



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA
MEDIÇÃO DO CARREGAMENTO DEVIDO AO
VENTO EM EDIFICAÇÕES ALTEADAS**

Dissertação de Mestrado

Marcus Vinicius Cerutti

Porto Alegre, 2003

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO
DO CARREGAMENTO DEVIDO AO VENTO EM
EDIFICAÇÕES ALTEADAS**

Marcus Vinicius Cerutti

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Estruturas

Porto Alegre, 2003

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Programa de Pós-Graduação.

Prof. Marcelo Maia Rocha

Orientador

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza

Orientador

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal

Coordenador do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Marcelo Maia Rocha (Orientador)
Dr.techn. pela Universität Innsbruck, Áustria

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza (Orientador)
Ph.D. pela University of Western Ontario, Canadá

Prof. Jorge Daniel Riera
PhD. pela Princeton University, Estados Unidos da América

Prof. Alberto Tamagna
Doutor pela Universidade do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Milton Zaro
Pós-Doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

*Dedico este trabalho à minha
esposa, Karen, e à minha família*

AGRADECIMENTOS

Durante o desenvolver deste trabalho pude sentir, em várias oportunidades, a presença de Deus ao meu lado. Agradeço então, em primeiro lugar, a Deus e a todas as pessoas que Ele colocou em meu caminho e que, de uma forma ou de outra, colaboraram na realização desta dissertação.

Aos professores Marcelo Maia Rocha e Acir Mércio Loredou Souza meu muito obrigado pela orientação sempre crítica, paciência e amizade.

Ao professores, funcionários e amigos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À Eng^a Mauren Aurich, muito obrigado mesmo pelo exemplo, amizade, dedicação e apoio prestados durante a elaboração desta dissertação.

Ao Eng. Gustavo Javier Zani Núñez, muito obrigado pela imensa atenção dispensada e inúmeras respostas em momentos de dúvidas.

Ao professor e amigo, João Ricardo Masuero, pelas inúmeras dicas e contribuições.

Ao amigo Paulo Francisco Bueno, pela inteligência e conhecimento colocados a disposição.

Ao Eng. Eduardo Azambuja, pelas sábias palavras e apoio profissional.

Aos meus pais, Adilson e Elisa, e minhas irmãs, Margarete e Elisiane, que caminharam ao meu lado neste período de dificuldades e êxitos.

À minha segunda família, João Carlos e Regina, pela amizade e confiança.

Meu mais especial agradecimento à minha esposa, Karen, pelo amor, dedicação, entendimento, amizade, paciência, serviço e companherismo. Muito, mas muito obrigado. Que Deus ilumine sempre o nosso caminho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO.....	1
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	PLATAFORMAS DE FORÇAS	3
2.2	CÉLULAS DE CARGA – TRANSDUTORES DE FORÇA	6
2.2.1	<i>Extensômetros</i>	8
3	CRITÉRIOS DE PROJETO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇAS.....	12
3.1	CRITÉRIOS DE PROJETO.....	12
3.1.1	<i>Componentes de Força Medidas</i>	12
3.1.2	<i>Precisão do Sistema – Sensibilidade</i>	12
3.1.3	<i>Freqüência Natural</i>	13
3.1.4	<i>Desacoplamento entre Componentes de Força e Momentos</i>	13
3.1.5	<i>Independência das Condições Externas</i>	14
3.2	RESUMO DOS PRÉ-REQUISITOS.....	14
4	DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DE FORÇAS	15
4.1	CONDICIONAMENTO DO SISTEMA MECÂNICO – PRIMEIRA ETAPA	15
4.1.1	<i>Verificação de Freqüências</i>	19
4.1.2	<i>Adequação do Modelo Numérico</i>	24
4.2	CONDICIONAMENTO DO SISTEMA MECÂNICO – SEGUNDA ETAPA	26
4.3	DETERMINAÇÃO DAS POSIÇÕES DE COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS	27
4.3.1	<i>Forças Horizontais F_x, F_y e Momento Vertical M_z</i>	28
4.3.2	<i>Força Vertical F_z e Momentos M_x e M_y</i>	31
4.4	LIGAÇÃO ENTRE OS EXTENSÔMETROS E O AMPLIFICADOR DE SINAL.....	34
5	CALIBRAÇÃO DA PLATAFORMA.....	37
5.1	EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS CALIBRAÇÕES	37

5.2	ENSAIO ESTÁTICO.....	37
5.3	CALIBRAÇÃO	41
6	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO.....	45
6.1	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	47
6.1.1	<i>Modelos.....</i>	<i>48</i>
6.1.2	<i>Descrição do Equipamento.....</i>	<i>50</i>
7	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
7.1	ENSAIOS COM VENTO UNIFORME E SUAVE – MODELOS 1 E 3.....	51
7.2	ENSAIOS COM VENTO UNIFORME E SUAVE – MODELOS 2 E 4.....	56
7.3	ENSAIOS COM VENTO DESLIZANTE E TURBULENTO – MODELOS 1 E 3	61
7.4	ENSAIOS COM VENTO DESLIZANTE E TURBULENTO – MODELOS 2 E 4	65
7.5	COEFICIENTES DE FORÇAS AERODINÂMICAS	68
8	CONCLUSÕES.....	70
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Plataforma de força de Gola (1980)	4
Fig. 2.2 – Balança construída por Tschanz (1982)	5
Fig. 2.3 – Balança desenvolvida por Cook (1983)	5
Fig. 2.4 – Plataforma de força de Lywood et al (1987)	6
Fig. 2.5 – Diagrama simplificado de um transdutor de força	7
Fig. 2.6 – Extensômetros	8
Fig. 2.7 - Ponte de Wheatstone	9
Fig. 4.1 – Esquema da Plataforma	16
Fig. 4.2 – Primeiro e segundo modos de vibração	17
Fig. 4.3 – Terceiro e quarto modos de vibração	17
Fig. 4.4 – Quinto e sexto modos de vibração	18
Fig. 4.5 – Peças da balança	19
Fig. 4.6 – Equipamento para medição das frequências de ressonância	20
Fig. 4.7 – Disposição dos acelerômetros piezoelétricos	20
Fig. 4.8 – Medição de frequências naturais – modo F_x	21
Fig. 4.9 – Medição de frequências naturais – modo F_y	21
Fig. 4.10 – Medição de frequências naturais – modo F_z	22
Fig. 4.11 – Medição de frequências naturais – modo M_x	22
Fig. 4.12 – Medição de frequências naturais – Modo M_y	23
Fig. 4.13 – Modelo numérico com sólidos – sem a tampa de acrílico	24
Fig. 4.14 – Modelo numérico com sólidos – mostrando a tampa de acrílico	25
Fig. 4.15 – Configuração deformada para o esforço F_x	29
Fig. 4.16 – Configuração deformada para o esforço F_y	29
Fig. 4.17 – Configuração deformada para o momento M_z	30
Fig. 4.18 – Posicionamento dos extensômetros – F_x , F_y e M_z	31
Fig. 4.19 – Configuração deformada para a força F_z	32
Fig. 4.20 – Configuração deformada para o momento M_x	32
Fig. 4.21 – Configuração deformada para o momento M_y	33
Fig. 4.22 – Posicionamento dos extensômetros – M_x e M_y	33
Fig. 4.23 – Posicionamento dos extensômetros – F_z	34
Fig. 4.24 – Placa de circuito impresso utilizada para ligação dos extensômetros	35
Fig. 4.25 – Balança montada em sua posição de trabalho	36
Fig. 5.1 – Ensaio estático – P1	38

Fig. 5.2 – Ensaio estático – P2.....	39
Fig. 5.3 – Ensaio estático – P3.....	39
Fig. 5.4 – Ensaio estático – P4.....	40
Fig. 5.5 – Ensaio estático – P5.....	40
Fig. 5.6 – Calibração da componente Fx.....	42
Fig. 5.7 – Calibração da componente Fy.....	42
Fig. 5.8 – Calibração da componente Mx.....	43
Fig. 5.9 – Calibração da componente My.....	43
Fig. 6.1 – Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	45
Fig. 6.2 – Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	46
Fig. 6.3 – Geometria dos modelos 1 e 3.....	49
Fig. 6.4 – Geometria dos modelos 2 e 4.....	49
Fig. 6.5 – Modelo 1 posicionado sobre a plataforma para ensaio.....	50
Fig. 7.1 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1.....	52
Fig. 7.2 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3.....	52
Fig. 7.3 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 1.....	53
Fig. 7.4 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 3.....	53
Fig. 7.5 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 1.....	54
Fig. 7.6 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 3.....	54
Fig. 7.7 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1.....	55
Fig. 7.8 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3.....	55
Fig. 7.9 – Modelo 1 fixado na plataforma.....	56
Fig. 7.10 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2.....	57
Fig. 7.11 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4.....	57
Fig. 7.12 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 2.....	58
Fig. 7.13 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4.....	58
Fig. 7.14 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 2.....	59
Fig. 7.15 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4.....	59
Fig. 7.16 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2.....	60
Fig. 7.17 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4.....	60
Fig. 7.18 – Modelo 2 fixado na plataforma.....	61
Fig. 7.19 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1.....	62
Fig. 7.20 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3.....	62
Fig. 7.21 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 1.....	63
Fig. 7.22 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 3.....	63

Fig. 7.23 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1.....	64
Fig. 7.24 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3.....	64
Fig. 7.25 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2.....	65
Fig. 7.26 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4.....	66
Fig. 7.27 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4.....	66
Fig. 7.28 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4.....	67
Fig. 7.29 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2.....	67
Fig. 7.30 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4.....	68

RESUMO

A presente dissertação de mestrado compreende o projeto e a execução de uma balança eletro-mecânica. Este equipamento tem por finalidade a medição das seis componentes dos esforços atuantes na base de modelos de edificações alteadas, ensaiadas em túnel de vento. As componentes medidas servirão como subsídio para o desenvolvimento do projeto estrutural e de fundações das edificações modeladas.

A fim de tornar o mais abrangente possível sua utilização, foi estudada a magnitude de esforços e frequências de vibração, devidas ao vento no modelo ensaiado, a que o sistema está submetido. Estas grandezas são os critérios de projeto para o desenvolvimento do sistema de medição. Deste modo, desenvolve-se um equipamento capaz de ser utilizado em estruturas dos mais variados tipos, como, por exemplo, torres, chaminés e edifícios alteados.

O sistema de medição em estudo consiste em três partes: um conjunto de células de carga dispostas de forma a medir as componentes dos esforços, um circuito eletrônico para amplificação e condicionamento do sinal produzido em cada célula de carga, e um microcomputador para aquisição e armazenamento dos dados produzidos pelo sistema.

Como resultados são apresentados os ensaios realizados em túnel de vento com modelos bem definidos, a fim de testar o sistema.

As conclusões do trabalho ficam por conta da interpretação dos resultados e análise da utilização deste tipo de equipamento para determinação de coeficientes globais de vento em edificações.

ABSTRACT

This work presents the project and the execution of an electro-mechanical base balance. This measurement system has the purpose of performing measurements of the six components of the physical efforts in the base of models of high-rise buildings, tested in boundary layer wind tunnels. The measurement of these six components will be used as subsidy for the design of actual building structures and foundations.

In order to make the measurement system as useful as possible, the magnitude of forces and moments, as well as the vibration frequencies due to the wind, were studied. These data are the project criteria for the development of the measurement system. In this manner, an equipment able to be used in several types of structures, as, for instance, towers, chimneys and high-rise buildings, was developed.

The measurement system consists of three parts: a set of load cells, allowed to measure the components of the efforts, an electronic circuit for amplification and conditioning of the sign produced in each load cell, and a microcomputer for acquisition and storage of the data produced by the system.

Results of wind tunnel tests of reduced models are presented, having the aim of testing the system.

The conclusions of the work are based in the interpretation of these results and analysis of the use of this equipment type for determination of global coefficients of wind in constructions.

1 INTRODUÇÃO

Ainda hoje, apesar do avanço da ciência da computação e dos métodos numéricos, a utilização de túneis de vento é imprescindível para a previsão da resposta de estruturas às cargas devidas ao vento. Muitas técnicas de modelagem numérica estão sendo desenvolvidas, mas estas ainda não prescindem de dados produzidos em túneis de vento para sua implementação e verificação.

Uma balança ou plataforma de força é um instrumento capaz de medir esforços resultantes, forças e momentos. Da mesma forma que uma pessoa ao subir em uma balança submete esta a ação de sua força peso e lê no mostrador o valor desta força (em kgf, por exemplo), esta plataforma deve quantificar as componentes de força desejadas ao estudo em questão.

Diversos ramos da engenharia utilizam-se de balanças para determinação de forças ou vibrações. Vibrações geradas por usinagem, avaliação de esforços gerados por veículos quando em aceleração, curvas ou frenagem, projetos de estruturas, interação fluido estrutura, esforços de vento, esforços de gatos ao caminhar (biomecânica) entre outros, são exemplos de utilização de plataformas de forças.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma plataforma de força capaz de medir as seis componentes do esforço de vento resultantes na base de um modelo reduzido (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) quando ensaiado em túneis de vento.

Fará parte do sistema de medição um condicionador de sinais, um microcomputador dotado de sistema de conversão analógico/digital e um programa computacional para aquisição dos dados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para a realização do trabalho foram estudados os diversos tipos de balanças existentes na bibliografia, como está descrito no capítulo 2.

Critérios teóricos de projeto de células de carga foram verificados, a fim de estudar a melhor alternativa eletro-mecânica possível para a finalidade a qual destina-se o sistema de medição de esforços. Esta revisão de conceitos teóricos está descrita no capítulo 3.

No capítulo 4 é descrito o procedimento para o desenvolvimento do trabalho, modelagem numérica do sistema estrutural, construção da plataforma propriamente dita, determinação dos pontos de colagem de e a ligação entre os extensômetros, e o amplificador de sinal.

Após ser determinado o modelo e o tipo de sistema de medição a ser adotado, o projeto foi concluído e suas premissas foram verificadas, no capítulo 6, através de calibração estática (determinação das constantes de calibração de cada componente) e verificação de frequências naturais dos seis principais modos de vibração.

O capítulo 7 se dedica a apresentar e discutir os resultados obtidos em ensaios de modelos em túnel de vento com a utilização do equipamento desenvolvido.

A conclusão do trabalho se dá, no capítulo 8, com a comparação de resultados já obtidos no túnel de vento com medições feitas com a plataforma de força, verificando assim a eficácia do sistema.

As considerações finais e previsão de trabalhos futuros é abordada no último capítulo, de número 9.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PLATAFORMAS DE FORÇAS

A idéia de medir esforços com uma plataforma de forças não é recente. Na sua tese de doutorado, Roesler (1997) elaborou uma revisão bibliográfica consistente. Elftman (1938) construiu uma plataforma para medir os esforços verticais e horizontais do caminhar humano. Sua balança consistia em uma base fixa por molas que, quando solicitadas permitiam um certo deslocamento e, em um ponto fixo próximo este deslocamento era medido permitindo assim o cálculo do esforço.

A primeira plataforma a utilizar a tecnologia do extensômetro foi desenvolvida por Cunningham e Brown (1952). Tinha base de aço e quatro colunas e, em cada coluna existiam seis extensômetros que tinham como função medir os esforços nos três eixos. Esta plataforma tinha uma frequência natural muito baixa na direção transversal. Os efeitos desfavoráveis desta baixa frequência foram atenuados posteriormente pelo desenvolvimento de um sistema de amortecimento viscoso.

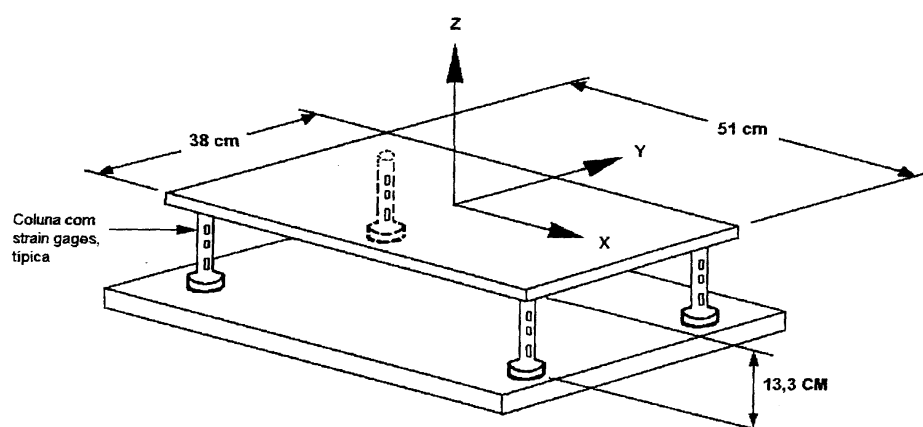


Fig. 2.1 – Plataforma de força de Cunningham e Brown (1952)

Na área de biotecnologia, vários outros pesquisadores construíram balanças para os mais variados fins. Forças exercidas por animais ao caminhar, força de um nadador ao saltar na piscina, entre outros, foram objetos de estudos e pesquisas ao longo do tempo.

Utilizado por Gola em 1978, o conceito de plataforma suspensa foi proposto por Paul e McLeich (apud Roesler, 1997). Neste conceito, em vez da plataforma se apoiar sobre os elementos, ela é suspensa por eles. A vantagem deste tipo de plataforma é separar os esforços em diferentes eixos com bastante eficácia, onde lâminas podem ser utilizadas para colagem dos extensômetros sem problema de flambagem ou instabilidade dinâmica, porém tem-se como desvantagem a dificuldade de fabricação e alinhamento. O projeto de Gola (1980) é uma plataforma triangular equilátera com 620mm de lado, suspensa, que possibilita a medição de forças e momentos nos três eixos.

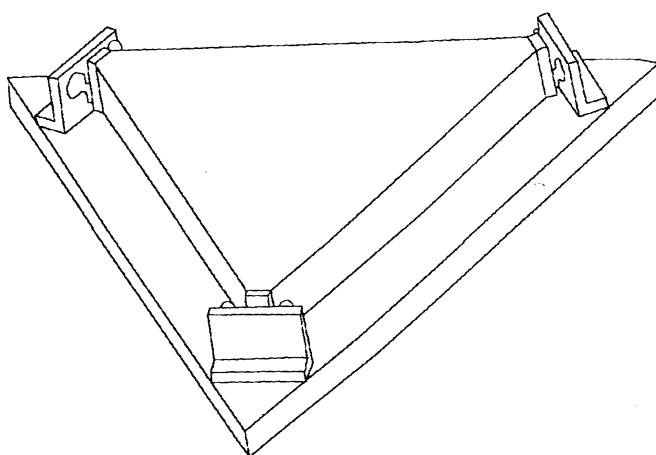


Fig. 2.2 – Plataforma de força de Gola (1980)

Para utilização em túneis de vento, Tschanz (1982) projetou e construiu uma balança que mede cinco componentes de forças. Conforme podemos ver na Fig. 2.3 o modelo é fixado a base e esta, através de hastes, transfere o esforço produzido pelo vento no modelo para células de carga a fim de quantificá-los. Na figura observa-se também o sistema de hastes.

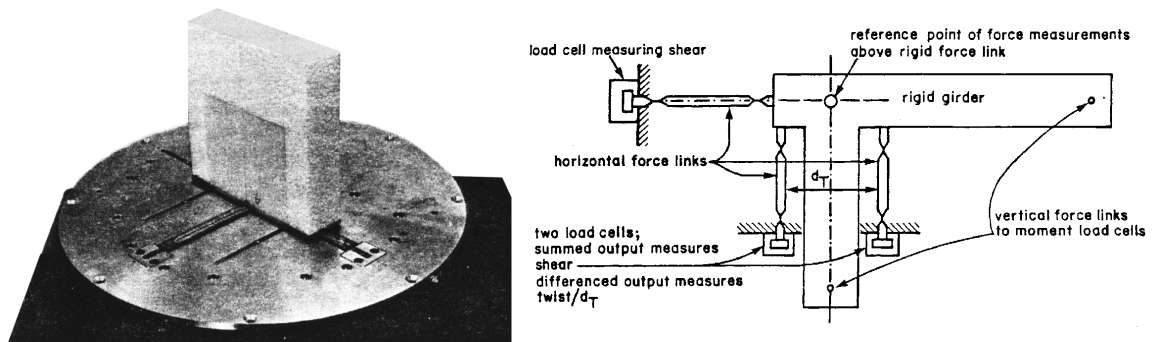


Fig. 2.3 – Balança construída por Tschanz (1982)

Cook (1983), assim como Tschanz, desenvolveu uma balança para túnel de vento, porém utilizando sensores piezelétricos. Esta balança possui quatro células de carga dispostas conforme a Fig. 2.4. Com esta disposição de células de carga cada componente medida é uma combinação de outras, resultado obtido no pós-processamento para cada uma das seis componentes de força.

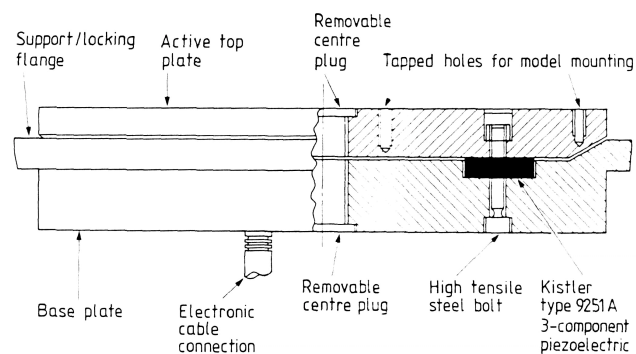


Fig. 2.4 – Balança desenvolvida por Cook (1983)

Em 1987, Lywood et al construíram uma plataforma de força para pesquisa em controle de postura de pequenos animais. Conforme pode-se observar no esquema da Fig. 2.5, a plataforma é composta por uma base na qual são engastados os blocos C. Estes são unidos aos elementos B, que ligam a viga D e as barras A. Nos elementos A, B e C são colados extensômetros para a medição de esforços.

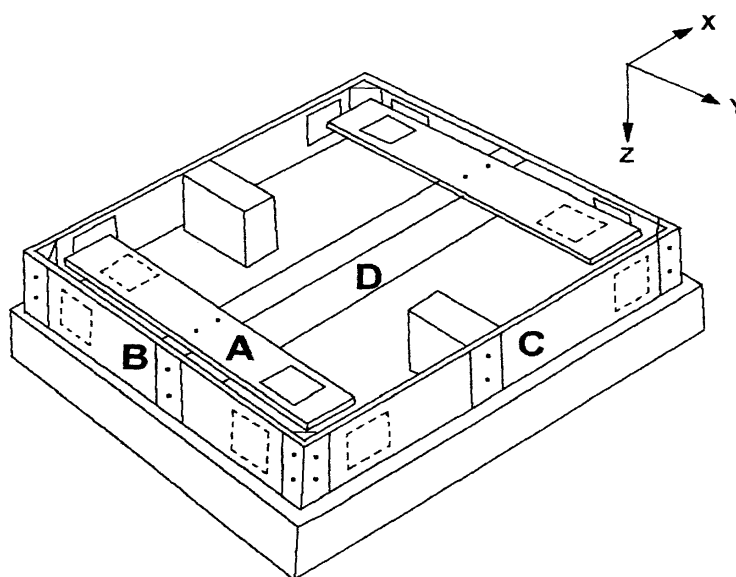


Fig. 2.5 – Plataforma de força de Lywood et al (1987)

Roesler (1997) desenvolveu uma plataforma de forças subaquática para medições de forças e momentos para utilização em biomecânica, seguindo o modelo proposto por Lywood et al (1987).

Analisando os estudos mencionados neste capítulo, observa-se que os critérios para desenvolvimento de plataformas de forças para túneis de vento ou biomecânicas são os mesmos.

Admite-se que a falta de publicações por parte dos fabricantes como KISTLER e AMTI se deve a proteção de seus projetos, apesar do grande desenvolvimento tecnológico por eles obtidos.

2.2 CÉLULAS DE CARGA – TRANSDUTORES DE FORÇA

Em um sistema simples com uma mola e uma régua, ao colocarmos uma massa sobre a mola, esta se deformará, e esta deformação pode ser medida na régua. Através da relação constitutiva da mola obtém-se a força peso da massa. O elemento ativo deste sistema é a composição mola – régua.

Chama-se elemento ativo em um sistema de medição de forças aquele sub-sistema responsável direto pela quantificação de uma grandeza qualquer (distância ou tensão elétrica, por exemplo) que pode ser relacionada com a força aplicada.

Observa-se que em sua maioria estes elementos ativos de medição de cargas são compostos por um material resistente a deformação e por um elemento de quantificação desta deformação.

Um transdutor de força é qualquer dispositivo que, quando excitado, fornece uma resposta (saída) proporcional à excitação (entrada).

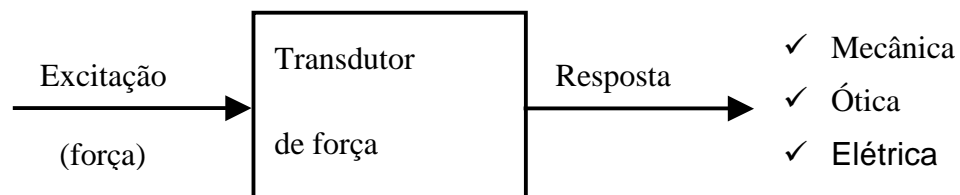


Fig. 2.6 – Diagrama simplificado de um transdutor de força

Na Fig. 2.6 tem-se um diagrama simplificado onde um transdutor de força é utilizado para transformar a grandeza que se quer medir, no caso força, em uma grandeza de outra natureza.

Vários tipos de transdutores são usualmente utilizados na engenharia. Os transdutores capazes de captar sinais de movimento (vibrações, acelerações) podem ser elétricos, mecânicos ou óticos, entre outros. Por facilidade de utilização e aquisição dos dados os elétricos são os mais utilizados. Dentre estes os que mais se destacam são o LVDT (*linear variable differential transformer*), o acelerômetro e o extensômetro de resistência elétrica. Neste projeto, um criterioso estudo sobre o tipo de transdutor a utilizar foi realizado. Analisadas as características e condições de adequação de cada um destes transdutores, foi escolhido para este projeto o extensômetro, cujo funcionamento é descrito a seguir.

2.2.1 Extensômetros

Extensômetro significa sensor de deformação. No presente trabalho, serão utilizados extensômetros de resistência elétrica, que medem deformações através da variação da resistência elétrica.

Utilizado com sucesso desde a segunda guerra mundial em diferentes áreas da engenharia, o extensômetro de resistência elétrica, ou *strain gage*, é um sensor capaz de medir deformações mecânicas relativas localizadas com grande precisão. Tem como vantagem sua utilização em locais de difícil acesso, como por exemplo na asa de um avião em vôo, peças internas de equipamentos e medições dinâmicas em geral.

Os extensômetros são fabricados com técnicas de circuito impresso, possibilitando complexos arranjos. Na Fig. 2.7 podemos ver que os extensômetros podem ter um ou mais elementos. Para medições de deformações nos mais variados elementos mecânicos tem-se os diferentes extensômetros. Por exemplo, para situações de tensões uniaxiais utiliza-se um sensor que mede em uma só direção e assim por diante.

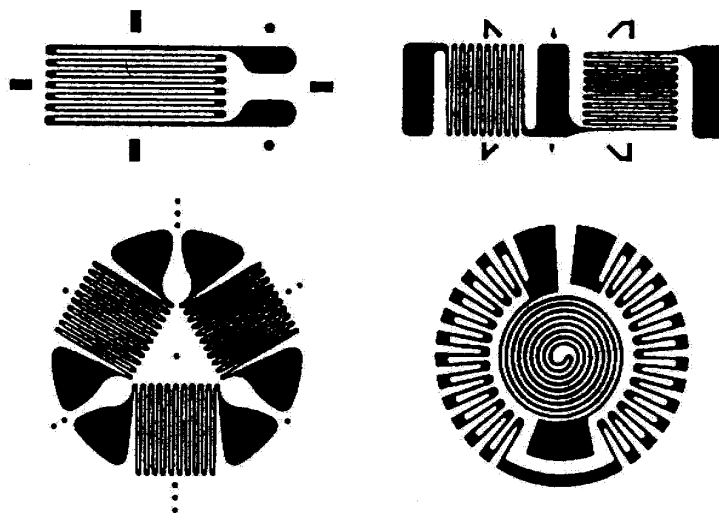


Fig. 2.7 – Extensômetros

Em 1856, Lord Kelvin enviou para *The Royal Philosophical Society* seus resultados com experimentos em que demonstrou que a resistência elétrica de um fio de cobre ou ferro, quando submetido a uma deformação elástica, sofre variação. Quando o comprimento do fio aumenta, sua seção transversal diminui, aumentando a dificuldade dos elétrons circularem pelo condutor, ou seja, aumentando a resistência elétrica do sensor.

Lord Kelvin demonstrou que para uma variação de comprimento relativo do fio há uma relação linear com a variação relativa da resistência do fio. Esta relação é constante quando a deformação se processa na região elástica do material. Podemos escrever:

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (2.1)$$

onde, l é o comprimento do fio, R sua resistência elétrica e k é a constante do fio, ou no extensômetro, o *gage factor*.

A sensibilidade à variação de temperatura é uma importante característica do extensômetro. Na maioria das aplicações essa variação é compensada no circuito elétrico, através da montagem dos sensores em *Ponte de Wheatstone*, como mostra a Fig. 2.8. Desta forma, a variação de resistência devida à temperatura, que ocorre em todos os sensores do circuito em conjunto, é praticamente eliminada pelo circuito elétrico.

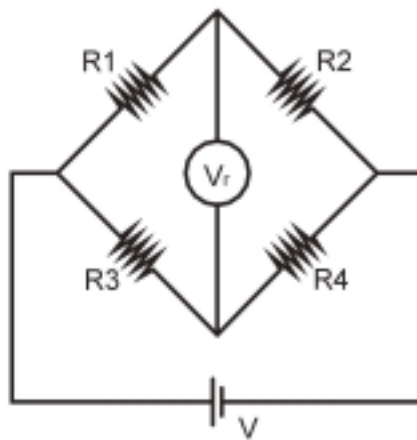


Fig. 2.8 - Ponte de Wheatstone

Atualmente todos os extensômetros trabalham colados ao material que se deseja medir, tornando evidente a importância da conexão mecânica entre material e extensômetro. O elemento de fixação a ser utilizado, a cola, deve possuir algumas propriedades específicas, como alta resistência mecânica, grande resistência ao cisalhamento, ser altamente isolante elétrico e fácil de aplicar. A resistência mecânica do adesivo é muito importante pois irá transmitir ao sensor as deformações atuantes. A colagem deve obedecer as recomendações do fabricante para que o transdutor funcione da acordo com o esperado. Superfícies limpas, isentas de óleos e poeira, cola adequada, cuidados com a cura da cola (térmica ou não), são aspectos que devem ser levados em conta no momento de fixar um extensômetro.

Pode-se deduzir matematicamente a sensibilidade de um extensômetro.

A resistência do fio é descrita como:

$$R(\rho, l, D) = \frac{\rho l}{A} = \frac{4l\rho}{D^2\pi} \quad (2.2)$$

onde, l é o comprimento, A é a área, D o diâmetro e ρ a resistividade do fio.

Causando uma deformação elástica infinitesimal dl ao fio, tem-se:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{2dD}{D} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2.3)$$

e, sendo

$$\nu = -\frac{dD/D}{dl/l} \quad (2.4)$$

o coeficiente de Poisson, substitui-se esta equação na 2.3 anterior para obter:

$$k = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (2.5)$$

que é o *gage factor*, ou sensibilidade do extensômetro.

3 CRITÉRIOS DE PROJETO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇAS

Este capítulo resume informações sobre o uso de plataformas de força e também sobre os tipos de equipamentos utilizados e suas evoluções.

Para cada sistema de medição desenvolvido, dependendo da sua aplicação, diferentes requisitos são necessários como, por exemplo, o número de componentes de força medidos, a precisão das medições, o tipo de elemento ativo na plataforma de força (célula de carga), as frequências naturais, a gama de esforços previstos, entre outros. Estes requisitos serão comentados a seguir.

Todos os critérios de projeto aqui definidos são fruto da interpretação das necessidades e características de ensaios realizados no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.

3.1 CRITÉRIOS DE PROJETO

3.1.1 Componentes de Força Medidas

Cada sistema, conforme suas necessidades, requer um certo grau de componentes medidos, que podem ser forças ou momentos no sentido dos 3 eixos coordenados (x e y horizontais e z vertical): F_x , F_y , F_z , M_x , M_y e M_z . Para a balança mencionada no capítulo anterior, somente a componente de força vertical, F_z , é necessária, pois o que interessa ao seu usuário é seu peso, força esta que atua no sentido vertical. Para aplicações em túnel de vento é interessante que a plataforma seja capaz de medir seis componentes de força.

3.1.2 Preci o do Sistema – Sensibilidade

A precisi o da plataforma de forças   função do fim a que esta se destina. A fim de evitar a destruição em nossas estradas de rodagem, os responsáveis pelo trânsito fazem eventualmente verificações na quantidade de peso que veículos de carga transportam. Para tanto se utilizam de balanças que medem a componentes F_z (peso do veículo). Sabendo que o peso destes veículos fica na casa das centenas de kN, dezenas de tf, não seria interessante e

nem viável (construtiva e economicamente) projetar-se um sistema capaz de medir com precisão de décimos de N.

No caso da balança projetada para o túnel de vento, desenvolvida nessa dissertação, a magnitude de forças medidas se encontra na faixa de 500 N a 600 N, de forma que uma precisão de 5 N (1%) se torna bastante razoável.

3.1.3 Freqüência Natural

A freqüência fundamental ou natural da plataforma deve ser muito maior que a máxima freqüência medida, a fim de evitar que uma parte do sinal lido seja amplificada pelo sistema mecânico, quando se tratar de análises dinâmicas. O espectro de resposta da plataforma será dado pela multiplicação do espectro de entrada (excitação do vento no modelo) pela função de transferência da própria plataforma.

Levando em consideração o fato de que quanto mais rígida for a estrutura mais alta será sua freqüência natural, para reduzir efeitos dinâmicos é interessante elevar ao máximo a rigidez da balança.

O ideal seria a balança possuir grande sensibilidade e grande rigidez, proporcionando medições bastante fiéis à excitação. Desde já, fica evidenciado uma contradição entre boas condições de sensibilidade e freqüência natural. Uma vez que estas duas grandezas são inversamente proporcionais, a condição ideal não é realizável, e, na prática, trabalha-se com essas variáveis até atingir-se um ponto ótimo, adequado à utilização desejada.

A freqüência natural mínima desejada para este projeto encontra-se na ordem de 150Hz, pois a freqüência de excitação do vento no modelo tem, em geral, valores aquém deste.

3.1.4 Desacoplamento entre Componentes de Força e Momentos

O carregamento em um eixo não pode ocasionar distorções no carregamento de outro eixo. Chamado de interferência entre componentes (*cross talk*), o acoplamento de forças e momentos deve ser minimizado por um projeto mecânico cuidadoso. Pode-se, inclusive,

também desacoplar os esforços numericamente, com auxílio de um programa computacional, no pós-processamento do sinal.

3.1.5 Independência das Condi es Externas

A independência de fatores externos como temperatura, pressão e umidade é obtido através de um projeto mecânico e elétrico cuidadoso. Se entende neste critério que a temperatura externa, ou suas varia es, por exemplo, não devem interferir no resultado das medi es.

3.2 RESUMO DOS PRÉ-REQUISITOS

Como resumo dos pré-requisitos descritos neste capítulo a plataforma de forças deve apresentar:

- Capacidade de mensurar 3 momentos e 3 forças;
- Preci o de 5 N e capacidade de absorver até 500 N sem danificar-se;
- Mínima freq ncia natural de vibra o em 150 Hz;
- Bom desacoplamento entre as componentes medidas, ou seja, baixa interferência;
- Independência de fatores externos.

4 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DE FORÇAS

Inicialmente pensou-se qual tipo de sensor utilizar. Descartou-se a utilização de sensores piezoelétricos pela dificuldade de medições estáticas com os mesmos. A alternativa técnica e economicamente viável foi utilizar extensômetros de resistência elétrica em função da facilidade de aquisição e boa relação custo – benefício.

Dentre os vários tipos de plataformas de forças mostrados na revisão bibliográfica e compatíveis com extensômetros, o modelo escolhido para ser desenvolvido nesta dissertação é o de Lywood et al (Fig. 2.5) e também utilizado por Roesler (1997). A justificativa para esta escolha reside nos seguintes fatos:

- Sistema mecânico simples de ser construído;
- Apresenta baixo acoplamento mecânico entre os diferentes eixos (cerca de 3%);
- Pode ser facilmente modelado em programas computacionais;
- Cada componente é medida por uma *ponte de Wheatstone* completa e independente, isto é, a medição de uma direção específica é feita através de uma única ponte, evitando operações analíticas entre as saídas de cada conjunto de sensores.

4.1 CONDICIONAMENTO DO SISTEMA MECÂNICO – PRIMEIRA ETAPA

A plataforma escolhida foi modelada computacionalmente com o objetivo de dimensionar as barras desta para que obedeça aos pré-requisitos descritos anteriormente. O programa computacional utilizado para fazer a modelagem foi o SAP2000, baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido pela empresa norte-americana *Computers and Structures, Inc.*

As dimensões escolhidas em um primeiro momento para a plataforma estão mostradas na Fig. 4.1:

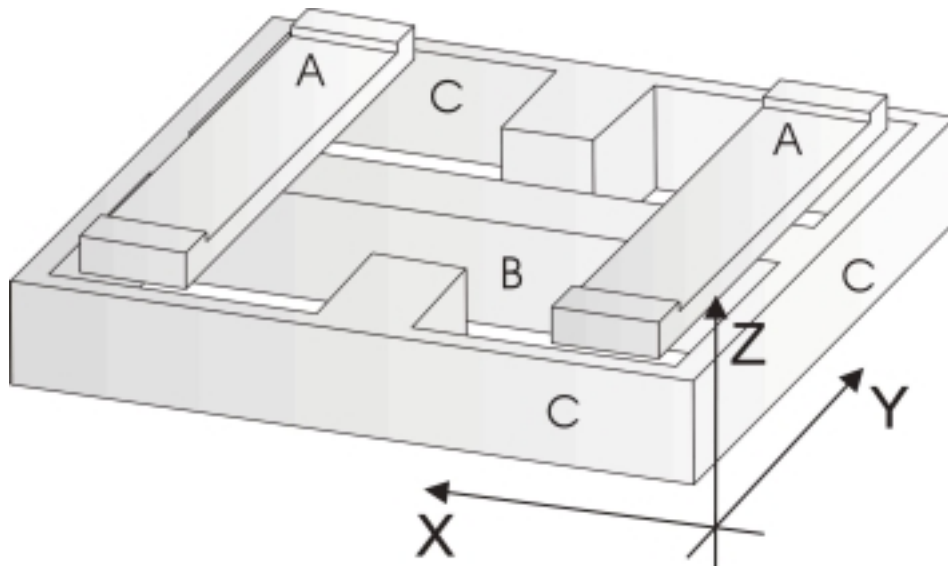


Fig. 4.1 – Esquema da Plataforma

As seções das barras indicadas nas figuras são as seguintes:

- Barra A – $14 \times 6 \text{ mm}^2$
- Barra B – $20 \times 16 \text{ mm}^2$
- Barra C – $10 \times 20 \text{ mm}^2$

O comprimento externo do quadro formado pelas barras C é de 160 mm. O material utilizado para as peças metálicas, barras A, B e C, é aço inox, por ter alta durabilidade, ser imune a oxidação e ter características mecânicas bem conhecidas, além de apresentar bom acabamento.

A massa específica do aço inox é 7.850 kg/m^3 sendo seu peso específico 77.522 N/m^3 . Seu módulo de elasticidade é $1,96 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

As barras A são fixadas à barra B por meio de dois parafusos, engastando uma à outra. Sobre esta estrutura metálica foi acoplada uma tampa em acrílico para dar fechamento ao equipamento e permitir fixação de modelos reduzidos. O acrílico possui massa específica de 1.200 kg/m^3 e peso específico de 11.780 N/m^3 . Seu módulo de elasticidade é de $3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$.

A primeira simulação computacional foi baseada na modelagem numérica da plataforma com elementos finitos unidimensionais (barras) e bidimensionais (placas), como mostram as Fig. 4.2, 4.3 e 4.4. Em preto, estão representadas as barras da estrutura, e em cinza os elementos que formam a base de acrílico na qual se apoiarão os modelos que serão ensaiados no túnel de vento.

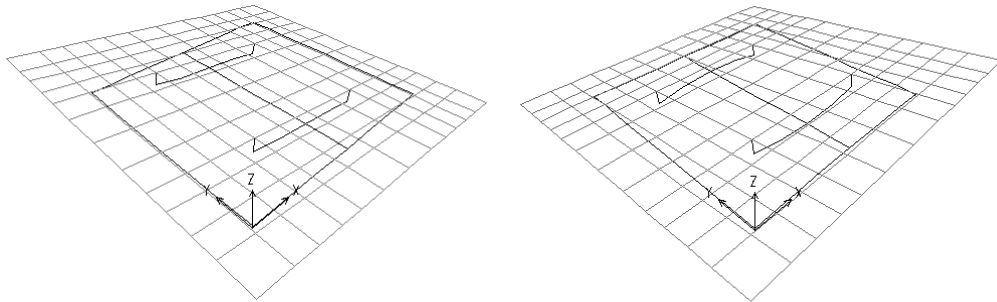


Fig. 4.2 – Primeiro e segundo modos de vibração

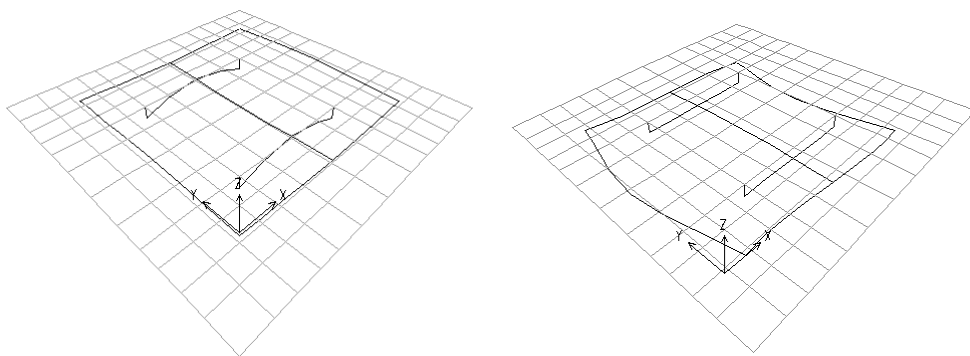


Fig. 4.3 – Terceiro e quarto modos de vibração

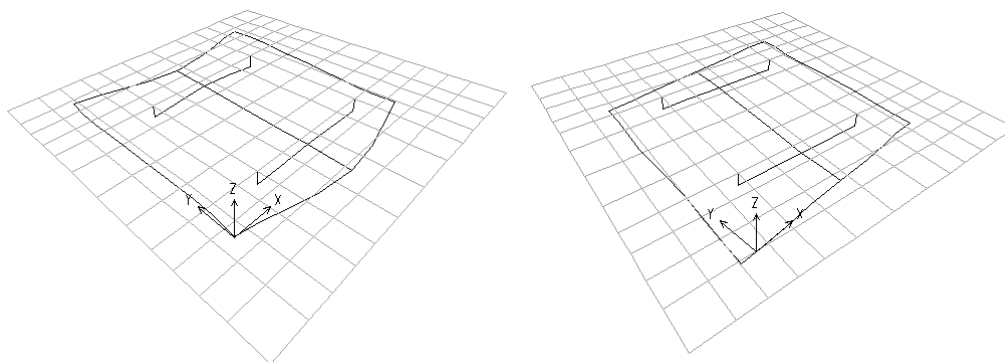


Fig. 4.4 – Quinto e sexto modos de vibração

As frequências calculadas através do modelo numérico para os modos apresentados nas Fig. 4.2 a 4.4 estão na Tab. 4.1:

Tab. 4.1 – Frequências calculadas

Modo	Período (s)	Frequência (Hz)	Forma Modal
1	0,002494	400,96	My
2	0,001947	513,61	Mx
3	0,001710	584,80	Fz
4	0,001575	634,92	Fx
5	0,001488	672,04	Fy
6	0,001342	745,16	Mz

Estando estes valores adequados aos critérios de projeto escolhidos, as peças constituintes da plataforma foram produzidas. Observa-se contudo que a fixação do modelo à balança faz cair os valores das frequências, devido ao acréscimo de massa. Deve-se portanto

limitar-se o uso da balança à modelos leves. A Fig. 4.5 mostra a primeira etapa de fabricação da plataforma de forças.

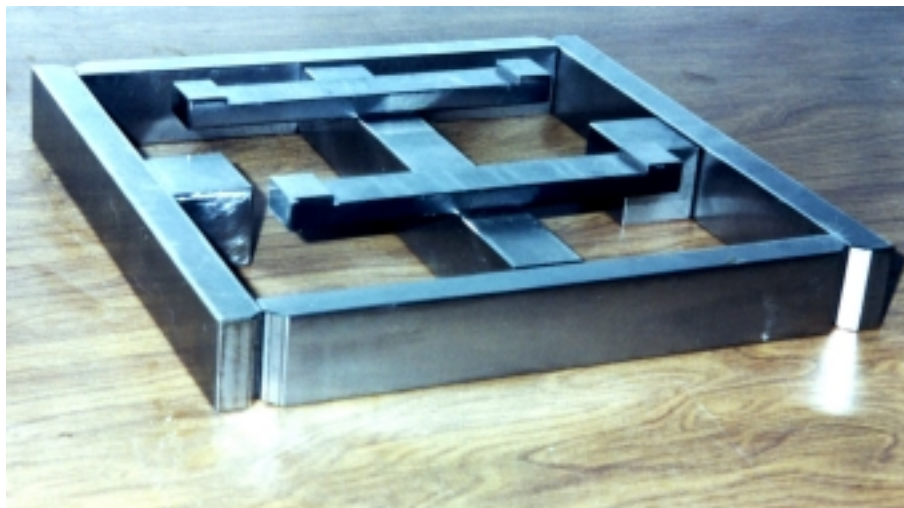


Fig. 4.5– Peças da balança

4.1.1 Verificação de Frequências

Após montada, restava determinar as frequências naturais de cada modo de vibração apresentadas pela plataforma, a fim de comparar com os resultados da simulação numérica. Utilizando dois acelerômetros piezoelétricos, foi possível determinar quais eram estas frequências. As Fig 4.6 e 4.7 mostram o equipamento de medição montado para determinação destas.

Nesta análise foram utilizados dois acelerômetros Bruel&Kjaer modelo 4371 conectados a um amplificador de carga da mesma marca, modelo Nexus de 4 canais. A saída foi monitorada por um osciloscópio digital Tektronics TDS210 de dois canais e também enviada para um micro-computador provido de placas de conversão analógico-digital Computer Board DAS12/330 mapeados em uma escala de tensão entre -5 e $+5$ volts, com precisão de $2,44$ mV, para registro e posterior processamento dos dados.



Fig. 4.6 – Equipamento para medição das frequências de ressonância

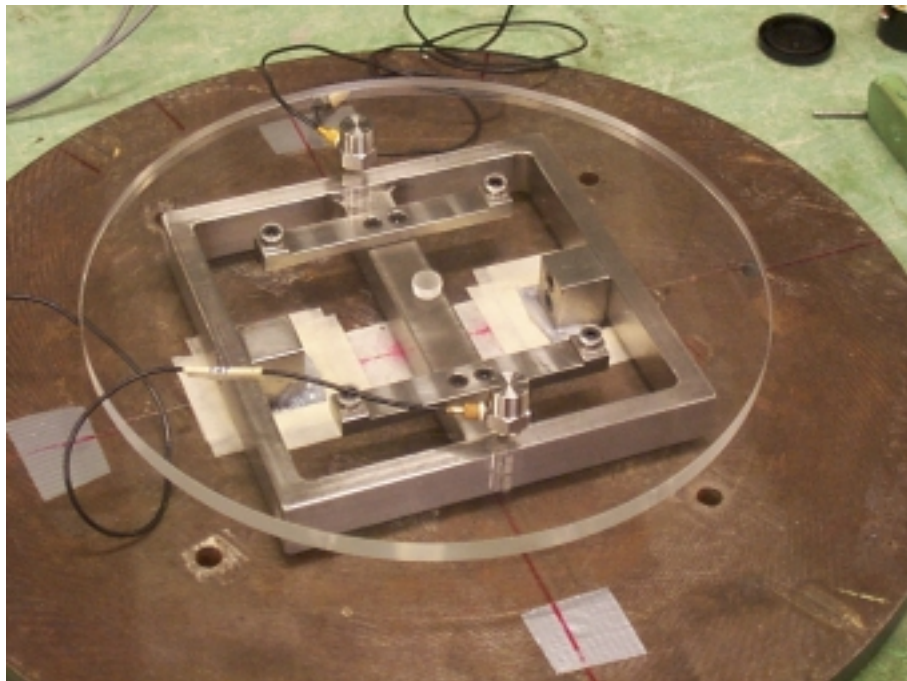


Fig. 4.7 – Disposição dos acelerômetros piezoelétricos

As Fig. 4.8 à 4.12 mostram os resultados das medições feitas.

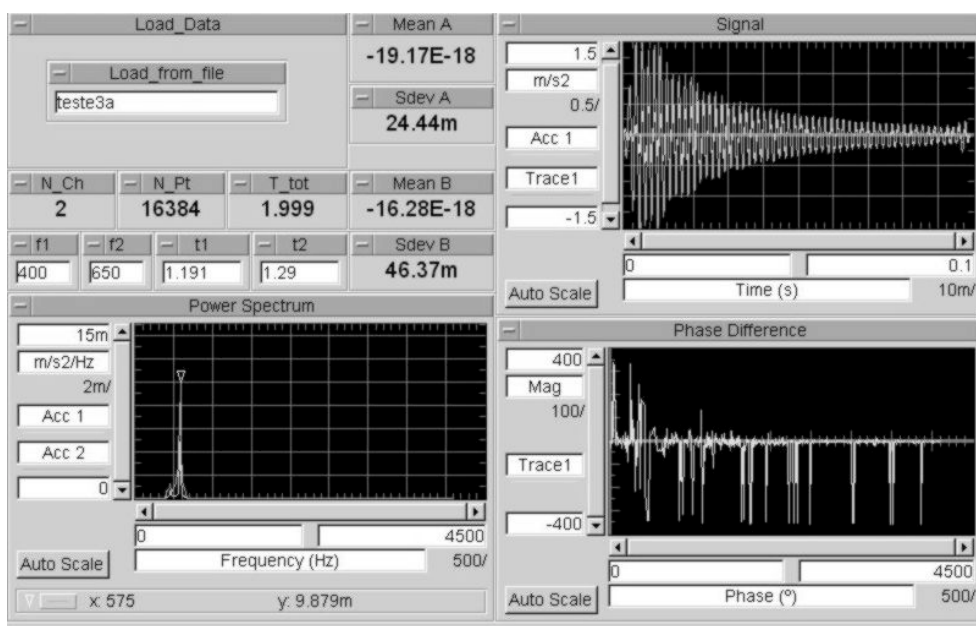


Fig. 4.8– Medição de frequências naturais – modo Fx

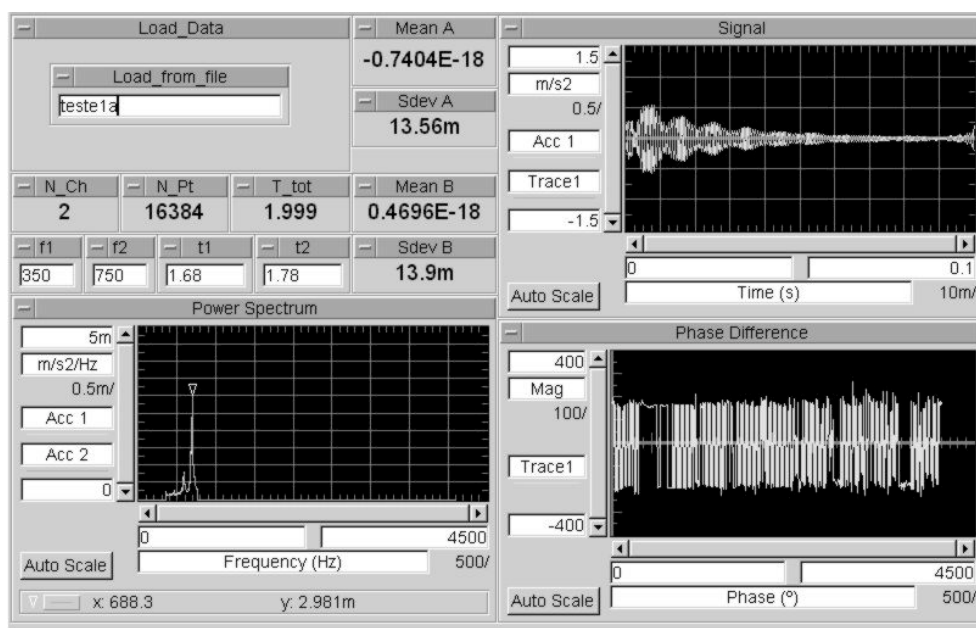


Fig. 4.9 – Medição de frequências naturais – modo Fy

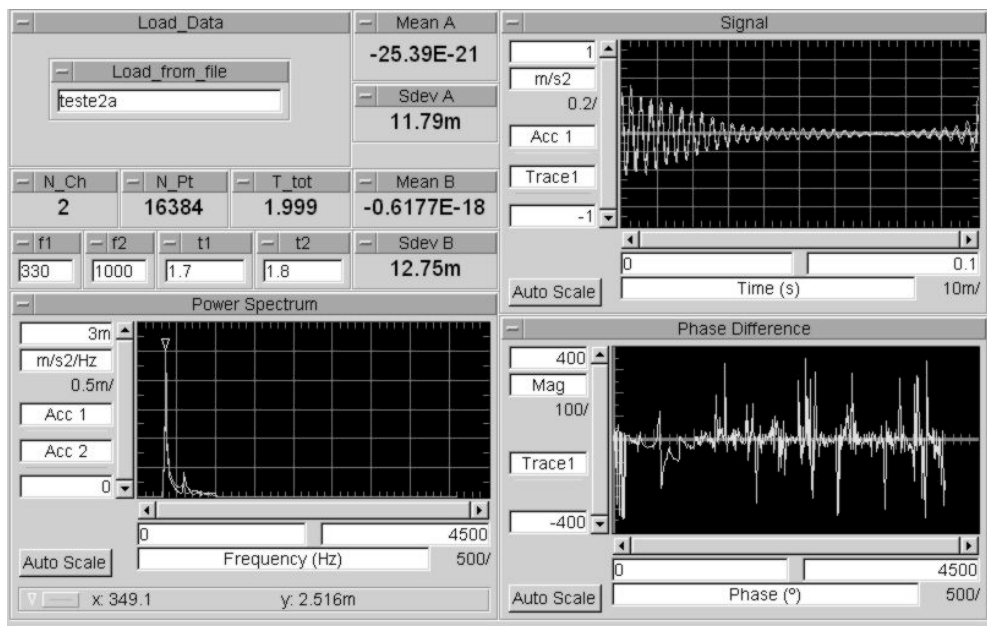


Fig. 4.10 – Medição de frequências naturais – modo Fz

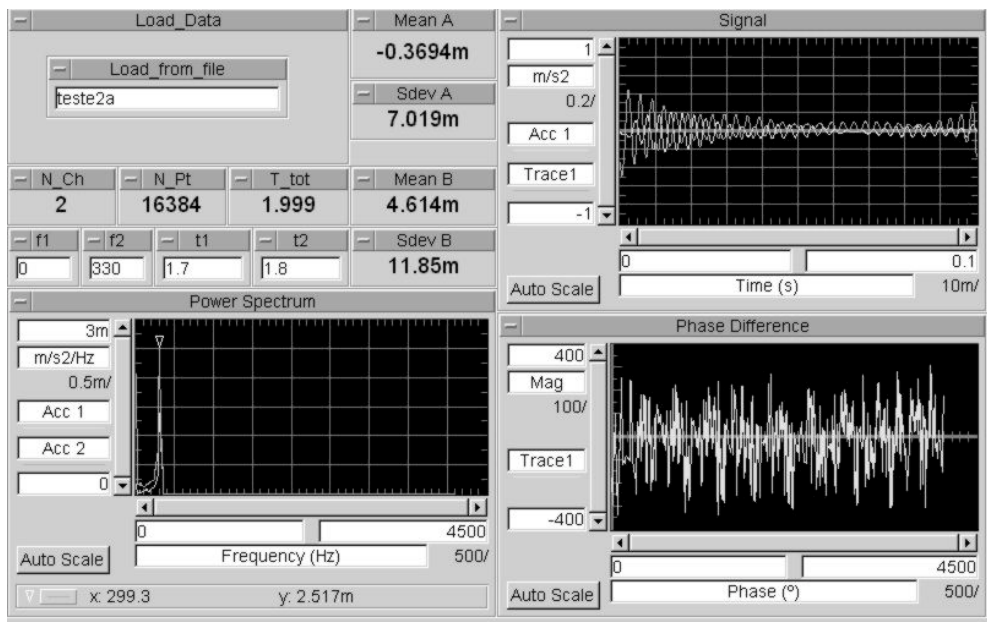


Fig. 4.11 – Medição de frequências naturais – modo Mx

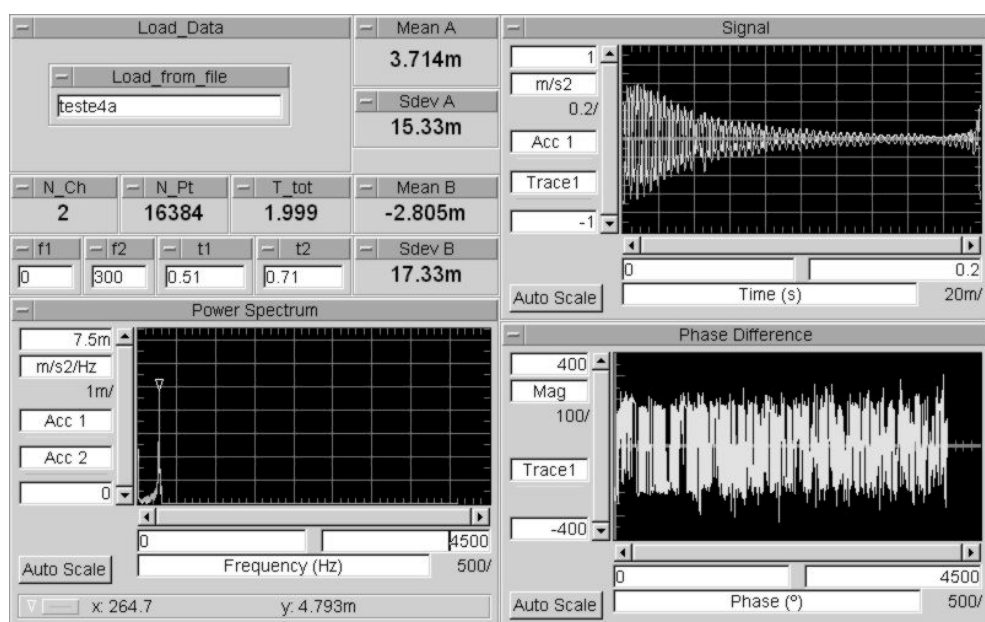


Fig. 4.12 – Medição de freqüências naturais – Modo My

Tab. 4.2 – Resultados da análise modal:

Modo	Freqüência (Hz)		Forma Modal Principal
	Simulação	Medido	
1	400,96	264,70	My
2	513,61	299,30	Mx
3	584,80	349,10	Fz
4	634,92	575,00	Fx
5	672,04	688,30	Fy
6	745,16	–	Mz

Desta verificação de frequências de vibração duas conclusões são importantes. A primeira é que o modelo numérico gerado para simular o sistema mecânico não é adequado, pois apresenta resultados pouco precisos. A segunda observação é que o sistema mecânico está mais rígido do que o necessário, sendo possível torná-lo mais esbelto e conseqüentemente mais sensível, sem problemas de amplificação dinâmica.

4.1.2 Adequação do Modelo Numérico

No intuito, então, de melhorar a sensibilidade da plataforma, o primeiro passo foi gerar um modelo numérico que simulasse melhor o sistema mecânico, para que quaisquer alterações propostas na geometria original pudessem ser testadas com confiabilidade.

Decidiu-se então utilizar elementos finitos sólidos para simular as barras. A placa superior foi mantida com elementos do tipo placa, porém com o formato geométrico real da placa da balança. O modelo numérico utilizado está mostrado nas Fig. 4.13 e 4.14.

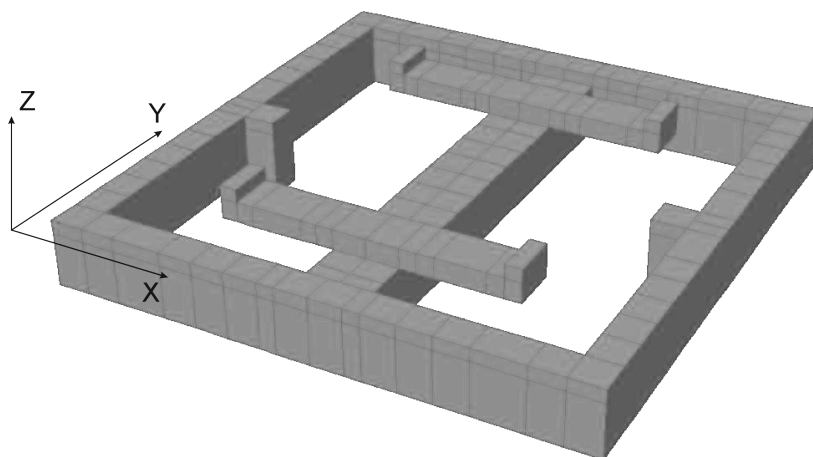


Fig. 4.13 – Modelo numérico com sólidos – sem a tampa de acrílico

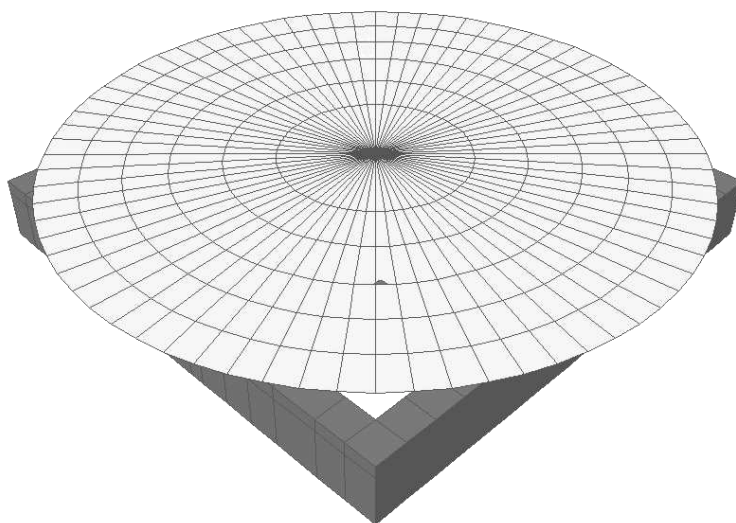


Fig. 4.14 – Modelo numérico com sólidos – mostrando a tampa de acrílico

Uma vez conhecidas as frequências obtidas na verificação dinâmica, foi possível aferir se o novo modelo numérico era fiel ao sistema físico.

Os resultados obtidos no segundo modelo numérico, são apresentados na Tab. 4.3.

As pequenas diferenças entre o ensaio dinâmico e os resultados obtidos com o segundo modelo numérico podem ser explicadas pela imprecisão do método de análise ou imprecisões na aquisição dos dados, sendo estes resultados considerados satisfatórios.

Tab. 4.3 – Análise modal: experimental – numérica

Modo	Frequência (Hz)			Forma Modal Principal
	Simulação	Medido	Erro (%)	
1	286,04	264,70	8,06	My
2	305,06	299,30	1,92	Mx
3	367,51	349,10	5,27	Fz
4	547,95	575,00	-4,70	Fx
5	734,21	688,30	6,67	Fy
6	890,47	–	–	Mz

4.2 CONDICIONAMENTO DO SISTEMA MECÂNICO – SEGUNDA ETAPA

Uma vez de posse de uma simulação eficiente, foram realizadas pequenas alterações nas seções das peças da balança para melhorar a sensibilidade sem causar interferências dinâmicas.

As alterações geométricas propostas para a plataforma são as seguintes:

- Barra A – de 14 x 6 mm² passou a ter seção de 14 x 4 mm²
- Barra B – não foi alterada, manteve-se com 20 x 16 mm²

- Barra C – de 10 x 20 mm² foi usinada para ficar com seção de 7 x 20 mm²

Com estas alterações, as frequências de ressonância foram recalculadas, e são mostradas na Tab. 4.4.

Tab. 4.4 – Resultados da análise modal numérica

Modo	Período (s)	Frequência (Hz)	Forma Modal Principal
1	0.00573	174.58	My
2	0.00482	207.64	Mx
3	0.00446	224.42	Fx
4	0.00380	262.88	Fz
5	0.00373	267.95	Fy
6	0.00344	291.04	Mz

Estes resultados ratificam a alteração proposta para o sistema, pois as frequências não diminuem o bastante para causar problemas de imprecisão por amplificação dinâmica, mas aumentam significativamente a sensibilidade do equipamento.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS POSIÇÕES DE COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS

Para determinar a posição mais efetiva para cada conjunto de extensômetros, foram combinados critérios de máximas deformações, para conseguir a máxima sensibilidade em uma direção e desacoplamento de sinais com as demais componentes. A seguir são mostradas figuras das deformações no sistema mecânico para cada componente de forças e momentos e

os pontos de colagem de cada conjunto de extensômetros responsáveis pela aquisição da componente respectiva.

Os extensômetros utilizados são da marca Kyowa, modelo KGF-5-120-C1-11. Estes extensômetros apresentam resistência elétrica de 120Ω e *gage factor* de 2,1.

Como será montada uma ponte completa para cada direção, é importante ter sempre dois pontos solicitados a compressão e dois pontos solicitados a tração para cada eixo ou componente, pois é nessa situação que ocorre o desbalanço na *ponte de Wheatstone*, produzindo o sinal de saída.

4.3.1 Forças Horizontais F_x , F_y e Momento Vertical M_z

A parte da estrutura responsável pela medição destas componentes é o quadro externo da balança, composto pelas barras C. O esforço é transferido à este conjunto de barras através da tampa de acrílico e pelas barras A e B. Para determinar a posição ideal de colagem destes 3 conjuntos de extensômetros, foi utilizado novamente o modelo numérico já citado. Cada esforço foi gerado no modelo, como caso independente de carregamento, obtendo assim a configuração deformada para cada caso.

Esta configuração deformada das barras C é visualizada nas Fig. 4.15 a 4.17, e evidenciam a posição ideal para os extensômetros.

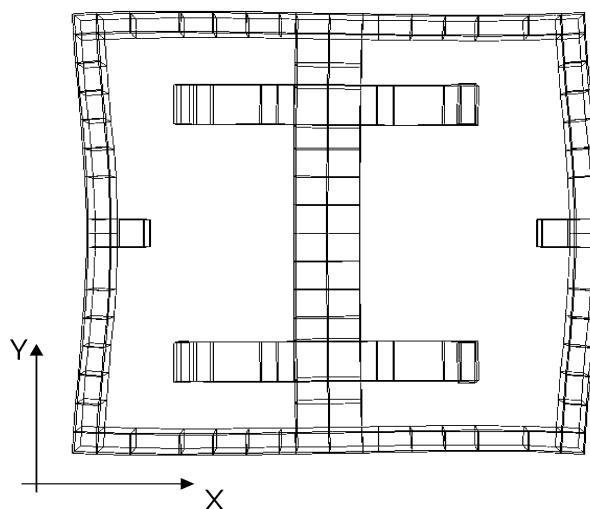


Fig. 4.15- Configuração deformada para o esforço F_x

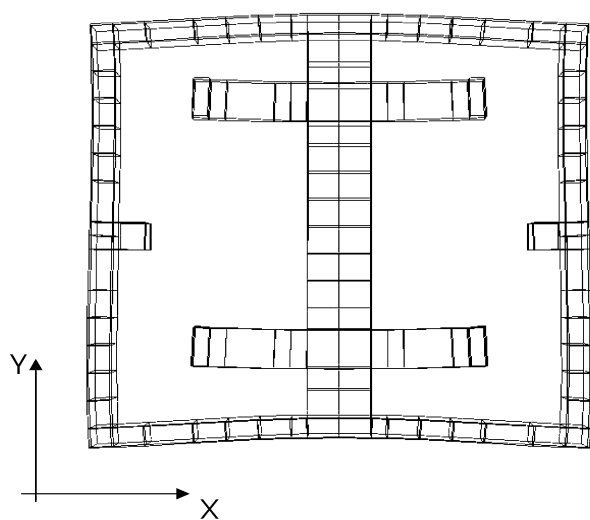


Fig. 4.16- Configuração deformada para o esforço F_y

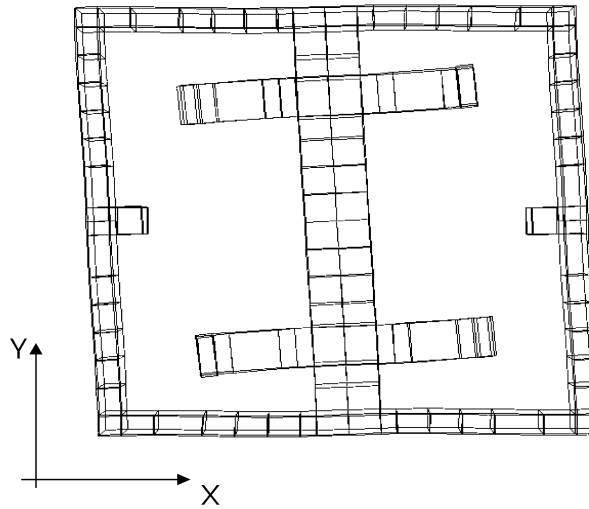


Fig. 4.17– Configuração deformada para o momento M_z

Da análise das Fig. 4.15 a 4.17, pode-se concluir que os pontos de maiores deformações para o caso de carga da direção X são os próximos do bloco C, e para as cargas na direção Y , próximos a barra B. A deformação no caso do momento M_z é, a grosso modo, igual tanto próximo ao bloco C ou próximo a barra B. A instalação dos extensômetros fica então como mostra a Fig. 4.18:

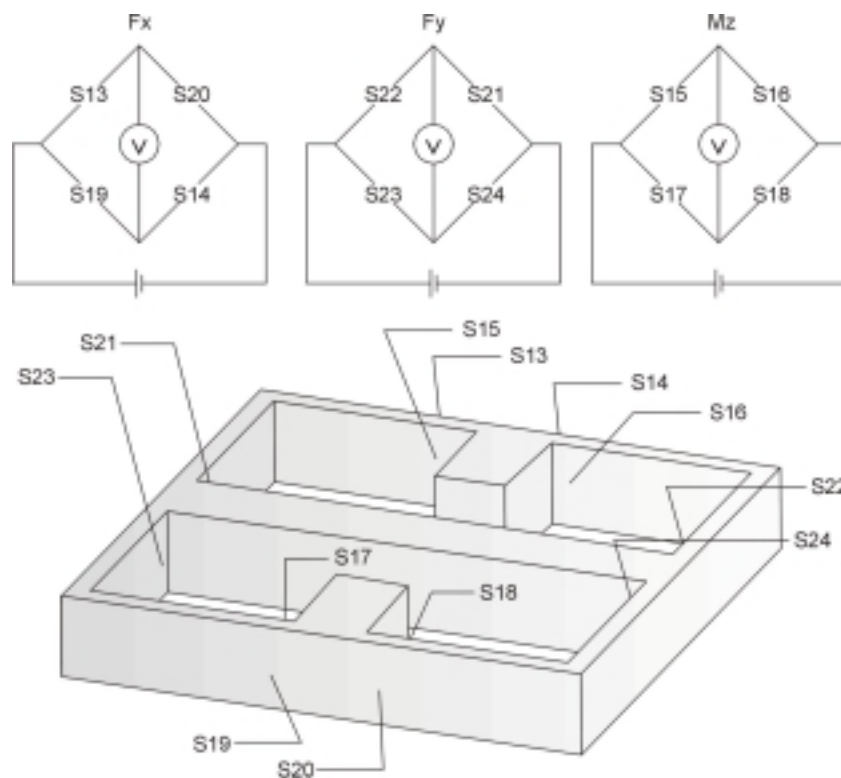


Fig. 4.18– Posicionamento dos extensômetros – F_x , F_y e M_z

Na Fig. 4.18, os extensômetros S13, S14, S19 e S20 estão posicionados no lado externo do quadro. Os outros extensômetros estão internos.

4.3.2 Força Vertical F_z e Momentos M_x e M_y

Estes esforços são mensurados através da deformação das barras A. Neste caso, mesmo sendo óbvias as posições de colagem dos extensômetros, a mesma abordagem citada no item anterior é apresentada. As configurações deformadas das barras A são mostradas nas Fig. 4.19 a 4.21.

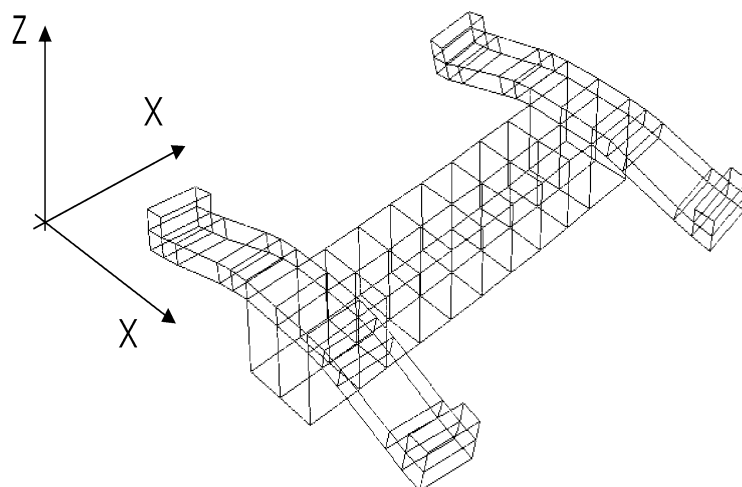


Fig. 4.19 – Configuração deformada para a força F_z

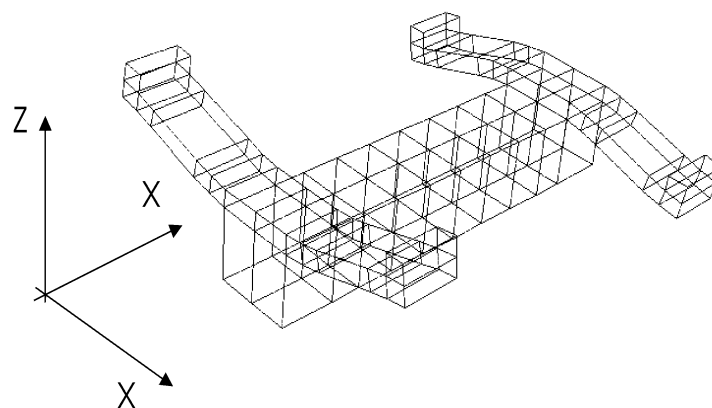


Fig. 4.20 – Configuração deformada para o momento M_x

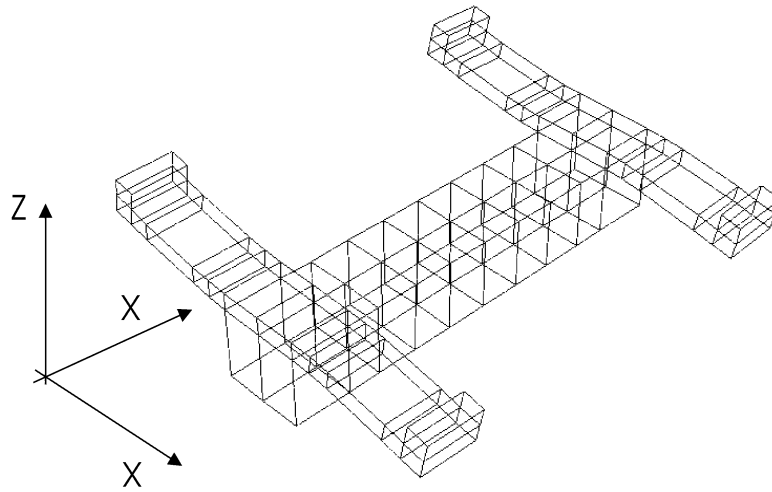


Fig. 4.21 – Configuração deformada para o momento M_y

O ponto de colagem é junto a união das barras A com a barra B. As Fig. 4.22 e 4.23 mostram onde foram instalados os extensômetros para estas componentes.

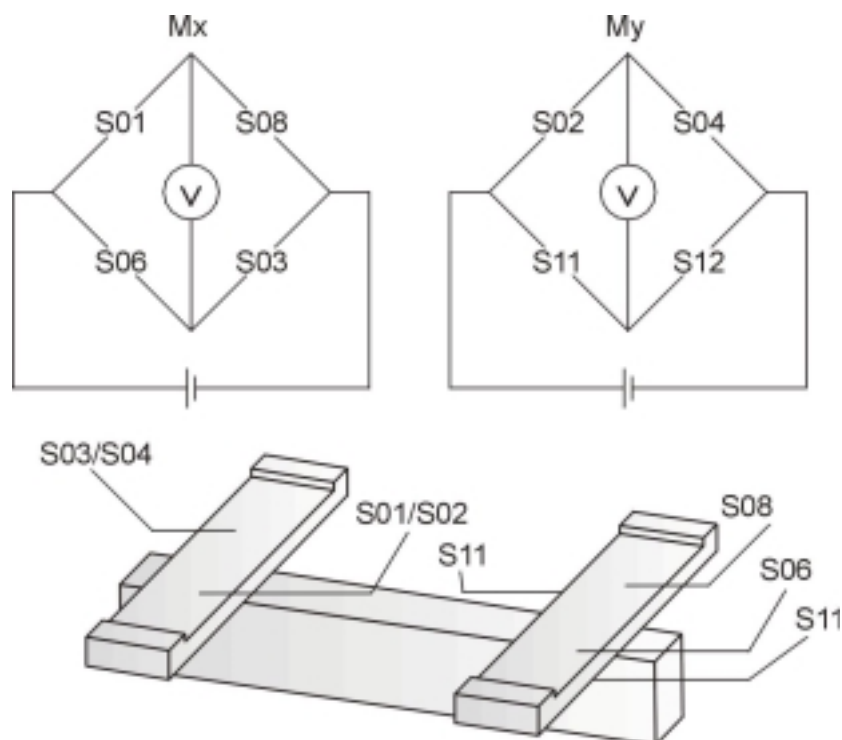


Fig. 4.22 – Posicionamento dos extensômetros – M_x e M_y

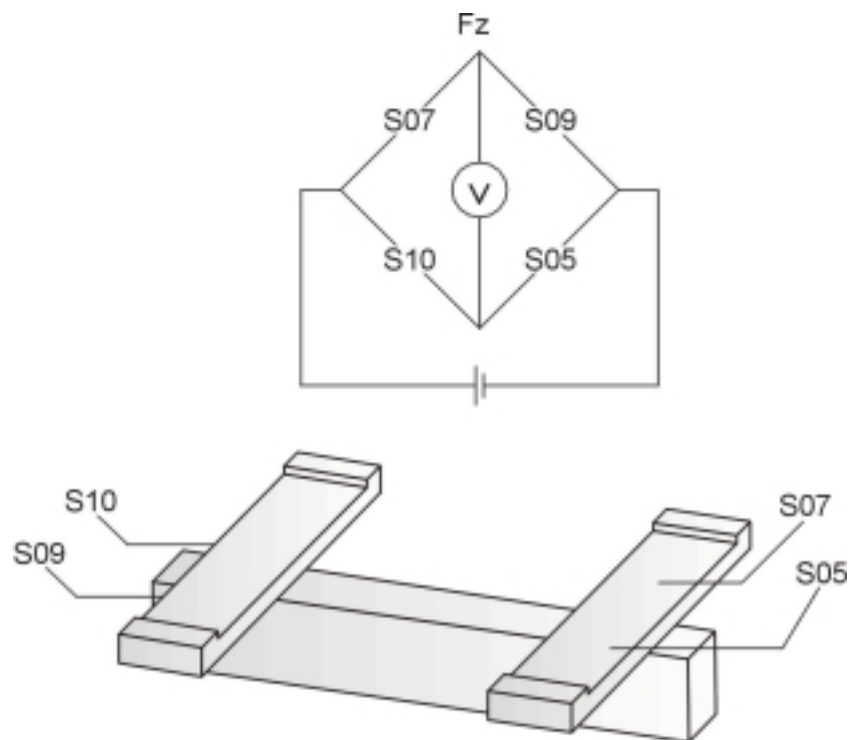


Fig. 4.23 – Posicionamento dos extensômetros – F_z

4.4 LIGAÇÃO ENTRE OS EXTENSÔMETROS E O CONDICIONADOR DE SINAIS

Com o posicionamento de cada extensômetro definido, se faz necessário elaborar um elemento eficiente para realizar as ligações entre os sensores e o sistema de amplificação de sinal.

A fim de reduzir ao mínimo o ruído nos sinais, o mais importante era que a ligação dos extensômetros se desse o mais próximo possível destes, fazendo a ligação até o amplificador através de um cabo único.

A solução adotada foi utilizar uma placa de circuito impresso, na qual cada extensômetro é diretamente conectado. Um circuito elétrico simples, na placa, liga os extensômetros em *ponte de Wheatstone*.

Um conector elétrico tipo DB25 faz a ligação entre a placa de circuito impresso e o cabo, sendo este ligado ao condicionador. Este conector foi configurado para que cada componente tivesse uma entrada para alimentação individual e uma saída do sinal.

A Fig. 4.24 mostra a placa. Cada número no desenho representa o ponto de ligação do extensômetro correspondente, na mesma nomenclatura utilizada anteriormente.

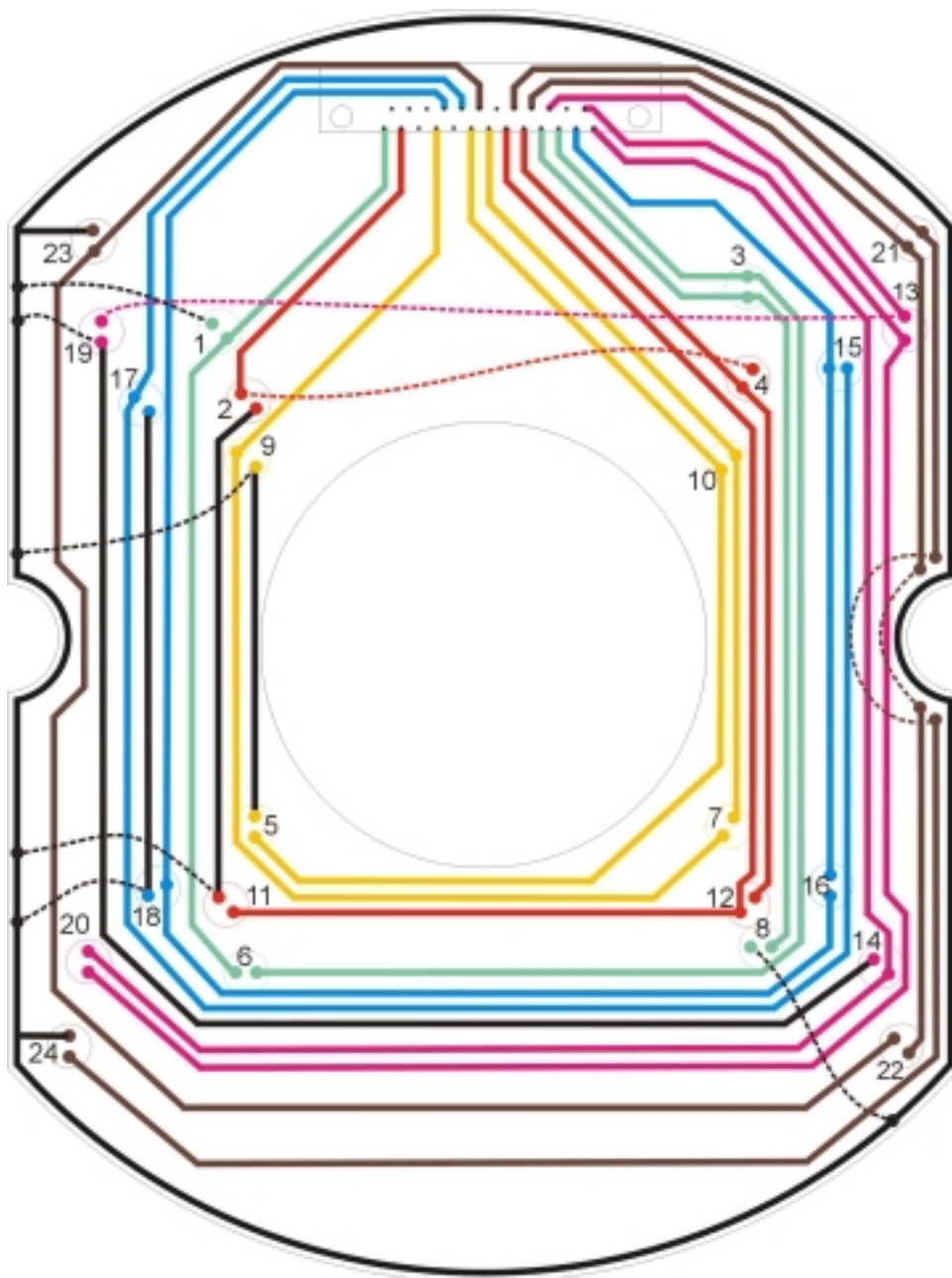


Fig. 4.24 – Placa de circuito impresso utilizada para ligação dos extensômetros

Na Fig. 4.24, a cor preta representa o terra, comum à todas as componentes. As outras cores representam uma componente diferente cada uma. As linhas tracejadas representam ligações fora da placa, através de fios (*jumpers*).

A Fig. 4.25 mostra a plataforma montada no local de ensaio. Nesta figura aparecem os fios que ligam os extensômetros à placa. Também é visível a placa de acrílico onde serão fixados os modelos durante os ensaios.



Fig. 4.25 – Balança montada em sua posição de trabalho

Os furos na periferia do placa de acrílico são os pontos de fixação dos modelos.

5 CALIBRAÇÃO DA PLATAFORMA

Foram executadas duas calibrações na plataforma, sendo a primeira, chamada de ensaio estático, realizada com esta fora da posição de trabalho e a segunda (calibração de ensaio) com a plataforma instalada no túnel de vento.

5.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS CALIBRAÇÕES

O equipamento utilizado para realização tanto do ensaio estático como nas calibrações constituiu-se de um sistema de aquisição de sinais, um condicionador de sinais e a própria plataforma de forças.

Para adquirir os sinais oriundos da plataforma de forças foi utilizado um microcomputador portátil dotado de placa de aquisição de sinais. Esta placa, já descrita no item 4.4.1, tem o objetivo de transformar a tensão elétrica que é aplicada em seus contatos em dados digitais. Os dados são então armazenados em arquivos magnéticos, através de um programa computacional, sendo possível tratá-los graficamente posteriormente.

Para o condicionamento do sinal foi utilizado um amplificador de seis canais de fabricação própria baseado no amplificador diferencial INA118 da Analog Devices, com capacidade de amplificar aproximadamente duas mil vezes o sinal de entrada. Este nível de amplificação é necessário em função da grande rigidez adotada para as células de carga.

Além disso foi utilizado em conjunto um osciloscópio digital para acompanhamento das leituras, já descrito no item 4.4.1, uma vez que através deste é possível verificar em tempo real as alterações nos valores dos sinais.

5.2 ENSAIO ESTÁTICO

O objetivo principal deste ensaio foi verificar, antes da instalação final (no túnel de vento) se havia algum erro de concepção ou problemas de montagem (elétrico-eletrônicos ou mecânicos), bem como verificar qual era a interferência entre os canais de medição.

Também foram verificados nesta primeira calibração possíveis problemas de histerese, seja mecânica ou elétrica, que o sistema poderia apresentar.

Para averiguação dos efeitos acima descritos, a plataforma de forças foi submetida a dois ciclos de carga e descarga, em cinco posições diferentes.

O ensaio P1 consistiu em excitar somente o componente Fz da plataforma, através de carregamento vertical centrado na placa de acrílico.

Nos ensaios P2 e P3 a plataforma foi submetida a cargas verticais com excentricidade de 90 mm em relação aos eixos x e y respectivamente, produzindo, além de Fz, momentos My e My.

Os ensaios P4 e P5 possuem o mesmo ponto de aplicação de carga do ensaio P1, porém a carga é horizontal, produzindo resposta somente em Fx e Fy respectivamente

Estes ensaios são apresentados graficamente nas Fig. 5.1 a 5.5.

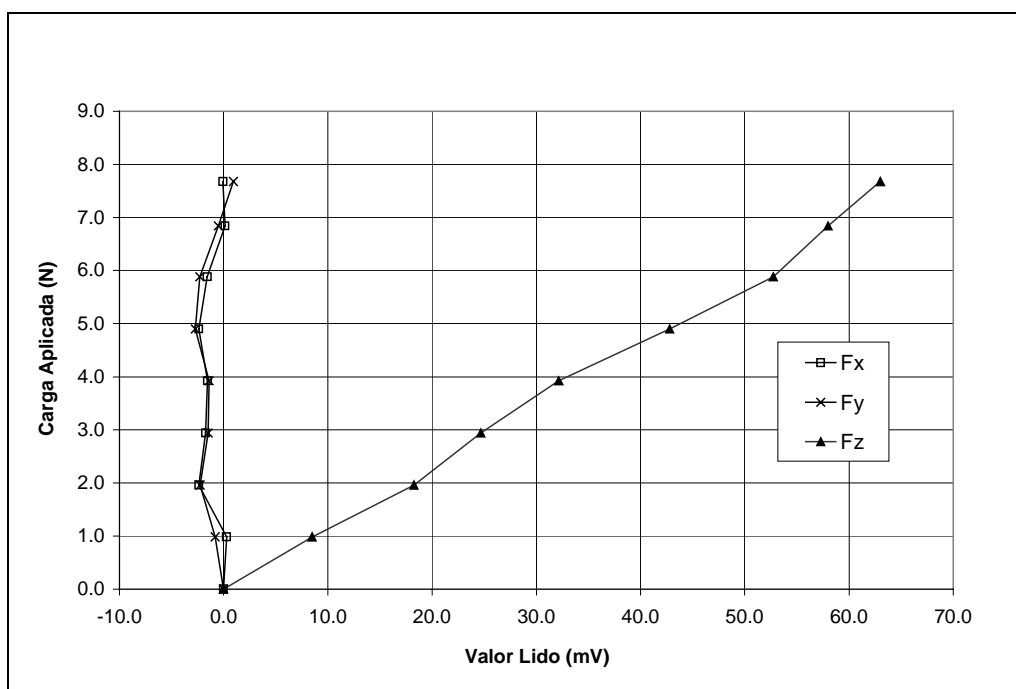


Fig. 5.1 – Ensaio estático – P1

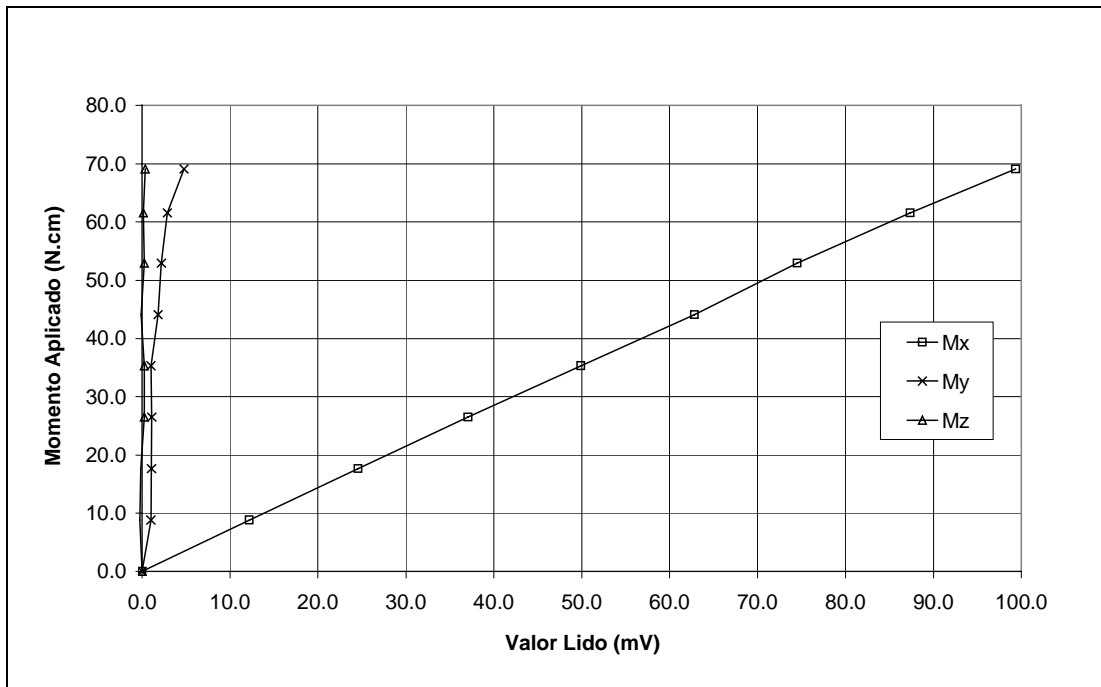


Fig. 5.2 – Ensaio estático – P2

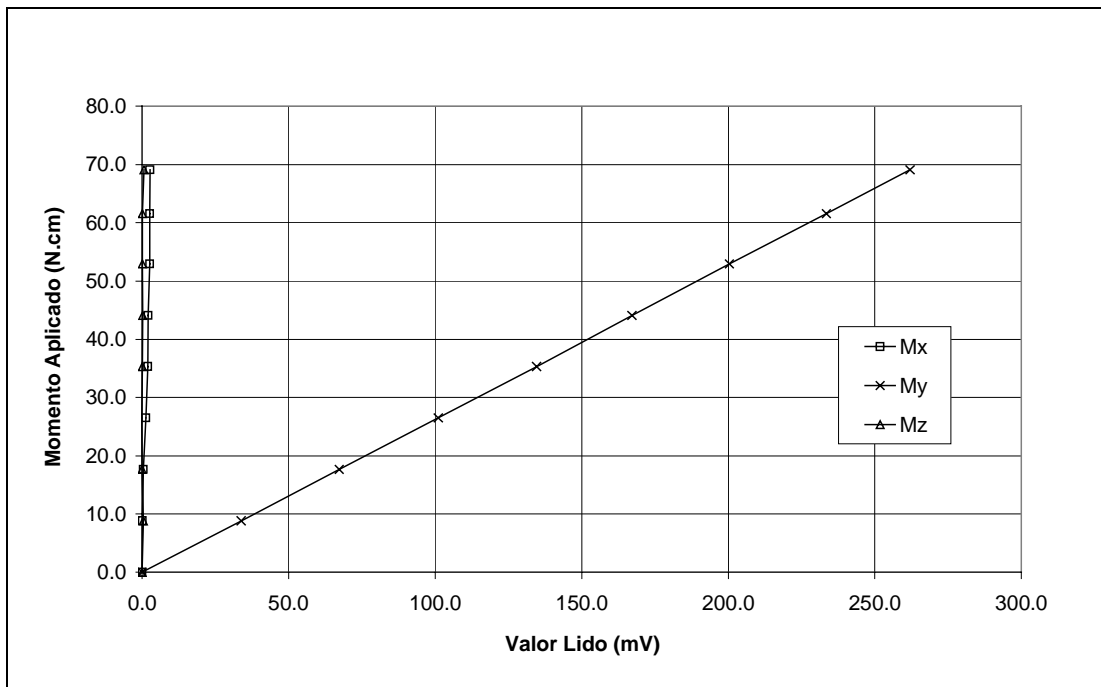


Fig. 5.3 – Ensaio estático – P3

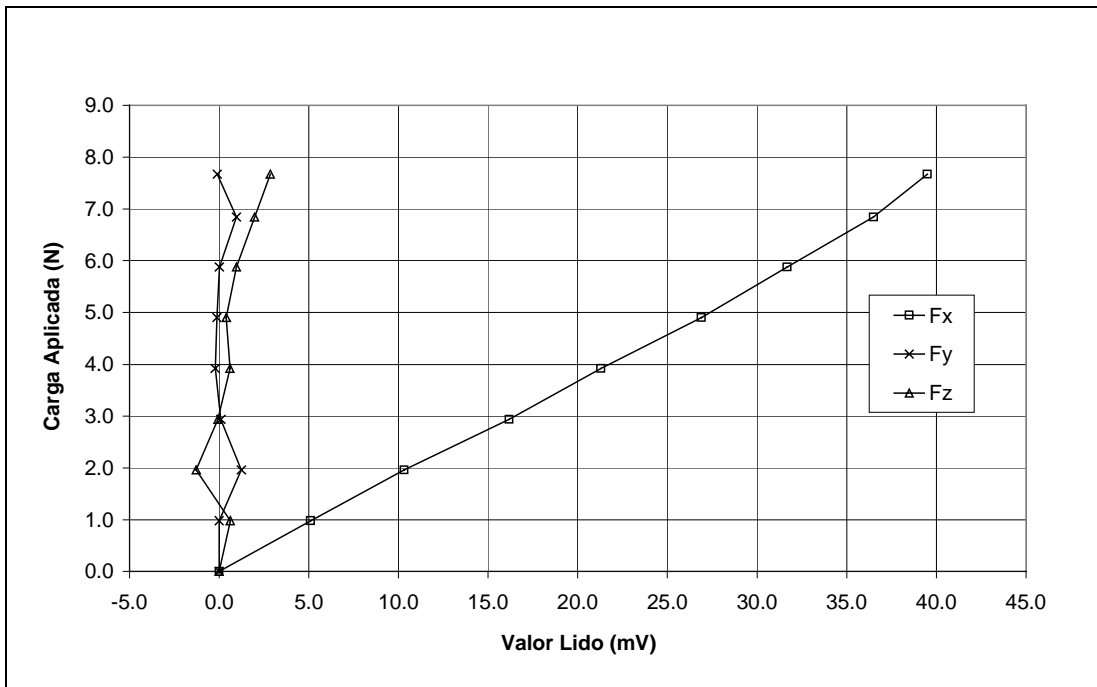


Fig. 5.4 – Ensaio estático – P4

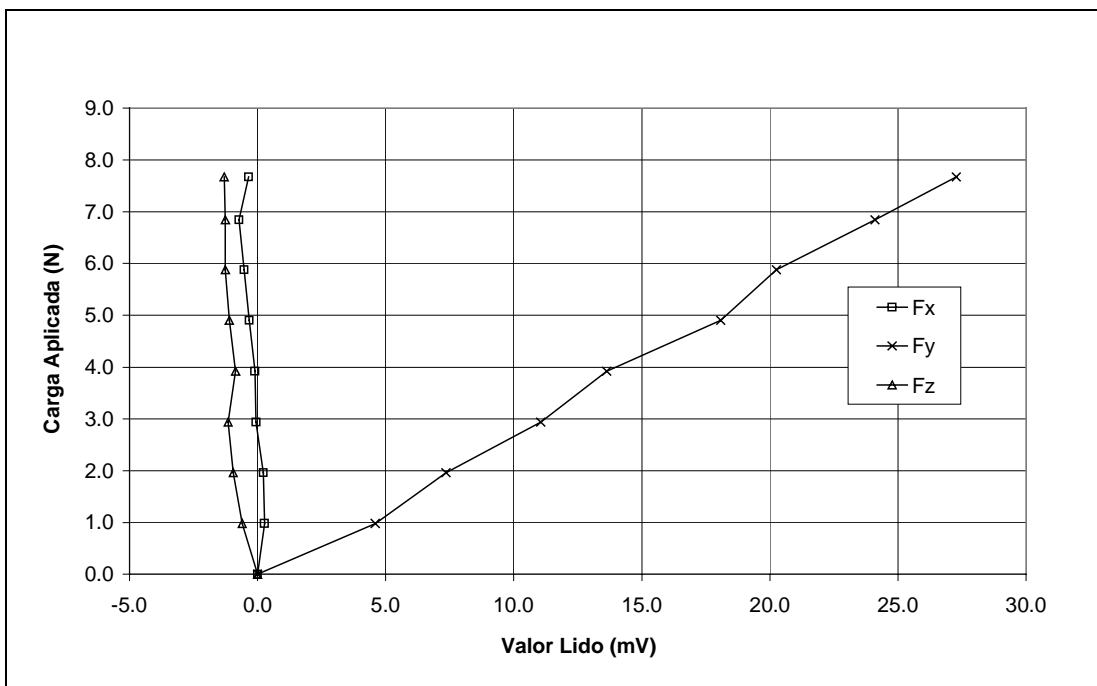


Fig. 5.5 – Ensaio estático – P5

Em uma observação direta dos gráficos apresentados, verifica-se que a interferência entre componentes é da ordem de 10%.

Esse resultado é considerado bom quando comparado à interferência das plataformas de forças dos tradicionais fabricantes de equipamentos para instrumentação, que é da ordem de 1%. Obviamente estas plataformas estão cada vez mais desenvolvidas, bem como cada vez mais caras, algumas alcançando cifras desde US\$ 15.000 à US\$300.000. A plataforma de forças desenvolvida nesta dissertação de mestrado teve um orçamento da ordem de US\$1.000.

Outra observação importante é a linearidade alcançada pelos sinais, não apresentando histerese. Isto comprova a adequada colagem e posicionamento dos extensômetros, bem como a estabilidade do sistema de amplificação.

5.3 CALIBRAÇÃO

Anterior e posteriormente à realização dos ensaios foram feitas calibrações na plataforma. Estas calibrações foram executadas com a plataforma em seu local de trabalho, ou seja, dentro do túnel e com um dos modelos reduzidos fixados sobre ela.

Diferentemente do ensaio estático, esta calibração tinha por objetivo obter as constantes de calibração das componentes que seriam medidas nos ensaios, ou seja, F_x , F_y , M_x e M_y .

Os gráficos das Fig. 5.6 a 5.9 apresentam os resultados e as constantes de calibração obtidas.

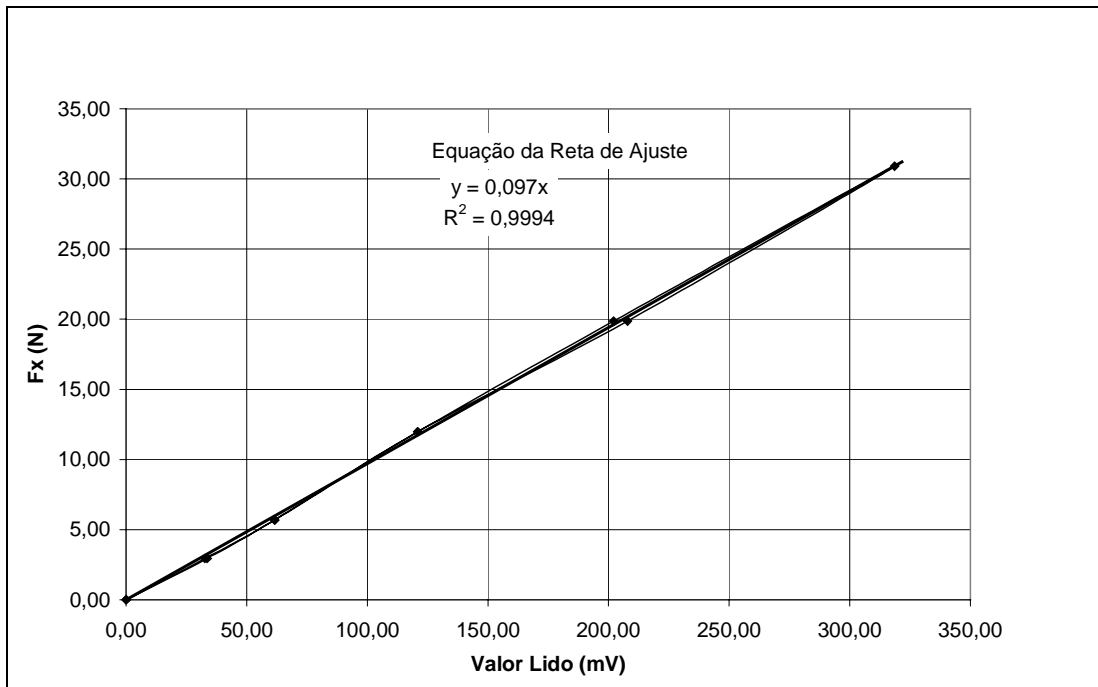


Fig. 5.6 – Calibração da componente Fx

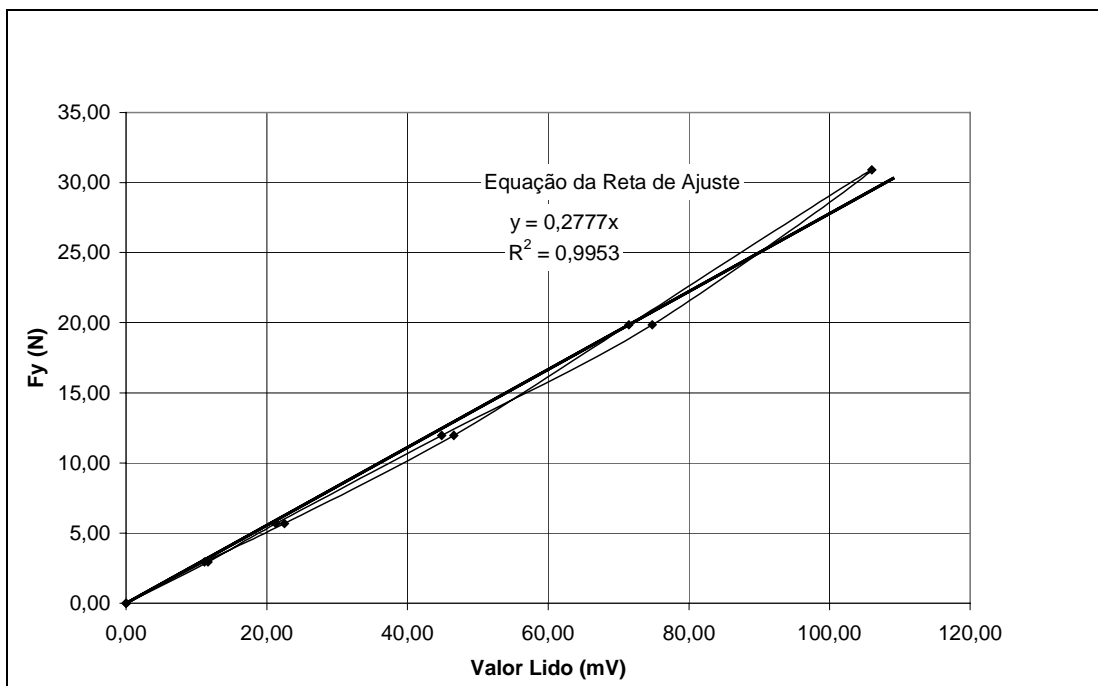


Fig. 5.7 – Calibração da componente Fy

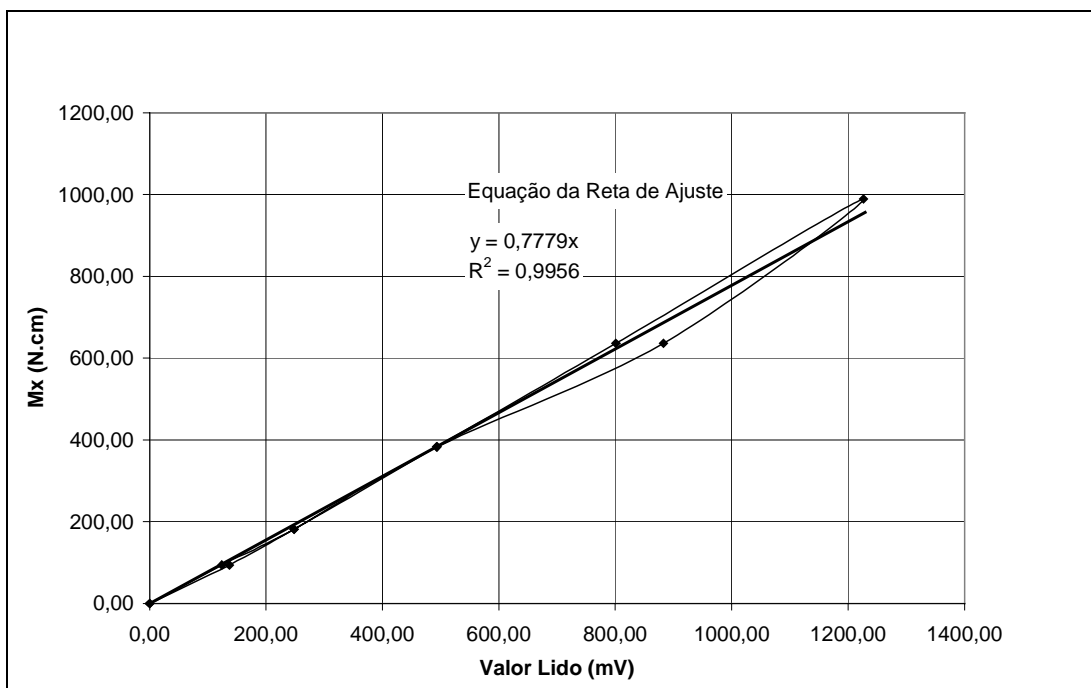


Fig. 5.8 – Calibração da componente Mx

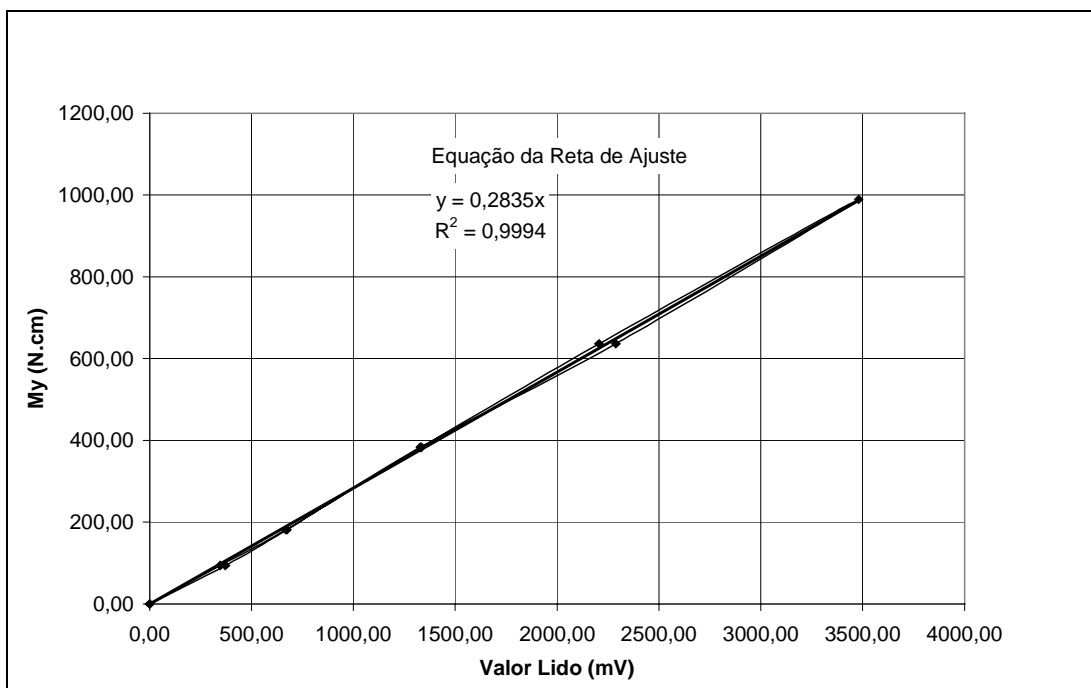


Fig. 5.9 – Calibração da componente My

As calibrações anterior e posterior ao ensaio apresentaram os mesmos resultados, sendo desnecessário apresentar ambas.

O resíduo encontrado na calibração foi da ordem de 0,02mV.

6 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mostrado na Fig. 6.1.

Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação *comprimento / altura* da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões 1,30 m x 0,90 m x 9,32 m (largura x altura x comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, é de 42 m/s. Os hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP e a velocidade do escoamento é controlada manualmente através de aletas radiais metálicas que obstruem a passagem do ar.



Fig. 6.1 – Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*

Atualmente o túnel de vento dispõe de três mesas giratórias para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos. A localização destas mesas e outras características físicas do túnel de vento pode ser vista na Fig. 6.2.

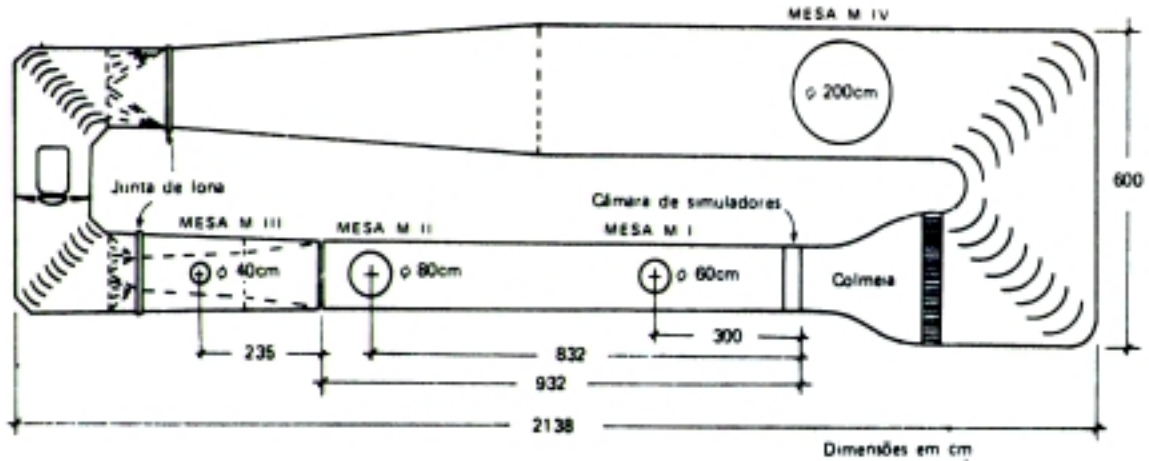


Fig. 6.2 – Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann

A determinação da velocidade do escoamento durante os ensaios é indireta, medida através da diferença de pressão estática, Δp_a , lida em dois anéis piezométricos situados nos extremos do convergente próximo à entrada da seção principal de trabalho. Estas leituras são feitas por meio de um micromanômetro à água tipo Betz.

Para os diversos perfis de velocidade dos ventos simulados no túnel foram determinados coeficientes k_0 que vinculam a velocidade média em determinadas posições, $V(z)$, a massa específica do ar, ρ , e a diferença de pressão estática, ΔP_a . Desta forma é possível calcular a velocidade do escoamento e conseqüentemente a pressão dinâmica em qualquer ponto da seção transversal, devidamente mapeada, pela simples leitura da pressão de referência. Esta relação é mostrada na equação 6.1.

$$V(z) = \sqrt{2k_0 \frac{\Delta P_a}{\rho}} \quad (6.1)$$

Na expressão 6.1 a diferença de pressão estática ΔP_a é dada em N/m^2 e a massa específica do ar é em kg/m^3 . K_0 é uma constante adimensional, e $V(z)$ é dado em m/s .

A utilização da equação 6.2 permite determinar a pressão dinâmica no ponto onde foi calculada a velocidade.

$$q = 0,613V(z)^2 \quad (6.2)$$

Onde a velocidade, $V(z)$, é dada em m/s e a pressão dinâmica, q , em N/m^2 .

6.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os modelos foram ensaiados em dois tipos de escoamentos, ambos na mesa MII. Primeiramente os modelos foram ensaiados com o vento uniforme e suave, cuja intensidade longitudinal da turbulência é de aproximadamente 0,4% e a macroescala da componente longitudinal da turbulência é de aproximadamente 20mm (valores médios, medidos fora da camada limite na altura do eixo longitudinal do túnel). A seguir foi simulado o vento deslizando e turbulento com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p=0,23$. Neste segundo caso, o perfil de velocidades médias é expresso, aproximadamente, pela seguinte lei potencial:

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (6.3)$$

Onde:

$V(z)$ – velocidade média na altura z ;

V_{ref} – velocidade média em uma altura de referência (no túnel, $z_{ref} = 450\text{mm}$ – cota do eixo longitudinal do túnel);

p – expoente da curva de potência.

6.1.1 Modelos

Para cada configuração de vento, quatro modelos foram ensaiados. As dimensões dos modelos foi adotada de tal forma que reproduzissem coeficientes de força aerodinâmicos bem definidos na norma NBR6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações (1988), sendo dois de tamanho reduzido e dois de maiores dimensões, propositadamente para testar a precisão do equipamento a diferentes magnitudes de esforços.

Isto se justifica tendo em vista que o objetivo destes ensaios é conhecer e verificar o funcionamento do equipamento, e não determinar coeficientes de força aerodinâmicos para formas geométricas desconhecidas ou não estudadas. Com este propósito, em cada ensaio são determinadas as forças e momentos aos quais os modelos estavam sendo submetidos e, a seguir, são calculados coeficientes de força aerodinâmica experimental. Este coeficiente é então comparado ao mesmo coeficiente dado na NBR6123.

A Tab. 6.1 descreve as dimensões dos modelos ensaiados.

Tab. 6.1 – Dimensões dos modelos ensaiados

Modelo	Face A (cm)	Face B (cm)	Altura (cm)
1	4,0	4,0	16,0
2	8,0	4,0	16,0
3	8,0	8,0	32,0
4	16,0	8,0	32,0

Os modelos 1 e 3, assim como os modelos 2 e 4, guardam entre si a mesma proporção em suas dimensões. Nos modelos 1 e 3 as faces possuem mesmas dimensões e a altura é quatro vezes maior do que a face A. Já nos modelos 2 e 4, a face A é duas vezes maior do que

a face B e a altura é quatro vezes maior do que a face B. As Fig. 6.3 e 6.4 ilustram a geometria dos modelos ensaiados.

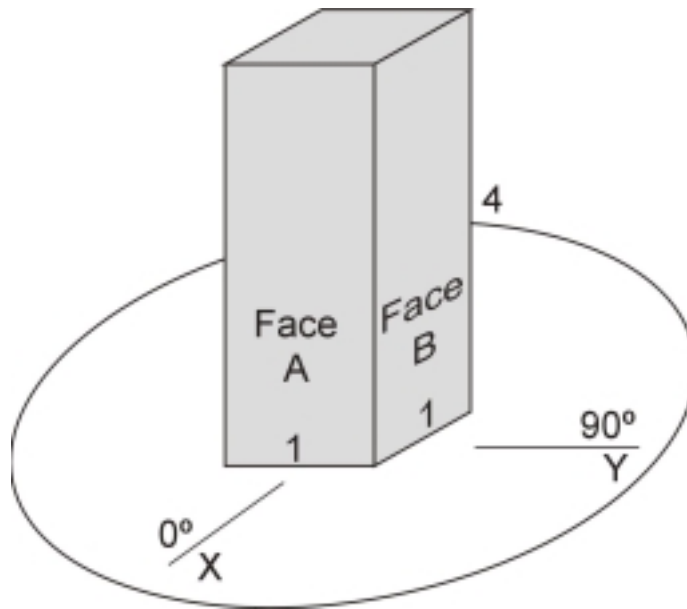


Fig. 6.3 – Geometria dos modelos 1 e 3

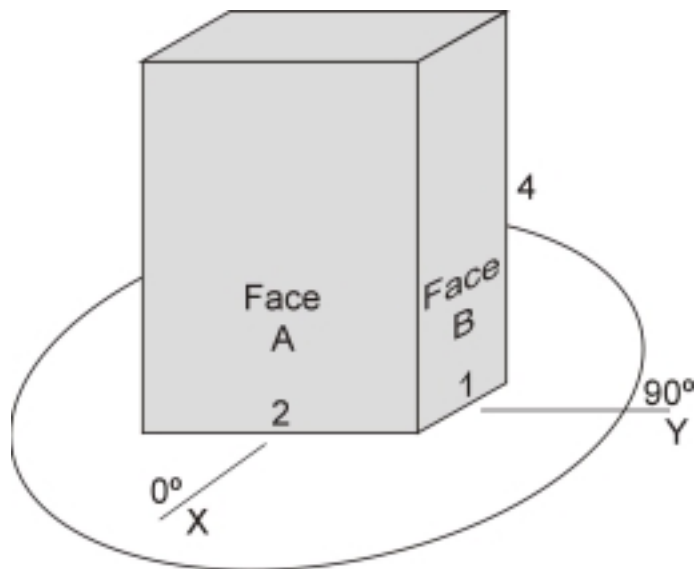


Fig. 6.4 – Geometria dos modelos 2 e 4

Assim, o coeficiente de arrasto para os modelos 1 e 3 tem o mesmo valor, ocorrendo o mesmo com os modelos 2 e 4. A diferença dos dois modelos é justamente a magnitude de esforços que estes irão transmitir à balança, sendo maiores nos modelos de número 3 e 4.

No desenvolver dos ensaios foi considerado “vento a 0°” quando este incide perpendicularmente à face A e “vento a 90°” quando a incidência do escoamento se dava perpendicularmente à face B. A Fig. 6.5 mostra o modelo 1 em condições de ensaio.



Fig. 6.5 – Modelo 1 posicionado sobre a plataforma para ensaio

6.1.2 Descrição do Equipamento

O equipamento utilizado nos ensaios é o mesmo já descrito no item 5.1.

A temperatura do escoamento, diferença de pressão estática e pressão atmosférica são anotados em planilha específica, pois não são adquiridos automaticamente pelo microcomputador durante os ensaios.

7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após realizadas as baterias de ensaios, os dados coletados foram tratados de forma a poderem ser graficados, o que será apresentado neste capítulo.

Esta apresentação foi formatada de modo que resultados semelhantes entre si possam ser facilmente confrontados pelo leitor, deixando bastante claras as limitações e qualidades do equipamento desenvolvido.

Em cada gráfico são apresentados as curvas de força *versus* velocidade do vento ou momento fletor na base *versus* velocidade do vento para as duas repetições de ensaios realizados em cada caso. Nos gráficos de força *versus* velocidade do vento, é apresentada também a curva segundo a norma NBR6123, sob título de “6123”.

7.1 ENSAIOS COM VENTO UNIFORME E SUAVE – MODELOS 1 E 3

Os resultados mostrados neste item são fruto da compilação dos dados adquiridos nos ensaios com os modelos 1 e 3 com vento uniforme e suave.

As Fig. 7.1 a 7.8 mostram os resultados destes ensaios.

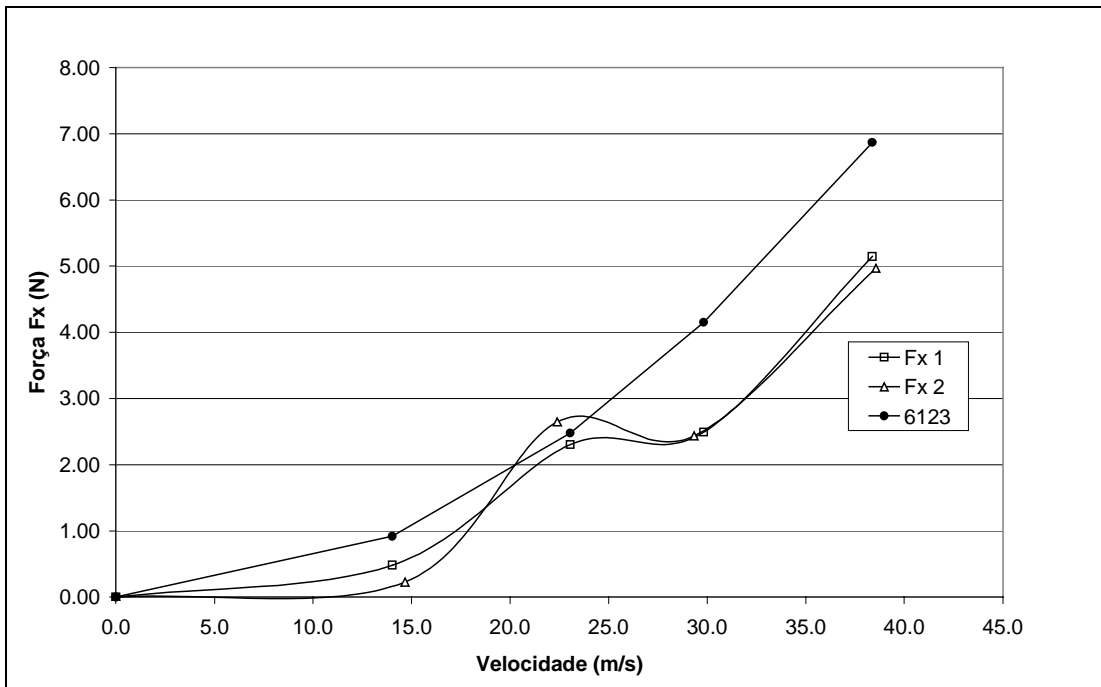


Fig. 7.1 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1

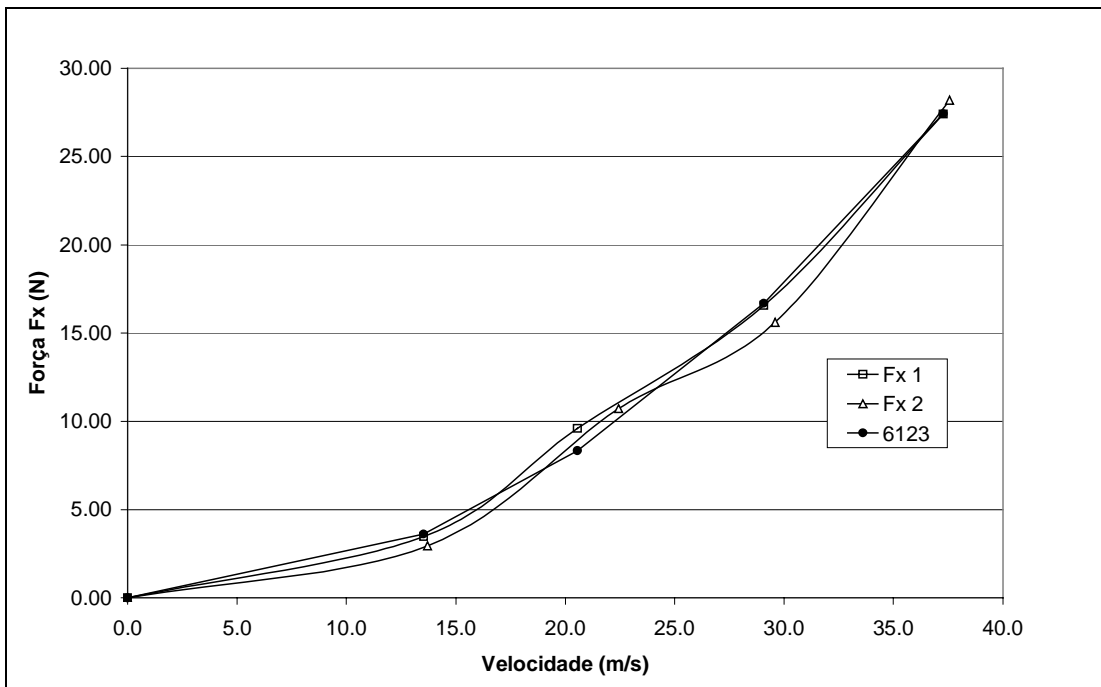


Fig. 7.2 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3

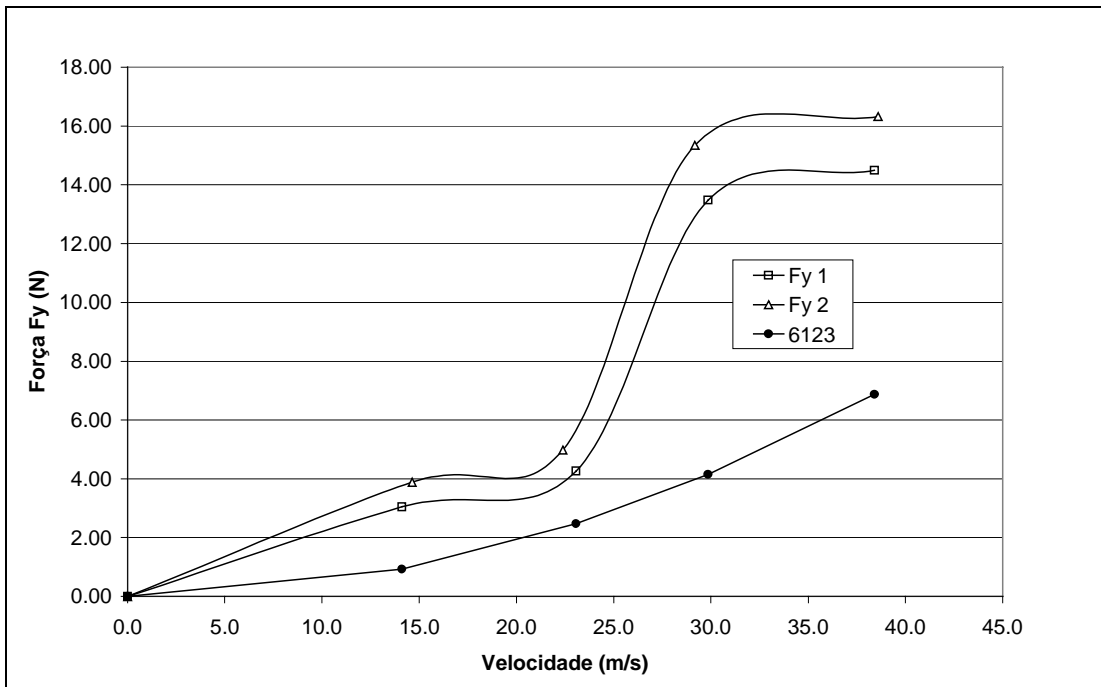


Fig. 7.3 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 1

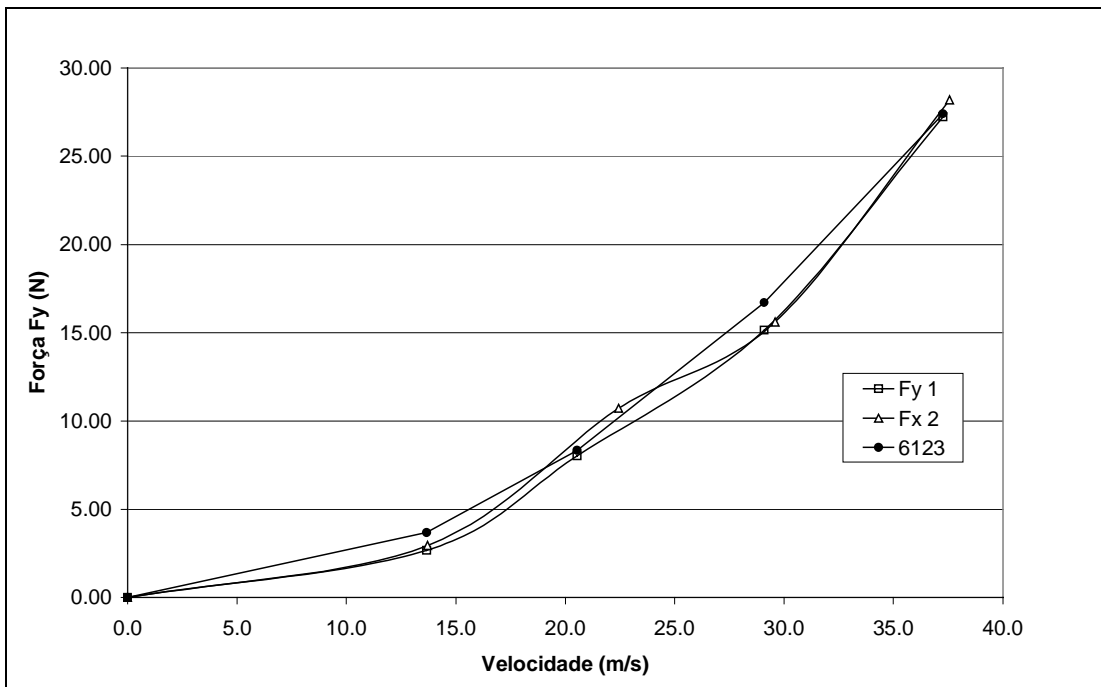


Fig. 7.4 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 3

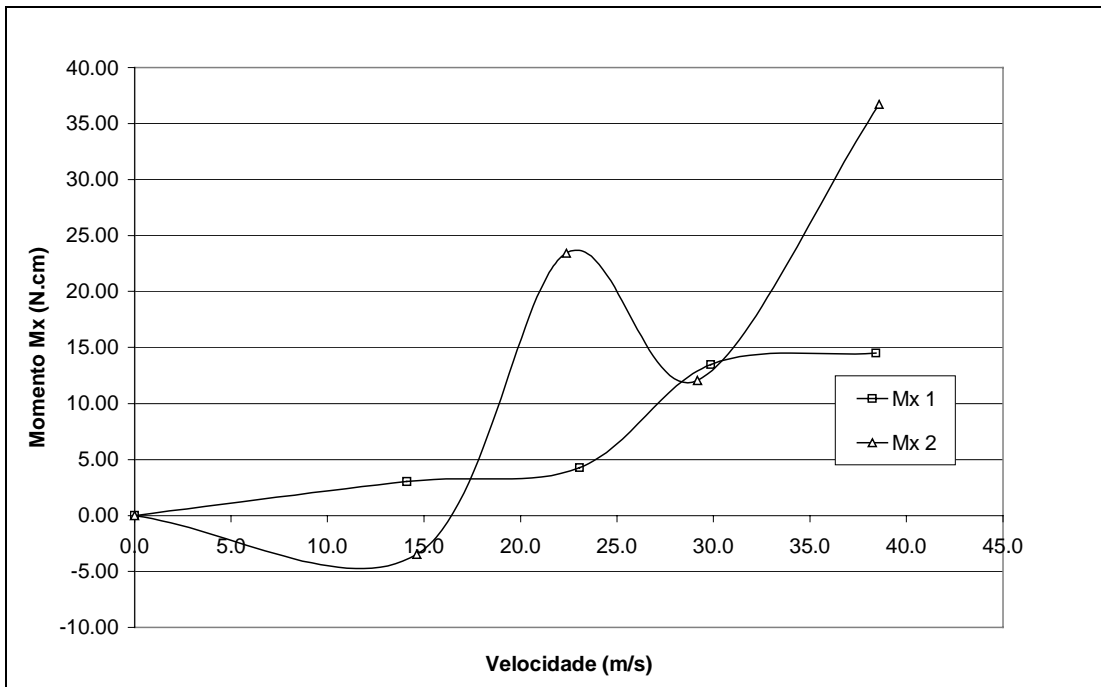


Fig. 7.5 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 1

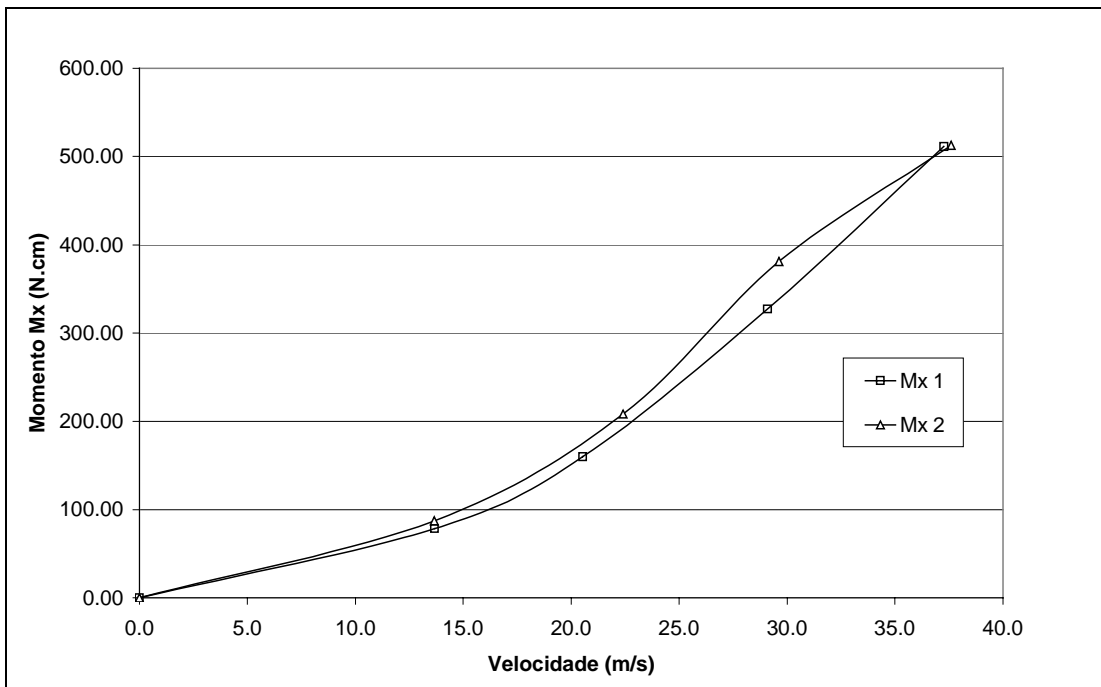


Fig. 7.6 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 3

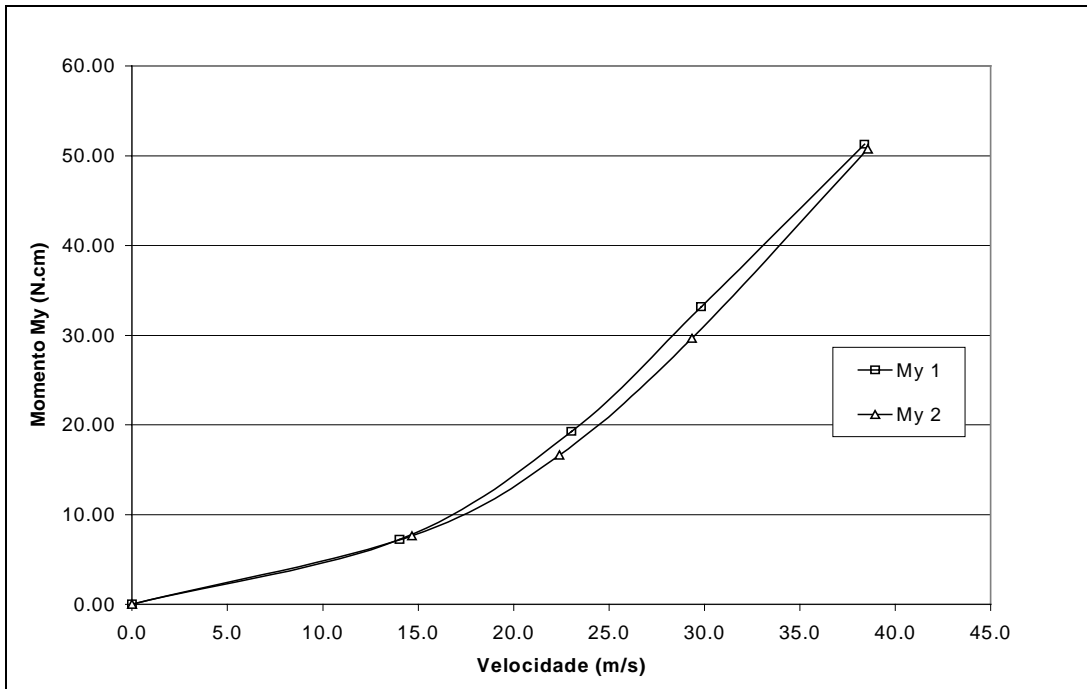


Fig. 7.7 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1

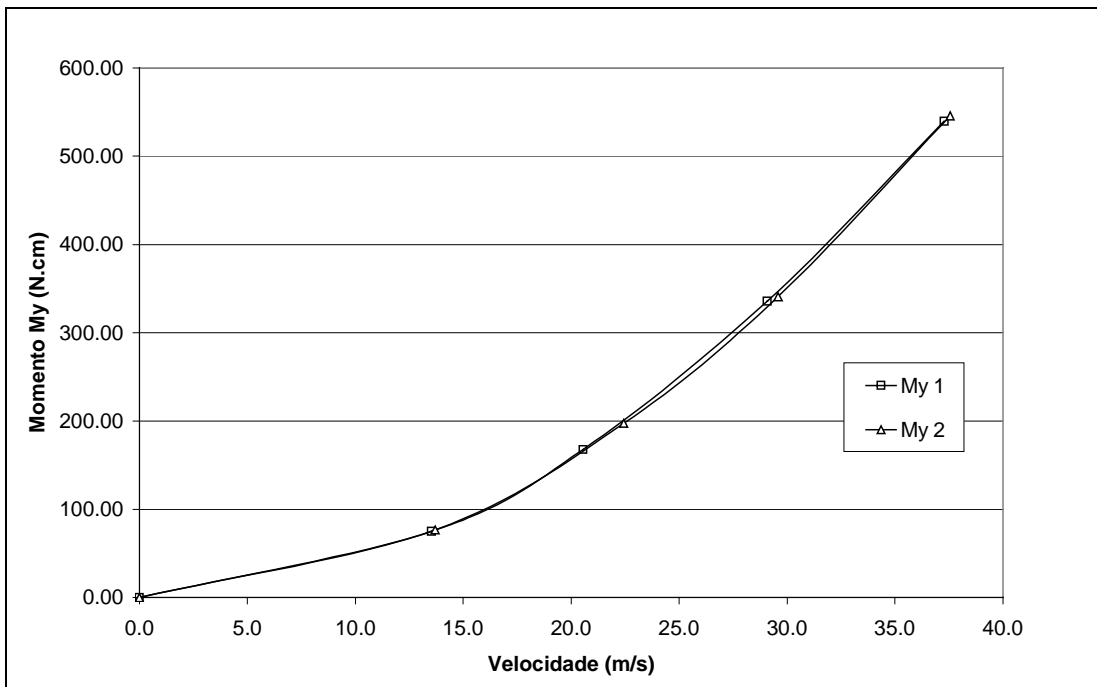


Fig. 7.8 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3

Nesta primeira mostra de resultados pode-se observar que para esforços pequenos, até 15 N, as componentes de forças, F_x e F_y tendem a não apresentar resposta compatível com a realidade. Para forças maiores, próximas de 30 N, as duas componentes apresentam resposta condizente com o esperado.

Nos gráficos de momentos fletores, observa-se que a resposta do equipamento para a componente M_x também apresenta precisão insatisfatória quanto solicitada aquém de 100 N.cm. A componente M_y tem comportamento bem definido tanto para o modelo 1 quanto para o modelo 3, mesmo em pequenos valores de momento fletor.

A Fig. 7.9 mostra o modelo 1 fixado sobre a balança, pronto para ser ensaiado.

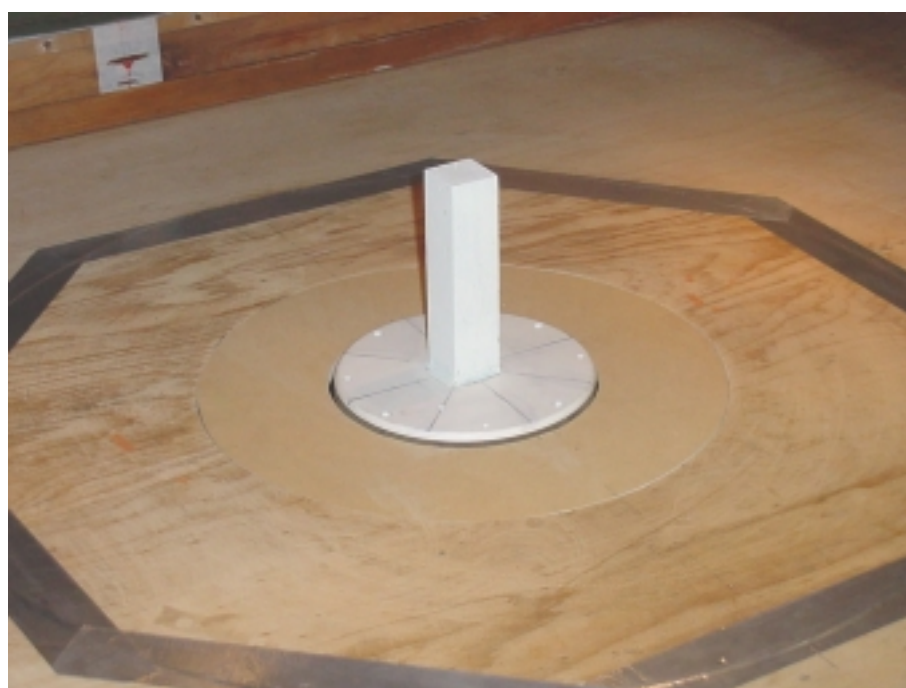


Fig. 7.9 – Modelo 1 fixado na plataforma

7.2 ENSAIOS COM VENTO UNIFORME E SUAVE – MODELOS 2 E 4

Os resultados dos ensaios com os modelos 2 e 4, com vento uniforme e suave, são apresentados nas Fig. 7.10 à 7.17.

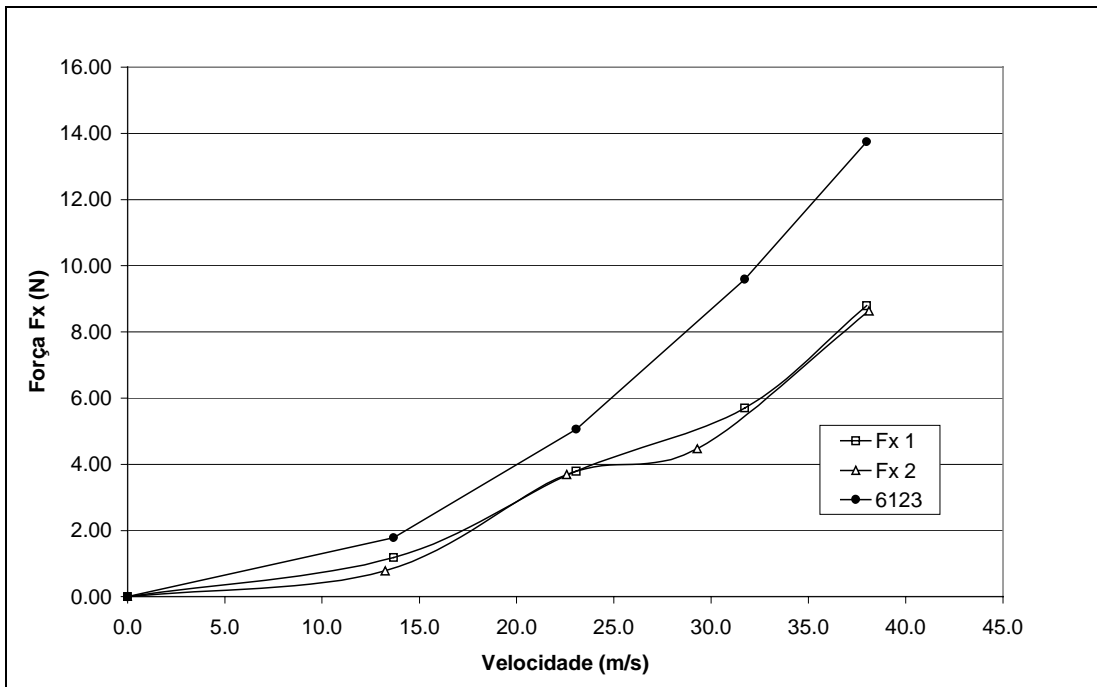


Fig. 7.10 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2

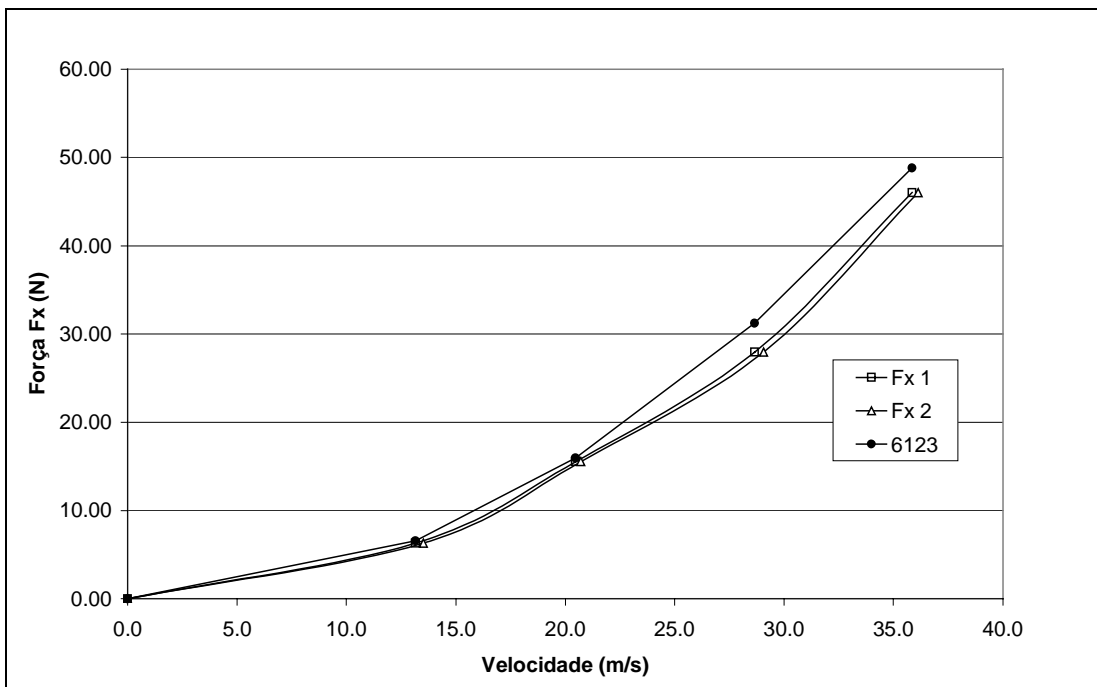


Fig. 7.11 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4

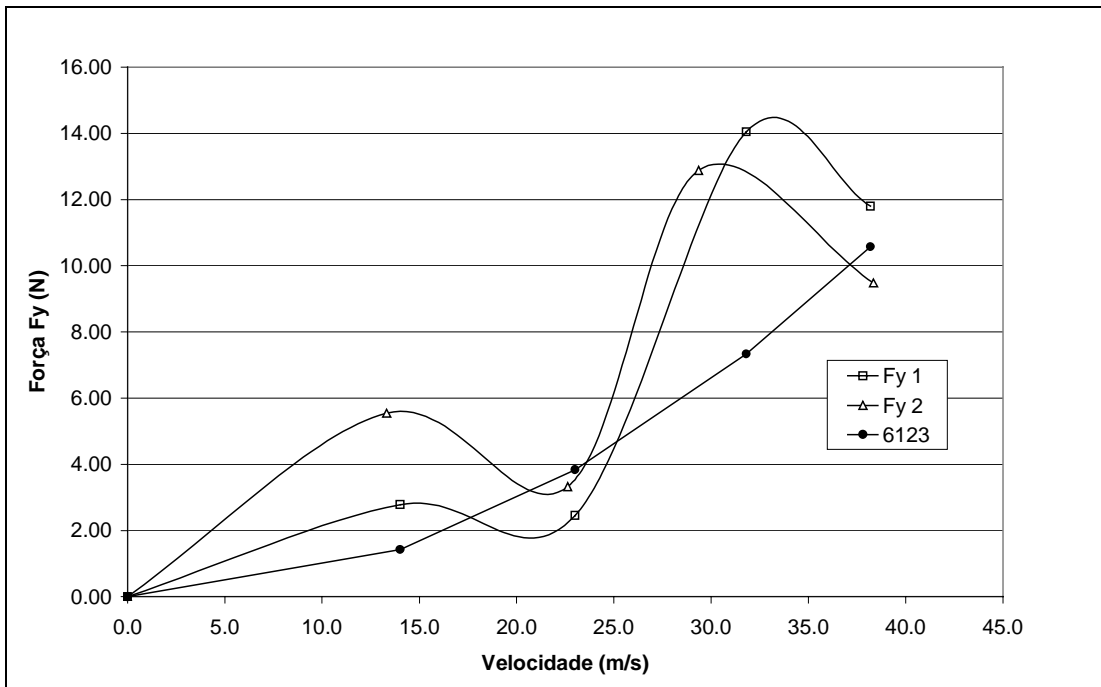


Fig. 7.12 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 2

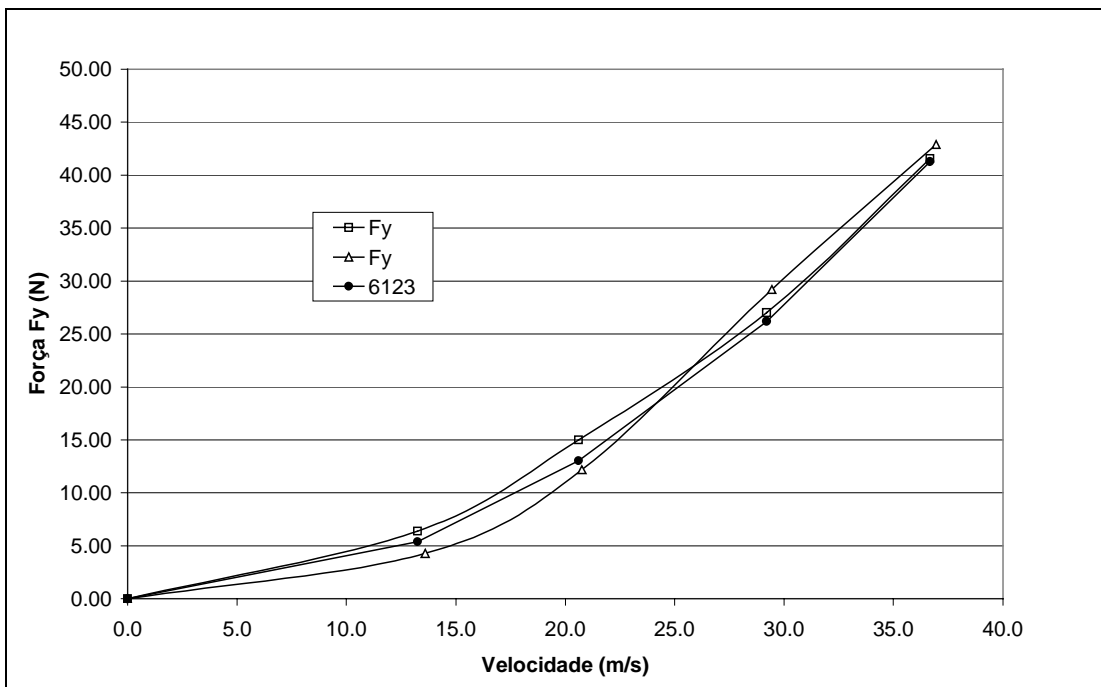


Fig. 7.13 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4

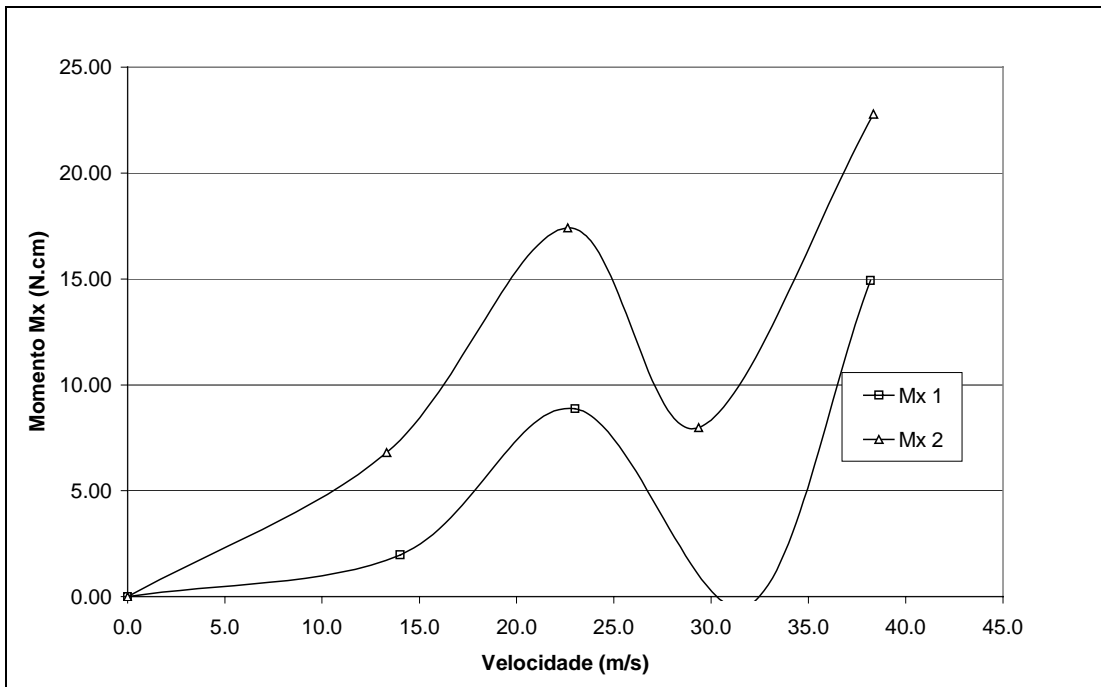


Fig. 7.14 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 2

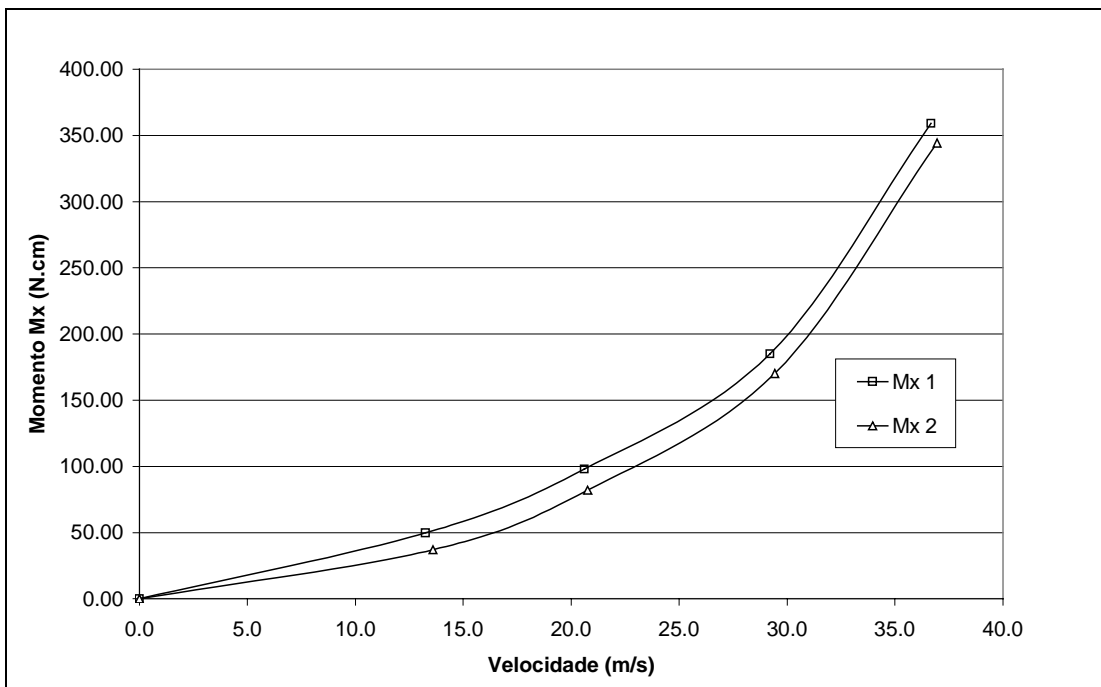


Fig. 7.15 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4

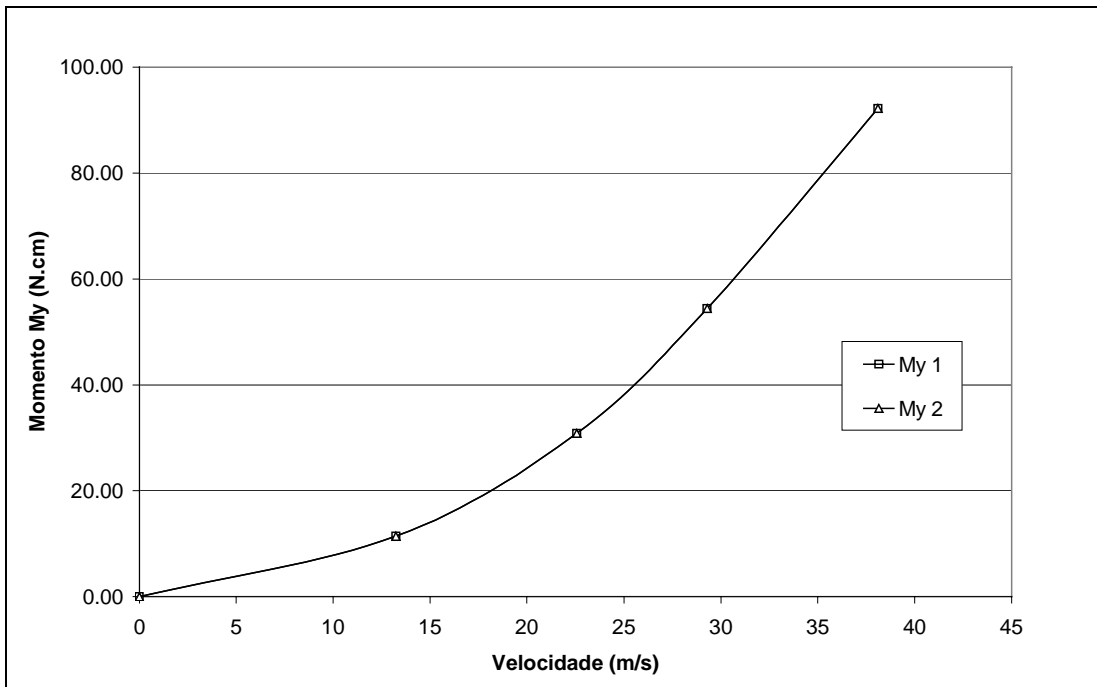


Fig. 7.16 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2

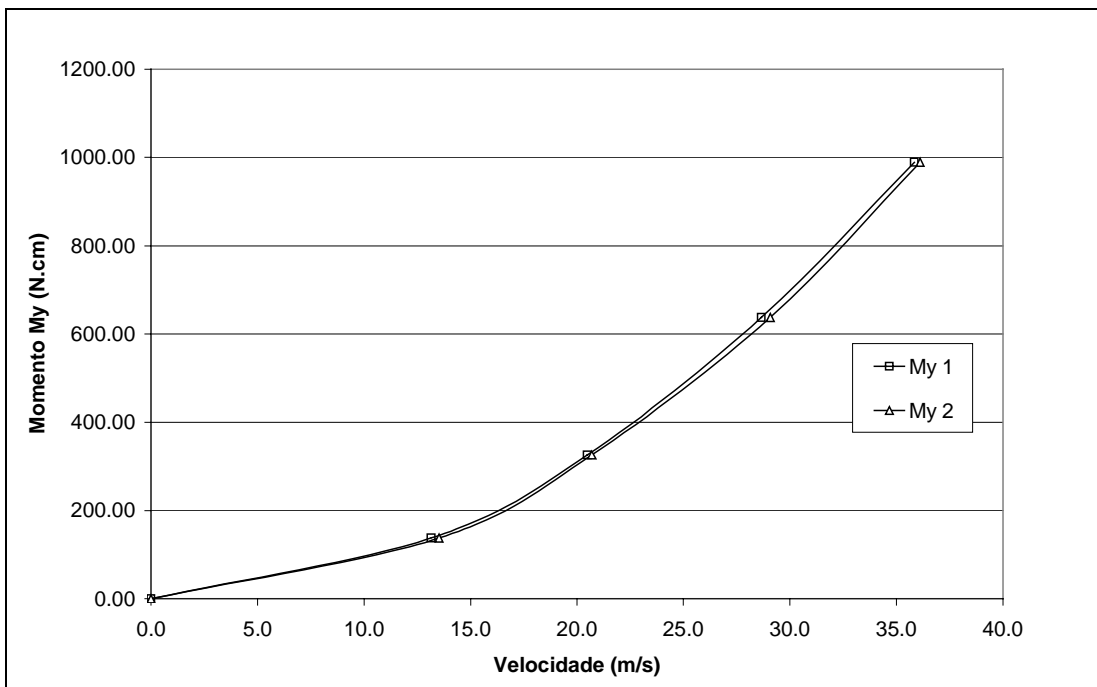


Fig. 7.17 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4

Os mesmos comentários escritos ao final do item 7.1 são válidos aqui. As imprecisões nas componentes de força se repetem nos mesmos níveis de carregamento, mostrando que a

sensibilidade do equipamento não é adequada para ensaios com modelos de proporções reduzidas, ou sujeitos a velocidades d vento muito pequenas.

O modelo 2 é mostrado na Fig. 7.18.



Fig. 7.18 – Modelo 2 fixado na plataforma

7.3 ENSAIOS COM VENTO DESLIZANTE E TURBULENTO – MODELOS 1 E 3

A seguir são mostradas as Fig. 7.19 à 7.24 com os resultados dos ensaios com os modelos 1 e 3 com vento deslizando e turbulento.

Nesses ensaios a velocidade máxima do escoamento é reduzida, em função dos obstáculos instalados no interior do túnel para simular o vento deslizando turbulento. Dessa forma somente serão apresentados gráficos cujos esforços na plataforma ficaram acima da sensibilidade mínima do equipamento, conforme comentado no item 7.1.

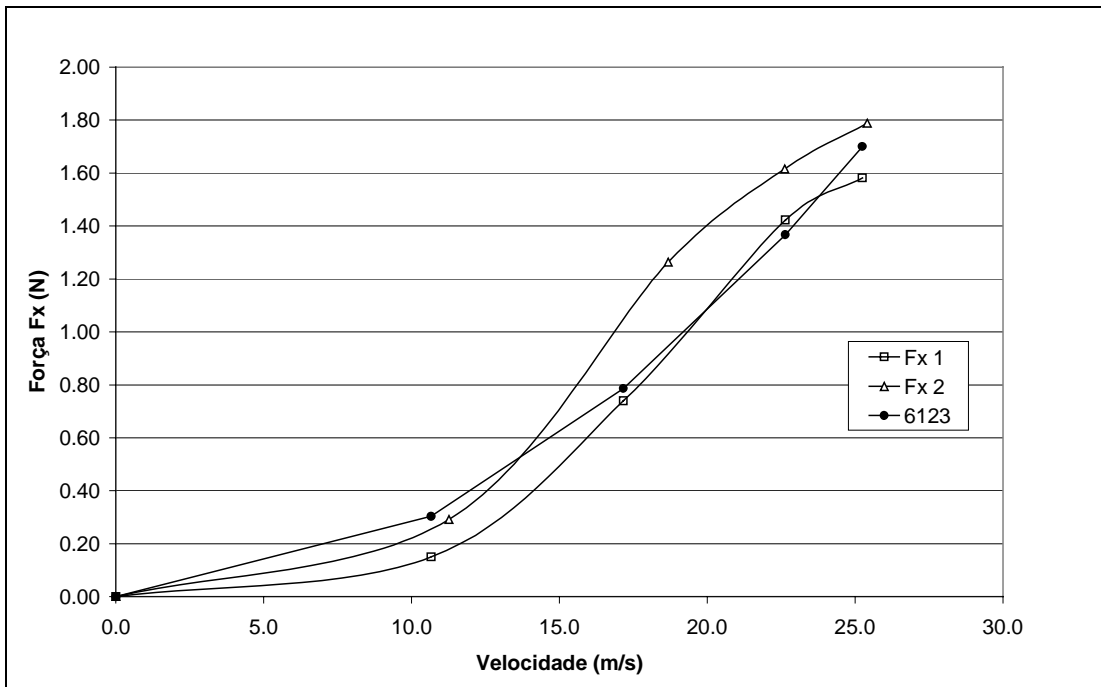


Fig. 7.19 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1

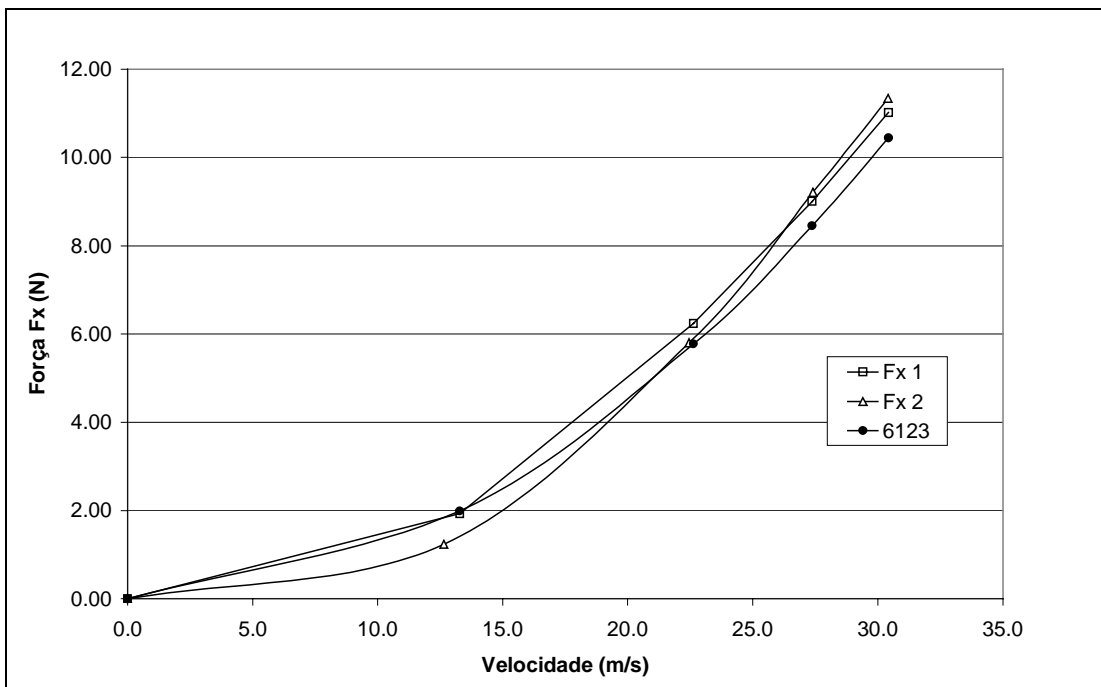


Fig. 7.20 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3

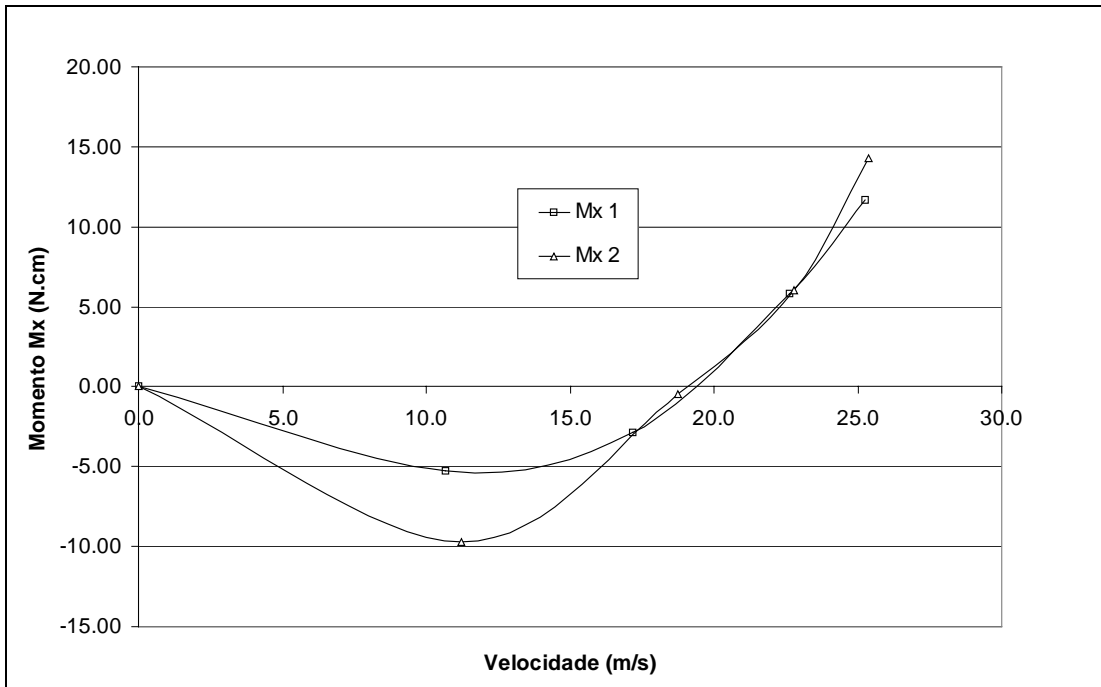


Fig. 7.21 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 1

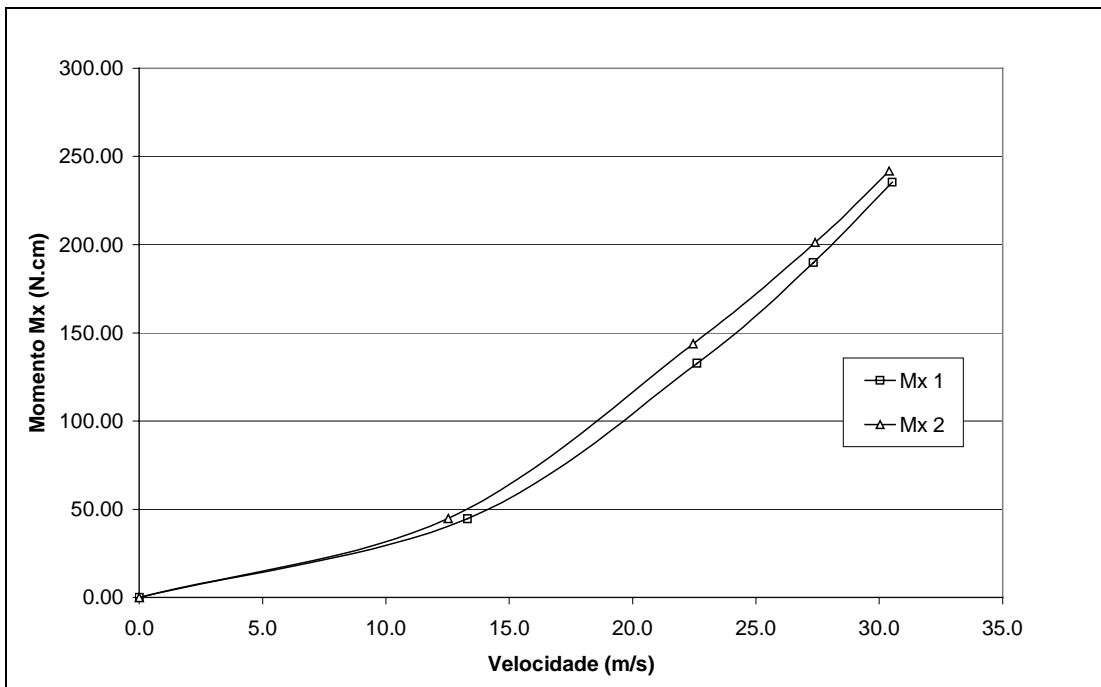


Fig. 7.22 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 3

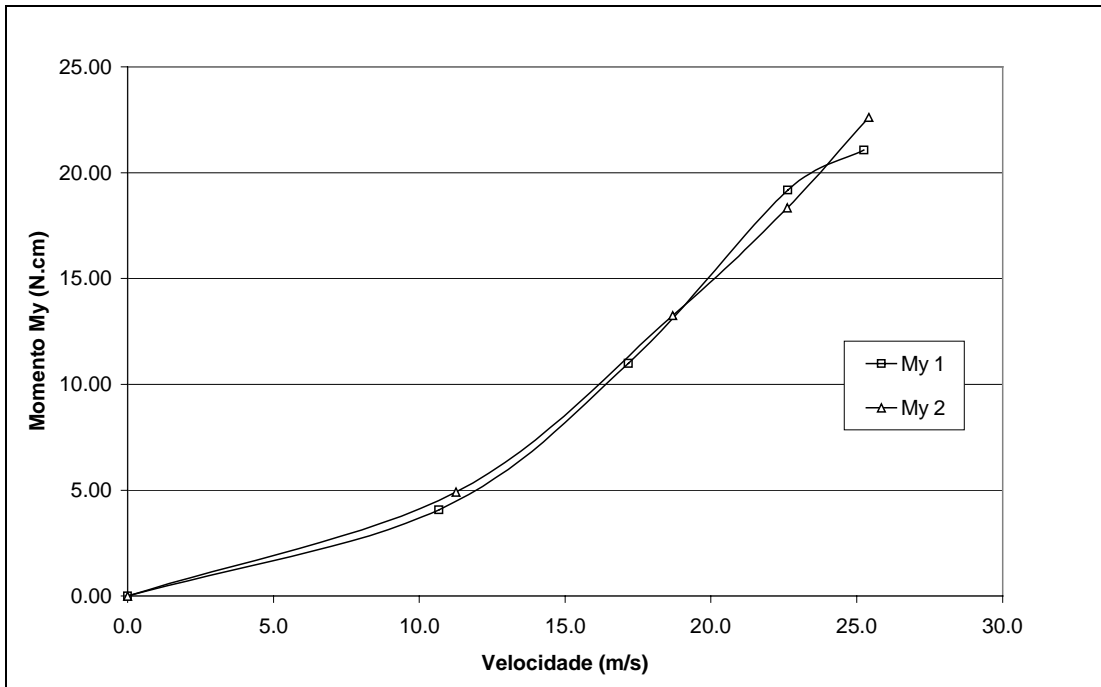


Fig. 7.23 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 1

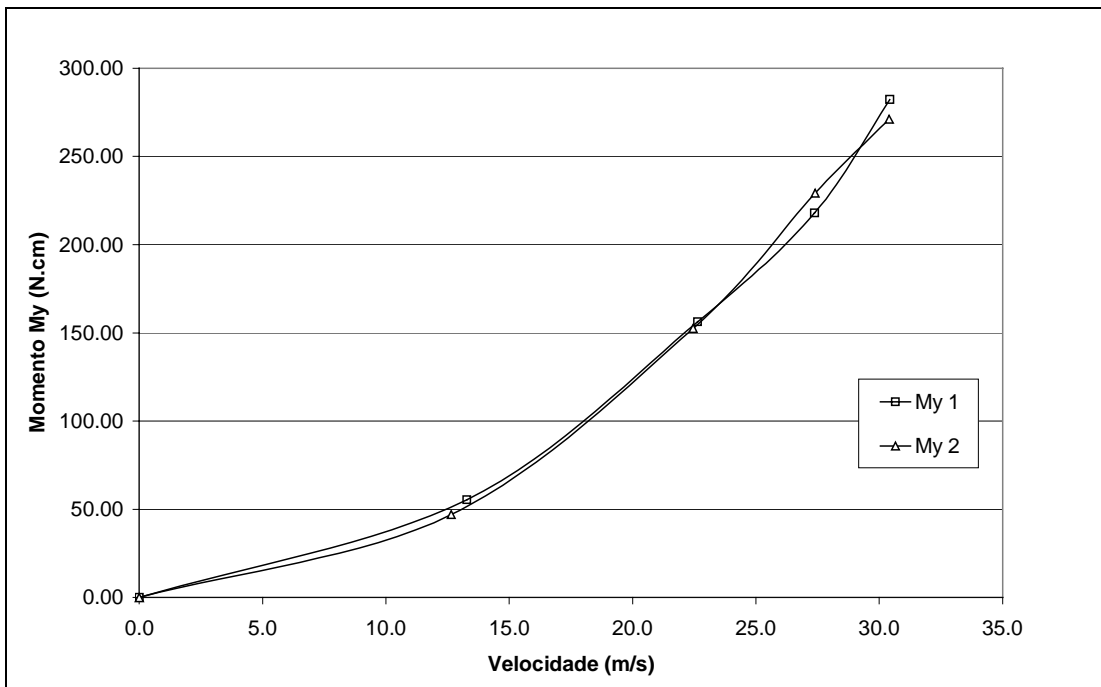


Fig. 7.24 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 3

7.4 ENSAIOS COM VENTO DESLIZANTE E TURBULENTO – MODELOS 2 E 4

A seguir são mostradas as Fig. 7.25 à 7.30 com os resultados dos ensaios com os modelos 2 e 4 com vento deslizando e turbulento.

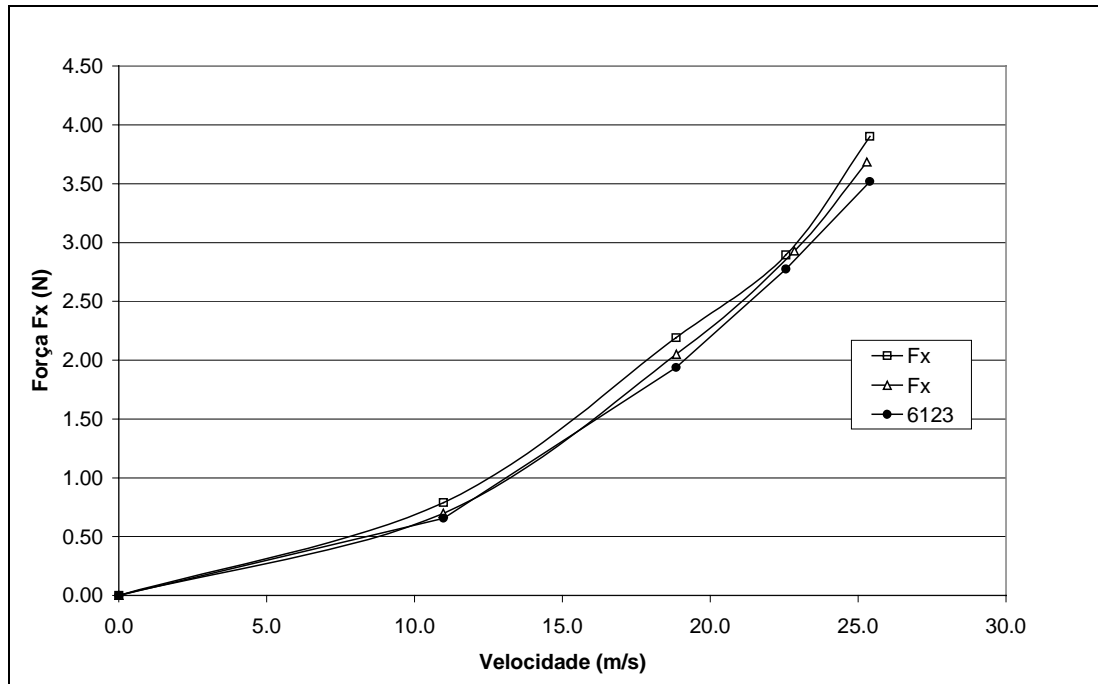


Fig. 7.25 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2

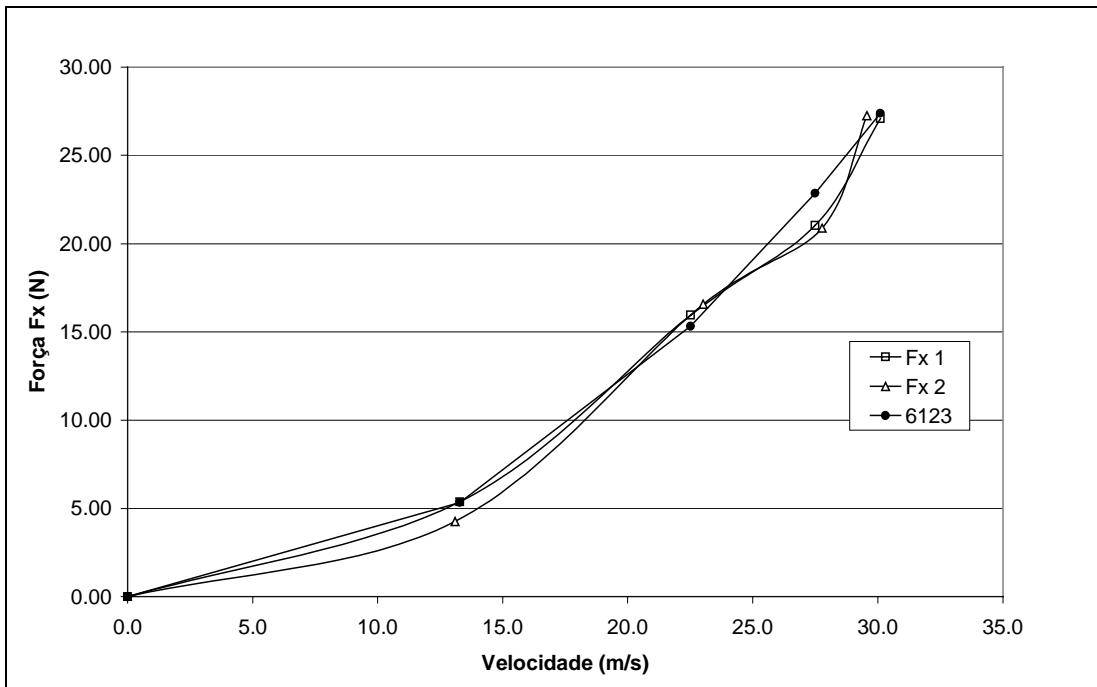


Fig. 7.26 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4

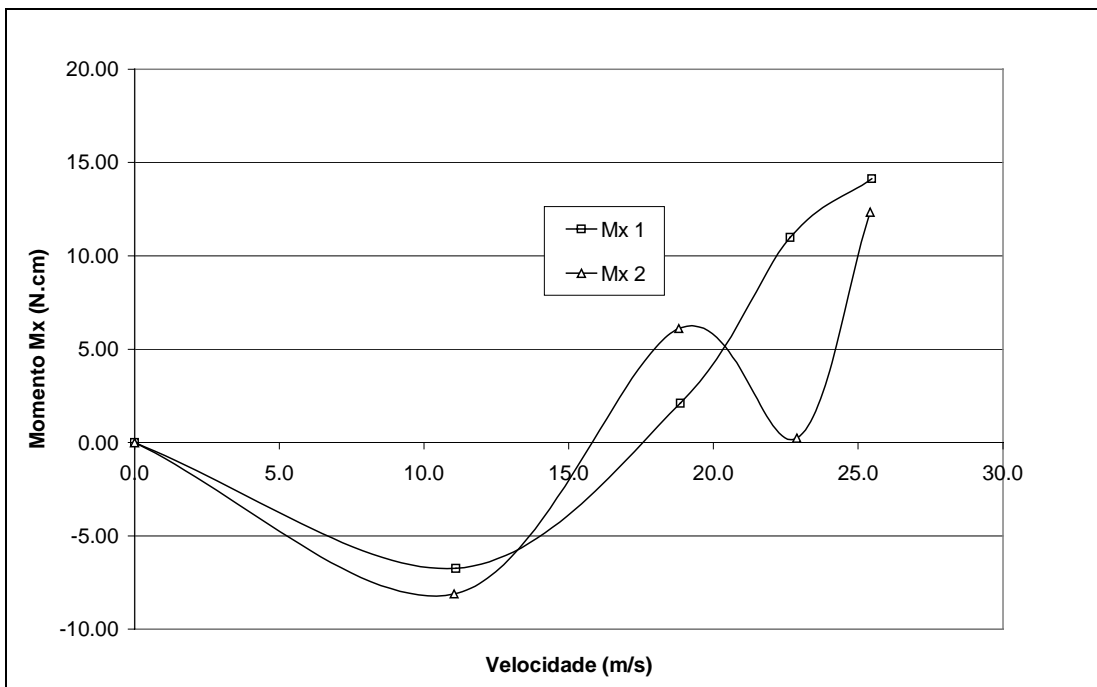


Fig. 7.27 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4

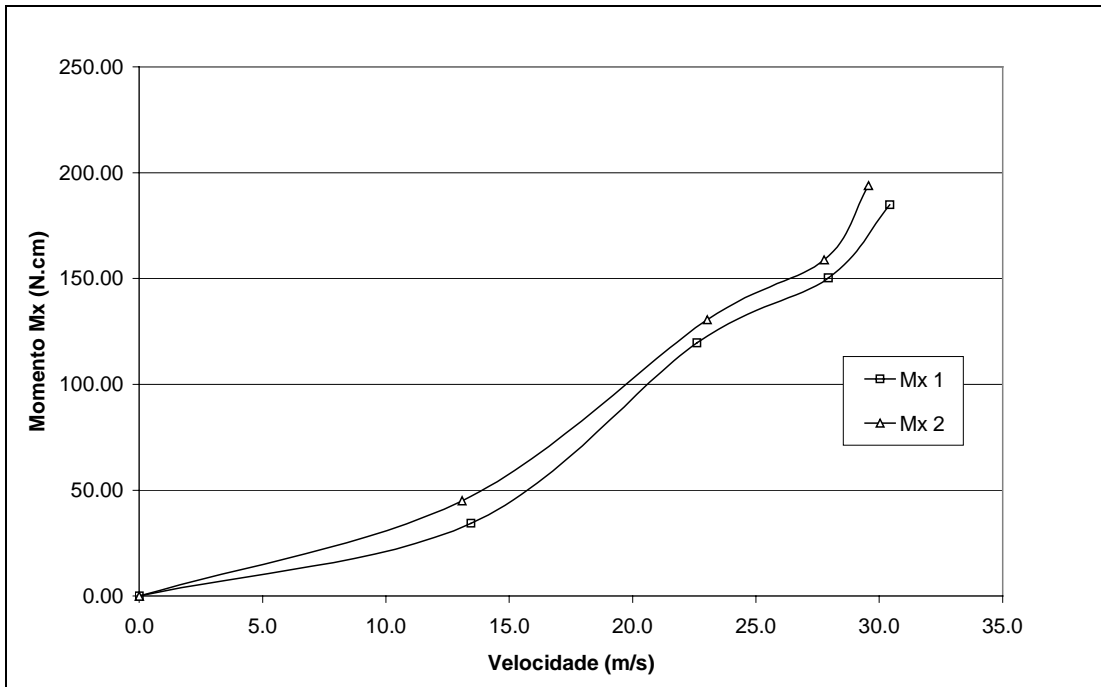


Fig. 7.28 – Resultado de ensaio – Vento a 90° – Modelo 4

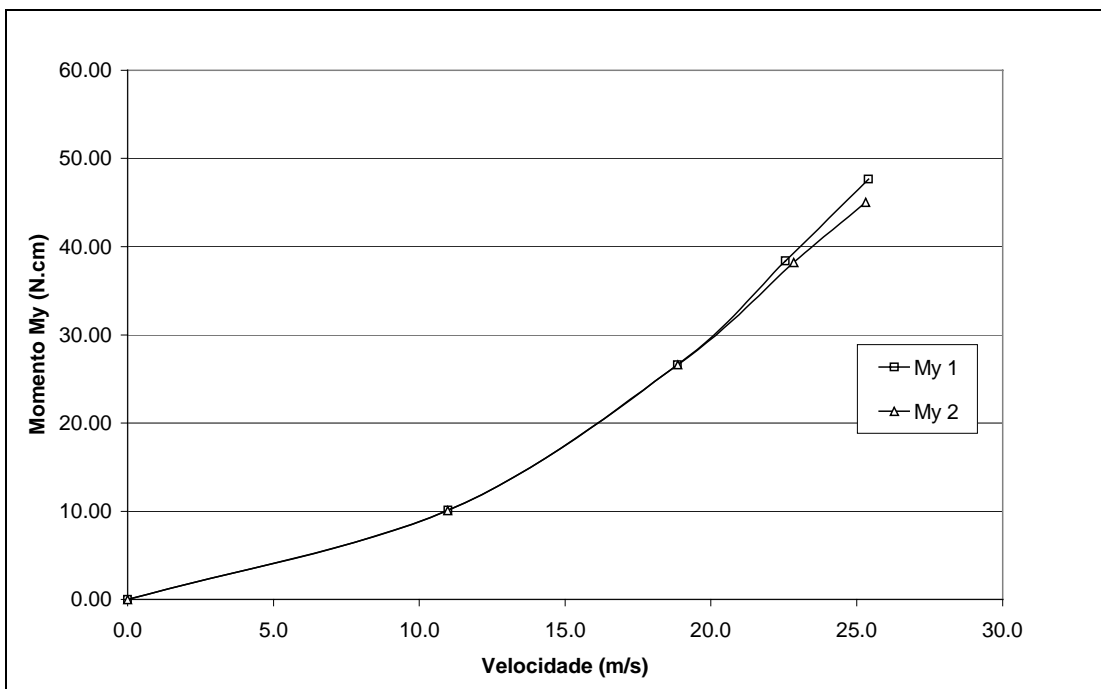


Fig. 7.29 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 2

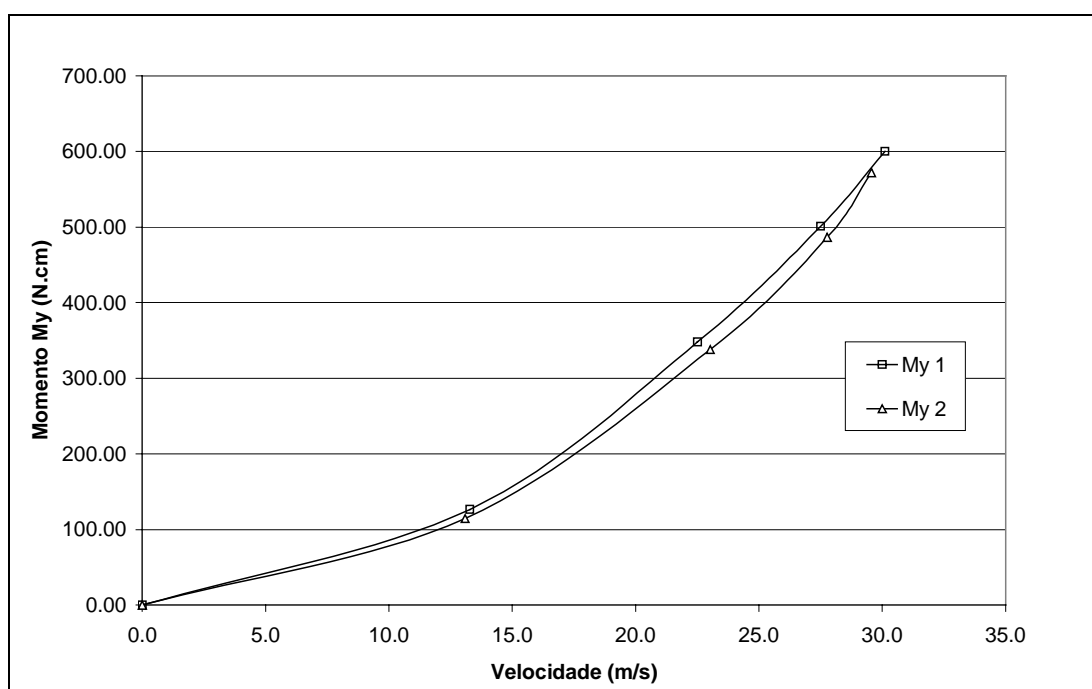


Fig. 7.30 – Resultado de ensaio – Vento a 0° – Modelo 4

7.5 COEFICIENTES DE FORÇAS AERODINÂMICAS

O resultado do cálculo dos coeficientes de força aerodinâmicos é mostrado neste item. A fim de comparar com resultados constantes na NBR6123, Este cálculo levou em consideração o perfil de velocidade do escoamento ao qual o modelo estava sendo submetido durante o ensaio.

Os coeficientes de força aerodinâmicos obtidos com a incidência do vento uniforme e suave são comparados aos coeficientes de arrasto para edificações paralelepédicas em vento de baixa turbulência segundo o ábaco da Fig. 4 da NBR6123. Já para a comparação dos resultados obtidos com o vento deslizando e turbulento foi utilizada a Fig.5 da NBR6123, que determina os coeficientes de arrasto para edificações paralelepédicas em vento de alta turbulência.

São então apresentados os coeficientes de força aerodinâmicos segundo a NBR6123 e os coeficientes calculados para cada modelo, para os dois tipos de escoamento testado, segundo o ângulo de incidência.

Os coeficientes de arrasto para 0° de incidência foram determinados a partir dos resultados obtidos através da componente Fx. Por outro lado, os coeficientes de arrasto para 90° de incidência foram determinados com a componente Fy.

As Tab. 7.1 e 7.2 trazem os coeficientes de força aerodinâmicos calculados.

Tab. 7.1 – Coeficientes força aerodinâmicos – vento uniforme e suave

Modelo	Coeficiente de arrasto – 0°		Coeficiente de arrasto – 90°	
	NBR6123	Experimental	NBR6123	Experimental
Modelo 3	1,35	1,37	1,35	1,34
Modelo 4	1,38	1,27	1,05	1,06

Tab. 7.2 – Coeficientes de arrasto – vento deslizando e turbulento

Modelo	Coeficiente de arrasto – 0°		Coeficiente de arrasto – 90°	
	NBR6123	Experimental	NBR6123	Experimental
Modelo 3	1,03	1,08	1,03	1,09
Modelo 4	1,08	1,39	0,88	1,20

8 CONCLUSÕES

Os fatores economia e segurança nas estruturas de obras civis, estão intimamente relacionados com o conhecimento das ações as quais a estrutura estará sujeita. Não sendo diferente para as ações devidas ao vento, ao conceber um projeto de uma construção, dependendo de sua geometria, poderá ser ou não possível determinar de forma analítica estas ações.

Para estruturas cujas formas geométricas não estão presentes em normas ou outras literaturas, o engenheiro de estruturas terá de lançar mão de uma das duas opções: garantir segurança e economia a partir de ensaios em túnel de vento – ou seja, investigar e estudar as ações devidas ao vento – ou, garantir a segurança mantendo exagerado grau de conservadorismo na estrutura, partindo para estruturas robustas e gastos além do necessário.

Uma vez que as ações verticais em uma estrutura de edificação alteada são conhecidas (tais como sobrecarga acidental, peso próprio e equipamentos), resta ao projetista, determinar a magnitude das ações horizontais na estrutura.

Dependendo do tipo de estrutura (edifícios, torres, chaminés, pontes, viadutos, estádios de futebol) e tipo de análise requerida, o estudo em túnel de vento pode se tornar bastante trabalhosa. A alta velocidade de desenvolvimento dos projetos estruturais atuais, graças aos modernos programas computacionais existentes no mercado, e a pressa dos empreendedores em dar início à sua obra, torna esta demora (e conseqüente elevado custo) na elaboração de estudos em túnel de vento um grande problema. Por conta disso, estruturas que poderiam tornar-se mais econômicas através de um estudo das ações do vento acabam por ser projetadas de forma conservadora.

Diante deste quadro, o equipamento desenvolvido se torna bastante versátil, proporcionando maior produtividade em ensaios nos quais o interesse é somente conhecer coeficientes de força aerodinâmicos, possibilitando até mesmo que sejam testadas variações da forma geométrica no modelo, a fim de pesquisar melhores condições aerodinâmicas. Isto é

possível pois os modelos para ensaios com a plataforma de forças são bem mais simples e fáceis de montar quando comparados aos modelos convencionais, com tomadas de pressão e também porque a análise dos dados é mais simples, produzindo resultados rapidamente.

Obviamente, o equipamento limita-se apenas a otimizar pesquisas centradas na determinação de coeficientes de força aerodinâmicos, não sendo aplicável a outros diversos estudos e análises em alguns casos necessários para subsidiar o projeto. Contudo, as informações em termos de coeficientes de força permitam antecipar o projeto de fundações, dando tempo para que ensaios mais detalhados possam ser elaborados para a estrutura.

Desta forma, conclui-se que:

- A precisão projetada para o equipamento foi alcançada para forças acima de 30N e momentos fletores maiores do que 100N.cm.
- A precisão dos ensaios está intimamente relacionada com a magnitude dos esforços transferidos pelo modelo à plataforma.
- Em sua utilização em estudos a ordem de grandeza dos esforços produzidos pelo escoamento no modelo deve estar acima dos limites de precisão, 30N para forças e 100N.cm para momentos.
- A ordem de grandeza dos esforços produzidos pelo escoamento sobre os modelos deve ser avaliada, para que se mantenha acima dos limites de precisão descritos.
- A placa de circuito impresso próxima aos extensômetros é importante, pois o nível de ruído verificado, durante os ensaios, foi bastante reduzido.
- O equipamento não apresenta histerese.

Assim, dentro da gama de utilização da plataforma de forças, pode-se afirmar que, utilizando modelos convenientemente dimensionados para este fim, o equipamento é uma

ferramenta versátil e precisa, viabilizando ao engenheiro de estruturas maior facilidade no uso do túnel de vento como instrumento de trabalho.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não é muito comum uma dissertação de mestrado apresentar capítulos após a conclusão que não sejam anexos ou apêndices. Neste caso, decidiu-se por redigir este capítulo pois, uma das únicas vantagens de ter-se um longo tempo no desenvolvimento da dissertação é o amadurecimento pessoal e profissional que ocorre neste período, trazendo à tona questões não imaginadas durante alguns processos de pesquisa.

Assim, este capítulo dedica-se a discutir algumas questões que, sob o ponto de vista do autor, ficaram em aberto, bem como propor trabalhos futuros nesta linha de pesquisa.

Durante a construção da plataforma de forças a sua geometria original foi alterada, pois, após ensaios dinâmicos verificou-se que o sistema estava rígido em demasia. Havendo possibilidade de tornar mais sensível o equipamento, foram propostas alterações na geometria, com objetivo de melhorar a precisão do equipamento. Neste processo foi gerado um modelo numérico em elementos finitos que, uma vez coerente com o ensaio dinâmico pregresso, permitiu prever, antes de realizar a alteração física na plataforma, quais as frequências de ressonância resultantes com alteração. Após as alterações nas peças da balança, não foi verificada, através de ensaio dinâmico, quais seriam as frequências reais de vibração, depositando-se confiança exagerada na análise numérica. Fica então a recomendação que seja executado um ensaio dinâmico na plataforma, a fim de comparar os dados obtidos neste ensaios com os dados oriundos da análise numérica de frequências naturais.

Observando os gráficos dos resultados, verifica-se que há diferentes níveis de precisão nas componentes F_x e F_y . Estas duas componentes são resultado da deformação do quadro formado pelas barras B, e teoricamente deveriam apresentar mesma resolução. Este fato tornou-se aparente quando da calibração do instrumento, pela simples comparação das constantes de calibração das duas componentes. Como trabalho posterior pode ser feita uma avaliação numérica e experimental, para determinar a causa deste efeito e uma possível solução.

A placa de acrílico utilizada como base para fixação dos modelos, é pouco rígida e apresenta coeficiente de expansão térmico muito diferente do aço inox. Esta placa pode ser responsável pela baixa precisão do equipamento quando solicitado aquém de 30N. O acrílico foi escolhido por apresentar baixo peso específico. Uma tampa mais pesada rebaixaria as frequências de ressonância da plataforma a níveis inaceitáveis. Uma pesquisa pode indicar a existência de um material mais adequado para confecção da tampa ou a elaboração de um novo sistema para fixação dos modelos sobre a plataforma, aumentando sua precisão.

Fica ainda a recomendação para futuros trabalhos que deve ser feita uma exploração dos limites do equipamento através de exaustivos ensaios com variados modelos e tipos de vento. Esta pesquisa irá revelar com mais clareza as potencialidades e limitações do equipamento, tornando-o mais confiável possibilitando sua utilização em larga escala.

Na mesma seqüência de ensaios proposta no parágrafo anterior, sugere-se medir as pressões existentes na base da balança e determinar quanto este efeito é significativo, ou seja, o quanto este efeito pode interferir nos resultados de ensaios executados com a plataforma de forças.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Forças devidas ao vento em edificações: NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988. Origem: NB-599/1987.
- [2] COOK, N.J. – *A sensitive 6-component high-frequency-range balance for building aerodynamics* – Journal of Physics e Scientific Instruments, vol 16, 1983, nº 5, maio.
- [3] CUNNINGHAM, D. M.; BROWN, G. W. – *Two devices for measuring the forces acting on the human body during walking* – Proc. Soc. Exp. Stress Anal. 9, 75-90, 1952.
- [4] GOLA, M. M. – *Mechanical desing, construction details and calibration of a new force plate* – Journal of Biomechanics, vol 13, 1978.
- [5] LYWOOD, D. W.; VANEYKEN, A., MACPHERSON, J. M. – *Small, triaxial force plate* – Med. & Biol. Eng & Comput., vol 25, 1987.
- [6] NÚÑEZ, G.J.Z. – *Relatório de Estágio Supervisionado* – Relatório de estágio supervisionado – Estágio Supervisionado – UFRGS, 1999.
- [7] ROESLER, H. – *Desenvolvimento de plataforma subaquática para medições de forças e momentos nos três eixos coordenados para utilização em biomecânica* – Tese de doutorado PROMEC – UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1997.
- [8] TSCHANZ, T. – *The base balance measurement technique and applications to dynamic wind loading of structures* – Phd tesis, The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science, London, Canada, BLWT-5-1983, 1982.
- [9] TSCHANZ, T.; Davenport, A.G. – *The base balance technique for the determination of dynamic wind loads* – Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 13, nº 1, dezembro, 1983.

- [10] ZARO, M.A.; Borchardt, I.G. – *Extensômetros de resistência elétrica; strain gauges* – Editora da Universidade UFRGS, 1982.
- [11] ZARO, M.A.; Borchardt, I.G. – *Instrumentação; Guia de aulas práticas* – Editora da Universidade UFRGS, 1982.