa e duas móveis, que permitem aplicar os carregamentos horizontais e vertical, de forma independente.

A montagem do dispositivo para a aplicação de cargas horizontais nas direções x e y, é apresentado esquematicamente na figura 5.3, onde pode-se observar a peça fixa com os pontos de fixação da plataforma e a peça móvel que permite a mudança do ponto de aplicação da carga com o esticador metálico.

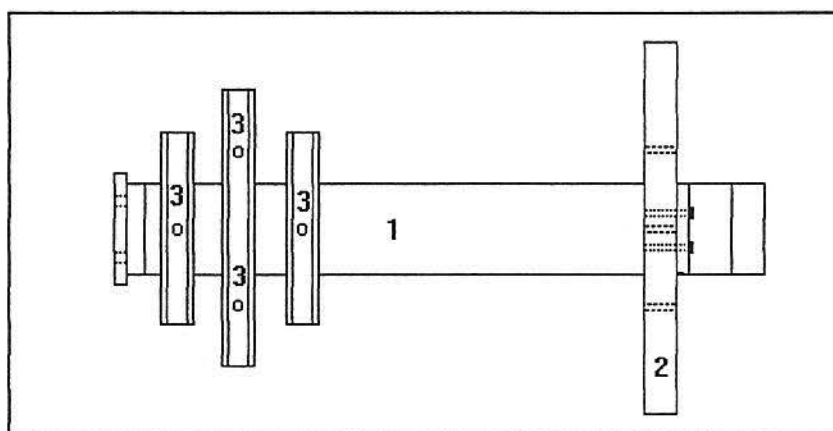


Figura 5.3 - Vista Superior do Dispositivo para Calibração da plataforma nas direções Horizontais

1) Parte fixa; 2) Parte móvel para calibração horizontal; 3) Pontos de fixação da plataforma

O dispositivo de calibração montado para aplicação das cargas verticais é visto na figura 5.4, que apresenta a peça móvel capaz de fixar o esticador metálico nos locais desejados para o processamento da carga.

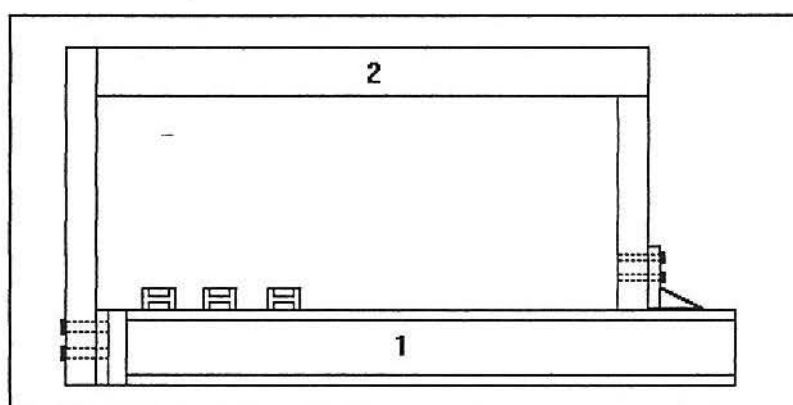


Figura 5.4 - Vista Frontal do Dispositivo para Calibração da plataforma na direção Vertical

1) Parte fixa; 2) Parte móvel para calibração vertical

Com o dispositivo de calibração concluído, foi possível desenvolver o processo de calibração, que será explicado no próximo item.

5.2 Descrição do Procedimento de Calibração

Para avaliar o comportamento global da plataforma frente ao carregamento foram selecionados vinte e um pontos para aplicação de carga ao longo da plataforma, doze horizontais e nove verticais, que podem ser identificados na figura 5.5, com suas respectivas direções. Os pontos de aplicação de carga foram escolhidos de modo que toda a superfície da plataforma fosse analisada frente à distribuição de cargas variadas, cobrindo todas as direções de carregamento.

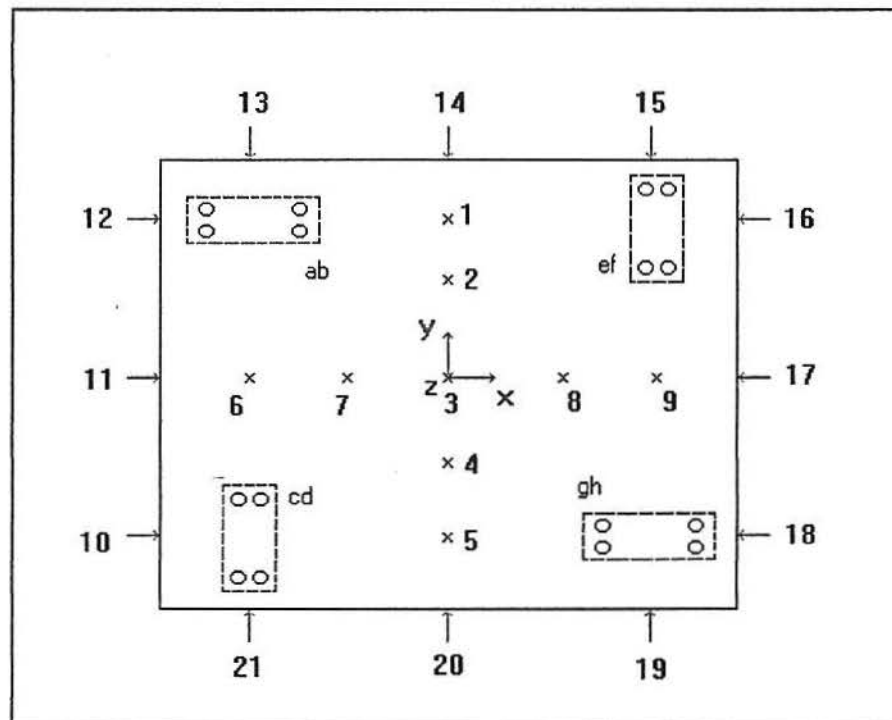


Figura 5.5 - Pontos de Aplicação de Carga para Calibração

O processo de calibração para cada um dos pontos de aplicação de carga, horizontal e vertical, é constituído das seguintes etapas:

a) aquecimento dos condicionadores de sinal;

b) ajuste manual de zero dos condicionadores de sinal;

c) aquisição do “zero” inicial dos condicionadores de sinal através da opção < 1 > do sistema ATDP (geração de oito arquivos denominados “sem carga”), para correção de alguma eventual flutuação do zero dos condicionadores;

d) aplicação de estágios de carga de 600 N, três estágios para cargas horizontais e quatro para as verticais, com aquisição de dados simultânea em todos os oito canais da placa de aquisição com a produção de oito arquivos de saída, chamados “com carga”;

e) descarregamento do sistema de aplicação de carga;

f) processamento dos arquivos “com carga” e “sem carga” para ajuste do zero através da opção < 5 > do sistema ATDP, isto é, a subtração dos arquivos com carregamento (“com carga”) dos adquiridos no início do processo (“sem carga”);

g) obtenção das cargas aplicadas para cada estágio, utilizando somente as matrizes de calibração individuais de cada célula de carga, com uma versão inicial da opção < 7 > do sistema ATDP, que realiza o cálculo dos esforços, para através dos valores encontrados realizar a correção posterior com os coeficientes de ajuste.

Para a obtenção dos esforços de momento realizou-se a combinação entre vários estados de carga, devido às dificuldades construtivas para aplicação de um momento único segundo cada eixo coordenado. Assim, por exemplo, para simular a existência de um momento no eixo y , utilizaram-se dois estados de carga na direção z , representados na figura 5.6; e com o auxílio da opção < 4 > do sistema ATDP (combinação de arquivos) foi possível combinar devidamente os conjuntos de arquivos. O mesmo procedimento foi empregado para a simulação de um momento único na direção x ; e para a direção z combinou-se estados de carga da direção x e/ou y , como mostra a figura 5.7.

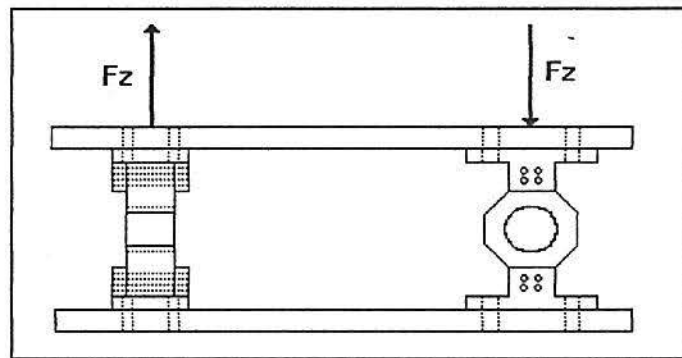


Figura 5.6 - Esquema para aplicação da componente do momento M_y

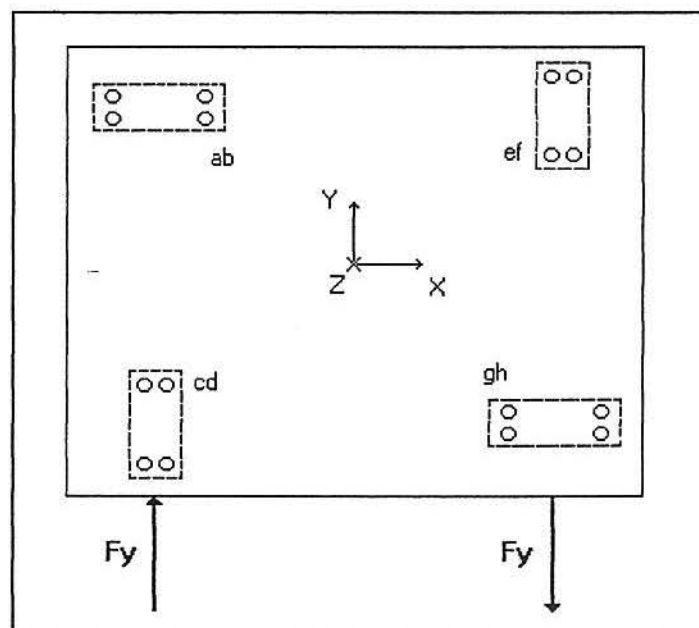


Figura 5.7 - Esquema para aplicação da componente do momento M_z

Em cada um dos doze pontos de aplicação de carga horizontais foram realizados três estágios de carga, atingindo o valor máximo de 1800 N; e para os nove pontos da direção vertical, quatro estágios, chegando a 2400 N. Após o processamento de todos os pontos de aplicação de carga em todos os estágios de carregamento o procedimento chega ao final com um total de 597 arquivos de saída.

O processo de calibração foi repetido três vezes para cada um dos pontos de aplicação de carga, totalizando então 1791 arquivos de saída após a realização das três repetições do ensaio. De posse destes arquivos foi calculada a média entre os valores obtidos para cada uma das repetições, considerando-se um estágio de carga padrão de 600 N, por exemplo, para um ponto na direção vertical, realiza-se a soma dos arquivos de cada estágio, ou seja, arquivo com carga de 600 N, 1200 N, 1800 N e 2400 N, e depois divide-se o resultado por dez (número de estágios de 600 N somados), obtendo-se o valor para o estágio padrão de 600 N para cada uma das repetições separadamente.

Através do processo de calibração da plataforma foi possível determinar o efeito causado pela montagem do conjunto completo, que evidentemente altera as constantes de calibração da plataforma; pois com a fixação das quatro células de carga nas placas não pode-se simplesmente somar a contribuição de cada célula. Sendo assim, introduziu-se um coeficiente de ajuste para cada direção ca_x , ca_y e ca_z .

A determinação destes coeficientes de ajuste é realizada partindo-se da seguinte expressão:

$$F_a = ca \cdot F_o \quad (5.1)$$

onde F_a é a força aplicada, ca é o coeficiente de ajuste e F_o é a força calculada com a matriz original da célula de carga. E isolando-se ca na equação 5.1 é possível determinar os coeficientes de ajuste para cada direção:

$$ca_i = \frac{F_{ai}}{F_{oi}}, \quad i = x, y, z \quad (5.2)$$

Encontram-se então os coeficientes de ajuste para cada uma das direções, como mostra a tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Coeficientes de Ajuste para as direções x, y e z

Direções	Coeficientes
ca_x	460,2
ca_y	750,8
ca_z	245,3

Com a correção das forças aplicadas e de acordo com as equações apresentadas no item 3.1, os momentos ficam também automaticamente corrigidos.

A montagem da linha experimental do sistema de calibração está ilustrada nas figuras 5.8 e 5.9, nota-se o emprego de alguns equipamentos alternativos (macaco tipo sanfona, barra de madeira) apenas para verificação do procedimento de calibração a ser utilizado, que posteriormente foi modificado, como já descrito no início deste capítulo.

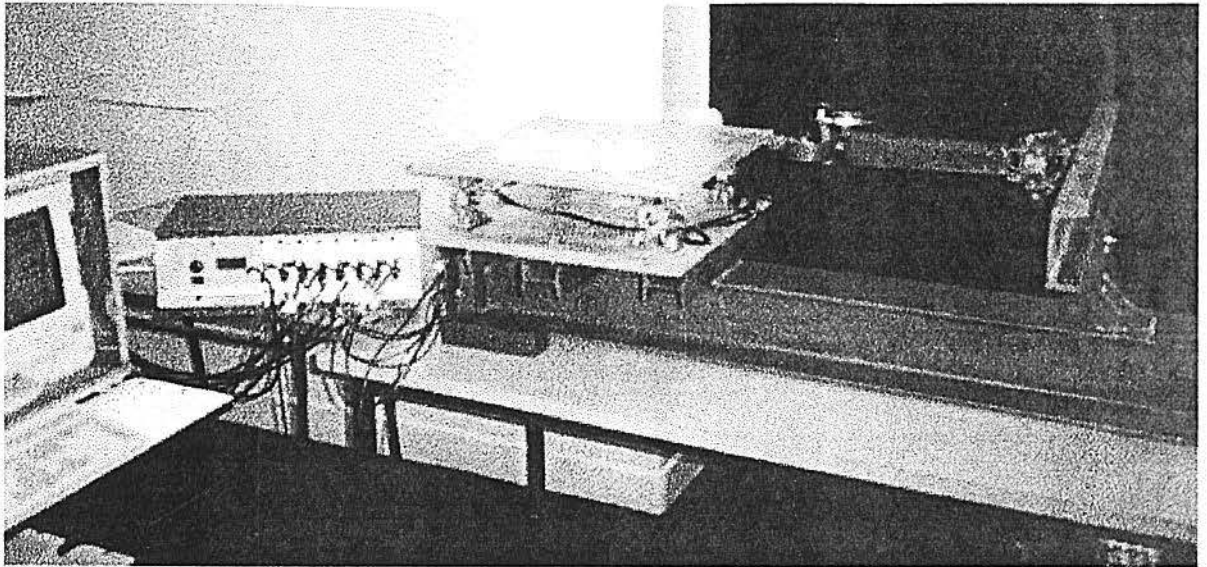


Figura 5.8 - Sistema completo da plataforma com equipamentos de calibração horizontal

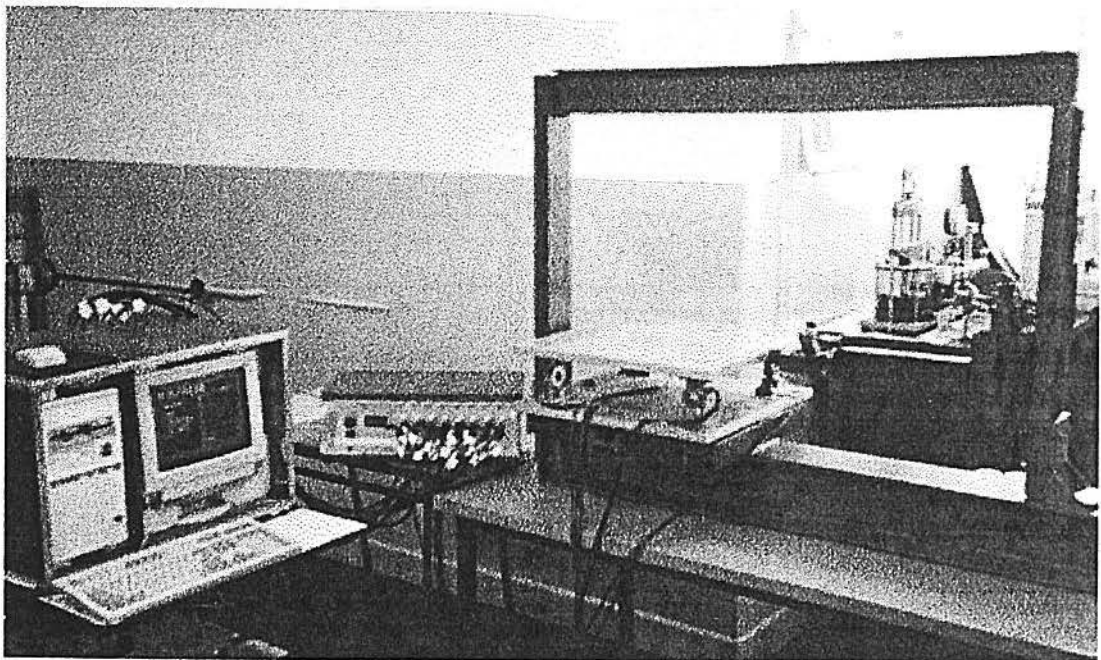


Figura 5.9 - Sistema completo da plataforma com equipamentos de calibração vertical

Com os dados obtidos nos ensaios de calibração e após seu processamento foi possível fazer a análise do erro e interferência relativos ao sistema completo, que serão apresentados no próximo item.

5.3 Determinação do Erro e Interferência

Após a obtenção dos coeficientes de ajuste, estes foram implementados no programa de cálculo dos esforços (opção < 7 > do sistema ATDP) e então todos os arquivos foram processados novamente para a determinação dos novos valores de forças e momentos. De cada calibração foi realizada a soma dos estágios para cada ponto de aplicação, e após dividiu-se pelo número de estágios referente a cada ponto de aplicação de carga, ou seja, três para horizontais e quatro para verticais, obtendo-se assim os conjuntos de valores para o estágio de carga padrão de 600 N para cada repetição. De posse dos três conjuntos de arquivos obtidos das operações anteriores para cada um dos ensaios de calibração foi calculada a média aritmética, culminando com o conjunto de valores médios para o estágio padrão, e o referente momento padrão de 216 Nm, obtido do produto da carga padrão de 600 N pelo braço de alavanca de 0,36m; valores estes que serão empregados para determinar o erro e a interferência da plataforma.

O erro do sistema completo foi determinado através da razão entre o valor de um estágio de carga real de 600 N aplicada e o valor médio encontrado para o estágio padrão de 600 N da carga obtida pelo sistema.

Durante o processo de calibração aplicou-se cada esforço separadamente, por exemplo, quando tinha-se uma força aplicada na direção z (F_z), os demais esforços deveriam

permanecer nulos. Porém, esta condição não ocorre, surgindo então valores residuais nos outros esforços; estes foram chamados de interferência, isto é, interferência é um sinal de saída do sistema causado por uma variável não alocada nesta saída em particular.

Os valores de interferência representam os valores máximos dos esforços secundários quando tem-se um esforço principal atuando, ou seja, os valores aparentes nos outros esforços quando existe a aplicação de um esforço único principal. Estes valores foram calculados para os estágios de carga desenvolvidos nesta calibração.

Os valores de erros percentuais e interferências encontrados para o sistema completo são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores de erro percentual e interferência para cada esforço

Esforço	Erro (%)	Interferência
F_x	8,9	34 N
F_y	8,6	40 N
F_z	4,5	17 N
M_x	8,7	15 Nm
M_y	5,0	14 Nm
M_z	7,5	17 Nm

Os valores de erro e interferência apresentados cumprem perfeitamente com os objetivos propostos neste trabalho, e em comparação com sistemas piezoelétricos, disponíveis apenas no mercado exterior, mostram-se na mesma ordem e com a vantagem de apresentar uma relação de custos bem menor.

6 APLICAÇÃO

Na natação competitiva, a diferença entre o vencedor e os outros competidores é muitas vezes inferior a 0,01s. Deste modo, apesar do tempo gasto pelo nadador na largada ser invariavelmente menor do que aquele que ele consome em movimento (nadando) ou na virada, uma largada eficiente não é menos importante para o sucesso no esporte, especialmente em provas curtas. [MILLER, HAY, WILSON, 1984]

O estudo das técnicas de saída usadas em competição tem recebido algum tratamento por parte dos pesquisadores, mas ainda existe muito o que analisar neste tipo de movimento. Existem discussões a respeito das diferentes técnicas de largada, qual seria a que desenvolve a melhor performance, quais os fatores limitantes para a escolha de uma delas.

Certamente se fosse apresentado aos nadadores estudos a respeito do tempo despendido para a realização da saída e das viradas, estes se conscientizariam da importância destes fundamentos no decorrer da prova, incentivando-os a desenvolver melhor suas técnicas objetivando o treinamento específico e consciente para estes movimentos. [THAYER, HAY, 1984]

O método para melhorar a saída do nadador deve partir da análise mecânica deste movimento, possibilitando direcionar o treinamento para um aproveitamento maior na realização deste movimento. Sendo necessário avaliar os fatores relevantes para atingir o resultado desejado, como: características físicas do nadador, técnica empregada, treinamento apropriado, tipo de ação de cada segmento do corpo, mecânica do movimento.

Neste trabalho iniciou-se o estudo dos esforços relativos a este movimento, utilizando para tanto a plataforma desenvolvida, com o objetivo de comprovar a utilidade da mesma para este fim. O estudo baseou-se na medição das componentes da força e no cálculo dos impulsos referentes a estas, nos fatores de amplificação, nas velocidades e ângulo de saída; úteis para a análise do movimento de saída do nadador enquanto em contato com o bloco de partida.

6.1 O movimento de saída na natação

A saída é o gesto pelo qual o nadador parte do bloco de saída e chega à água, sendo composta de um conjunto de elementos significativos: chegar o mais longe possível, com a maior velocidade, no tempo mais reduzido e numa orientação favorável à retomada do nado. Estes diferentes elementos não devem ser nunca considerados isoladamente, mas sempre na sua totalidade e na sua interação. [CATTEAU, GAROFF, 1990]

Uma boa saída garante ao nadador uma vantagem cronométrica inegável. A importância de uma boa técnica de saída varia em razão inversa das distâncias a serem percorridas; para um nadador de velocidade, a saída é fundamental.

Embora na sua estrutura, a saída associe basicamente um desequilíbrio a um impulso, a descrição do movimento nos leva à observação de um certo número de fases: preparação, sinal, desequilíbrio, impulsão, trajetória, penetração na água, deslizamento profundo e início do nado. [MAGLISCHO, 1990]

Em uma descrição simplificada do movimento de saída tem-se os pés normalmente separados, apoiados na borda da parte inclinada do bloco de partida (Figura 6.1A). Em seguida, flexiona todos os segmentos, uns sobre os outros, as pernas sobre os pés, as coxas sobre as pernas, o tronco sobre as coxas, enquanto os braços serão levados para frente ou para trás, em função do tipo de desequilíbrio habitual de cada nadador (Figura 6.1B). O peso do corpo é então levado para frente, no limite de sustentação, conservando uma margem de segurança adequada, para reagir instantaneamente ao sinal.

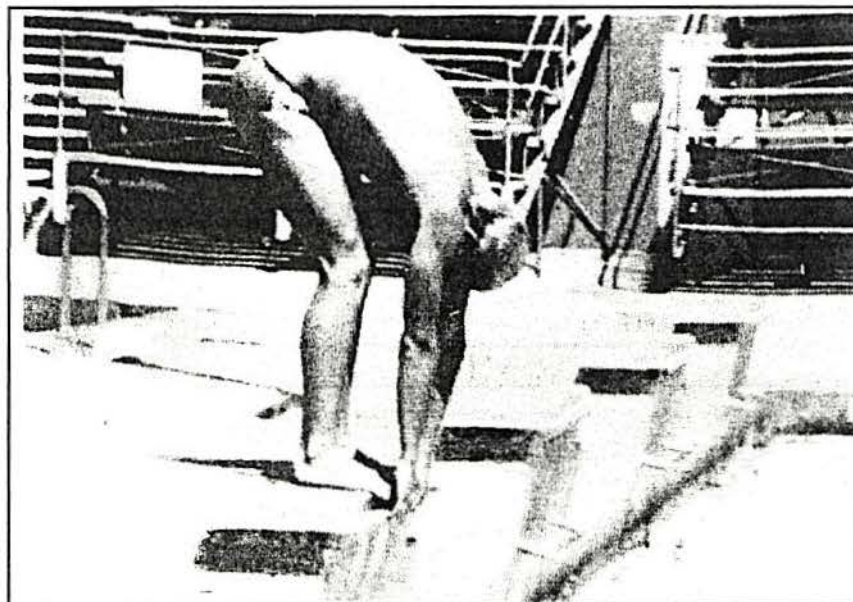


Figura 6.1 (A) Movimento de saída na natação

Fonte: MAGLISCHO, 1990

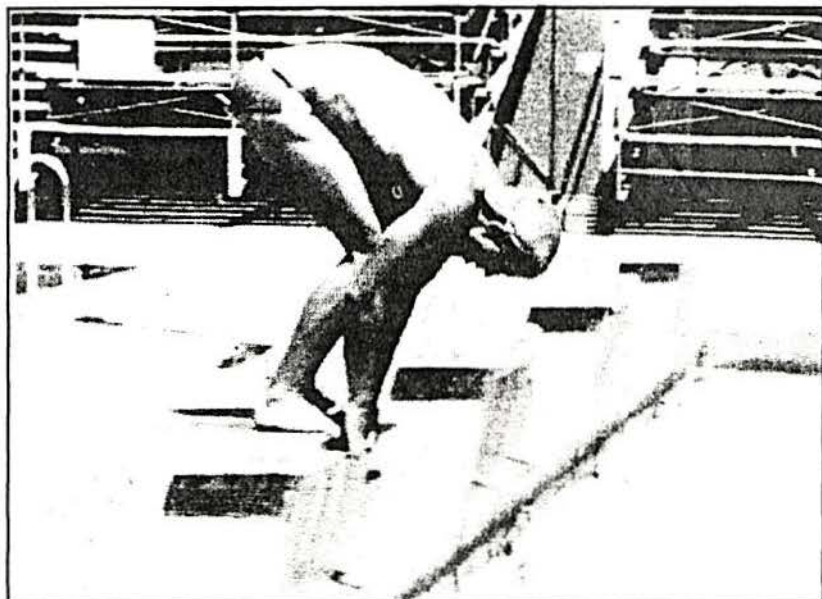


Figura 6.1 (B) Movimento de saída na natação

Fonte: MAGLISCHO, 1990

Dado o sinal efetivo, passa um certo tempo para percepção deste e o início das ordens motoras; então o nadador permite levar o centro de gravidade para a frente dos pontos de apoio e, assim, tirar melhor proveito do impulso (Figura 6.1C). Durante o desequilíbrio, o corpo vai girar em torno de um ponto fixo ideal, representado pela aresta do bloco de saída. O desequilíbrio é uma queda controlada, e este será tanto mais rápido quanto mais o nadador estiver flexionado sobre si mesmo; a flexão dos segmentos uns sobre os outros favorece portanto a velocidade do desequilíbrio.

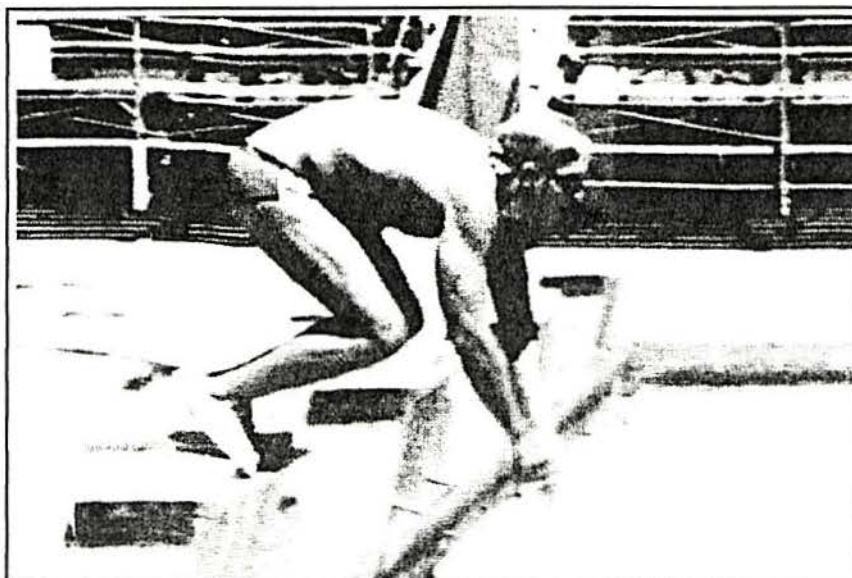


Figura 6.1 (C) Movimento de saída na natação

Fonte: MAGLISCHO, 1990

A intensificação da flexão dos segmentos constitui uma colocação sob tensão dos músculos extensores, que terá como efeito um aumento considerável na força (Figura 6.1D). A impulsão do mergulho de saída é caracterizada pelo seu aspecto explosivo, ocorrendo ainda a extensão de todos os segmentos anteriormente flexionados simultaneamente.

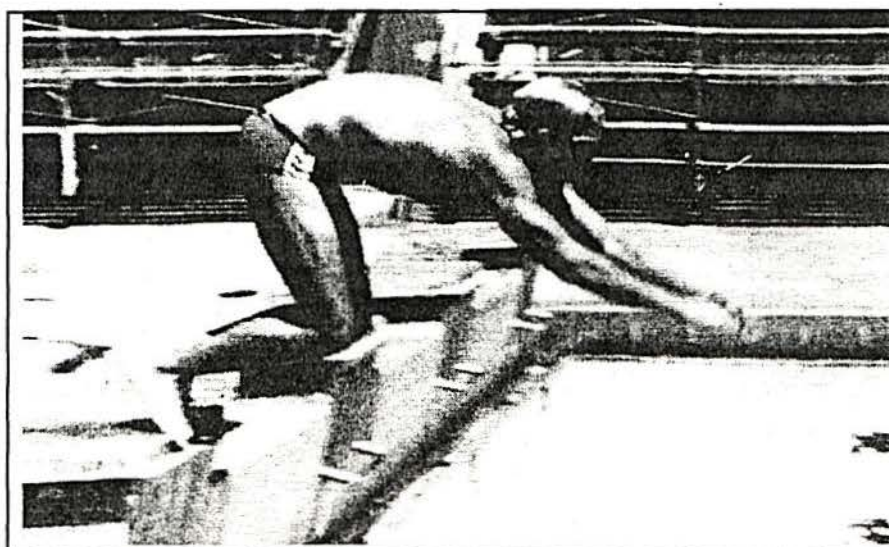


Figura 6.1(D) Movimento de saída na natação

Fonte: MAGLISCHO, 1990

A impulsão é eficaz na medida que as forças são integralmente transmitidas ao tronco, supondo um alinhamento tronco-quadril-tornozelos durante toda a duração da extensão das pernas, sendo necessário que o tronco permaneça firme durante a impulsão (Figura 6.1E). A extensão das costas e flexão da cabeça contribuem para o alinhamento vertebral (Figura 6.1F). A elevação dos braços atua de maneira importante, aumentando a pressão do corpo sobre o plano, que coordenada com a extensão geral do corpo manifesta um aumento da impulsão das pernas.

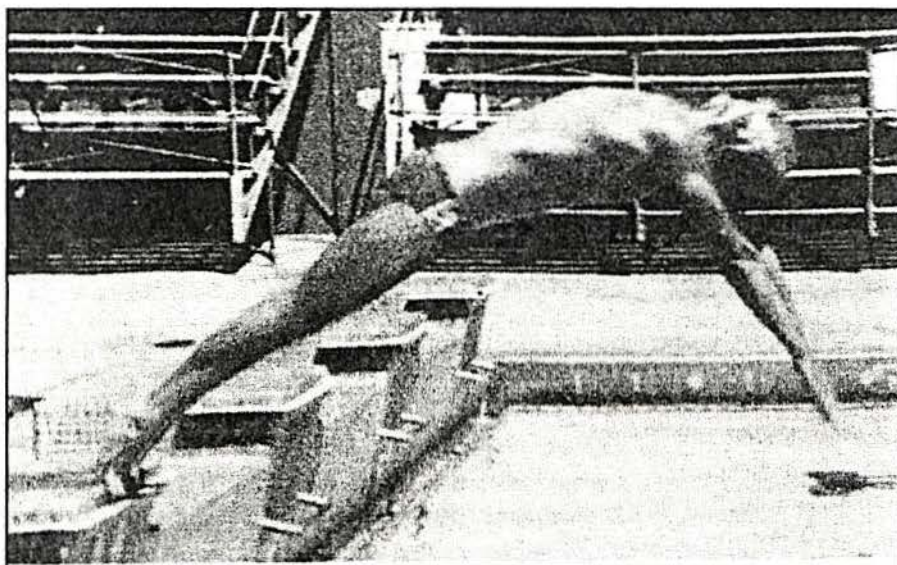


Figura 6.1 (E) Movimento de saída na natação

Fonte: MAGLISCHO, 1990

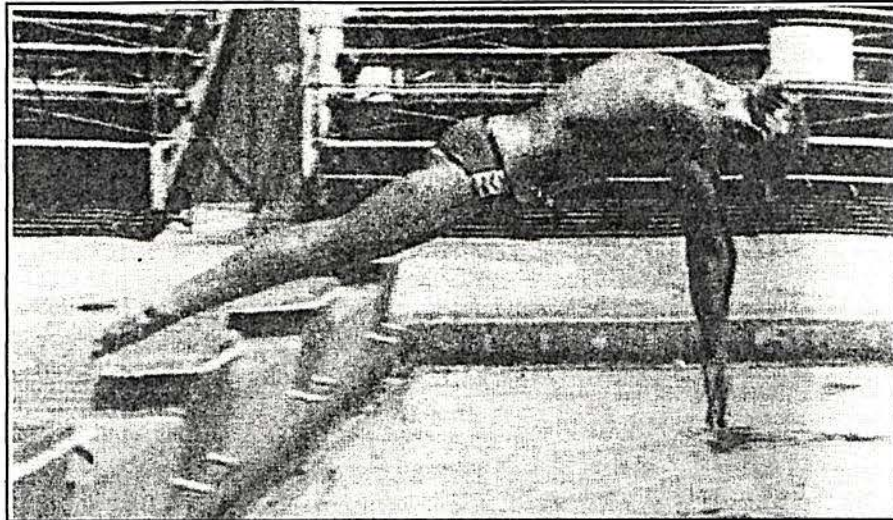


Figura 6.1 (F) Movimento de saída na natação

Fonte: MAGLISCHO, 1990

No momento em que os pés vão deixar o bloco, todos os segmentos estão em extensão completa, formando uma leve concavidade ventral (Figura 6.1E); e quando os pés deixam o apoio, a trajetória do centro de gravidade está determinada (Figura 6.1F). As diferentes partes do corpo podem modificar as orientações relativas nessa trajetória, o corpo pode flexionar-se, procurando a melhor maneira de transformar parcialmente a energia de queda em energia de deslocamento.

O nadador pode mudar seu ângulo de penetração na água, de acordo com a modalidade do nado. A orientação adotada durante a trajetória permite que o nadador procure o melhor ângulo de incidência, sendo a entrada na água feita pelas mãos (Figura 6.1G). Os braços por sua orientação e superfície de apoio, tem uma função de leme de profundidade, e com efeito, devido à passagem da leve concavidade ventral para uma leve concavidade dorsal, é que a energia de queda pode ser utilizada em benefício da velocidade horizontal a partir da entrada na água. (Figura 6.1H)

6.2 Descrição da medição

A medição dos esforços do movimento de saída na natação foi realizada na piscina semi-olímpica (25 metros) da Escola Superior de Educação Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ESEF - UFRGS).

Para realizar a medição dos esforços no movimento de saída de um nadador, confeccionou-se uma estrutura em aço para suportar a plataforma de força na borda da piscina, e também posicioná-la em ângulo e altura corretos, de acordo com um bloco de partida convencional. A estrutura de fixação juntamente com a plataforma, já fixados na borda da piscina, são vistos nas figuras 6.2 e 6.3.

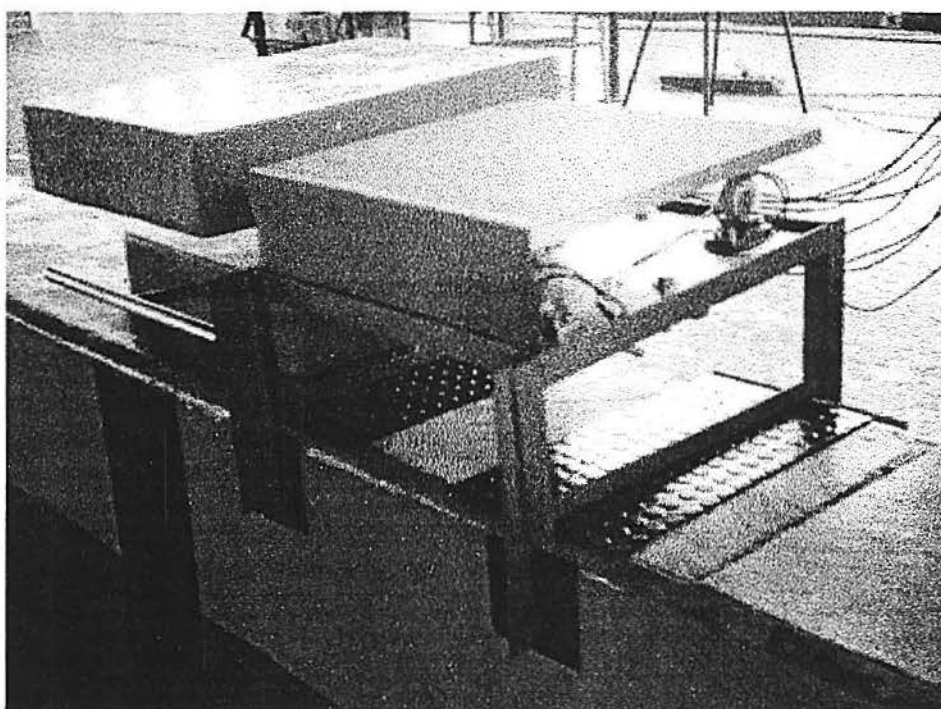


Figura 6.2 - Estrutura de fixação e plataforma de força junto a borda da piscina

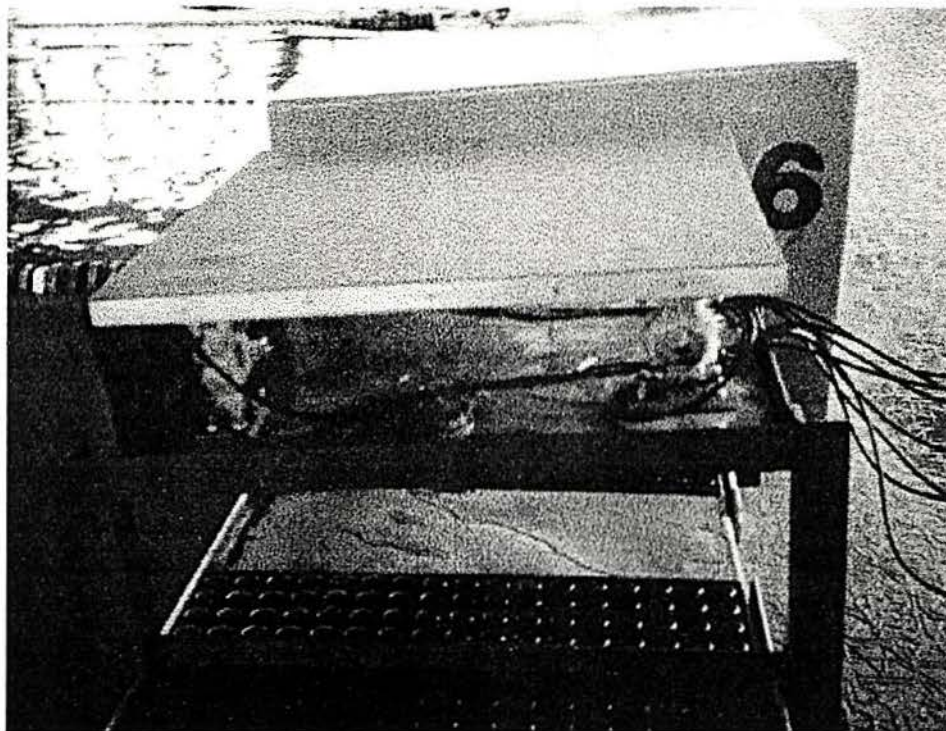


Figura 6.3 - Vista lateral da plataforma de força e estrutura de fixação junto a borda da piscina

A instrumentação completa do ensaio contou com a plataforma de força, os condicionadores de sinal e o equipamento de aquisição, isto é, placa de aquisição de dados e microcomputador; todos equipamentos já descritos neste trabalho. A figura 6.4 mostra esta instrumentação no local de realização dos ensaios.

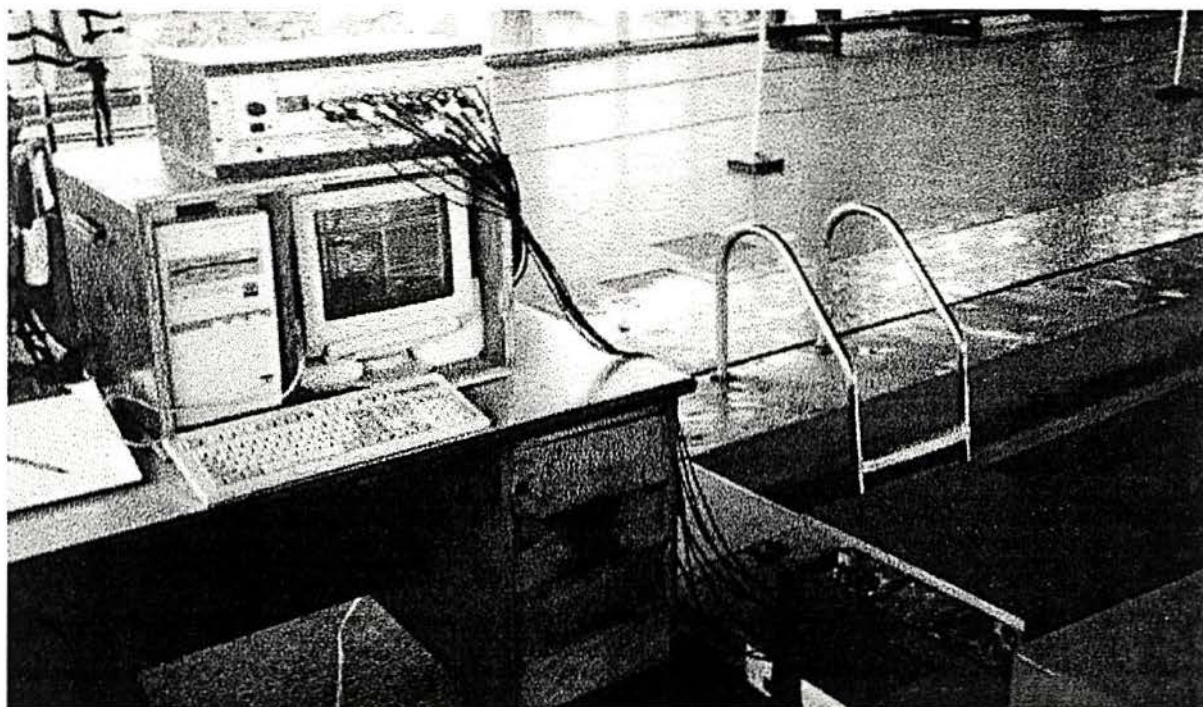


Figura 6.4 - Instrumentação completa no local de ensaios

O grupo de indivíduos utilizado para a realização deste estudo foi constituído de quatorze nadadores voluntários, dez homens e quatro mulheres, participantes da equipe de natação da ESEF - UFRGS, com idade média de 24 anos. Deste grupo de estudo cada indivíduo realizou em média três saídas do bloco, totalizando 42 ensaios.

As características de massa, altura e tempo para percorrer os 25 metros da piscina dos indivíduos ensaiados são apresentadas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Características principais dos indivíduos ensaiados

Indivíduo	Massa (kg)	Altura (m)	Tempo para 25 m
1	68	1,75	15''06
2	61	1,65	13''93
3	69	1,74	12''86
4	81	1,83	11''92

5	83	1,85	12''75
6	80	1,84	12''97
7	49	1,58	16''12
8	71	1,87	13''13
9	78	1,82	11''96
10	71	1,85	13''78
11	69	1,73	13''54
12	48	1,60	16''91
13	78	1,73	17''45
14	65	1,60	21''83

Com os indivíduos devidamente identificados por suas características principais, e depois de um aquecimento livre de 500 metros, cada indivíduo saiu alternadamente da piscina e posicionou-se no bloco de saída localizado ao lado da plataforma, após o sinal este deslocava-se para cima da plataforma e procedia a largada.

O procedimento de medição consistiu de um tempo de aquisição de quatro segundos, dentro do qual o indivíduo subia na plataforma, posicionava-se devidamente para a largada e partia em direção à água, percorrendo uma distância de 25 metros com uma intensidade de percurso bem próxima da desenvolvida em competição. O tempo decorrido desde a saída do bloco até atingir o final da piscina foi registrado por cronômetro digital, resultando num tempo médio de 14''70 para os 25 metros.

Depois de cada largada efetuada, o nadador voltava a nadar 250 metros, em seguida retornava ao bloco de saída para nova medição. Este circuito foi repetido, em média, três vezes por cada atleta.

6.3 Resultados

Do conjunto de ensaios realizados foram selecionados os que apresentaram boas condições para análise, totalizando trinta e sete conjuntos de arquivos de aquisição a serem processados.

Após o processamento dos conjuntos de arquivos com o sistema ATDP, como explicado anteriormente no capítulo 4, relacionou-se no anexo B, os valores máximos das forças e seus respectivos fatores de amplificação, ou seja, a razão entre a força e o peso corporal do indivíduo. A tabela 6.2 mostra os fatores de amplificação médio, máximo, mínimo e desvio padrão para cada uma das direções.

Tabela 6.2 - Fatores de amplificação e desvio padrão para o movimento de saída dos nadadores

Direção	Fator de Amplificação			Desvio padrão
	médio	máximo	mínimo	
x	0,22	0,47	0,10	0,07
y	1,03	1,39	0,38	0,17
z	1,29	1,93	1,02	0,20

Com os dados do anexo B montou-se a tabela 6.3 que apresenta a média dos valores máximos das forças para cada direção e seus respectivos desvios padrões para a realização do movimento de saída os nadadores ensaiados, bem como os valores máximos e mínimos dos picos das forças.

Tabela 6.3 - Valores médios dos picos das forças, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos picos das forças para o movimento de saída dos nadadores

Direção	média (N)	desvio padrão	máximo (N)	mínimo (N)
x	-32	154	299	-220
y	689	136	837	182
z	870	212	1302	482

Através dos impulsos referentes ao movimento de saída, pode-se encontrar as velocidades horizontais e vertical de saída do nadador, porém a plataforma nos informa os valores de impulsos referentes aos eixos desta, sendo necessário realizar uma mudança de eixos, para a obtenção das velocidades no momento em que o nadador abandona o bloco de partida.

Baseando-se nas direções dos eixos mostrados na figura 6.5, e sabendo-se que a plataforma encontra-se numa inclinação de 6° , devido ao seu posicionamento idêntico ao bloco de saída convencional da piscina, encontram-se os valores de impulsos referentes as forças de reação, através das seguintes equações:

$$I_{z'} = I_z \cdot \cos\alpha - I_y \cdot \sin\alpha \quad (6.1)$$

onde $I_{z'}$ é o impulso da força de reação na direção z' (vertical), I_z é o impulso da força na direção z da plataforma, I_y é o impulso da força na direção y da plataforma e α é o ângulo de inclinação da plataforma;

$$I_{y'} = I_z \cdot \sin\alpha + I_y \cdot \cos\alpha \quad (6.2)$$

onde $I_{y'}$ é o impulso da força de reação na direção y' (horizontal), I_z é o impulso da força na direção z da plataforma, I_y é o impulso da força na direção y da plataforma e α é o ângulo de inclinação da plataforma.

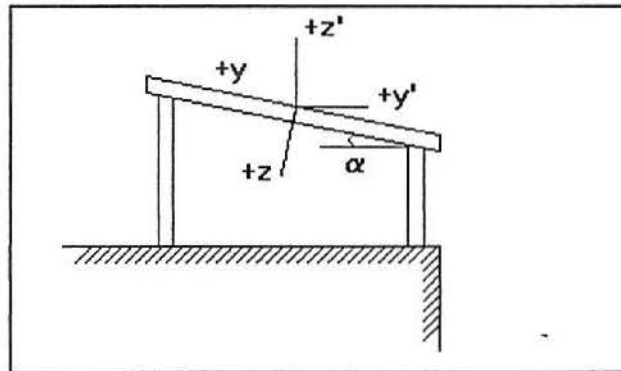


Figura 6.5 - Representação da mudança de eixos realizada

+ y : eixo na direção y positiva da plataforma; + z : eixo na direção z positiva da plataforma;

+ y' : eixo na direção horizontal do movimento; + z' : eixo na direção vertical do movimento;

α : ângulo de inclinação da plataforma

Sabe-se que o impulso é a integral da força em determinado intervalo de tempo, e que também pode ser encontrado através variação da quantidade de movimento. Considerando-se que a velocidade inicial do nadador (quando o sinal de partida é dado) é igual a zero, que sua massa é constante e que o impulso é conhecido, tem-se que a velocidade de saída do centro de massa pode ser obtida com a equação: [GUIMARÃES, 1982]

$$\vec{I} = m \cdot \vec{v} \quad (6.3)$$

onde \vec{I} é o impulso, m é a massa corporal do nadador e \vec{v} é a velocidade de saída.

A velocidade vertical de saída do nadador é obtida com o impulso referente a força vertical que produz este movimento, e o valor deste impulso pode ser encontrado através da seguinte equação:

$$I_{z'}^d = I_{z'} - I_{z'}^P \quad (6.4)$$

onde $I_{z'}^d$ é o impulso referente a força de reação dinâmica do movimento na direção vertical, $I_{z'}$ é o impulso da força de reação na direção vertical e $I_{z'}^P$ é o impulso da força peso do nadador na direção vertical.

O impulso referente a força peso do nadador na direção vertical é obtido com a equação:

$$I_{z'}^P = P \cdot \Delta t \quad (6.5)$$

onde P é a força peso do nadador e Δt é o intervalo de tempo percorrido desde o início do movimento de largada até o instante em que o atleta abandona a plataforma.

Substituindo as equações 6.1 e 6.5 na equação 6.4 obtém-se o impulso referente a força de reação dinâmica do movimento na direção vertical, como a massa do nadador é conhecida, pode-se obter a velocidade vertical de saída:

$$v_v = \frac{I_{z'}^d}{m} \quad (6.6)$$

onde v_v é a velocidade vertical de saída, I_z^d é o impulso da força de reação dinâmica do movimento na direção vertical e m é a massa do nadador.

A velocidade horizontal de saída do nadador é obtida com o impulso referente a força de reação dinâmica horizontal que produz este movimento, sendo este impulso encontrado diretamente através da equação 6.2, pois o impulso da força peso na direção horizontal é igual a zero. Então obtém-se esta velocidade com a equação:

$$v_h = \frac{I_{y'}}{m} \quad (6.7)$$

onde v_h é a velocidade horizontal de saída, $I_{y'}$ é o impulso da força de reação do movimento na direção horizontal e m é a massa do nadador.

Conhecendo as velocidades vertical e horizontal de saída calcula-se o ângulo de saída em relação a direção horizontal (eixo y') através da equação:

$$\tan \beta = \frac{v_v}{v_h} \quad (6.8)$$

onde β é o ângulo de saída em relação a direção horizontal, v_v é a magnitude da velocidade vertical de saída e v_h é a magnitude da velocidade horizontal de saída.

A velocidade lateral, ou seja, na direção perpendicular ao movimento de saída do nadador (direção x), representa o desvio da trajetória retilínea do corpo do nadador, e é obtida

diretamente pela razão entre o impulso referente a força na direção x e a massa do nadador, como mostra a equação:

$$v_L = \frac{I_x}{m} \quad (6.9)$$

onde v_L é a velocidade lateral, I_x é o impulso na direção x e m é a massa do nadador.

Os valores das velocidades vertical, horizontal e lateral de saída, assim como o ângulo de saída em relação a direção horizontal (Figura 6.5), calculados com as equações apresentadas anteriormente, encontram-se no anexo C. Na tabela 6.4 relacionou-se seus valores médios, desvio padrão, máximos e mínimos das velocidades e ângulo de saída.

Tabela 6.4 - Valores médios, desvio padrão, valores máximos e mínimos das velocidades de saída e ângulo de saída

	média	desvio padrão	máximo	mínimo
v_v (m/s)	-0,84	1,14	2,22	-2,62
v_h (m/s)	3,99	0,66	4,97	2,83
v_L (m/s)	-0,15	0,60	1,25	-1,23
β (°)	-11	14	25	-35

Como exemplo dos arquivos obtidos após o processamento apresenta-se nas figuras 6.6 a 6.11, as curvas típicas dos gráficos das componentes da força, do momento e dos impulsos, os quais representam basicamente os dois tipos distintos de desenvolvimento do movimento de largada, encontrados depois da análise de todos arquivos.

Descrevendo-se simplificadamente o movimento efetuado através das figuras 6.6. e 6.7, que apresentam as componentes da força para dois nadadores distintos, pode-se explicá-las em cinco fases bem definidas: em (1) a subida do nadador na plataforma, em (2) a sua acomodação sobre esta, possibilitando a verificação das componentes do peso do indivíduo, em (3) verifica-se o começo do movimento através do aumento da componente da força horizontal y , no segmento (4) tem-se a flexão de todos os segmentos do corpo uns sobre os outros e o desequilíbrio habitual do corpo do nadador, e em seguida o peso do corpo é levado para frente e então o nadador leva o centro de gravidade para frente dos pontos de apoio, girando seu corpo em torno de um ponto fixo e impulsionando-se para o mergulho através da extensão completa de todos os segmentos de seu corpo, começando então sua trajetória de queda em direção a água, em (5) o nadador abandona a plataforma, deixando o apoio do bloco de saída, tendo a trajetória do seu centro de gravidade determinada.

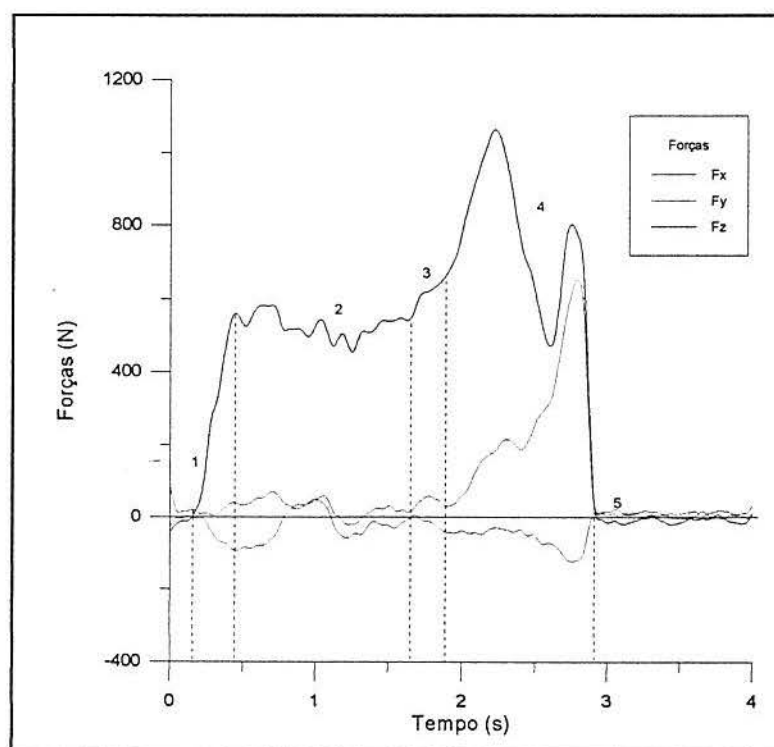


Figura 6.6 - Componentes da força para o movimento de saída do nadador A

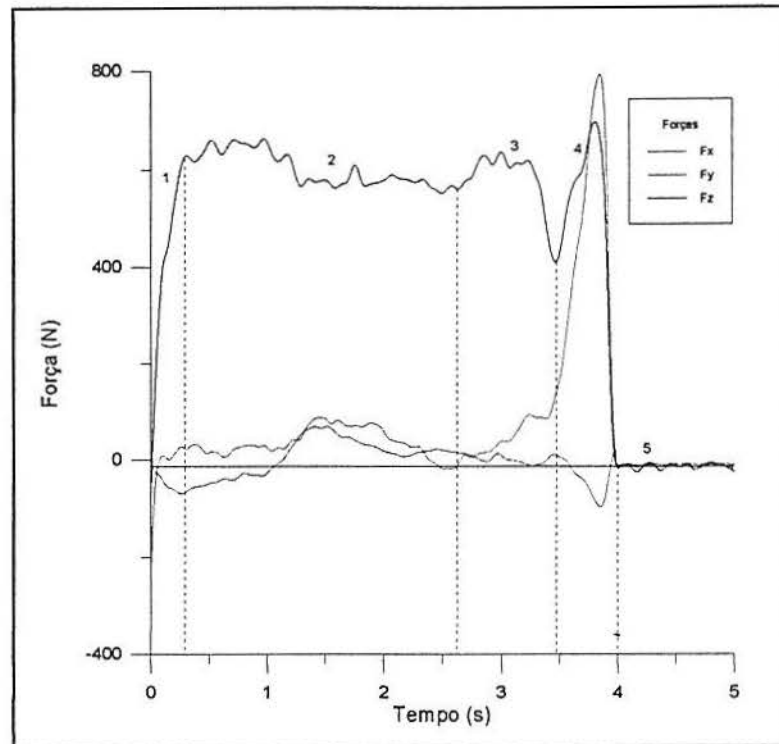


Figura 6.7 - Componentes da força para o movimento de saída do nadador B

Nas figuras 6.6 e 6.7 mostram-se as componentes da força obtidas pela plataforma durante a execução do movimento de saída de dois nadadores, as quais permitem visualizar a diferença básica entre o tipo de desequilíbrio corporal desenvolvido pelo atleta, que pode ser observada avaliando-se a componente da força vertical (F_z) em cada gráfico. Na figura 6.6 (nadador A) nota-se dois picos distintos para F_z mostrando que este atleta desenvolveu um desequilíbrio do centro de gravidade para trás e após efetuou a sequência do movimento. Enquanto que analisando a figura 6.7 (nadador B) observa-se que este nadador desenvolve diretamente o desequilíbrio para frente e procede com sua largada.

As curvas típicas para as componentes do momento são apresentadas nas figuras 6.8 e 6.9, onde observa-se as variações dos momentos principalmente para as direções y e z dos dois nadadores distintos.

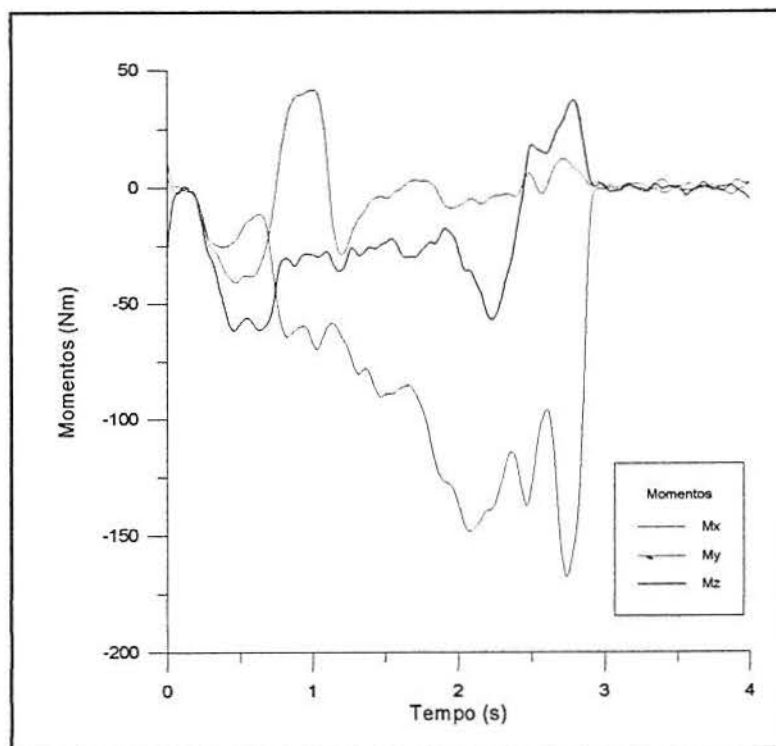


Figura 6.8 - Componentes do momento para o movimento de saída do nadador A

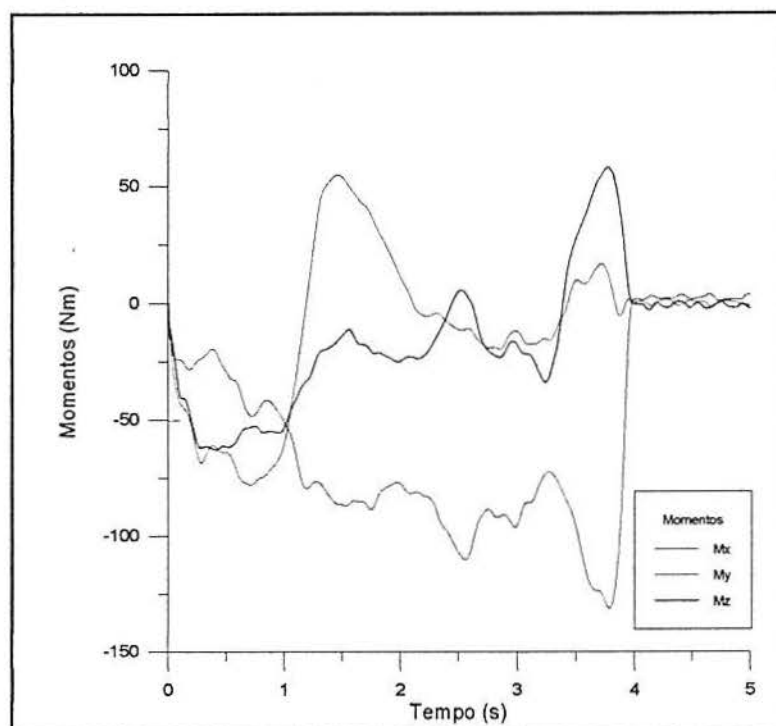


Figura 6.9 - Componentes do momento para o movimento de saída do nadador B

Nas figuras 6.10 e 6.11 tem-se as curvas do impulso desenvolvido pelos nadadores A e B, respectivamente.

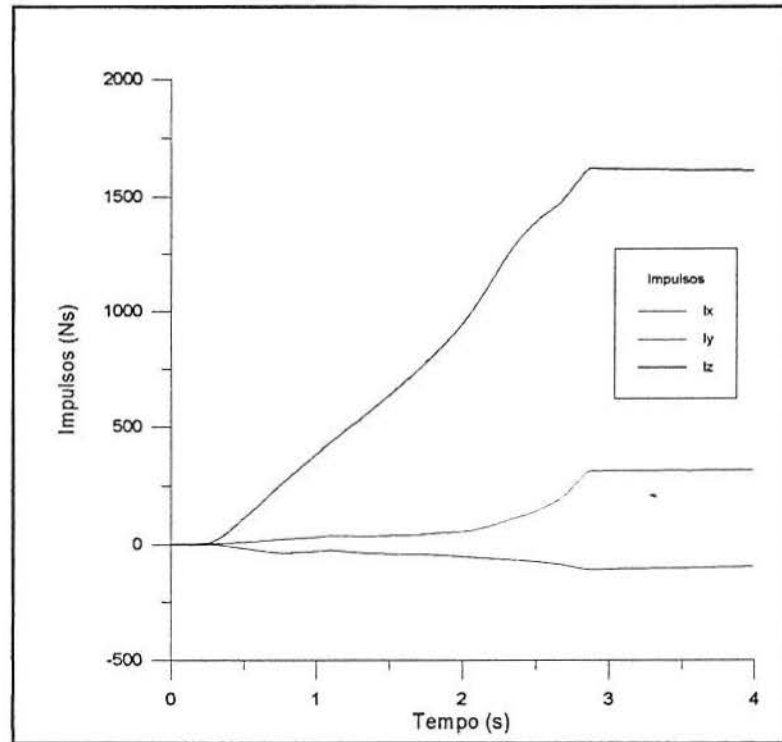


Figura 6.10 - Impulsos desenvolvidos pelo nadador A

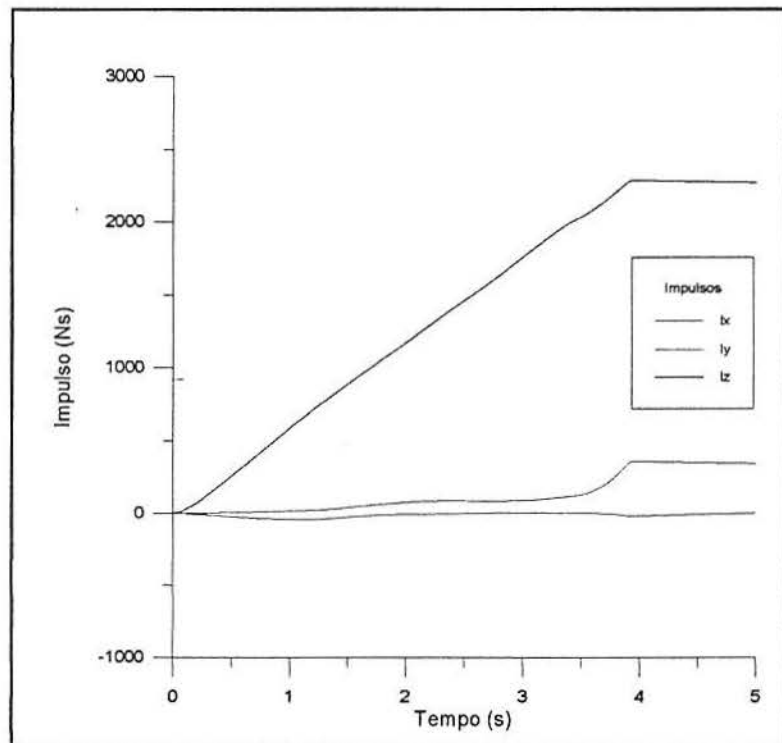


Figura 6.11 - Impulsos desenvolvidos pelo nadador B

As figuras 6.12 a 6.14, apresentadas a seguir, mostram alguns momentos distintos do movimento de largada dos nadadores no local de ensaio. Na figura 6.12 vê-se o início da extensão dos segmentos do corpo, antes posicionados em flexão, tendo como efeito um aumento da força; e a impulsão do mergulho de saída, caracterizada pelo aspecto explosivo.

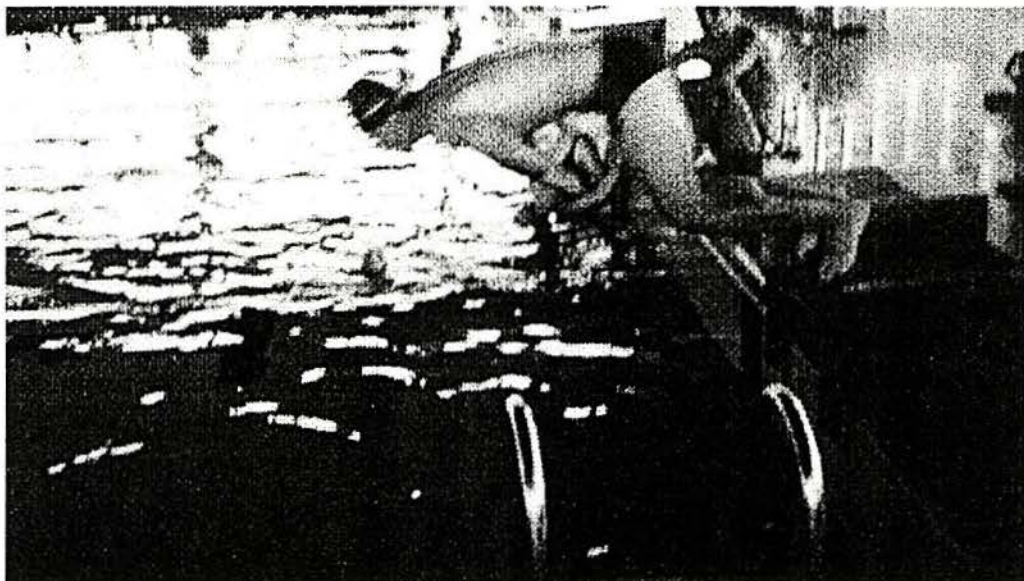


Figura 6.12 - Fase de extensão dos segmentos do corpo e impulsão em direção à água

A figura 6.13 apresenta a extensão completa dos segmentos corporais, com o alinhamento tronco-quadril-tornozelos, manifestando um aumento da impulsão das pernas; e formando uma leve concavidade ventral, com a trajetória de centro de gravidade já determinada.

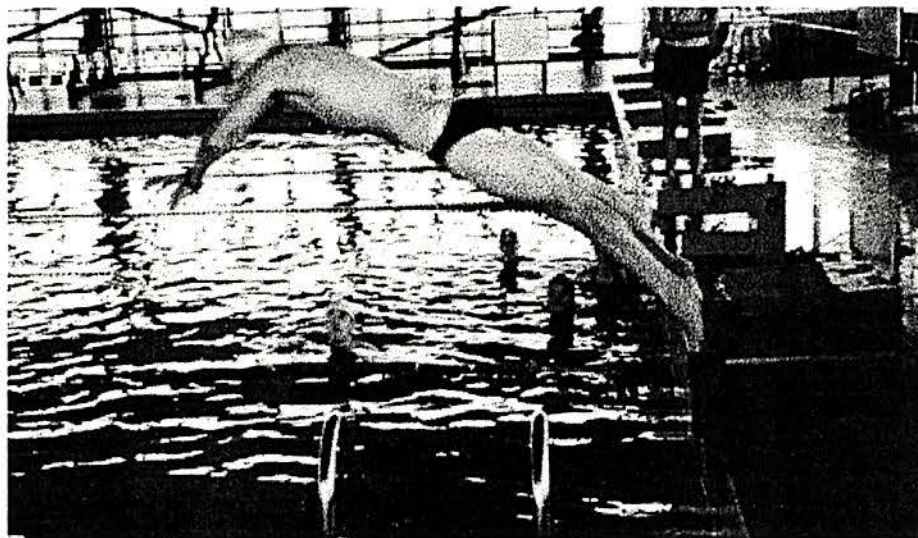


Figura 6.13 - Fase de extensão completa dos segmentos do corpo

No momento do vôo apresentado na figura 6.14, nota-se a flexão da cabeça contribuindo para o alinhamento ventral, e a orientação já definida pelo posicionamento dos braços, com a entrada na água sendo realizada pelas mãos.

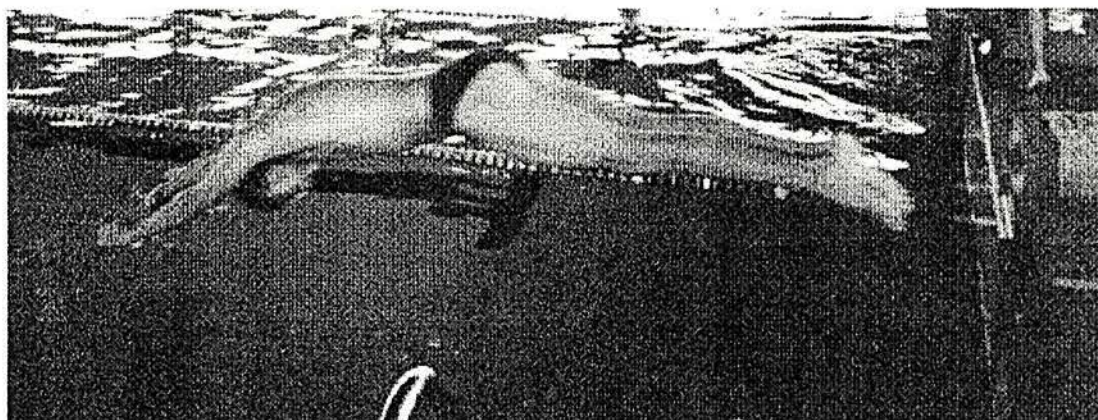


Figura 6.14 - Trajetória definida para entrada na água pelas mãos

6.4 Outras aplicações

Apenas como ilustração de algumas aplicações da plataforma, e para verificar os tipos de registros disponíveis do equipamento para futuras pesquisas, são mostrados alguns registros de força desenvolvida no caminhar, corrida de velocidade e corrida de maratonista.

Na figura 6.15 tem-se a representação das componentes da força para o caminhar, a componente da força vertical F_z é caracterizada por uma curva com dois picos bem definidos, o primeiro pico ocorre durante a primeira metade do apoio na superfície e caracteriza a batida do calcanhar e a porção do apoio de todo o corpo na superfície da plataforma, excedendo o peso da pessoa e reduzindo depois do contato do pé, transferindo uma aceleração vertical ao tronco. Com o balanço da pessoa a força vertical torna-se menor que o peso; o segundo pico representa a ação de empurrar a superfície de apoio quando o corpo levanta, aumentando a força vertical antes do pé terminar a ação de pisar e mover-se para o próximo passo. Assim o tronco é submetido a um momento de subida e descida durante o período de contato do pé. A componente horizontal F_y , mostra a força de desaceleração na batida inicial do calcanhar e a aceleração quando o pé deixa a superfície. A força transversal F_x , é pequena e representa o balanço do corpo da esquerda para a direita.

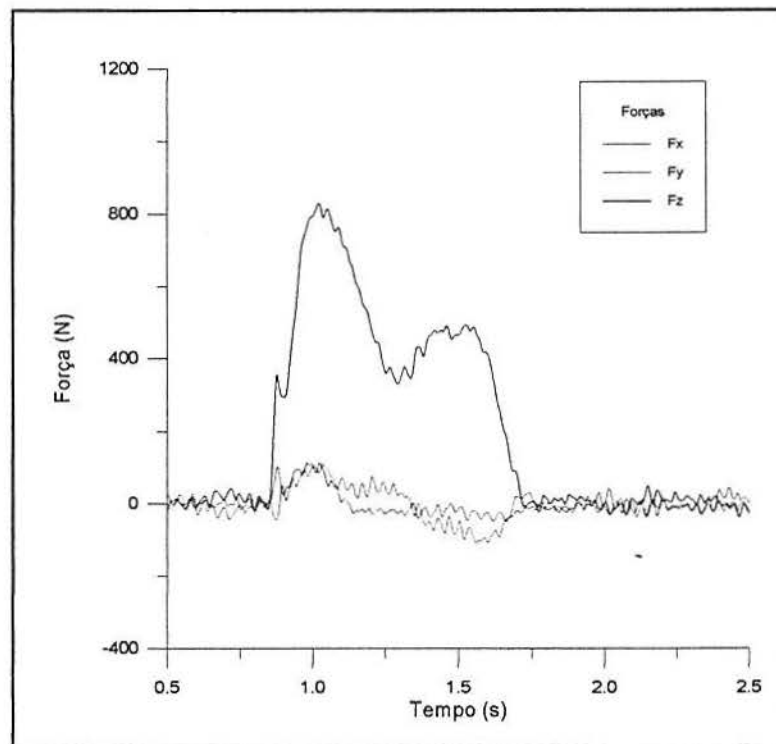


Figura 6.15 - Registro típico para análise da força no caminhar

Na corrida a forma da curva da componente vertical depende do estilo do corredor, velocista ou maratonista. No caso do apoio de um maratonista (Figura 6.16), que ocorre com o pé inteiro, inicialmente o calcanhar e em seguida a parte anterior do pé, o primeiro pico acontece muito rapidamente depois do contato inicial com a superfície e pode ser chamado de pico de impacto. O segundo pico ocorre na metade do tempo de contato e geralmente tem valor superior ao pico de impacto. Enquanto que para um corredor de velocidade o apoio é feito apenas com a parte anterior do pé, então o pico de impacto não acontece ou é bem pequeno (Figura 6.17).

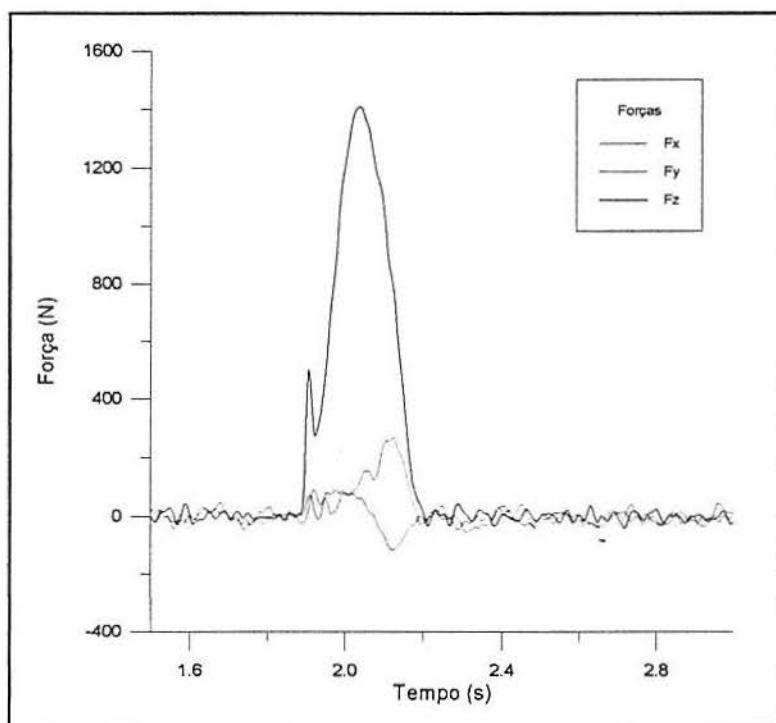


Figura 6.16 - Registro para análise da força em uma simulação da corrida de maratonista

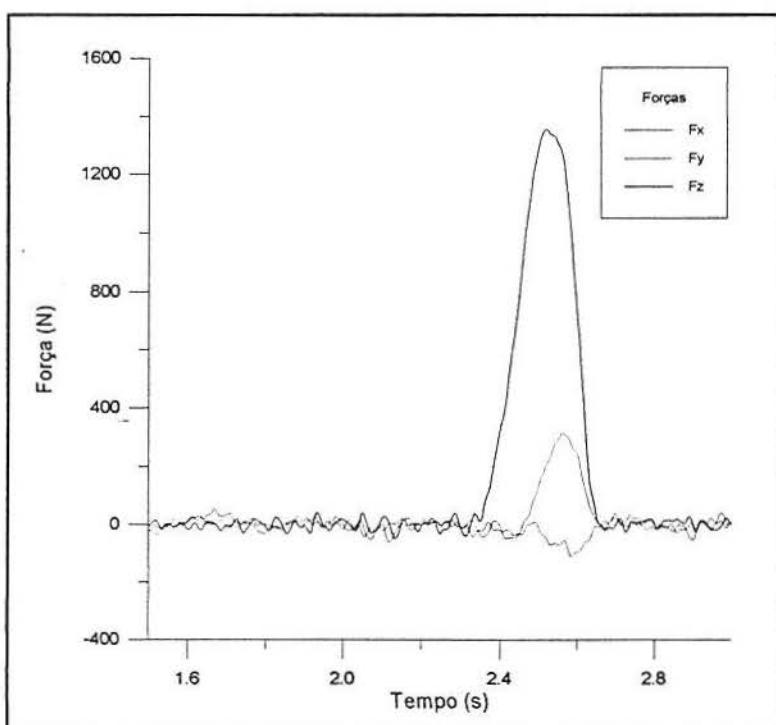


Figura 6.17 - Registro para análise da força em uma simulação da corrida de velocista

A componente horizontal F_y nos dois tipos de corrida apresenta forma e magnitude similares, ao passo que no caminhar tem um valor mais reduzido. A força transversal F_x para estes movimentos é bem variável, não apresentando uma uniformidade, dependendo de cada indivíduo em particular.

Na caminhada a relação entre o pico da força vertical e o peso corporal (fator de amplificação) normalmente tem valores entre 1,0 e 1,5; enquanto que para a corrida este valor fica entre 2,0 e 3,0. Em relação ao tempo de contato com a superfície de apoio para a corrida tem-se um intervalo bem mais curto em comparação com a caminhada.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto e construção de uma plataforma de força, que era o objetivo principal desta dissertação, foi alcançado eficazmente através da quantificação das forças nos movimentos analisados.

As células de carga octogonais, para medição simultânea de forças dinâmicas em duas direções, apresentaram um comportamento eficiente no sentido do desacoplamento das forças vertical e horizontal, possuindo rigidez de mesma ordem em ambas as direções, traduzida em medições com sensibilidade semelhante nestas direções. Uma dificuldade evidenciada no projeto da célula octogonal foi a união da mesma junto às placas de fixação, de maneira a respeitar as condições de contorno com que estas foram projetadas.

O aço inox empregado na construção das células de carga teve um bom comportamento, porém com a utilização de alumínio estrutural como material base teria-se uma diminuição da massa do equipamento e também uma maior sensibilidade das peças, mas resultaria num custo mais elevado.

Com relação ao uso das quatro células de carga octogonais para o desenvolvimento de uma plataforma de força, este número ficou vinculado ao sistema de aquisição disponível, no caso tinha-se a disposição uma placa de aquisição de dados de oito canais.

Quanto ao emprego deste tipo de célula de carga para outros fins específicos, deve-se realizar um novo projeto, dando-se especial atenção à união da célula de carga na superfície de apoio. Estas junções devem apresentar a maior rigidez possível, refletindo numa transmissão adequada do sinal de deformação em cada uma das direções (horizontal e

vertical) da célula de carga. Pois um alto valor de rigidez implica na diminuição do efeito de acoplamento entre as direções ortogonais de medição. O projeto de junção irá depender basicamente das dimensões necessárias para a célula e do número de células a utilizar, de acordo com a aplicação específica, definindo assim a viabilidade de construção conjunta de toda peça, ou a necessidade de suportes ou elementos de fixação.

Com referência aos condicionadores de sinal utilizados, estes apresentaram estabilidade razoável no decorrer das medições, sempre respeitando-se o tempo de aquecimento inicial.

A placa de aquisição de dados empregada apresentou uma boa performance até uma taxa de aquisição de 512 pontos/segundo, sendo este valor suficiente para as medições realizadas; entretanto para valores superiores a este ocorre cruzamento de dados entre os oito canais de aquisição; apesar das informações do fabricante fornecerem valores superiores.

O sistema de aquisição e tratamento de dados (conjunto de programas computacionais) desenvolvido para utilização conjunta com a plataforma de força permitiu a quantificação das forças de reação da superfície em relação ao corpo, proporcionando a análise posterior das forças internas atuantes no corpo humano na realização de movimentos; sendo possível também o cálculo de outros fatores derivados das forças, como momentos, impulsos, ponto de aplicação e o ângulo entre a força horizontal e a força vertical.

O erro médio é de 7,2% para as medições de força e momento e os valores de interferência médios são de 30 N para as forças e 15 Nm para os momentos, estes cumpriram com os objetivos propostos, mostrando-se na mesma ordem dos sistemas comercialmente disponíveis, tendo como vantagem apresentar uma relação de custos bem menor. O custo para

produção do equipamento foi bem inferior ao valor necessário para aquisição de um similar importado, viabilizando a sua fabricação no mercado nacional.

A menor frequência natural apresentada é de 98 Hz, determinando com isto sua faixa de utilização de 0 a 55 Hz, o que possibilita o emprego da plataforma desenvolvida em medições de esforços produzidos por pessoas em movimento na maioria dos casos práticos normalmente encontrados.

O equipamento construído permitiu uma primeira análise do movimento relacionado à natação, possibilitando uma avaliação satisfatória dos parâmetros em questão (forças, impulsos, velocidades e ângulo de saída), e comprovando a utilidade da plataforma para este fim. Através dos registros gráficos fornecidos pelo equipamento é possível interpretar com facilidade cada fase do movimento, tornando possível efetuar correções significativas no posicionamento do corpo do atleta e na execução do movimento; viabilizando a avaliação das diferentes técnicas de saída do nadador.

O valor médio de força encontrado na realização do movimento de saída de um nadador foi de 870 N para a direção vertical e 689 N para a horizontal. O fator de amplificação que é obtido da relação entre o pico da componente da força e o peso corporal, tem como valor médio na direção do eixo z 1,29 e na direção do eixo y 1,03. Sendo que para um movimento de saída bem executado obteve-se os seguintes valores de velocidade de saída: 2,22 m/s para a direção vertical, 4,79 m/s para a horizontal e -0,84 m/s para a lateral. O ângulo de saída apresentado neste movimento foi de 25° , o que configura uma boa saída.

Tendo em vista que a plataforma mostrou ser um equipamento eficiente para medição dos esforços produzidos por nadadores, uma próxima etapa deste trabalho seria a realização

de ensaios utilizando as técnicas de projeto e avaliação de experimentos. Sendo que, para esta análise torna-se necessário uma amostra de atletas com melhor qualificação, visto que o aprimoramento deste movimento trará vantagens de grande valor para as competições de alto nível neste esporte, tornando-se assim uma contribuição valiosa.

Com a construção deste equipamento gera-se a possibilidade de estudos relacionados aos mais variados movimentos humanos, ambientados em laboratórios próprios da Universidade, os quais realizam a análise biomecânica tanto a nível esportivo, como reabilitação e manutenção das perfeitas condições físicas dos indivíduos da sociedade, juntamente com outras opções de equipamentos para monitorização de fatores relevantes ao estudo.

Como continuidade deste trabalho sugere-se a soldagem das células de carga nas placas de apoio, aperfeiçoando a fixação e melhorando o funcionamento conjunto das células; e com uma disposição diferente das células de carga, permitir que as quatro trabalhem conjuntamente nas direções vertical e horizontal, tornando necessário um novo equacionamento das variáveis de medição para o cálculo dos esforços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANSYS engineering analysis system; examples supplement for revision 5.0. Houston: Swanson Analysis Systems, 1992a. 105 p.
- 2 ANSYS user's manual for revision 5.0. Houston: Swanson Analysis Systems, 1992b. 182 p. v.1: procedures.
- 3 ANSYS user's manual for revision 5.0. Houston: Swanson Analysis Systems, 1992c. 344 p. v.3: elements.
- 4 BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G. **Random data: analysis and measurement procedures.** New York: Wiley - Interscience, 1971. 471 p. p. 291 - 299.
- 5 BAGESTEIRO, L.B.; TAMAGNA, A. **Projeto e construção de uma célula de carga dinâmica octogonal.** Porto Alegre: DEMEC - UFRGS, 1995. 21 p. (Caderno Técnico de Engenharia Mecânica, n ° 7)
- 6 CATTEAU, R.; GAROFF, G. **O ensino da natação.** 3.ed. São Paulo: Manole, 1990. p. 224 - 233.
- 7 DALLY, J.W.; RILEY, W.F. **Experimental stress analysis.** 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. p. 223 - 233.

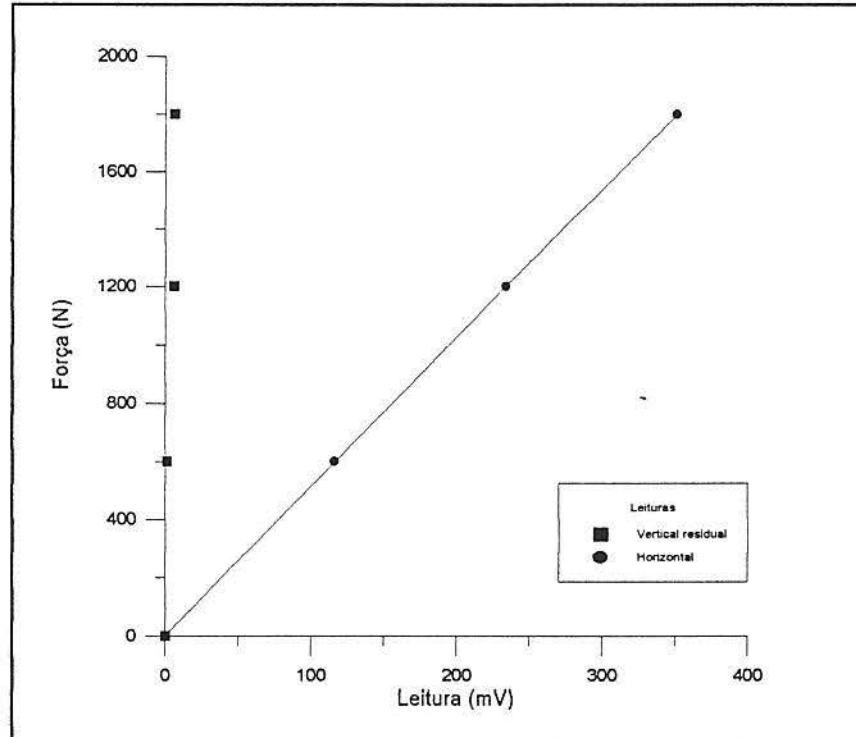
- 8 DOZ, G.; TAMAGNA, A.; RIERA, J.D. **Subsídios para o projeto de células de carga sob solicitações dinâmicas**. Porto Alegre: CPGEC - UFRGS, 1990. 21 p. (Caderno de Engenharia, 41)
- 9 EQUIPAMENTOS CIENTÍFICOS E INDUSTRIAIS - ECI. **Manual ECI - IEAR Conversora A/D**. Porto Alegre, 1993. 15p.
- 10 GOLLA, M.M. Mechanical design, constructional details and calibration of a new force plate. **Journal of Biomechanics**, Oxford, v.13, p. 113 - 128, July 1980.
- 11 GUIMARÃES, A.C.S. **A Mechanical analysis of the grab starting technique in swimming**. Iowa, 1982. 131p. Master's Thesis, University of Iowa.
- 12 HAMILL, J.; KNUTZEN, K.M. **Biomechanical basis of human movement**. Baltimore: Williams & Wilkins, 1995. p. 398 - 405.
- 13 HULL, M.L.; DAVIS, R.R. Measurement of pedal loading in bicycling: instrumentation. **Journal of Biomechanics**, Oxford, v.14, n.12, p. 843 - 856, Nov. 1981.
- 14 LYWOOD, D.W. et al. Small, triaxial force plate. **Medical & Biological Engineering & Computing**, Stevenage, Engl., n.25, p. 698 - 701, Nov. 1987.
- 15 MAGLISCHO, E.W. **Nadar mas rápido - tratado completo de natación**. 2.ed. Barcelona: Editorial Hispano Europea, 1990. p. 205 - 216.

- 16 MILLER, J. A., HAY, J. G., WILSON, B. D. Starting techniques of elite swimmers. **Journal of Sports Science**, London, n.2, p. 213 - 223, Nov. 1984.
- 17 NIGG, B.M.; HERZOG, W. **Biomechanics of the musculo-skeletal system**. London: John Willey, 1994. p. 213 - 223.
- 18 PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. **Manual de engenharia química**. 5.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.
- 19 POPOV, E. P. **Introducción a la mecánica de sólidos**. México: Limusa, 1976. p. 379 - 383.
- 20 RAMEY, M.R. **Exercise and sport sciences reviews**. New York: Academic Press, 1975. v.3, p. 303 - 319.
- 21 SAMBLANCAT, V.C. **Calculo de estructuras de acero**. Madrid: Blume, 1978. v.1: teoria.
- 22 THAYER, A. L.; HAY, J. G. Motivating start and turn improvement. **Swimming Technique**, Los Angeles, p. 17 - 20, Feb./Apr. 1984.
- 23 WINTER, D.A. **Bimechanics and motor control of human movement**. 2.ed. New York: John Wiley, 1990. p. 84 - 92.

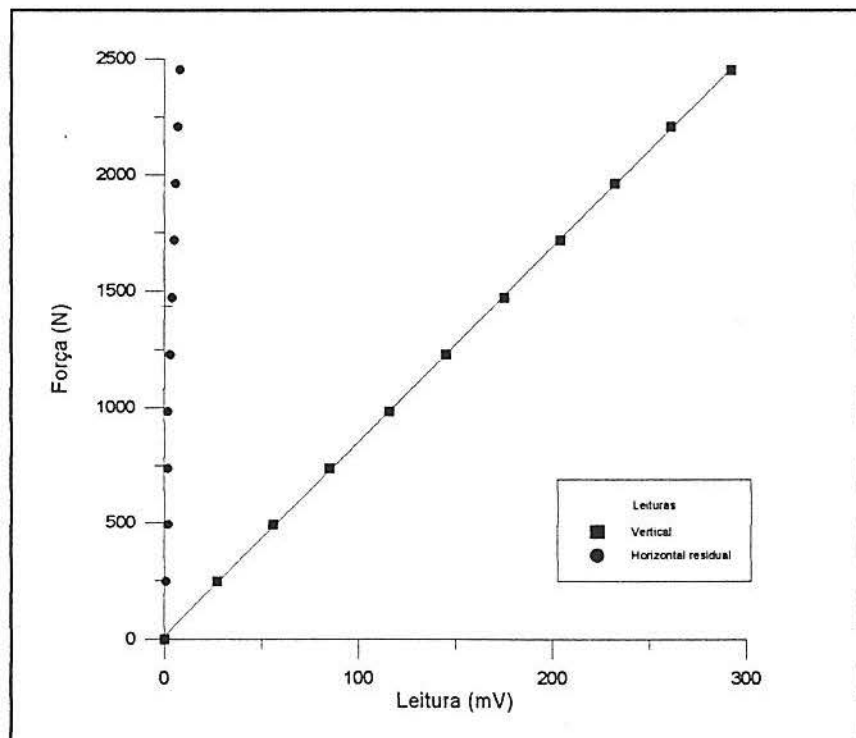
ANEXO A - Curvas de Calibração das Células de Carga

1. Célula AB

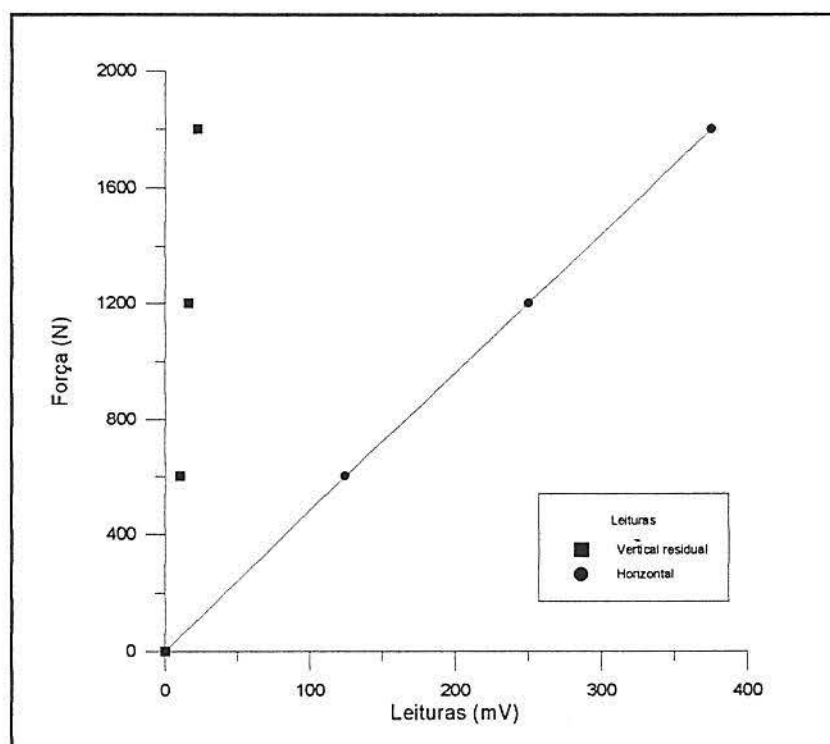
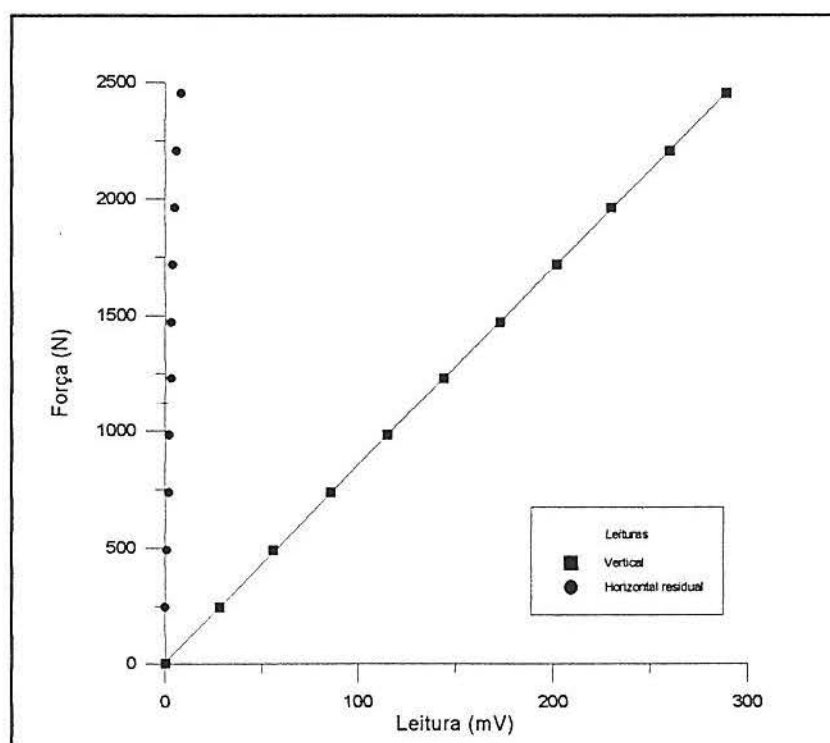
Carregamento Horizontal - desvio de linearidade 0,6%



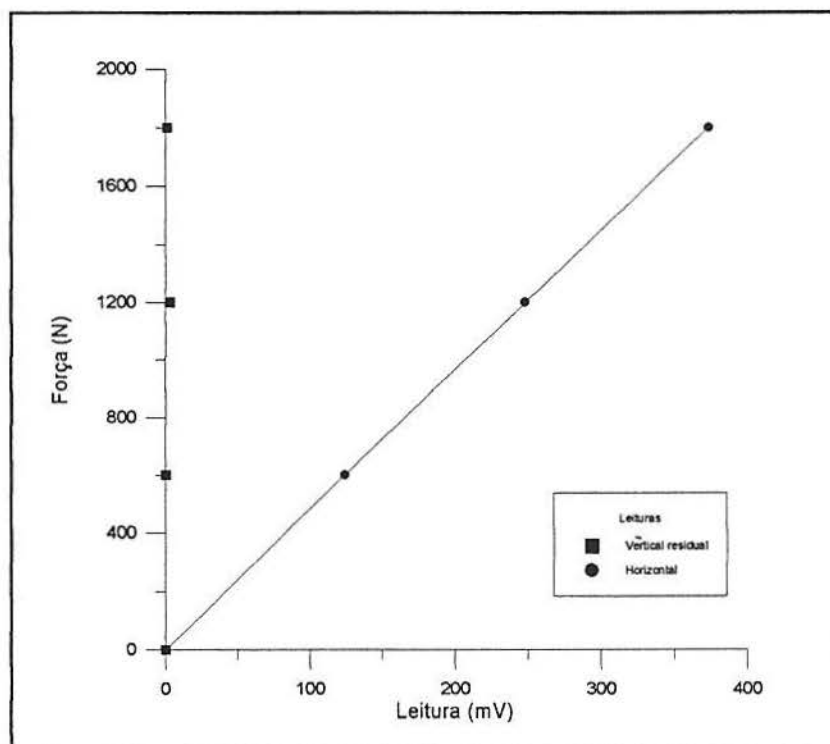
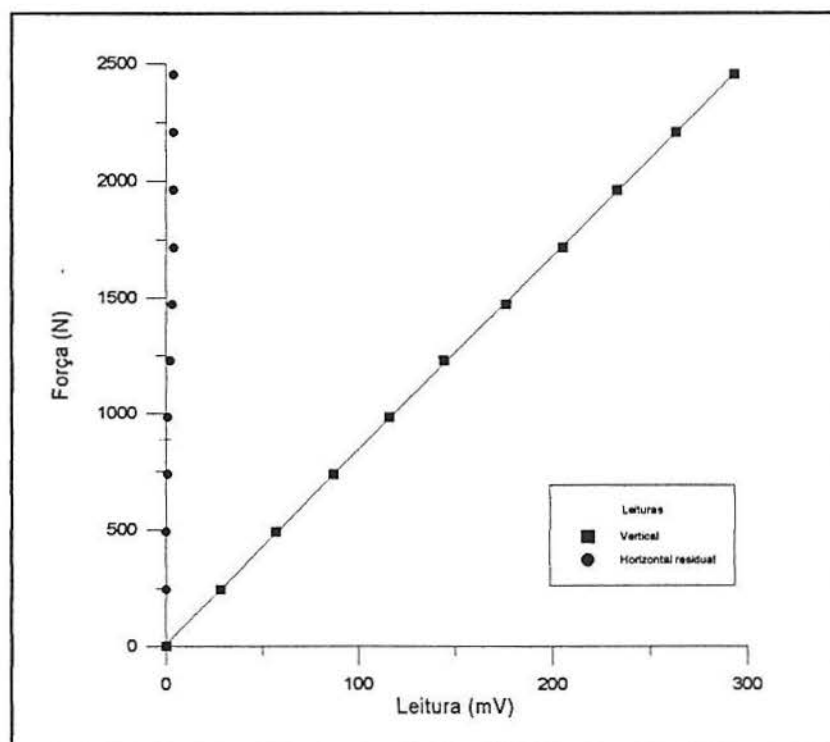
Carregamento Vertical - desvio de linearidade 1,48%



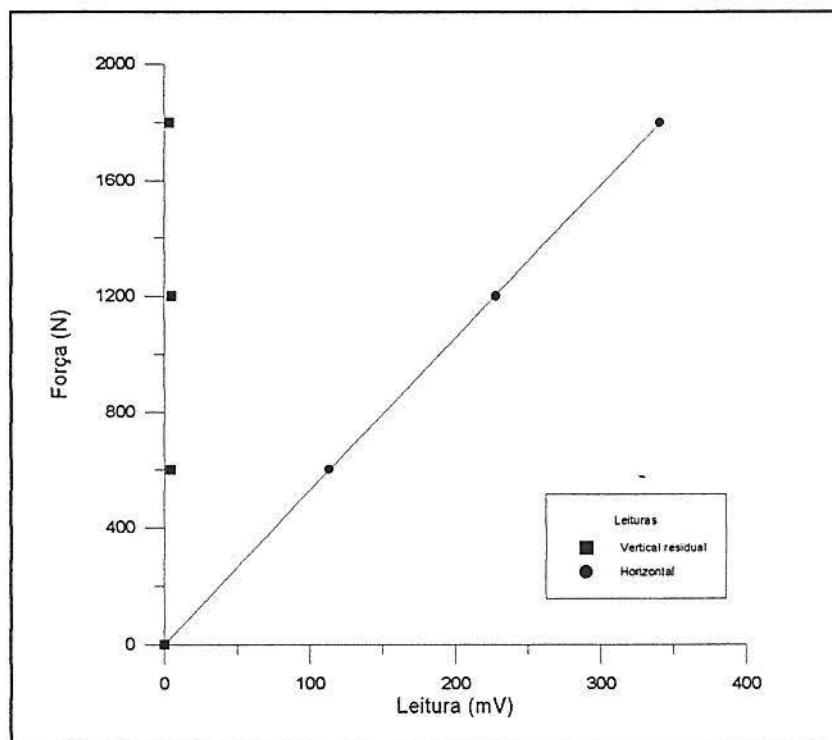
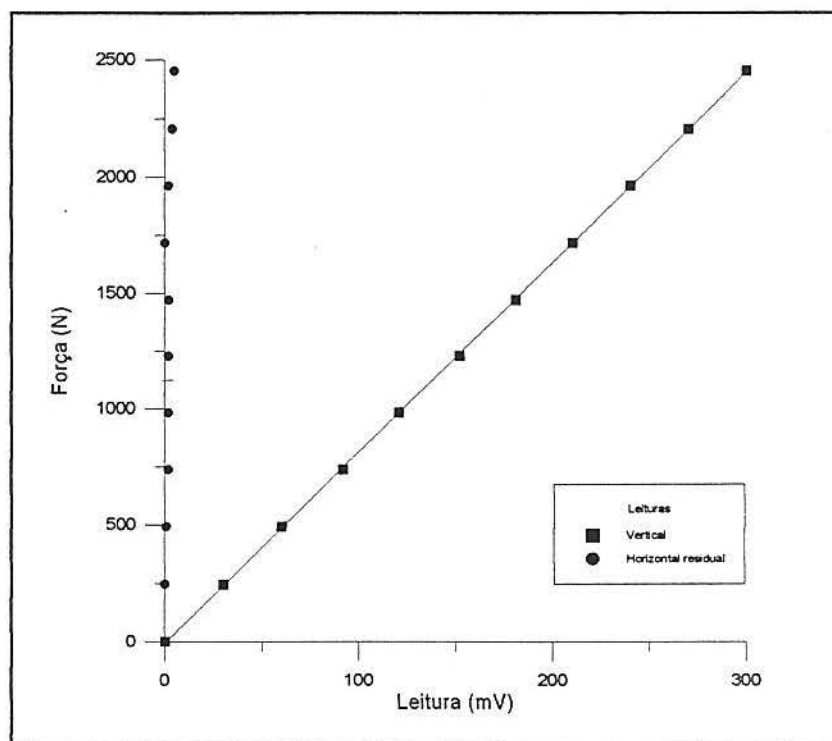
2. Célula CD

Carregamento Horizontal - desvio de linearidade 0,56%Carregamento Vertical- desvio de linearidade 1,73%

3. Célula EF

Carregamento Horizontal - desvio de linearidade 0,16%Carregamento Vertical - desvio de linearidade 1,12%

4. Célula GH

Carregamento Horizontal - desvio de linearidade 0,44%Carregamento Vertical - desvio de linearidade 0,96%

ANEXO B - Valores máximos das forças e seus respectivos fatores de amplificação para os indivíduos ensaiados

Arquivo	Pico Fz (N)	$\frac{Fz}{P}$	Pico Fy (N)	$\frac{Fy}{P}$	Pico Fx (N)	$\frac{Fx}{P}$
A	709	1,06	812	1,22	-107	0,16
B	815	1,36	705	1,18	-136	0,23
C	1083	1,60	672	0,99	-134	0,20
D	1223	1,81	718	1,06	-181	0,27
E	784	1,31	786	1,31	-96	0,16
G	1140	1,40	769	0,95	210	0,26
I	565	1,18	501	1,04	-129	0,27
J	878	1,26	590	0,85	-124	0,18
L	1060	1,39	776	1,02	219	0,29
M	947	1,40	588	0,87	70	0,10
N	1302	1,93	670	0,99	-127	0,19
O	1073	1,32	747	0,92	206	0,25
P	1062	1,34	780	0,98	-126	0,16
S	538	1,12	182	0,38	80	0,17
T	971	1,40	741	1,06	-137	0,20
U	1040	1,36	837	1,09	243	0,32
V	894	1,32	805	1,19	-95	0,14
X	565	1,20	530	1,13	-140	0,30
Y	802	1,34	832	1,39	105	0,18
Z	765	1,10	688	0,99	139	0,20
AA	886	1,16	735	0,96	104	0,14
BB	482	1,02	565	1,20	-220	0,47
DD	846	1,11	902	1,18	-167	0,22
EE	910	1,31	765	1,10	-137	0,20
FF	506	1,05	588	1,22	-94	0,20
HH	1003	1,23	773	0,95	141	0,17
II	1136	1,43	756	0,95	-173	0,22
JJ	1094	1,43	759	0,99	299	0,39
LL	1042	1,54	670	0,99	-207	0,31
MM	767	1,10	644	0,93	-152	0,22
NN	817	1,04	730	0,93	191	0,24
OO	781	1,15	729	1,08	-133	0,20
QQ	665	1,41	553	1,18	-163	0,35
RR	750	1,18	461	0,72	-140	0,22
TT	829	1,08	811	1,06	-119	0,16
UU	493	1,03	537	1,12	-98	0,20
VV	953	1,17	791	0,97	133	0,16

ANEXO C - Valores das velocidades vertical, horizontal e lateral de saída, e ângulo de saída, para os indivíduos ensaiados

Arquivo	v_v (m/s)	v_h (m/s)	v_L (m/s)	β (°)
A	-0,46	4,92	-0,32	-5
B	-0,08	4,32	-0,69	-1
C	2,22	4,79	-0,84	25
D	1,89	4,74	-0,78	22
E	-1,48	4,76	-0,34	-17
G	0,27	4,21	0,84	4
I	-1,31	3,07	-0,18	-23
J	-1,28	3,24	-0,34	-22
L	0,43	3,22	0,77	8
M	-0,11	3,05	0,01	-2
N	-0,18	4,07	-0,46	-3
O	-0,81	3,27	0,84	-14
P	-0,72	3,50	-0,19	-12
S	-1,83	4,47	0,12	-22
T	-1,61	4,48	-0,06	-20
U	0,06	4,18	0,64	1
V	-1,20	3,47	-0,17	-19
X	-1,69	3,93	-0,65	-23
Y	-0,36	4,87	0,07	-4
Z	-2,55	4,05	0,52	-32
AA	-1,73	4,15	0,36	-23
BB	-2,13	4,96	-1,23	-23
DD	-1,78	4,97	-0,56	-20
EE	-0,92	4,85	-0,48	-11
FF	-2,12	4,53	-0,53	-25
HH	-2,48	4,86	1,25	-27
II	-0,15	3,10	-0,38	-3
JJ	0,47	3,00	0,90	9
LL	0,98	3,88	-0,80	14
MM	-0,72	3,12	-0,72	-13
NN	-2,62	3,78	0,29	-35
OO	-1,30	3,77	-0,04	-19
QQ	-1,05	3,99	-0,98	-15
RR	-0,30	2,83	-0,68	-6
TT	-1,38	3,77	-0,19	-20
UU	-1,55	3,76	-0,55	-22
VV	-1,59	3,55	0,07	0