

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

PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE TRANSDUTORES PARA MEDIÇÃO DE
ESFORÇOS EM SEMEADORAS-ADUBADORAS.

por

Jankiel Bordignon

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2005

PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE TRANSDUTORES PARA MEDIÇÃO DE
ESFORÇOS EM SEMEADORAS-ADUBADORAS.

por

Jankiel Bordignon
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Wilson João Batista

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Antonio Lilles Tavares Machado

Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Prof. Dr. Luis Carlos Gertz

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 03 de junho de 2005.

À minha família

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha irmã, pelo apoio em todos os momentos.

Aos tios(as) e primos(as) que sempre estiveram presente, colaborando de forma positiva.

Ao orientador, Professor Vilson J. Batista, pelo apoio e confiança depositada para realização deste trabalho.

Ao Professor Trein, pelas inúmeras reflexões que nos propôs.

Aos membros da banca de avaliação, Prof. Dr. Antonio Lilles Tavares Machado, Prof. Dr. Luis Carlos Gertz e Prof. Dr. Joyson Pacheco.

Ao Eng. Carlos Thomas, M.Sc (Pato), pela colaboração e ensinamentos.

Aos professores do PROMEC, em especial ao Ignacio, que tem se mostrado uma unanimidade entre os alunos, e à UFRGS pela oportunidade de ampliar horizontes.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À John Deere Brasil, pela oportunidade de desenvolver um projeto conjunto, e uma atenção especial aos Ilmos. Srs. Antônio Garcia, Luiz Eduardo Ramos e Julio Gomes.

Aos Engenheiros Ademar Gelbhar, Hugo, Javier, Gabriel, Rômulo e Cristiano, parceiros neste projeto, pela grande ajuda na realização dos testes e pela amizade.

Aos colegas da disciplina de Relação Solo-Máquina, Amauri e Xavier.

À Carla, que nos auxiliou nas avaliações de solo e nas publicações.

Ao amigo Rodrigo Jacques, pelas dicas e ensinamentos agronômicos.

Aos bolsistas de iniciação científica.

Ao Dr. Nelson Schuch, que nos possibilitou interagir com o meio científico junto ao INPE de maneira bastante profícua.

À professora Maria Beatriz Luce, da Faculdade de Educação da UFRGS, que realiza um trabalho de grande relevância para o ensino.

RESUMO

A mecanização agrícola tem sido um importante fator que vem contribuindo para atender o aumento na demanda por alimentos. Porém, o desenvolvimento de máquinas e implementos com maior desempenho operacional ainda carecem de uma base de informações tecnológicas sistematizadas para a implementação em novos projetos de produtos. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho foi o de implementar um sistema capaz de gerar informações para auxiliar no desenvolvimento de novos projetos de produtos, ou mesmo na melhoria das máquinas e implementos já existentes.

Para tanto, foi construído um conjunto de transdutores de força – dinamômetros do tipo anel octogonal estendido, capazes de medir solicitações em duas direções ortogonais e o momento associado a estes dois esforços. Associados a estes transdutores foram utilizados outros recursos para a formação de uma instrumentação embarcada, a fim de possibilitar os registros, em tempo real, dos dados gerados para serem armazenados em bancos de dados para posterior análises e avaliações.

Com o sistema implementado foram realizados diversos conjuntos de testes de campo, onde se ensaiou uma semeadora adubadora comercial com seus elementos ativos e/ou seus componentes isolados da máquina. No primeiro teste, foi avaliada uma linha completa de uma semeadora-adubadora, onde foram medidos os esforços no disco de corte da palha, na haste sulcadora para deposição do adubo e na unidade de semeadura. Nos testes seguintes, foram realizadas avaliações em dois modelos de hastes sulcadoras, trabalhando com diversos parâmetros distintos, a fim de comparar os respectivos desempenhos entre os dois modelos estudados. Também, verificaram-se avaliações das solicitações dos esforços de tração para sulcadores de adubo tipo disco duplo e, para tracionar somente os discos de corte. Finalmente, mediram-se os esforços para o arraste do chassi durante o deslocamento em campo.

Os resultados dos sensores de força combinados com a instrumentação embarcada foram considerados satisfatórios durante as medições nos testes de campo, visto a sua repetibilidade tendo como referência um sistema de calibrações prévias. Desta forma, confirmou-se que os registros dos testes de campo podem servir de referência para a análise de projeto de máquinas semeadoras-adubadoras, uma vez que os mesmos foram obtidos em condições reais durante as operações de campo.

ABSTRACT

“FORCE SENSOR DESIGN AND CONSTRUCTION FOR DIRECT SEEDERS STRENGTH MEASUREMENT”

Agricultural mechanization has been an important factor contributing to supply the increase in world food demand. However, the development of machines and implements with bigger operational performance still lacks a systemized technological information base for implementation in new product designs. Thus, the main objective of this work has been to implement a system capable to generate information to aid in development of new product designs, or in already existing machines and implements improvement.

Thus, has been constructed a force transducers kit - type extended octogonal ring dynamometers, capable to measure strength in two orthogonal directions and the moment associated with these. Associated to these transducers had been used other resources to mount an on board instrumentation, to make possible to register in real time the generated data, to be stored in data bases for posterior analyses and evaluations.

With the implemented system diverse sets of field tests had been carried through, where has tested a commercial direct seeder with its active elements and/or its isolated components from machine. In the first test, a complete line of a direct seeder has been evaluated, where had been measured the strength of a straw cutter disc, in fertilizer chisel opener and in sowing unit. In the following tests, evaluations in two models of fertilizer chisel opener had been carried through, working with diverse distinct parameters, in order to compare the respective performances between the two studied models. Also, had been evaluated the draft force for double disc furrow openers and only straw cutter disc acting. Finally, had been measured the draft force to move the chassis during the displacement in field.

Results of force sensors combined with on board instrumentation had been considered satisfactory during the measurements in field tests, based in its repeatability and referenced in a previous calibrations system. Thus, has been confirmed that field data tests can aid like reference for direct seeder machines design analysis, considering that the same ones had been gotten in real conditions during field operations.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	O Agronegócio Brasileiro	3
1.2	Objetivo Geral.....	4
1.3	Objetivo Específico.....	4
1.4	Metodologia	4
1.5	Estrutura do presente trabalho	5
1.6	Limitações do presente trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	O Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas	7
2.1.1	O processo atualmente praticado na indústria de máquinas agrícolas.....	9
2.2	Semeadora-Adubadora.....	10
2.3	Elementos Sulcadores	12
2.4	Esforço de Tração	14
2.5	Células de carga octogonais	18
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	20
3.1	Equacionamento Básico da Elasticidade Linear	20
3.2	Transdutor de Força	24
3.2.1	Elemento Elástico	24
3.2.2	Transdutor com extensômetros de resistência elétrica.....	25
3.2.3	Extensômetros de Resistência Elétrica (Strain Gages)	27
3.2.3.1	Princípio básico do extensômetro de resistência elétrica.....	27
3.2.4	Ponte de Wheatstone	29
3.3	Características Fundamentais das Células de Carga	32
3.3.1	Desvio de Linearidade (Alinearidade)	32
3.3.2	Histerese.....	33
3.3.3	Repetibilidade	34
3.3.4	Interferência	35
3.4	Conceitos sobre Aquisição de Dados.....	36
3.4.1	Aquisição de Dados com Microcomputadores	36
3.4.2	Sensores	37
3.4.3	Condicionadores.....	37
3.4.4	Cabos.....	37
3.4.5	Conversor A/D	38
3.4.6	Faixa de Entrada e Resolução	39

3.4.7	Taxa de Amostragem.....	41
3.4.8	Fatores de Escala.....	44
4	PROJETO, CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA OCTOGONAIS.....	46
4.1	Dimensionamento	46
4.2	Características da célula de carga	51
4.3	Material Elástico	51
4.4	Extensômetros	51
4.5	Adesivo	51
4.6	Proteção Física da Célula de Carga	51
4.7	Cabos.....	52
4.8	Testes de Laboratório – Calibração dos sensores.	53
4.8.1	Calibração estática das células de carga octogonais	53
4.8.1.1	Pré-calibração.....	53
4.8.1.2	Equipamento e dispositivos utilizados na calibração.....	55
4.8.1.3	Procedimento experimental para calibração	55
4.8.1.4	Amplificação dos sinais de saída das pontes	58
4.8.2	Análise Dinâmica da Célula de Carga Octogonal.....	59
4.8.2.1	Procedimento Numérico	59
4.8.2.2	Procedimento Experimental.....	59
4.9	Resultados de Calibração	60
4.9.1	Desvio de Linearidade (Alinearidade)	62
4.9.2	Histerese.....	63
4.9.3	Repetibilidade	63
4.9.4	Interferência	64
4.9.5	Análise de Erros.....	64
5	VALIDAÇÃO DOS TRANSDUTORES – TESTES DE CAMPO.	67
5.1	Instrumentação Embarcada - Sistema de condicionamento de sinal, aquisição, e armazenamento de dados	67
5.2	Experimento 1 - Linha de semeadora-adubadora (Rio Brillhante - MS).....	69
5.2.1	Localização e caracterização geral da área de teste	69
5.2.2	Delineamento Experimental.....	70
5.2.3	Máquinas e equipamentos para execução dos ensaios no campo	70
5.2.4	Configurações experimentais	70
5.2.4.1	Operação de semeadura em deslocamento retilíneo	71
5.2.4.2	Comparativo de esforço da haste sulcadora medida em dois pontos distintos	72

5.2.4.3	Avaliação dos esforços nas hastes sulcadoras de distribuição de adubo em manobras ..	73
5.2.4.4	Avaliação de esforços nos discos de corte da palha em manobras	76
5.3	Experimento 2 – Testes com um chassi porta ferramentas acoplado aos três pontos (Horizontina – RS).....	78
5.3.1	Localização e caracterização geral da área de teste	78
5.3.2	Máquinas e equipamentos para condução dos ensaios no campo.....	78
5.3.3	Configuração experimental.....	79
5.3.3.1	Avaliação de esforços em sulcadores de adubo tipo facão	79
5.3.4	Delineamento Experimental.....	79
5.4	Experimento 3 – Chassi com sete linhas acoplado na barra de tração (Horizontina – RS)	80
5.4.1	Localização e caracterização geral da área de teste	80
5.4.2	Máquinas e equipamentos para condução dos ensaios no campo.....	80
5.4.3	Configurações experimentais	81
5.4.3.1	Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo facão.....	81
5.4.3.2	Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo disco duplo	82
5.4.3.3	Avaliação de esforços de tração dos discos de corte da palha	83
5.4.3.4	Avaliação do arraste de transporte do chassi	84
5.4.4	Delineamento Experimental e análise estatística.	84
5.5	Teor de água no solo	84
5.6	Resistência à penetração do solo	84
5.7	Profundidade do Sulco	84
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
6.1	Avaliação qualitativa de uma aquisição.....	85
6.2	Experimento 1 – linha de semeadora-adubadora (Rio Brilhante - MS).....	87
6.2.1	Semeadura em deslocamento retilíneo.....	87
6.2.2	Comparativo de esforço da haste sulcadora medida em dois pontos distintos	95
6.2.3	Avaliação de hastes sulcadoras de distribuição de adubo em manobras	98
6.2.4	Avaliação de esforços nos discos de corte da palha em manobras	99
6.3	Experimento 2 – Testes com um chassi porta ferramentas acoplado aos três pontos (Horizontina – RS).....	100
6.3.1	Avaliação de esforços em sulcadores de adubo tipo facão	100
6.4	Experimento 3 – chassi com sete linhas acoplado na barra de tração (Horizontina – RS)	101
6.4.1	Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo facão.....	101
6.4.2	Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo disco duplo	103
6.4.3	Avaliação de esforços de tração dos discos de corte da palha	104

6.4.4	Avaliação do arraste de transporte do chassi	105
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	107
7.1	Conclusões	107
7.2	Sugestões de continuidade	108
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	APÊNDICE A.....	116
	APÊNDICE B.....	117
	APÊNDICE C	118
	APÊNDICE D.....	119
	APÊNDICE E.....	120
	APÊNDICE F.....	121
	APÊNDICE G.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	1.10^{-6}	
A	área	[m ²]
A/D	analógico/digital	
AC	corrente alternada	
DC	corrente contínua	
E	tensão de alimentação da ponte	[V]
E	módulo de elasticidade	[N/ m ²]
E _o	tensão de saída da ponte	[V]
F	força	[N]
F	sensibilidade ou fator do extensômetro	
G	módulo de elasticidade transversal	[N/ m ²]
GPS	sistema global de posicionamento (<i>Global Positioning System</i>)	
K	sensibilidade ou fator do extensômetro	
l	comprimento	[m]
L	comprimento	[m]
R	resistência elétrica	[]
RMS	média quadrática (<i>Route Mean Square</i>)	
S	sensibilidade de um transdutor	
Sc	sensibilidade da célula de carga	
Sp	sensibilidade da ponte	
S _{ponte}	sensibilidade da ponte	
TDA	tração dianteira auxiliar	
V	tensão elétrica	[V]
V _{exc}	tensão de excitação	[V]
V _{out}	tensão de saída	[V]
Δl	variação de comprimento	[m]
Δ	deformação	
ë	constante de Lamé	
í	módulo de Poisson	
ñ	resistividade do material	[/m]
ó	tensão	[N/ m ²]

σ_e	tensão de escoamento corpo na posição deformada	[N/ m ²]
σ_o	corpo na posição inicial	
ΔL	variação de comprimento	[m]
ΔR	variação de resistência elétrica	[]
ΔV	variação de tensão elétrica	[V]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da seqüência de elementos ativos que compõe uma linha de semeadura direta típica.	11
Figura 2.2 – Exemplo de uma seqüência de elementos ativos de uma linha de semeadura comercial.	11
Figura 2.3 – Parâmetros básicos de uma haste sulcadora: o ângulo de ataque e espessura da ponteira.	12
Figura 3.1 – Descrição da deformação de um corpo	20
Figura 3.2 - Estado de tensões em um elemento infinitesimal.....	21
Figura 3.3 – Diagrama simplificado de um transdutor de força. Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982a.	24
Figura 3.4 – Diagrama de bloco das unidades de um transdutor de força; o transdutor é composto por uma célula de carga e uma ponte amplificadora. Os quatro extensômetros são elementos comuns entre a célula e o amplificador. Fonte: Adaptado de Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982a.	26
Figura 3.5 – Diagrama do processo da informação desde a excitação até a resposta. Fonte: Adaptado de Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982a.	26
Figura 3.6 - Representação do condutor de comprimento l e área da seção transversal A	28
Figura 3.7 – Extensômetro de resistência elétrica (strain gage).....	29
Figura 3.8 – Ponte de Weatstone	30
Figura 3.9 – Gráfico mostrando a forma de determinação da alinearidade (A).	32
Figura 3.10 – Gráfico com esquema de determinação da Histerese.	33
Figura 3.11 – Gráfico com esquema de determinação da repetibilidade.	34
Figura 3.12 – Exemplo de interferência entre canais de uma célula de carga qualquer com três canais.	35
Figura 3.13 - Esquema de um sistema de aquisição de dados. Fonte: AqDados.	36
Figura 3.14 – Esquema de um sistema de aquisição de dados utilizando microcomputador. Fonte: AqDados.....	37
Figura 3.15 – Exemplo de conversão analógico/digital de uma força. A/D de 4 bits ($2^4 = 16$ níveis), faixa de entrada de ± 5 V e taxa de amostragem de 10 Hz. Fonte: AqDados, 2003.	39
Figura 3.16 – Condicionamento de sinal, adequando a faixa de entrada. Fonte: AqDados, 2003.	40

Figura 3.17 – Sinal amostrado em 4 e 5 bits. Fonte: AqDados, 2003.....	41
Figura 3.18 – Sinal amostrado em duas taxas de amostragens distintas, 10 e 20 amostras por segundos. Fonte: AqDados, 2003.	42
Figura 3.19 – Exemplos de amostragem. (A) sem aliasing, (B e C) com aliasing. Fonte: AqDados, 2003.	43
Figura 3.20 – Diagrama de conversão de uma força que é analógica em um registro digital. Fonte: AqDados, 2003.	44
Figura 3.21 – Conversão do registro digital para tensão elétrica. Fonte: AqDados, 2003.....	45
Figura 3.22 – Conversão de tensão elétrica em valores de força. Fonte: AqDados, 2003.....	45
Figura 4.1 – Ferramenta genérica para estimativa de momento aplicado no anel octogonal estendido.	47
Figura 4.2 – Desenho final do elemento elástico do anel octogonal estendido.	49
Figura 4.3 – Dinamômetro em forma de “duplo anel octogonal”. Fonte: Muro & Tran, 2004. ...	50
Figura 4.4 – Foto de um Dinamômetro em forma de “duplo anel octogonal” mostrando os extensômetros e a fiação até a caixa de ligação. Fonte: Godwin et al., 1993.....	50
Figura 4.5 - Esquema de posicionamento e ligações elétricas dos extensômetros no elemento elástico. Fonte: Adaptado de Souza & Magalhães, 1989	50
Figura 4.6 - Célula de Carga com proteção montada	52
Figura 4.7 – Cabo especial, construído para ligação das células de carga octogonais.....	52
Figura 4.8 – Configuração de montagem em máquina universal de ensaio para calibração do eixo horizontal da célula de carga.	54
Figura 4.9 - Configuração de montagem em máquina universal de ensaio para calibração do eixo vertical da célula de carga.	54
Figura 4.10- Configuração de montagem em máquina universal de ensaio para calibração de momento na célula de carga.	55
Figura 4.11 – Configuração para calibração do canal que mede o esforço horizontal da célula de carga octogonal. A – esquema teórico; B – foto da montagem executada.	56
Figura 4.12– Configuração para calibração do canal vertical da célula de carga octogonal. A - esquema teórico; B – foto da montagem executada.	57
Figura 4.13– Configuração para calibração do canal que mede momento na célula de carga octogonal. A – esquema teórico; B – foto da montagem executada.	58
Figura 4.14 – Espectro de frequência da resposta impulsiva da célula de carga. Dados dos três canais da célula de carga sobrepostos no gráfico.	60

Figura 4.15 – Gráfico característico da calibração do eixo horizontal das células de carga.....	61
Figura 4.16 – Gráfico característico da calibração do eixo vertical das células de carga.	61
Figura 4.17 – Gráfico característico obtido na calibração de momento.....	62
Figura 5.1 – Desenho esquemático do arranjo utilizado para aquisição de sinais.	67
Figura 5.2 – Célula de carga tipo anel octagonal estendido.....	68
Figura 5.3 - Condicionador de sinais marca Lynx, modelo ADS2000IP.....	68
Figura 5.4 – Microcomputador utilizado nas aquisições para calibração e testes de campo.	69
Figura 5.5 – Disposição das três células de carga para avaliação de três distintas funções da semeadora-adubadora.	71
Figura 5.6 – Disposição de três células de carga. Uma medindo esforços no disco de corte, outras duas na haste sulcadora, sendo uma junto ao chassi e outra diretamente na haste.	72
Figura 5.7 – Diagrama do posicionamento das células de carga na semeadora-adubadora para avaliação dos esforços gerados na haste sulcadora do adubo.....	73
Figura 5.8 – Célula de carga montada na orientação Vertical	74
Figura 5.9 - Célula de carga montada na orientação Transversal	74
Figura 5.10 – Manobra de semeadura atravessando um terraço típico a 45° de sua orientação principal.....	75
Figura 5.11 – Manobra de semeadura em curva	76
Figura 5.12 - Diagrama do posicionamento das células de carga octogonais na semeadora- adubadora para avaliação dos esforços no sistema do disco de corte de palha.	76
Figura 5.13 – Posicionamento das células de carga octogonais para avaliação dos esforços em 3 discos de corte.	77
Figura 5.14 – Chassi especial de testes com disco de corte de palha e hastes sulcadoras de adubo acoplado aos três pontos do trator.	78
Figura 5.15 – Chassi de semeadora-adubadora adaptado para testes.....	80
Figura 5.16 – Acoplamento de uma célula de carga uniaxial na posição da barra de tração do trator.	82
Figura 5.17 – Linha composta por disco de corte de palha e sulcador de adubo tipo disco duplo.	83
Figura 5.18 – Sete discos de corte de palha em avaliação do esforço de tração.....	83
Figura 6.1 – Registro da medição de uma linha de plantio de uma semeadora-adubadora de treze linhas. De cima para baixo, esforço horizontal, vertical e momento na	

haste sulcadora, disco de corte e unidade de semeadura, respectivamente nas células de carga 1, 2 e 3.	86
Figura 6.2 – Força Horizontal medida na haste sulcadora de adubo em três profundidades e três velocidades de operação.	88
Figura 6.3 - Força Vertical medida na haste sulcadora de adubo em três profundidades e três velocidades de operação.	90
Figura 6.4 – Força Horizontal medida no disco de corte da palha. Foram efetuados registros com uma regulagem fixa no disco de corte enquanto se fez a variação de três profundidades e três velocidades na haste sulcadora de adubo.	91
Figura 6.5 – Força Vertical medida no disco de corte da palha. Foram efetuados registros com uma regulagem fixa no disco de corte enquanto se fez a variação de três profundidades e três velocidades na haste sulcadora de adubo.	92
Figura 6.6 - Força de tração no sistema de semeadura, com os seguintes elementos ativos: disco duplo para deposição de semente e rodas compactadoras.	93
Figura 6.7 – Força de tração no Disco de Corte (DC), Haste Sulcadora (Haste) e Unidade de Semeadura (US). Valores médios de três repetições para três velocidades e três profundidades medidas.	94
Figura 6.8 – Sobreposição dos sinais adquiridos nos canais que medem esforços Horizontais nas células de carga 1 (vermelho) e 3 (azul), que estão posicionadas respectivamente junto a haste e junto ao chassi da máquina.	96
Figura 6.9 – Correlação (98,7% ou $R^2 = 0,987$) das forças Horizontais medidas em pontos distintos, referentes a figura 6.8. A linha tracejada (azul) é o ajuste linear dos pontos. A linha contínua (vermelha) serve como referência para uma correlação de 100%.	96
Figura 6.10 - Sobreposição dos sinais adquiridos nos canais Verticais das células de carga 1 (vermelho) e 3 (azul), que estão posicionadas respectivamente junto a haste e junto ao chassi da máquina.	97
Figura 6.11 – Correlação (44% ou $R^2 = 0,44$) das forças Verticais medidas em pontos distintos, referentes a figura 6.10. A linha tracejada (azul) é o ajuste linear dos pontos.	97
Figura 6.12 - Sobreposição dos sinais adquiridos nos canais que medem Momento nas células de carga 1 (vermelho) e 3 (azul). Estas estão posicionadas respectivamente junto a haste e junto ao chassi da máquina.	98
Figura 6.13 - Correlação (95% ou $R^2 = 0,95$) dos Momentos medidos em pontos distintos, referentes a figura 6.12. A linha tracejada (azul) é o ajuste linear dos pontos.	98
Figura 6.14 – Forças medidas pela célula 1 em duas hastes distintas para comparativo de desempenho.	100
Figura 6.15 - Forças medidas pela célula 2 em duas hastes distintas para comparativo de desempenho.	100

Figura 6.16 – Esforço médio por linha de semeadura. Valor medido na barra de tração.	102
Figura 6.17 – Força de tração em hastes sulcadoras. Registros feitos com os anéis octogonais estendidos.	103
Figura 6.18 – Força para tracionar 7 linhas compostas por disco de corte e sulcador de adubo tipo disco duplo de 16”, variando a pressão nas molas do sulcador de adubo.	104
Figura 6.19 – Força para tracionar um chassi com 7 discos de corte de palha, espaçados de 0,45 m, em dois níveis de pressão nas molas destes discos.	105
Figura 6.20 – Gráfico da força em N (eixo Y) na barra de tração durante transporte de um chassi de semeadora com 4,5 m de largura e quatro pneus para transporte e transmissão.	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Equações da saída das pontes de Wheatstone. Fonte: Adaptado de Measurements Group	31
Tabela 3.2 – Exemplos de Frequência de Amostragem por Aplicação	44
Tabela 4.1 - Características dos extensômetros elétricos empregados nas células de carga.....	51
Tabela 4.2 – Valores de ganho utilizados na amplificação dos sinais de saída de cada ponte das células de carga octogonais para adequação da faixa de tensão de saída do condicionador de sinais.	59
Tabela 4.3– Coeficientes angulares dos respectivos canais das três células de carga octogonais, referentes as curvas de calibração com ganhos de 1000, 2000 e 500 respectivamente para os canais Horizontal, Vertical e Momento.	62
Tabela 4.4 – Desvio de linearidade calculado para os dados de calibração, nas respectivas células de carga.....	63
Tabela 4.5 – Histerese verificada nas três células de carga octogonais, nos respectivos canais.	63
Tabela 4.6 – Desvio da repetibilidade apresentada pelas células de carga.	63
Tabela 4.7 – Interferências entre canais verificadas na calibração das três células de carga tipo anéis octogonais estendidos.	64
Tabela 4.8 – Imprecisão calculada sem levar em conta a interferência entre os canais.....	65
Tabela 4.9 – Imprecisão calculada levando em conta a interferência entre os canais.	66
Tabela 6.1 – Força Horizontal (N) na haste sulcadora de adubo em três profundidades e três velocidades de operação (média de três repetições).	87
Tabela 6.2– Força Vertical (N) na haste sulcadora de adubo (média de três repetições). O sentido da força é de baixo para cima.	89
Tabela 6.3 – Força Horizontal (N) no Disco de Corte de Palha (média de três repetições).	91
Tabela 6.4 – Força Vertical (N) medida no disco de corte da palha. Foram efetuados registros com uma regulagem fixa no disco de corte enquanto se fez a variação de três profundidades e três velocidades na haste sulcadora de adubo. ...	92
Tabela 6.5 – Força de tração (N) na unidade de semeadura	93
Tabela 6.6– Valores máximos dos esforços de tração medidos nas hastes sulcadoras.....	99
Tabela 6.7 – Valores máximos dos esforços transversais medidos nas hastes sulcadoras.....	99
Tabela 6.8 – Valores máximos dos esforços medidos no Disco de Corte de Palha.....	100

Tabela 6.9 – Esforços de tração por linha. Cada linha composta por disco de corte e haste sulcadora de adubo.	101
Tabela 6.10 – Força de tração para conjunto formado por disco de corte e sulcador de adubo tipo disco duplo.	104
Tabela 6.11 – Força de tração do chassi equipado apenas com discos de corte	105
Tabela 6.12 – Forças medidas na barra de tração do trator para tracionar um chassi de semeadora com 4,5 m de largura e com quatro pneus para transporte. Os intervalos apresentados nesta tabela se refere ao gráfico da figura 6.20	106

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por alimentos e insumos básicos para a agroindústria mostra-se crescente, fazendo com que o setor primário tenha que aumentar a produção para atender aos novos mercados. Para uma maior produção, existem duas alternativas básicas, que são: melhora e/ou otimização da produtividade e/ou aumento das áreas de cultivo.

A pressão sobre os recursos naturais, para atender o crescimento da demanda por alimentos, é um dos principais fatores responsáveis pela degradação e má qualidade do solo e da água. Este fato tem ocorrido principalmente nos países localizados nas zonas tropicais e subtropicais, onde os solos são fisicamente frágeis, fortemente ácidos, possuem deficiência de nutrientes e onde ocorrem grandes precipitações e altas temperaturas, fatores estes que favorecem o processo de rápida degradação do solo [Camacho, 2002].

A preocupação, a nível mundial, em relação à eficácia dos sistemas de preparo de solo é crescente. Para aumentar a eficiência no processo produtivo agrícola, novos tipos de preparo de solo vêm sendo propostos visando a minimização das perdas por erosão, que são características bastante visíveis no sistema de preparo convencional de solo.

No Brasil, desde a década de 70, uma alternativa que tem sido utilizada como método conservacionista, reduzindo perdas de solo e nutrientes, é o sistema de semeadura direta, conhecido popularmente como “plantio direto”. Esta técnica está bastante difundida entre os agricultores brasileiros tendo ocupado 21,8 milhões de hectares na safra 2003/2004, segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha.

Entretanto, com esta prática, podem surgir algumas condições do solo que são desfavoráveis para o adequado cultivo. Uma destas condições indesejadas é a ocorrência da compactação do solo. Isto ocorre principalmente em áreas onde há integração da lavoura-pecuária e em áreas onde o sistema está consolidado (implantado a mais tempo), uma vez que foi eliminada a operação de revolvimento do solo, porém ainda ocorre o tráfego de máquinas. Outro fator que pode contribuir para a ocorrência da compactação é a utilização de máquinas com maior capacidade operacional que normalmente são máquinas maiores e com maior massa, e nem sempre com configurações adequadas de rodado, acarretando em um aumento considerável da compactação do solo. Aliado a estes fatores ainda pode-se considerar o teor de água no solo. Quando este for superior ao limite de friabilidade, considerado “solo úmido”, a compactação ocorrerá mais facilmente. Alguns efeitos negativos são vinculados à compactação, entre eles o aumento da resistência mecânica, que dificulta o crescimento radicular, a redução na capacidade de infiltração da água e aeração do solo, afetando diretamente a produtividade agrícola [Cepik, 2002].

Muitas áreas que apresentam compactação, não necessitariam operações de descompactação, como a escarificação, se houvesse uma adequada utilização das semeadoras-adubadoras. Ocorre que na maioria das vezes, são utilizadas configurações iguais de montagens e/ou regulagens nos sulcadores em condições distintas de solo, não propiciando um rendimento satisfatório do equipamento, uma vez que o solo se comporta de maneira distinta pela variação do teor de água contido nele [Cepik, 2002].

Para Boller, 2002, a mecanização agrícola consiste na utilização racional de máquinas, implementos e ferramentas para a realização das diversas operações agrícolas que compõem os sistemas de produção nas propriedades rurais. Entretanto, algumas observações não seguem esta premissa. Mantovani, 1999, destaca que os equipamentos agrícolas têm a sua utilização comprometida em razão da sua não-adequação às condições de trabalho. Além disso, para uma utilização “racional”, é necessário conhecer, entre outros fatores, a energia consumida no processo. Para a solução de alguns desses problemas não se dispõem de muitos dados sistematizados para se utilizar como parâmetros de projeto e, como agravante, alguns dos que tentam resolver essas questões não participam do projeto das máquinas, constituindo em ações isoladas sem uma possível integração com fabricantes. Romano, 2003, avaliando o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas, verifica que a informalidade deste processo é notória, onde as empresas produtoras de máquinas agrícolas, em geral, não adotam e não utilizam procedimentos sistemáticos para a realização do processo de desenvolvimento de produto, sendo que a grande maioria dos novos desenvolvimentos são apenas baseados na experiência dos responsáveis.

As pesquisas mundiais sobre mobilização do solo por ferramentas de preparo iniciaram na década de 20. Porém, após uma considerável estagnação no período de guerras, foram retomadas a partir da década de 50. Trabalhos investigativos nessa área são bastante desenvolvidos nos Estados Unidos da América e Europa, porém no Brasil ainda são poucas as ocorrências destes [Machado, 2001].

Para uma real avaliação do desempenho de máquinas e implementos agrícolas, se faz necessário estabelecer condições operacionais semelhantes àquelas em que os equipamentos trabalham no campo. Para tanto, uma das ferramentas que possibilitam esse tipo de avaliação é a instrumentação eletrônica, que permite desenvolver sistemas para aquisição de dados sistemáticos, tendo os registros em banco de dados. Assim, com a tecnologia da instrumentação embarcada, pode-se obter dados de testes de campo com relativa rapidez e precisão que irão auxiliar no projeto de desenvolvimento de novos produtos ou na otimização de modelos já existentes. Sabe-se que testes feitos sem a utilização desses recursos tecnológicos demandam

maiores áreas, por vezes não disponíveis, sejam em quantidade ou mesmo disponibilidade temporal [Mantovani, 1999].

1.1 O Agronegócio Brasileiro

O desenvolvimento do setor de agronegócio tem sido expressivo nos últimos tempos. Por um lado, o desenvolvimento de novos cultivares possibilita aos agricultores a escolha adequada das espécies a serem semeadas em cada região do país. Por outro lado, as técnicas de cultivo, aliadas as máquinas cada vez mais modernas ajudam a impulsionar a produtividade do setor agrícola brasileiro.

Com 388 milhões de hectares de terras agricultáveis férteis e de alta produtividade, o Brasil se apresenta como um país de vocação natural para a agropecuária e todos os negócios relacionados as suas cadeias produtivas.

Segundo estatística oficial do governo brasileiro, de 1990 a 2003 a produção de grãos no Brasil cresceu 131%. Nesse período, a área cultivada foi ampliada em apenas 16,1%, passando de 36,8 milhões para 43,9 milhões de hectares. Assim, o crescimento verificado neste período ocorreu graças ao aumento de 85,5% no índice de produtividade. O rendimento das principais culturas agrícolas aumentou de 1,5 para 2,8 toneladas por hectare. Contribuindo com isso, a pesquisa agropecuária foi responsável pelo desenvolvimento de 529 novos cultivares adaptados especificamente a cada clima e solo nas principais regiões produtoras do Brasil. O emprego de técnicas mais avançadas e ambientalmente corretas, como o plantio direto, também contribuíram para o crescimento percebido [Ministério da Agricultura, 2004].

O Brasil dispõe ainda de 90 milhões de hectares de terras agricultáveis ainda não utilizadas. Com isso, o país pode aumentar, no mínimo, três vezes sua produção de grãos. Esse volume poderá ser ainda maior se for considerado que, até 2003, 220 milhões de hectares eram ocupados com pastagens e parte desta área poderia ser incorporada a produção de grãos. Todo esse crescimento projetado não causaria impacto à Amazônia, uma vez que estaria sendo considerada apenas a expansão da fronteira agrícola no Centro-Oeste e no Nordeste [Ministério da Agricultura, 2004].

Em relação à Pesquisa e Desenvolvimento, o Ministério da Agricultura, 2004, reconhece que o conhecimento e a tecnologia são instrumentos imprescindíveis ao crescimento sustentável do agronegócio do Brasil. O imenso potencial desta área, aliado a capacidade instalada de suas instituições e a reconhecida criatividade de seus pesquisadores, abrem enormes possibilidades de investimentos externos e privados em pesquisa e desenvolvimento no país. A informática na agropecuária e a agricultura de precisão são algumas das áreas que apresentam as

melhores oportunidades de investimento por intermédio de parceria público-privada para a geração de conhecimento técnico-científico.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver e implementar um sistema capaz de auxiliar na avaliação de esforços em máquinas agrícolas, sobretudo em semeadoras-adubadoras. Com este sistema pretende-se gerar uma base de dados para ser utilizada no projeto de novos produtos, bem como na otimização e/ou melhoria das máquinas já existentes, seja por avaliações parciais, de cada um dos elementos ativos do conjunto, ou globais da máquina.

1.3 Objetivo Específico

Implementação de três transdutores de força, do tipo anel octogonal estendido, capazes de medir esforços em máquinas agrícolas durante operação normal de campo.

Gerar uma base de dados que possa servir de referência de projeto de máquinas agrícolas, onde os valores de carregamento e/ou solicitações atuantes na estrutura são utilizados como subsídio para realização de análises numéricas ou analíticas.

Realizar comparação entre montagens e/ou configurações distintas para a mesma função na máquina. Este tipo de comparativo direto pode indicar o comportamento e valores de referência para serem utilizados como parâmetros no desenvolvimento de projetos.

1.4 Metodologia

Dada a natureza deste trabalho, pesquisa e desenvolvimento tecnológico, o presente estudo foi concebido a partir de uma demanda de mercado apresentada pela empresa fabricante de máquinas agrícolas John Deere Brasil - JDB, em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP. Dentro deste contexto, foram realizadas reuniões de trabalho entre os grupos envolvidos, que contou com representantes da diretoria, bem como da área de engenharia de plantadeiras da JDB e com professores e pesquisadores da UFRGS, onde se definiu o tema com seus objetivos, seus desdobramentos e pontos a serem trabalhados dentro deste projeto de cooperação.

Um dos objetivos propostos pelos grupos foi a avaliação dos esforços envolvidos na operação de uma semeadora-adubadora. Em particular, foi priorizada a mensuração de esforços na haste sulcadora, elemento ativo da máquina que exige maior esforço de tração.

A partir da definição do objetivo, foram realizadas pesquisas e avaliações pelo grupo de trabalho da UFRGS que encaminhou diversas soluções, algumas implementadas e registradas neste trabalho.

As soluções propostas necessitavam ser exequíveis dentro de um prazo delimitado sem deixar de observar a qualidade da solução.

Como resultado destas análises, optou-se por projetar e construir células de carga especiais do tipo anéis octogonais estendidos. Estes deveriam atender as avaliações propostas, visto que se contava com longa experiência, e isso facilitaria a construção dos sensores utilizando as infra-estruturas da fábrica da JDB e os laboratórios da UFRGS para execução dos trabalhos.

Assim, após projeto e construção dos sensores, montou-se uma instrumentação dedicada para executar as calibrações e caracterizações das suas respostas. O passo seguinte, foi a validação dos sensores através dos testes de campo repetitivos com auxílio de uma instrumentação embarcada para registro dos eventos e formação de um banco de dados.

1.5 Estrutura do presente trabalho

O presente trabalho apresenta uma introdução no capítulo um, onde busca contextualizar o assunto e apresentar os objetivos a serem atingidos, bem como suas limitações.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre tópicos pertinentes aos testes desenvolvidos.

O terceiro capítulo traz alguns fundamentos teóricos que servem de base para realização do trabalho. Estes fundamentos juntamente com as definições e conceitos apresentados na revisão do capítulo dois dão o embasamento para o desenvolvimento e execução da pesquisa com seus desdobramentos e registros que seguem nos capítulos seguintes.

O capítulo quatro foi destinado a todo processo de implementação do transdutor de força. Apresenta desde o equacionamento para dimensionamento do elemento elástico, passando pelos materiais utilizados, processo e resultados da calibração.

Definiu-se o capítulo cinco como validação dos transdutores – testes de campo. Neste estão relatados três tipos distintos de testes que foram executados.

O capítulo seis traz os resultados e discussões dos testes descritos no capítulo cinco

Fazendo o fechamento tem-se a conclusão no capítulo sete e sugestões de continuidade do trabalho.

Após o capítulo das conclusões, estão as referências bibliográficas e na seqüência apêndices e anexos do trabalho.

1.6 Limitações do presente trabalho

Os testes de avaliação de esforços feitos neste trabalho são direcionados para o auxílio à engenharia de produto, para desenvolvimento e otimização de projetos. Desse modo, são de cunho distinto das avaliações que priorizam aspectos agrônômicos. As avaliações de solos feitas neste trabalho são restritas e limitadas, visto que há inúmeros parâmetros para a caracterização completa do solo de uma área de testes. Nas ciências agrárias, fazem-se análises com maior grau de complexidade, porém neste trabalho dá-se ênfase aos aspectos de engenharia, onde se considerou os atributos físicos de determinada área constantes.

Os resultados apresentados neste trabalho estão limitados a alguns dos testes realizados em campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas

Segundo Romano, 2003, as máquinas agrícolas são abordadas em trabalhos científicos sob dois enfoques: o primeiro é o do projeto e o segundo é do ensaio de máquinas agrícolas.

Os trabalhos que se referem ao primeiro enfoque, que é o desenvolvimento de protótipos, descrevem o processo de projeto pelo qual a máquina agrícola foi concebida, desde as suposições realizadas, passando pelas tomadas de decisões, as ferramentas de apoio utilizadas nas várias etapas do projeto, a documentação gerada, bem como o detalhamento da construção do protótipo e os testes. Trabalhos com esse enfoque não são comuns de se encontrar na literatura. Por outro lado, trabalhos sobre ensaios de máquinas agrícolas e protótipos são a grande maioria. Estes, normalmente, fazem a avaliação do desempenho funcional do produto, mas não abordam a forma pela qual a mesmo foi desenvolvido.

Romano, 2003, relata que os primeiros registros sobre processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas datam de 1972, nos Estados Unidos. No princípio do desenvolvimento das máquinas agrícolas, predominavam as técnicas de tentativa-erro, onde alguns autores se referem como a “era do ferreiro”. Nesta época, costumava-se construir grosseiramente um protótipo na oficina para ser levado ao campo para testes. Conforme os resultados desses testes, o protótipo recebia cortes, remendos e reforços até que se apresentasse funcionalmente satisfatório e estruturalmente resistente. A partir deste protótipo, construía-se uma máquina “modelo”, com as devidas alterações, para a partir dela fazer uma produção seriada. O papel dos agricultores no desenvolvimento das máquinas é destacado, uma vez que estes contribuíram com muitas idéias que surgiram no seu dia a dia no campo, onde, muitas vezes, este construía e/ou adaptava seus próprios modelos ou supervisionava a construção dos mesmos.

Analisando os processos que envolvem o desenvolvimento de máquinas agrícolas, identificam-se pelo menos dois tipos de projeto: o primeiro trata do desenvolvimento de um novo tipo de máquina, enquanto o segundo, da melhoria de uma máquina existente (projeto de um novo modelo similar a máquinas existentes e/ou alterações de projeto para reduzir custos de manufatura da máquina).

O modelo apresentado por Kepner et al., 1972, não é detalhado em tarefas e recursos necessários para a realização do processo de projeto do produto. Porém foi percebida a ênfase na realização de experimentos, que permitem testar funcionalmente os princípios de concepções gerados, iniciando o ciclo projetar-testar-projetar. A partir desta viabilização experimental,

partiria o detalhamento do projeto para construção do protótipo e testes do produto. Ao final dessa fase se concentrariam esforços para elaboração e implementação do plano de manufatura da máquina.

No Brasil, o primeiro registro sobre o desenvolvimento de máquinas agrícolas está em Mialhe, 1974. Nesta publicação é apresentado um roteiro que indica o trabalho a ser realizado, desde a necessidade de ser realizada uma operação agrícola até o lançamento da máquina no mercado consumidor. Porém, o modelo apresentado por este autor limita-se a indicar as ações a serem executadas para a obtenção da máquina, não detalhando o processo de projeto de máquina agrícola com relação às atividades e à aplicação de métodos e ferramentas de auxílio de projeto, ou seja, define o que precisa ser feito, mas não explica como fazer ou com que ferramentas ou técnicas o projeto pode ser desenvolvido [Romano, 2003].

O mesmo autor relata que as primeiras informações sobre como as empresas situadas no Brasil desenvolviam suas máquinas agrícolas são oriundas de uma avaliação tecnológica realizada na década de 80. Esta avaliação foi baseada em um estudo que resultou na análise do processo de desenvolvimento de produto, denominado na época de “rota tecnológica de desenvolvimento de produto”. Os resultados desta avaliação demonstraram que naquela época a indústria de máquinas agrícolas brasileira não realizava pesquisa e buscavam subsídios para o desenvolvimento da concepção de seus produtos em trabalhos realizados por outras empresas e/ou na assistência técnica. Os cálculos eram bastante simplificados, com poucas exceções, norma ou critério técnico. Esta mesma pesquisa indicou que a maioria das empresas realizava algum tipo de ensaio ou teste em condições reais de trabalho.

Desta pesquisa foram levantadas algumas dificuldades que impediam um melhor desempenho do processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas das empresas:

- O conhecimento insuficiente do mercado, em termos de adequação dos produtos às necessidades do consumidor e dos produtos similares existentes;
- A insuficiência ou inexistência de infra-estrutura para controle de qualidade de produtos próprios e adquiridos de terceiros.
- O desconhecimento de informações e parâmetros básicos para o projeto
- O despreparo técnico, pela escassez ou ausência de pessoal com experiência para realizar pesquisa e desenvolvimento de produto.
- Ausência de análise, simulação da distribuição de tensões e deformações em componentes de máquinas.
- Escassez de material bibliográfico.

Essas dificuldades geravam efeitos sobre as máquinas produzidas, tanto que as vezes, eram lançados novos modelos de produtos para sanar alguns problemas, mas em alguns casos o modelo novo apresentava características piores que o modelo anterior. Isso provocava elevados custos de manutenção e grandes perdas principalmente por ocorrer durante a operação na lavoura. Porém para correções ao nível de projeto seria necessário substancial retrabalho.

Romano, 2003, destaca a importância do lançamento da metodologia Back em 1983, principalmente para a sistematização do processo de projeto do produto. Através desta metodologia, vários protótipos de máquinas agrícolas destinadas a pequenas propriedades rurais foram desenvolvidos e testados pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Outra publicação que vem tratar da sistematização do processo de projeto surgiu em 1986 editado pela ASAE, com autoria de Christianson e Rohrbch, onde é apresentado um modelo para o processo de projeto composto por 14 passos, porém pouco detalhado, indicando parcialmente o que fazer.

Na década de 90, foram incorporados à metodologia de projeto utilizada no desenvolvimento de protótipos de máquinas agrícolas do LP/UFSC novos métodos, e alguns conceitos preconizados pelo modelo de Pahl & Beitz, 1996 [Romano, 2003].

2.1.1 O processo atualmente praticado na indústria de máquinas agrícolas.

Mialhe, 1996, destaca que alguns progressos em setores específicos são percebidos, como no caso de empresas produtoras de tratores e colhedoras automotrizes, justificando tal progresso em função da evolução da metodologia de projeto, na qual o autor evidencia o papel do ensaio de laboratório e de campo.

Pelo relato das atividades de pesquisa e desenvolvimento de produtos de algumas empresas que participaram do Workshop sobre Mecanização Agrícola na Região de Clima Temperado, 1994, realizado em Pelotas no Estado do Rio Grande do Sul, observa-se que algumas ressaltam a necessidade de um maior intercâmbio com as instituições de pesquisas, para a obtenção de melhores resultados.

Grande parte da capacidade existente nas empresas de máquinas agrícolas é decorrente de esforços realizados para a cópia e adaptação de máquinas existentes no mercado, sejam estas importadas ou não. A estratégia utilizada no processo de projeto para formalizar esta prática é baseada no licenciamento de tecnologia e nas atividades de P&D, apesar desta última ser deficiente [Passos & Calandro, 1999].

Centeno, 2000, apud Romano, 2003, apresentou uma descrição de como o processo ocorre na maioria das empresas do setor, onde o modelo tradicional do processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas envolve, normalmente, seis áreas distintas da empresa

(marketing, engenharia, manufatura, compras, vendas e pós-vendas). Este modelo vem sendo modificado principalmente em empresas de grande porte, passando a ser mais integrado e simultâneo, fato também descrito por Passos & Calandro, 1999, e Pinheiro, 1999.

Thomas, 2003, apresentou uma metodologia experimental para avaliação do projeto de máquinas agrícolas. Neste trabalho, descreveu testes com duas técnicas experimentais combinadas: pintura de camada frágil e extensometria. Utilizando estas técnicas obteve dados para estimativa de vida útil de alguns componentes da máquina ensaiada.

2.2 Semeadora-Adubadora

A máquina denominada semeadora tem a função básica de dosar e colocar no solo as sementes para a implantação das culturas. Esta máquina deve atender as exigências de densidade de plantas, espaçamento e profundidade ao fazer a deposição das sementes no solo. Quando uma semeadora possui a função adicional de dosar e colocar fertilizante, esta máquina é chamada de semeadora-adubadora [Balastreire, 1990]. As semeadoras-adubadoras são constituídas basicamente de: chassi, depósitos de sementes, depósitos de adubo, mecanismos dosadores de sementes, mecanismos dosadores de adubo, discos de corte de resíduos, elementos sulcadores para deposição de sementes, sulcadores para deposição de adubo, mecanismos cobridores de sementes, rodas compactadoras, rodas de controle de profundidade de semeadura, rodas de sustentação e de acionamento dos mecanismos de transmissão e marcadores de linhas [Coelho, 1996].

As máquinas para semeadura e adubação podem ser classificadas segundo diversas características, entre elas, o tipo de engate à fonte de potência (de arraste na barra de tração, ou montada nos três pontos do trator) e o tipo de distribuição de sementes (à lanço, em linha de precisão e em linha de fluxo contínuo) [Machado et al., 1996].

As semeadoras-adubadoras podem variar suas configurações dependendo da região a ser utilizada e cultura que será implantada. As máquinas que estão sendo utilizadas para o sistema de semeadura direta podem variar seus discos de corte de resíduos, os sulcadores para deposição de adubo, e sulcadores para sementes [Levien, 1999].

Thomas, 2003, define que, do ponto de vista de engenharia, as semeadoras podem ser descritas como sendo estruturas em aço carbono, que sustentam depósitos de sementes e adubo, bem como seus mecanismos de distribuição, além de ferramentas que fazem a abertura e fechamento do solo por onde passam. Já do ponto de vista agrônomo, verifica-se entre outras características, se a semeadora apresenta uma boa capacidade de carga de sementes e adubo, se os distribui com precisão e se esta não apresenta excessivo peso, causando compactação do solo.

As semeadoras-adubadoras são classificadas por várias características, entre elas o número de linhas. Uma linha pode ser definida como uma seqüência completa de elementos ativos que compõe as funções de abertura e fechamento do sulco, onde são realizadas as operações de adubação e semeadura. A figura 2.1 mostra esquema da seqüência de elementos ativos compondo uma linha de semeadura que utiliza haste como sulcador para distribuição de adubo. Pode haver variação desta configuração. Combinações de disco(s) e haste(s) podem ser feitas nas funções de sulcador de adubo e semente. Também, diferentes tipos de rodas compactadoras são encontrados no mercado. Na função de corte da palha são empregados basicamente discos lisos, porém há modelos de disco com borda recortada, estriada, ondulada e dentada [Bianchini, 2002].

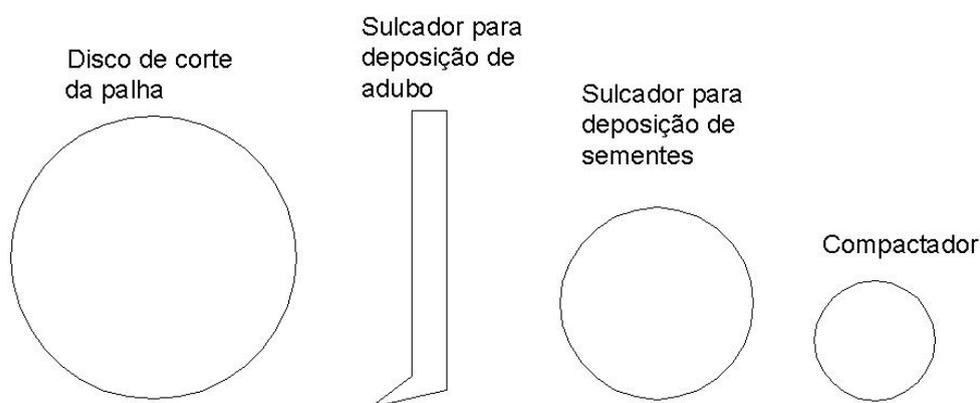


Figura 2.1 – Esquema da seqüência de elementos ativos que compõe uma linha de semeadura direta típica.

A figura 2.2 mostra um exemplo da configuração ilustrada no esquema da figura 2.1. Este exemplo é um modelo comercial que pode ser considerado como configuração básica presente em um grande número das máquinas comercializadas no Brasil.

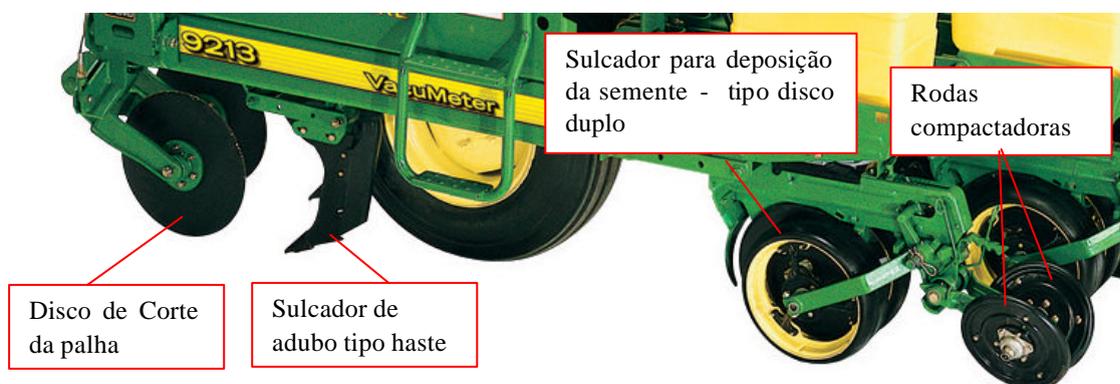


Figura 2.2 – Exemplo de uma seqüência de elementos ativos de uma linha de semeadura comercial.

2.3 Elementos Sulcadores

Para Balastreire, 1990, sulcadores são elementos mecânicos utilizados em semeadoras que, além dos pneus dos rodados, estabelecem a relação entre o solo e a máquina de semeadura. Sua função principal é a abertura do sulco para deposição de fertilizantes e/ou sementes no solo, em uma profundidade adequada para cada cultura, propiciando condições ideais de germinação e desenvolvimento inicial de plantas. O mesmo autor menciona que existem três tipos principais de sulcadores: facões ou hastes, discos simples e discos duplos. Os facões ou hastes são normalmente utilizados em terrenos que já sofreram preparo e livre de tocos, pedras ou restos de cultura sobre a superfície. Os sulcadores de discos simples são utilizados em terrenos onde podem existir restos de cultura, ou até mesmo pequenas pedras ou raízes, sendo mais utilizados em culturas de inverno. Já os sulcadores de discos duplos aliam a capacidade de trabalhar em terrenos com restos de cultura com uma boa precisão de abertura de sulco.

Os sulcadores do tipo facão podem possuir diferentes ângulos de ataque (figura 2.3) que facilitam sua penetração no solo. Isto evita que as semeadoras equipadas com este mecanismo dependam somente da transferência de peso da máquina para promover a penetração dos discos de corte dos resíduos e dos discos duplos (sulcadores para deposição das sementes) no solo. Outro fator de destaque é que estes promovem o preparo localizado, atingindo boas profundidades (8 a 15 cm), onde será depositado o adubo [Casão Júnior et al., 1998].

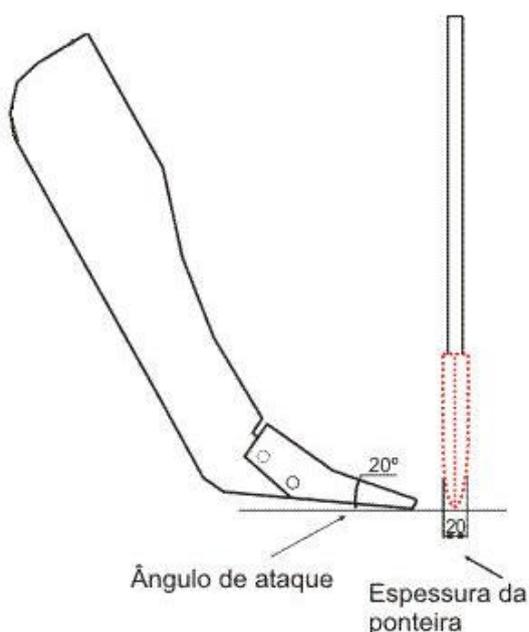


Figura 2.3 – Parâmetros básicos de uma haste sulcadora: o ângulo de ataque e espessura da ponteira.

Estudando a distribuição de sementes de milho em semeadura direta, comparando dois tipos de sulcadores (hastes e discos duplos) e com dois tipos de rodas compactadoras (em “V” e côncava), o mecanismo rompedor de hastes abriu sulcos mais profundos, depositando o adubo e as sementes a profundidades maiores que o mecanismo rompedor de discos. A combinação haste e roda compactadora côncava apresentou valores médios de profundidade de 14,3 cm, contra 6,8 cm na configuração discos duplos e roda compactadora côncava [Takahashi et al., 2001].

Num comparativo de duas hastes sulcadoras com diferentes geometrias, foi constatado que mais do que o tipo de haste, é importante a correta regulagem de profundidade e a escolha do teor de água no solo apropriado à operação de semeadura. Com a seleção das profundidades de trabalho, nos solos com teores de água diferentes é possível reduzir a mobilização do mesmo, o que reduz potencialmente as perdas de solo [Oliveira et al., 2000].

Dallmeyer et al., 1986, analisando oito configurações de linhas de semeadura, como facas rotativas, discos duplos e sulcadores tipo haste, com e sem disco de corte de resíduos e sulcadores de adubo e sementes do tipo discos simples, discos duplos e hastes sulcadoras, concluíram que o aumento na velocidade de operação tendeu a diminuir as diferenças entre os mecanismos testados e o volume de solo mobilizado, sendo que os maiores volumes foram obtidos com o sulcador de haste.

Comparando hastes do tipo facão, de diferentes dimensões, fixadas em um dispositivo acoplado ao engate de três pontos de um carro dinamométrico, foi verificado que a geometria das hastes afetou as forças verticais e horizontais, sendo possível utilizar essas variações para alterações em projetos de hastes sulcadoras de adubo [Siqueira et al., 2000].

Estes mesmos autores, em 2001a, avaliaram o comportamento energético de 13 tipos de hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras utilizadas no sistema plantio direto. Os resultados indicaram variações de até 714% (64 a 524 N) na força vertical e até 60% (1376 a 2201 N) na demanda de esforço horizontal. A força horizontal específica variou 59% (111 a 177 N.cm⁻¹), enquanto que o momento medido na haste variou 67% (956 a 1595 N.m). Os resultados demonstraram que é possível alterar estes esforços com mudanças na geometria do mecanismo rompedor do solo, uma vez que a geometria da haste influi diretamente nas forças e no momento.

O desempenho energético de quatro semeadoras-adubadoras diferenciadas foi avaliado quanto aos discos de corte de resíduos, hastes sulcadoras de adubo e discos duplos para a deposição de sementes, em duas velocidades (4,7 e 8,3 km.h⁻¹). Na avaliação geral do grupo de semeadoras, a menor velocidade de operação resultou em menores valores de força de tração, potência e consumo de energia. As semeadoras-adubadoras apresentaram desempenhos

diferenciados quanto ao esforço de tração, indicando que é possível selecioná-las para a semeadura direta com menores exigências energéticas. Porém, em virtude do grande número de fatores que influenciam o desempenho energético das semeadoras e da complexidade de suas interações, há a necessidade de estudos mais específicos visando identificar as demandas energéticas dos diversos componentes e dos mecanismos de ação dos vários modelos de hastes. [Siqueira et al., 2001a].

Casão Júnior et al., 2000a, analisando o desempenho energético e operacional de uma semeadora-adubadora em plantio direto, em solos tipo Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada, verificaram que o uso de haste sulcadora foi importante para a manutenção da profundidade desejada em semeadura direta. Com o aumento da velocidade de trabalho houve redução na profundidade do sulco, bem como a ocorrência de áreas com muito solo descoberto na linha de semeadura.

Gebresenbet & Johnson, 1992, realizaram uma avaliação de diferentes tipos de sulcadores, em relação às suas características dimensionais, construtivas e performance na operação. Evidenciaram que o ângulo de ataque da ponteira e a velocidade de operação do conjunto influenciaram significativamente o desempenho operacional em solos argilosos, não tendo influência em solos arenosos.

2.4 Esforço de Tração

Desbiolles et al., 1977, verificaram que a correta previsão de esforço de tração, em implementos de preparo do solo, é de grande importância, tanto para o projetista, quanto para o responsável pela utilização do maquinário agrícola dentro de uma propriedade. Ao projetista importa a diminuição do tempo necessário para o desenvolvimento e redução dos custos de produção de novos produtos. O agricultor busca otimizar a combinação entre trator-implemento, nas operações de campo.

Casão Júnior et al., 1998, estudando o efeito do teor de água no solo verificaram que a força de tração exigida pela semeadora-adubadora testada aumentou em função da velocidade de deslocamento, profundidade de atuação do sulcador do tipo facão e o teor de água do solo, quando esse passou da condição friável à plástica.

Casão Júnior et al., 2000b, analisando esforço de tração de uma semeadora-adubadora equipada com hastes sulcadoras com ângulo de ataque de 21°, verificaram que esta promoveu uma força vertical de 1481 N, o que ocasionou uma força de sucção, dispensando uso de lastros para o correto desempenho dos elementos sulcadores do solo. A força horizontal foi responsável por 98% do esforço de tração exigido pelas semeadoras.

Casão Júnior et al., 2000c, avaliando semeadoras-adubadoras, constataram que hastes sulcadoras com ângulo de ataque com 20° e espessura da ponteira de 2 cm, têm apresentado bons resultados, pois as hastes sulcadoras podem ter um esforço vertical, que reduz a necessidade de peso adicional à semeadora-adubadora.

Collins & Fowler, 1996, fizeram um estudo com diferentes hastes sulcadoras e diferentes solos, verificaram que a geometria da haste influenciou diretamente no esforço de tração e que a largura da haste e seu ângulo de ataque foram os elementos mais importantes. Este estudo também mostrou que o tipo de solo teve grande influência no esforço de tração, pois nos solos argilosos a exigência de tração foi, em média, 24% maior do que em solos arenosos. Observaram que, em velocidades de deslocamento de 6 a 10 km.h⁻¹, a força de tração aumentou em 4% para cada incremento de 1 km.h⁻¹ e, em 20%, para cada aumento de 1 cm de profundidade de trabalho do sulcador de adubo (de 1 a 5 cm).

Kushwaha & Zhang, 1998, analisando modelos de predição de forças para a abertura do sulco, verificaram que os efeitos dinâmicos do solo sobre as forças e sobre a energia gasta pela ferramenta são distintos. Entre os modelos analisados, alguns consideram a demanda energética, bem como velocidade de operação, aceleração do solo em relação à ferramenta de abertura do sulco e forças envolvidas neste processo. Considerar o rendimento da cultura, bem com a dinâmica dos solos envolvidos no processo, são de grande valia para o projeto de sulcadores para condições específicas de solo.

A *American Society of Agricultural Engineers – ASAE*, 2003, dispõe de dados de referência para dimensionamento de tratores que operam com semeadoras-adubadoras. Esta relata que a força de tração necessária para a operação de semeadoras de grãos graúdos, em linha na direção horizontal do deslocamento, já incluída a resistência ao deslocamento da máquina, com bom leito de semeadura, é de 3400 N por linha de semeadura, tendo uma variação de 35%.

Chaudhuri, 2001, com avaliações feitas em laboratório e a campo, concluiu que o ângulo de ataque das hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras influenciou diretamente as forças verticais e horizontais, sendo os menores esforços de tração obtidos com ângulos de ataque entre 25 e 30°. Também verificou que o aumento na largura das hastes aumentou o esforço de tração e diminuiu a qualidade de cobertura da semente pelo solo. O teor de água no solo e sua taxa de evaporação foram responsáveis pela performance dos sulcos abertos por hastes em semeadura direta.

Machado, 2001, estudando modelos de previsão de esforço de tração para ferramentas estreitas, identificou que o modelo proposto por Reece em 1965 é o que mais se

adequou para dois solos do Rio Grande do Sul, pois além de ter proporcionado bom ajuste com os valores experimentais de campo, possuem menor complexidade de cálculo.

Além do conhecimento da relação entre profundidade e velocidade trabalho, também vem a ser importante o conhecimento dos efeitos do teor de água do solo no esforço de tração, em uma operação de preparo do solo, a fim de melhorar as operações de campo e a interação trator-implemento [Kruger & Palmer, 1982].

Glancey et al., 1989, relatam que a falta de homogeneidade do solo, associada a maneira complexa com que o solo se rompe, dificulta a medição da interação entre forças que atuam no solo e sua interação com ferramentas de preparo. O conhecimento da distribuição das forças que atuam sobre as ferramentas de preparo e sua movimentação através do solo tem duas aplicações. Uma, auxiliar no projeto, avaliando as condições e carregamentos a que uma ferramenta encontra-se durante operação. Outra, proporcionar um modo capaz de quantificar as propriedades dinâmicas do solo ao se estudar a mecânica do preparo do solo.

McKyes, 1978, relata que para projetar ferramentas de preparo de solo, teoricamente, são necessárias técnicas mecânicas para determinar a melhor geometria e desempenho da ferramenta. Dentre os critérios para obtenção destas condições pode-se incluir a identificação do esforço de tração necessário e as forças que atuam sobre a ferramenta, entre outros. Quando faz-se a predição do desempenho no projeto, o tempo consumido e os custos dos procedimentos de testes de modelos ou protótipos podem ser consideravelmente reduzidos.

Casão Junior & Chang, 1993, dizem que o estudo dos esforços que atuam em máquinas e implementos agrícolas vem a ser um dos parâmetros de maior contribuição para a solução dos problemas com mecanização no meio rural. A elaboração de projetos mais apropriados, a eliminação do desperdício e o uso adequado de máquinas e implementos dependem destas informações.

O conhecimento dos esforços de tração, proporcionados por ferramentas de preparo de solo, são importantes na seleção dos sistemas de preparo. O trator a ser utilizado vem a ser melhor especificado quando existem boas informações a respeito da necessidade de potência e esforço de tração exigidos em diferentes tipos de solos [Summers et al., 1986].

Mielke et al, 1994, relatam que o esforço de tração e o tempo disponível para a realização das tarefas agrícolas normalmente ditam a potência necessária de um trator numa propriedade agrícola. Como o trator é o maior investimento de capital numa propriedade, o conhecimento do correto esforço de tração se faz necessário na tomada de decisão relativa ao maquinário agrícola. Além disso, a otimização do uso de energia é um importante critério no projeto de uma máquina agrícola.

O esforço de tração e área de solo mobilizado por hastes inclinadas estão relacionados, principalmente, com o ângulo de ataque da ferramenta. Verificou-se que para ângulos de ataque mais agudos ocorre um aumento da distância de ruptura do solo a frente da ferramenta, da largura de solo mobilizado, da força vertical que auxilia na penetração da ferramenta no solo e uma diminuição do esforço de tração, concluindo que o ideal é que este ângulo seja menor do que 45° [Payne & Tanner, 1959].

Em solos leves (não compactados) o esforço de tração de uma ferramenta vertical cresce linearmente com a profundidade de trabalho, sendo insensível à velocidade de operação. Em solos compactados, o esforço de tração mostrou-se maior com o aumento da profundidade de trabalho e velocidade de operação. Concluiu-se que a consolidação do solo vem a ser o principal agente causador do esforço de tração a maiores velocidades de trabalho. O ângulo de ataque da ferramenta influenciou o esforço de tração. Para um ângulo de ataque de 45° , obtiveram valores de esforço de tração da ordem de um terço do valor obtido com 90° de ângulo de ataque na ferramenta [Dransfield et al., 1964]. Para ângulos de ataque menores, em hastes estreitas, o esforço de tração diminuiu, pois as componentes das forças que atuam perpendicularmente às superfícies de ruptura foram menores [Plasse et al., 1985].

Grisso et al., 1996, salientam que o esforço de tração é um parâmetro importante na avaliação da performance de um implemento, em termos de necessidades energéticas.

O esforço de tração em ferramentas de preparo aumenta com o aumento da profundidade bem como da velocidade de operação [Palmer et al., 1983, Summers et al., 1986, Grisso et al., 1996].

Pesquisas têm demonstrado que as forças atuantes sobre os implementos de preparo do solo são alteradas devido ao desgaste das ponteiros, o qual muda a sua geometria. Também verificou que o aumento da velocidade de trabalho proporcionou aumento do esforço de tração [Fielke, 1996].

No estudo de hastes estreitas, Plasse et al., 1985, relata que os parâmetros que influenciam o rompimento do solo são:

- características geométricas das ponteiros;
 - profundidade de trabalho;
 - ângulo de ataque;
 - largura;
- condições de solo;
- efeito da interface solo-ponteira;

- contribuição da pressão proporcionada pela quantidade de solo que encontra-se sobre a ponteira.

2.5 Células de carga octogonais

Há diversos tipos e modelos de células de carga multicomponentes apresentados em trabalhos de diferentes áreas. Com referência a trabalhos de avaliação de esforços em ferramentas de preparo de solo, o modelo que se destaca é o anel octogonal estendido. Os autores citados neste capítulo fornecem subsídios para o projeto deste tipo de transdutor.

Godwin, 1975, apresentou um transdutor para uso em estudos de preparo de solo do tipo anel octogonal estendido. Neste trabalho é apresentado o roteiro para o projeto, bem como os problemas relacionados ao mesmo. O sensor apresentado mede duas forças e um momento associado a estas duas forças. O autor avaliou que a saída do sensor é linear e consegue medir esforços independentemente da posição de aplicação de carga na ferramenta a ser medida.

O'Dogherty, 1975, apresenta o projeto de um anel octogonal estendido baseado no equacionamento de um anel octogonal simples. O sensor apresentou boa linearidade, histerese desprezível, mas uma interferência entre as pontes que medem os esforços ortogonais, entre 4,1 e 6,5%. A calibração mostrou que é necessário modificações nas equações de cálculo do anel octogonal simples para adaptação ao anel octogonal estendido.

Sousa & Magalhães, 1989, apresentam um transdutor de força bidimensional para ser utilizado em sistemas solo-implemento, os quais utilizaram o método de elementos finitos para determinar o melhor ponto de colagem dos extensômetros. Este trabalho baseou-se em Godwin, 1975 e O'Dogherty, 1975.

Godwin et al., 1993, apresentam uma nova forma de aplicação do anel estendido, onde este é construído de forma a conter dois anéis octogonais ortogonais. Esta configuração permite a medição de três forças ortogonais entre si e dois momentos diretamente nos anéis. Na flange de acoplamento foi montada um arranjo de extensômetros que permite medir o terceiro momento, tornando o dispositivo capaz de medir seis distintos esforços. Watyotha & Salokhe, 2001, e Muro & Tran, 2004, também utilizam este conceito de anel octogonal estendido duplo em seus trabalhos.

O'Dogherty, 1996, apresenta um conjunto de equações e análises de anéis dinamométricos. Faz considerações sobre distintos métodos de cálculo para anéis circulares, octogonais e octogonais estendidos. Também faz referência a anéis em que não pode-se considerar o elemento elástico como anel devido a sua relação de raio/espessura do anel ser muito pequena. Neste trabalho fez referência a diferentes autores sobre dimensionamento de

anéis octogonais dinamométricos, comparando os resultados e discutindo outras características importantes neste tipo de transdutor.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Equacionamento Básico da Elasticidade Linear

A elasticidade linear infinitesimal trata do estudo das deformações e da distribuição dos esforços internos de um sólido sujeito a cargas externas. As limitações da teoria restringem a aplicação da mesma apenas para deformações muito pequenas e somente para deformações elásticas.

Considere um corpo deformável (ou estrutura) Ω_0 , mostrado na figura 3.1 que se deforma sob a ação de um sistema de forças atingindo a configuração deformada Ω . O vetor \mathbf{u} denota o deslocamento de um ponto genérico \mathbf{P} de sua posição na configuração inicial para a nova posição na configuração deformada. Este vetor deslocamento é tratado como uma função contínua da posição inicial, isto é, para cada ponto \mathbf{x} da peça existe um vetor $\mathbf{u}(\mathbf{x})$. Esta descrição é possível devido a hipótese de um meio contínuo, que desconsidera a microestrutura do material.

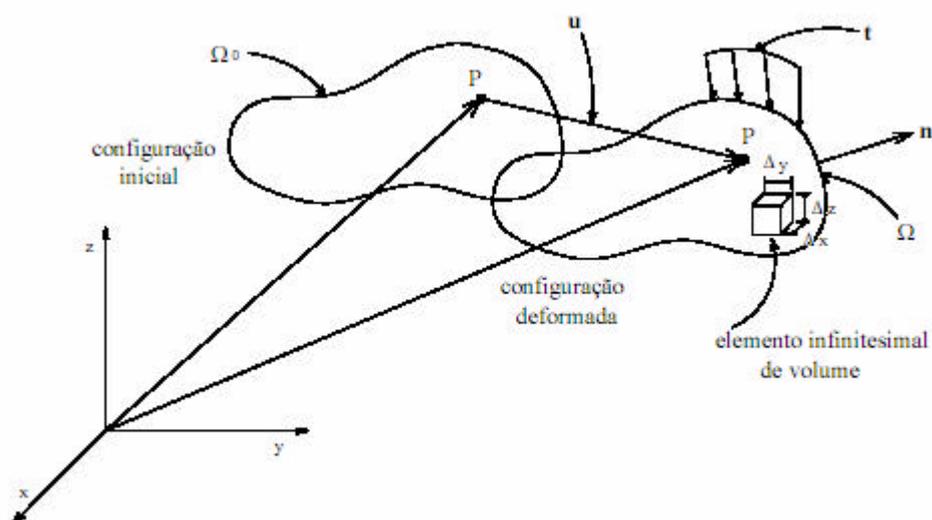


Figura 3.1 – Descrição da deformação de um corpo

Para o estudo do estado de tensões no interior do corpo deformado, isola-se um elemento infinitesimal de um volume de dimensões Δx , Δy , Δz .

As tensões atuantes sobre este elemento infinitesimal de volume são mostradas na figura 3.2. Observe que σ_{ij} representam os incrementos de tensão, devido à presença das forças de corpo $\mathbf{r}f_i$, por exemplo. Substituindo os incrementos de tensão

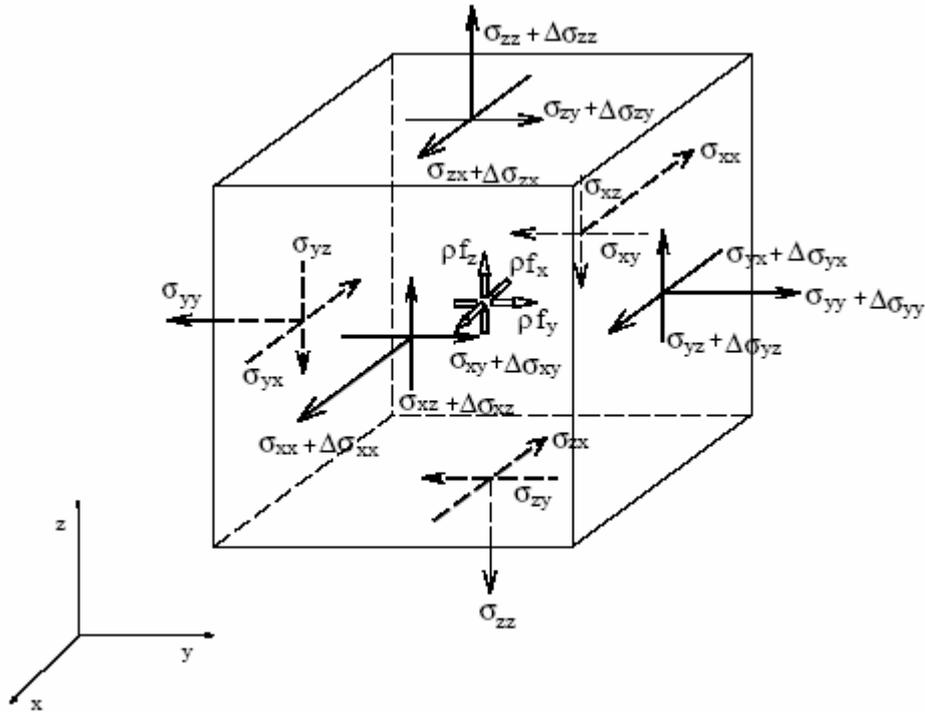


Figura 3.2 - Estado de tensões em um elemento infinitesimal.

$$\Delta \mathbf{s}_{ij} \quad \text{por} \quad \frac{\partial \mathbf{s}_{ij}}{\partial x_k} dx_k \quad (1)$$

e escrevendo as equações de equilíbrio nas direções \mathbf{x} , \mathbf{y} e \mathbf{z} obtém-se as equações de equilíbrio para tensões, também chamadas de equações diferenciais de equilíbrio, ou seja:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{s}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{s}_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{s}_{zx}}{\partial z} + \mathbf{r}f_x &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{s}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{s}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{s}_{zy}}{\partial z} + \mathbf{r}f_y &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{s}_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{s}_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{s}_{zz}}{\partial z} + \mathbf{r}f_z &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

e

$$\mathbf{s}_{xz} = \mathbf{s}_{zx}, \mathbf{s}_{xy} = \mathbf{s}_{yx}, \mathbf{s}_{yx} = \mathbf{s}_{xy} \quad (3)$$

onde a equação 3 expressa a condição de simetria das componentes do tensor tensão.

A partir dos deslocamentos, pode-se calcular as deformações em qualquer ponto da estrutura. As equações deformações-deslocamentos para elasticidade linear tridimensional são:

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\
\mathbf{e}_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \\
\mathbf{e}_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} \\
\mathbf{e}_{xy} = \mathbf{e}_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\
\mathbf{e}_{xz} = \mathbf{e}_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\
\mathbf{e}_{yz} = \mathbf{e}_{zy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{4}$$

onde u_x , u_y e u_z são as componentes do vetor deslocamento \mathbf{u} nas direções x , y e z , respectivamente. Estas equações representam adequadamente as deformações somente se as diferenças forem bem pequenas.

As equações 4 podem ser colocadas na forma matricial $\{\dot{\mathbf{a}}\} = [\mathbf{B}] \{\mathbf{u}\}$, conforme apresentado na equação 5.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{a}}_{xx} \\ \dot{\mathbf{a}}_{yy} \\ \dot{\mathbf{a}}_{zz} \\ 2 \dot{\mathbf{a}}_{xy} \\ 2 \dot{\mathbf{a}}_{xz} \\ 2 \dot{\mathbf{a}}_{yz} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial}{\partial y} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial}{\partial z} & \mathbf{0} & \frac{\partial}{\partial x} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}_x \\ \mathbf{u}_y \\ \mathbf{u}_z \end{array} \right\} \tag{5}$$

As equações constitutivas (ou equações tensões-deformações) para sólidos elásticos lineares homogêneos são dadas pela Lei de Hooke generalizada para materiais isotrópicos:

$$\begin{aligned}
\mathbf{s}_{xx} &= (\mathbf{l} + 2G)\mathbf{e}_{xx} + \mathbf{l}\mathbf{e}_{yy} + \mathbf{l}\mathbf{e}_{zz} \\
\mathbf{s}_{yy} &= \mathbf{l}\mathbf{e}_{xx} + (\mathbf{l} + 2G)\mathbf{e}_{yy} + \mathbf{l}\mathbf{e}_{zz} \\
\mathbf{s}_{zz} &= \mathbf{l}\mathbf{e}_{xx} + \mathbf{l}\mathbf{e}_{yy} + (\mathbf{l} + 2G)\mathbf{e}_{zz} \\
\mathbf{s}_{xy} &= 2G\mathbf{e}_{xy} \\
\mathbf{s}_{yz} &= 2G\mathbf{e}_{yz} \\
\mathbf{s}_{zx} &= 2G\mathbf{e}_{zx}
\end{aligned} \tag{6}$$

onde a constante de Lamé pode ser expressa como

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{u}E}{(1 + \mathbf{u})(1 - 2\mathbf{u})} \tag{7}$$

e o módulo de elasticidade transversal por

$$G = \frac{E}{2(1 + \mathbf{u})} \tag{8}$$

sendo E o módulo de elasticidade do material e \mathbf{n} o coeficiente de Poisson.

As condições de contorno são dadas por:

$$\begin{aligned}
t_x &= \mathbf{s}_{xx}n_x + \mathbf{s}_{xy}n_y + \mathbf{s}_{xz}n_z \\
t_y &= \mathbf{s}_{yx}n_x + \mathbf{s}_{yy}n_y + \mathbf{s}_{yz}n_z \\
t_z &= \mathbf{s}_{zx}n_x + \mathbf{s}_{zy}n_y + \mathbf{s}_{zz}n_z
\end{aligned} \tag{9}$$

onde t_x , t_y e t_z são as componentes do vetor tração na superfície do corpo e n_x , n_y e n_z são as componentes do vetor normal, \mathbf{n} , à superfície do corpo.

O conjunto de equações 2, 3, 4, 6 e 9 representam as equações fundamentais para a elasticidade tridimensional. Em Popov, 1978, podem ser observados detalhes do processo de obtenção destas equações.

3.2 Transdutor de Força

O Transdutor de Força pode ser definido como qualquer dispositivo que, quando excitado por força, fornece uma resposta (saída) proporcional à excitação (entrada), conforme o diagrama da figura 3.3.

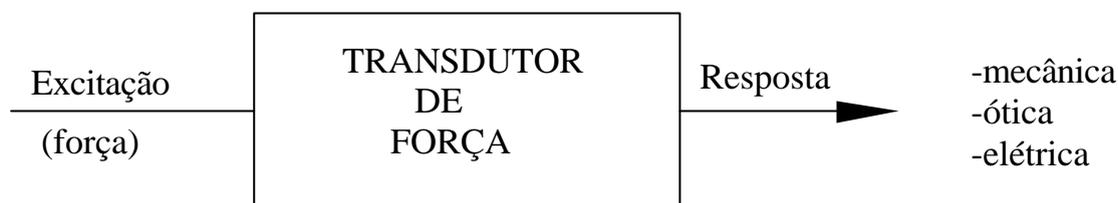


Figura 3.3 – Diagrama simplificado de um transdutor de força. Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982a.

A grandeza a ser medida (força) é processada pelo transdutor que a transforma em uma grandeza de outra natureza. No caso dos transdutores elétricos uma grandeza de força na entrada do transdutor se transformaria num sinal elétrico na saída do mesmo.

Os transdutores são caracterizados por um parâmetro denominado sensibilidade, que se define por:

$$S = \text{resposta/excitação.}$$

3.2.1 Elemento Elástico

O elemento elástico é a peça, construída geralmente em material metálico, que representa a geometria de interesse num transdutor de força. Sua função é servir de reação a grandeza mecânica aplicada e conduzir o efeito desta grandeza em um isolado, e se possível uniforme, campo de deformações relativas onde os extensômetros são colocados para medi-las [Cauduro, 1992].

Os níveis de deformação do elemento elástico não excedem em qualquer ponto, quer seja ou não posição de algum extensômetro, o limite elástico do material de que é construído. Em outras palavras, a tensão em qualquer ponto do elemento elástico não deve exceder o limite de escoamento do material.

Cauduro, 1992, relata que o elemento elástico é a parte crítica de um transdutor extensométrico e deve funcionar como se fosse uma mola de alta precisão, estável no tempo e insensível a variações de temperatura, o que implica em: linearidade, baixa histerese mecânica, baixa fluência e estabilidade metalúrgica. O material elástico deve possuir também alta condutividade térmica para dissipar o calor gerado nos extensômetros quando excitados na

ponte, o que praticamente inviabiliza o uso de materiais não metálicos. Entre os materiais mais utilizados estão os aços ABNT 4140 e 4340; aços inoxidáveis e ligas de alumínio. Para cada tipo de elemento elástico existem extensômetros autocompensados, que apresentam a mesma dilatação do material, para uma determinada faixa de temperatura. A dureza máxima recomendada para o elemento elástico, no caso do aço, é em torno de 50 RC, para evitar fraturas frágeis.

As células de carga dinâmicas são feitas de aços com baixa histerese e alta resistência. A baixa histerese é fundamental porque em ensaios dinâmicos é provável a ocorrência de muitos ciclos de carga e recarga. Sendo que o material histerético, absorverá energia a cada ciclo, o que em alguns casos pode mudar suas características durante o uso ou provocar dano acumulado. Os aços chamados genericamente “especiais” são materiais de alta resistência, em geral, após tratamento térmico. Isto permite que o transdutor tenha um tamanho menor e seja mais prático. Este tipo de material tem grande constância nas suas propriedades mecânicas. [Doz et al, 1990]

3.2.2 Transdutor com extensômetros de resistência elétrica

A figura 3.4 mostra um diagrama de bloco das unidades componente de um transdutor. Numa outra representação, a transformação de uma força em sinal elétrico pode ser dividida em 3 blocos, conforme figura 3.5. No primeiro estágio, a força aplicada na célula provoca deformações elásticas ($\epsilon = D/l$), que dependem da geometria e do material da célula. No segundo estágio, estas deformações elásticas são transformadas em variações de resistências elétricas ($\Delta R/R$), através de extensômetros de resistência elétrica colados na célula. Estas resistências são ligadas num circuito tipo ponte, que fornece um sinal elétrico de desbalanço ($\Delta V/V$) proporcional a ($\Delta R/R$).

Como as deformações elásticas são pequenas, da ordem de micrometros por metro, faz-se necessário utilizar amplificador para medir os desbalanços ($\Delta V/V$). É comum o uso de pontes amplificadoras especiais para extensômetros e que completam o processamento do último estágio da informação, com baixo ruído. Assim, num transdutor, é a célula de carga que deve ser escolhida para cada aplicação específica.

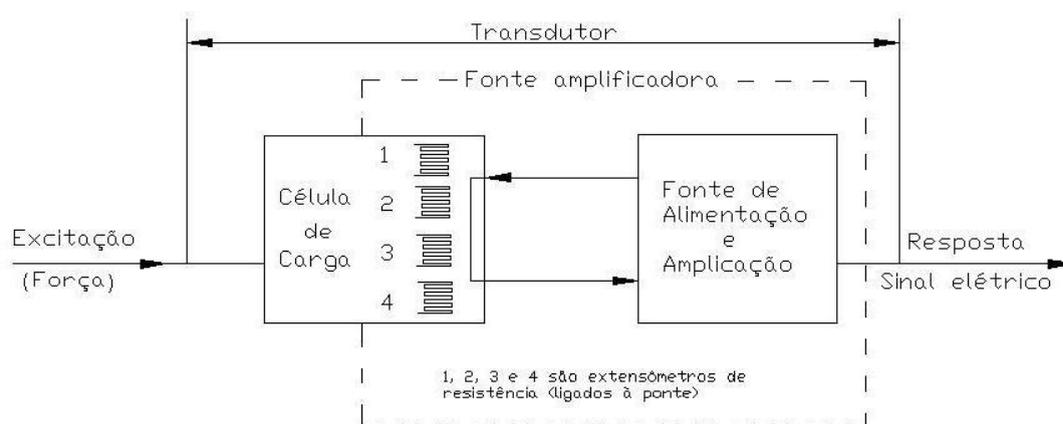


Figura 3.4 – Diagrama de bloco das unidades de um transdutor de força; o transdutor é composto por uma célula de carga e uma ponte amplificadora. Os quatro extensômetros são elementos comuns entre a célula e o amplificador. Fonte: Adaptado de Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982a.

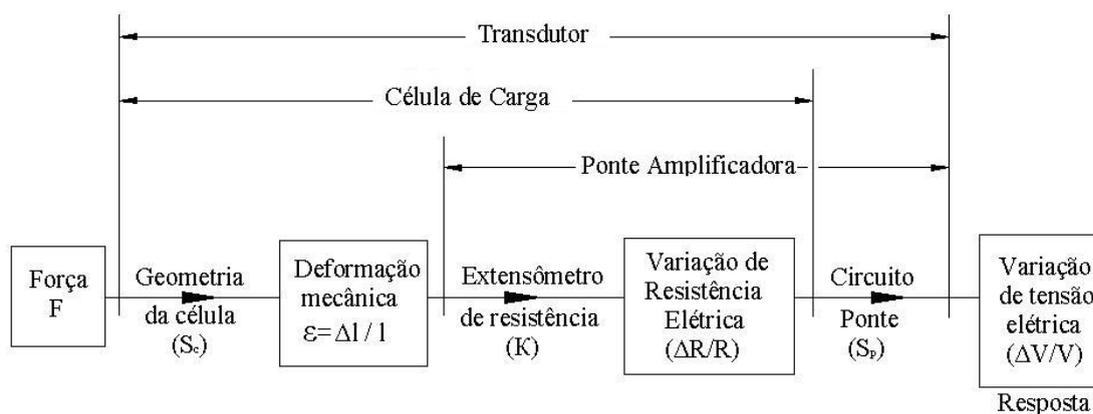


Figura 3.5 – Diagrama do processo da informação desde a excitação até a resposta. Fonte: Adaptado de Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982a.

É conveniente definir uma sensibilidade, ou seja, um parâmetro característico para cada estágio conversor da informação de um transdutor. Assim:

- Sensibilidade da ponte $S_p = (\mathbf{DV/V})/(\mathbf{DR/R})$;
- Sensibilidade dos extensômetros $K = (\mathbf{DR/R})/(\mathbf{DI/l})$;
- Sensibilidade da célula de carga $S_c = (\mathbf{DI/l})/(F)$.

A sensibilidade do transdutor $S = (\mathbf{DV/V})/(F)$ pode ser calculada como função das demais sensibilidades (da ponte, dos extensômetros e da célula de carga) e desta forma, qualquer

anomalia que ocorrer em qualquer um dos três estágios do processamento da informação se reflete integralmente na saída do transdutor.

3.2.3 Extensômetros de Resistência Elétrica (Strain Gages)

A designação “extensômetro” significa medidor de deformação e, analogamente, o extensômetro de resistência elétrica (*electrical resistance strain gauge*) vem a significar medidor de deformação (mecânica) relativa, através da determinação da resistência elétrica. [Borchardt & Zaro, 1982a].

Borchardt & Zaro, 1982b, apontam que são duas as principais aplicações dos extensômetros:

- a) Determinação de deformações num ponto de um componente mecânico, e conseqüentemente as tensões deste ponto;
- b) Elemento sensor de deformação, funcionando como transdutor calibrado em termos de deslocamento, força, pressão, aceleração, etc.

Além do extensômetro de resistência elétrica, existem extensômetros que utilizam outros princípios, onde cita-se: mecânicos, ópticos, acústicos, pneumáticos e dentro dos extensômetros elétricos tem-se os seguintes princípios: indutivos, capacitivos, resistivos e piezoelétricos [Thomas, 2003].

Historicamente, o desenvolvimento de extensômetros tem seguido diferentes abordagens, e alguns foram desenvolvidos baseados nos princípios mecânico, óptico, elétrico, acústico e até com princípio pneumático [Dally et al., 1993].

3.2.3.1 Princípio básico do extensômetro de resistência elétrica

Em 1856, Kelvin, realizou experimentos utilizando fios de cobre e ferro e observou que a resistência elétrica mudava quando os materiais sofriam deformação na região elástica. Ele verificou que a variação relativa da resistência sobre a variação relativa da deformação é uma constante ($(\Delta R/R) / (\Delta l/l) = \text{constante}$), o que modernamente viria a ser chamado “*fator gage*”.

Considerando um condutor (figura 3.6) de comprimento l e área da secção transversal (circular) A . Sabe-se que a resistência elétrica R de um condutor é função dos aspectos geométricos (l/A) e da característica do material (resistividade: $\tilde{\rho}$):

$$R = \tilde{\rho} \frac{l}{A} \quad (10)$$

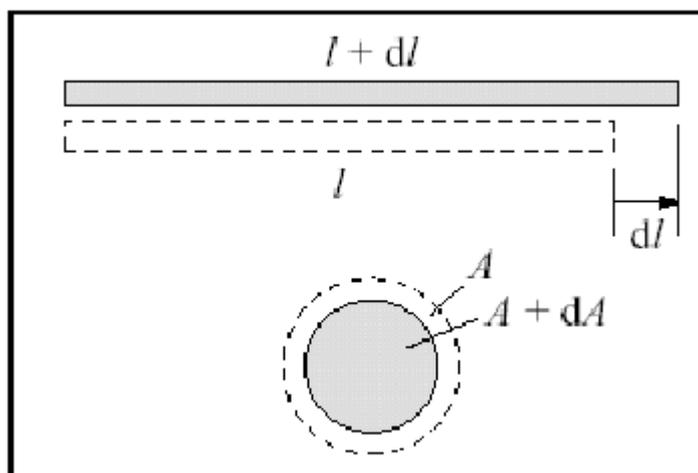


Figura 3.6 - Representação do condutor de comprimento l e área da seção transversal A .

O extensômetro de resistência elétrica é um sensor de deformação relativa cuja resistência elétrica R varia de $\frac{\Delta R}{R}$ quando sob a ação de uma deformação relativa ϵ devida ao efeito da deformação mecânica do elemento elástico onde esta colado.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (11)$$

Na equação 11, K é conhecido por *fator gage* e representa a sensibilidade do “*strain gage*”. O valor de K depende do material que compõem o condutor do extensômetro. Comercialmente, o extensômetro não apresenta um aspecto de fio, mas de uma grade formada por um “vai e vem” de um condutor.

O extensômetro de resistência elétrica é formado por dois elementos: a base e a grade, conforme a figura 3.7. A base é uma lâmina de epóxi ou poliamida de grande elasticidade que tem três funções básicas:

- servir de base para a grade.
- permitir a cimentação do sensor a superfície elástica
- isolar eletricamente a grade da superfície onde será fixado.

A grade geralmente é formada por silício, ou por uma liga metálica de níquel-cromo, ou cobre-níquel que serve como elemento resistivo [Kyowa].

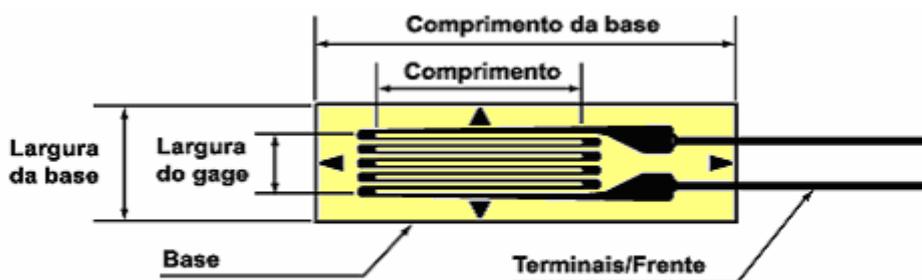


Figura 3.7 – Extensômetro de resistência elétrica (strain gage).

A utilização dos *strain gages* é relativamente simples: eles devem ser colados na superfície do objeto que se pretende medir as deformações. Quando houver uma deformação no objeto que está sendo medido, haverá uma deformação no extensômetro, o que implica numa variação de comprimento e conseqüentemente uma variação da resistência elétrica.

Devido ao fato de fornecer um sinal elétrico, tem-se construído células de carga a base de *strain gauges*, que constituem a maioria das balanças eletrônicas modernas. Este sinal pode ser facilmente processado e analisado por computadores ou outros equipamentos eletrônicos, e, portanto, pode ser utilizado em medições dinâmicas, o que é um fator que limita a utilização de sistemas mecânicos convencionais [Borchardt & Zaro, 1982a].

3.2.4 Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é um circuito elétrico onde se pode comparar resistores e também medir variações relativas de resistência elétrica. As variações de resistência observadas sobre os extensômetros de resistência elétrica são muito pequenas, na ordem de μm . Medir diretamente estas variações pode significar uma difícil e onerosa tarefa. Por esta razão, os extensômetros de resistência elétrica são ligados de modo que constituam um circuito tipo ponte de Wheatstone, o que facilita e diminui os custos da operação de extensômetros.

Conforme a figura 3.8, verifica-se que a ponte é formada basicamente por quatro resistores, alimentada por um sinal de tensão externo V_{exc} , e que produz um sinal de tensão de saída V_{out} nulo única e exclusivamente quando as resistências respeitarem a seguinte relação:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (12)$$

A partir destes componentes, pode-se obter diferentes configurações de montagens, onde o extensômetro de deformação pode assumir o papel de qualquer um dos resistores da ponte, ou mesmo mais de um, conforme o nível de sensibilidade requerida. Quando utiliza-se

quatro extensômetros ativos no lugar dos resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , obtém-se a máxima sensibilidade possível, configuração esta denominada de Ponte Completa. Já a configuração do tipo Meia Ponte, como o próprio nome sugere, utiliza dois extensômetros ativos, ou seja, apenas metade ou um “braço” da ponte, resultando por fim na metade da sensibilidade da ponte completa. Há, também, a possibilidade de utilização de apenas um extensômetros ativo. Esta configuração é chamada de Um Quarto de Ponte.

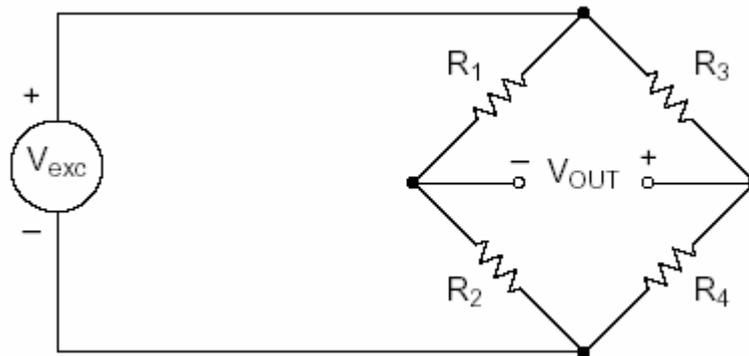


Figura 3.8 – Ponte de Weatstone

A sensibilidade do sinal de saída será então o produto das sensibilidades do extensômetro e da sensibilidade da ponte. Em termos de equações

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{exc}} = S_{ponte} \frac{\Delta R}{R} \quad (13)$$

e

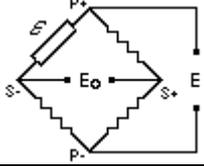
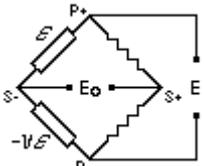
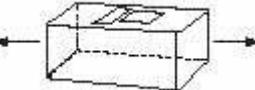
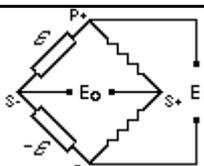
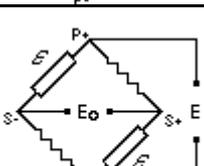
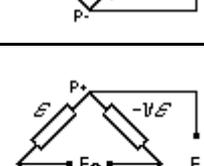
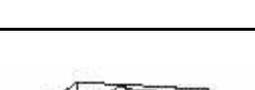
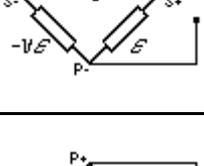
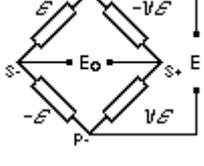
$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (14)$$

então,

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{exc}} = S_{ponte} \cdot K \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (15)$$

A tabela 3.1 apresenta as possíveis variações da configuração da ponte de Wheatstone juntamente com a respectiva sensibilidade.

Tabela 3.1 - Equações da saída das pontes de Wheatstone. Fonte: Adaptado de Measurements Group

Tipo de arranjo das deformações na ponte de Wheatstone	Modo de Medição (descrição)	Descrição	Equação de saída = E_o/E em mV/V *
		Um único extensômetro ativo em tração ou compressão uniaxial.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F \epsilon \times 10^{-3}}{4 + 2F \epsilon \times 10^{-6}}$
		Dois extensômetros ativos em um campo uniaxial de tensões. Um alinhado com a deformação máxima principal e outro com a deformação transversal "Poisson".	$\frac{E_o}{E} = \frac{F \epsilon (1 + \nu) \times 10^{-3}}{4 + 2F \epsilon (1 - \nu) \times 10^{-6}}$
		Dois extensômetros ativos com deformação igual de sinal contrário. Típico de arranjo de viga em balanço.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F \epsilon \times 10^{-3}}{2}$
		Dois extensômetros ativos com igual deformação e de mesmo sinal. Usado em lados opostos de colunas com baixo gradiente térmico (compensação do efeito de balanço, por exemplo)	$\frac{E_o}{E} = \frac{F \epsilon \times 10^{-3}}{2 + F \epsilon \times 10^{-6}}$
		Quatro extensômetros ativos num campo uniaxial de tensões. Dois alinhados com a deformação máxima principal e outros dois com a deformação transversal, "Poisson". (coluna)	$\frac{E_o}{E} = \frac{F \epsilon (1 + \nu) \times 10^{-3}}{2 + F \epsilon (1 - \nu) \times 10^{-6}}$
		Quatro extensômetros ativos em num campo uniaxial de tensões. Dois alinhados com a deformação máxima principal e outros dois com a deformação transversal, "Poisson". (viga)	$\frac{E_o}{E} = \frac{F \epsilon (1 + \nu) \times 10^{-3}}{2}$
		Quatro extensômetros ativos com pares sujeitos a deformações iguais e sinal contrário (viga em balanço ou eixo em torção).	$\frac{E_o}{E} = F \epsilon \times 10^{-3}$

* deformação expressa em microstrain (10^{-6})

** não-linear em grandes deformações

3.3 Características Fundamentais das Células de Carga

As células de carga são avaliadas por algumas características fundamentais obtidas com os dados de calibração das mesmas. As principais características fundamentais que se deve avaliar são: desvio de linearidade, histerese e repetibilidade [Beck, 1983]. Em transdutores que medem mais que um esforço, também faz-se necessário uma avaliação da interferência entre os canais que avaliam os diferentes esforços durante a operação do sensor. No subitens que seguem, essas características fundamentais são conceituadas individualmente.

3.3.1 Desvio de Linearidade (Alinearidade)

Considera-se como desvio de linearidade a relação da maior diferença existente, conforme equação 16, entre a curva média de calibração e a reta (que passa pelo ponto (0,0) e pelo ponto de máxima carga e respectiva tensão encontrada), pela tensão máxima lida na saída do respectivo canal [Beck, 1983], conforme figura 3.9.

$$A = \frac{u}{V} \quad (16)$$

onde:

A = alinearidade

u = maior diferença de tensão lida entre as curvas

V = tensão correspondente ao carregamento máximo

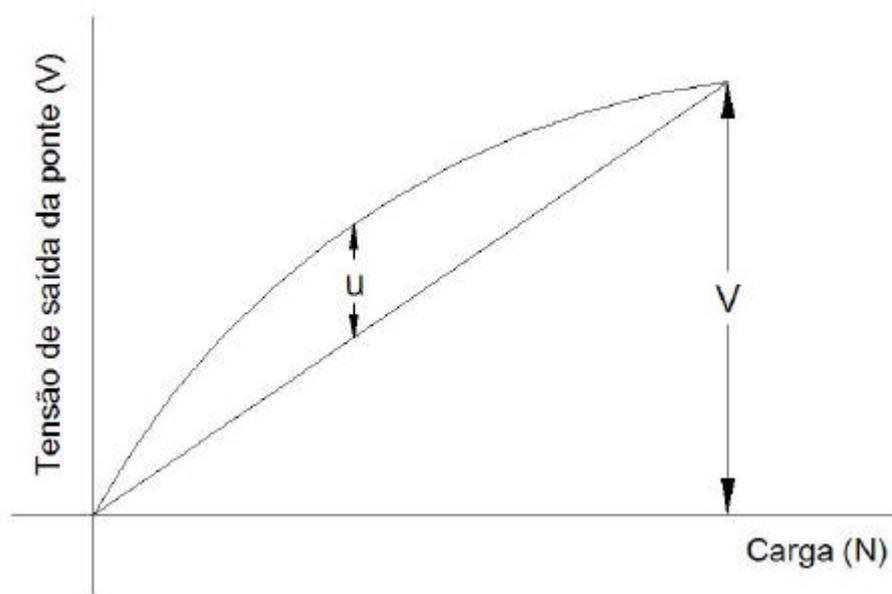


Figura 3.9 – Gráfico mostrando a forma de determinação da alinearidade (A).

3.3.2 Histerese

Com os valores obtidos dos ensaios, traçam-se as curvas de calibração dos carregamentos e descarregamentos e mede-se a maior abertura. Este valor dividido pela tensão máxima fornece o valor do desvio, conforme equação 17, entre carregamento e descarregamento, que é chamado histerese [Beck, 1983]. Esse processo está ilustrado na figura 3.10.

$$H = \frac{u'}{V} \quad (17)$$

onde:

H = histerese

u' = maior diferença (de tensão) entre a curva de carregamento e descarregamento

V = tensão correspondente ao carregamento máximo

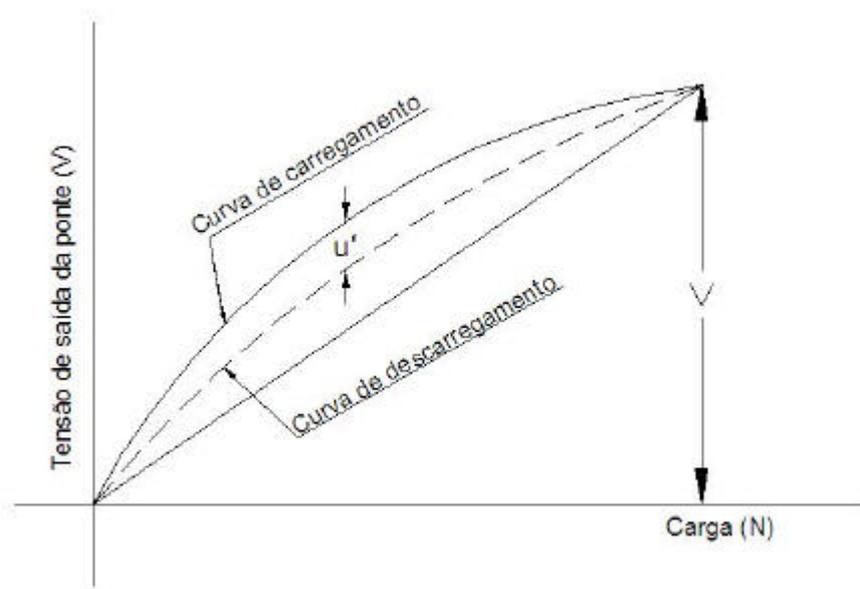


Figura 3.10 – Gráfico com esquema de determinação da Histerese.

3.3.3 Repetibilidade

Efetuem-se ensaios em diferentes dias (nas mesmas condições) e toma-se a máxima diferença ocorrida no valor da tensão. Este valor, dividido pela tensão máxima de fundo de escala é a repetitividade, conforme a equação 18 [Beck, 1983]. A figura 3.11 apresenta um esquema do processo para avaliação da repetibilidade.

$$R = \frac{\Delta t}{t} \quad (18)$$

onde:

R = repitibilidade

Δt = maior diferença ocorrida no valor de tensão

t = tensão máxima de fundo de escala

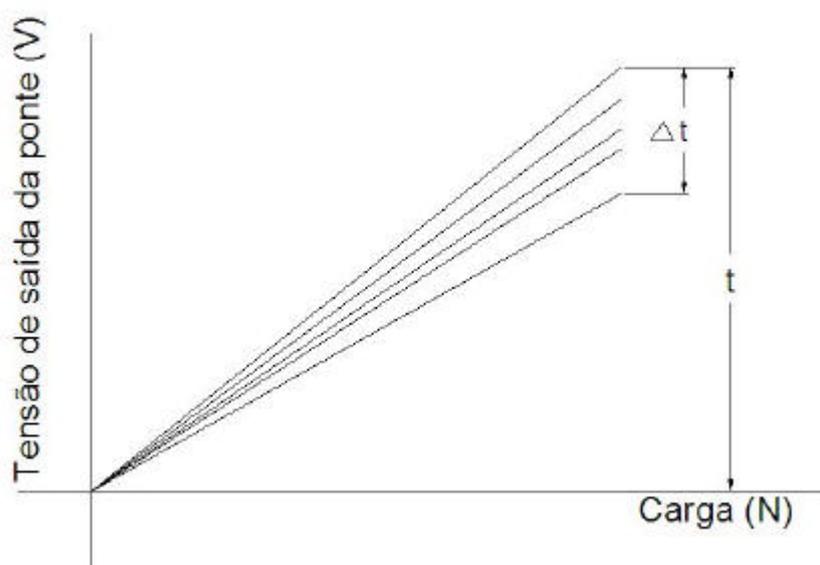


Figura 3.11 – Gráfico com esquema de determinação da repetibilidade.

3.3.4 Interferência

Em células de carga multiaxiais faz-se a avaliação da interação entre os diferentes esforços que são medidos no transdutor. Durante o processo de calibração aplica-se cada esforço separadamente, por exemplo, quando tem-se a aplicação de força na direção horizontal, os outros canais (vertical e momento) deveriam permanecer nulos. Porém, esta condição não ocorre, uma vez que surgem valores residuais em diferentes direções. Estes valores de interação são chamados de interferência, isto é, interferência é um sinal de saída do sistema causado por uma variável não alocada neste canal de saída em particular [Bagesteiro, 1996].

A figura 3.12 apresenta um exemplo onde dois canais apresentam interferência, com sinais de tensão v_1 e v_2 , quando se faz a calibração do canal principal gerando a tensão V ao se aplicar o carregamento.

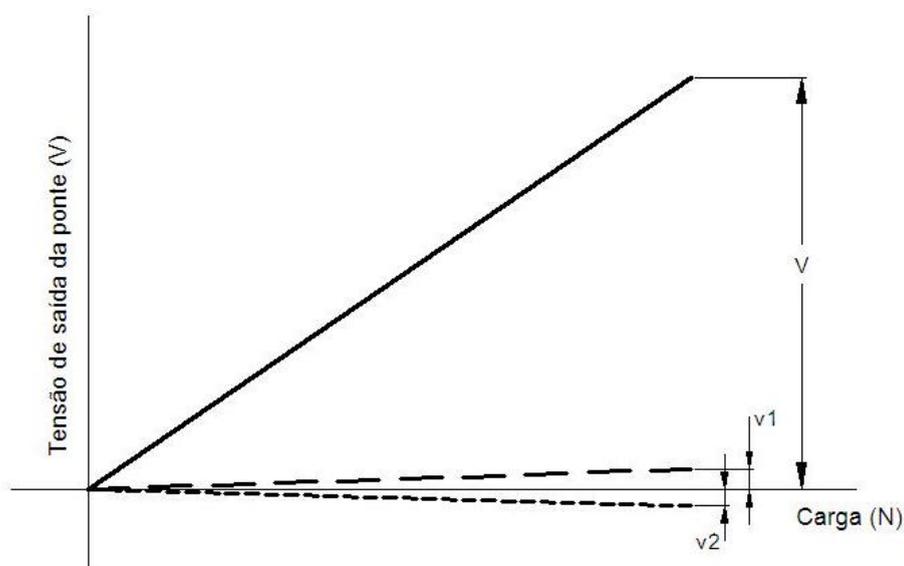


Figura 3.12 – Exemplo de interferência entre canais de uma célula de carga qualquer com três canais.

3.4 Conceitos sobre Aquisição de Dados

O termo Aquisição de Dados é usado genericamente para designar a obtenção de informações a respeito de um processo. Um exemplo de processo poderia ser os esforços sofridos pelo semi-eixo de uma suspensão veicular em pistas de testes. As informações colhidas poderiam ser usadas posteriormente para simulação em laboratório. Os processos podem ser de naturezas diversas, podendo-se citar, entre outros: químico, biofísico, industrial, elétrico ou mecânico. Nestes, algumas das grandezas que se pode medir são: temperatura, pressão, aceleração, vazão, etc.

As informações a respeito de um processo interessam aos profissionais envolvidos no seu estudo, projeto, melhoria ou manutenção. Podem, quase sempre, ser transformadas em sinal elétrico e registradas de alguma forma. Algumas formas de registro podem ser: papel e lápis, gravadores de fita, registrador gráfico, analisadores de espectro, osciloscópios com memória e polígrafos.

A figura 3.13 ilustra um exemplo de aquisição de dados (pressão arterial, batimento cardíaco, ondas cerebrais, etc.) de um processo biofísico.

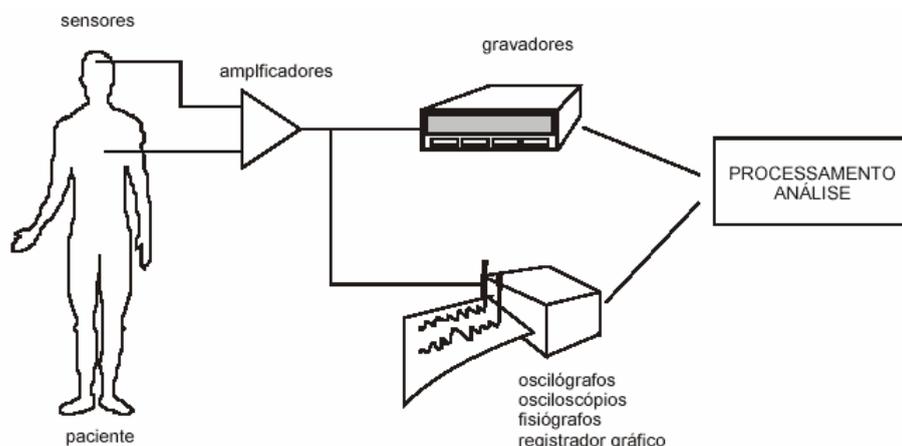


Figura 3.13 - Esquema de um sistema de aquisição de dados. Fonte: AqDados.

3.4.1 Aquisição de Dados com Microcomputadores

A utilização de microcomputadores torna a aquisição de dados muito mais eficiente e confiável, se comparada a métodos tradicionais. Além disso, acrescenta uma grande vantagem: os dados já estão prontos para pós-processamento, onde se pode fazer análise do sinal,

processamento do sinal, elaboração de relatório (gráficos e tabelas), exportação de dados para outros programas.

A figura 3.14 mostra a aquisição de dados do mesmo processo da figura anterior com a utilização de microcomputador.

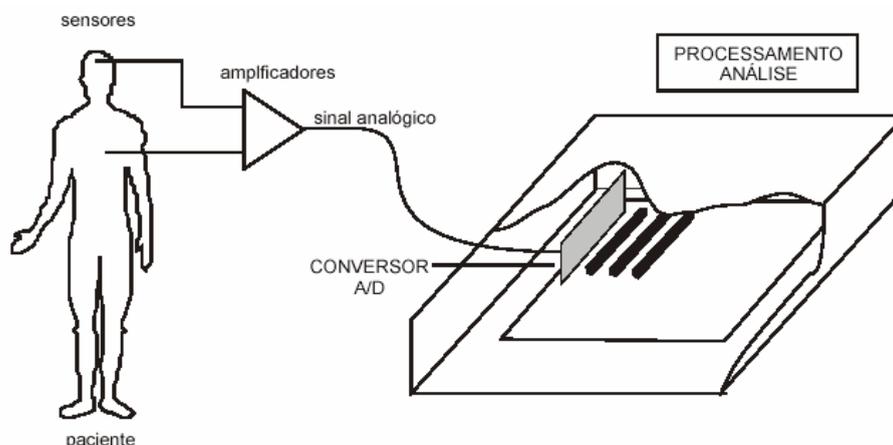


Figura 3.14 – Esquema de um sistema de aquisição de dados utilizando microcomputador. Fonte: AqDados.

3.4.2 Sensores

Sensores ou transdutores são dispositivos que convertem grandezas físicas em sinais elétricos (tensão ou corrente). São exemplos de sensores:

acelerômetro:	mede aceleração
termopar:	mede temperatura
célula de carga:	mede força

3.4.3 Condicionadores

Os condicionadores são equipamentos eletrônicos que modificam o sinal de entrada de alguma forma. São exemplos de condicionamento: amplificação ou atenuação, filtragem, conversão de corrente para tensão e isolamento galvânica.

3.4.4 Cabos

Os cabos interligam os sensores, condicionadores e placas de conversão A/D nos microcomputadores. Em geral, os cabos não podem ser muito longos (principalmente se os sinais forem de tensão e de baixa amplitude). Em ambientes sujeitos a ruídos por indução eletromagnética deve-se utilizar cabos tipo manga que são compostos por pares trançados envolvidos em blindagem.

3.4.5 Conversor A/D

O conversor A/D converte um sinal analógico em dado digital. O sinal digitalizado pode então ser manipulado pelo microcomputador, através de programas específicos.

As grandezas analógicas são aquelas cujas medidas podem assumir uma infinidade de valores. O mundo físico apresenta diversos exemplos de grandezas analógicas: a posição de um carro na pista, a força de tração num cabo de aço, a corrente elétrica consumida por um equipamento, a força numa mola, a temperatura ambiente, entre outras. No caso da força numa mola, o seu valor pode ser de 1000 kgf num determinado instante e logo em seguida 1012 kgf. Neste intervalo, a força assumiu uma infinidade de valores (1000,1; 1001,009; 1007,89763; etc.), ou seja, uma grandeza analógica possui infinitos valores ao longo do intervalo de variação.

Um computador opera com dados digitais. Um dado ou informação digital caracteriza-se por assumir uma quantidade finita de valores discretos.

A conversão analógica-digital permite representar numericamente um sinal, sendo que a precisão de representação digital depende de vários fatores, entre os quais destacam-se:

- Faixa de entrada e resolução
- Taxa de amostragem

Na figura 3.15 é exemplificada a conversão A/D de um sinal de força utilizando-se um conversor A/D de 4 bits (com $2^4 = 16$ níveis) e com faixa de entrada de ± 5 volts. A taxa de amostragem utilizada é de 10 amostras por segundo (10 Hz). Observa-se que os pontos de intersecção das retas da grade correspondem ao conjunto de valores discretos que podem ser obtidos para a dada taxa de amostragem e resolução do conversor A/D.

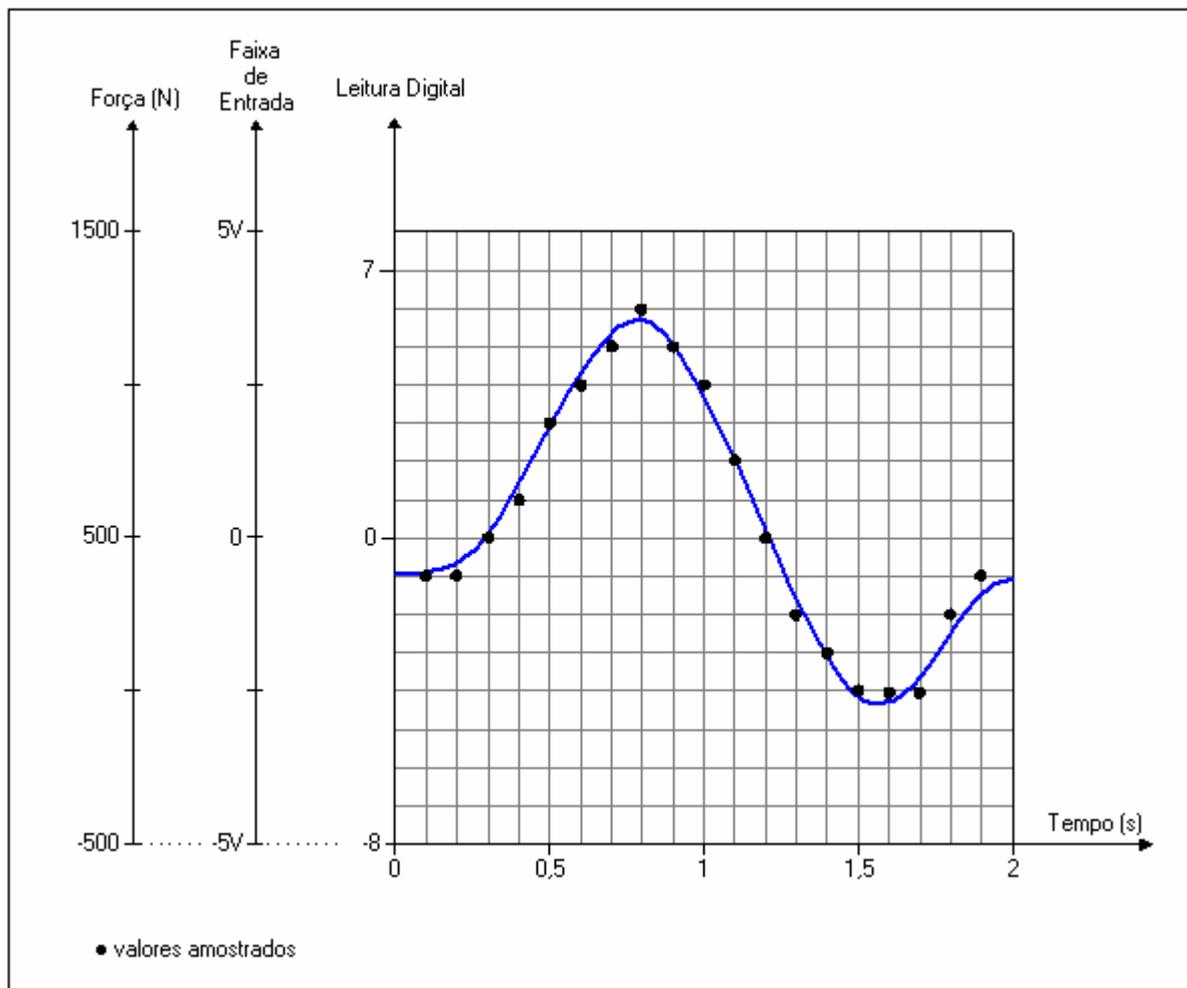


Figura 3.15 – Exemplo de conversão analógico/digital de uma força. A/D de 4 bits ($2^4 = 16$ níveis), faixa de entrada de ± 5 V e taxa de amostragem de 10 Hz. Fonte: AqDados, 2003.

3.4.6 Faixa de Entrada e Resolução

A faixa de entrada é um parâmetro associado à resolução e informa a faixa de tensões e/ou correntes que a placa conversora A/D consegue representar numericamente. Esta faixa pode ser de ± 5 V, 0 a 5V, ± 10 V, 0 a 20 mA, etc.

Quando os sinais de entrada não forem adequados para as faixas de entrada disponíveis na placa A/D será necessário condicioná-los (amplificar ou atenuar) antes de conectá-los na entrada da placa A/D. A figura 3.16 mostra exemplos onde o condicionamento do sinal faz-se necessário.

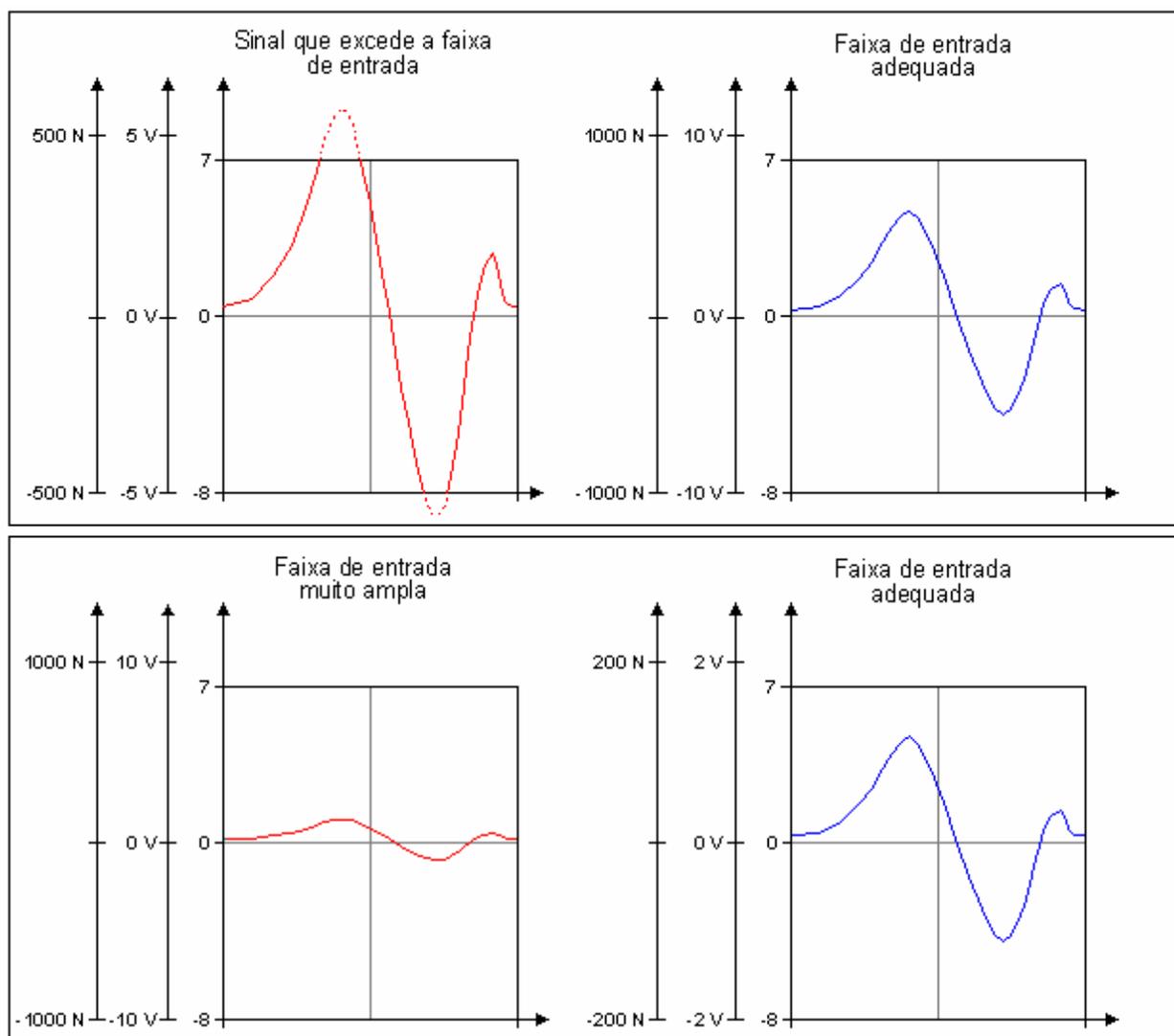


Figura 3.16 – Condicionamento de sinal, adequando a faixa de entrada. Fonte: AqDados, 2003.

A resolução de um conversor A/D indica a menor variação do sinal analógico que o conversor pode detectar. É geralmente indicada em termos de número de bits. Assim, têm-se conversores com resolução de 6, 8, 10, 12, 14, 16, ...bits.

A figura 3.17 mostra o mesmo sinal lido por conversores com resolução de 4 e 5 bits. Comparando-se os dois conversores, que possuem a mesma faixa de entrada, observa-se que o de maior resolução permitirá detectar variações menores no sinal de entrada.

Um conversor com faixa de entrada $\pm 5V$ e resolução de 4 bits pode representar o sinal de entrada em 16 (2^4) níveis e detectará variações de 625 mV (10 V dividido por 16 níveis). Já o conversor de 5 bits pode representar o mesmo sinal em 32 níveis e detectará variações de 312,5 mV.

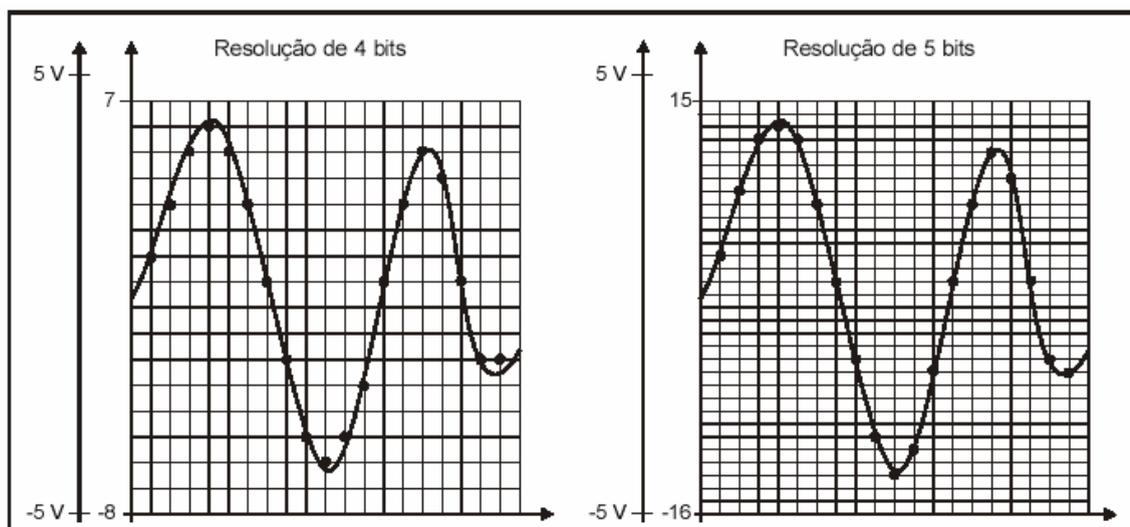


Figura 3.17 – Sinal amostrado em 4 e 5 bits. Fonte: AqDados, 2003.

3.4.7 Taxa de Amostragem

Numa aplicação prática o sinal de entrada do conversor A/D varia no decorrer do tempo, e o que se deseja é registrar esta variação. Como a capacidade de armazenamento de um computador é finita, o registro não é contínuo e sim discreto.

A discretização é feita através da amostragem do sinal a intervalos regulares. O inverso desse intervalo é a taxa de amostragem. Por exemplo, para uma taxa de amostragem de 100 amostras por segundo (ou seja, 100 Hz), o intervalo entre as amostras é de 10 ms (ou seja, 1/100 de segundo). A taxa de amostragem é semelhante a resolução da conversão A/D, só que aplicada ao tempo.

A figura 3.18 ilustra um exemplo que utiliza duas taxas de amostragem distintas para o mesmo sinal. Neste exemplo tem-se taxas de amostragem de 10 e 20 amostras por segundo.

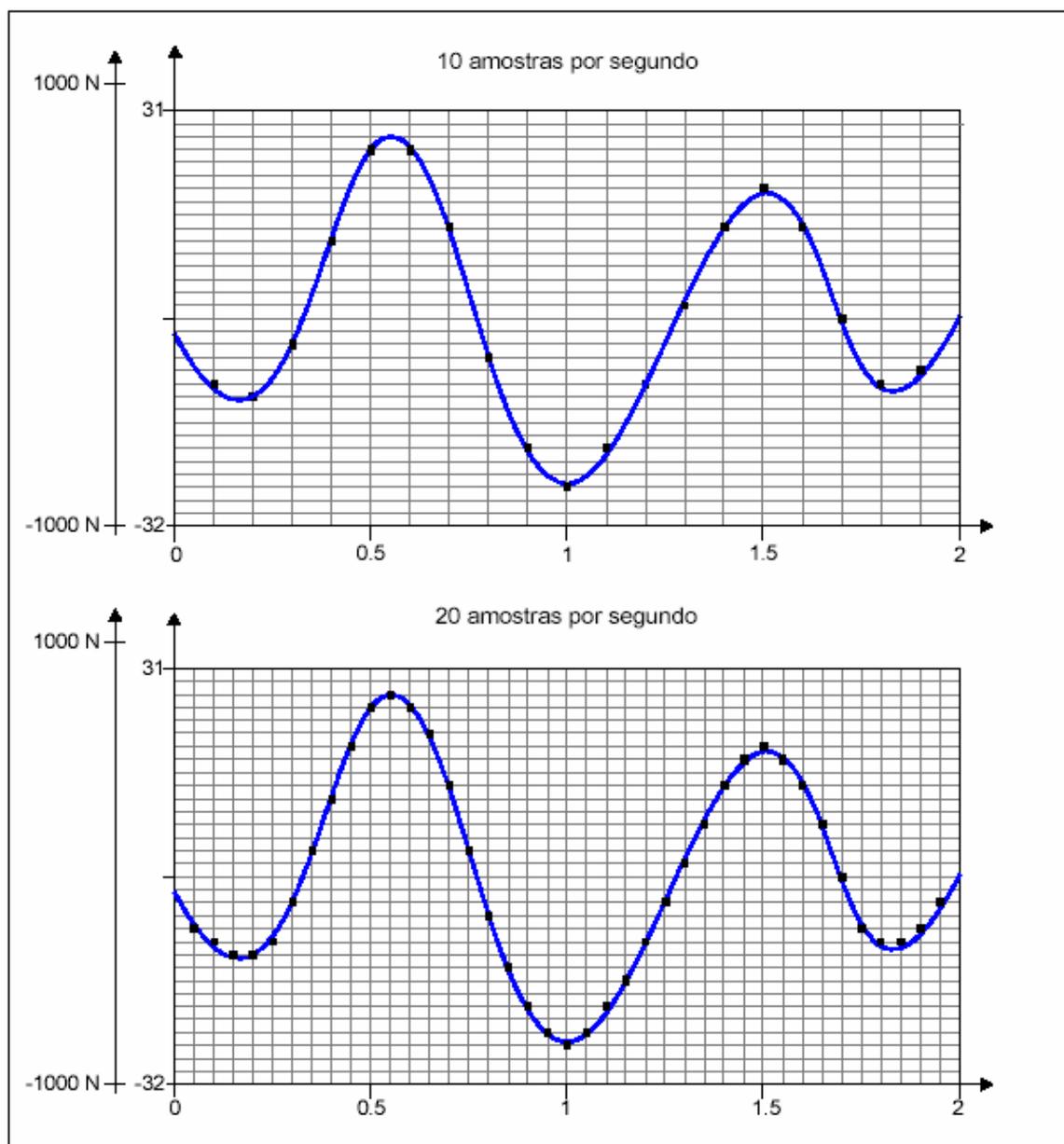


Figura 3.18 – Sinal amostrado em duas taxas de amostragens distintas, 10 e 20 amostras por segundos. Fonte: AqDados, 2003.

Quanto maior a taxa, melhor a representação do sinal. No entanto, devido à limitação do espaço disponível para armazenamento dos dados, há uma relação de compromisso entre a taxa de amostragem e a duração da aquisição.

A taxa de amostragem também não pode ser muito baixa, comparada com a frequência de variação do sinal, devido ao efeito de subamostragem (*Aliasing*).

O efeito *Aliasing* ocorre sempre que a frequência de amostragem é menor que duas vezes a frequência da componente de maior frequência do sinal (Teorema de Nyquist).

A figura 3.19 mostra gráficos que representam um sinal senoidal de 100 Hz amostrado em diferentes taxas de amostragem. No caso A, a taxa de amostragem é de 500 Hz e

não ocorre *Aliasing* (taxa = 500 Hz > 2 x 100 Hz). No caso B a taxa de amostragem é de 83.3 Hz e ocorre *Aliasing*. É importante observar que os pontos amostrados representam um sinal senoidal de frequência menor que a da senoide original. No caso C a taxa de amostragem é exatamente igual à frequência do sinal de entrada, ou seja, 100 Hz. Neste caso, os valores amostrados são sempre iguais, dando a impressão de que se trata de um sinal contínuo (DC).

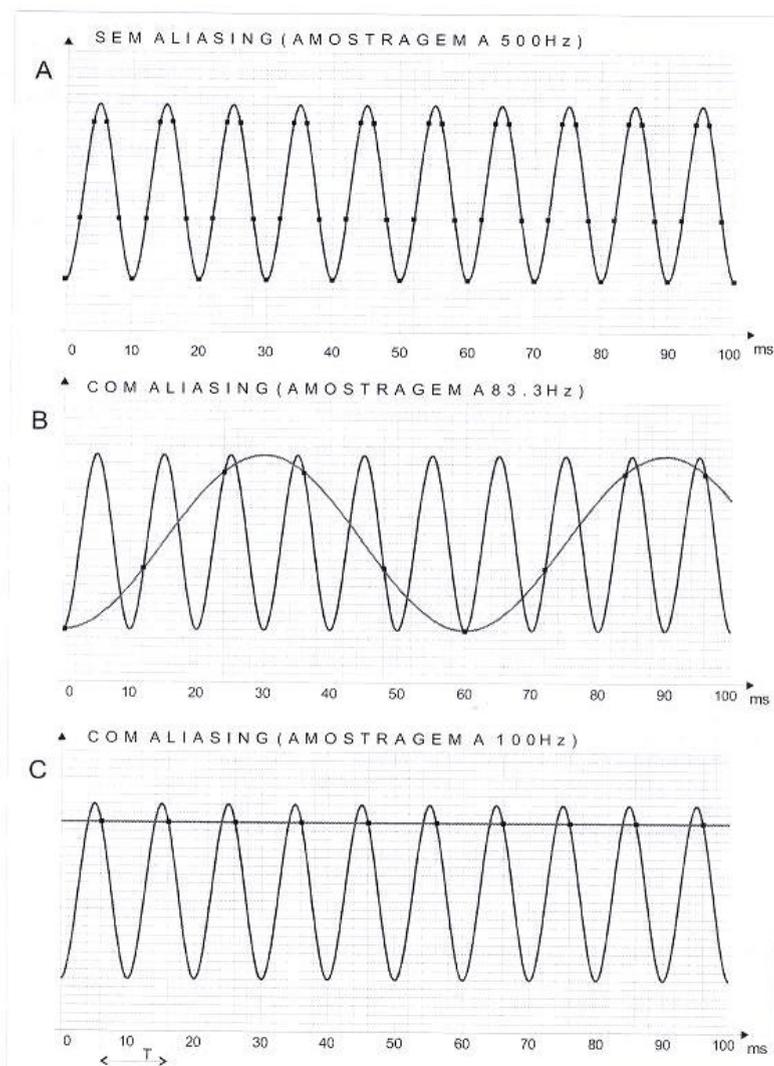


Figura 3.19 – Exemplos de amostragem. (A) sem aliasing, (B e C) com aliasing. Fonte: AqDados, 2003.

Caso não se tenha certeza sobre a frequência mais alta presente no sinal, pode-se elevar a taxa de amostragem. Se frequências altas são inconvenientes pode-se utilizar filtros passa baixa para limitar a banda do sinal de entrada para abaixo da metade da frequência de amostragem utilizada e desta forma evitar a ocorrência de *Aliasing*.

O fenômeno de *Aliasing* pode ser evitado, mas não pode ser corrigido. Se um sinal é adquirido com *Aliasing*, o sinal original não poderá mais ser recuperado.

A tabela 3.2 apresenta alguns exemplos práticos para a escolha da frequência de amostragem.

Tabela 3.2 – Exemplos de Frequência de Amostragem por Aplicação

Aplicação	Banda do Sinal	Frequência de Amostragem
Temperatura em fornos	muito baixa	Menor que 5 Hz
Máquinas rotativas de baixa rotação	100 Hz	1 kHz a 5 kHz
Suspensão de veículos	menor que 20 Hz	200 Hz a 500 Hz
Qualidade de energia elétrica	1800 Hz	6 kHz
Esforços e vibrações em pontes	100 Hz	200 Hz a 500 Hz
Potencial cardíaco (Eletrocardiograma)	80 Hz	200 Hz a 500 Hz
Pressão cardíaca	20 Hz	100 Hz a 300 Hz
Fluxo respiratório	2 Hz	10 Hz

3.4.8 Fatores de Escala

A grandeza física a ser medida é convertida em tensão elétrica (através de um sensor/transdutor) que é então aplicada no conversor A/D que converte o sinal analógico de tensão elétrica em uma informação digital, conforme ilustra a figura 3.20.

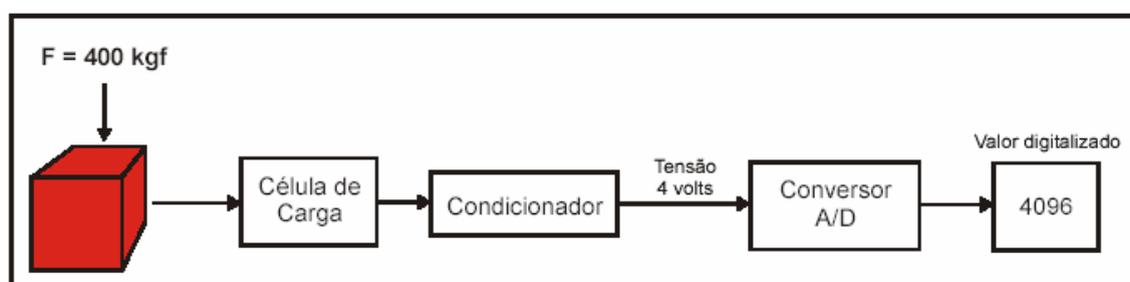


Figura 3.20 – Diagrama de conversão de uma força que é analógica em um registro digital.

Fonte: AqDados, 2003.

O número digital é proporcional à tensão elétrica na entrada do conversor. Conhecendo-se a faixa de entrada e a resolução do conversor A/D, pode-se calcular a tensão elétrica na entrada do conversor a partir do valor digitalizado conforme a figura 3.21.

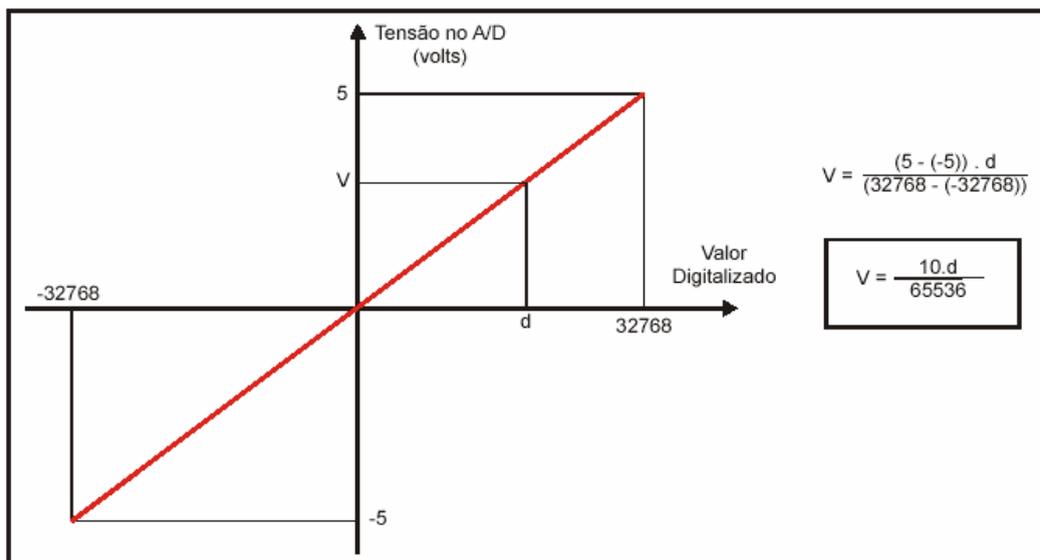


Figura 3.21 – Conversão do registro digital para tensão elétrica. Fonte: AqDados, 2003.

Como a grandeza de interesse, em geral, não é tensão elétrica, a medida da grandeza não pode ser obtida diretamente, sendo necessária efetuar a conversão do dado digitalizado para o valor da grandeza. Quando o sensor utilizado for linear, é possível estabelecer uma relação linear entre o valor da grandeza e o dado digitalizado, conforme a figura 3.22.

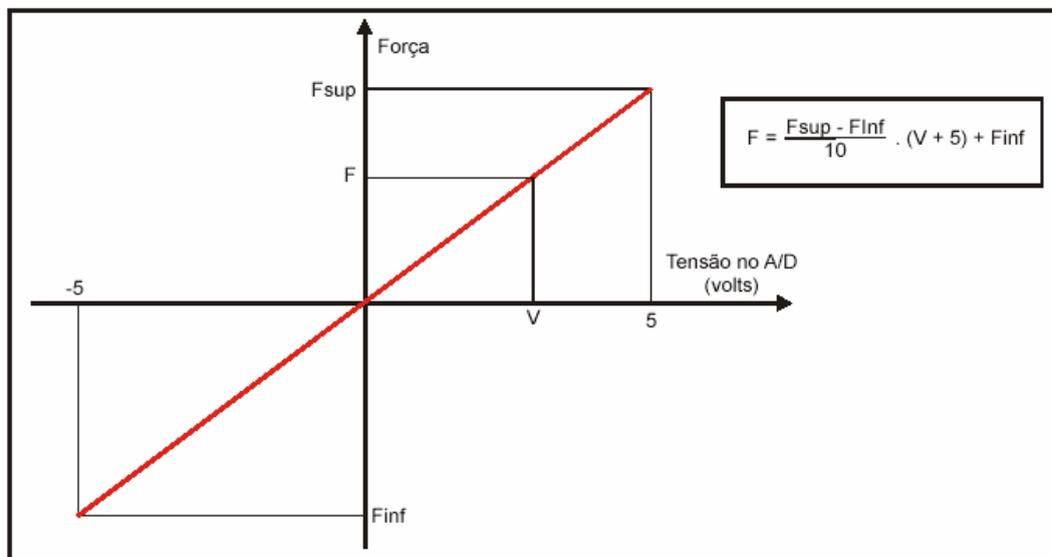


Figura 3.22 – Conversão de tensão elétrica em valores de força. Fonte: AqDados, 2003.

4 PROJETO, CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA OCTOGONAIS.

Godwin, 1975, relata que o sistema de forças atuantes no preparo de solo, onde a falha do solo é simétrica, consiste de duas componentes de forças perpendiculares mutuamente, sendo uma força horizontal F_x e uma força vertical F_z , e o momento M_y no plano dessas duas forças. Baseado na simetria da falha do solo considerou que a força lateral F_y bem como os momentos M_x e M_z são nulos. Utilizando estes conceitos, o autor desenvolveu um transdutor de força em forma de anel octogonal estendido para o estudo de ferramentas de preparo de solo.

Souza & Magalhães, 1989, apresentam um transdutor de força baseado na metodologia de cálculo de Godwin, 1975, e com as estimativas de forças horizontal e vertical de Spoor & Godwin, 1978. Estes também relatam que até aquele momento os trabalhos, desenvolvidos no Brasil, visando a determinação dos esforços atuantes em ferramentas agrícolas utilizavam tradicionalmente transdutores que mediam exclusivamente a força horizontal atuante, onde informações importantes não são obtidas por falta de um transdutor adequado.

4.1 Dimensionamento

Para determinação das dimensões do elemento elástico do transdutor de força, faz-se necessário uma estimativa dos esforços envolvidos. Neste trabalho, determinou-se que as maiores solicitações seriam obtidas ao se medir hastes sulcadoras em semeadoras-adubadoras. Neste tipo de haste, há registros, da engenharia experimental da John Deere Brasil, de forças (valores máximos de pico) maiores que 10 kN.

Observando-se as condições de contorno estabelecidas para o dimensionamento feito por Souza & Magalhães, 1989, verifica-se que este, mesmo tendo sido projetado para hastes escarificadoras, poderia atender as demandas do presente estudo com segurança quanto a eventuais sobrecargas. Assim, para o dimensionamento do transdutor considerou-se uma profundidade de 0,40 m com a condição limite de trabalho da ferramenta. Para valores de força máxima tem-se 19,60 kN para força horizontal, e 7,8 kN para força vertical que representa 40% da força horizontal .

Para utilização do equacionamento proposto por Godwin, 1975, faz-se necessário conhecer previamente o momento de força aplicado. O momento foi determinado baseado numa ferramenta qualquer, conforme a figura 4.1, onde pode-se ver esquematicamente a atuação das forças máximas estabelecidas anteriormente.

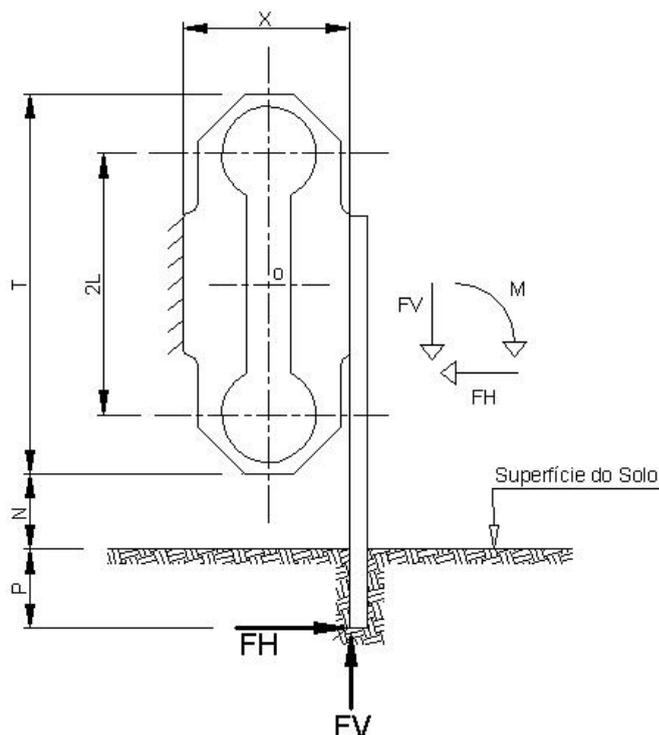


Figura 4.1 – Ferramenta genérica para estimativa de momento aplicado no anel octogonal estendido.

Fonte: Souza & Magalhães, 1989.

Na figura 4.1, foram adotados os seguintes valores numéricos para efetuar o cálculo do momento pela equação 19:

$$T = 300 \text{ mm}$$

$$x = 80 \text{ mm}$$

$$N = 100 \text{ mm}$$

$$P = 400 \text{ mm}$$

e

$$FH = 19,6 \text{ kN}$$

$$FV = 7,8 \text{ kN}$$

tem-se então:

$$M_o = FH\left(N + P + \frac{T}{2}\right) + FV \cdot \frac{x}{2} \quad (19)$$

resultando num valor de momento de: $M_o = 13,05 \text{ kNm}$

Com este valor, utilizando a equação 20, obtêm-se os valores de b e t .

$$\frac{s_e \cdot b \cdot t^2}{M_o \cdot F_s} = y \quad (20)$$

onde $y = 0,40$ para $k = 1,6$
 $0,30$ para $x = 2,4$
 $0,27$ para $x = 3,0$
 $0,21$ para $x = 4,0$

S_e = tensão de escoamento do material

b = largura do anel octogonal

t = espessura do anel octogonal

r = raio médio do anel

M_o = momento aplicado

$k = L/r$

$2L$ = distância entre os centros dos anéis

F_s = fator de segurança

Utilizando a equação 20, e considerando-se $S_e = 1117$ MPa (aço SAE 4340 tratado termicamente) e um fator de segurança $F_s = 2,8$; obtém-se os valores de $b = 90$ mm para largura do anel octogonal estendido e $t = 10,5$ mm para espessura.

Para a largura do rasgo interno foi adotado o valor de 25 mm, formando um vão livre para montagens elétricas. Na altura da saliência adotou-se 5 mm. Esta saliência é uma solução mecânica para que os esforços seja aplicados ao transdutor numa área que não interfira na medida, pois aplicando cargas próximas às extremidades dos anéis, resulta em variações nas medidas. A figura 4.2 apresenta as dimensões geométricas do projeto final do anel octogonal estendido.

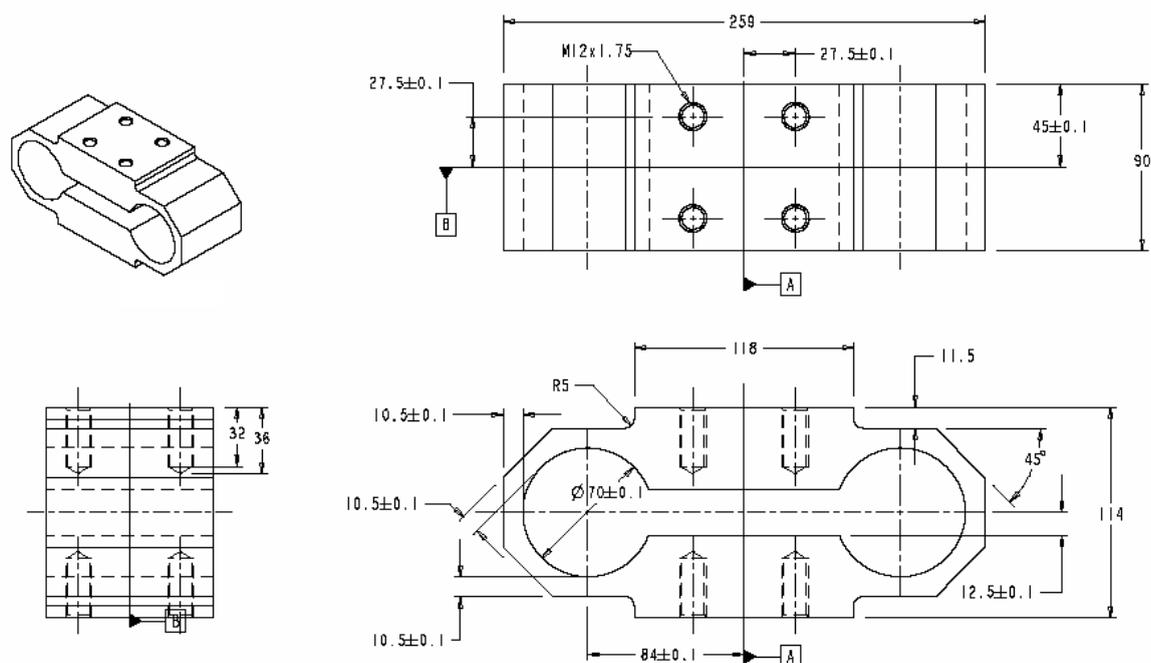


Figura 4.2 – Desenho final do elemento elástico do anel octogonal estendido.

Godwin et al., 1993, Watyotha & Salokhe, 2001, e Muro & Tran, 2004 mostraram uma versão da célula de carga do tipo "anel octogonal estendido duplo", ou seja, além do anel, com maior dimensão na direção vertical, apresenta outro anel octogonal estendido acoplado ao primeiro na direção transversal. Essa configuração, que pode ser vista nas figuras 4.3 e 4.4, permite medir simultaneamente, na geometria octogonal, 3 forças e 2 momentos. Também pode ser medido o terceiro momento (torque no eixo da flange) posicionando-se extensômetros na parte cilíndrica da flange, conforme indicado na figura 4.4.

Partindo do conceito de medir esforços em mais que duas direções com anéis octogonais, propôs-se uma forma de utilização do anel octogonal simples para tal fim. Dessa forma, o elemento elástico do transdutor contém a geometria dos pontos de fixação em posição que permita sua fixação em duas direções sem necessidade de adaptações. Isso se fez distribuindo os furos de fixação de modo que estes formem um quadrado, conforme pode ser visto na figura 4.2.

Como esta geometria não sofre influência considerável pela aplicação de carga em diferentes pontos [Souza & Magalhães, 1989, e Godwin, 1975], a alteração da furação de fixação não deve ter efeito sobre as medições.

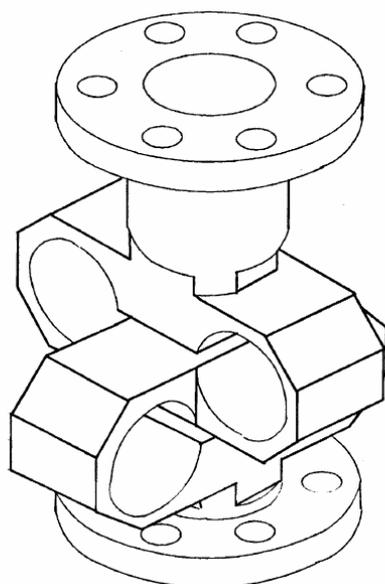


Figura 4.3 – Dinamômetro em forma de “duplo anel octogonal”. Fonte: Muro & Tran, 2004.

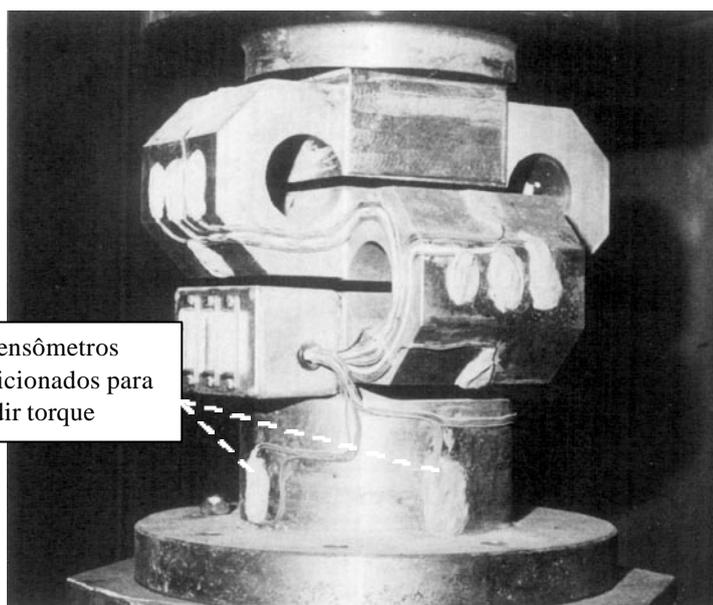


Figura 4.4 – Foto de um Dinamômetro em forma de “duplo anel octogonal” mostrando os extensômetros e a fiação até a caixa de ligação. Fonte: Godwin et al., 1993.

O esquema do posicionamento para colagem dos extensômetros, para montagem das pontes correspondentes às três grandezas medidas neste transdutor, podem ser observados na Figura 4.5.

Os ângulos recomendados são respectivamente de 34° e 90° para as pontes dos canais que medem os esforços nas direções vertical e horizontal, seguindo a orientação da Figura 4.5 [Godwin, 1975, e Souza & Magalhães, 1989].

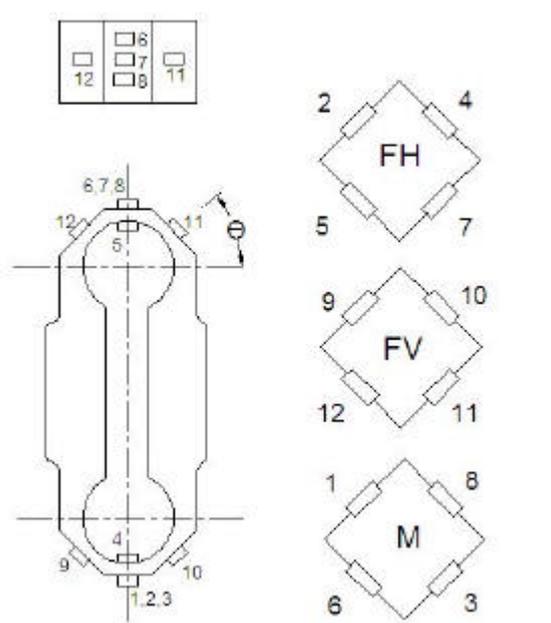


Figura 4.5 - Esquema de posicionamento e ligações elétricas dos extensômetros no elemento elástico. Fonte: Adaptado de Souza & Magalhães, 1989

4.2 Características da célula de carga

A célula de carga da figura 4.2 apresenta as seguintes características estáticas nominais de trabalho: força horizontal máxima de 19,6 kN, força vertical máxima de 7,84 kN e um momento máximo de 13,05 kNm.

4.3 Material Elástico

Para a construção do elemento elástico do transdutor, utilizou-se aço SAE 4340. Após a usinagem, fez-se tratamento térmico, têmpera e revenimento, para que se obtivesse uma dureza final em de 40 HRC, o que corresponde a uma tensão de escoamento em torno de 1117MPa.

4.4 Extensômetros

As células de carga foram instrumentadas com extensômetros de resistência elétrica marca Kyowa, modelo KFG-5-120-C1-11, cujas características estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dos extensômetros elétricos empregados nas células de carga.

Tipo	KFG-5-120-C1-11
Compensação de temperatura	Aço
Comprimento da grade	5 mm
Resistência da grade	$119,8 \pm 0,2 \Omega$
Fator Gage (K)	$2,11 \pm 1,0\%$
Sensibilidade Transversal	0,40%

Fonte: Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. Japão

4.5 Adesivo

Para colagem dos extensômetros no bloco de aço, já usinado e tratado termicamente, utilizou-se um adesivo comercial a base de cianoacrilato – LOCTITE 495/496. Este tem características para uso em temperatura ambiente, o que dispensa a utilização de forno para cura do adesivo.

4.6 Proteção Física da Célula de Carga

Devido ao ambiente agressivo enfrentado durante os testes, foram confeccionadas cápsulas em chapa de aço para proteger os *strain gauges*, a fiação e conexões das células de

carga. Os transdutores trabalham em testes de campo, onde a condição de montagem, muitas vezes, é difícil e pode eventualmente colidir com obstáculos danificando o sensor. A figura 4.6 mostra esta proteção em chapa de aço montada no elemento elástico do transdutor.



Figura 4.6 - Célula de Carga com proteção montada

4.7 Cabos

Foram montados cabos especiais, um para cada célula de carga. Fez-se a ligação de um conector único de engate rápido na extremidade que conecta ao sensor. Este conector contém doze pinos ligando os três canais de cada transdutor. Cada canal contém quatro fios que fazem a ligação da ponte completa.

Na extremidade do cabo, que se conecta ao condicionador de sinais, fez-se a colocação de terminais individuais em cada um dos doze fios para facilitar a ligação destes nos bornes do condicionador. Ainda, fez-se a identificação individual de cada fio através da colocação de código de letras.

A figura 4.7 apresenta o cabo construído. Na figura pode-se observar o conector de engate rápido numa ponta e na outra os fios com terminais individuais para ligação ao condicionador.



Figura 4.7 – Cabo especial, construído para ligação das células de carga octogonais.

4.8 Testes de Laboratório – Calibração dos sensores.

4.8.1 Calibração estática das células de carga octogonais

No processo considerado como calibração definitiva e/ou padrão, utilizou-se uma célula de carga tipo S como referência de padrão secundário, conforme indicado nas figura 4.11, 4.12 e 4.13. Com isso, foi possível uma aquisição simultânea dos valores de força aplicados e da tensão equivalente dos canais das células de carga. Para a aquisição simultânea, utilizaram-se taxas de 100, 30 e 10 amostras por segundo, conforme conveniência para manipulação dos dados. Um maior detalhamento do sistema de aquisição de dados é apresentado no item 5.1. O processo de calibração, determinado como padrão, foi repetido antes de cada ensaio de campo para aferir as características dos transdutores.

4.8.1.1 Pré-calibração

Foram utilizados os seguintes equipamentos para pré-calibração das células de carga octogonais:

- Máquina de Ensaio Universal (Laboratório de Matérias da JDB);
- Suportes de acoplamento;
- Condicionador de sinais Lynx, microcomputador portátil e cabo de rede para conexão do condicionador ao microcomputador;
- Cabos de conexão da célula de carga ao condicionador de sinais.

As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam as montagens utilizadas no processo de pré-calibração, que são, respectivamente, para calibração do canal horizontal, vertical e momento.

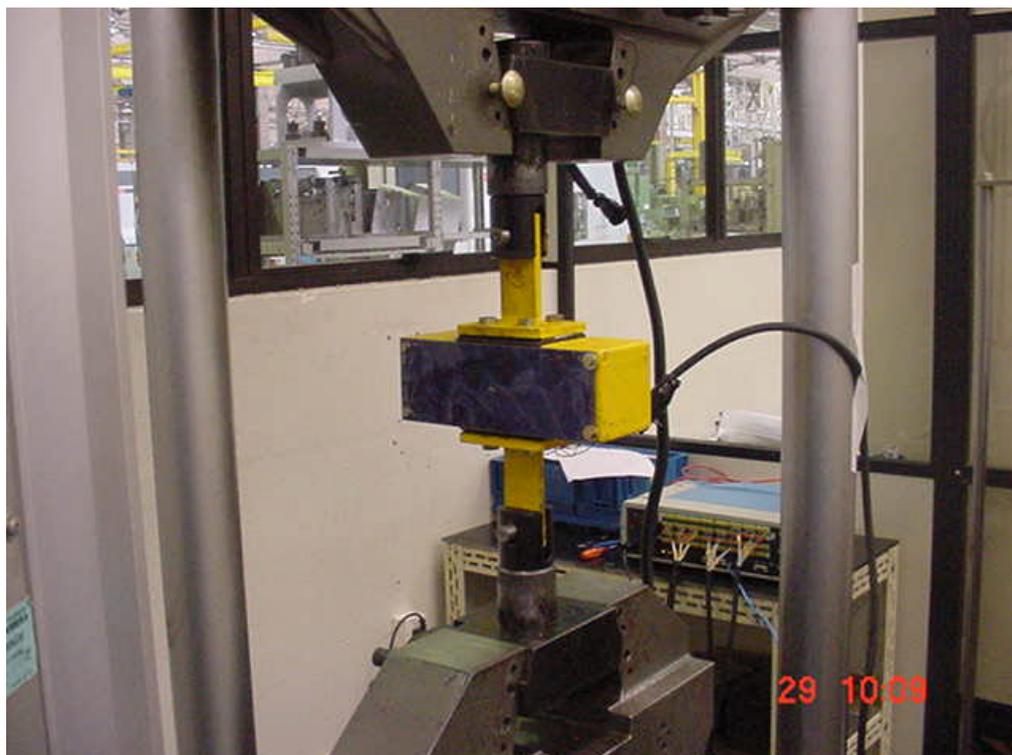


Figura 4.8 – Configuração de montagem em máquina universal de ensaio para calibração do eixo horizontal da célula de carga.



Figura 4.9 - Configuração de montagem em máquina universal de ensaio para calibração do eixo vertical da célula de carga.

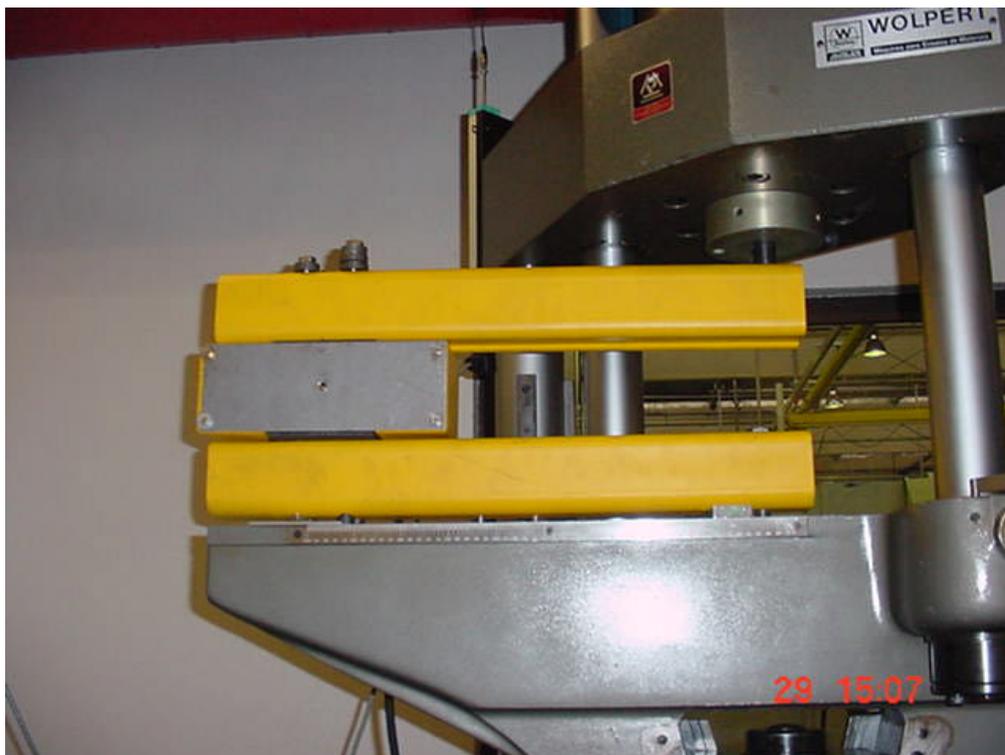


Figura 4.10- Configuração de montagem em máquina universal de ensaio para calibração de momento na célula de carga.

4.8.1.2 Equipamento e dispositivos utilizados na calibração

- Estrutura metálica especial para aplicação dos carregamentos;
- Célula de carga comercial, tipo S, capacidade de 20 kN – padrão secundário;
- Suportes de acoplamento, em aço;
- Condicionador de sinais Lynx, microcomputador e cabo de rede para conexão do condicionador ao microcomputador;
- Cabos de conexão da célula de carga ao condicionador de sinais;
- Cabos de aço para tração;
- Esticador de rosca;
- Parafusos diversos;

4.8.1.3 Procedimento experimental para calibração

Foi utilizado um esticador de rosca para aplicação das cargas à célula de carga. Para medição dos valores aplicados foi utilizada uma célula de carga comercial do tipo “S” com capacidade de 20 kN. Estas montagens podem ser verificadas nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

Na figura 4.11 tem-se o detalhamento da montagem utilizada para calibração do canal horizontal das células de carga.

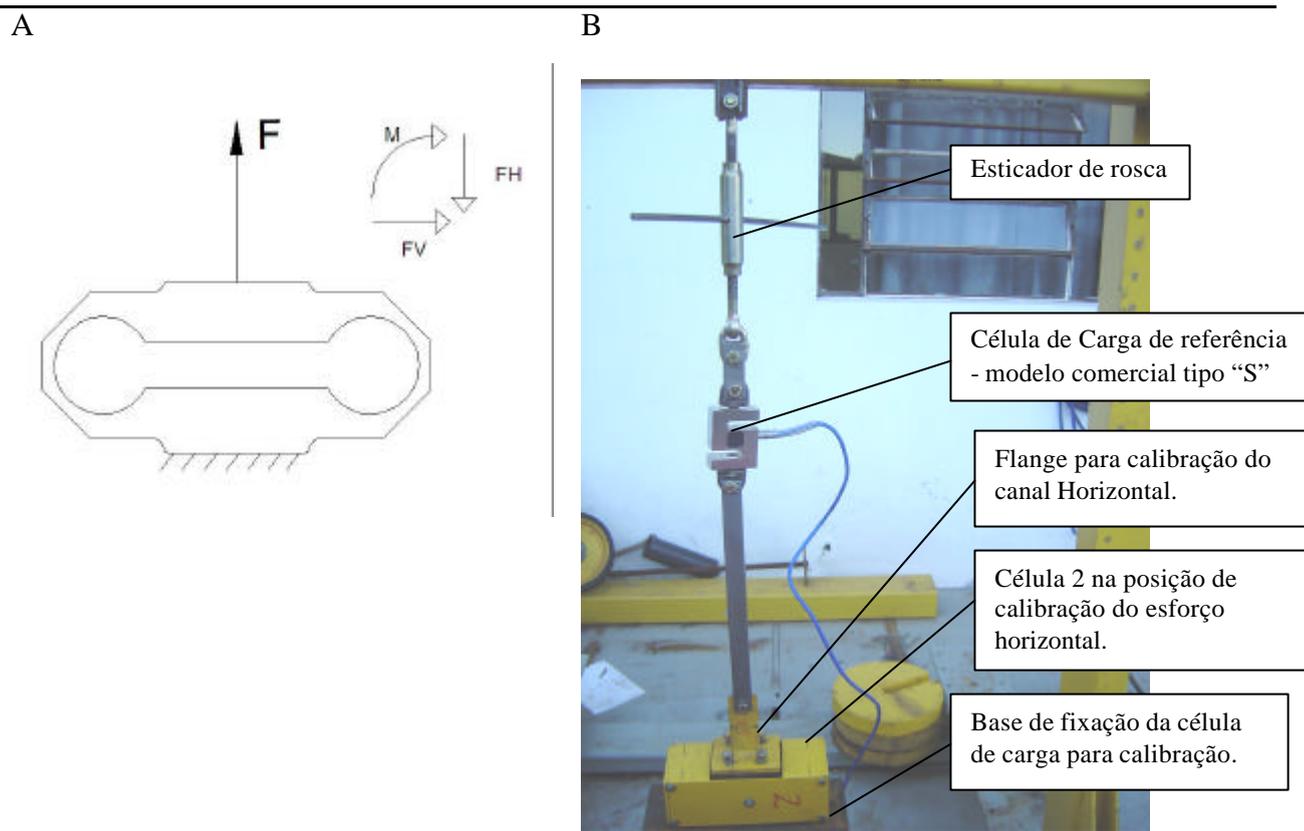


Figura 4.11 – Configuração para calibração do canal que mede o esforço horizontal da célula de carga octogonal. A – esquema teórico; B – foto da montagem executada.

O processo de calibração para cada uma das direções, horizontal e vertical, e momento, nas três células de carga segue as seguintes etapas:

- ligar o sistema para aquecimento e/ou estabilização de temperatura do condicionador de sinal - este deverá estar conectado a célula de carga para que o sistema estabilize;
- ajuste de zero, pelo balanceamento da ponte;
- definir forma de registro: selecionar uma taxa de amostragem ou registrar os valores manualmente de forma discreta.
- verificar o valor de zero que é apresentado na tela de aquisição; este poderá diferir de zero e deverá ser descontado dos valores medidos;
- aplicação de carga até o fundo de escala, e após, descarregar até zero com aquisição simultânea dos dados dos três canais; repetir várias vezes.
- processamento dos arquivos, para que se faça conversão do sinal adquirido, obtendo-se as curvas de ajuste da calibração.

Foram feitas três repetições para cada configuração de calibração. Com os arquivos adquiridos, calculou-se a média dos valores obtidos para cada canal, gerando uma curva de calibração ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

A figura 4.12 apresenta o detalhamento da montagem utilizada para calibração do canal vertical das células de carga.

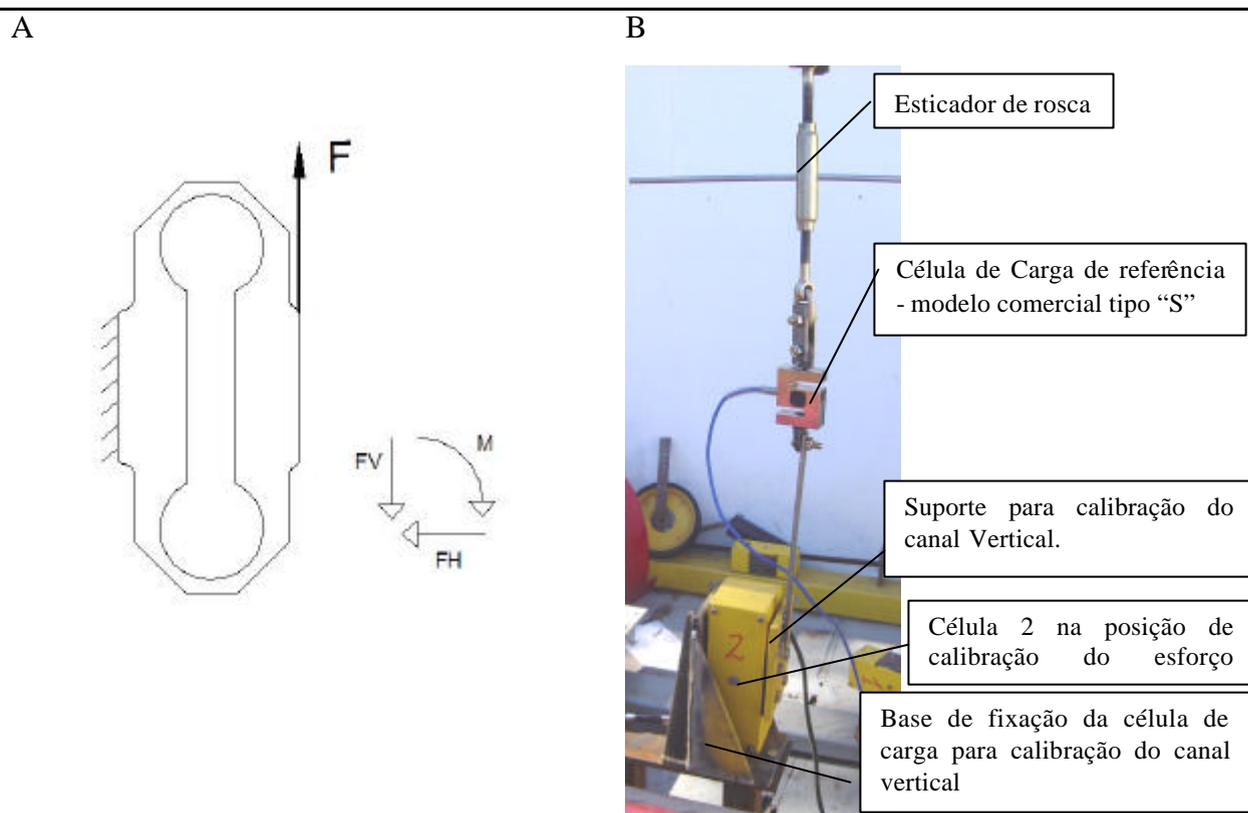


Figura 4.12– Configuração para calibração do canal vertical da célula de carga octogonal. A - esquema teórico; B – foto da montagem executada.

A figura 4.13 apresenta a montagem utilizada para calibração do canal de momento das células de carga. Observa-se que foi realizada uma montagem para geração de um binário de forças para que a estrutura recebesse apenas um esforço de giro fazendo com que o esforço cortante resultante fosse igual a zero.

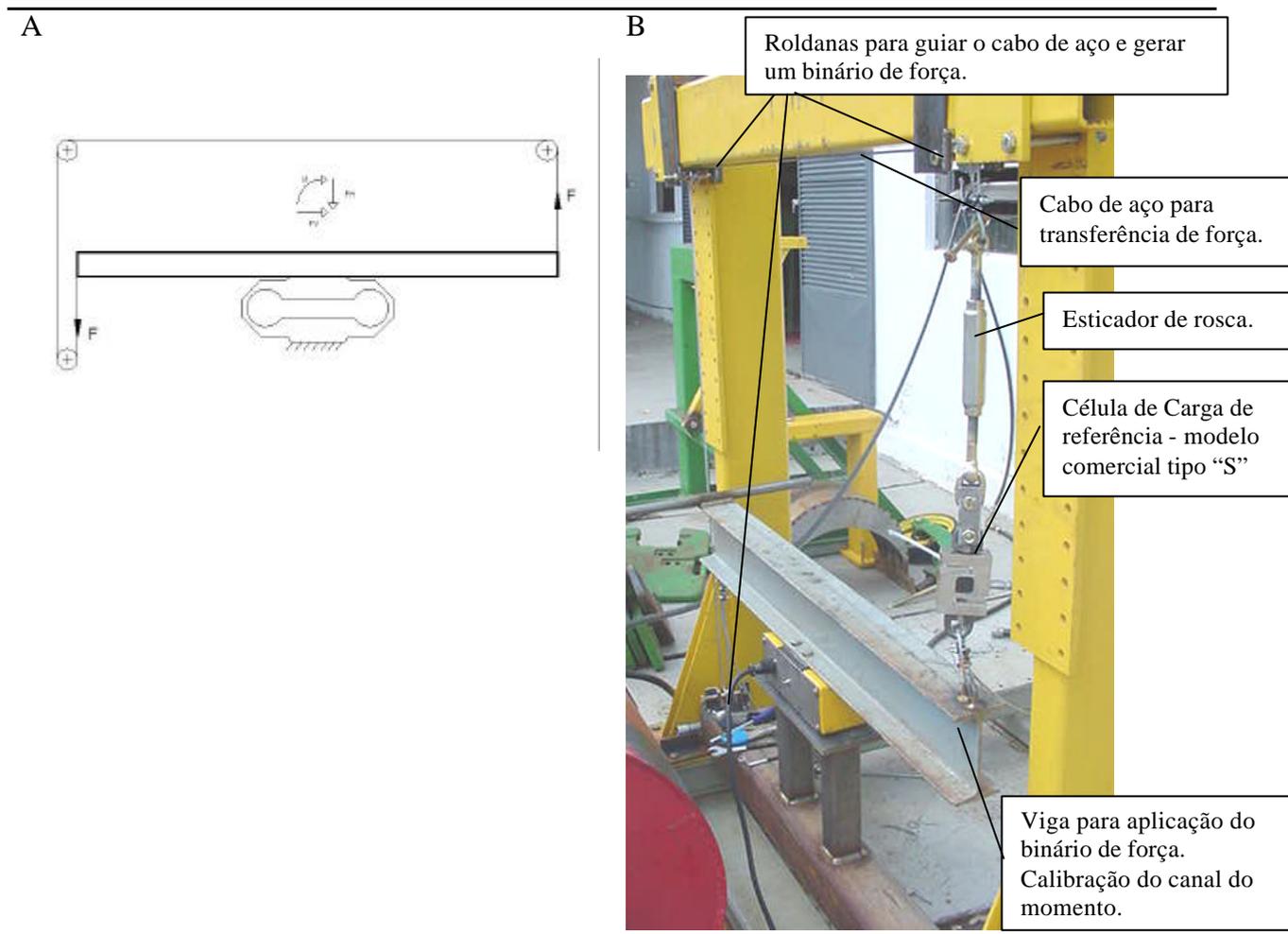


Figura 4.13– Configuração para calibração do canal que mede momento na célula de carga octogonal. A – esquema teórico; B – foto da montagem executada.

4.8.1.4 Amplificação dos sinais de saída das pontes

Os sinais de tensão gerados nas pontes, dos distintos canais das células de carga octogonais, são de uma ordem de grandeza bastante reduzida, valores em μV . Assim, para que se tenha uma melhor representação deste sinal, é necessário a adequação da faixa de tensão de entrada (amplificação ou atenuação), que associado a resolução, informará a faixa de tensão que o conversor A/D representará o sinal. Na tabela 4.2, tem-se os valores de amplificação utilizados para calibração dos respectivos canais das células de carga octogonais.

Tabela 4.2 – Valores de ganho utilizados na amplificação dos sinais de saída de cada ponte das células de carga octogonais para adequação da faixa de tensão de saída do condicionador de sinais.

Canal	Ganho
Horizontal	1000
Vertical	2000
Momento	500

4.8.2 Análise Dinâmica da Célula de Carga Octogonal

A análise dinâmica é realizada com a finalidade de se obter a frequência natural da célula de carga, ou seja, a frequência de vibração que corresponde à rigidez e massa do sistema sob influência de forças. Com a determinação da frequência natural do conjunto é possível localizar a zona onde a função de ganho se comporta como “quase estático”. Dessa maneira, pode-se admitir a linearidade nas medições dinâmicas, uma vez que se trabalhe em frequências distantes das frequências fundamentais do sistema.

4.8.2.1 Procedimento Numérico

Na análise da frequência natural por meio de simulação numérica, utilizou-se o método dos elementos finitos. Neste, foi empregado um elemento tipo sólido de estrutura nodal tetraédrica, com 10 nós por elemento e 3 graus de liberdade por nó (u_x , u_y , u_z). Os valores obtidos numericamente foram respectivamente, para o primeiro e segundo modos de vibração da peça, 710 Hz e 914 Hz.

4.8.2.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental para obtenção da frequência fundamental da célula de carga possibilitou verificar os dois primeiros modos de vibração do transdutor. Esta verificação foi feita pela Transformada Rápida de Fourier – FFT, do software AqDados, da resposta impulsiva gerada por uma massa desconhecida. Fez-se também a aquisição do sinal temporal da resposta da célula ao impulso. Com este registro foi feito, em pós-processamento com o software SAD32-UFRGS, uma segunda análise com a FFT dos valores para avaliação das frequências naturais.

As duas frequências naturais mais baixas do sensor, medidas, foram respectivamente 714 Hz e 910 Hz, vide figura 4.14. O resultado experimental comparado ao de simulação está coerente, validando assim os processos utilizados. Também pode-se observar uma pequena

alteração, na mesma figura, em torno de 60 Hz, que é ruído gerado pela rede elétrica do laboratório.

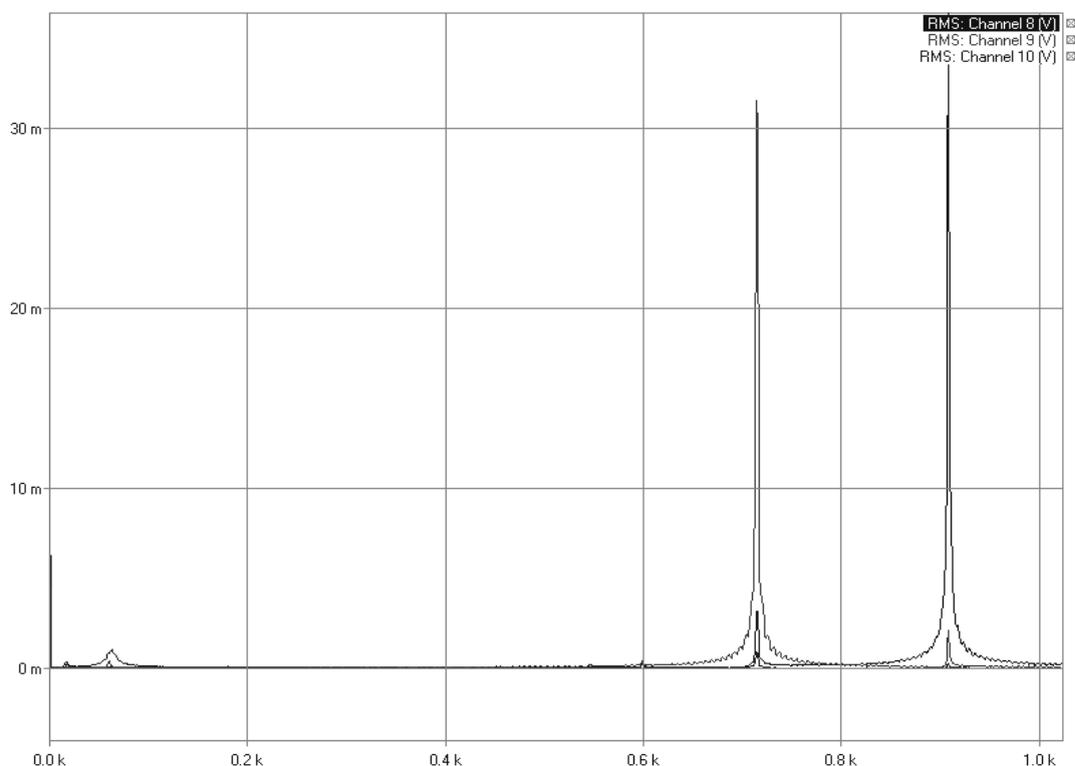


Figura 4.14 – Espectro de frequência da resposta impulsiva da célula de carga. Dados dos três canais da célula de carga sobrepostos no gráfico.

Pode-se estabelecer que este transdutor não terá erros consideráveis nem a necessidade de correção posterior dos dados em função das excitações até uma frequência de 300Hz, ou seja, aproximadamente 40% da primeira frequência fundamental, valor citado como referência para anéis dinamométricos [Doz et al., 1990].

4.9 Resultados de Calibração

Nesta seção são apresentados os resultados das análises feitas com os dados da calibração. As figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam os gráficos típicos obtidos na calibração das células de carga, que são, respectivamente, do canal horizontal, vertical e momento. Como os gráficos das diversas repetições, das três células de carga, apresentaram sempre o mesmo comportamento, optou-se por apresentar apenas um gráfico típico de cada um dos três canais (horizontal, vertical e momento).

No gráfico 4.15, fez-se uma reta tracejada de referência. Esta serve para cálculo de “alinearidade” das células de carga, partindo de (0,0) até o ponto de máxima carga. Observa-se que não é perceptível desvio de linearidade neste exemplo real.

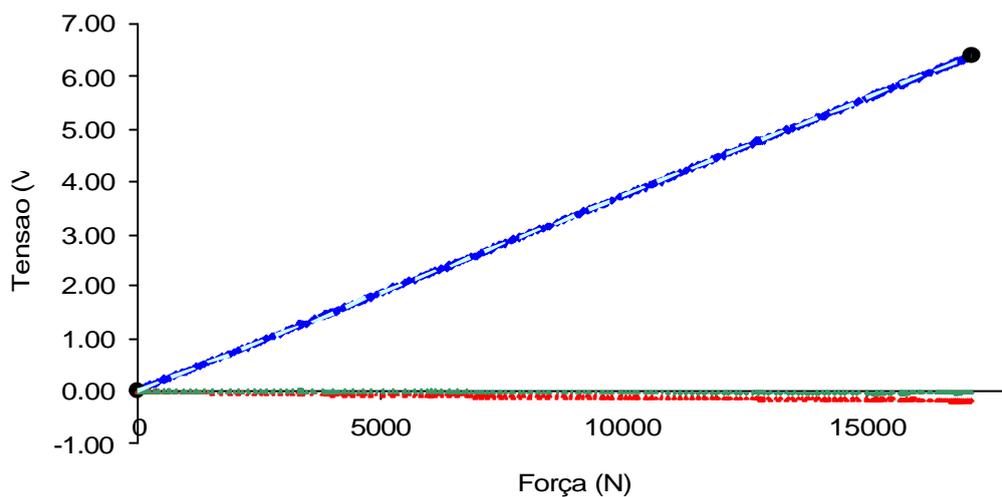


Figura 4.15 – Gráfico característico da calibração do eixo horizontal das células de carga.

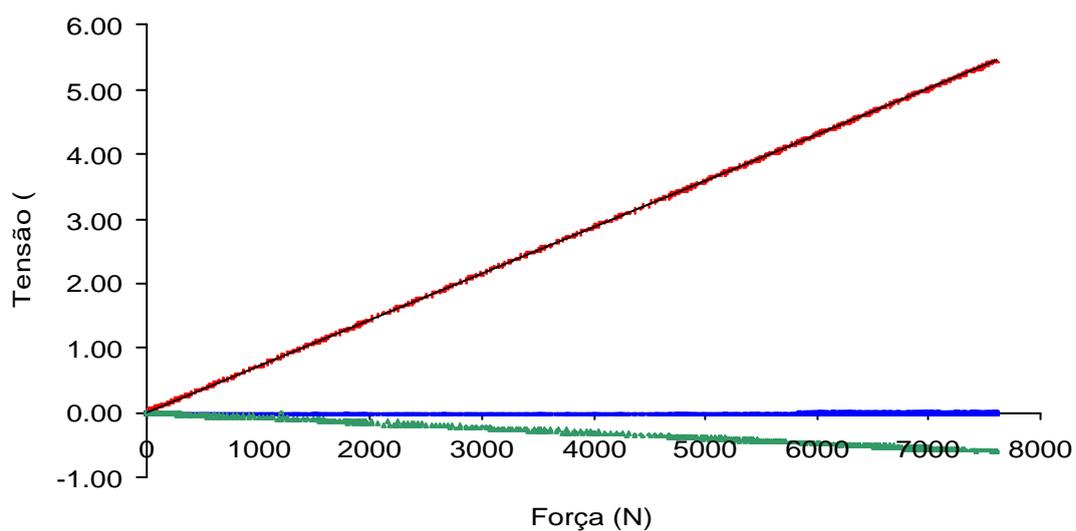


Figura 4.16 – Gráfico característico da calibração do eixo vertical das células de carga.

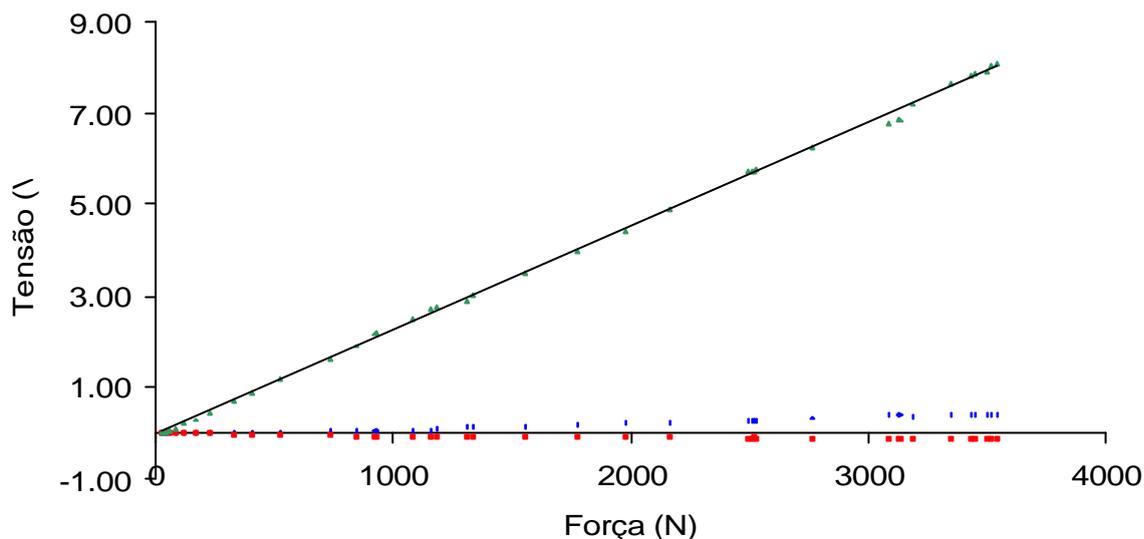


Figura 4.17 – Gráfico característico obtido na calibração de momento.

A partir da análise dos dados registrados na calibração das células, foram geradas curvas, como as apresentadas nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17, de onde foram obtidos os coeficientes angulares de cada canal das células de carga.

A tabela 4.3 apresenta os coeficientes, para conversão de tensão em unidade de força, obtidos para os três canais de cada célula de carga. Estes coeficientes são proporcionais ao ganho utilizado. Assim, para que se utilizem estes coeficientes, devem ser considerados os mesmos valores de ganho, caso contrário, pode ocorrer variação em função da amplificação eletrônica, que pode ter variações particulares a cada canal e cada condição de parâmetro escolhida.

Tabela 4.3– Coeficientes angulares dos respectivos canais das três células de carga octogonais, referentes as curvas de calibração com ganhos de 1000, 2000 e 500 respectivamente para os canais Horizontal, Vertical e Momento.

	Coeficientes Angulares		
	Cel Carga n° 1	Cel Carga n° 2	Cel Carga n° 3
Horizontal	2682,7	2701,5	2753,6
Vertical	1392,7	1374,1	1453,2
Momento	835,7	843,6	856,4

4.9.1 Desvio de Linearidade (Alinearidade)

A tabela 4.4 apresenta os valores de alinearidade calculados para as células de carga octogonais construídas. Verifica-se que os sensores apresentam boa linearidade, pois a maioria dos canais avaliados apresenta desvio de linearidade abaixo de 1%.

Tabela 4.4 – Desvio de linearidade calculado para os dados de calibração, nas respectivas células de carga.

	Alinearidade (%)		
	Célula de Carga n° 1	Célula de Carga n° 2	Célula de Carga n° 3
Horizontal	0,4	1,3	0,9
Vertical	0,5	1,2	2,0
Momento	0,6	0,7	0,7

4.9.2 Histerese

A tabela 4.6 apresenta os valores de histerese das três células de carga e respectivos canais. Verifica-se que a histerese nos transdutores é baixa, ficando na sua maioria em torno de 1%.

Tabela 4.5 – Histerese verificada nas três células de carga octogonais, nos respectivos canais.

Canal	Histerese (%)		
	Célula de Carga n° 1	Célula de Carga n° 2	Célula de Carga n° 3
Horizontal	0,5	1,2	2,3
Vertical	0,5	2,8	5,0
Momento	1,1	0,8	0,8

4.9.3 Repetibilidade

A tabela 4.6 apresenta os valores relativos ao desvio dos valores apresentados ao se repetir a calibração das células de carga. Em geral os valores apresentaram uma imprecisão devida a repetibilidade menor que 2%. Esse valor foi considerado adequado para a finalidade destes transdutores.

Tabela 4.6 – Desvio da repetibilidade apresentada pelas células de carga.

Canal	Desvio da Repetibilidade (%)		
	Célula de Carga n° 1	Célula de Carga n° 2	Célula de Carga n° 3
Horizontal	1,2	1,4	1,2
Vertical	1,1	1,3	1,3
Momento	1,9	2,1	1,9

4.9.4 Interferência

Os valores de interferência entre os diferentes canais de cada célula de carga estão apresentados em valores percentuais na tabela 4.5.

Souza & Magalhães, 1989, apresentam uma interferência máxima da força horizontal na força vertical de 1,3% e a inversa de 0,61%. Os valores apresentados neste trabalho são maiores que os referidos pela bibliografia. Isso pode estar relacionado a imprecisão do posicionamento dos extensômetros bem como a variações nas dimensões do anel em função de usinagem imprecisa.

Tabela 4.7 – Interferências entre canais verificadas na calibração das três células de carga tipo anéis octogonais estendidos.

Célula de Carga n° 1	Interferência (%)		
	Horizontal	Vertical	Momento
Horizontal	100,0	-7,1	-0,6
Vertical	0,1	100,0	-6,3
Momento	5,2	2,1	100,0
Célula de Carga n° 2			
Horizontal	100,0	6,2	-1,7
Vertical	-0,1	100,0	-6,4
Momento	4,0	5,2	100,0
Célula de Carga n° 3			
Horizontal	100,0	10,9	0,5
Vertical	2,2	100,0	4,1
Momento	7,7	8,6	100,0

4.9.5 Análise de Erros

Em resultados de trabalhos experimentais, existem erros provenientes de fatores que influenciam na exatidão de medição, tais como: incerteza do instrumento de medição, metodologia empregada e erros aleatórios. Para atenuar os efeitos desses erros, costuma-se repetir a medida várias vezes e efetuar um tratamento estatístico. O emprego de um método estatístico em um estudo científico aplica-se quando a variabilidade, complexidade ou parcial

desconhecimento das origens do fenômeno comprometem a confiabilidade dos resultados. O resultado obtido pelas técnicas estatísticas permite alcançar uma série de comportamentos gerais frente a casos acidentais ou isolados, com os quais se fabrica um modelo.

Na prática o que em termos gerais se determina é o erro aparente, ou seja, a diferença entre o valor objetivo na medida e o valor mais provável da grandeza física considerada, pois a determinação do erro de uma medida em relação ao verdadeiro valor da grandeza é impraticável. Uma grandeza física experimental deve ser determinada a partir de medição, e o resultado é sempre uma aproximação para o valor verdadeiro da grandeza [Borchardt & Zaro, 1982b].

Segundo Borchardt & Zaro, 1982b, quando o resultado procurado é dependente de medições individuais, o método mais utilizado na bibliografia especializada é o de Kleine e McClintock dado pela equação 21.

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot \Delta_2 \right)^2 + \dots \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Onde: ΔR é a incerteza do resultado, x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis independentes e Δ é a incerteza de cada variável independente.

A tabela 4.8 apresenta os valores das imprecisões dos três canais de cada uma das três células de carga. Nestes valores foram consideradas as incertezas geradas pelo desvio de linearidade, histerese e desvio na repetibilidade. Em geral os valores de imprecisão ficaram abaixo de 3%. Observa-se que nesta tabela não se considerou a interferência entre os canais para calcular a incerteza de cada canal.

Tabela 4.8 – Imprecisão calculada sem levar em conta a interferência entre os canais.

Canal	Imprecisão sem interferência (%)		
	Célula de Carga n° 1	Célula de Carga n° 2	Célula de Carga n° 3
Horizontal	1,3	2,2	2,7
Vertical	1,3	3,3	5,5
Momento	2,3	2,3	2,2

A tabela 4.9 apresenta os valores de imprecisão das células de carga levando-se em conta a interferência entre os canais, além dos fatores já considerados na tabela 4.8. Neste

sentido observa-se um aumento da imprecisão total, porém estes valores estão abaixo de 9%, exceto um canal que apresentou uma imprecisão final em torno de 15%.

Tabela 4.9 – Imprecisão calculada levando em conta a interferência entre os canais.

Canal	Imprecisão com interferência (%)		
	Célula de Carga n° 1	Célula de Carga n° 2	Célula de Carga n° 3
Horizontal	5,4	4,6	8,5
Vertical	7,5	8,7	14,9
Momento	6,7	7,0	4,7

A imprecisão geral ficou abaixo de 10%. Tendo em vista que o desenvolvimento é experimental, considerou-se satisfatório este índice obtido.

5 VALIDAÇÃO DOS TRANSDUTORES – TESTES DE CAMPO.

Neste capítulo está descrito o sistema de aquisição de forma detalhada, composto dos sensores de força e da instrumentação embarcada para executar todos os registros de dados, com suas especificações técnicas e parâmetros utilizados. Na seqüência, também descreve-se individualmente os conjuntos de experimentos desenvolvidos no campo, onde foram utilizados os transdutores de força descritos no item 4. Os testes foram realizados em três configurações distintas que serão descritos em itens específicos.

As áreas utilizadas para a realização dos experimentos são definidas neste trabalho como parcela; local este onde ocorre o deslocamento do conjunto trator/semeadora.

5.1 Instrumentação Embarcada - Sistema de condicionamento de sinal, aquisição, e armazenamento de dados

As aquisições de dados realizadas no desenvolvimento do presente trabalho contaram com um equipamento para o condicionamento de sinais dos sensores e uma unidade de registro. A figura 5.1 apresenta o esquema da configuração utilizada nos trabalhos. As células de carga foram conectadas ao condicionador por meio de cabos especiais, descritos no item 4.7, e por meio destes, fez-se a alimentação e leitura da tensão gerada pelo desbalanço das pontes de Weatstone dos transdutores. Os sinais são amplificados, digitalizados e filtrados nesta unidade de condicionamento, sendo transmitidos a um computador utilizado como unidade de registro.

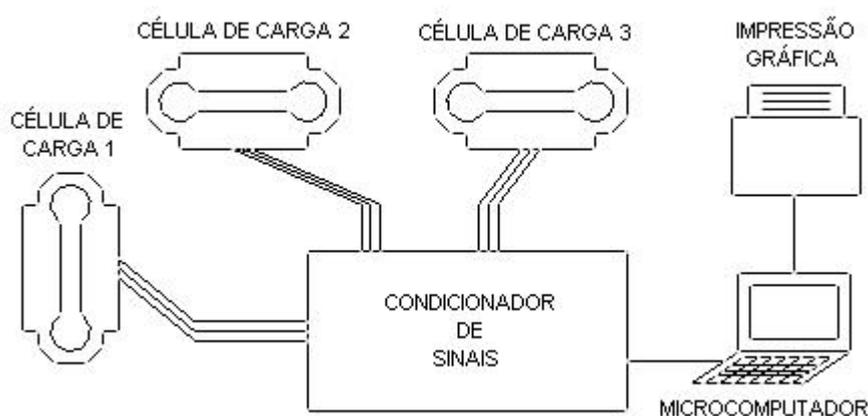


Figura 5.1 – Desenho esquemático do arranjo utilizado para aquisição de sinais.

Na calibração das células de carga, figura 5.2, bem como nos testes de campo utilizou-se o condicionador de sinais da marca Lynx, modelo ADS2000IP, composto por

conversor A/D e controlador AC2122 de 16 bits, condicionador de sinais AI2164 contendo 32 canais de entrada configuráveis por software, figura 5.3. Como unidade de registro, foi utilizado um microcomputador portátil da marca Toshiba, modelo Satellite, processador Intel de 2GHz, 256 MB de memória RAM, capacidade de disco rígido de 30GBytes, figura 5.4. A transmissão dos dados entre o computador e o condicionador de sinais foi feita através de rede Ethernet/IP, sendo possível a utilização do sistema *wireless*. Foram utilizados programas específicos para aquisição de dados (AqDados) e para análise dos mesmos (AqDAnalysis).

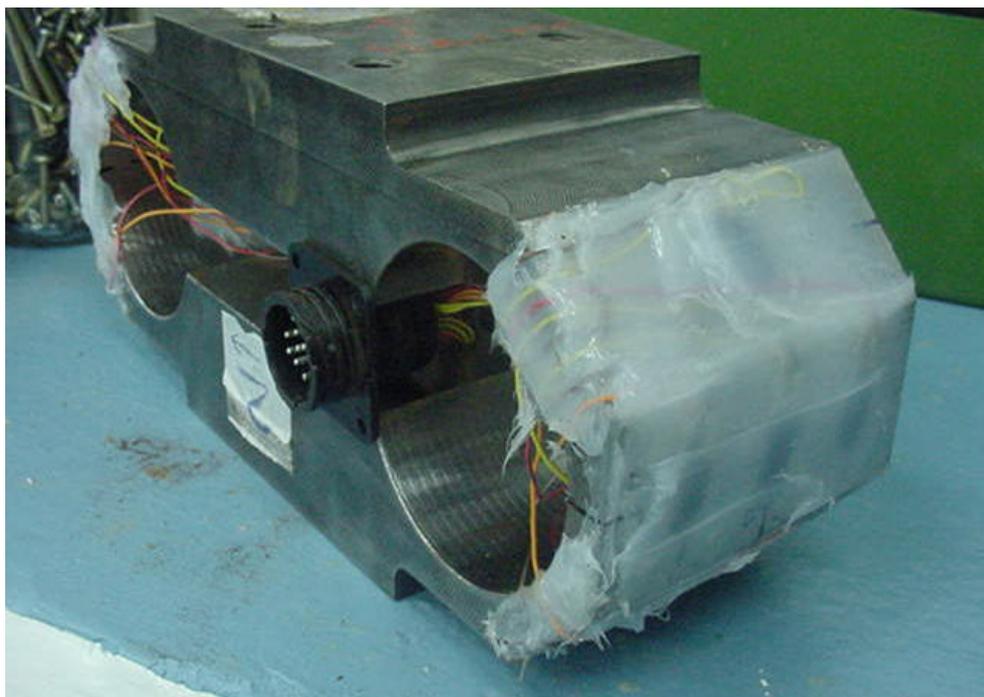


Figura 5.2 – Célula de carga tipo anel octagonal estendido.

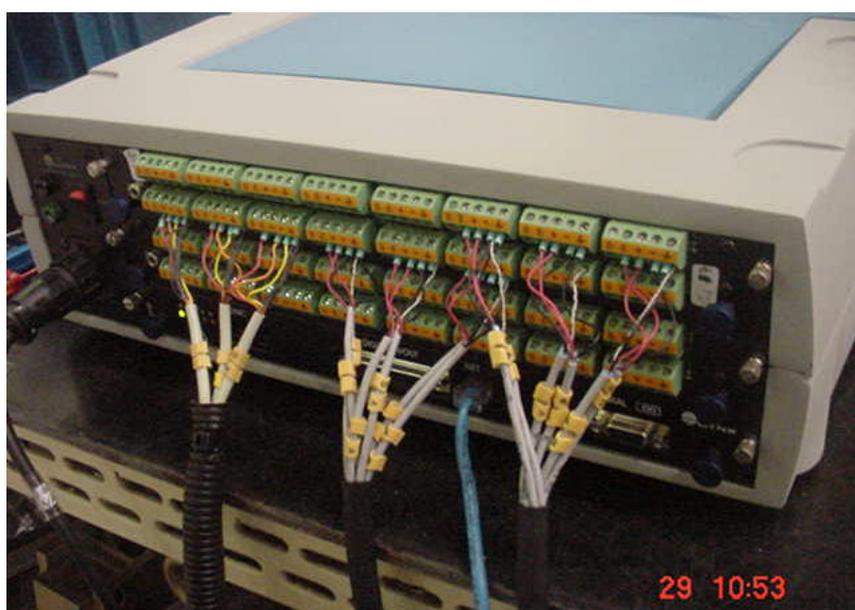


Figura 5.3 - Condicionador de sinais marca Lynx, modelo ADS2000IP.

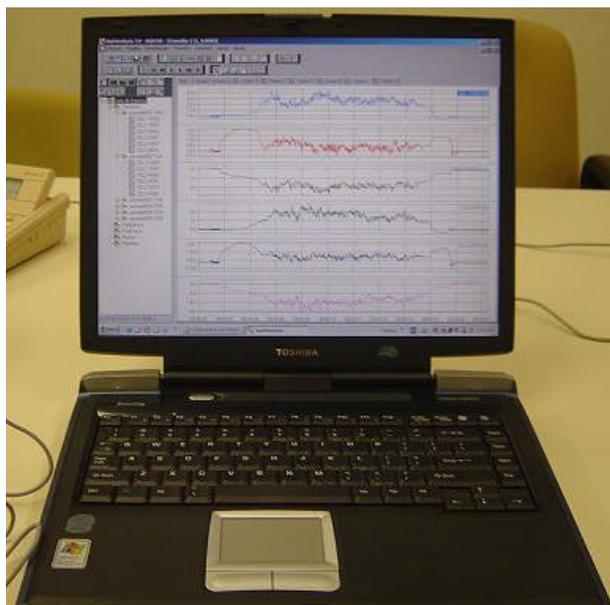


Figura 5.4 – Microcomputador utilizado nas aquisições para calibração e testes de campo.

Para pós-processamento dos dados, utilizou-se o programa Microsoft *Excel* na tabulação, ajuste de curvas e geração de gráficos. O programa SAD32-UFRGS foi utilizado para algumas análises dos dados. Para elaboração dos gráficos utilizou-se o programa *SigmaPlot*.

Como parâmetro, nos testes de campo, utilizou-se uma taxa de aquisição de 200 amostras por segundo. Conforme relatos de especialistas e alguns valores observados na bibliografia, as frequências envolvidas em máquinas agrícolas são baixas, na sua maioria não ultrapassando 30 Hz. Com a taxa de aquisição adotada, foi satisfeito o teorema de Nyquist, evitando efeitos de subamostragem (*Aliasing*) e permitindo análises espectrais dos sinais amostrados.

5.2 Experimento 1 - Linha de semeadora-adubadora (Rio Brilhante - MS)

5.2.1 Localização e caracterização geral da área de teste

O experimento foi realizado numa lavoura de soja localizada no município de Rio Brilhante – MS – Brasil [Latitude 21°32' S; Longitude 54°32' W], em abril de 2004. O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distroférico, de textura muito argilosa (>60% de argila) [Embrapa, 1999]. A semeadura da soja ocorrerá em sistema de preparo convencional (aração e gradagem). No momento dos testes, a área encontrava-se com restos de palha da colheita da soja. O teor de água médio do solo testado foi $6,3 \text{ kg.kg}^{-1}$.

5.2.2 Delineamento Experimental

A demarcação da área de testes permitiu a realização de três repetições para cada configuração de teste, sendo a ordem definida por sorteio, configurando um Experimento Inteiramente Casualizado. Os valores dos esforços foram processados e feitas as médias (média aritmética) das diferentes configurações testadas.

5.2.3 Máquinas e equipamentos para execução dos ensaios no campo

- **Trator marca John Deere, modelo 7810**, tração 4x2 com TDA, potência máxima do motor de 126,8 kW (170cv). Durante os testes a TDA esteve acionada. O trator possuía sistema de monitoramento por GPS capaz de informar a velocidade de deslocamento real, distância percorrida, tempo de trabalho, entre outras funções não relevantes para este trabalho.
- **Semeadora-adubadora de precisão**, marca John Deere, 13 linhas com a seguinte configuração:
 - distância entre linhas de 0,45 m
 - discos de corte de palha do tipo liso, com diâmetro de 0,508 m (20")
 - sulcadores para distribuição de adubo do tipo facão com ângulo de ataque de 25°/45° e largura máxima de 0,015 m na ponteira
 - sulcadores para distribuição de semente do tipo discos duplos, com diâmetros de 0,381 m (15")
 - rodas compactadoras duplas, instaladas ao final de cada linha de semeadura
 - sistema de dosagem de sementes à vácuo.

Durante os testes a semeadora-adubadora operou com os reservatórios de semente e adubo vazios.

- **Flanges**, para adaptação/fixação da célula de carga ao chassi da semeadora-adubadora;
- **Trena métrica**, de 50 m;
- **Cronômetro Digital**;
- **Penetrômetro analógico**, marca Stara, cone com ângulo de 60°;
- **Três células de carga-UFRGS** do tipo anel octogonal estendido, construídas neste trabalho;

5.2.4 Configurações experimentais

Os testes para avaliação de esforços na semeadora-adubadora de 13 linhas foram executados com diferentes configurações de montagem das células de carga. Em cada uma

destas configurações, foram utilizados e combinados diversos conjuntos de parâmetros operacionais distintos, os quais estão descritos nos subitens a seguir.

5.2.4.1 Operação de semeadura em deslocamento retilíneo

Nos experimentos de deslocamento retilíneo, caracterizado como condição normal de trabalho, foram instalados os três anéis octogonais estendidos numa das linhas de plantio, localizada na lateral externa, da semeadora-adubadora de teste. Estas foram montadas, em três distintas partes da máquina, a fim de realizar diferentes medidas de esforços, conforme mostrado na figura 5.5. A célula de carga 1 foi montada com o objetivo de avaliar os esforços na haste sulcadora. A célula de carga 2 foi posicionada para avaliação dos esforços no disco de corte. Já a célula de carga 3, foi montada para avaliação dos esforços no sistema de semeadura, que tem como elementos ativos em contato com o solo o sulcador de sementes de disco duplo e as rodas compactadoras. As três células de carga foram montadas para avaliar o esforço de tração ou horizontal, o esforço vertical e o momento associado a estes esforços em cada uma das três partes.



Figura 5.5 – Disposição das três células de carga para avaliação de três distintas funções da semeadora-adubadora.

Os testes foram executados em três diferentes profundidades nominais, de trabalho, da haste sulcadora de adubo: $P1 = 8 \text{ cm}$, $P2 = 13 \text{ cm}$ e $P3 = 18 \text{ cm}$. Foram utilizadas três velocidades de deslocamento: $V1 = 6 \text{ km.h}^{-1}$, $V2 = 8 \text{ km.h}^{-1}$ e $V3 = 10 \text{ km.h}^{-1}$. A profundidade de trabalho da haste sulcadora foi regulada através das rodas calibradoras. As dimensões das parcelas experimentais foram de 50 m de comprimento por 7 m de largura, permitindo a passagem da semeadora-adubadora.

5.2.4.2 Comparativo de esforço da haste sulcadora medida em dois pontos distintos

Conforme figura 5.6, montou-se uma configuração com duas células de carga para avaliar os esforços da haste sulcadora. Estas estavam dispostas em dois pontos de referência distintos: o primeiro ponto, com a célula de carga 1, junto a haste sulcadora, já o segundo, com a célula de carga 3, junto ao chassi onde o sistema articulado da haste está engastado. A célula de carga 2 foi posicionada para avaliação dos esforços produzidos pelo disco de corte de palha.

Esta avaliação em dois pontos distintos, dos esforços produzidos pelo mesmo elemento ativo, possibilitou a avaliação de uma possível correlação entre os esforços medidos nos diferentes pontos. Dessa forma, se os valores tem boa correlação, pode-se estabelecer que é indiferente o ponto de referência da medida, podendo ser utilizado aquele que for mais conveniente para montagem.

A velocidade de deslocamento neste teste foi fixada em 8 km.h^{-1} . A profundidade nominal da haste sulcadora do adubo nesta configuração foi de 16 cm. Foram obtidos os valores médios de três repetições.

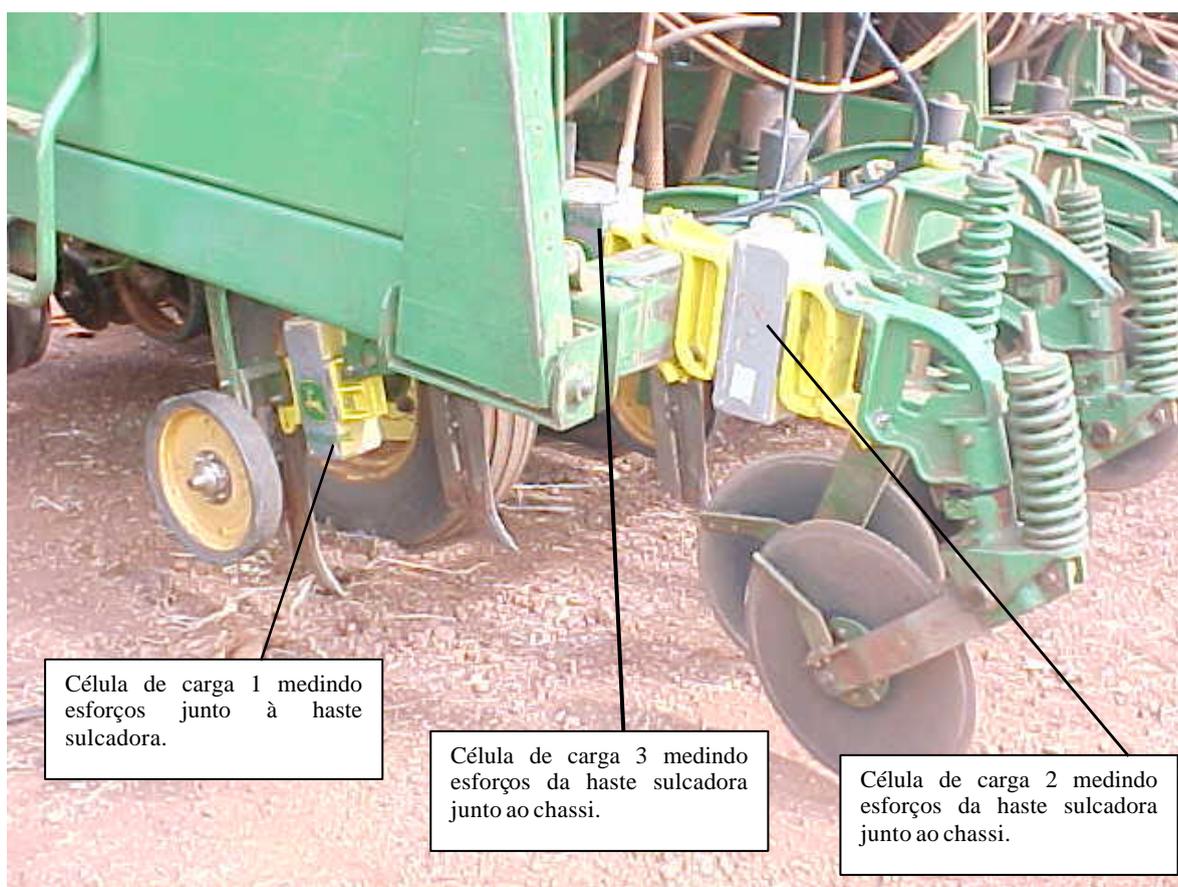


Figura 5.6 – Disposição de três células de carga. Uma medindo esforços no disco de corte, outras duas na haste sulcadora, sendo uma junto ao chassi e outra diretamente na haste.

5.2.4.3 Avaliação dos esforços nas hastes sulcadoras de distribuição de adubo em manobras

As semeadoras-adubadoras, além da operação em linha reta, também necessitam operações em condições não regulares, que são as manobras. As manobras que ocorrem freqüentemente nas lavouras são o deslocamento curvilíneo e a transposição de terraços, ainda assim, as semeadoras devem manter a uniformidade das operações de abertura do sulco e distribuição de adubo e sementes.

Para avaliação dos esforços que surgem nestas manobras, foram instaladas as três células de carga junto às hastes sulcadoras em três linhas distintas: uma em cada linha externa e outra na linha central da máquina, conforme diagrama da figura 5.7.

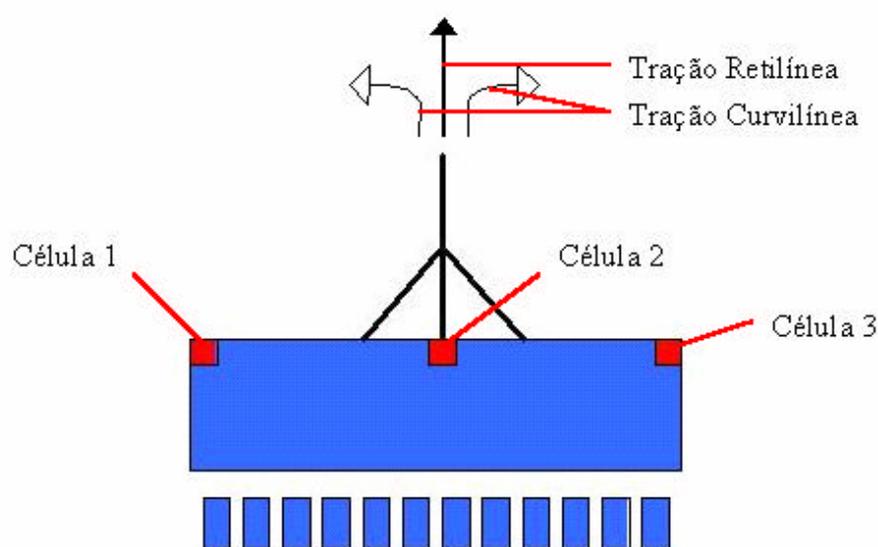


Figura 5.7 – Diagrama do posicionamento das células de carga na semeadora-adubadora para avaliação dos esforços gerados na haste sulcadora do adubo.

Neste posicionamento, mostrado na figura 5.7, as células de carga foram montadas em duas orientações distintas, conforme mostram as figuras 5.8 e 5.9. A primeira orientação, posição vertical da célula, conforme a figura 5.8, permitiu a medição, na haste sulcadora de adubo, dos esforços horizontal, vertical e o momento associado aos mesmos. A segunda orientação, que foi a transversal, conforme a figura 5.9, permitiu a medição do esforço transversal ao deslocamento da haste sulcadora, além do esforço horizontal e o momento associado a estes dois esforços.



Figura 5.8 – Célula de carga montada na orientação Vertical

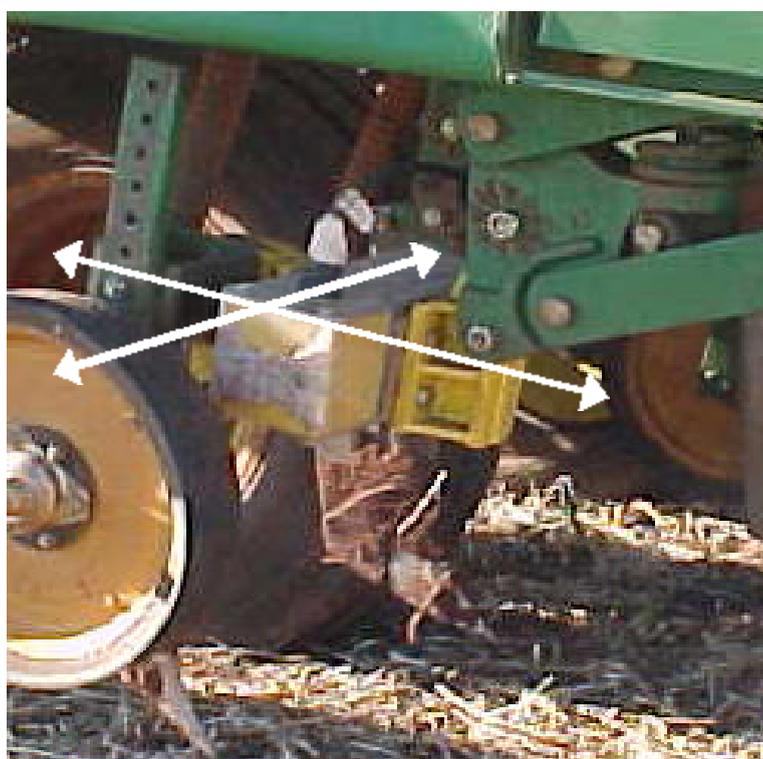


Figura 5.9 - Célula de carga montada na orientação Transversal

Nestas duas configurações de montagem, com as três células de carga montadas na orientação vertical e depois as três células de carga na orientação transversal, foram realizadas

operações de semeadura sobre terraço e semeadura em deslocamento curvilíneo. Para cada configuração foram realizadas 3 medidas.

A primeira manobra foi a operação de cruzar o terraço a 45° de sua orientação principal, conforme a figura 5.10. O terraço onde foram feitos os testes apresentava as seguintes características: largura de 6,5 m, altura de 0,40 m, resistência à penetração foi de 4374 kPa ($44,6 \text{ kgf/cm}^2$) na profundidade de 0 a 0,25 m (média de 10 medidas).

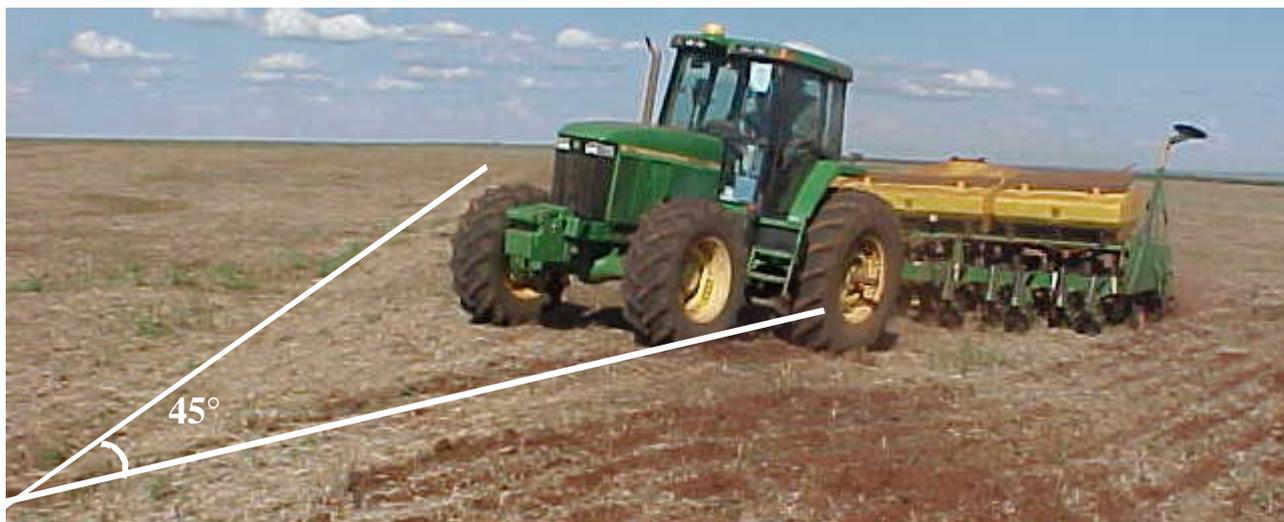


Figura 5.10 – Manobra de semeadura atravessando um terraço típico a 45° de sua orientação principal.

A segunda manobra realizada foi a operação de semeadura em curva, conforme a figura 5.11. Nesta etapa foram realizados testes com dois raios de curvatura: no primeiro fez-se com que o marcador da semeadora-adubadora ficasse posicionado no centro de giro da curva, conforme figura 5.11., resultando num raio de 9 m, do centro até o sulco mais externo. O segundo teste em curva, foi utilizado um raio de giro de 15 m até o sulco mais externo.

A área onde foram feitas as medidas em operação de semeadura em curva, apresentou resistência à penetração de 4638 kPa ($47,3 \text{ kgf/cm}^2$), sendo este um valor médio dos valores máximos obtidos em cada penetração (média de 18 medidas). Os valores máximos foram verificados em profundidades próximas a 15 cm, evidenciando o efeito do preparo convencional utilizado na semeadura anterior.

A velocidade de deslocamento neste teste foi fixada em 8 km.h^{-1} para transposição do terraço e $3,5 \text{ km.h}^{-1}$ para deslocamento curvilíneo. A profundidade nominal das hastas sulcadoras de adubo nesta configuração foi de 16 cm. Foram obtidos os valores médios de três repetições



Figura 5.11 – Manobra de semeadura em curva

5.2.4.4 Avaliação de esforços nos discos de corte da palha em manobras

Similar ao procedimento do item anterior, nesta etapa foram utilizadas três células de carga para avaliação dos esforços nos discos de corte. Estas foram posicionadas em discos de corte localizados nas duas linhas externas e num terceiro disco de corte, situado numa posição intermediária entre a linha central e a linha externa direita da semeadora-adubadora, conforme diagrama da figura 5.12. Esta posição intermediária ocorreu devido a impossibilidade de montagem na posição central. A orientação das células de carga permitiu avaliar os esforços nos eixos vertical e horizontal (sentido de deslocamento da máquina), conforme mostra a figura 5.13.

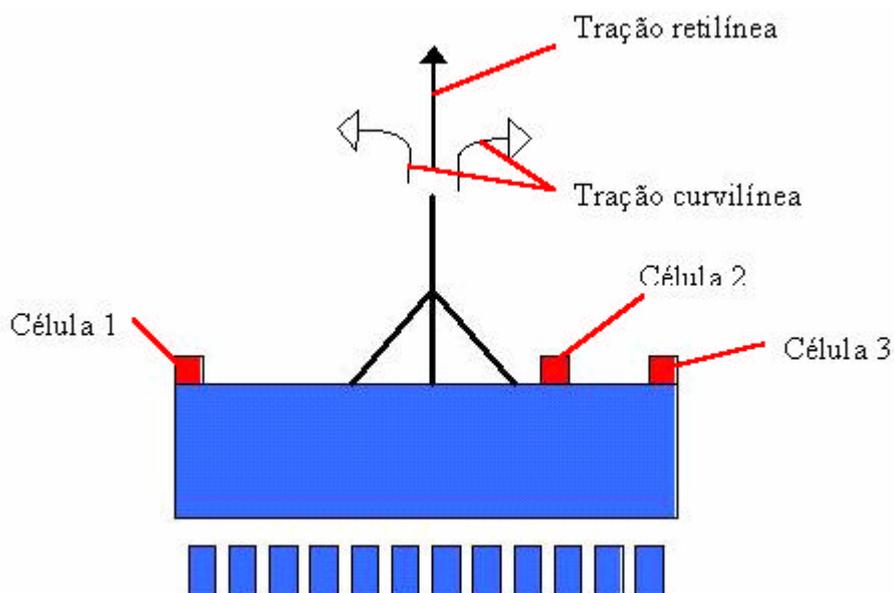


Figura 5.12 - Diagrama do posicionamento das células de carga octogonais na semeadora-adubadora para avaliação dos esforços no sistema do disco de corte de palha.



Figura 5.13 – Posicionamento das células de carga octogonais para avaliação dos esforços em 3 discos de corte.

O esforço transversal nos discos de corte não foi avaliado nesta etapa dos trabalhos, uma vez que o movimento de rotação, do suporte do disco de corte, ocorre de forma parcial, podendo atenuar possíveis carregamentos assimétricos.

Com essa configuração de montagem das células de carga, foram feitas operações de semeadura sobre terraço, cruzando este a 45° de sua orientação principal e semeando em curva em dois raios de curvatura, 9 m e 15 m. Foram realizadas três repetições em cada condição, totalizando 9 aquisições na avaliação dos discos de corte.

A velocidade de deslocamento neste teste foi fixada em 8 km.h⁻¹ para transposição do terraço e 3,5 km.h⁻¹ para deslocamento curvilíneo. A profundidade nominal das hastes sulcadoras de adubo nesta configuração foi de 16 cm. Foram obtidos os valores médios de três repetições.

5.3 Experimento 2 – Testes com um chassi porta ferramentas acoplado aos três pontos (Horizontina – RS)

5.3.1 Localização e caracterização geral da área de teste

O experimento foi realizado numa lavoura localizada no município de Horizontina - RS – Brasil [Latitude 27°37' S; Longitude 57°18' W], em julho de 2004. O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distroférico, de textura muito argilosa (>56% de argila) [Streck, 2002] Análise de laboratório – Apêndice D. Sua utilização é, basicamente, para o cultivo de soja, em sistema de semeadura direta. No momento dos testes, a área encontrava-se com restos de palha da colheita da soja.

5.3.2 Máquinas e equipamentos para condução dos ensaios no campo

- **Trator marca John Deere, modelo 7500**, tração 4x2 com TDA, potência máxima do motor de 104,4 kW (140cv). Durante os testes operou com a TDA acionada. Fez-se a seleção de marcha e rotação do motor que imprimisse uma velocidade de 8 km.h⁻¹.
- **Chassi especial de teste**, com acoplamento aos três pontos do trator, conforme mostrado na figura 5.14. Este foi construído de forma a permitir a realização de teste com mais rapidez, propiciando facilidade de transporte e montagem para testes com hastes sulcadoras. Neste foram montadas duas linhas para teste, compostas de sulcadores de adubo e disco de corte de palha lisos, com diâmetro de 0,508 m (20”), espaçados de 45 cm.

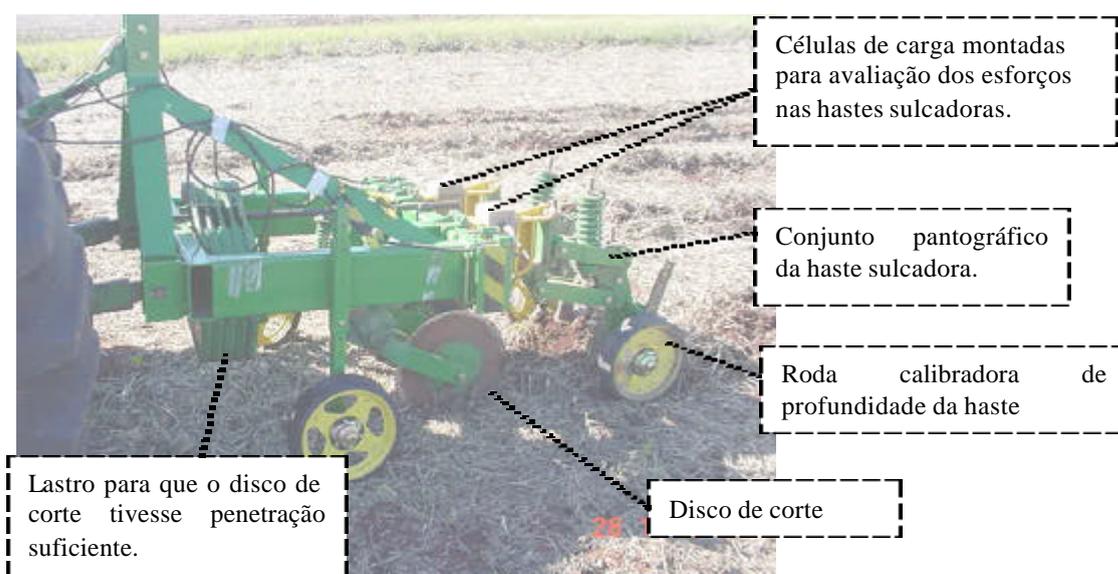


Figura 5.14 – Chassi especial de testes com disco de corte de palha e hastes sulcadoras de adubo acoplado aos três pontos do trator.

- **Sulcadores de adubo do tipo facão.** Um modelo com ângulo de ataque de 25° e largura máxima de 15mm na ponteira, e outro com ângulo de ataque de 36° e largura máxima da ponteira de 22mm;
- **Flanges**, para adaptação/fixação da Célula de Carga ao chassi de testes;
- **Trena métrica;**
- **Cronômetro Digital;**
- **Penetrômetro analógico**, da marca Stara, cone com ângulo de 60°;
- **Três Células de Carga (UFRGS)** do tipo Anel Octogonal Estendido, construídas neste trabalho;
- **Inversor DC/AC**, entrada 12Vdc, saída 110/220Vac, 60Hz, 300Watts;

5.3.3 Configuração experimental

5.3.3.1 Avaliação de esforços em sulcadores de adubo tipo facão

O chassi de engate nos três pontos foi utilizado para efetuar o comparativo entre dois modelos de hastes. Estes modelos trabalharam com parâmetros distintos. Um modelo com ângulo de ataque entre 25° e largura máxima de 15 mm na ponteira, e outro com ângulo de ataque de 36° e largura máxima da ponteira de 22 mm. As hastes trabalharam com os respectivos tubos de adubo montados. Esta montagem pode ser verificada na figura 5.14.

Para este teste foram utilizados os seguintes parâmetros: três diferentes profundidades nominais: 10 cm, 15 cm e 20 cm e a velocidade de deslocamento nominal foi de 8 km.h⁻¹. A pressão nas molas dos discos de corte da palha foram mantidas fixas na regulação mínima.

5.3.4 Delineamento Experimental

Foram executadas três repetições em cada parâmetro testado. Cada modelo de haste testado foi avaliado em duas posições de montagem, com diferentes células de carga, conforme a figura 5.14. A ordem das parcelas foi definida por sorteio, configurando um Experimento Inteiramente Casualizado. Os valores dos esforços foram processados e feitas as médias (média aritmética) das diferentes configurações testadas.

5.4 Experimento 3 – Chassi com sete linhas acoplado na barra de tração (Horizontal – RS)

5.4.1 Localização e caracterização geral da área de teste

O experimento foi realizado numa lavoura localizada no município de Horizontina - RS – Brasil [Latitude 27°37' S; Longitude 57°18' W], em outubro de 2004. O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distroférico, de textura muito argilosa (>56% de argila) [Streck, 2002, Análise de laboratório – Apêndice D]. Utilizado, basicamente, para o cultivo de soja, em sistema de semeadura direta. No momento dos testes, a área encontrava-se com restos de palha da colheita da soja.

5.4.2 Máquinas e equipamentos para condução dos ensaios no campo

- **Trator marca John Deere, modelo 6420 e 7810**, tração 4x2 com TDA, potência máxima do motor de 82kW (110cv) e 126,8 kW (170cv) respectivamente. Durante os testes operou com a TDA acionada. Fez-se a seleção de marcha e rotação do motor que imprimisse uma velocidade de 8 km.h⁻¹;
- **Chassi de semeadora-adubadora**, com sistema de levante hidráulico no rodado do chassi e acoplamento na barra de tração do trator, com montagem apenas do disco de corte de palha com diâmetro de 0,508 m (20”) e sistema sulcador de adubo. O chassi possui dimensões que permitiram a montagem de 7 linhas espaçadas de 45 cm, conforme pode ser visto na figura 5.15;



Figura 5.15 – Chassi de semeadora-adubadora adaptado para testes.

- **Sulcadores de adubo do tipo facão.** Um modelo com regulagem do ângulo de ataque entre 25° ou 45° e largura máxima de 16mm na ponteira, e outro com regulagem do ângulo de ataque de 25° ou 36° ou 45° e largura máxima da ponteira de 22mm;
- **Sulcadores de adubo do tipo disco duplo**, com diâmetro de 15”;
- **Flanges**, para adaptação/fixação da Célula de Carga ao chassi de testes;
- **Trena métrica**;
- **Cronômetro Digital**;
- **Penetrômetro analógico**, da marca Stara, cone com ângulo de 60°;
- **Três Células de Carga (UFRGS)** do tipo Anel Octogonal Estendido, construídas neste trabalho;
- **Inversor DC/AC**, entrada 12Vdc, saída 110/220Vac, 60Hz, 300Watts;
- **Hastes metálicas**;
- **Célula de carga uniaxial**, com capacidade de 100 kN.

5.4.3 Configurações experimentais

5.4.3.1 Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo facão

Foi utilizado um chassi com possibilidade de montagem de até 7 linhas de semeadura. Foram avaliados os esforços resultantes para tracionar as hastes sulcadoras. Com esse procedimento pode ser feito um comparativo com os valores obtidos pela utilização dos anéis octogonais estendidos, o qual visa ratificar os resultados obtidos anteriormente.

Foram executados testes para mensuração dos esforços de tração de um conjunto de sete linhas de semeadura. As mesmas foram compostas de disco de corte de palha e sulcador de adubo tipo facão. Para tanto, fez-se a instalação de uma célula de carga comercial, uniaxial, com capacidade de 100 kN, conforme a figura 5.16, posicionada na barra de tração do trator, onde é acoplada a semeadora-adubadora. Simultaneamente as medidas da barra de tração, foram realizadas medições em três linhas individuais, onde foram utilizados três anéis octogonais estendidos. Dessa forma, fez-se a aquisição simultânea das quatro células de carga durante os testes.

Os parâmetros utilizados para estes ensaios foram: três diferentes profundidades nominais de operação da haste sulcadora: 10 cm, 12,5 cm e 17,5 cm, com ângulo de ataque de 25°. Já para as profundidades de 12,5 cm, 15 cm e 20 cm foi utilizado o ângulo de ataque de 45°

A velocidade de deslocamento foi fixada em 8 km.h^{-1} ; a pressão nas molas dos discos de corte da palha foi mantida em regulagem mínima.



Figura 5.16 – Acoplamento de uma célula de carga uniaxial na posição da barra de tração do trator.

5.4.3.2 Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo disco duplo

Considerando o mesmo chassi utilizado no item anterior (5.4.3.1), fez-se a avaliação dos esforços de tração, através da barra de tração, com o sulcador de adubo do tipo disco duplo, conforme a figura 5.17.

Foram executados testes para mensuração dos esforços de tração num conjunto de sete linhas, as quais eram compostas de disco de corte de palha e sulcador de adubo tipo disco duplo de 381 mm (15”) de diâmetro. Utilizou-se uma célula de carga comercial, uniaxial, com capacidade de 100 kN, conforme a figura 5.16, na posição da barra de tração do trator.

O efeito de penetração no solo, em sulcadores de disco duplo, ocorre pela aplicação de carga sobre estes. As semeadoras-adubadoras são equipadas com um sistema de molas que transmite parte do peso da semeadora para os sulcadores.

Foram medidos os esforços para tracionar as sete linhas de semeadura com duas regulagens de pressão nos sulcadores de adubo tipo disco duplo: o primeiro numa regulagem de mínima pressão e outro com regulagem máxima operacional do sistema. A velocidade dos testes foi fixada em 8 km.h^{-1} . Manteve-se constante a pressão nas molas dos discos de corte, em regulagem mínima.



Figura 5.17 – Linha composta por disco de corte de palha e sulcador de adubo tipo disco duplo.

5.4.3.3 Avaliação de esforços de tração dos discos de corte da palha

Este teste foi complementar aos testes descritos nos itens 5.2.3.1 e 5.2.3.2, onde foram avaliados, respectivamente, os sulcadores tipo haste e tipo disco duplo. Neste, foi avaliado o esforço para tracionar o chassi de testes com sete discos de corte em contato com o solo, não foram montados os sulcadores de adubo. A figura 5.18 apresenta esta montagem.

Os parâmetros de teste para esta configuração foram os seguintes: três condições de pressão nas molas dos discos de corte de palha: mínima, intermediária e máxima. Em cada condição, foram feitas três repetições, mantendo-se a velocidade nominal de 8 km.h^{-1} .



Figura 5.18 – Sete discos de corte de palha em avaliação do esforço de tração.

5.4.3.4 Avaliação do arraste de transporte do chassi

O objetivo deste teste, foi avaliar o esforço de tração necessário para transportar o chassi na área de testes. Este esforço de tração é denominado aqui como “arraste” do chassi, uma vez que é medida apenas a força necessária para vencer o atrito do rodado com a superfície.

5.4.4 Delineamento Experimental e análise estatística.

Foram executadas três repetições em cada condição de teste. A ordem das parcelas foi definida por sorteio, configurando um Experimento Inteiramente Casualizado. Os valores dos esforços foram processados e feitas as médias (média aritmética) das diferentes configurações testadas.

5.5 Teor de água no solo

Foram retiradas amostras de solo para a verificação do seu teor de água, na profundidade entre 0 e 0,20 m. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos identificadas e vedadas. A metodologia utilizada para a determinação do teor de água foi o descrito em EMBRAPA (1997), com a secagem em estufa a 105°C, durante 24 horas. O resultado foi expresso em percentual de massa de água. Essa determinação foi realizada no Laboratório de Física do Solo, da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

5.6 Resistência à penetração do solo

Foi utilizado um penetrômetro analógico, modelo comercial da marca Stara. Com este equipamento foram feitas avaliações até 0,25 m de profundidade, registrando-se o valor máximo indicado no equipamento. Os valores apresentados referem-se aos testes descritos anteriormente.

5.7 Profundidade do Sulco

Para avaliar a profundidade do sulco, fez-se a medição da distância do ponto mais profundo, dentro do sulco aberto, em relação a superfície não mobilizada do solo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No próximo item, apresenta-se os resultados quantitativos de forma detalhada e de como eles foram obtidos com a instrumentação embarcada que foi implementada na semeadora-adubadora. Também, nos itens seguintes são apresentados diversos conjuntos de resultados dos experimentos realizados em campo.

6.1 Avaliação qualitativa de uma aquisição.

A figura 6.1 apresenta um conjunto de gráficos típicos, que são os registros de uma medição realizada em campo. Neste exemplo foi utilizada uma semeadora-adubadora de treze linhas, conforme relatado no item 5.2.3.1. Foram medidos simultaneamente os esforços atuantes no disco de corte de palha, numa haste sulcadora e na unidade de semeadura. Nesta figura, observando de cima para baixo, têm-se os registros das células de carga 1, com esforço horizontal, vertical e momento e na mesma seqüência para as células de carga 2 e 3.

Através dos registros gráficos da figura 6.1, é possível observar, de forma qualitativa, o comportamento de cada parte da máquina testada. Entre zero e cinco segundos (eixo X), tem-se o momento em que a máquina foi baixada. Depois, permaneceu parada e próximo ao instante 10 s iniciou-se o deslocamento da máquina. A partir deste momento percebe-se um pequeno período de transição entre “parado” e “estado de regime”. No estado de regime a semeadora-adubadora está com velocidade constante e os elementos ativos estão numa condição de operação plena. A partir desta região de aceleração, tem-se um período estável entre 15 s e 40 s. A desaceleração e parada da máquina acontece entre 40 s e 45 s. Após, a máquina permaneceu parada até o levantamento, através do acionamento do sistema hidráulico, que atua no rodado da semeadora-adubadora.

Durante o período considerado de regime, observa-se seqüências de picos que se repetem aos pares em períodos regulares. Estes picos são gerados quando os elementos ativos cruzam por trilhos de solo compactado. Estes trilhos são resultantes de pulverizações, operações realizadas com tratores ou pulverizadores autopropelidos. Estes picos registrados nos valores dos esforços, são mais notados no sensor da haste sulcadora, pois esta mobiliza maior quantidade de solo que os outros elementos ativos. O sensor do disco de corte também acusou picos ao passar pelos trilhos de solo compactado, porém os picos são menores. A unidade de semeadura não apresenta maiores perturbações no sinal, uma vez que o sulcador desta unidade passa pelo solo já mobilizado pela haste sulcadora.

Verifica-se que a utilização dos anéis octogonais estendidos permitiu acompanhar o comportamento dos elementos ativos de uma semeadora-adubadora, possibilitando a mensuração dos esforços em diferentes etapas da operação.

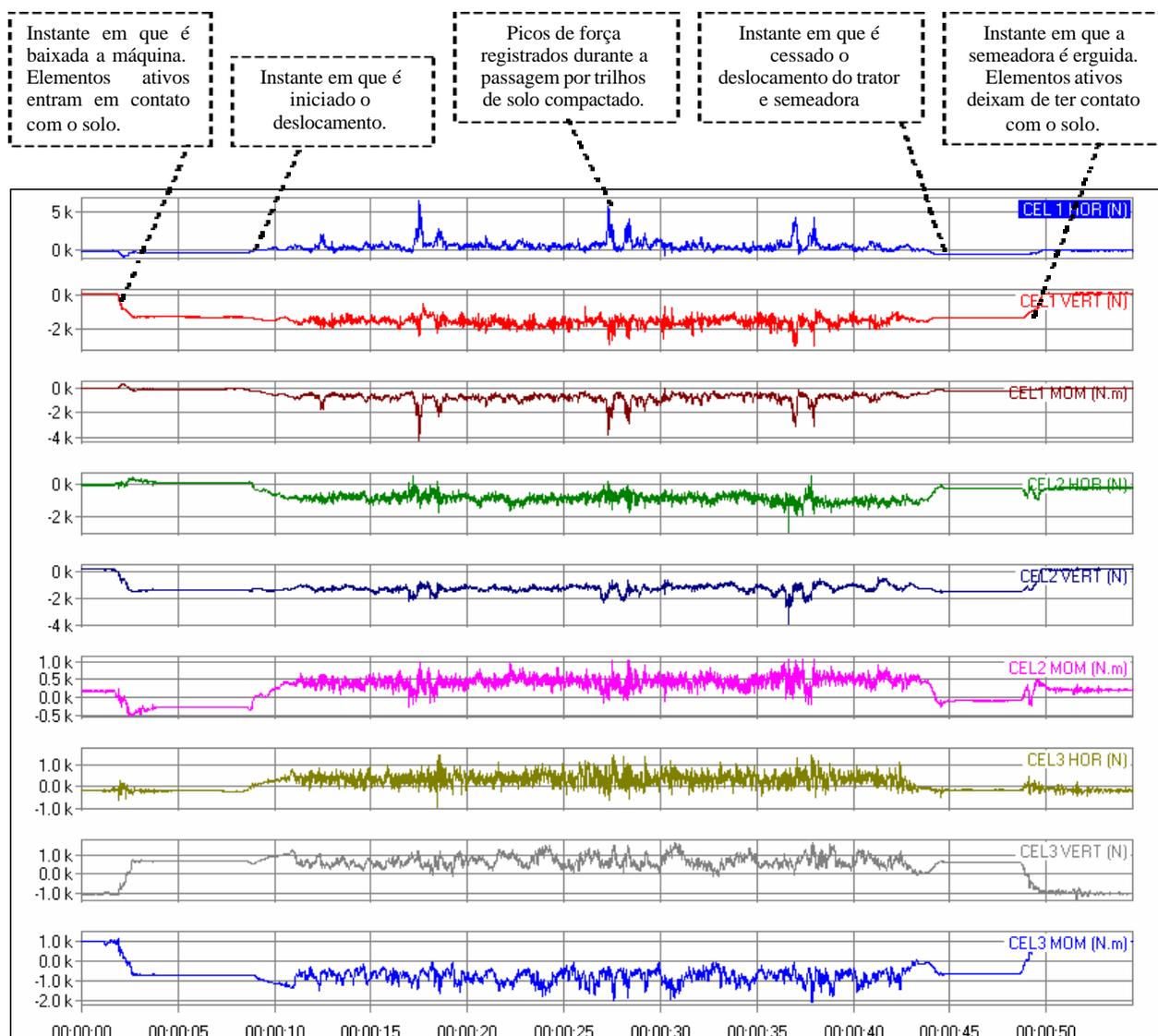


Figura 6.1 – Registro da medição de uma linha de plantio de uma semeadora-adubadora de treze linhas. De cima para baixo, esforço horizontal, vertical e momento na haste sulcadora, disco de corte e unidade de semeadura, respectivamente nas células de carga 1, 2 e 3.

6.2 Experimento 1 – linha de semeadora-adubadora (Rio Brillhante - MS)

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes descritos no item 5.2. O teor de água médio do solo testado foi 6,3 kg.kg⁻¹. Este percentual de água indica uma condição de solo seco. Mesmo assim, a área apresentou condições de semeadura.

6.2.1 Semeadura em deslocamento retilíneo

A semeadura em linha reta ou quase reta pode ser considerada como a condição padrão de semeadura. Assim, em avaliações de esforços em hastes sulcadoras utiliza-se este tipo de trajetória para que os esforços transversais possam ser desconsiderados. O valor médio dos valores máximos de resistência à penetração foi de 5158,3 kPa (52.6 kgf/cm²), (média de 90 medidas). Os valores máximos de resistência a penetração ocorreram sempre em torno de 15 cm, indicando o efeito do preparo convencional da última safra. A profundidade dos sulcos foi medida quatro vezes por parcela. Com estes valores registrados fez-se a média geral para as três distintas profundidades testadas. Na regulagem de 8 cm, o valor médio de profundidade ficou em 8,6 cm. Para a regulagem de 13 cm, obteve-se a média de 12,8 cm. Na maior profundidade regulada, 18 cm, obteve-se a média de 19,1 cm. Esses valores são correspondentes aos testes de semeadura em deslocamento retilíneo.

- Forças medidas na direção horizontal – haste.

A tabela 6.1 apresenta as forças medidas na haste sulcadora de adubo na direção horizontal, nas nove condições testadas, durante os testes com a semeadora adubadora.

Tabela 6.1 – Força Horizontal (N) na haste sulcadora de adubo em três profundidades e três velocidades de operação (média de três repetições).

Profundidade da Haste (cm) Regulado - Medido	Velocidade de Operação (km h ⁻¹)			Média
	6	8	10	
8 - 8,6	484,5 Aa	495,1 Aa	549,9 Aa	509,8
13 - 12,8	1082,2 Ab	1095,9 Ab	1208,9 Ab	1129,0
18 - 19,1	2566,2 Ac	3239,7 Bc	2933,6 Bc	2913,2
Média	1377,6	1610,3	1564,1	

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05)

A figura 6.2 traz em forma de gráfico os valores da tabela 6.1. Verifica-se que quanto maior a profundidade de atuação da haste sulcadora e a velocidade de operação, maior é o esforço de tração, fato verificado também por Dransfield et al., 1964; Palmer et al., 1983; Summers et al., 1986; Grisso et al., 1996; e Casão et al., 1998. Entretanto, o aumento do esforço de tração com o aumento da velocidade é muito menor que o aumento com a variação da profundidade.

Os valores obtidos nos testes estão proporcionalmente de acordo com Cepik, 2002. Entretanto, Siqueira, 2001b, apresentou valores significativamente maiores, entre 1376 e 2201 N a uma profundidade de 13 cm. Observa-se que este último autor trabalhou num solo com maior teor de argila (73%) e diferentes ângulos de ataque e espessuras de ponteiros.

A diferença de força entre a profundidade de 12,8 cm e 19,1 cm é maior que a diferença observada entre 8,6 cm e 12,8 cm. Isso pode ser resultado do preparo do solo utilizado na safra anterior, onde o solo fora preparado de maneira convencional, com revolvimento do solo.

O crescimento não linear, do esforço de tração, com o aumento da profundidade, também pode ter sido influenciado pela profundidade crítica de trabalho, que em hastes estreitas é função da largura, ou espessura da ponteira. Isso modifica o comportamento da mobilização do solo em torno da haste. Assim, o efeito de uma determinada geometria, de haste sulcadora, teria condições favoráveis de trabalho até uma certa profundidade.

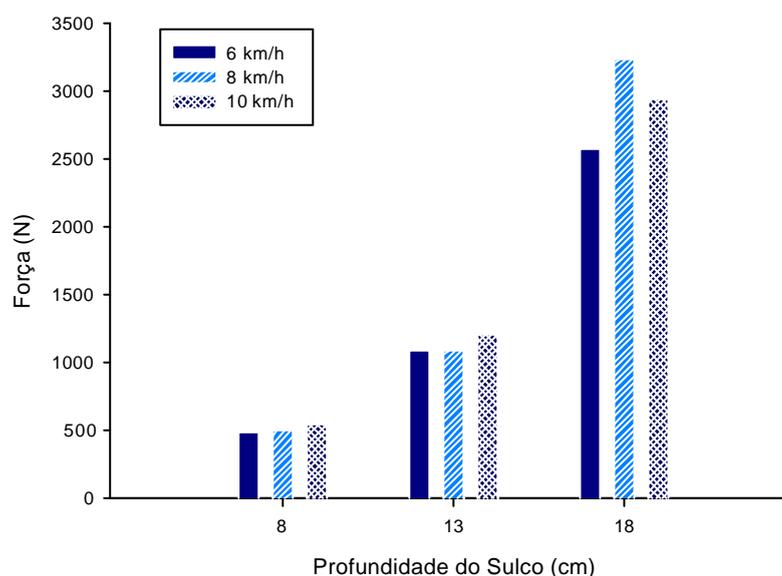


Figura 6.2 – Força Horizontal medida na haste sulcadora de adubo em três profundidades e três velocidades de operação.

- Forças medidas na direção vertical – haste.

Os esforços apresentados na tabela 6.2 e que geraram o gráfico da figura 6.3 foram medidos junto a haste sulcadora. Observou-se que o sentido destas forças, medidas na direção vertical, é de baixo para cima. Se for considerado que o ângulo de ataque utilizado é menor que 45° deveria ocorrer sucção da haste, gerando esforço de cima para baixo [Siqueira, 2001b]. Assim, os valores apresentados não estariam de acordo. Porém, é necessário salientar que além da haste sulcadora há a roda calibradora de profundidade, que é afixada junto à haste. Assim, mesmo que a haste gere uma força de cima para baixo, a roda estará sustentando este esforço. Existe ainda o esforço provocado pela mola do sistema pantográfico, ao qual a haste é afixada. Quando em operação, a mola faz um esforço tendendo a pressionar a haste para baixo. Assim, a força da mola atua num lado do sensor, enquanto que do outro lado está atuando a resultante entre a haste e a roda calibradora.

O fato dos esforços verticais serem maiores em menores profundidades podem ser explicados pela presença da roda calibradora. Como a mola do sistema pressiona a haste para baixo e esta foi mantida com regulação constante, quanto menor a profundidade regulada na roda calibradora, maior será o efeito desta roda na contraposição da mola, uma vez que o chassi da máquina trabalha sempre na mesma altura.

Tabela 6.2– Força Vertical (N) na haste sulcadora de adubo (média de três repetições). O sentido da força é de baixo para cima.

Profundidade da Haste (cm) Regulado - Medido	Velocidade de Operação (km h ⁻¹)			Média
	6	8	10	
8 - 8,6	1749.4 Aa	1840.2 Aa	1809.7 Aa	1799,7
13 - 12,8	1328.9 Ab	1240.0 Ab	1243.3 Ab	1270,7
18 - 19,1	384.6 Ac	129.7 Bc	261.6 ABc	258,7
Média	1154,3	1104,8	1069,9	

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05)

Quando se fez a regulagem de profundidades maiores, a haste penetrou mais no solo, diminuindo o deslocamento que gera a compressão na mola. Isso resultou nos menores esforços observados na figura 6.3.

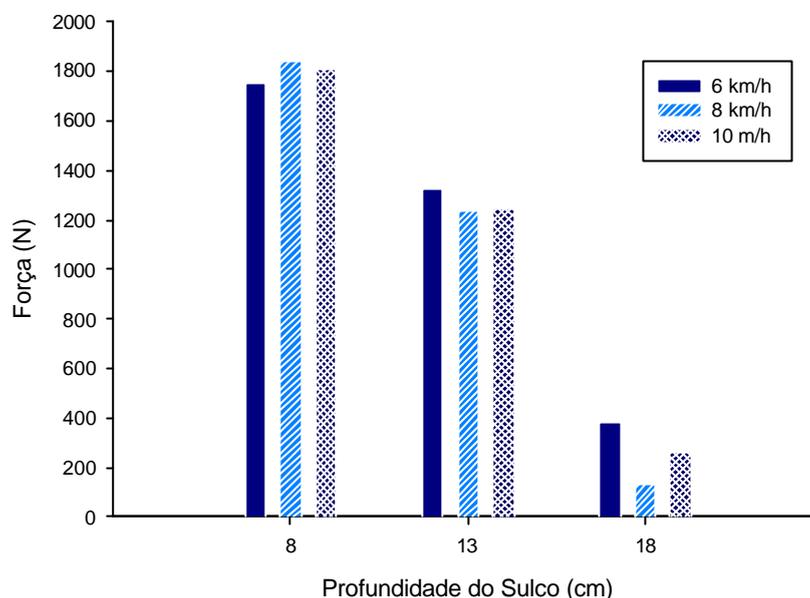


Figura 6.3 - Força Vertical medida na haste sulcadora de adubo em três profundidades e três velocidades de operação.

- Forças medidas na direção horizontal – disco de corte da palha.

Enquanto se fez a avaliação da haste sulcadora em diferentes profundidades e velocidades, também foram avaliados os esforços no disco de corte. A tabela 6.3 apresenta os valores desta avaliação. Conforme se verifica no gráfico da figura 6.4, os esforços de tração do disco de corte tiveram um leve acréscimo com o aumento da profundidade de sulcamento da haste. Esta diferença pode estar relacionada com uma maior penetração do disco de corte, uma vez que o esforço vertical na haste diminuiu, transferindo mais carga sobre os discos de corte, porém se observado na figura 6.5, que apresenta os valores dos esforços verticais sobre os discos de corte, não se verifica uma tendência de maior transferência de carga para os discos de corte. Não se percebe alterações significativas nos esforços em virtude das variações de velocidade.

Tabela 6.3 – Força Horizontal (N) no Disco de Corte de Palha (média de três repetições).

Profundidade da Haste (cm)	Velocidade de Operação (km h ⁻¹)			Média
	6	8	10	
Regulado - Medido				
8 - 8,6	770,6	799,7	816,5	795,6a
13 - 12,8	860,4	816,6	914,3	863,7b
18 - 19,1	937,2	930,8	955,7	941,2c
Média	856,1AB	849,0A	895,5B	

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

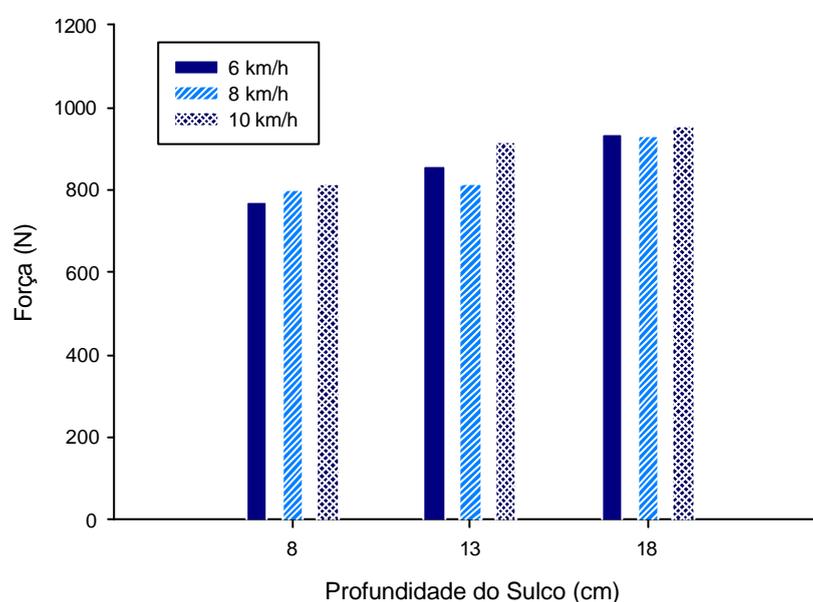


Figura 6.4 – Força Horizontal medida no disco de corte da palha. Foram efetuados registros com uma regulagem fixa no disco de corte enquanto se fez a variação de três profundidades e três velocidades na haste sulcadora de adubo.

- Forças medidas na direção vertical – disco de corte da palha.

Os valores dos esforços verticais no disco de corte não apresentaram variações consideráveis em virtude da variação da profundidade do sulcamento da haste, nem da variação de velocidade.

Tabela 6.4 – Força Vertical (N) medida no disco de corte da palha. Foram efetuados registros com uma regulagem fixa no disco de corte enquanto se fez a variação de três profundidades e três velocidades na haste sulcadora de adubo.

Profundidade da Haste (cm)	Velocidade de Operação (km h ⁻¹)			Média
	6	8	10	
8	-1252.2	-1321.8	-1245.4	-1273,1 a
13	-1269.1	-1215.3	-1323.8	-1269,4 a
18	-1350.5	-1356.8	-1288.4	-1331,9 a
Média	-1290,6 A	-1297,9 A	-1285,9 A	

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05)

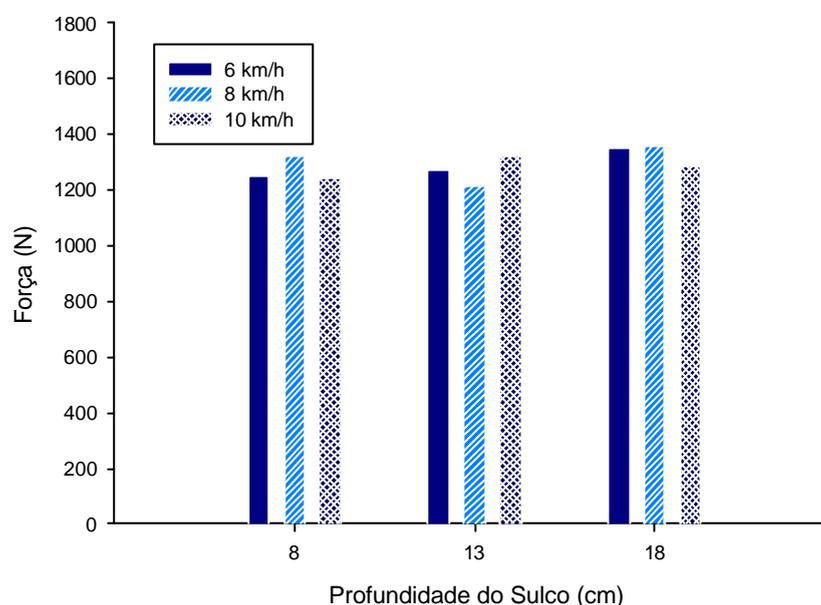


Figura 6.5 – Força Vertical medida no disco de corte da palha. Foram efetuados registros com uma regulagem fixa no disco de corte enquanto se fez a variação de três profundidades e três velocidades na haste sulcadora de adubo.

- Forças medidas na direção horizontal – unidade de semeadura.

A tabela 6.5 apresenta os esforços de tração da unidade de semeadura em função da variação da profundidade de sulcamento da haste, bem como da variação da velocidade. Os esforços de tração na unidade de semeadura não apresentaram tendências significativas em função das variações de profundidade sulcamento da haste nem da variação da velocidade.

Tabela 6.5 – Força de tração (N) na unidade de semeadura

Profundidade da Haste (cm)	Velocidade de Operação (km h ⁻¹)			Média
	6	8	10	
Regulado - Medido				
8 - 8,6	351,4	341,5	335,7	243,9 a
13 - 12,8	355,7	325,2	337,8	339,6 a
18 - 19,1	369,8	369,0	382,4	373,7 b
Média	359,0 A	345,2 A	352,0 A	

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Os valores de esforço de tração na unidade de semeadura são menores que os valores medidos no disco de corte e na haste sulcadora. Isto já era esperado, pois estes últimos já haviam atuado no solo diminuindo sua resistência à passagem dos discos duplos que abrem o sulco para a deposição da semente.

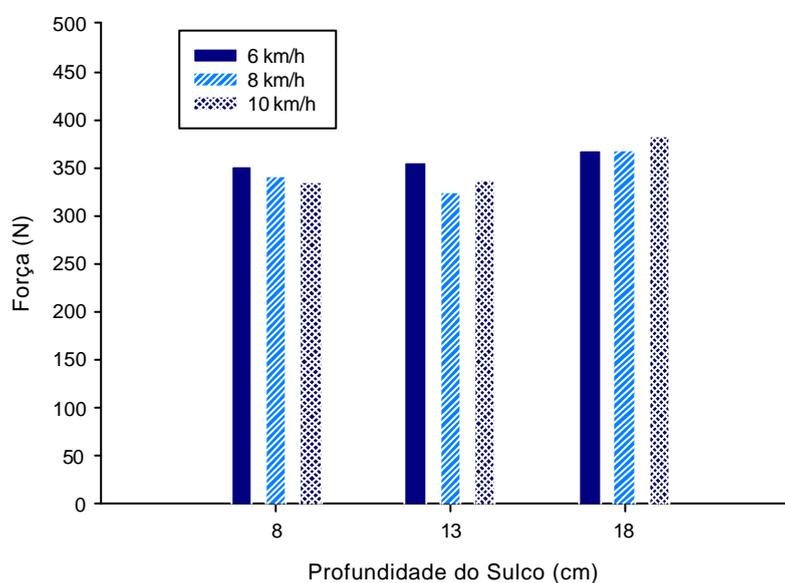


Figura 6.6 - Força de tração no sistema de semeadura, com os seguintes elementos ativos: disco duplo para deposição de semente e rodas compactadoras.

A figura 6.7 apresenta todos os registros dos esforços de tração obtidos no teste de semeadura em deslocamento retilíneo. Fez-se este “mapa” para possibilitar uma avaliação

qualitativa ampla. Nesta figura pode-se verificar o incremento na força de tração na haste sulcadora quando se utilizou uma profundidade de sulcamento de 19,1 cm.

O fato de se ter esforços de tração com valores elevados na operação de sulcamento resulta em algumas implicações: as solicitações mecânicas serão maiores, exigindo uma estrutura robusta, que poderá significar acréscimo de peso na máquina. Caso este peso não estiver adequadamente distribuído sobre o solo, poderá provocar a compactação do solo. Além disso, far-se-á necessário um trator com capacidade superior para efetuar este sulcamento “profundo”, podendo se fazer necessário um maior investimento nesta aquisição, bem como um provável aumento no consumo de combustível.

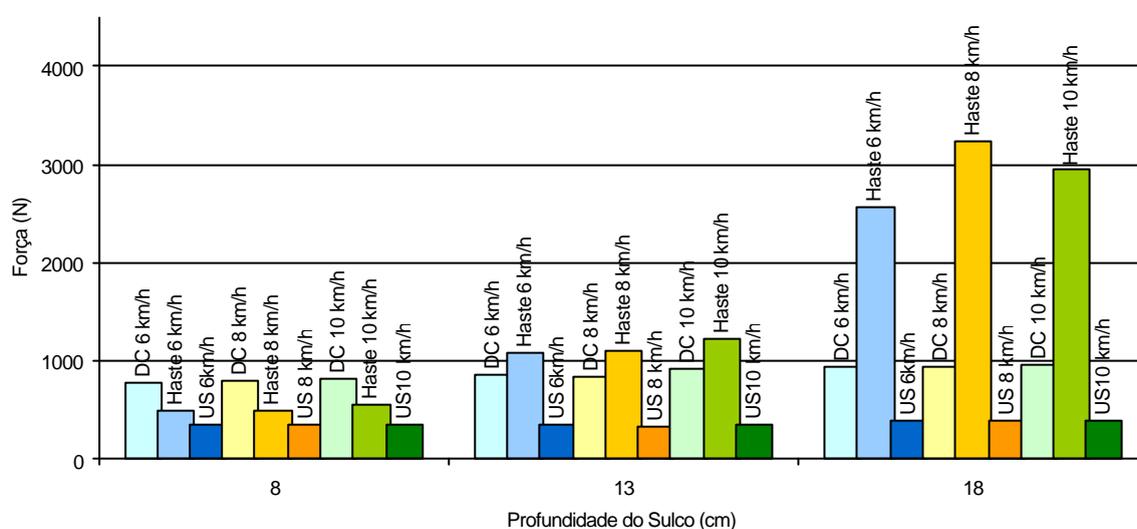


Figura 6.7 – Força de tração no Disco de Corte (DC), Haste Sulcadora (Haste) e Unidade de Semeadura (US). Valores médios de três repetições para três velocidades e três profundidades medidas.

As tabelas e figuras apresentaram, até agora, grandezas correspondentes aos três subconjuntos de uma linha de semeadura. Outra análise que pode ser feita é a força total consumida pela linha completa. Tomando por base a menor profundidade com a menor velocidade como sendo o menor valor para tração de uma linha de semeadura e a maior profundidade com a maior velocidade sendo o valor de referência como maior, obtemos 1606,5 N/linha e 4271,7 N/linha como os valores mínimos e máximos dos testes apresentados até aqui.

Segundo a ASAE, 1999, a força de tração necessária para a operação de semeadoras de grãos gráudos, na direção horizontal do deslocamento, com bom leito de semeadura, é de 3400 N/linha, tendo variação de 35%. Estes dados estão disponíveis como referência para o dimensionamento de tratores que operam com semeadoras-adubadoras. Verifica-se que o valor

encontrado como máximo neste trabalho (4271,7 N/linha), está dentro dos limites recomendados pela norma citada.

Casão et al., 2000a, avaliando uma semeadora de precisão, de arrasto, mediu esforços de tração em semeadura de soja e milho, em profundidades que variaram entre 10 e 13 cm, com velocidade de 8 km/h. Na semeadura da soja, primeiro teste, obteve 2757 N/linha. No segundo e terceiro testes, semeando milho, os valores obtidos foram de 4550 N/linha e 4082 N/linha, respectivamente. Estes últimos valores são da mesma ordem de grandeza do valor de referência adotado como máximo neste trabalho, porém a profundidade deste é 18 cm, enquanto do outro é 13 cm. Assim, no teste em que este mesmo autor, semeou soja, obteve um valor mais próximo do obtidos neste trabalho que, para a profundidade de 13 cm e 8 km/h, ficou em 2273,7 N/linha.

Casão et al., 2000b, testando uma semeadora-adubadora de precisão, montada nos três pontos do trator, chegou a valores de força horizontal de tração de 2731,7 N/linha para a velocidade de 4,9 km/h e 13,2 cm de profundidade do sulco e 2863N/linha para a velocidade de 7,6 km/h e 12,6 cm de profundidade de sulcamento. Estes valores estão de acordo com Casão et al., 2000a, e semelhantes aos obtido na profundidade de 13 cm deste trabalho. As diferenças observadas podem ser motivadas por características do solo, bem como das hastes testadas [Plasse et al., 1985; Collins & Fowler, 1996; Casão Júnior et al., 1998].

6.2.2 Comparativo de esforço da haste sulcadora medida em dois pontos distintos

A figura 6.8 traz os sinais de força de tração (horizontal) registrados pelas células de carga 1 e 3 simultaneamente. Verifica-se que os sinais apresentam uma correlação de 98,7%, figura 6.9. Isso significa que independentemente do ponto de medição os esforços medidos são praticamente iguais. Esta observação se faz válida para os pontos de medições avaliados.

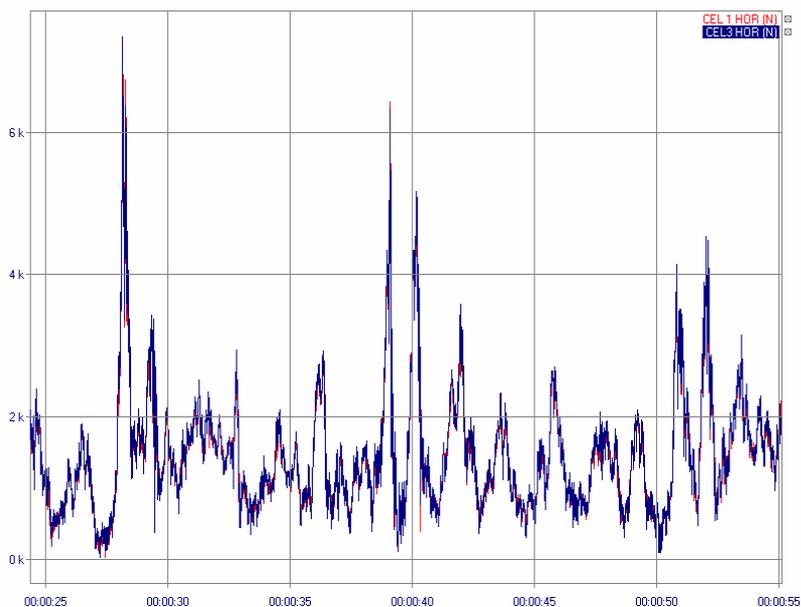


Figura 6.8 – Sobreposição dos sinais adquiridos nos canais que medem esforços Horizontais nas células de carga 1 (vermelho) e 3 (azul), que estão posicionadas respectivamente junto a haste e junto ao chassi da máquina.

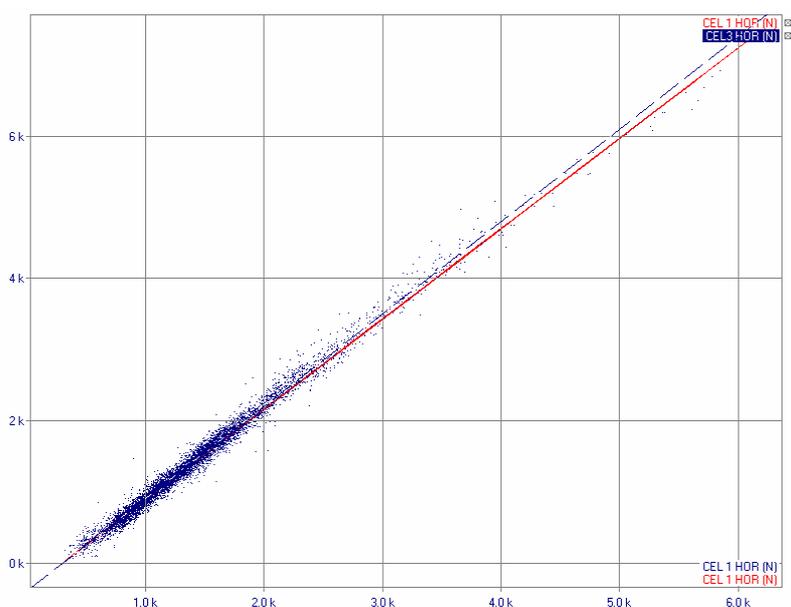


Figura 6.9 – Correlação (98,7% ou $R^2 = 0,987$) das forças Horizontais medidas em pontos distintos, referentes a figura 6.8. A linha tracejada (azul) é o ajuste linear dos pontos. A linha contínua (vermelha) serve como referência para uma correlação de 100%.

A figura 6.10 mostra os sinais dos esforços verticais, que foram registrados simultaneamente em dois pontos distintos. Conforme a figura 6.11, a correlação desses sinais foi de 44%, valor que demonstra uma significativa diferença entre as medidas de um ponto e outro. Em outras palavras, não se pode inferir que o valor lido num ponto seja o mesmo no outro ponto.

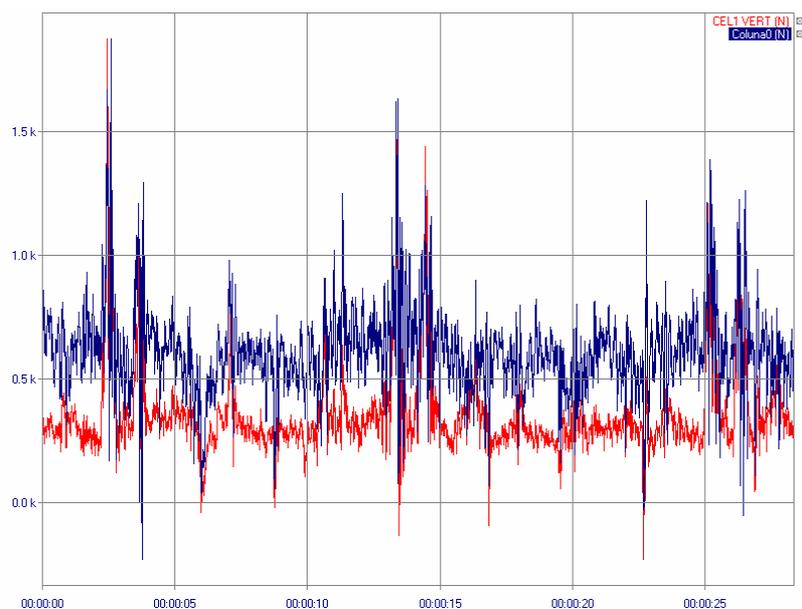


Figura 6.10 - Sobreposição dos sinais adquiridos nos canais Verticais das células de carga 1 (vermelho) e 3 (azul), que estão posicionadas respectivamente junto a haste e junto ao chassi da máquina.

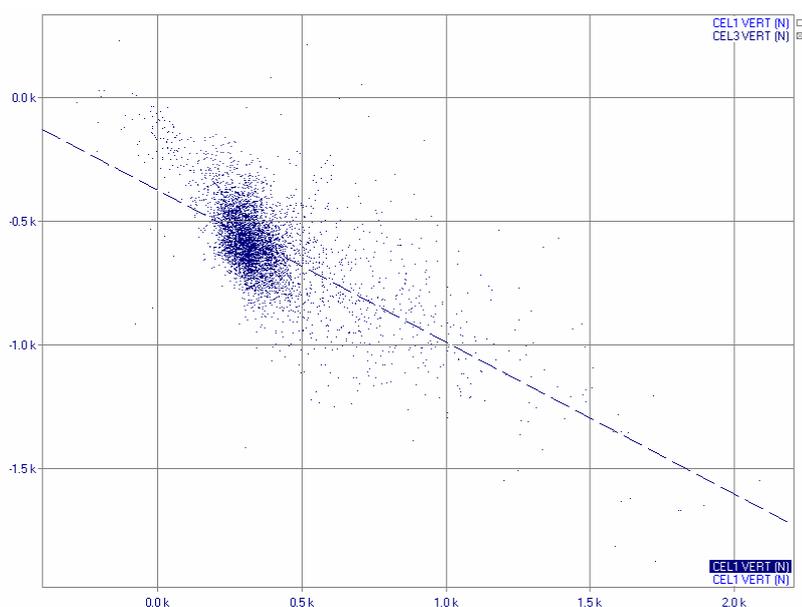


Figura 6.11 – Correlação (44% ou $R^2 = 0,44$) das forças Verticais medidas em pontos distintos, referentes a figura 6.10. A linha tracejada (azul) é o ajuste linear dos pontos.

A figura 6.12 traz os sinais do canal de momento adquiridos nas células de carga 1 e 3, simultaneamente, em dois pontos distintos. A correlação dos dois sinais, conforme a figura 6.13 foi de 95%, o que indica que há uma semelhança grande entre os valores de momento adquiridos. Assim, pode-se considerar válida a leitura dos valores de momento independentemente do ponto medido. Esta consideração é para os pontos avaliados.

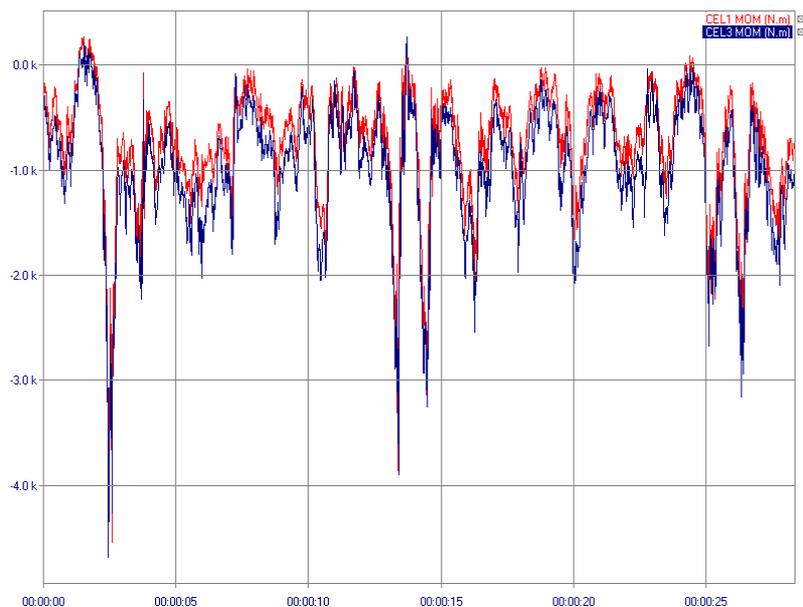


Figura 6.12 - Sobreposição dos sinais adquiridos nos canais que medem Momento nas células de carga 1 (vermelho) e 3 (azul). Estas estão posicionadas respectivamente junto a haste e junto ao chassi da máquina.

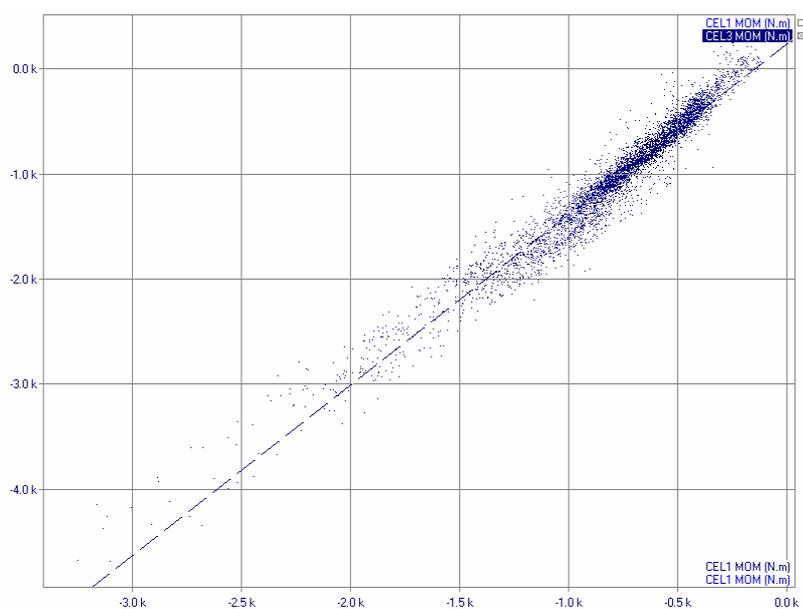


Figura 6.13 - Correlação (95% ou $R^2 = 0,95$) dos Momentos medidos em pontos distintos, referentes a figura 6.12. A linha tracejada (azul) é o ajuste linear dos pontos.

6.2.3 Avaliação de hastes sulcadoras de distribuição de adubo em manobras

As operações de manobras, onde se fez a transposição de terraço e deslocamento em curvas acentuadas remete a esforços não convencionais, onde se tem uma condição de operação diferenciada. Assim, as tabelas 6.6 e 6.7 trazem valores de esforços máximos medidos durante as

manobras já mencionadas. O maior valor de força horizontal em manobras foi na condição de transposição do terraço a 45°, onde verificou-se 11806 N.

Apesar de se esperar que os maiores esforços sejam obtidos em manobras, observou-se que o valor máximo de esforço de tração na haste foi verificado durante a operação de semeadura em linha reta, onde registrou-se um pico de força de 14248,5 N. Este valor está ligado à passagem por trilhos de solo compactado, evento já caracterizado nos resultados qualitativos (item 6.1).

Tabela 6.6– Valores máximos dos esforços de tração medidos nas hastes sulcadoras.

	Força Horizontal Máxima (N)
Terraço 45°	11806.6
Raio de giro 9 m	9424.85
Raio de giro 15 m	9521.76

Na avaliação de esforços transversais em hastes, registrou-se os eventos e posteriormente foram extraídos os valores máximos para cada tipo de manobra, os quais são apresentados na tabela 6.7. Verificou-se que os maiores esforços transversais ocorreram nos deslocamentos em curva, sendo que na curva mais acentuada tem-se o maior pico. A semeadura sobre terraço ocorre mais regularmente que o deslocamento em curvas acentuadas como as do teste. Assim, o projetista deve levar em conta históricos de utilização das máquinas para uma melhor avaliação dos valores a serem adotados.

Tabela 6.7 – Valores máximos dos esforços transversais medidos nas hastes sulcadoras

	Força Transversal Máxima (N)
Terraço 45°	3698.5
Raio de giro 9 m	5008.0
Raio de giro 15 m	4048.4

6.2.4 Avaliação de esforços nos discos de corte da palha em manobras

A tabela 6.8 apresenta os valores máximos dos esforços, medidos no disco de corte, durante as manobras. Verificou-se que os esforços, tanto horizontal quanto vertical, foram maiores na operação de transposição de terraço.

Tabela 6.8 – Valores máximos dos esforços medidos no Disco de Corte de Palha.

	Força Máxima (N)	
	Horizontal	Vertical
Terraço 45°	4496.16	5059.8
Raio de giro 9 m	2336.19	4043.04
Raio de giro 15 m	2596.55	3250.85

6.3 Experimento 2 – Testes com um chassi porta ferramentas acoplado aos três pontos (Horizontal – RS)

6.3.1 Avaliação de esforços em sulcadores de adubo tipo facão

Os testes utilizando o chassi de engate nos três pontos visaram estabelecer o desempenho de dois modelos de hastes sulcadoras em condições específicas. As figuras 6.14 e 6.15 são gráficos que apresentam os resultados destes testes. Avaliando estes gráficos, tem-se uma relativa contradição entre os dois, pois no comparativo, das duas hastes sulcadoras, ocorreu uma inversão de comportamento. No gráfico 6.14 tem-se que a haste “espessura 15 ataque 25” (espessura da ponteira de 15 mm e ângulo de ataque de 25°) demanda maior esforço que o modelo “espessura 22 ataque 36”. No gráfico 6.15 o resultado, para as mesmas hastes, ocorre praticamente ao inverso. As tabelas com os valores dos gráficos 6.14 e 6.15 estão no apêndice E.

Para uma avaliação mais completa, optou-se por realizar o experimento 3 (item 5.4), onde foi possível avaliar um número maior de hastes simultaneamente.

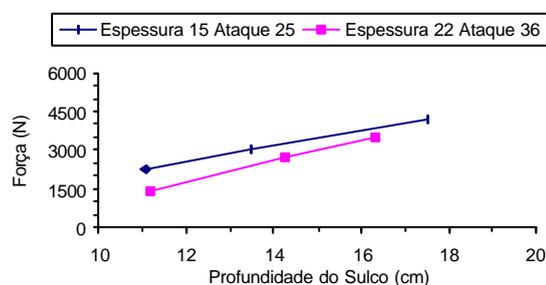


Figura 6.14 – Forças medidas pela célula 1 em duas hastes distintas para comparativo de desempenho.

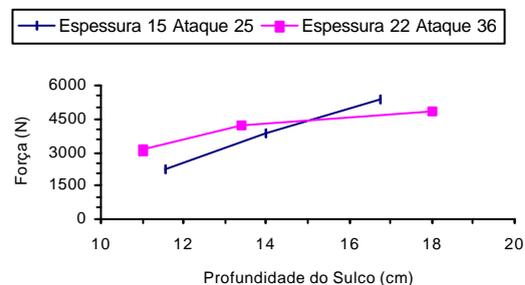


Figura 6.15 - Forças medidas pela célula 2 em duas hastes distintas para comparativo de desempenho.

6.4 Experimento 3 – chassi com sete linhas acoplado na barra de tração (Horizontal – RS)

Este item – experimento 3 - apresenta os resultados de testes de medição de esforços feitos com um chassi de semeadora. Neste chassi foram montadas sete linhas, onde fez-se composições com disco de corte e sulcadores de adubo de dois tipos: haste sulcadora e discos duplos.

6.4.1 Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo facão.

No chassi de semeadora foram montadas sete linhas compostas por disco de corte e sulcador de adubo tipo haste ou facão. Estas hastes foram testadas em duas angulações diferentes: 25° e 45°. Cada angulação foi testada em três regulagens de profundidade distintas.

Os resultados dos testes, apresentados na tabela 6.9 e na figura 6.16, mostra que a haste com menor espessura da ponteira apresentou menor esforço de tração no ângulo de 25°. No comparativo entre hastes trabalhando a 45° não houve diferenças significativas. Nas profundidades em torno de 15 cm, os valores de força são maiores quando as hastes trabalharam com ângulo de ataque de 45°. Para ângulos de ataque menores, em hastes estreitas, o esforço de tração diminui [Plasse et al., 1985].

Tabela 6.9 – Esforços de tração por linha. Cada linha composta por disco de corte e haste sulcadora de adubo.

Ângulo de ataque	Profundidade nominal do sulco	Espessura 16mm		Espessura 22mm	
		Profundidade do sulco - medida (cm)	Força de tração (N)	Profundidade do sulco - medida (cm)	Força de tração (N)
25°	10,0	7,1	1234.1	9,1	1819.8
	12,5	12,8	2307.3	14,7	2833.1
	15,0	14,6	2854.7	16,1	3313.8
45°	12,5	13,9	2820.4	13,9	2964.6
	15	15,2	3591.4	16,0	3723.9
	20	18,2	4300.7	19,3	4545.0

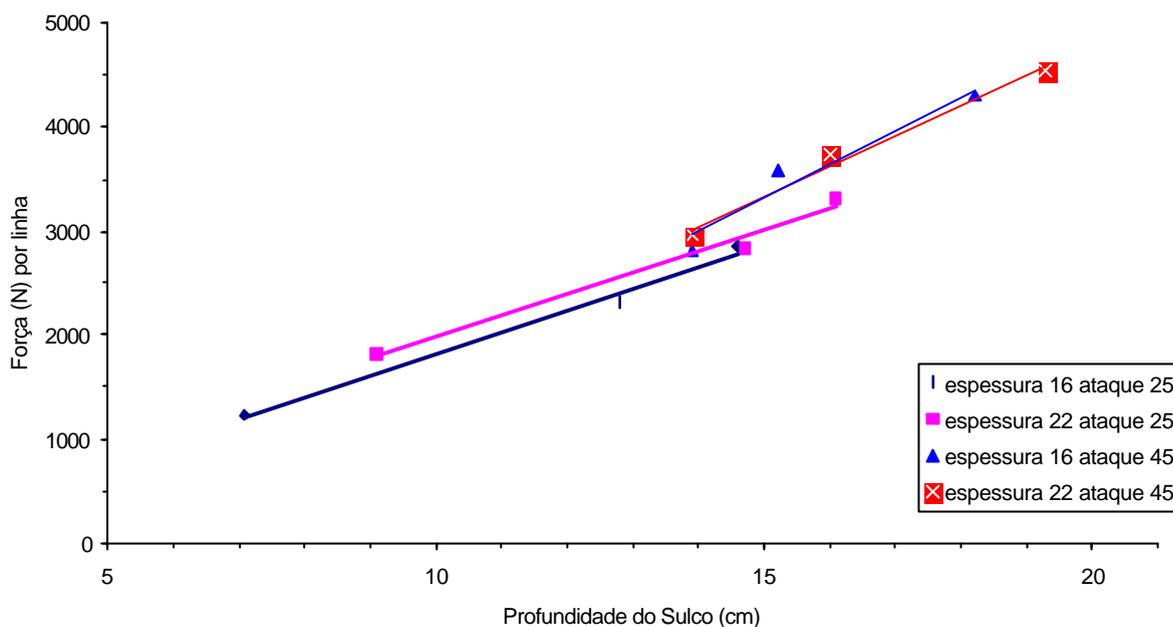


Figura 6.16 – Esforço médio por linha de semeadura. Valor medido na barra de tração.

A figura 6.17 apresenta os resultados de esforço de tração medidos por 3 anéis octogonais estendidos. Esta aquisição foi simultânea aquela apresentada na figura 6.16. Numa avaliação qualitativa entre estes dois gráficos, há semelhança entre eles, bem como coerência entre os resultados de cada modelo de haste. Os resultados da figura 6.17 são valores médios de três hastes, enquanto os valores da figura 6.16 são resultantes da tração de sete hastes com respectivos discos de corte. Assim, pode haver diferenças no comportamento de algumas hastes, o que justificaria eventuais diferenças nos resultados, além dos já mencionados discos de corte.

Em estudo similar, Siqueira, 2001b, avaliando a variabilidade da demanda energética de hastes sulcadoras, encontrou diferenças nos esforços de tração de até 60%. Entretanto, este autor trabalhou com apenas uma profundidade e com ângulos de ataque fornecidos pelos fabricantes.

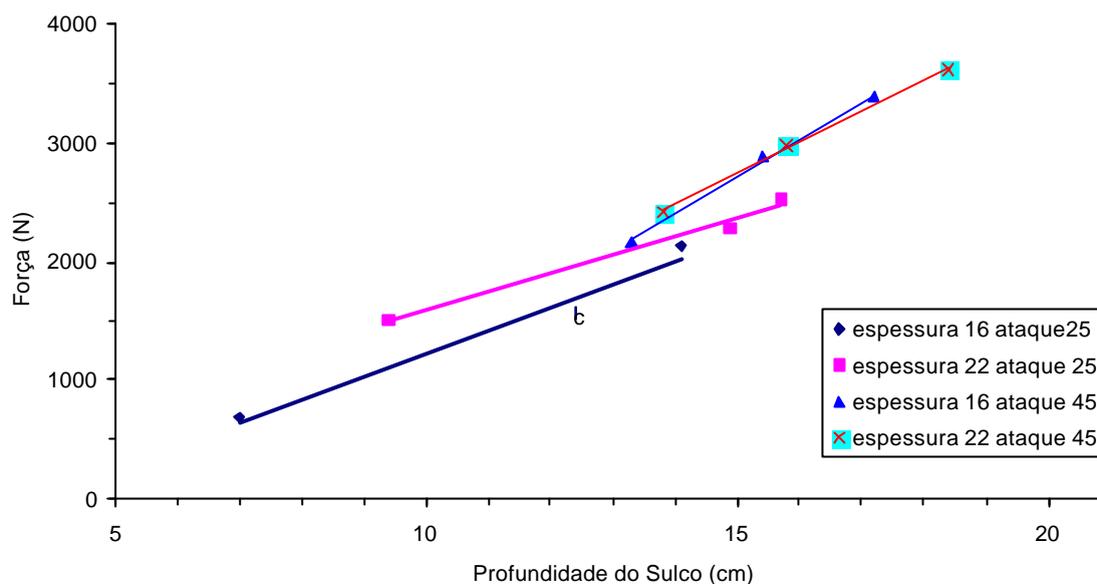


Figura 6.17 – Força de tração em hastes sulcadoras. Registros feitos com os anéis octogonais estendidos.

6.4.2 Avaliação de esforços de tração em sulcadores de adubo tipo disco duplo

O disco duplo é um tipo de sulcador utilizado largamente em semeadoras-adubadoras, principalmente na deposição da semente, uma vez que este consegue uma boa regularidade na profundidade de operação, com os devidos mecanismos de regulagem. Este tipo de sulcador também é utilizado para deposição de adubo. A utilização deste em relação a haste sulcadora se traduz num menor esforço de tração por linha, porém, sua utilização fica vinculada as condições de solo. Ou seja, nem sempre se terá uma deposição de adubo e manejo de solo adequados com o disco duplo, porque ele trabalha em profundidades menores que a haste sulcadora. Outro diferencial é que os discos, em geral, penetram no solo devido a carga sobre eles, enquanto a haste sulcadora pode trabalhar com ângulos que geram uma força de sucção (vertical, para baixo), facilitando a penetração no solo.

Na figura 6.18 pode-se ver os registros do teste que avaliou o esforço de tração de um chassi de semeadora, onde foram montados dois elementos ativos: o disco de corte e o sulcador de adubo tipo disco duplo. Manteve-se a regulagem constante nos discos de corte e fez-se a variação da pressão, em três níveis, nos sulcadores tipo disco duplo. Conforme a figura 6.18, os esforços aumentaram com o aumento da pressão nos sulcadores de disco duplo. Este comportamento é esperado, visto que houve maior penetração dos discos com o aumento da carga vertical sobre eles. Observa-se que o maior valor de esforço de tração por linha com o

disco duplo (735,8 N) ainda é consideravelmente menor que o menor valor obtido com as hastes sulcadoras (125,8 N) conforme a tabela 6.9.

Tabela 6.10 – Força de tração para conjunto formado por disco de corte e sulcador de adubo tipo disco duplo.

	Pressão nas molas do Disco Duplo			Média
	Baixa	Intermediária	Alta	
Força (N) de tração para sete linhas	3950,5 a	4522,4 b	5148,3 c	4540,4
Força (N) de tração por linha	564,1	646,5	735,8	648,8

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

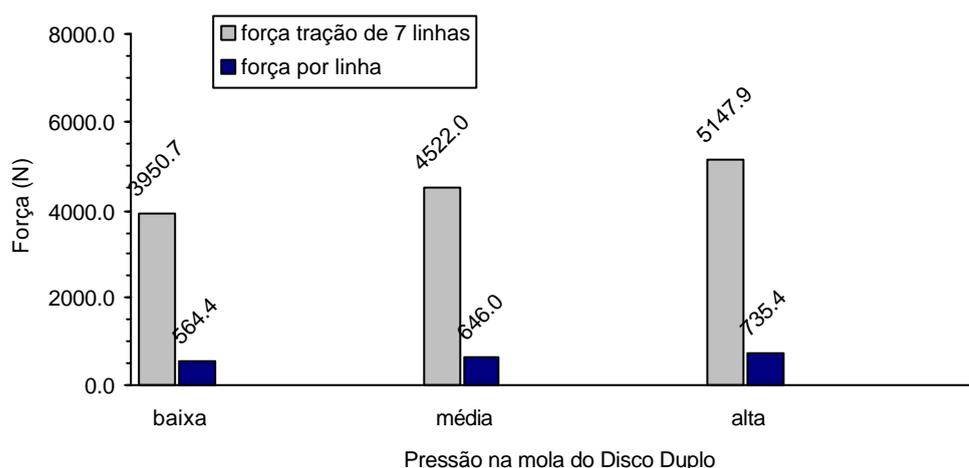


Figura 6.18 –Força para tracionar 7 linhas compostas por disco de corte e sulcador de adubo tipo disco duplo de 16'', variando a pressão nas molas do sulcador de adubo.

6.4.3 Avaliação de esforços de tração dos discos de corte da palha

O disco de corte da palha é considerado de fundamental importância nas semeadoras-adubados de precisão, pois com seu funcionamento adequado evita embuchamento na máquina. Assim, sendo um elemento em contato com o solo, haverá um consumo parcial da potência total exigida na tração da semeadora-adubadora.

Este teste verificou a força necessária para tracionar um chassi, onde foram montados apenas discos de corte, não havendo nenhum outro elemento ativo na máquina.

Na figura 6.19 pode-se ver os valores registrados para duas regulagens de pressão da mola do disco de corte. Quando a mola está com um nível de pressão alto, o disco terá uma transferência de carga sobre ele maior, implicando numa maior capacidade de penetração no solo. Nos testes, verificou-se que houve aumento de 122% na força de tração quando a pressão na mola do disco de corte foi aumentada da regulagem de pressão baixa para alta.

Tabela 6.11 – Força de tração do chassi equipado apenas com discos de corte

	Pressão nas molas do Disco de Corte		Média
	Baixa	Alta	
Força (N) de tração para sete linhas	2762,5 a	6127,3 b	4444,9
Força (N) de tração por linha	394,6	875,3	635,0

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

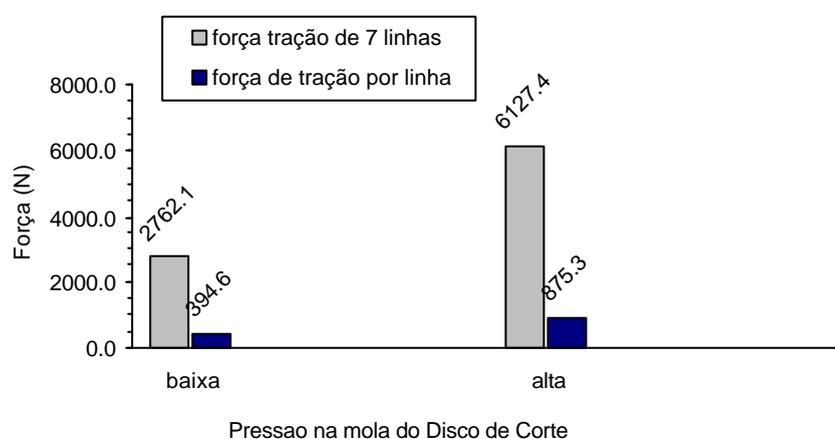


Figura 6.19 – Força para tracionar um chassi com 7 discos de corte de palha, espaçados de 0,45 m, em dois níveis de pressão nas molas destes discos.

6.4.4 Avaliação do arraste de transporte do chassi

O gráfico da figura 6.20 apresenta os registros de força medidos, na barra de tração do trator, durante o transporte do chassi de semeadora. Neste gráfico foram selecionados três distintos trechos para avaliação dos esforços envolvidos. A tabela 6.10 apresenta um resumo estatístico das forças encontradas nos respectivos trechos selecionados na figura 6.20.

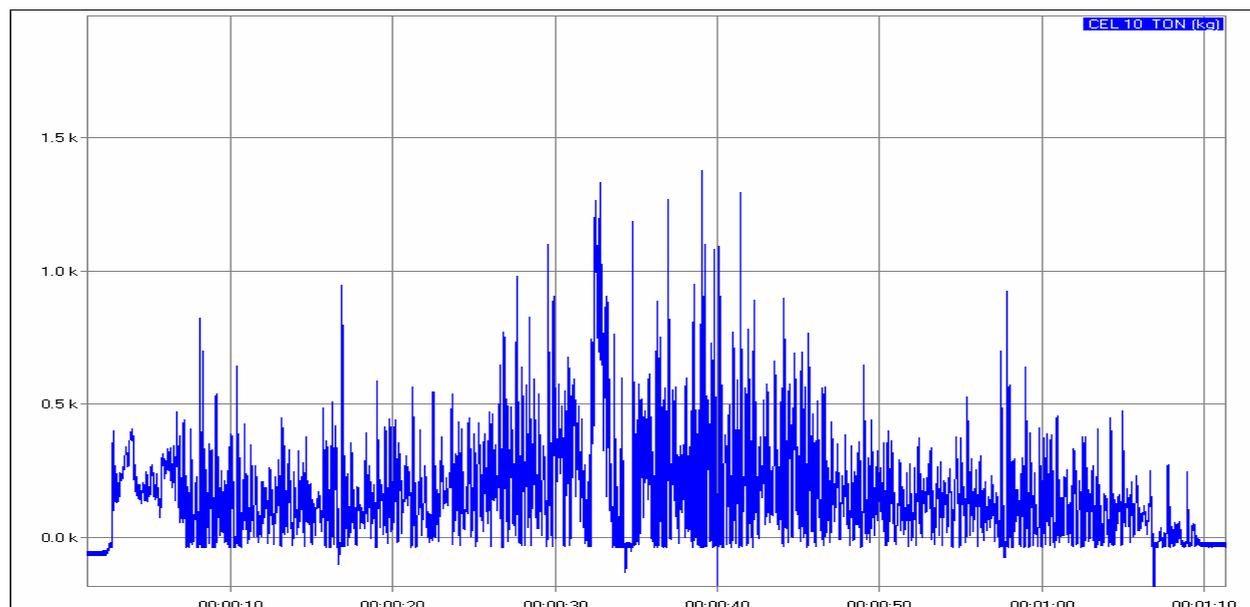


Figura 6.20 – Gráfico da força em N (eixo Y) na barra de tração durante transporte de um chassi de semeadora com 4,5 m de largura e quatro pneus para transporte e transmissão.

No primeiro trecho, entre 10 e 25 s, e último, entre 45 s e 1 min e 5 s, o transporte se faz num terreno relativamente plano, entre terraços. No trecho do meio, foi realizada a passagem sobre um terraço. Os valores para transposição do terraço são maiores que os valores de tráfego normal, conforme pode-se ver nos valores correspondentes ao intervalo de tempo entre 25 e 45 s da tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Forças medidas na barra de tração do trator para tracionar um chassi de semeadora com 4,5 m de largura e com quatro pneus para transporte. Os intervalos apresentados nesta tabela se refere ao gráfico da figura 6.20

Intervalo de tempo (eixo X)	Força (N)		
	Média	RMS	Máximo
10 s – 25 s	1228.2	1733.4	9273.4
25 s – 45 s	2407.4	3484.5	13502.5
45 s – 1 min 05 s	1206.6	1762.9	9061.5

Com as avaliações realizadas, que foram apresentadas no decorrer do experimento 3, tem-se a possibilidade de verificar a contribuição, na demanda energética total, de cada parte que compõe uma semeadora adubadora.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

7.1 Conclusões

Neste trabalho foram construídos transdutores de força que possibilitaram medir duas forças ortogonais e o momento associado a esses esforços. Com a montagem adequada dos sensores de força numa dada disposição de acoplamento, foi possível realizar medidas no terceiro eixo - ou esforço ortogonal aos eixos de uso convencional do transdutor. Também, com esta segunda orientação de montagem foi possível medir um segundo momento. Assim, as medidas realizadas totalizaram em três forças e dois momentos, de uma ferramenta de preparo de solo, sem a necessidade de alterações nos dispositivos de acoplamento dos sensores utilizados nas máquinas avaliadas.

Os transdutores apresentaram boa linearidade e baixa histerese, possibilitando, obter-se resultados adequados na avaliação de esforços em semeadoras-adubadoras. A incerteza da medição, sem tratamento de pós-processamento, ficou abaixo de 10%, o que se considerou adequado tendo em vista as condições reais a que os sensores são submetidos durante os testes de campo.

As validações dos sensores construídos, através dos testes de campo, permitiram a avaliação dos principais esforços atuantes nos elementos ativos de uma semeadora-adubadora durante todo o ciclo de operação da mesma. Isto foi confirmado através dos registros gráficos que permitiram visualizar os valores médios, valores máximos e mínimos, bem como aqueles valores considerados peculiares das diversas operações ou manobras realizadas.

Os dados obtidos nestes testes podem ser utilizados como referência para projetos de semeadoras adubadoras. Todavia, observa-se que há uma variabilidade de tipos de solo bem como diferentes configurações de semeadoras-adubadoras. Essas variações são indicativos reais, e que devem ser consideradas num desenvolvimento, pois os testes realizados neste trabalho são restritos tanto em tipo de solo como em configurações de máquinas, podendo não ser adequados para comparação direta com outros testes.

Os valores de esforços de tração de hastes sulcadoras, obtidos nos testes, estão em acordo com trabalhos similares de outros autores, o que valida a metodologia empregada para a montagem do sistema utilizado neste trabalho.

Finalmente, verificou-se que o sistema de instrumentação embarcada utilizado, pela facilidade de operação, rapidez na aquisição e registro dos dados, precisão nas medidas e grande capacidade de armazenamento, mostraram-se uma ótima ferramenta para obtenção de parâmetros referentes a máquinas agrícolas, sobretudo naquelas situações reais de trabalho através dos testes de campo.

7.2 Sugestões de continuidade

- SISTEMA AUTOMATIZADO, TIPO CAIXA DE SOLOS - Desenvolver um sistema ou máquina flexível, e que possam ser realizadas inúmeras modificações nas configurações, e também, que permitam regulagens das ferramentas de preparo de solo e se consiga executar testes em curtos intervalos de tempo. Que o sistema, também, possibilite além dos parâmetros operacionais de preparo do solo, executar uma avaliação das características físicas do solo de forma automatizada através de ferramental adequado.

- SENSOR DE FORÇA TIPO ANEL OCTOGONAL DUPLO - Construir um sensor de força tipo anel octogonal duplo para avaliações de esforços nos elementos ativos das máquinas agrícolas, o que dispensaria montagens extras, bem como se poderia medir o terceiro eixo de momento, o qual não é possível com o transdutor do presente trabalho.

- MEDIDAS ADICIONAIS EM SOLOS / REGIÕES – Dada a variedade de solos, encontrados no território brasileiro, sugere-se que, além dos testes com os solos já testados em diferentes regiões, outros solos e regiões sejam investigadas, pois o comportamento das semeadoras-adubadoras podem variar em virtude das condições de trabalho. Assim, formar-se-ia um conjunto complementar de informações que poderiam auxiliar a engenharia de desenvolvimento de máquinas agrícolas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Agricultural Engineers, “Agricultural Machinery Management Data”. In: **ASAE standards 2003**: standards engineering practices data. San Joseph, 2003. p.373-380.

AqDados, 2003. “Manual do Usuário”. **Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda.** São Paulo – SP. Revisão 5.

Bagesteiro, L.B., 1996. “**Desenvolvimento de uma plataforma para análise de forças produzidas por pessoas**” – Dissertação de Mestrado. PROMEC – UFRGS.

Balastreire, L.A., 1990. “**Máquinas agrícolas**”. São Paulo: Manole, 307 p.

Beck, J.C.P., 1983. “**Projeto, Construção e Análise de Células de Carga de Placa e de Anel**” Dissertação de Mestrado. PPGEMM - UFRGS.

Bianchini, A. 2002. “**Avaliação de um disco de corte dentado passivo para o preparo de solo em plantio direto**”. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola. UNICAMP Campinas.

Boller, W., 2002. “Máquinas que trafegam sobre o solo e qualidade ambiental”. IV **Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo**. Porto Alegre / RS

Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982a. “**Extensômetros de Resistência Elétrica**”, Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre.

Borchardt I. G., Zaro, M. A., 1982b. “**Instrumentação: Guia Prático de Aulas**”, Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre.

Camacho J. H., 2002. “**Mobilização do solo utilizando combinações de discos duplos e hastes parabólicas para práticas de cultivo**”. Dissertação (Mestrado) – UNICAMP / Campinas – SP

Casão Júnior, R., Chang, C.S., 1993. “Estudo dos esforços tridimensionais em hastes de paraplow em caixa de solo”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 22, 1993, Ilhéus. **Anais...Ilhéus** : SBEA, p.1878-1894.

Casão Junior, R.; Araújo, A.G.; Ralisch, R. 2000a. “Desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 em plantio direto no basalto paranaense”. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.3, p.523-32.

Casão Júnior, R.; Araújo, A.G.; Ralisch, R.; Silva, A.L.; Ladeira, A.S.; Silva, J.C.; Machado, P.; Rosseto, R.; 1998. “ Avaliação do desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 PD no basalto paranaense”. **Circular Instituto Agrônomo do Paraná**, Londrina, n.105, p.1-47.

Casão Júnior, R.; Araújo, A.G.; Ralisch, R.; Siqueira, R.; 2000b. “Análise tridimensional de esforços em semeadora de plantio direto”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 29., 2000, Ceará. **Anais...** Ceará: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 1 CD ROM.

Casão Júnior, R.; Siqueira, R.; Araújo, A.G.; Ralisch, R.; 2000c. “**Dinâmica de semeadoras-adubadoras diretas em Primeiro de Maio**” - PR. Londrina: IAPAR, 2000. 14p. (Boletim Técnico)

Cauduro, C.R., 1992. “**Uma metodologia para auxílio ao projeto mecânico de transdutores extensométricos**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEMM.

Centeno, A. “Correio eletrônico”, 17 jul. 2000. **Re: Informações...** [mensagem pessoal de Romano, 2003].

Cepik, C.T.C., 2002, “**Análise do desempenho de uma haste sulcadora de semeadora-adubadora, em diferentes teores de atua no solo, velocidades e profundidades de trabalho**”. Dissertação de Mestrado. PPG em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS. Porto Alegre.

Chaudhuri, D., 2001. “Performance evaluation of various types of furrow openers on seed drills – a review”. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.79, n.2, p.125-37.

Christianson, L. L.; Rohrbach, R. P.; 1986. “**Design in Agricultural Engineering**”. St. Joseph: ASAE.

Coelho, J.L.D., 1996. “Ensaio e certificações de máquinas para a semeadura”. In: Mialhe, L.G. **Máquinas Agrícolas: ensaios & certificações**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, p.551-70.

Collins, B.A.; Fowler, D.B.; 1996. "Effects of soil characteristics, seeding depth, operating seed, and opener design on draft force during direct seeding". **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.39, p.199-211.

Dallmeyer, A.U., Righes, A.A., Pozzera, J., Ferreira, O.O., Silveira, T.C., Silveira, D.R., Farret, I.S., 1986. "Mobilização do solo por mecanismos de semeadura direta". In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 15., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. p.156-66.

Dally, J. W., Riley, W. F., McConnell, K.G., 1993. "**Instrumentation for Engineering Measurements**", Estados Unidos.

Desbiolles, J.M.A., Godwin, R.J., Kilgour, J. et al.. 1977. "A novel approach to the prediction of tillage tool draught using a standart tine". **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.66, p. 259-309.

Doz, G.; Tamagna, A.; Riera, J.D., 1990. "**Subsídios para o projeto de células de carga sob solicitações dinâmicas**". Porto Alegre: CPGEC – UFRGS. 21p. (Caderno de Engenharia, 41)

Dransfield, P., Willantt, S.T., Willis, A.H., 1964. "Soil-to-implement reaction experience with simple tines at various angles of attach". **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.9, p.220–224.

Embrapa, 1999. '**Sistema brasileiro de classificação de solos**'. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412f.

Embrapa, 1997. "**Manual de métodos de análise de solo**". 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa – SNLCS.

Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha - http://www.febrapdp.org.br/br/evolucao/pd_93-04.htm (atualização de 03/01/2005).

Fielke J. M., 1996. "Interactions of the Cutting Edge of Tillage Implements with Soil". **Journal of Agricultural Engineering Research** . v.63 , p.61-72.

Gebresenbet, G.; Johnson, H. 1992. "Performance of seed drill coulters in relation to seed, depth and rake angles". **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.52, n.2, p.121-45.

Glancey, J.L., Upadhyaya, S.K., Chancellor, W.J. et al., 1989. "An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics". **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.14, p.1-24.

Godwin, R. G., 1975. "An extend octogonal ring transducer for use in tillage studies". **Journal of Agricultural Engineering Research**, 20: 347-352.

Godwin, R. J.; Reynolds, A. J.; O'Dogherty, M. J; Al-Ghazal, A. A.; 1993. "A Triaxial Dynamometer for Force and Moment Measurements on Tillage Implements" **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.55 (3), p.189-205

Grisso, R. D., Yasin, M., Kocher, M. F., 1996. "Tillage implemente forces operating inn silty clay loam". **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, V. 39, n.6, p1977-1982.

Kepner, R. A.; Bainer, R. Barger, E. L., 1972. "**Principles of Farm Machinery**". Connecticut: The Avi Publishing Company.

Kruger, I.R., Palmer, A.L., 1982. "Effects on scarifier draft of soil moisture, depth and speed of tillage". In: Conference on Agricultural Engineering, Armidale. **Proceedings...Armidale** : Institution of Enggineers, Australia, p.123-127.

Kushwaha, R.L.; Zhang, Z.X., 1998. "Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools – a review". **Journal of Terramechanics**, Amsterdã, v. 35, p. 69-86.

Kyowa, "**Strain Gages - A complete lineup of High Prformance Strain Gages and accessories**", Japão.

Levien, R., 1999. "**Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para a implantação da cultura do milho (Zea mays L.)**". Botucatu, UNESP, 1999. 305f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Machado, A.L.T., 2001 "**Esforço de tração para ferramentas de hastes com ponteiros estreitas em dois solos do Rio Grande do Sul**". . 175f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciencia do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Machado, A.L.T.; Reis, A.V. dos; Moraes, M.L.B. de; Alonço, A. dos S.; 1996. “**Máquinas para preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais**”. Pelotas: UFPel, 229p.

Mantovani, E.C., 1999. “Automação do processo de avaliação de desempenho de tratores e implementos em campo”. **Pesq. Agropec. Bras., Brasília, DF.** V.34,n.7, p.1241-1246.

McKyes, E., 1978. “The calculation of draft forces and soil failure boundaries of narrow cutting blades”. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.21, °20-24.

Mialhe, L. G., 1974. “**Manual de Mecanização Agrícola**”. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 301p.

Mialhe, L. G., 1996. “**Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**”. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz.

Mielke, L. N., Grisso, R.D., Bashford, L.L. et al., 1994. “Bi-level subsoiler performance using tandem shanks”. **Applied Engineering in Agriculture**. St. Joseph, v.10, n.3, p. 345-349.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. www.agricultura.gov.br, atualização de 01/06/2004.

Muro, T.; Tran, D. T.; 2004. “Regression analysis of the characteristics of vibro-cutting blade for tuffaceous rock”. **Journal of Terramechanics**, 40:191-219.

O’Dogherty M. J., 1996. “The Design of Octagonal Ring Dynamometers”. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.63 (1),p. 9-18

O’Dogherty, M. J. 1975. “A dynamometer to measure the forces on a sugar beet topping knife”. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 20: 339-345.

Oliveira, M.F.B. de; Siqueira, R.; Ralisch, R.; Araújo, A.G. de; Casão Júnior, R.; 2000 “Mobilização do solo por hastes sulcadores de semeadoras-adubadoras de plantio direto”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 29., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. 1 CD ROM.

Pahl, G.; Beitz, 1996. W. “**Engineering Design: a Systematic Approach**”. Ed. Springer Verlag.

Palmer, A. L., Kruger, I. R., Humphries, M. R., 1983. "Horizontal and vertical forces on scarifier shares: the influence of type, width, speed, depth and position in an array". **Mech. Eng. Trans.** I.E. Aust., v. me8, n.2, p.53-58.

Passos, M.C.; Calandro, M.L. 1999. "**Impactos Sociais e Territoriais da Reestruturação Econômica no Rio Grande do Sul; transformações nas Estratégias de Produção da Indústria de Máquinas e Implementos Agrícolas do Rio Grande do Sul**". Secretaria da Coordenação e Planejamento. Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. Documentos FEE, 14, Porto Alegre.

Payne P.C.J., Tanner D W, 1959. "The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements". **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.4, n. 4, p.312–325.

Pinheiro, J. R., 1999. "**Capacitação Tecnológica na Indústria de Máquinas Agrícolas no Rio Grande do Sul**". Dissertação (Mestrado em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

Plasse, R., Raghavam, G.S.V., McKyes, E., 1985. "Simulation of narrow blade performance in different soils". **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.4, p.1007-1012.

Popov, E., 1978. "**Introdução à Mecânica dos Sólidos**", Editora Edgard Blücher.

Romano, L.N., 2003. "**Modelo de Referencia para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas**". Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

Siqueira, R.; Araújo, A.G.; Casão Júnior R.; Ralisch, R.; 2001a. "Desempenho energético de semeadoras-adubadoras de plantio direto na implantação da cultura da soja (*Glycine max L.*)". In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. 1 CD ROM.

Siqueira, R.; Casão Júnior R.; Ralisch, R.; Araújo, A.G.; 2001b. "Variabilidade da demanda energética de hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras diretas". In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. 1 CD ROM.

Siqueira, R.; Oliveira, M.F.B. de.; Casão Júnior R.; Ralisch, R.; Araújo, A.G.; 2000. “Demanda energética por hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras de plantio direto”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 29., 2000. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. 1 CD ROM.

Souza, W.R.; Magalhães, P.S.G., “Projeto e construção de um transdutor para teste de implementos agrícolas”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 18., 1989, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v.1, p.295-306, 1989.

Spoor, G.; Godwin, R.J. 1978. “An investigation into the deep loosening of soil by rigid tines”. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 23 (3): 243-258.

Streck, E.V. et al., 2002. “**Solos do Rio Grande do Sul**”. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS.

Summers, J.D., Khalilian, A., Batchelder, D.G., 1986. “Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils”. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.1, p.37-39.

Takahashi, C.M.; Mello, L.M.M.; Yano, E.H.; 2001. “Distribuição longitudinal de sementes de milho (*Zea mays* L.) em plantio direto”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. 1 CD ROM.

Thomas, C.A.K., 2003. “**Desenvolvimento de um sistema de medição de deformações em máquinas agrícolas**”, Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.

Watyotha, C.; Salokhe, V.M.; 2001. “Development of a data acquisition system for measuring the characteristic of real time forces by cage wheels”. **Journal of Terramechanics**, 38:201-210.

“Workshop Sobre Mecanização Agrícola na Região de Clima Temperado”, 1, 1994, Pelotas. **Documentos...** Pelotas: EMBRAPA – CPACT, 1996. 135p.

APÊNDICE A

Neste item é apresentada uma bibliografia que foi consultada para realização deste trabalho mas que não foi citada. O objetivo é oferecer referências que possam ser úteis ao leitor.

Cervieri, A., 2000. “**Medição de forças em próteses de membro inferior para ortopedia e dinâmica inversa**” Dissertação de Mestrado. PROMEC – UFRGS.

Gertz, L., 2002. “**Desenvolvimento de plataforma de força para teclado de computador**”, Tese de Doutorado, Promec/UFRGS, Porto Alegre.

Roesler, H., 1997. “**Desenvolvimento de Plataforma Subaquática para Medições de Forças e Momentos nos Três Eixos Coordenados para Utilização em Biomecânica**” Dissertação de Mestrado. PROMEC – UFRGS.

Sites da Internet.

EMBRAPA - Coleção 500 Perguntas – 500 Respostas –
<http://www.cpa0.embrapa.br/publicacoes/500p500r/index.php>

Excel Sensores Ind. Com. e Exportação Ltda. – <http://www.excelsensor.com.br>

Interactive Guide to Strain Measurement Technology – VISHAY -
http://www.vishay.com/brands/measurements_group/guide/guide.htm

John Deere Brasil - <http://www.johndeere.com.br>

Laboratório de Medições Mecânicas da UFRGS – <http://www.ufrgs.br/lmm/>

APÊNDICE B

Curva de calibração da célula de carga de 20 kN, utilizada como padrão secundário para calibração das células octogonais. A calibração foi efetuada com uma máquina de ensaio universal da marca Shimadzu, modelo AG-100kNG, no LEME-UFRGS.

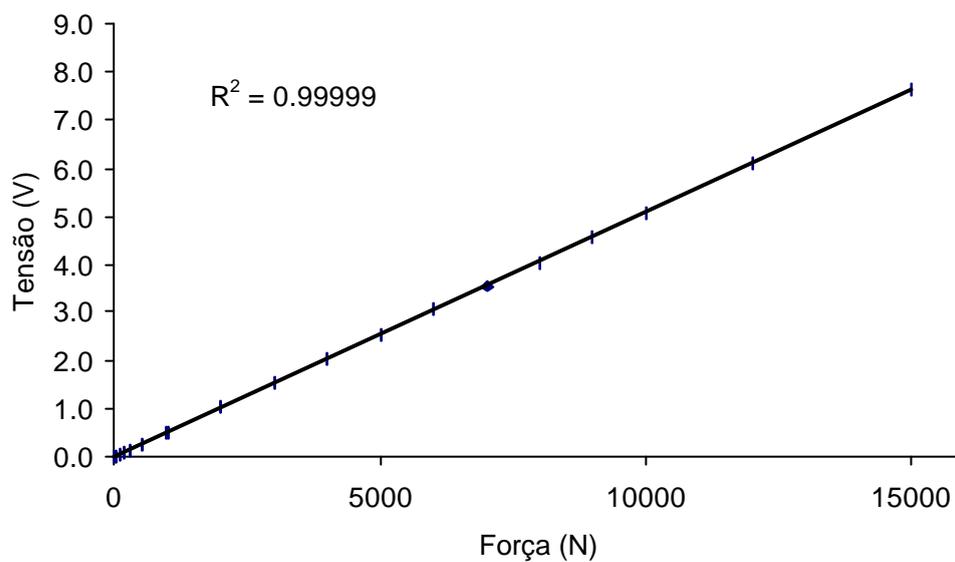


Figura A1 – Curva de calibração da célula de carga tipo S, com capacidade de 20 kN.

APÊNDICE C

Curva de calibração da célula de carga de 100 kN (10 ton.), utilizada na barra de tração do trator. A calibração foi efetuada com uma máquina de ensaio universal no Laboratório de Materiais da John Deere Brasil, em Horizontina.

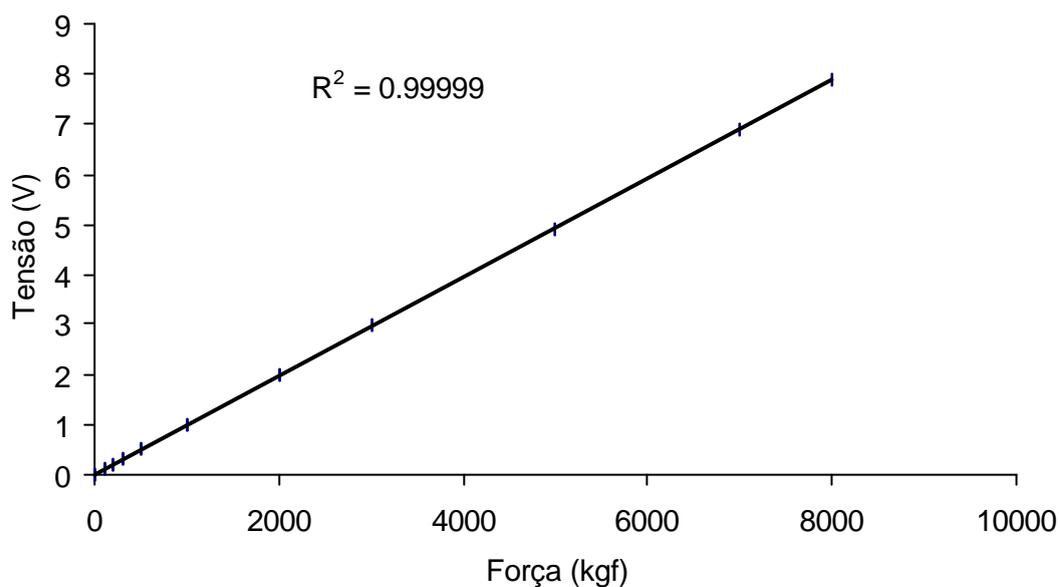


Figura A2 – Curva de calibração da célula de carga uniaxial utilizada na barra de tração do trator, com capacidade de 100 kN (10 ton.).

APÊNDICE D

Teste de duas amostras de solos onde foram realizados os testes no município de Horizontina.



UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE AGRONOMIA - DEPTO. DE SOLOS
LABORATÓRIO DE ANÁLISES

35 anos
Serviço à Agricultura

Laudo de Análise de Solo

NOME: Profº Carlos Ricardo Trein
MUNICÍPIO:
ESTADO:
LOCALIDADE:

DATA DO RECEBIMENTO: 16/09/04
DATA DA EXPEDIÇÃO: 27/09/04

NUM	REGISTRO	ARGILA %	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg/dm ³	K mg/dm ³	M.O. %	Al _{loc.} cmol _c /dm ³	Ca _{loc.} cmol _c /dm ³	Mg _{loc.} cmol _c /dm ³
1	850/6	>56	6.2	6.3	13	>400	3.6	0.0	6.3	3.3
2	850/7	>56	6.1	6.3	16	262	3.5	0.0	7.3	3.5

Argila determinada pelo método do densímetro; pH em água 1:1; P e K determinados pelo método Mehlich I; M.O. por digestão úmida; Ca, Mg, Al, Mn, e Na trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; S-SO₄ extraído com Ca-EDTA, 500 mg L⁻¹ de P; Zn e Cu extraídos com HCl 0,1 mol L⁻¹; B extraído com água quente.

NUM	Al+H cmol _c /dm ³	CTC cmol _c /dm ³	% SAT da CTC		RELAÇÕES			SUGESTÃO DE CALAGEM p/PRNT (t ha ⁻¹)			
			BASES	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	100	85	70	55
1	3.1	13.8	78	0.0	1.9	6	3.1				
2	3.1	14.6	79	0.0	2.1	11	5				

CTC a pH 7,0. Necessidade de calcário para atingir pH 6,0 - calculada pela média dos métodos SMP e Al+H. Sugestão válida no caso de não ter sido feita calagem integral nos últimos 3 anos e sob sistema de cultivo convencional. No sistema plantio direto, consultar um agrônomo.

NUM	S mg/dm ³	Zn mg/dm ³	Cu mg/dm ³	B mg/dm ³	Mn mg/dm ³	Fe g/dm ³	Na mg/dm ³	OUTRAS DETERMINAÇÕES
1	6.1	4.3	3.5	0.6	1			
2	7.1	2.1	3.1	0.6	1			

Consulte um agrônomo para obter as recomendações de adubação

NUM	IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA
1	Fazenda Mimosa (0-20cm)
2	Fazenda Manjabosco (0-20cm)



Clesio Gianello
Engº Agrº CREA nº Reg 25.642
Chefe do Laboratório de Análises

Laboratório de Análises de Solo - Av. Bento Gonçalves, 7712 - Porto Alegre - RS - CEP 91540-000
Fones/Fax: (0xx51) 3316-6023 - 3316-7457 - 3316-7459 - E-mail: labsofos@bol.com.br

APÊNDICE E

Tabela referente a figura 6.14.

Profundidade da Haste (cm) nominal	Tipos de Haste		Média
	15 mm espessura ataque 25	22 mm espessura ataque 36	
10	2246	1447	1846,3 a
15	3057	2743	2900,1 b
20	4163	3530	3846,5 c
	3155,5 A	2579,1 B	

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

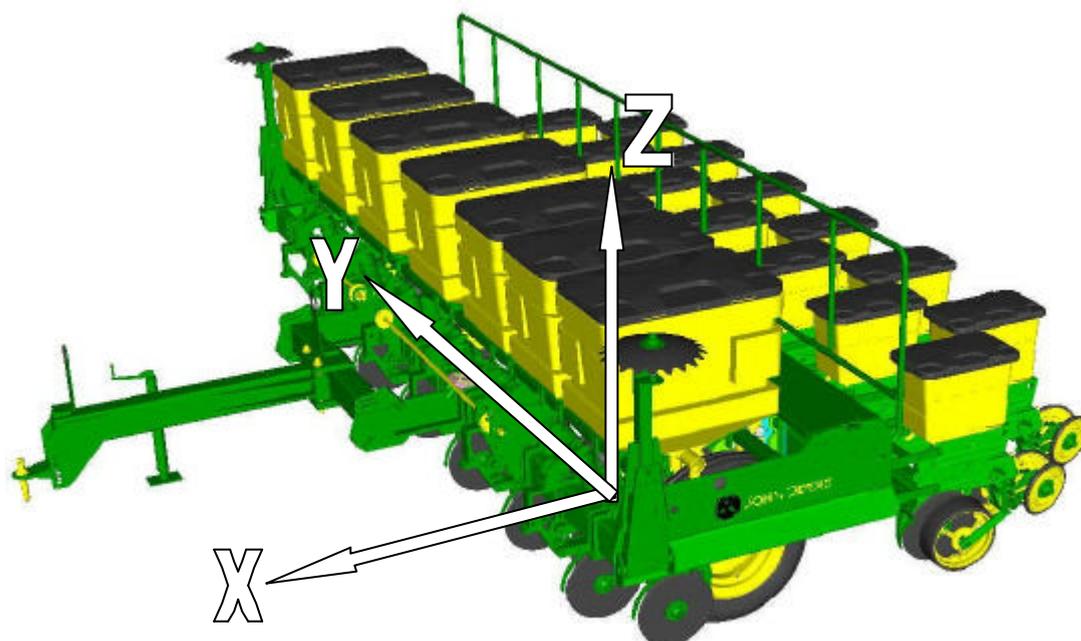
Tabela referente a figura 6.15.

Profundidade da Haste (cm) nominal	Tipos de Haste		Média
	15 mm espessura ataque 25	22 mm espessura ataque 36	
10	2268 Aa	3073 Ba	2670,5
15	3800 Ab	4198 Ab	3999,3
20	5329 Ac	4866 Ac	5097,1
	3799,0	4045,7	

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

APÊNDICE F

Orientação das direções. O eixo X representa a direção Horizontal, que é a direção do esforço de tração. O eixo Z representa a direção Vertical. O eixo Y representa a direção Transversal.



APÊNDICE G

Desenho esquemático da montagem realizada na figura 5.5.

