

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

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM
MÁQUINAS AGRÍCOLAS

por

Carlos Alberto Kern Thomas

Dissertação para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, novembro de 2003.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM
MÁQUINAS AGRÍCOLAS.

por

Carlos Alberto Kern Thomas
Engenheiro Eletricista

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

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Vilson João Batista

Aprovada por:

Prof. Dr José Antônio Esmério Mazzaferro – PROMEC- UFRGS

Prof. Dr. Carlos Ricardo Trein – Agronomia – UFRGS

Prof. Dr. Luiz Carlos Gertz - ULBRA

Prof. Dr. Milton Antônio Zaro - ULBRA

Prof. Dr. Jun Fonseca
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, novembro de 2003.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Hugo Thomas e Leny Kern Thomas,
e a minha companheira Helen Mattos

AGRADECIMENTOS

A minha querida família, meu modelo de dignidade e honestidade, pelo amor, dedicação e privações em prol do meu futuro.

A minha amada Helen pela paciência, compreensão e companheirismo.

Ao amigo Professor Vilson João Batista pelo apoio, orientação, disponibilidade e otimismo. Por ser um exemplo de superação e determinação, assim como principal incentivador para realização deste trabalho.

Ao dedicado Professor Milton Antônio Zaro (meu “guru” e eixo principal do LMM que certamente ficou na memória de todos que por lá passaram), por ter me dado o privilégio de compartilhar a sua sabedoria e amizade ao longo da minha carreira nesta Universidade.

Aos incansáveis parceiros André Cervieri, Guilherme Schmidt e André Schneider, pela incalculável contribuição na coleta de dados sobre semeadoras, restaurantes e bares.

A John Deere, por investir na idéia de parceria entre Empresa e Universidade na realização de pesquisas, tornando viável este trabalho. Em especial aos funcionários Hugo, Mostiack, Edy, Jorge e Charles, pelo apoio, paciência e companheirismo.

Aos “colegas” Gertz, Klafke e Nabinger, pelas conversas e trocas diárias de experiências, que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Giovanni, grande assador, que no dia-a-dia coloca em “xeque” muitas das minhas idéias e convicções, contribuindo sobremaneira para o meu amadurecimento.

Ao inteligentíssimo Maciel, pelo árduo trabalho de programação do SAD, pelas longas discussões e questionamentos técnicos que muito me ajudaram.

Ao Sobczyk, figura de muitas consoantes e fiel seguidor, pelo auxílio nas traduções.

A UFRGS por ser Pública, Gratuita e de Qualidade, que me proporcionou chegar a um título de pós-graduação.

Aos meus velhos amigos de Montenegro e da rua República, que me fazem companhia em horas de descontração ao longo destes anos.

Aos membros do Pink Floyd, por terem criado uma maravilhosa obra musical que muito me encanta.

E a todos que de alguma forma contribuíram este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um projeto para análise experimental em semeadoras agrícolas a fim de levantar dados sobre as deformações e solicitações mecânicas na sua estrutura, bem como nos diversos componentes da máquina. Visa-se o desenvolvimento de uma ferramenta / metodologia que permita localizar as regiões de maior deformação mecânica, quantificar estas deformações e registrá-las de forma dinâmica com a máquina realizando seu trabalho em campo para posterior análise dos dados.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada a averiguação do estado da arte na análise experimental de tensões. Posteriormente foi feito um estudo para verificar quais dos métodos experimentais poderiam ser utilizados e qual destes métodos poderia apresentar melhores resultados para este caso. As características básicas de cada método receberam classificação e estes dados foram colocados em um programa comercial de QFD. Este estudo considerou que o baixo custo de implementação e a facilidade de operação devem apresentar maior importância. O estudo mostrou que nenhum dos métodos isoladamente atende a todos os requisitos exigidos. A fim de que atender as necessidades decidiu-se pela aplicação de dois métodos: Camada Frágil e Extensometria. O primeiro método utilizado inicialmente para localizar os pontos de maior deformação do equipamento, enquanto o segundo método fornece dados quantitativos para a posterior análise dos dados. Assim, os dois métodos escolhidos são apresentados com maior detalhamento. Este trabalho ainda apresenta uma descrição de problemas encontrados na aplicação de cada método, bem como as soluções adotadas; descreve detalhes de equipamentos e materiais comerciais utilizados e discute detalhes do processo experimental empregado. Posteriormente são discutidos os erros experimentais.

Os resultados obtidos demonstram que o método escolhido atendeu as necessidades e que foi capaz de proporcionar arquivos contendo dados sobre as deformações mecânicas dos componentes quando submetidos aos carregamentos dinâmicos encontrados no trabalho em campo.

ABSTRACT

The present work presents the development of a project for experimental analysis in agricultural planters in order to lift data on the deformations and mechanical requests in its structure, as well as in the several components of the machine. The development of a tool is sought / methodology that allows to locate the areas of larger mechanical deformation, to quantify these deformations and to register them in a dynamic way with the machine accomplishing its work in field for subsequent analysis of the data.

For the development of this work a verification of state of art was accomplished in the experimental stress analysis. Later was made a study to verify which could be used of the experimental methods and which could of this method presents better results for this case. The basic characteristics of each method received a classification and these data were inputted in a commercial program of QFD. This study considered the low cost of implementation and the operation easiness should present larger importance. The study showed that none of the methods separately assists it all of the demanded requirements. So that to assist the needs it decided for the application of two methods: brittle-coating and strain gage. The first method initially used to locate the points of larger deformation of the equipment, while the second method supplies quantitative data for the subsequent analysis of the data. Like this, the two chosen method are detailed presented. This work still presents a description of problems found in the application of each method, as well as the adopted solutions; it describes details of equipments and commercial materials used and it discusses details of the experimental process employee. Later the experimental mistakes are discussed.

The obtained results demonstrate that the chosen method assisted the needs and that it was capable to provide files containing data about the mechanical deformations of the components when submitted to the dynamic shipments found in the field work.

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - Motivação do trabalho.....	2
1.2 – Objetivos.....	3
1.3 – Estrutura do presente trabalho.....	3
1.4 – Limitações deste trabalho.....	4
2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E O ESTADO DA ARTE NO PROCESSO DE ANÁLISE DE TENSÕES	5
2.1 – Introdução.....	5
2.2 - Métodos numéricos.....	5
2.3 – Métodos experimentais.....	7
2.3.1– Cobertura frágil.....	7
2.3.2 – Fotoelasticidade.....	9
2.3.3 – Interferometria.....	15
2.3.3.1 – O método de Moiré.....	16
2.3.4 – Extensometria.....	18
2.3.4.1 Princípio básico do extensômetro de resistência elétrica:.....	19
3 – DETERMINAÇÃO DOS MÉTODOS EMPREGADOS E INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE SEMEADORAS AGRÍCOLAS.....	23
3.1 – O Projeto: Escolha do Método.....	23
3.2 – Considerações Sobre os Métodos.....	26
3.2.1 – Camada frágil.....	26
3.2.1.1 – Efeitos de mudança na umidade.....	27
3.2.1.2 – Efeitos de temperatura.....	27
3.2.1.3 – Subcobertura.....	28
3.2.1.4 – Aplicação da camada.....	28
3.2.1.5 – Secagem.....	29
3.2.1.6 – Calibração da cobertura.....	29
3.2.1.7 – Rachaduras na cobertura	30
3.2.1.8 – Uso em ambientes abertos.....	31
3.2.2 – Extensometria.....	31
3.2.2.1 - Resistência elétrica da grade.....	31

3.2.2.2 – Dimensões.....	32
3.2.2.3 – Material da grade e fator gage.....	32
3.2.2.4 – Configuração da grade.....	33
3.2.2.5 – Compensação térmica.....	33
3.2.3.6 – Algumas limitações.....	34
3.2.2.7 – Preparação de superfície e colagem.....	35
3.2.2.8 – A ponte de Wheatstone.....	36
3.2.2.9 – Cuidados especiais.....	38
3.3 – Informações Básicas Sobre Semeadoras Agrícolas.....	40
3.3.1 – O sistema de Plantio direto.....	40
3.3.2 – A semeadora Agrícola.....	41
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1 – Materiais e suas Aplicações nas Semeadoras.....	45
4.2 – Hardware e software empregados.....	49
4.3 – Procedimento Experimental Adotado.....	50
4.4 – Levantamento do Erro Associado ao Método.....	54
5 – RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1 – Camada Frágil.....	57
5.2 – Strain Gages: Calibração e Ajuste de zero.....	58
5.3 – Dados em Tensão elétrica.....	59
5.4 – Dados em Deformação Relativa.....	60
5.5 – Transformada Rápida de Fourier	60
5.6 – Ruídos nas Medições.....	61
5.7 – Multiplexação dos Dados.....	62
5.8 – Recursos de Software Utilizados.....	62
5.9 – Apresentação final dos Resultados.....	65
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	66
6.1 - Conclusões.....	66
6.2 - Sugestões de continuidade.....	67
7 – BIBLIOGRAFIA.....	68
8 – ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	página
2.1	Estrutura plana (a) e o modelo de elementos finitos(b). Fonte: Budynas,1977.....	6
2.2	Ilustração do resultado obtido na análise por elementos finitos na estrutura de uma semeadora de grãos.....	7
2.3	Quadro de distribuição de tensões obtido com o método. Fonte: Dally e Riley, 1991.....	8
2.4	Diferentes padrões de trinca, indicando regiões de diferentes tensões mecânicas médias: possibilidade de quantificar os resultados.Fonte:James W. Phillips,	9
2.5	Franjas de diferentes ordens obtidas com diferentes carregamentos: menor (a) e maior (b). Fonte: Vishay web site.....	10
2.6	Representação da polarização da luz.....	10
2.7	Análise da luz com dois filtros polarizadores dispostos ortogonalmente.....	11
2.8	Representação esquemática de um polariscópio plano. Fonte: James W. Phillips.....	12
2.9	Representação esquemática de um polariscópio de transmissão.Fonte: James W. Phillips.....	12
2.10	Franjas isóclinas a) e isocromáticas b) obtidas através da fotoelasticidade. Fonte: James W. Phillips.....	13
2.11	Polariscópio para análise de modelos.	14
2.12	Aplicação do material fotoelástico sobre o componente a) e representação esquemática do polariscópio de superfície b). Fonte: Vishay web site.	15
2.13	Interferência observadas pela superposição de duas grades ópticas. Fonte: Home page da Universidade de Glasgow	17
2.14	Padrão típico das franjas obtidas pelo método de Moiré em um disco circular submetido a compressão. Fonte: Dally e Rilley, 1991.....	17
2.15	Representação de condutor de comprimento l e área da secção transversal A	19
2.16	Tipos comerciais de strain gages: grade plana a) e folha b). Fonte: Borchardt e Zaro,1982.....	21

3.1	Fases do projeto de experimentos. Fonte: Ribeiro, 1996.....	23
3.2	Casa da qualidade obtida com QFD4.....	25
3.3	Gráfico para escolha do Stresscoat em função da temperatura e humidade. Fonte: J.W. Phillips.....	27
3.4	Aspecto de uma aplicação tecnicamente aprovada: amarelo e polido.....	28
3.5	Barras de calibração do Stresscoat.....	29
3.6	Esquema do dispositivo calibrador das barras.....	30
3.7	Rachaduras observadas sobre a camada frágil.....	30
3.8	Aspecto geral de um “strain gage” comercial.....	31
3.9	Strain gage muito longo: erro de medição. Fonte: Barreto Jr.....	32
3.10	Strain gage uniaxial único.Fonte: Catálogo Kyowa.....	33
3.11	Extensômetro tipo roseta triaxial. Fonte: Catálogo Micro-Measurements.....	33
3.12	Compensação térmica do strain gage - figura adaptada. Fonte: Manual de strain gages fabricados pela Micro-Measuremenst.....	34
3.13	Diagrama elétrico da Ponte de Wheatstone.....	36
3.14	Braços da Ponte de de Wheststone – Figura adaptada. Fonte: Borchadt e Zaro, 1982.....	36
3.15	Análise do erro causado pela simplificação.....	38
3.16	Esquema da configuração ¼ de ponte, ligação a dois fios. Figura adaptada. Fonte: Measurements Group TT-612.....	38
3.17	Esquema da configuração ¼ de ponte, ligação a 3 fios. Figura adaptada.Fonte: Measurements Group TT-612.....	39
3.18	Lavoura de plantio direto: plantio sobre a palha.....	40
3.19	Semeadora agrícolaFonte: Web site John Deere.....	41
3.20	Vista esquemática lateral de uma a semeadora.....	42
3.21	Conjunto disco de corte e sulcador.Fonte: Tecmaster web site.....	42
3.22	Diferentes ferramentas usadas para o fechamento dos sulcos.....	43
3.23	Diferentes soluções para a função de transporte de adubo e sementes.....	43
4.1	Peça após a aplicação do jato de areia.....	45
4.2	Peça de uma semeadora coberta por Stresscoat®	46
4.3	Marcação dos três pontos.....	46
4.4	Superfície metálica após o uso de lixas com diferentes granulometrias.....	47
4.5	Aplicação do ácido fraco e álcool isopropílico com o auxílio de uma pinça com	

algodão.....	47
4.6 Aplicação do adesivo sob o strain gage.....	48
4.7 Resistores fixados junto ao ponto de medição.....	48
4.8 Proteção de borracha de silicone.....	49
4.9 Componentes de baixa frequência contidos no sinal.....	51
4.10 Registro de dados de deformação típicos apresentados pelo no Excel [®]	53
4.11 Informações adicionais contidas nos arquivos.....	53
4.12 Calibração do sistema de aquisição com o auxílio de um resistor calibrador.....	54
4.13 Alinhamento do strain gage.....	55
5.1 Padrão de trincas formadas devido a esforço de tração.....	57
5.2 Rugas formadas na Camada Frágil devido a compressão aplicada.....	58
5.3 Modo numérico de apresentação de dados no SAD32.....	59
5.4 Apresentação gráfica dos dados: 16 curvas de tensão em função do tempo.....	59
5.5 Gráficos das deformações relativas em função do tempo.....	60
5.6 FFT dos sinais adquiridos.....	61
5.7 Sinal com ruído elétrico presente.....	61
5.8 Mistura de dados adquiridos nos diferentes canais.....	62
5.9 Recurso de Zoom do SAD32.....	63
5.10 Exibição dos dados estatísticos de determinado canal.....	63
5.11 Sinal com ruído (verde) e após aplicação do filtro média móvel 30Hz (preto).....	64
5.12 Sinais: original (□, vermelho) e sub amostrado(○, azul).....	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Descrição	página
2.1	Sensibilidade dos strain gages para diferentes materiais de grade.....	20
3.1	Voz do cliente.....	24

LISTA DE SÍMBOLOS

I	intensidade luminosa transmitida	[lux]
I_m	intensidade máxima de transmissão	[lux]
θ	ângulo entre as direções de propagação dos filtros	[$^{\circ}$]
$\mu\epsilon$	deformação relativa	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
l	comprimento do condutor	[m]
A	área da seção transversal	[m^2]
ρ	resistividade do material	[Ω/m]
R	resistência elétrica	[Ω]
ν	coeficiente de Poisson	[m/m]
D	diâmetro da seção circular transversal	[m]
k	Fator Gage	[m/m]
E	Tensão de Alimentação da ponte	[V]
e_o	tensão de saída	[V]
ΔR	Variação da resistência elétrica	[Ω]
R_L	Resistência elétrica de um fio de ligação	[Ω]

1 - INTRODUÇÃO

As modernas técnicas de estabelecimento de culturas agrícolas exigem maiores investimentos em tecnologia e equipamentos. É necessário que os agricultores tenham cuidados em todas as etapas do cultivo: escolha das sementes, preparação do solo, colheita e armazenamento. Se a mecanização agrícola auxilia o produtor rural a obter mais produtividade, em contrapartida, a sucessiva utilização de pesadas máquinas pode causar efeitos indesejados no solo.

Faz-se necessário que o agricultor se preocupe com muitos detalhes para obter bons lucros com o cultivo. Os altos custos envolvidos nos diversos cultivos exigem a maximização da produtividade. Para isto, não basta simplesmente investir em espécies de maior produtividade. Também são importantes as modernas tecnologias de preparação do solo (físico e quimicamente) e plantio. A perfeita distribuição de fertilizante e sementes sobre o solo é de fundamental importância para um bom resultado final. Desta forma, são necessários pesados investimentos não só em tratores e implementos para preparação do solo, como também nos equipamentos de distribuição de adubo e sementes. Uma semeadora deve executar esta tarefa.

Preparada a lavoura, escolhidas as sementes e definidos a quantidade e o tipo de adubo, é iniciada a etapa de regulagem da semeadora. Esta deve apresentar versatilidade e facilidade para estas regulagens. Também deve apresentar uma boa autonomia, ou seja, capacidade de transporte de adubo e sementes para cobrir a maior área possível. O reabastecimento é normalmente demorado e trabalhoso, envolvendo muitas pessoas. Por este motivo, os fabricantes se preocupam em oferecer semeadoras com boa autonomia: capacidade de transportar boa quantidade de sementes e adubo. Transportar grandes volumes de sementes e adubo significa carregar muito peso, necessitando tratores potentes e pesados (com mais lastro) para poder movê-las. Significa também que a estrutura mecânica da semeadora deve estar preparada para suportar estas cargas, bem como os esforços mecânicos envolvidos na tarefa de distribuir adubo e sementes. O aumento de peso aumenta a pressão exercida sobre o solo, causando uma maior compactação do mesmo. Esta compactação pode prejudicar o crescimento das plantas e a consequência final é uma baixa na produtividade. Além disto, quanto mais compactado estiver o solo, mais energia deverá ser utilizada para o plantio, causando maior gasto de combustível e o consequente aumento indesejado de custo.

Se por um lado é desejável uma semeadora que transporte o máximo de sementes e adubo, por outro, é necessária a menor compactação do solo. Portanto a massa do próprio equipamento é de fundamental importância. Assim sendo, o projeto de um equipamento de

semeadura deve levar em consideração que fatores como peso e autonomia são de fundamental importância e que a robustez também é desejada.

1.1 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Talvez uma das maiores preocupações do homem neste início de século seja com relação à preservação do meio ambiente. A exploração mineral e vegetal, o crescimento da indústria, e a necessidade de aumentar as áreas de cultivo de alimentos fez com que o ser humano devastasse de modo irreversível grande parte do meio onde vive.

A simples relação entre a atual população mundial e a área de terra disponível para o cultivo de alimentos já é motivo de preocupação. Somando-se a isto o fato de que o crescimento populacional continua a ocorrer, a conclusão é simples: enquanto o ser humano não estabelecer uma relação racional entre meio ambiente, área para o cultivo de alimentos e a população mundial, continuará ocorrendo destruição do meio ambiente, ou a fome já observada em diversas regiões tenderá a se estender.

Enquanto não se obtém uma solução que estabeleça a perfeita harmonia entre a população humana (e suas necessidades) e o meio ambiente, existe a necessidade da otimização dos recursos disponíveis bem como das áreas produtivas para que, no mínimo, o crescimento da fome e a destruição do meio ambiente sejam contidos.

Preservar o pouco que resta de meio ambiente não devastado pode significar a necessidade de aumentar o rendimento das áreas cultivadas. Deve-se procurar um aumento da produção de alimentos sem aumentar as áreas de cultivo.

O desejado aumento de rendimento pode ser obtido com o aperfeiçoamento genético das espécies cultivadas, o correto controle de pragas e com tecnologia e mecanização das lavouras.

O engenheiro pode contribuir de forma significativa na melhoria da mecanização das culturas. Muitas das máquinas existentes atualmente podem apresentar um rendimento ainda maior. Além disto, as máquinas agrícolas e as novas tecnologias deverão ter a sua utilização estendida aos pequenos e médios agricultores.

Contribuir para baixar os custos de produção e conseqüentemente o custo final de equipamentos, assim como melhorar a performance dos já existentes, é a principal motivação para a realização deste trabalho.

1.2 – OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é implementar uma ferramenta de apoio na avaliação de projeto de máquinas e implementos agrícolas. Esta ferramenta consiste em quantificar (a partir de um sistema de aquisição de dados auxiliado por microcomputador) as deformações/tensões mecânicas nos diversos componentes de máquina durante o uso. A partir destes dados, a equipe de engenharia da empresa poderá estimar o tempo de vida útil do componente / implemento, prever a sua falência e fornecer subsídios para redimensionamento, determinação de novas geometrias, utilização de diferentes materiais ou mesmo para criar novo processo de fabricação da sua estrutura e de seus componentes mecânicos, quando necessário. Além disto, através da ferramenta desenvolvida neste estudo, são obtidas importantes informações para a realização de simulações e análises numéricas, possibilitando o refinamento e “calibração” de modelos numéricos. Desta forma, pode-se criar um banco de dados que irá auxiliar o projeto de novas máquinas, bem como otimizar as já existentes.

1.3 - ESTRUTURA DO PRESENTE TRABALHO

O presente estudo foi estruturado em 6 capítulos:

No capítulo 1 são fornecidas algumas informações gerais para a compreensão do trabalho. Também são descritas a motivação, o objetivo e a estrutura assim como as limitações desta dissertação.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica descrevendo e caracterizando os métodos experimentais mais comuns. Além disto, dada a necessidade do tema, realizou-se também um levantamento do estado da arte.

O capítulo 3 apresenta um estudo dos métodos mais indicados para o caso através do QFD, bem como Os fundamentos teóricos sobre cada método utilizado. Ainda se encontra neste capítulo uma apresentação de informações básica sobre as semeadoras agrícolas comerciais utilizadas neste estudo.

No capítulo 4 são apresentados a metodologia e os materiais utilizados para a realização dos testes, assim como a discussão e a análise dos erros experimentais existentes.

No capítulo 5 são mostrados alguns registros dos resultados experimentais obtidos nos sucessivos testes efetuados em diferentes equipamentos.

O capítulo 6 finaliza o trabalho, colocando conclusões decorrentes da análise dos resultados obtidos e apresentando sugestões para melhorar estes resultados e complementar o presente estudo.

1.4 – LIMITAÇÕES DESTE TRABALHO

A medição das deformações / tensões mecânicas nos componentes de máquina, assim como a qualificação do material e método de fabricação bem como uma análise criteriosa dos resultados obtidos é fundamental para o sucesso do processo de verificação do projeto. Este estudo tem como principal objetivo, alcançar uma melhor qualidade dos dados coletados e não a análise destes. Esta é a principal limitação do presente trabalho.

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS E O ESTADO DA ARTE NO PROCESSO DE ANÁLISE DE TENSÕES

2.1 INTRODUÇÃO

O principal papel da análise de tensões é verificar a distribuição das cargas aplicadas a uma máquina e/ou componente desta. Há vários casos em que mais de uma solução pode ser adotada para resolver os requisitos de um projeto. A melhor ou o mais barata solução deve ser escolhida. A base de um projeto sempre deve assumir que as cargas fluem pela estrutura. A consideração destes fatos guia o projetista acerca da forma e do material a serem escolhidos.

Para facilitar o estudo da distribuição de cargas e conseqüentes deformações, recorre-se freqüentemente a cargas que simulem as condições de serviço da estrutura, medindo-se as deformações nas áreas críticas. Também pode ser escolhido o recurso de estudar a estrutura em um modelo reduzido proporcionalmente.

Várias são as técnicas empregadas com a finalidade de verificar as tensões/deformações mecânicas de uma estrutura e elas podem ser separadas em dois grupos: os métodos numéricos e os métodos experimentais.

2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

É crescente a utilização de métodos numéricos para solução de problemas em engenharia. Ferramentas matemáticas, computacionais ou não, que fornecem soluções teóricas para estes problemas são chamadas de métodos numéricos. A crescente utilização do computador permitiu o desenvolvimento de poderosos métodos e técnicas numéricas para a solução de problemas complexos. Com o uso do computador é possível realizar integrações e diferenciações numéricas, além de solucionar sistemas e equações lineares ou não. A utilização de métodos como diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos permitiram o surgimento de poderosos softwares para solução de problemas comuns em engenharia.

Segundo Gertz (2002), “na análise estrutural o objetivo é a determinação da resposta do sistema em termos de campo de deslocamento, das deformações e/ou tensões internas, sob aplicação de cargas externas. Neste caso, é possível formular os problemas em termos de um sistema de equações diferenciais lineares ou não, definindo suas condições de contorno, ou de valor inicial segundo o caso. Muitas vezes estes problemas não tem solução analítica fechada. Na busca destas soluções, a partir do final do século passado, os engenheiros e matemáticos

dedicaram-se a desenvolver métodos que permitissem a solução aproximada destes modelos. Como resultado destes estudos, além do desenvolvimento dos computadores, surgiram vários métodos, como o Método das Diferenças Finitas, e mais recentemente, a Análise Matricial das Estruturas, que deu origem ao Método dos Elementos Finitos”.

A figura 2.1(a) representa uma estrutura plana. A pressão aplicada causa deformações e tensões. O modelo de elementos finitos, figura 2.1(b), é formado por áreas planas. Os pontos pretos, chamados nós, indicam onde os elementos são conectados uns aos outros. Neste modelo, cada nó tem dois graus de liberdade: isto é, cada nó pode deslocar-se na direção x e na direção y. Assim, se existem n nós, existem $2n$ graus de liberdade no modelo. (Na estrutura real existem infinitos graus de liberdade, por que a estrutura é composta por infinitas partes). As equações algébricas que descrevem o modelo são resolvidas para determinar os graus de liberdade.

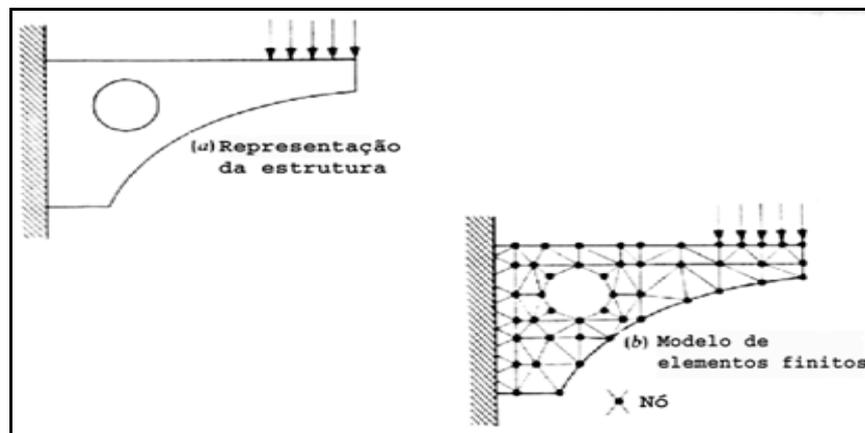


Figura 2.1 – Estrutura plana (a) e o modelo de elementos finitos(b)

Fonte: Budynas,1977.

Basicamente, o método consiste em obter uma solução numérica, portanto teórica, levando em consideração as propriedades físicas e posicionamento dos elementos, quando aplicado um carregamento/deslocamento a estrutura. Obtém-se como resultado (figura 2.2) o campo de deslocamento/deformação da estrutura no qual as diferentes cores correspondem aos vários níveis de deslocamento/deformação submetidos a estrutura.

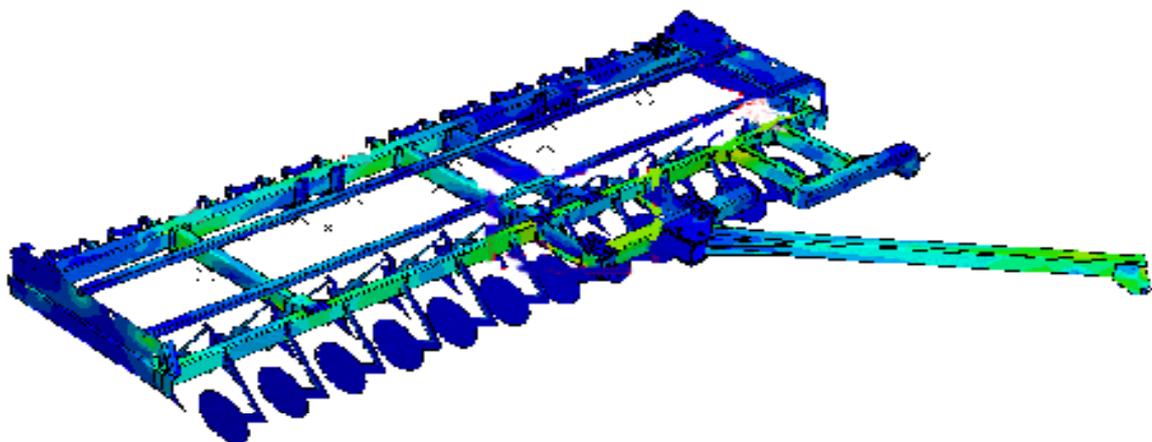


Figura 2.2 – Ilustração do resultado obtido na análise por elementos finitos na estrutura de uma semeadora de grãos.

Convém salientar que para obter sucesso na utilização de um método numérico (teórico), é necessário que as informações fornecidas (propriedades físicas, dimensionamentos e cargas/deslocamentos aplicados), sejam bem caracterizados.

2.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Em análise de tensões, quando a solução teórica é impraticável devido a custos, tempo, treinamento de pessoal, ou quando alguns dados não são conhecidos recorre-se a métodos experimentais. Na fase de projeto, modelos em escala podem ser analisados experimentalmente. Se a máquina (ou seu componente) já existe, pode facilmente ser analisada através de métodos experimentais. Esforços, tensões, deslocamentos ou deformações podem ser medidos através destes métodos. Existem diversos métodos experimentais para a análise de tensões. Entre eles podemos citar a Cobertura Frágil, a Extensiometria (Strain Gages), a Fotoelasticidade e a Interferometria dentre outros.

2.3.1 COBERTURA FRÁGIL

O método de cobertura frágil baseia-se em aplicar uma fina cobertura de um material de comportamento frágil (pouco dúctil) sobre o componente mecânico a ser analisado. Em seguida, é aplicado o carregamento que irá causar deformações mecânicas neste componente e,

conseqüentemente, na cobertura. Deformações na superfície do componente causam fissuras na camada de cobertura, proporcionais a tensão superficial do componente.

O método é empregado para a rápida detecção de áreas de concentração de tensão/deformação. Ele provê também a direção das tensões principais (as fissuras na cobertura são sempre perpendiculares à direção de tensão principal). A cobertura permite um estudo completo de todo o campo de deformação.

Segundo Dally e Riley (1991), coberturas frágeis se formam naturalmente em processos de laminação a quente: observa-se uma fina camada oxidada na superfície do material.

Para Budynas (1977), o método da cobertura frágil proporciona um resultado rápido e direto para muitos projetos industriais onde não é necessária uma extrema precisão.

Como a cobertura se quebra em função da tensão da superfície abaixo dela, esta quebra indica a direção e a magnitude da deformação da estrutura. Estes provêm um quadro gráfico da distribuição e magnitude das tensões envolvidas (figura 2.3). A cobertura se quebra sob uma tensão de valor predeterminado e tal valor pode ser encontrado através de um método simples de calibração.

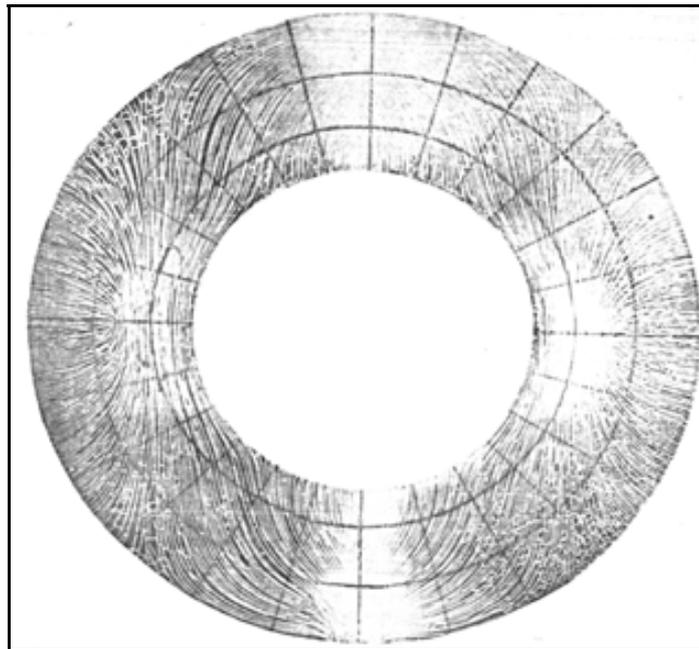


Figura 2.3 – Quadro de distribuição de tensões obtido com o método de cobertura frágil.

Fonte: Dally e Riley, 1991.

Segundo a Stresscoat®, o método oferece resultados quantitativos (figura 2.4) com uma incerteza de +/- 10% quando executado cuidadosamente.

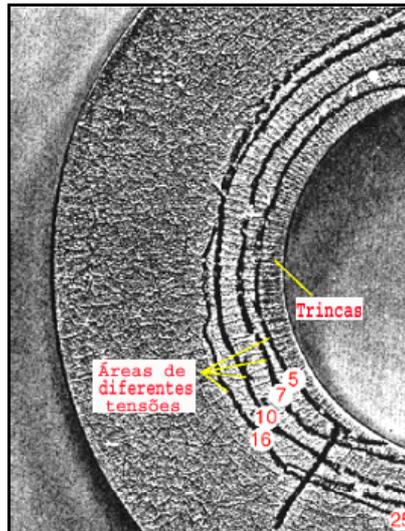


Figura 2.4 – Diferentes padrões de trinca, indicando regiões de diferentes tensões mecânicas médias: possibilidade de quantificar os resultados.

Fonte: Phillips- 2000

Este é um método relativamente simples e de baixo custo, no entanto, convém salientar que a temperatura ambiente, a temperatura do componente mecânico sob análise e a umidade relativa do ar afetam a sensibilidade e os resultados obtidos.

Embora este seja um método muito antigo, ainda é amplamente utilizado. Recentemente, Abdul-Baqi *et al.* (2002) realizaram uma análise numérica (elementos finitos) na cobertura frágil sobre um substrato dúctil com uma falha mecânica induzindo fissuras na cobertura. Neste estudo, verificam o início das trincas, o avanço e o espaçamento entre elas, os parâmetros e as influências.

2.3.2 FOTOELASTICIDADE

Este método consiste basicamente em relacionar a ordem das franjas de interferência (figura 2.5) obtidas em um material fotoelástico sob luz polarizada, com as tensões mecânicas a que este foi submetido.

Timoshenko (1979), comenta que a fotoelasticidade tem se revelado muito útil para os casos onde as distribuições de tensões sejam muito difíceis de ser determinadas analiticamente.

A fotoelasticidade tem a rapidez como característica principal, pois associada ao método está o mapeamento visual do campo de tensões, obtido através do padrão de franjas [Álvarez,1998].

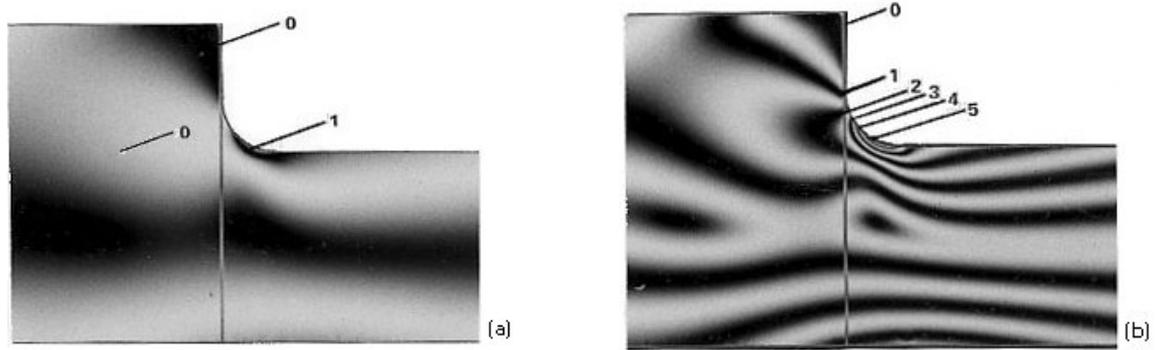


Figura 2.5 – Franjas de diferentes ordens obtidas com diferentes carregamentos: menor (a) e maior (b).

Fonte: Vishay web site

Quando a luz atravessa um filtro polarizador (fig 2.6), apenas os componentes cujos vetores vibram paralelamente à direção de orientação do filtro serão transmitidos e os outros vetores serão absorvidos pelo filtro.

Caso sejam utilizados dois filtros polarizadores no trajeto luminoso, será de extrema importância conhecer-se o ângulo formado entre as orientações de propagação de ambos, pois dele dependerá a intensidade luminosa transmitida, este fenômeno é equacionado pela Lei de Malus:

$$I = I_m \cos^2 \theta \quad (2.1)$$

Onde: I = intensidade luminosa transmitida

I_m = intensidade luminosa máxima de transmissão

θ = ângulo entre as direções de propagação dos filtros

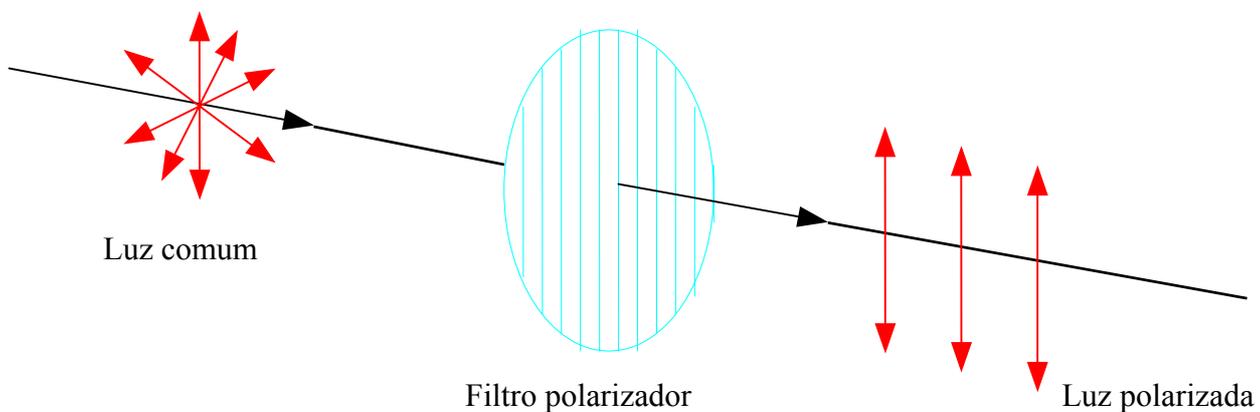


Figura 2.6 -Representação da polarização da luz

Segundo a Lei de Malus a intensidade luminosa transmitida será máxima quando o ângulo θ assumir orientação paralela e mínima, quando o ângulo θ assumir orientações ortogonais (figura 2.7).

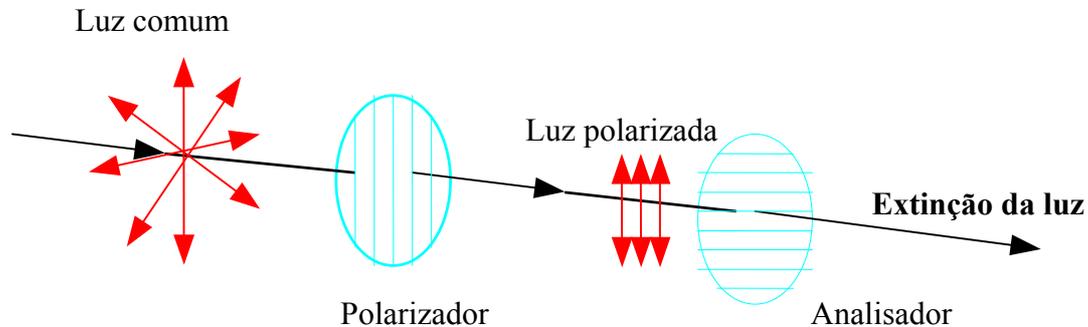


Figura 2.7 - Análise da luz com dois filtros polarizadores dispostos ortogonalmente

Segundo Phillips (2000), a fotoelasticidade é uma técnica baseada na propriedade optomecânica chamada birrefringência (dupla refração) apresentada por muitos polímeros transparentes.

Podemos dizer que um material transparente à incidência de uma luz comum apresenta birrefringência se este dois índices de refração na incidência de uma luz polarizada quando submetido à solicitação de cargas externas,. Os eixos de birrefringência coincidem com os eixos das principais tensões ou deformações de um corpo. Esta propriedade é inerente aos materiais fotoelásticos.

Alvarez (1998), coloca que a fotoelasticidade se destaca por ser uma técnica aplicável a geometrias e distribuição de cargas complexas. E que é uma técnica cujos resultados podem ser quantitativos ou qualitativos e cujos ensaios podem ser realizados com caráter destrutivo ou não.

O polariscópio plano (figura 2.8) é um equipamento que permite a análise das tensões e suas distribuições em modelos de materiais transparentes, utilizando-se as técnicas da fotoelasticidade. Nele, são obtidas franjas com o auxílio de uma fonte de luz e dois polarizadores com os eixos de polarização a 90° , e de um corpo de prova (modelo) em material fotoelástico construído em escala. As franjas escuras, que aparecem quando o modelo é submetido a carregamentos, são denominadas isóclinas (figura 2.10a) e provêm a direção principal das tensões e sua magnitude.

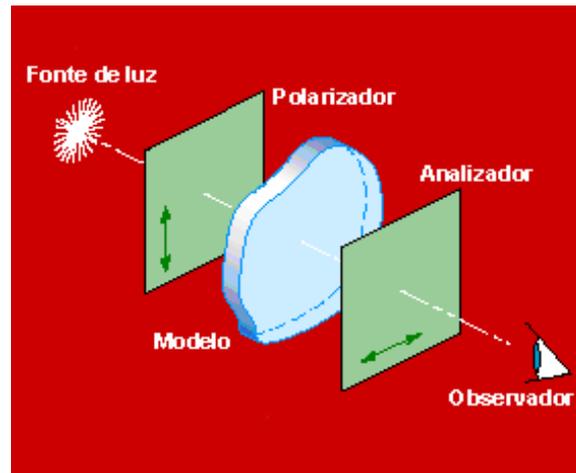


Figura 2.8 – Representação esquemática de um polariscópio plano.

Fonte: Phillips - 2000

Muitos materiais fotoelásticos apresentam características físicas (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson) semelhantes ao aço, ao alumínio, etc. Assim sendo, uma estrutura pode ser construído em escala com um material fotoelástico, e submetido ao carregamento, simulando a estrutura e os carregamentos originais. A análise dos resultados fornece dados sobre as tensões mecânicas envolvidas.

Mark *et al.* (1973) utilizaram esta técnica, construindo um modelo em material fotoelástico, escala 1:50 de dois segmentos da abóbada de uma catedral gótica (Cologne) e comparam os resultados obtidos com os resultados da análise por elementos finitos.

Existe ainda, o polariscópio de transmissão com luz circularmente polarizada (figura 2.9), semelhante ao polariscópio plano, porém com a adição de duas placas de quarto de onda.

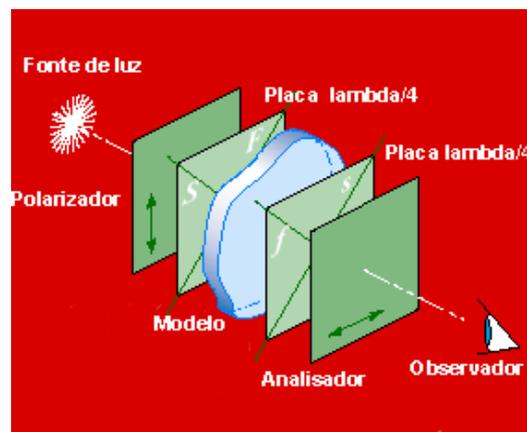


Figura 2.9 – Representação esquemática de um polariscópio de transmissão.

Fonte: Phillips - 2000

Segundo Alvarez (1998), neste caso aparecerão apenas as franjas isocromáticas que estão relacionadas apenas com as diferenças entre as tensões principais (figura 2.10b) e indicam as áreas de tensão de mesma magnitude.

Num polarizador plano, as franjas isóclinas e isocromáticas estão superpostas umas sobre as outras. Entretanto, para obter os valores das tensões devem ser adotadas técnicas de separação.

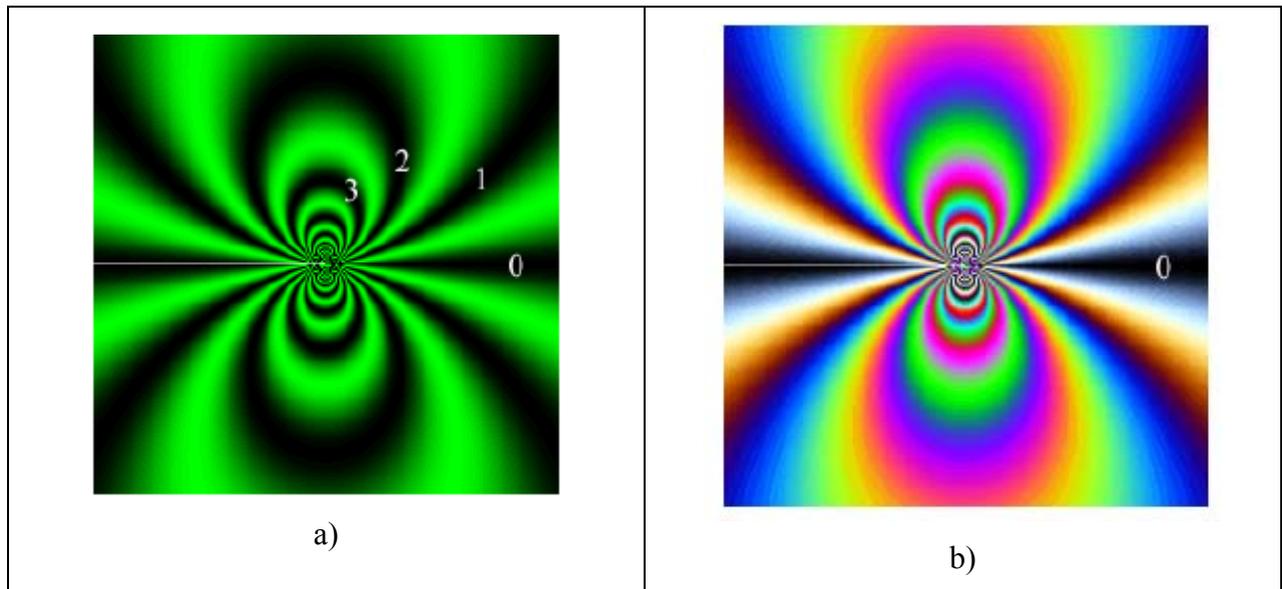


Figura 2.10 - franjas isóclinas a) e isocromáticas b) obtidas através da fotoelasticidade.

Fonte: Phillips- 2000

Por se tratar de um método experimental com resultados de fácil compreensão e visualização, Alvarez *et al.* (2000), realizaram um estudo destacando o emprego de métodos experimentais (fotoelasticidade) como ferramenta didática no processo de ensino entre alunos dos cursos de graduação em engenharia. Os resultados obtidos apontam que os alunos que tiveram contato com o método experimental apresentaram um desempenho aproximadamente 50% maior que os alunos que os outros, que recebem tradicionalmente aulas de forma teórica.



Figura 2.11 - Polariscópio para análise de modelos.

Além do polariscópio para modelos (figura 2.11) existe ainda o polariscópio de superfície (ou de reflexão). Neste caso, é utilizado o próprio componente mecânico para análise e não um modelo. É aplicada uma fina camada de material fotoelástico (figura 2.12 a) sobre a superfície da peça que se deseja estudar. Através do polariscópio de superfície (figura 1.12b) são observadas as franjas que surgem no material fotoelástico quando a estrutura é submetida aos carregamentos.

Pode-se observar que a análise de tensões por fotoelasticidade depende fundamentalmente do estudo das imagens obtidas. Para situações de solicitações meramente estáticas, o método funciona perfeitamente. No entanto, para que se possa fazer uma análise dinâmica é necessário que sejam capturados muitos quadros que acompanhem os diversos níveis de solicitações para posterior análise. Ainda assim, deve ser verificada a frequência máxima da carga ao qual a estrutura está sendo submetida e realizar uma captura de imagens com uma frequência compatível. A posterior análise destes quadros fornecerá as informações desejadas.

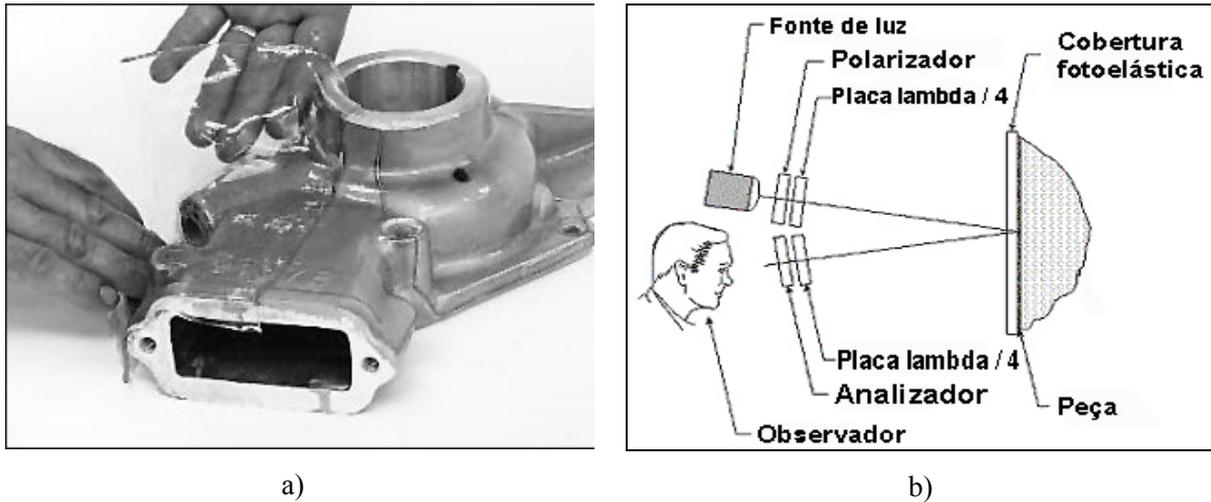


Figura 2.12 - Aplicação do material fotoelástico sobre o componente a) e representação esquemática do polariscópio de superfície b).

Fonte: Vishay web site

Existem polariscópios de reflexão que apresentam uma fonte de luz estroboscópica, permitindo análise dinâmica dentro de uma limitação de faixa de frequência.

Asundi *et al.* (1995), descrevem um experimento com fotoelasticidade dinâmica usando um scanner laser. O sistema de gravação dinâmico de baixo custo utiliza um scanner de fax fora de linha.

Plouzenec *et al.* (1999), descrevem um experimento utilizando a fotoelasticidade automatizada com fontes de luz (monocromáticas) de diferentes comprimentos de onda para a análise dos parâmetros. O processamento digital das imagens obtidas neste método minimiza o tempo gasto para a identificação e medição da ordem das franjas isocromáticas e isoclinicas.

2.3.3 INTERFEROMETRIA

O uso das técnicas ópticas na área de mecânica experimental não é novidade. Há vários anos elas são aplicadas na inspeção de materiais e na análise de tensões. Neste sentido, a terminologia “técnicas interferométricas ópticas” engloba uma gama de métodos diferentes baseados no fenômeno de interferência da luz. Todo o método que de alguma forma baseia-se na interferência da luz foi classificado nesta categoria, com exceção aos métodos que se utilizam da fotoelasticidade.

As técnicas interferométricas comumente empregadas em mecânica experimental têm como principais virtudes o fato de serem não destrutivas e de não contato, além de possuírem altas sensibilidades, quando comparados aos processos mecânicos convencionais.

Dentre os métodos ópticos merecem destaque as técnicas de holografia e de Speckle. O experimento descrito por Sanford (1973), trata de um interferômetro, no qual é realizada a dupla exposição fotográfica registrando o holograma fotoelástico de um corpo opaco submetido a diferentes níveis de sollicitação e resultando no holo-interferômetro de tensão diferencial. São colocadas as vantagens do método em relação as técnicas então existentes.

Dentre as técnicas interferométricas existentes, a técnica de Speckle se destaca por possuir uma ampla faixa de sensibilidade, e por não ter exigências rigorosas quanto à resolução do meio de gravação. O uso de câmeras CCDs e do computador, permitiu incorporar modernas formas de processamento de imagem, além da automação na obtenção de resultados. Com essa evolução, a técnica passou a se chamar então Interferometria Digital de Padrões de Speckle (DSPI). Uma técnica de Speckle é utilizada por Ma e Huang (2001), numa análise experimental e numérica da vibração de placas com pré-trincas na frequência de ressonância utilizam um interferômetro também a laser com uma concepção diferente.

Outro interferômetro muito conhecido é o interferômetro a laser como o utilizado por Rubio-Gonzalez *et al.* (2001), numa investigação experimental num punção bidimensional em compósito isotrópico submetido a carga quase estática e sob impacto.

No entanto, o método de Moiré talvez seja a técnica de interferência mais usada tanto para casos estáticos como dinâmicos.

2.3.3.1 O método de Moiré:

O método de Moiré baseia-se na observação da imagem gerada através da superposição de padrões regulares. A técnica não destrutiva permite medições em três dimensões usando um aparato experimental relativamente simples. Os chamados padrões regulares são grades ópticas (figura 2.15) contendo milhares de linhas por milímetro. Uma destas grades é usada como referência e a outra é projetada sobre o objeto de interesse. O resultado desta técnica é o surgimento de uma série de franjas de interferência (figura 2.16) cujas ordens se relacionam com as deformações as quais a estrutura foi submetida.

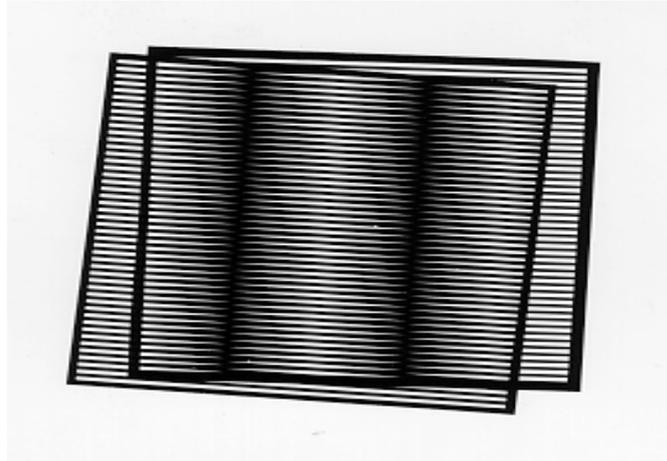


Figura 2.13 – Interferência observadas pela superposição de duas grades ópticas.

Fonte: Home page da Universidade de Glasgow

Chiang *et al.* (1973), descrevem dois métodos aproximados, usando uma e duas câmeras para estudar casos com aplicação dinâmica de carga, usando o método de Moiré e comentam problemas para sincronizar a dupla exposição.

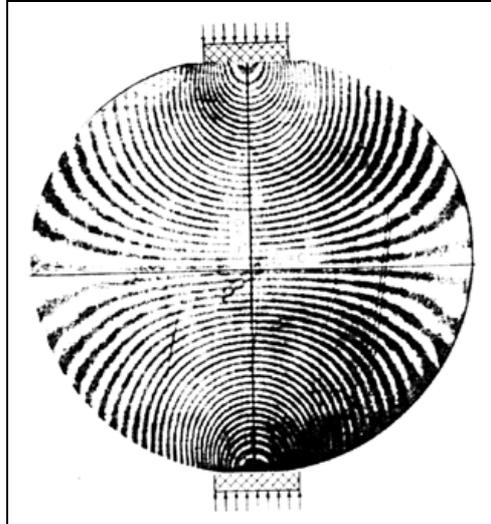


Figura 2.14 – Padrão típico das franjas obtidas pelo método de Moiré em um disco circular submetido a compressão.

Fonte: Dally e Rilley, 1991.

Freese *et al.* (1999), utilizam elementos finitos para modelar, analisar e visualizar os dados obtidos pelo método de Moiré. Elementos de suavização são utilizados a fim de diminuir o

espalhamento de dados e o erro obtido pela técnica. A técnica de Moiré é aplicada em um experimento clássico de flexão a quatro pontos e a técnica de modelamento é usada para obter o deslocamento e o gradiente de tensões.

Schwartz *et al.* (2000), comparam os resultados obtidos com o interferômetro de Moiré e simulação numérica do mesmo método. Determinam campos de tensões mecânicas residuais, direção da tensão principal e a componente de deformação cisalhante em torno de um furo na peça em estudo, observando as franjas obtidas pelos métodos.

Nishioka *et al.* (2000), descrevem um método híbrido para automaticamente detectar e eliminar erros experimentais obtidos através do método de Moiré.

Um novo interferômetro de Moiré é proposto por Lin (2001). Este apresenta sensibilidade duas vezes maior que o interferômetro convencional. No artigo é feita uma análise teórica deste novo método, bem como um experimento que confirma as vantagens da utilização do novo método em relação ao convencional.

2.3.4 EXTENSOMETRIA

Para Lee (1950), um “strain gage“ pode ser definido como qualquer instrumento ou dispositivo empregado para medir deformação linear.

Existem extensômetros: mecânicos, ópticos, acústicos, pneumáticos e elétricos (indutivos, capacitivos, resistivos e piezoelétricos). A expressão Extensômetros de resistência elétrica é usada para traduzir a expressão em inglês “Electrical Resistance Strain Gauge”.

O nome extensômetro de resistência elétrica significa medidor de deformação (mecânica) relativa através da determinação da variação de resistência elétrica [Borchardt & Zaro, 1982]

Assim, costuma-se chamar “strain gages” (extensômetro de resistência elétrica) os transdutores que relacionam variação de resistência elétrica com a deformação relativa de uma peça. O método experimental que utiliza “strain gages” (strain gauges) é comumente chamado extensometria.

Segundo Borchardt e Zaro (1982), strain gauges são usados principalmente:

- a) Para determinar o estado de deformação existente num ponto de um componente mecânico submetido a um esforço e, conseqüentemente, para a análise de tensões localizadas.

- b) Para agir como elemento sensor de deformação, funcionando como um transdutor calibrado em termos de deslocamento, força, pressão, aceleração, etc.

2.3.4.1 Princípio básico do extensômetro de resistência elétrica:

Vamos considerar um condutor (figura 2.13) de comprimento l e área da secção transversal (circular) A . Sabe-se que a resistência elétrica R de um condutor depende basicamente dos aspectos geométricos (l/A) e da característica do material (resistividade: ρ):

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.2)$$

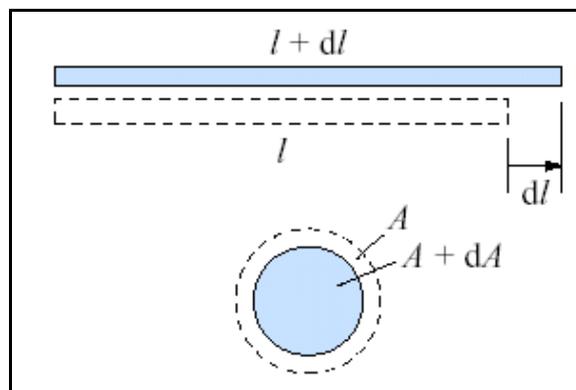


Figura 2.15- Representação de condutor de comprimento l e área da secção transversal A .

Como a área A para esta secção é dada por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.3)$$

onde D é o diâmetro da secção circular transversal, temos que:

$$R = \frac{4 \rho l}{\pi D^2} \quad (2.4)$$

Se for aplicado um carregamento mecânico compressivo neste condutor, serão observadas uma variação infinitesimal no comprimento dl e no diâmetro da secção transversal dD . Assim,

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dD}{D} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2.5)$$

O coeficiente de Poisson ν estabelece a relação entre as variações relativas de comprimento l e diâmetro D de um determinado material. Como ele é calculado por:

$$\nu = - \frac{dD/D}{dl/l} \quad (2.6)$$

temos, :

$$\frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (2.7)$$

Supondo que $d\rho/\rho$ não varia com dl/l , obtemos:

$$\frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\nu \quad (2.8)$$

Como o coeficiente de Poisson é considerado constante e caracteriza os diferentes materiais, temos:

$$\frac{dl}{l} = \frac{1}{k} \frac{dR}{R} \quad (2.9)$$

Onde 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 strain gage (tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Sensibilidade dos strain gages para diferentes materiais de grade

Material da grade (nome comercial)	Composição (%)	Sensibilidade k (fator gage)
Constantan	57 Cu, 43 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, res. Fé+ Al	2,1
Nicrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platinum-tungsten	92 Pt 8 W	4,0

Fonte: Hoffmann, 1989.

Comumente a deformação relativa $\frac{dl}{l}$ é representada por ϵ , assim chegamos a expressão :

$$\epsilon = \frac{1}{k} \frac{dR}{R} \quad (2.10)$$

Na prática, desejamos medir ϵ , o fabricante do strain gage fornece os valores de k e de R . Torna-se necessário medir dR ou como é mais conhecido ΔR para então conhecer-se ϵ .

Comercialmente, o strain gage não apresenta um aspecto de fio, mas de uma grade formada por um “vai e vem” de um condutor. Borchardt e Zaro (1982), afirmam que o primeiro tipo comercial de extensômetro (figura 2.14 a) foi o de grade plana, enquanto que o tipo folha (figura 2.14 b).

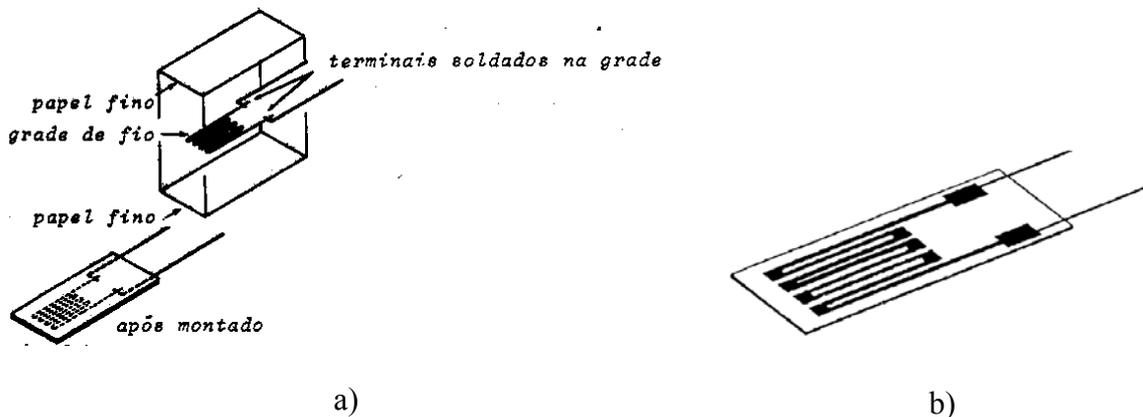


Figura 2.16 - Tipos comerciais de strain gages: grade plana a) e folha b).

Fonte: Borchardt e Zaro, 1982.

Quando um strain gage é colado sobre a superfície de uma estrutura submetida a uma deformação, esta é transmitida para o strain gage e se percebe uma variação da resistência elétrica do mesmo. Assim, se o local da estrutura onde está colado o strain gage estiver submetida a um esforço trativo, o valor da resistência elétrica do mesmo sofrerá um acréscimo (devido ao aumento de comprimento e diminuição da secção). No entanto, se o esforço for de natureza compressiva, este valor sofrerá uma diminuição (diminui o comprimento e aumenta a secção).

Arola *et al.* (1999), utilizaram strain gages para uma análise experimental em um quadro de bicicleta, detalhando a aquisição das deformações dinâmicas, e discutindo os resultados obtidos.

Baek *et al.* (2001), descrevem um método híbrido de análise de tensões na vizinhança de um furo em um elemento confeccionado a partir de um compósito ortotrópico usando análise por elementos finitos e o método extensométrico.

Shull *et al.* (2001), focam os reais problemas associados a medição dinâmica de deformação utilizando strain gages e a validação dos dados.

3 - DETERMINAÇÃO DOS MÉTODOS EMPREGADOS E INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE SEMEADORAS AGRÍCOLAS.

3.1 - O PROJETO: ESCOLHA DO MÉTODO

É sabido que um bom projeto deve passar primeiramente por uma etapa de levantamento de informações chamada projeto informacional. O levantamento do estado da arte (Capítulo 2 do presente trabalho) faz parte deste primeiro momento do projeto. No entanto, outras informações são necessárias. Em um fluxograma (figura 3.1), Ribeiro, 1996, coloca a necessidade ouvir a voz do cliente e do engenheiro como importantes etapas a serem cumpridas em um projeto de experimentos.

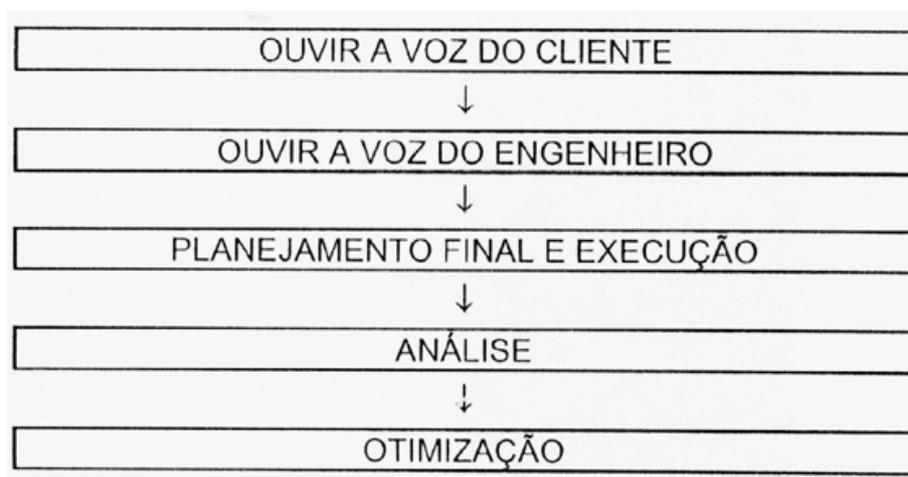


Figura 3.1 – Fases do projeto de experimentos.

Fonte: Ribeiro, 1996.

Neste caso, ouvir a voz do cliente significa identificar as características mais necessárias e sua importância relativa. A voz do engenheiro deve procurar quantificar os parâmetros, identificar restrições, intervalos de variação e fatores controláveis, bem como definir possíveis interações. Assim sendo, as características levantadas para o caso (tabela 3.1), bem como sua importância relativa, necessitam da avaliação do engenheiro especialista.

Para quantificar a facilidade de utilização e análise dos dados, foi utilizado o tempo gasto [h] em cada tarefa como unidade de medida. Unidades monetárias [u.m.] foram usadas tanto para medir o custo de utilização quanto o custo de implantação do método, embora o segundo deva levar em consideração o número de testes a serem realizados e o tempo no qual se deseja diluir o

custo de implantação. As demais características se referem de alguma forma ao erro experimental de cada método e assim são expressos em pontos percentuais [%].

Tabela 3.1 – Voz do cliente

Característica	Tipo	Importância Relativa
Facilidade de aplicação	Maior-é-melhor	4
Facilidade de análise dados	Maior-é-melhor	2
Custo de utilização	Menor-é-melhor	2
Custo de implantação do método	Menor-é-melhor	4
Sensibilidade presença de pó	Menor-é-melhor	4
Sensibilidade vibrações / choque	Menor-é-melhor	4
Influência temperatura	Menor-é-melhor	2
Influência umidade	Menor-é-melhor	1
Confiabilidade dados	Maior-é-melhor	2

Com os dados levantados foi utilizada a chamada casa da qualidade (figura 3.2) através do software QFD Capture 4.0. Esta nos possibilita verificar mais claramente que os principais aspectos a serem observados são o custo de implantação da metodologia experimental a ser adotada, assim como a sensibilidade do método a presença de poeira. Além disto, verifica-se que o custo e o erro do processo experimental estão fortemente ligados.

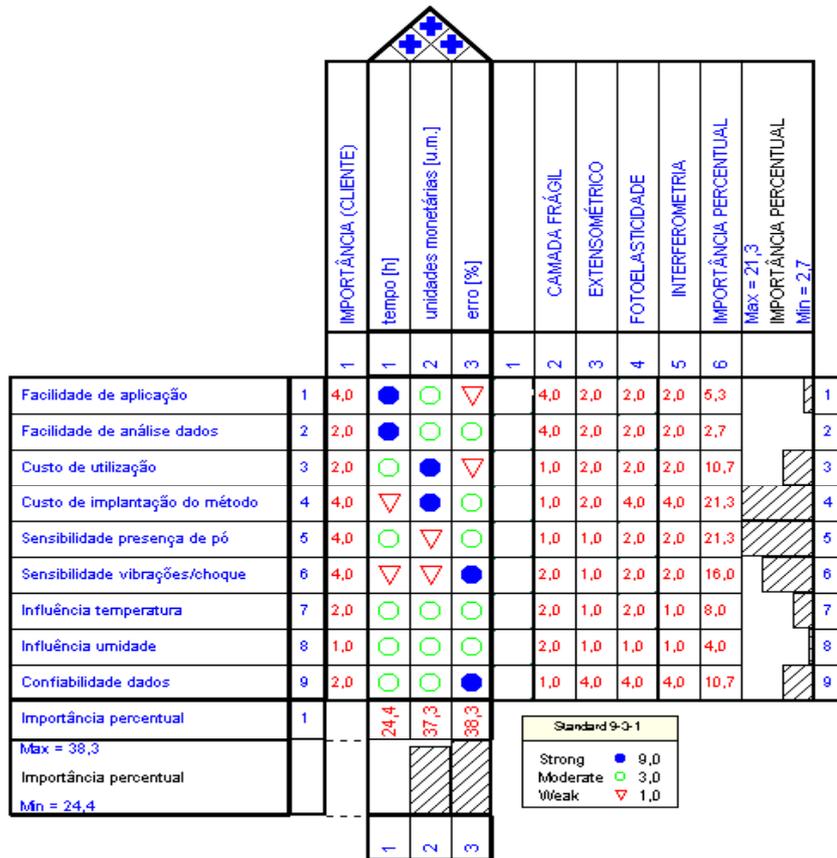


Figura 3.2 – Casa da qualidade obtida com QFD 4.0

De uma forma simplória, um especialista pode achar que o resultado desta análise seja óbvia e que não necessitaria fazer um QFD para chegar a estes indicadores. No entanto, esta ferramenta possibilita sintetizar e analisar os dados com maior certeza.

Desta forma, foi eliminada a hipótese de utilizar qualquer método óptico: interferométricos ou fotoelásticos. Além do fato da intensa presença de poeira e dos métodos apresentarem um custo de implantação relativamente alto, todas as alternativas cobrem pequenas áreas comparadas com o todo que se deseja analisar. Este fato levaria o usuário a ter que instalar uma série destes aparelhos, tornando inviável pelo ponto de vista econômico, ou tendo que repetir várias os experimentos, impossibilitando sob o ponto de vista técnico. Além disto, a necessidade de construir uma série de rígidos suportes para fixar lentes, filtros, fontes de luz e filmadoras, traria uma série de problemas. Somados a estes problemas, estes métodos necessitariam de pós-processamento com a análise de uma série de imagens, que os inviabiliza, embora apresentem grande precisão.

Restaram apenas o método da camada frágil e o extensométrico. O primeiro contempla os aspectos baixo custo de implantação e utilização, fáceis aplicação e análise dos resultados, baixa sensibilidade a presença vibrações/choque e de poeira. No entanto não apresenta boa precisão

(do ponto de vista quantitativo) e apresenta sensibilidade a variações de umidade, e temperatura. Já o segundo método, destaca-se por apresentar baixa sensibilidade a presença de um ambiente com poeira, variações de umidade e temperatura, apresenta facilidade na aplicação e na análise dos dados obtidos, boa confiabilidade dos dados, embora apresente custos de implantação do método e utilização relativamente significativos.

Esta análise permite concluir que nenhum dos métodos, isoladamente, contempla todas as necessidades, e também que a fotoelasticidade, bem como a interferometria, não podem ser usados.

Um aspecto que a voz do cliente não considerou é o fato que o método deve ser capaz de investigar a totalidade do objeto em estudo (semeadora). Isto pode significar a utilização de centenas ou milhares de extensômetros, que inviabiliza o método tanto pelo aspecto econômico quanto pelo técnico. Já o método da camada frágil, contempla plenamente a necessidade de analisar toda a superfície do objeto, embora apresente um erro indesejado bem como sensibilidade a umidade e temperatura.

Agora, se um método for usado para indicar as regiões de maior concentração de tensão (bem como a direção principal) e outro for usado para medir estes “pontos”, pode-se obter um método misto de custo relativamente baixo, aplicação e análise de dados relativamente fáceis e rápidos, que cubra toda a superfície da máquina, não seja sensível a presença de poeira, a umidade ou a variações de temperatura, observando ainda a necessidade de boa precisão dos dados obtidos.

Pelo acima exposto, foi utilizado primeiramente o método das camadas frágeis para simplesmente identificar e indicar os pontos estruturais críticos e nestes foi aplicada a técnica da extensometria para efetuar as necessárias medições. Para que se entenda um pouco mais sobre cada um dos métodos, segue um maior detalhamento.

3.2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.2.1 - CAMADA FRÁGIL

Foram escolhidos os produtos da empresa Stresscoat (Upland, Califórnia – Estados Unidos) para aplicação neste projeto. Estes produtos têm uma sensibilidade limiar nominal de 500 microstrain ($\mu\epsilon$) sob as condições de temperatura e umidade relativa constantes.

A seleção de uma cobertura adequada (Figura 3.3) depende da temperatura e da umidade relativa do local no momento do teste, bem como da sensibilidade requerida.

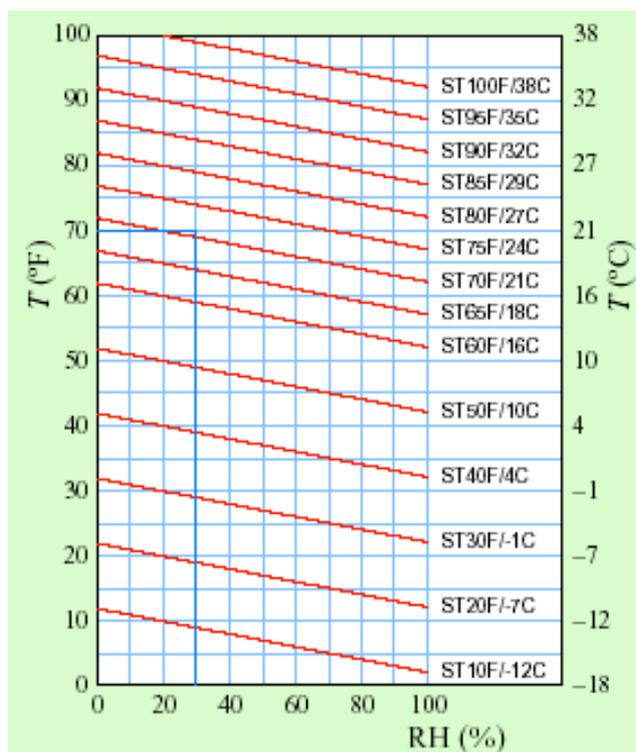


Figura 3.3 – Gráfico para escolha do Stresscoat em função da temperatura e umidade.

Fonte: Philips 2000.

3.2.1.1 - Efeitos de mudanças na umidade

A sensibilidade varia aproximadamente em $4\mu\epsilon$ por ponto percentual de variação de umidade relativa. A cobertura perde sensibilidade e fragilidade à medida que a umidade relativa supera os 20%, mas isso só se torna perceptível quando há grandes variações da umidade relativa.

3.2.1.2 - Efeitos da temperatura:

O efeito da temperatura sobre o Stresscoat é de $72\mu\epsilon / ^\circ\text{C}$. À medida que a temperatura se eleva, a cobertura se torna mais plástica, perdendo sensibilidade. O oposto ocorre quando a temperatura se reduz. O nível mínimo de sensibilidade antes que a cobertura se quebre por efeitos térmicos é de $200\mu\epsilon$.

3.2.1.3 - Subcobertura:

Uma subcobertura não-inflamável refletora fornece uma base uniforme tanto em materiais ásperos como polidos, eliminando assim quaisquer características direcionais que a superfície tenha e que possam mascarar o efeito da carga.

3.2.1.4 - Aplicação da camada:

A superfície da estrutura deve estar rigorosamente livre de qualquer tipo de sujeira, gordura, crostas soltas ou tintas. Desta forma sugere-se que a estrutura seja submetida a raspagem, jateamento ou escovação e que após sejam utilizados produtos de limpeza que não deixem resíduos.

A cobertura deve ser aplicada lentamente com o auxílio de uma pistola de pintura em várias camadas finas, chegando a uma espessura entre 0,06 a 0,11 mm. A cobertura não deve ser aplicada tão líquida que escorra nem tão densa que pareça rugosa. Uma camada de Stresscoat bem aplicada deve apresentar uma coloração amarelo fraco e polido, conforme pode ser visto na figura 3.4. Devem-se evitar excessos de aplicação, pois podem ocorrer bolhas internas que descaracterizem o padrão das fraturas.



Figura 3.4 – Aspecto de uma aplicação tecnicamente aprovada: amarelo e polido

Aplicações em condições de alta umidade podem criar bolhas na cobertura ou torná-la avermelhada. O avermelhamento desaparece durante a cura, mas as bolhas não. Entretanto, algumas pequenas bolhas espalhadas geralmente não afetam os testes, desde que pequenas em relação a área sob investigação.

As barras de calibração (Figura 3.5) que acompanham o produto devem receber o spray ao mesmo tempo e nas mesmas condições da amostra. Elas serão então empregadas na determinação da verdadeira sensibilidade da cobertura durante o teste através de uma calibração simples.

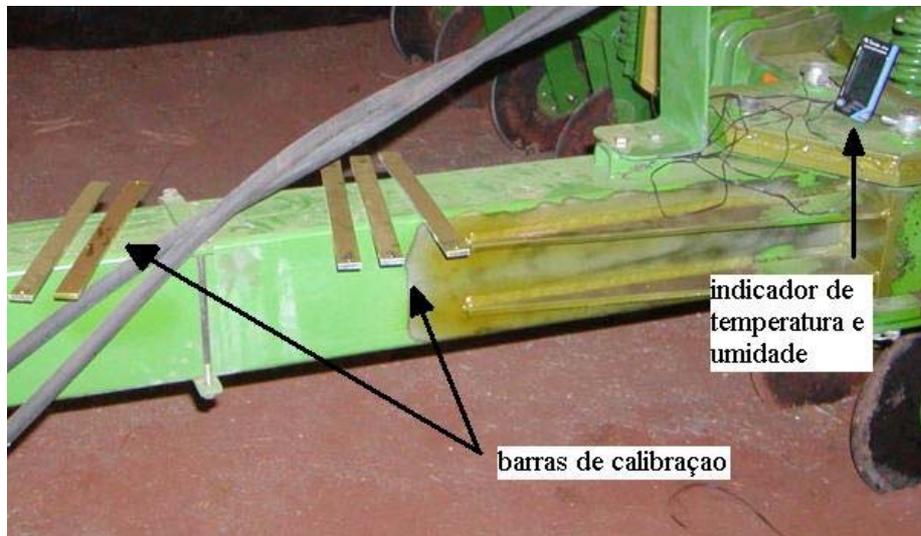


Figura 3.5 – Barras de calibração do Stresscoat.

3.2.1.5 - Secagem

Uma vez aplicadas, as coberturas devem ficar secando por pelo menos 24 horas. A temperatura de secagem da cobertura deve ser mantida a mesma da aplicação. Com a cobertura seca, a temperatura pode ser baixada lentamente para aquela em que o teste ocorrerá. A temperatura da amostra deve ser estabilizada antes que o teste se inicie. Todas essas medidas também se aplicam às barras de calibração. O resfriamento rápido deve ser evitado para que não haja rachaduras por contração térmica. Assim, amostra e barras devem ser postas a salvo de correntes de ar e outras fontes de baixa temperatura.

3.2.1.6 - Calibração da cobertura:

As barras da calibração preparadas sob as mesmas condições da amostra devem ser carregadas antes do teste na amostra. Estas devem ser colocadas no dispositivo de calibração (Figura 3.6) e submetidas à deformação conhecida. Enquanto a barra ainda está sob carga, a menor rachadura visível é marcada. A carga é então removida e a barra colocada no calibrador

de deformação. A sensibilidade em $\mu\epsilon$ da cobertura é então lida no calibrador para o ponto marcado na barra.

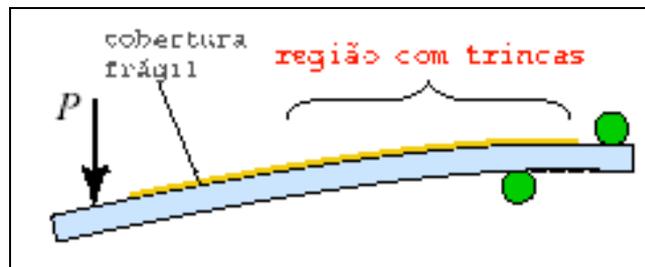


Figura 3.6 – Esquema do dispositivo calibrador das barras.

3.2.1.7 - Rachaduras na cobertura:

Deve-se observar que a cobertura se quebra muito antes das tensões atingirem a região de deformação plástica do material abaixo dela, que compõem a estrutura sob análise.

As falhas, ou rachaduras podem ser visualizadas na figura 3.7. Estas podem ser detectadas imediatamente se houver uma fonte de luz em um ângulo adequado sobre a superfície. Os padrões de falhas em coberturas com sensibilidade abaixo de $900 \mu\epsilon$ continuarão abertos após a retirada da carga e podem ser detectadas com a fonte de luz.

À medida que padrões se formam na estrutura, a posição e direção em que ocorrem devem ser registradas junto com o valor limiar de deformação da cobertura. Padrões de falhas recém formadas dão os resultados mais precisos.

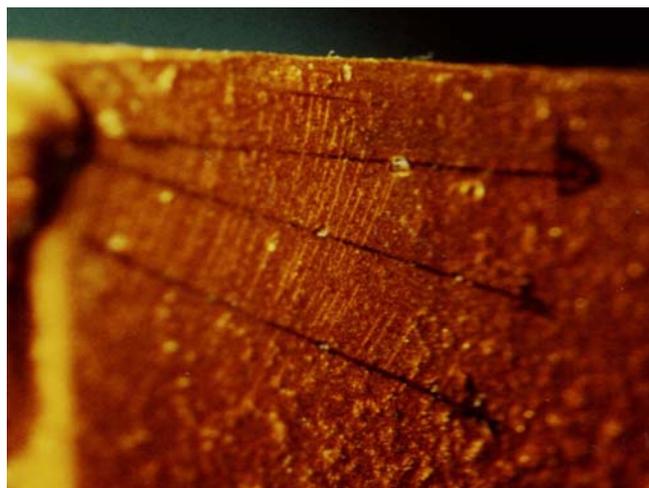


Figura 3.7 – Rachaduras observadas sobre a camada frágil.

As rachaduras se formam perpendicularmente a direção da deformação principal e assim sendo, fornecem o quadro de distribuição destas tensões na estrutura.

3.2.1.8 - Uso em ambientes abertos:

Podem-se obter resultados satisfatórios em locais abertos com uma ampla variação de temperatura. Entretanto, os testes devem ser feitos na temperatura desejada, pois as temperaturas em lugares abertos oscilam muito ao longo do dia. Estas temperaturas normalmente têm seu mínimo às 7h e o máximo às 15h, sendo que a redução começa em torno das 17horas.

3.2.2 - EXTENSOMETRIA

Os extensômetros de resistência elétrica, ou “strain gages” (Figura 3.8) como são mais conhecidos, são apresentados um formato básico de uma pequena grade que é uma resistência elétrica composta geralmente de liga metálica, ou de material semicondutor depositada sobre uma fina base de material isolante. Naturalmente, existem diferentes materiais para compor a grade ou a base. Nas extremidades desta grade encontram-se os terminais, aos quais são conectados os “leades”, ou fios de ligação.

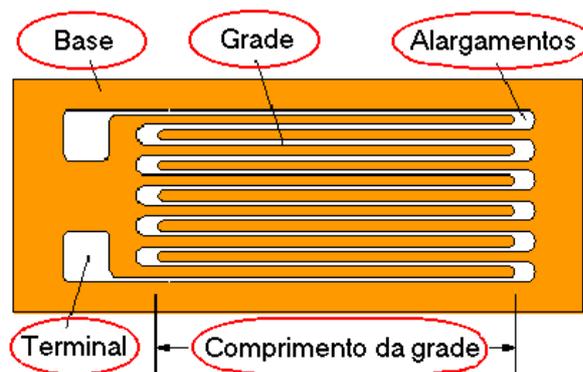


Figura 3.8 – Aspecto geral de um “strain gage” comercial.

3.2.2.1 - Resistência elétrica da grade

Uma das características de um extensômetro de resistência elétrica é a resistência elétrica da grade. Dentre outros fatores, dela depende a máxima tensão elétrica aplicado para efetuar-se a

medição. Comercialmente, os valores mais comuns (para aqueles cuja grade é confeccionada com material metálico) são 120Ω e 350Ω . O tipo de medição que se deseja realizar e o condicionador de sinais utilizado poderão determinar qual o valor a ser escolhido.

3.2.2.2 – Dimensões

O primeiro aspecto ligado as dimensões de um extensômetro refere-se ao comprimento da grade (parte sensível). Este é muito importante, pois ele será ser colado numa região com um gradiente de deformação e fará uma leitura próxima a média do seu comprimento. Se for usado um strain gage muito longo (Figura 3.9), a leitura não será tão pontual e os valores decorrentes da medição poderão apresentar valores abaixo do real. Se por um lado é desejado muitas vezes que o strain gage apresente o menor comprimento possível, em contrapartida quanto menor for este sensor, maiores serão as dificuldades na sua colagem. Já a escolha da sua largura depende muito mais de uma aplicação específica.

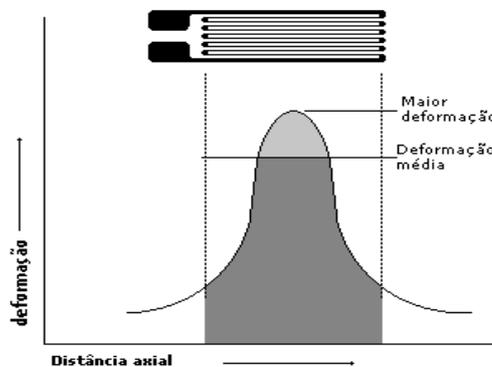


Figura 3.9 – Strain gage muito longo: imprecisão de medição - figura adaptada.

Fonte: Barreto, 2002

3.2.2.3 – Material da grade e fator gage

Como já foi visto anteriormente, o material que compões a grade de um extensômetro metálico é um determinante da sua sensibilidade k (fator gage), assim como, quando associados os aspectos dimensionais, a sua resistência elétrica.

Comercialmente, o valor de k para strain gages metálicos apresenta-se por volta de 2,1. No entanto, para os que têm sua grade formada por material semicondutor, este valor passa para 150. Porém, os resultados obtidos com estes últimos apresentam maior sensibilidade a variações térmicas.

3.2.2.4 - Configuração da grade

Os diversos fabricantes oferecem uma extensa variedade de configurações de grades extensômetros. O mais comum é o strain gage uniaxial único (figura 3.10).

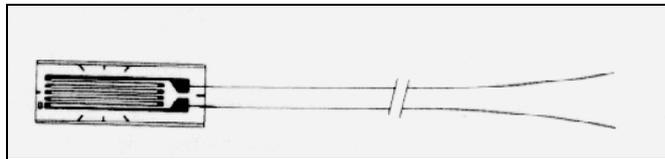


Figura 3.10 – Strain gage uniaxial único.

Fonte: Catálogo Kyowa

No entanto o usuário com um pouco de experiência e dependendo da aplicação pode encontra-los em configurações biaxial, triaxial (Figura 3.11), tipo diafragma, uniaxial múltiplo, etc.

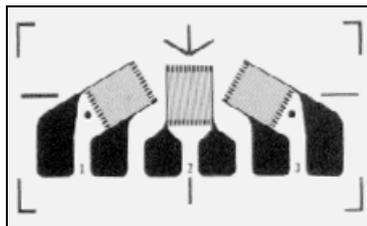


Figura 3.11 – Extensômetro tipo roseta triaxial

Fonte: Catálogo Micro-Measurements

3.2.2.5 – Compensação térmica

Normalmente um extensômetro apresentaria um coeficiente de dilatação térmica linear diferente do mesmo coeficiente do material onde o extensômetro está aplicado. Desta forma, quando a temperatura varia, o extensômetro estaria sujeito a uma deformação aparente irreal.

Por este motivo os extensômetros apresentam autocompensação térmica para diferentes materiais. O coeficiente de resistividade do material da grade é ajustado para o material ao qual será aplicado o strain gage, minimizando desta forma este efeito numa determinada faixa de temperatura.

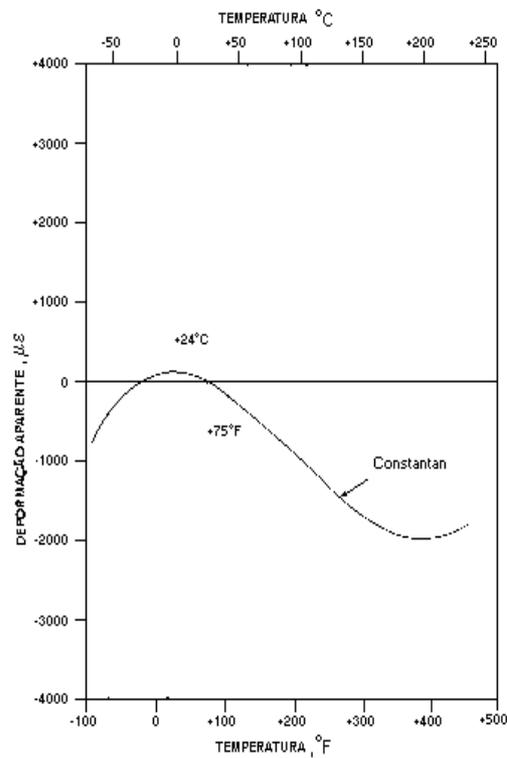


Figura 3.12 – Compensação térmica do strain gage - figura adaptada.

Fonte: Manual de strain gages fabricados pela Micro-Measuremenst

3.2.2.6 – Algumas Limitações

A faixa de temperatura utilizável para extensômetros comuns fica entre -75°C e 175°C . No entanto existem especiais que atingem temperaturas próximas aos 400°C .

A vida em fadiga de um strain gage depende do comprimento de grade e do ciclo de trabalho. No entanto, fabricantes expressam valores como 10^8 ciclos a $1200\ \mu\epsilon$ de deformação e 10^6 ciclos a $1500\ \mu\epsilon$ sob determinadas condições que devem ser muito bem observadas.

O limite de deformação de um extensômetro de resistência elétrica depende principalmente do comprimento da grade. Valores como 5% para grades maiores que 5mm e 3%

para as menores podem ser encontradas nos catálogos dos fabricantes, mas estes valores podem atingir até 10%, dependendo da aplicação.

Devido ao Efeito Joule na resistência elétrica na grade do strain gage, existe uma limitação de potencia elétrica aplicada sobre ele. Este valor depende do strain gage e da base ao qual ele será aplicado. Este é um importante dado a ser observado para evitar problemas de medição ou até mesmo causar danos no próprio extensômetro.

A Sensibilidade transversal de um strain gage expressa a influência que apresentam deformações transversais ao eixo da grade. Para os comerciais, este valor se encontra por volta 0,5% a 1%.

3.2.2.7 - Preparação de superfície e colagem

A superfície onde será aplicado não deve apresentar saliências, óxidos, riscos ou qualquer tipo de matéria estranha. Desta forma, conforme a necessidade o usuário deve usar esmerilhadeira, limas e lixas (granulação 220 a 400) para preparar satisfatoriamente a superfície.

A seguir é necessária a limpeza do local a fim de remover qualquer tipo de óleos ou gorduras. Normalmente álcool isopropílico ou acetona é utilizado para este fim. É comum que se siga o trabalho com o ataque da superfície com um ácido fraco para a remoção de pequenas oxidações e posterior neutralização, para então se dar início ao trabalho de marcação do local de colagem, alinhamento do extensômetro e por fim a colagem do strain gage.

Existe uma série de tipos de adesivos para este fim. Cada fabricante dispõe de variadas opções: as mais comuns são a base de epóxi, cianoclorato poliamida e cerâmicos. Pela facilidade de uso e cura rápida, os cianocloratos são preferidos pela maioria dos usuários.

Logo após a colagem, é comum que os strain gages recebam sobre eles uma camada protetora. Dentre a variedade de produtos oferecidos pelo mercado para este fim o mais comum é o adesivo a base de silicone. É importante destacar que não é recomendado o uso de borrachas de silicone, como são conhecidas que apresentem um comportamento ácido ou corrosivo. Devem-se preferir aquelas que ofereçam um desempenho neutro.

3.2.2.8 – A Ponte de Wheatstone

As variações de resistência observadas sobre os extensômetros de resistência elétrica são muito pequenas, na ordem de $\mu\Omega$. Medir diretamente estas variações pode significar uma difícil e onerosa tarefa. Para facilitar e baratear esta operação utiliza-se a Ponte de Wheatstone (figura 3.13).

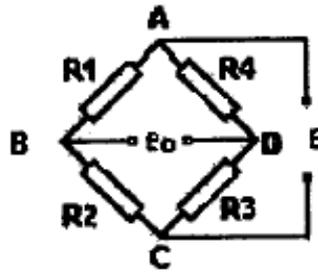


Figura 3.13 - Diagrama elétrico da Ponte de Wheatstone.

Composta por quatro resistores, na ponte de Wheatstone é aplicada uma tensão de alimentação E e obtida uma tensão de saída (também chamada de sinal de saída) e_o .

A fim de simplificar a compreensão do funcionamento, esta pode ser separada (Figura 3.14) em duas partes, uma formada pelos resistores $R1$ e $R2$, e outra formada pelos resistores $R3$ e $R4$.

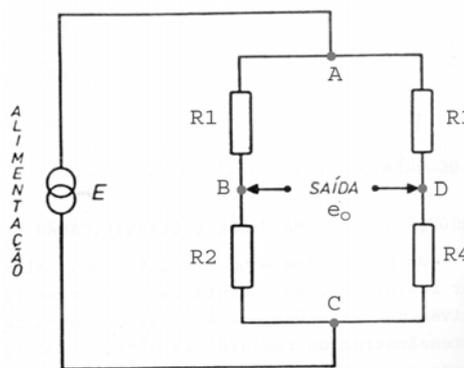


Figura 3.14 – Braços da Ponte de de Wheststone – Figura adaptada.

Fonte: Borchadt e Zaro, 1982.

Considerando zero a tensão no ponto C, as tensões nos ponto B (V_B) e D(V_D) são assim calculadas:

$$V_B = \frac{E.R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (3.1)$$

$$V_D = \frac{E.R_4}{(R_3 + R_4)} \quad (3.2)$$

Como a tensão de saída da ponte $e_o = V_B - V_D$, temos:

$$e_o = \frac{E.R_2}{(R_1 + R_2)} - \frac{E.R_4}{(R_3 + R_4)} \quad (3.3)$$

Supondo que a ponte é formada por extensômetros de mesma resistência elétrica ($R_1=R_2=R_3=R_4=R$), teremos $e_o = 0$ e dizemos que a ponte encontra-se balanceada.

Quando sujeito a um esforço de natureza trativa, o strain gage apresenta aumento de resistência ($R+\Delta R$) e quando comprimido, a resistência elétrica mostra uma diminuição em relação ao valor inicial ($R-\Delta R$). Um extensômetro que apresenta variação no valor da sua resistência elétrica é chamado de elemento ativo numa Ponte de Wheatstone.

Se um dos extensômetros sofrer variação de resistência elétrica devido a deformação aplicada, conseqüentemente a situação de $e_o=0$ não vale mais. Supondo-se, por exemplo, que $R_2' = R_2 + \Delta R$, ou seja, $R_2' = R + \Delta R$. O novo valor de e_o é dado por

$$e_o = \frac{E(R + \Delta R)}{(2R + \Delta R)} - \frac{E}{2} \quad (3.4)$$

Sabendo que $\Delta R = \varepsilon.R.k$, conclui-se que:

$$e_o = \frac{E(R + \varepsilon.R.k)}{(2R + \varepsilon.R.k)} - \frac{E}{2} \quad (3.5)$$

Considerando $e_o \ll E$, e isolando ε , chega-se a expressão simplificada (3.6) usada para determinar a deformação relativa sofrida por um strain gage em função da variação de tensão elétrica que se observa na saída da Ponte de Wheatstone para o caso no qual somente um dos elementos apresenta variação da resistência elétrica. Esta configuração é chamada de um quarto de ponte.

$$\varepsilon = 4 \frac{1}{k} \frac{e_o}{E} \quad (3.6)$$

A simplificação adotada ($e_o \ll E$) produz um erro (Figura 3.15) em relação a solução completa. No entanto, este apresenta um valor percentual muito pequeno dentro da faixa de medições usualmente usada: o erro máximo observado é de 0,2% a 2000 $\mu\epsilon$. A fonte deste erro é o sinal elétrico não linear de saída da Ponte de Wheatstone. Contudo, utilizando a expressão completa para esta configuração (1/4 de ponte), este erro cai para zero.

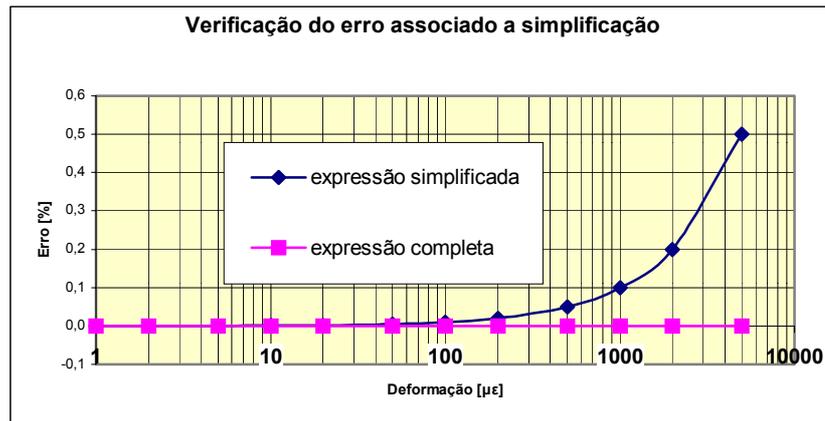


Figura 3.15 – Análise do erro causado pela simplificação.

3.2.2.9 - Cuidados especiais:

A configuração 1/4 de ponte é amplamente utilizada na análise experimental de tensões, todavia alguns cuidados devem ser observados. Este tipo de ligação não permite compensação de efeitos térmicos (Figura 3.16), como quando bem colocados nas configurações de 1/2 ponte (dois elementos ativos) ou ponte completa (os quatro elementos são ativos).

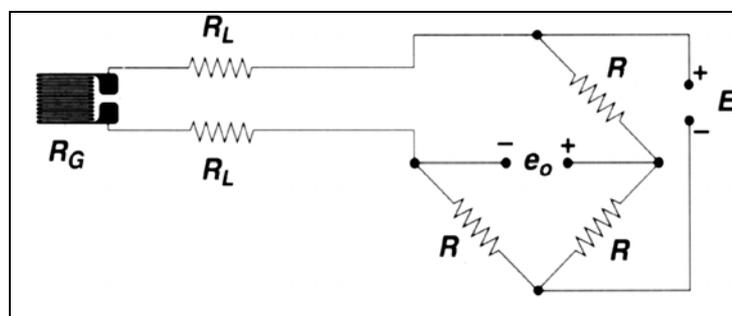


Figura 3.16 – Esquema da configuração 1/4 de ponte, ligação a dois fios. Figura adaptada.

Fonte: Measurements Group TT-612

Apesar do fato dos extensômetros comerciais serem autocompensados termicamente, isto não evita que variações térmicas aplicadas a estrutura sob análise causem mudanças no valor da resistência elétrica destes, ou que este mesmo fato se manifeste nos cabos elétricos de ligação utilizados, causando erros nos dados obtidos durante a medição.

Devem ser evitadas grandes diferenças de temperatura ao longo das tomadas de dados de uma análise de tensões a fim de evitar a superposição dos efeitos causados pela deformação (que se deseja conhecer) e das variações causadas por efeitos térmicos. Visando a compensação dos efeitos térmicos sobre os fios de ligação de um extensômetro a Ponte de Wheatstone, é comum a adoção de uma solução bastante simples e eficiente chamada ligação a três fios (Figura 3.17).

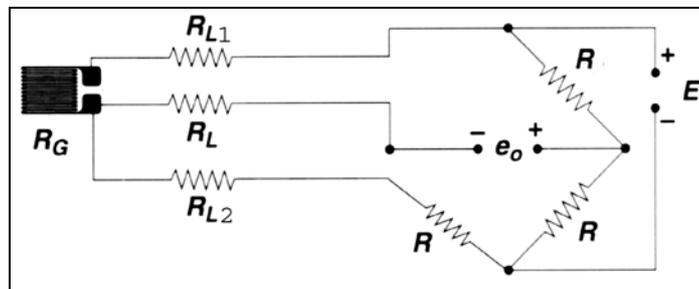


Figura 3.17 – Esquema da configuração $\frac{1}{4}$ de ponte, ligação a 3 fios. Figura adaptada.

Fonte: Measurements Group TT-612

Na configuração $\frac{1}{4}$ de ponte a dois fios (Figura 3.16), variações térmicas sobre os fios de ligação R_L causam mudanças no valor da resistência elétrica destes e conseqüentemente na resistência total do elemento da Ponte, composta pela soma da resistência elétrica do extensômetro com as resistências R_L dos fios de ligação. O resultado disto é o indesejado surgimento de uma tensão em e_o . Para neutralizar este efeito, utiliza-se a ligação a três fios, onde a resistência elétrica nos cabos de ligação encontra-se distribuída igualmente nos dois elementos da Ponte. A resistência de um fio (R_{L1}) soma-se a resistência elétrica do strain gage, enquanto a do outro fio (R_{L2}) é somada a resistência do outro elemento (R) do mesmo braço equilibrando as resistências elétricas dos mesmos, bem como os efeitos que possam aparecer decorrentes das variações que estas possam sofrer.

3.3 - INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE SEMEADORAS AGRÍCOLAS.

3.3.1 – O SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

Os estudos sobre o plantio direto se iniciaram na década de 70, em busca de uma agricultura sustentável e tem refletido na mudança de comportamento dos produtores. O não revolvimento do solo (Figura 3.18), a rotação de culturas e o uso de culturas de cobertura para formação de palhada, associados ao manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas, caracterizam a técnica.

Quando bem aplicado, o sistema pode proporcionar uma série de vantagens ao produtor, tais como economia de combustível no processo de preparação do solo/plantio, diminuição da incidência de erosão, maior retenção de água (maior umidade no solo) e maior produtividade.

Sobre o plantio direto, a Semeato, 2003, cita como benefícios do plantio direto a redução da erosão do solo, a redução da temperatura do solo, o aumento da infiltração de água, o aumento da retenção de água pelo solo, a maior diversificação de matéria orgânica no solo, a melhora da qualidade do solo, o aumento da fertilidade do solo, o aumento da produtividade, a redução do uso de adubo, a redução do perigo do aquecimento terrestre, a redução da sedimentação dos rios, reservatórios e lagos, a melhora na qualidade da água, e a diminuição da sedimentação das estradas e uma agricultura sustentável garantida: ecologicamente, economicamente e socialmente.

Esta moderna agricultura exige que as máquinas e equipamentos agrícolas sejam eficientes, resistentes e precisos, de modo a atingir uma maior produtividade.



Figura 3.18 – Sistema de plantio direto: plantio sobre a palha.

Muitos consideram que no sistema de plantio direto, a semeadora é o coração do sistema produtivo, pois deve apresentar regularidade de distribuição de sementes e de fertilizantes entre outras qualidades.

3.3.2 – A SEMEADORA AGRÍCOLA

Do ponto de vista de engenharia, as semeadoras (Figura 3.19) podem ser descritas como sendo estruturas em aço carbono (com uma haste de engate a um trator), que sustentam depósitos de sementes e adubos, assim como seus mecanismos de distribuição, além de ferramentas que fazem a abertura e fechamento do solo por onde passam.



Figura 3.19 – Semeadora agrícola

Fonte: Web site John Deere

Já o ponto de vista agrônomo verifica 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.

Uma vista esquemática lateral (Figura 3.20) permite a separação de alguns dos componentes por grupos e/ou função. Muitas peças são encontradas repetidas vezes ao longo do que é chamado de linha. Portanto uma linha de plantio é responsável por uma carreira de plantas, cujas sementes devem ser depositadas a igual distância e profundidade por uma seqüência de ferramentas que se repete ao longo da semeadora. Uma breve discussão sobre cada conjunto permite compreender mais facilmente sua função.



Figura 3.20 – Vista esquemática lateral de uma a semeadora.

Na parte frontal da semeadora encontramos uma haste, chamada de lança, que tem como função fazer a conexão entre o trator e a plantadeira, permitindo a movimentação e a manobrabilidade requeridos. Na parte dianteira inferior, localiza-se uma série de conjuntos (Figura 3.21) formados pelos chamados disco de corte e haste sulcadora (ou simplesmente sulcador). A função principal deste disco é efetuar o corte e abrir o sulco onde será colocado o adubo e pode ser encontrado em diversos formatos e tamanhos. Abrir o sulco onde será colocado o adubo é a principal tarefa do primeiro sulcador. Outras ferramentas como disco duplo desengatado podem substituir esta ferramenta, dependendo de diversos fatores. Além destes componentes, uma série de outros podem ser encontrados neste conjunto, como, por exemplo, rodas niveladoras e rodas de limpeza. Junto (e imediatamente após) a haste sulcadora ou mecanismo de disco duplo verifica-se a existência de um tubo condutor, responsável pela aplicação do adubo no solo.

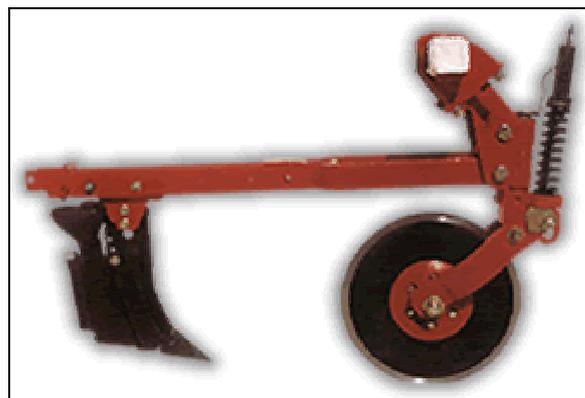


Figura 3.21 - Conjunto disco de corte e sulcador.

Fonte: Tecmaster web site.

Ainda na parte inferior da semeadora, seguem-se mecanismos de fechamento parcial do sulco, aplicação das sementes e fechamento final do sulco plantado (Figura 3.22). Assim como acontece no conjunto responsável pela abertura do solo/adubação, esta parte pode apresentar uma série de diferentes componentes visando solucionar os diversos problemas que se apresentam nesta parte.



Figura 3.22 – Diferentes ferramentas usadas para o fechamento dos sulcos.

Diferentes soluções para os mecanismos de dosagem de adubo e sementes são também encontradas nos diversos modelos dos vários fabricantes existentes, assim como para as solucionar a questão de transportá-los (figura 3.23).



Figura 3.23 – Diferentes soluções para a função de transporte de adubo e sementes.

Outros aspectos podem ser considerados importantes para a caracterização de uma semeadora. A posição dos pneus é uma delas. Muitas apresentam os pneus dispostos nas laterais. Porém as mais modernas apresentam os pneus internamente e entre as linhas de plantio, diminuindo o efeito de compactação do solo sobre a linha. No caso dos pneus internos é comum que a máquina apresente um eixo acionado hidráulicamente que a levanta em relação ao solo, possibilitando desta forma diferentes profundidades de plantio, assim como facilita o transporte, erguendo toda a semeadora. Um sistema hidráulico semelhante é encontrado naquelas com rodas

laterais, no entanto, muitas utilizam o chamado terceiro ponto do trator para desempenhar as mesmas tarefas.

Algumas semeadoras apresentam também duas hastes laterais (uma à esquerda e outra à direita), geralmente acionadas hidráulicamente e que dispõem de um disco na extremidade. A estes mecanismos denominamos marcadores e são responsáveis pela indicação de onde deve passar o pneu do trator quando este estiver passando ao lado, permitindo que todas as linhas plantadas apresentem a mesma distância entre si.

Além do número de linhas os catálogos dos fabricantes ainda informam em seus catálogos o peso de cada modelo, bem como a potência requerida por cada um deles. Verifica-se que a maioria das máquinas de maior peso demandam maior potência. Esta é uma informação importante, pois necessitando maior potência (maior consumo de combustível) do que os concorrentes, a semeadora deve apresentar vantagens muito maiores noutros quesitos em relação as concorrentes para se manter competitiva no mercado.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Durante a execução do presente trabalho foram realizados ensaios em semeadoras de 11, 13 e 18 linhas, respectivamente nas cidades de Horizontina (RS), Arapoti (PR) e Rondonópolis (MT) durante os meses de dezembro de 2000 e janeiro de 2001. As diferentes localizações adotadas nos testes proporcionaram obter variações nos fatores temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Este fato permitiu verificar o funcionamento do método nas diversas condições encontradas.

4.1 MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES NAS SEMEADORAS

Em cada um dos modelos testados, foi feita uma pré-avaliação do chassi e dos sistemas articulados, enfatizando-se onde poderiam aparecer problemas estruturais. Assim, nestes locais conforme ilustra a figura 4.1 foi aplicado um jato de areia para realizar a limpeza e na seqüência foi aplicado o Stresscoat[®]. Devido as diferentes condições climáticas (temperatura e umidade) encontradas em cada caso, produtos apresentando diferentes especificações tiveram que ser utilizados, como o ST 70F/21C em Horizontina, o ST 80F/27C em Arapoti e o ST 95F/35 em Rondonópolis.



Figura 4.1 – Peça após a aplicação do jato de areia.

Em cada um dos locais, as diferentes semeadoras submetidas a aplicação do Stresscoat[®], apresentavam-se com uma cobertura amarela e brilhante (Figura 4.2). Estas foram submetidas ao

trabalho de campo, tão logo a temperatura ambiente permitisse (em dois casos à noite: Arapoti e Rondonópolis).

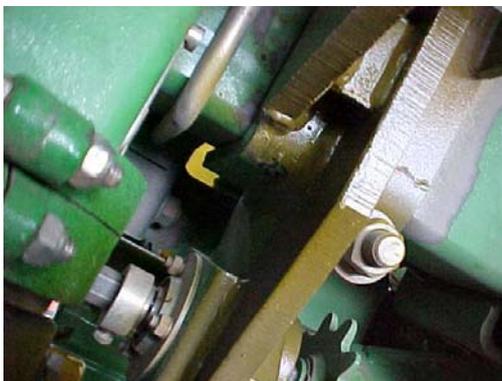


Figura 4.2 – Peça de uma semeadora coberta por Stresscoat[®].

Com o auxílio de uma lâmpada fluorescente de 20W, 12V foram investigados e marcados e numerados as regiões que apresentaram trincas. Ainda foi observada a direção principal da deformação, bem como a região de maior deformação. Baseado nisto foram indicadas com o auxílio de um punção marcando três pontos (Figura 4.3) na estrutura com a seguinte convenção: a direção principal é coincidente com a reta que passa pelos dois pontos que se encontram mais próximos, enquanto a reta perpendicular a primeira que passa pelo terceiro ponto indica o centro da grade do extensômetro a ser colado.



Figura 4.3 – Marcação dos três pontos.

Uma nova limpeza para retirar a camada de Stresscoat (Figura 4.4) teve que ser executada, através do processo de lixamento com o uso sucessivo de lixas com as seguintes

granulometrias: 80, 150, e 400, respectivamente. Esta seqüência foi mantida até se obter o grau de regularidade da superfície desejado.



Figura 4.4 - Superfície metálica após o uso de lixas com diferentes granulometrias.

Na seqüência procedeu-se a limpeza química da superfície, utilizando-se inicialmente um spray solvente (o limpador de contatos LPS), o álcool isopropílico aplicado com o auxílio de uma pequena bucha de algodão numa pinça (Figura 4.5), seguido da aplicação do ácido fraco (Conditioner MCA-1, da Vishay) e do neutralizador (neutralizer MN5A-1, também da Vishay), ambos aplicados também com o uso da bucha de algodão enrolado sobre a pinça.

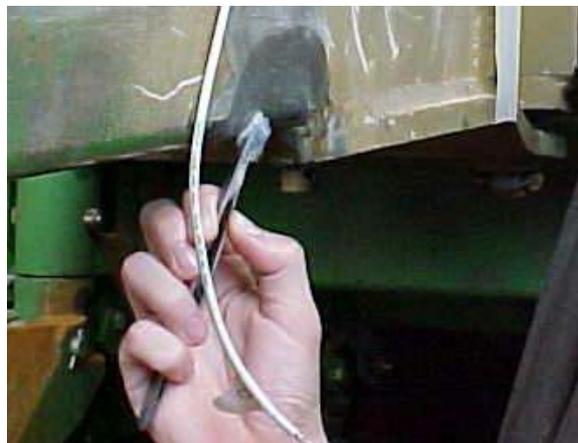


Figura 4.5 – Aplicação do ácido fraco e álcool isopropílico com o auxílio de uma pinça com algodão.

Com o objetivo de atender os critérios técnicos necessários, bem como apresentar facilidade de aquisição e disponibilidade no mercado, foram escolhidos os strain gage da Kyowa KFG-5-120-C1-11: uniaxiais para uso geral em aço, com 5mm de comprimento de grade (por 1,4mm de largura), resistência elétrica de 120 Ω e fator gage aproximado de 2.1.

Os eixos de posicionamento dos strain gages foram marcados com o auxílio de canetas para retro-projetor de ponta fina. Estes foram montados com o auxílio de uma fita adesiva comum, a qual facilita o posicionamento fino dos sensores. Para a fixação dos strain gages (Figura 4.6) foi utilizado o adesivo da marca Loctite série 496 a base de cianocrilato.



Figura 4.6 – Aplicação do adesivo sob o strain gage.

Na semeadora de 11 linhas foram utilizados três resistores de precisão ($120,0 \Omega \pm 0,1 \%$) fixados junto ao ponto de medição (Figura 4.7) para completar o circuito tipo ponte de Wheatstone. Dado as condições operacionais, estes resistores foram descartados após as medidas de campo.

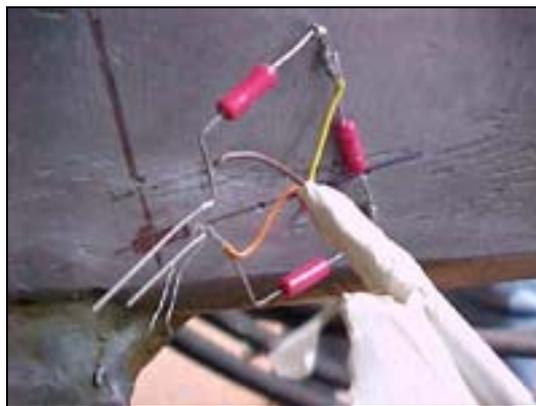


Figura 4.7 – Resistores fixados junto ao ponto de medição.

Para aumentar a robustez mecânica e a repetibilidade das medidas de campo, nas semeadoras de 13 e 16 linhas, este sistema evoluiu para uma caixinha plástica contendo estes resistores no seu interior e dotada de conectores para a entrada e saída dos fios de conexão

facilitando o trabalho na hora de trocar os pontos de medição. Esta evolução deu-se também devido ao custo destes resistores (US\$ 6,00 por unidade) e a necessidade de medições em 32 pontos diferentes em cada uma destas semeadoras.

Em seguida, os strain gages receberam a proteção (Figura 4.8) de uma cobertura de borracha de silicone da marca Dow Corning do tipo 3145 RTV, evitando que a poeira, o barro ou a umidade, assim como choque de qualquer objeto que pudesse danificá-los ou interferir nas medidas.



Figura 4.8 – Proteção de borracha de silicone.

Foram utilizados cabos elétricos da marca Pirelli, modelo KMP AF 4X1X28 AWG, para a ligação dos sensores ao condicionador de sinais, devido ao fato que neste cabo, cada condutor apresenta uma blindagem individual. Estes cabos foram fixados a estrutura da semeadora com o auxílio de fitas adesivas do tipo Fita Crepe, evitando o deslocamento e o movimento dos mesmos durante o ensaio.

4.2 - HARDWARE E SOFTWARE EMPREGADOS

A leitura, a aquisição e o armazenamento dos dados obtidos durante os testes foram feitos com o auxílio de um micro-computador portátil Toshiba com processador Pentium de 133 Mhz e 48Mb de memória do tipo RAM. Este equipamento utiliza Windows 95, e foi inicialmente equipado com um conversor analógico /digital Computer Boards tipo PCM-CIA-DAS16/330: 16 canais com 12 bits de resolução, escalas de $\pm 5V$ e $\pm 10V$, assim como velocidade máxima de

conversão de 330 kS/s (330.000 amostras por segundo). Nos últimos testes realizados, ou seja, na semeadora de 18 linhas, foi usado o conversor MAX187, montado no Laboratório de Medições Mecânicas (LMM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este conversor de um canal, com resolução de 12 bits, escala de 0 a 4,095 V \pm 1 % e máxima taxa de conversão próxima de 20 kS/s foi adotado devido a robustez física que este apresenta em relação ao primeiro. Externamente ao micro-computador foi utilizado um condicionador de sinais e multiplexador da Computer Boards, o CIO-EXP-BRIDGE16 que foi alimentado por duas baterias de 12 V-7 Ah (em paralelo), através de um regulador “caseiro” de tensão (5 V_{CC}-1 A). Este oferece tensões de 1 V, 2 V, 4 V e de 10 V para alimentação dos 16 canais (pontes completas, meias pontes, ou um quarto de ponte a dois fios) que dispõe. Ele se destina para uso em circuitos tipo Ponte de Wheatstone e proporciona ganho de 1, 10, 100 ou 1000 vezes (\pm 0,1%) independente por canal, mais um multiplicador de 2,5 (\pm 1 %) vezes para todos os canais. O BRIDGE16 incorpora um multiplexador que permite medir cada canal especificamente, mediante o recebimento da codificação digital correspondente. Esta operação pode ser realizada centenas de vezes por segundo e é realizada por um programa computacional. O software empregado neste trabalho foi concebido para ser utilizado em sistemas operacionais DOS e é chamado de SAD32. Na versão 2.61, foi criado e desenvolvido no LMM, é de uso público e gratuito. Por se tratar de uma poderosa ferramenta de aquisição e análise de sinais e encontrar-se a gratuitamente na página <http://www.ufrgs.br/lmm>, resolveu-se adotar este software.

4.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ADOTADO

Por utilizar-se strain gages de 120 Ω , a tensão nominal de alimentação usada foi de 4 V, que devido a perda de tensão ao longo dos cabos de ligação foi regulada de forma a obter-se 4,00V \pm 1 % na extremidade da ponte de Wheatstone . Adotando a escala de \pm 5 V no conversor A/D e ganho de 1000 vezes no condicionador, pode-se efetuar leituras cuja capacidade supera os 2000 $\mu\epsilon$, ou seja dentro da região de deformação plástica do material usado (aço) na fabricação das semeadoras.

Para este ganho de tensão (X1000), o amplificador do condicionador apresenta uma faixa passante de 0 a 30 Hz com 1% de atenuação do ganho nesta máxima frequência (30 Hz), o que atende perfeitamente as necessidades do caso: Conforme informações do fabricante das semeadoras, testes efetuados nos Estados Unidos indicaram não existir a necessidade de medir

freqüências superiores a 30 Hz. Durante os testes foram adotadas diferentes taxas de amostragem do sinal elétrico proveniente dos strain gages: 60, 100, 200 e 400 S/s (amostras por segundo) e concluiu-se que não existe a necessidade de taxas superiores a 60 S/s, pois na análise dos dados foram observados somente componentes de baixa freqüência conforme mostra a Figura 4.9.

Figura 4.9 – Componentes de baixa freqüência contidos no sinal.

O ajuste de zero para cada um dos canais foi realizado sempre que se iniciaria uma nova tomada de dados referente as diferentes tarefas através de um “trimpot” colocado junto ao condicionador, responsável pelo balanceamento da ponte. Um segundo ajuste (mais grosso) foi usado quando necessário e trata do ajuste do “off-set” do circuito amplificador do condicionador. Para o segundo conversor A/D usado nas medições realizadas o valor do zero adotado foi de 2,048 V, uma vez que o fundo de escala é de 4,095 V. Este valor foi descontado posteriormente através do software. Depois de realizado o "zeramento" de todos os canais, foram realizadas as tarefas da semeadora propriamente ditas.

Para o caso de Horizontina, onde foram usados somente 16 extensômetros, cada tarefa foi feita uma única vez, enquanto em de Arapoti e Rondonópolis foram feitas duas vezes, uma vez que foram medidos 32 pontos e o condicionador disponibiliza apenas 16 canais.

As semeadoras foram carregadas com a carga nominal de sementes e de adubo e as tarefas realizadas foram as seguintes:

- 1) Na posição de transporte: arrancada brusca;
- 2) Na posição de transporte: freada brusca;
- 3) Na posição de transporte: curva forte a esquerda;
- 4) Na posição de transporte: curva forte a direita;

- 5) Na posição de transporte: zigue-zague;
- 6) Na posição de transporte: cruzando obstáculos desencontrados;
- 7) Na posição de transporte: cruzando forte declive em velocidade;
- 8) Plantando: no plano com marcador direito acionado;
- 9) Plantando: no plano com marcador esquerdo acionado;
- 10) Plantando: subindo patamar a 45° com marcador esquerdo acionado;
- 11) Plantando: subindo patamar a 45° com marcador direito acionado;
- 12) Plantando: descendo patamar a 45° com marcador esquerdo acionado;
- 13) Plantando: descendo patamar a 45° com marcador direito acionado;
- 14) Plantando: subindo patamar a 90° com marcador esquerdo acionado;
- 15) Plantando: descendo patamar a 90° com marcador esquerdo acionado;
- 16) Plantando: fazendo curva no plano à esquerda com marcador direito;
- 17) Plantando: fazendo curva no plano à esquerda com marcador esquerdo;
- 18) Plantando: fazendo curva no plano à direita com marcador direito;
- 19) Plantando: fazendo curva no plano à direita com marcador esquerdo;
- 20) Levando a quebra o parafuso de segurança do marcador esquerdo;
- 21) Levando a quebra o parafuso de segurança do marcador direito;

Cada tarefa gerou um arquivo de extensão <*.SAD>, registrando o comportamento dos 16 canais ao longo do tempo de cada teste. Tendo em posse os dados destes testes e o quanto percentualmente cada uma destas atividades significa ao longo da vida de uma semeadora, o fabricante pôde efetuar um cálculo estimando o tempo de vida de cada um dos pontos medidos, bem como do conjunto. Para estimar este tempo, o fabricante utilizou um software que requer arquivos de entrada, compatíveis com o Excel, contendo na primeira coluna as informações sobre o tempo e nas colunas seguintes os dados de deformação [$\mu\epsilon$] de cada ponto medido.

O SAD32 não exporta este tipo de arquivos, no entanto é capaz de exportar arquivos compatíveis com o Grapher, de extensão <*.DAT>, possíveis de serem lidos no Excel.

Assim sendo, cada arquivo teve que ser exportado com a extensão DAT e aberto no Excel com os dados importados a partir da linha 1, delimitados por vírgulas e usando aspas (") para definir texto. Obtém-se com isto, uma sucessão de colunas fornecendo os dados do instante de tempo e do valor correspondente lido para cada canal. Eliminaram-se as colunas de tempo, deixando apenas as colunas referentes a deformação adquirida (Figura 4.10) a cada instante.

Gage1	Gage2	Gage3	Gage4	Gage5	Gage6	Gage7
-0,12898	-7,04968	2,192659	0,058962	-0,16583	4610,904	0,055277
2,174236	2,163178	-0,11055	0,058962	-0,16583	4610,904	-2,24794
-0,12898	-0,14004	-7,02019	0,058962	-0,16583	4610,904	9,268131
2,174236	-0,14004	-0,11055	2,362175	-0,16583	4610,904	0,055277
-0,12898	-0,14004	-2,41377	9,271816	2,137382	4610,904	0,055277

Figura 4.10 – Registro de dados de deformação típicos apresentados pelo no Excel[®].

Como se utilizou uma taxa de aquisição na ordem de centenas de amostras por segundo e cada tomada de dados durou alguns segundos (8-20s), formando colunas com centenas ou até milhares de linhas e as informações sobre o tempo não foram consideradas, algumas informações adicionais (Figura 4.11) foram adicionadas aos arquivos, contendo a taxa e o tempo de aquisição, além dos valores máximos e mínimos encontrados em cada coluna.

Tipo de strain gage : kfg-5-120-c1-11
 Fator Gage =2.12
 Tamanho de arquivo:13.36s
 taxa de aquisição: 100Hz por canal

	"Canal 1 Y"	"Canal 2 Y"	"Canal 3 Y"	"Canal 4 Y"	"Canal 5 Y"	"Canal 6 Y"
Máx	11	12	43	69	9	416
Min	-103	-124	-10	1	-676	-159

Figura 4.11 – Informações adicionais contidas nos arquivos.

Para os casos nos quais foram usadas taxas de aquisição maiores, foram realizadas operações como filtragem do sinal (média móvel, 60 Hz) e posterior sub-amostragem de forma a exportar arquivos com tamanhos aproximados.

Todos os dados foram adquiridos em valores de tensão, vindos do condicionador de sinais. A equação 3.6 permite transformar os dados obtidos na deformação relativa correspondente, considerando a amplificação de 1000 vezes do condicionador de sinais, que o fator gage dos extensômetros usados é 2.12 e que a tensão de alimentação usada foi de 4 V. Assim, para calcular a deformação relativa [$\mu\epsilon$], dividi-se o valor lido [mV] por 2120.

Como o zero adotado para o caso do conversor MAX187 é de 2,048 V e o fundo de escala é de 4,095 V, sobra uma tensão de aproximadamente $\pm 2V$ para as medidas. Com ganho de 1000 vezes, as máximas deformações admissíveis dentro desta escala seriam próximas de 1000 $\mu\epsilon$, abaixo do necessário. Desta forma, utilizou-se o ganho de 250 vezes, que para este caso, os dados lidos [mV] devem ser divididos por 530 para obter o valor da deformação relativa [$\mu\epsilon$].

O uso de resistores de calibração para sistemas de aquisição desta natureza é comum. Existem resistores que quando colocados em paralelo com um dos braços da Ponte, simulam uma deformação. Foram utilizados resistores com valor de $59880 \Omega \pm 0.02 \%$ para causar uma deformação aparente de $1000 \mu\epsilon$, calibrando desta forma o sistema de aquisição de dados em deformação relativa, conforme mostrado na figura 4.12.

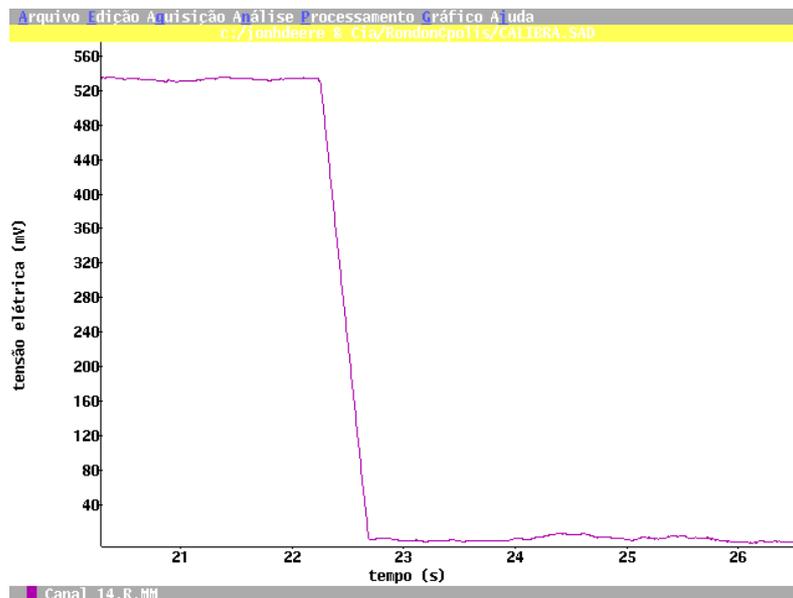


Figura 4.12 – Calibração do sistema de aquisição: inicialmente com o auxílio de um resistor calibrador e depois sem.

No entanto, deve-se ressaltar que este valor de resistor é fabricado com o objetivo de simular a deformação para um extensômetro de 120Ω e fator gage nominal de 2,00.

4.4 - LEVANTAMENTO DA IMPRECISÃO ASSOCIADA AO MÉTODO

São várias as fontes de imprecisão presentes neste processo experimental. Erros intrínsecos ao uso de strain gages, a determinação da posição dos mesmos, bem como a instrumentação necessária, são responsáveis por uma imprecisão dos dados obtidos.

A resistência nominal do strain gage é de 120Ω usada como base para os cálculos, porém o valor dos utilizados foi de $119,8 \pm 0,2 \Omega$. O valor do fator gage dos extensômetros usados é de 2.12 com uma imprecisão de $\pm 1 \%$. A sensibilidade transversal dos mesmos é de 1%. Além disto, soma-se o erro causado pela simplificação na equação 3.6, que depende do valor da deformação.

A queda de tensão de alimentação observada nos cabos elétricos foi minimizada, ajustando-se este valor para o mínimo erro. No entanto, uma variação de $\pm 1\%$ pode ser medida entre uma ponte e outra.

O sinal elétrico de saída da Ponte de Wheatstone também apresenta perdas ao longo do cabo assim como devido a impedância de entrada do condicionador de sinais. Soma-se a isto, a capacitância do cabo, que interfere nas medições a medida que a frequência cresce.

A primeira etapa de amplificação de condicionador/multiplexador apresenta uma imprecisão de $\pm 0,1\%$, enquanto na segunda etapa, quando usada, este erro é de 1% . Estes valores nominais são colocados para ganho em corrente contínua. No entanto, para sinais dinâmicos deve-se verificar que uma crescente atenuação vai ocorrendo na medida que a frequência deste sinal cresce e depende também do ganho de tensão escolhido. Para um ganho de 1000 vezes, a 30 Hz, o sinal apresenta uma diminuição de 1% em relação ao esperado.

Nominalmente, os conversores A/D apresentam uma incerteza na ordem de $\pm 1\%$ nos valores de fundo nas escalas de medição.

Associado a estas fontes, temos os problemas devido a determinação da posição do strain gage. Esta é inicialmente apontada pelo padrão das trincas observadas no Stresscoat. Por maior que seja o cuidado nesta operação, é inerente ao método, a verificação de um erro significativo nesta etapa. Este pode ser observado tanto na determinação da direção principal, como também na localização da região de maior deformação. É pertinente ao processo a existência do erro devido a chamada marcação.

Seguem-se erros devido ao alinhamento do extensômetro (Figura 4.13), da sua posição e do seu comprimento.

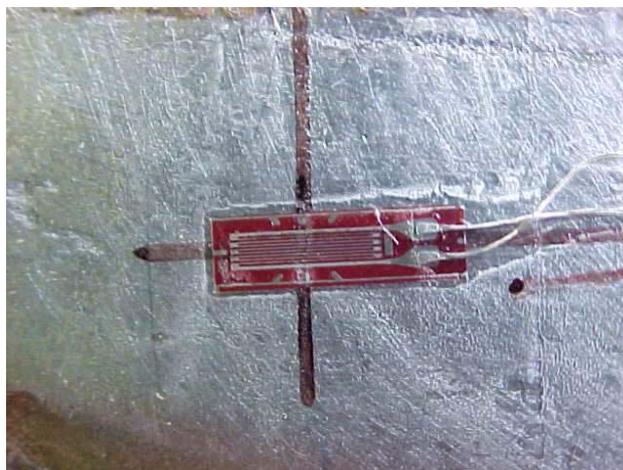


Figura 4.13 – Alinhamento do strain gage.

Fixando-se o strain gage de forma a não coincidirem perfeitamente a direção da principal deformação com a do eixo do próprio, este indicará um valor inferior. Isto acontecerá da mesma forma, se o extensômetro não se encontrar na posição onde se encontra maior deformação. Além disto, na maioria dos casos, existe um gradiente de deformação sob o sensor, que indica um valor médio do que está acontecendo sob a sua grade que é a área efetiva de medida. Desta forma, existirá um erro em virtude do comprimento desta grade.

Assim sendo, para estimar corretamente o erro associado ao processo investigativo em questão, é necessária uma análise criteriosa para cada canal medido, bem como o levantamento das características específicas de cada medição.

Para uma verificação e avaliação grosseira do erro no método adotado, foram realizadas algumas simplificações e estimativas para os valores das fontes de erro, a seguir:

Tensão de alimentação: ± 1 %

Intrínsecos ao strain gage: ± 1 %

Sinal elétrico da ponte: $\pm 0,5$ %

Determinação da localização: $\pm 0,5$ %

Marcação: $\pm 0,5$ %

Posicionamento e alinhamento: ± 2 %

Amplificação/condicionamento: $\pm 0,5$ %

Conversor A/D: ± 1 %

Utilizando o método de Kleine e McClintock, obtém-se que a imprecisão intrínseca ao método fica próxima de ± 3 %, considerando as simplificações adotadas. Este valor apresenta uma referência relevante, visto a sua natureza experimental, podendo orientar o projeto estrutural, bem como calibrar possíveis modelamentos em elementos finitos.

5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa John Deere, e teve como meta principal desenvolver um método de análise experimental de tensões de baixo custo para testes em campo. Este estudo incluiu ainda, as medições em três modelos de semeadoras fabricados pela empresa. Nestas, foram levantados diversos dados específicos durante a realização das tarefas citadas anteriormente. Não obstante, estas medições tiveram como objetivo testar o método, e não coletar dados característicos de cada uma das semeadoras. Desta forma, os resultados aqui colocados se referem unicamente ao método empregado, e não aos dados específicos.

5.1 – CAMADA FRÁGIL

O método da Camada Frágil foi o primeiro aplicado nas três semeadoras utilizadas neste trabalho. Considerou-se que esta técnica apresentou resultados satisfatórios, indicando as regiões onde ocorreram as maiores deformações durante a execução das diversas tarefas de campo. Estas deformações ocorrem devido aos esforços de tração (Figura 5.1), onde se observou a formação de uma série de trincas no material de cobertura, indicando a direção principal de deformação sendo que as trincas aparecem de forma perpendicular a esta. Ainda pode-se verificar o local onde esta se dá de forma mais intensa, ou seja onde encontram-se maior número de trincas por unidade de área.

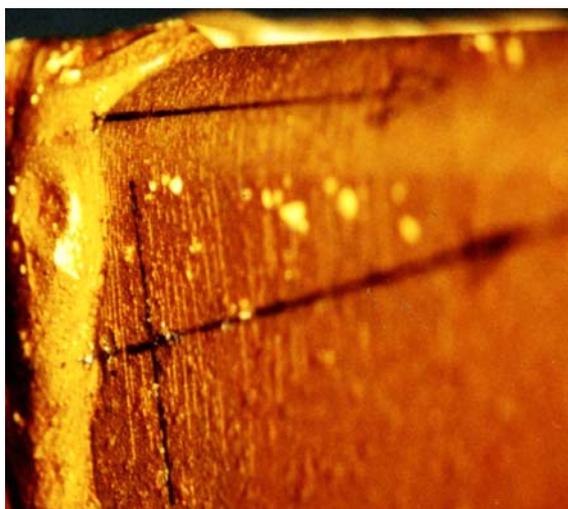


Figura 5.1 – Padrão de trincas formadas devido a esforço de tração.

Quando esforços compressivos foram aplicados aos componentes mecânicos cobertos pelo Stresscoat®, verificou-se que a cobertura encontrava-se enrugada (Figura 5.2). Da mesma forma que para os esforços de tração, pode-se determinar a região de maior deformação, bem como a direção principal observando o padrão formado.



Figura 5.2 – Rugas formadas na Camada Frágil devido a compressão aplicada.

5.2 – CALIBRAÇÃO E AJUSTE DE ZERO

Com a finalidade de verificar a calibração, bem como efetuar o balanceamento (ajuste de zero), foi utilizado a apresentação numérica (e não gráfica) do software SAD32. Assim, foi possível investigar possíveis fontes de erros compreendidas entre a ponte de Wheatstone e o sinal elétrico medido pelo software. A cada série de medições, o resistor de calibração foi colocado em paralelo com um dos braços da ponte, provocando uma leitura de tensão (equivalente a uma deformação de $1000 \mu\epsilon$ para strain gages com resistência elétrica 120Ω e $k = 2,00$). Como o valor do fator gage dos extensômetros usados é 2,12 o valor lido foi corrigido multiplicando o valor lido por 0,9434. Assim, foram verificados os erros na Ponte, nos cabos, no amplificador e na conversão A/D. Este procedimento foi efetuado para os dois equipamentos utilizados (dois conversores diferentes e distintos “ganhos” de tensão adotados no condicionador de sinais) e mostrou ser útil e eficiente.



Figura 5.3 – Modo numérico de apresentação de dados no SAD32.

5.3 - DADOS EM TENSÃO ELÉTRICA:

Depois de ajustado o zero e verificado o ganho de cada canal, foi iniciada a etapa de aquisição e armazenamento de dados. Estes são apresentados pelo SAD32 na forma de múltiplas curvas (Fig. 5.4) sobrepostas, representando as variações ocorridas nos respectivos pontos de medição, em função do tempo. Cada uma destas curvas é apresentada em diferentes cores, corresponde a tensão elétrica de saída da Ponte de Wheatstone amplificada pelo condicionador. Na primeira sementeira, onde foram analisados apenas 16 pontos, obteve-se um destes gráficos para cada tarefa executada. Já nas outras duas sementeiras, foram examinados 32 pontos. Desta forma, para cada tarefa executada, foram obtidos dois destes múltiplos gráficos.

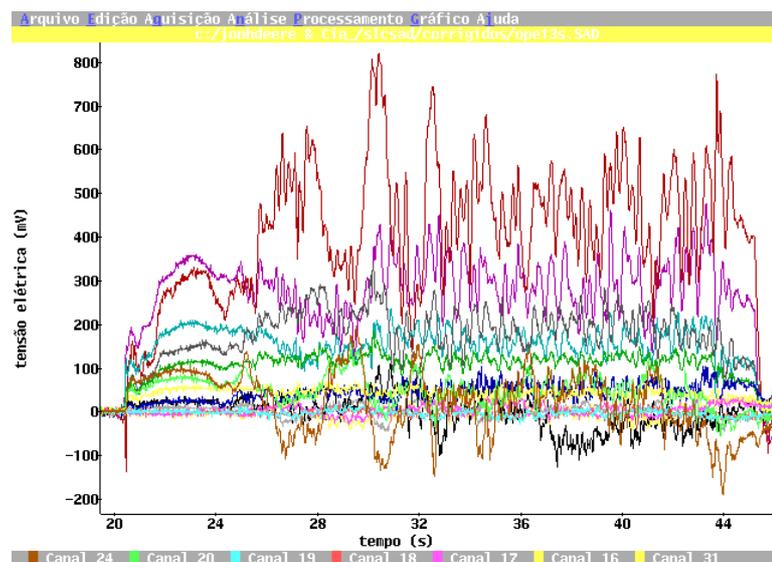


Figura 5.4 – Apresentação gráfica dos dados: 16 curvas de tensão em função do tempo.

5.4 – DADOS DE DEFORMAÇÃO RELATIVA

Os dados obtidos (em tensão elétrica) foram convertidos para a deformação relativa (Figura 5.5), mediante a multiplicação destes dados por constantes, através da função “escala” do menu “edição” encontrados no software SAD32. Nas duas primeiras sementeiras examinadas, foram utilizados um conversor com escala de ± 10 V e um ganho 1000 vezes no condicionador. Assim, os dados adquiridos (em mV) foram multiplicados por 0,4651 para obter os dados em deformação relativa [$\mu\epsilon$]. Já na última investigação experimental, o conversor usado apresenta escala de 0 a 4,095 V e o ganho usado no condicionador foi de 250 vezes. Desta forma, a constante multiplicadora aplicada foi de 1,861. Deve-se ressaltar que em ambos casos, a tensão de alimentação da Ponte de Wheatstone adotada para cálculos foi de 4,00 V.

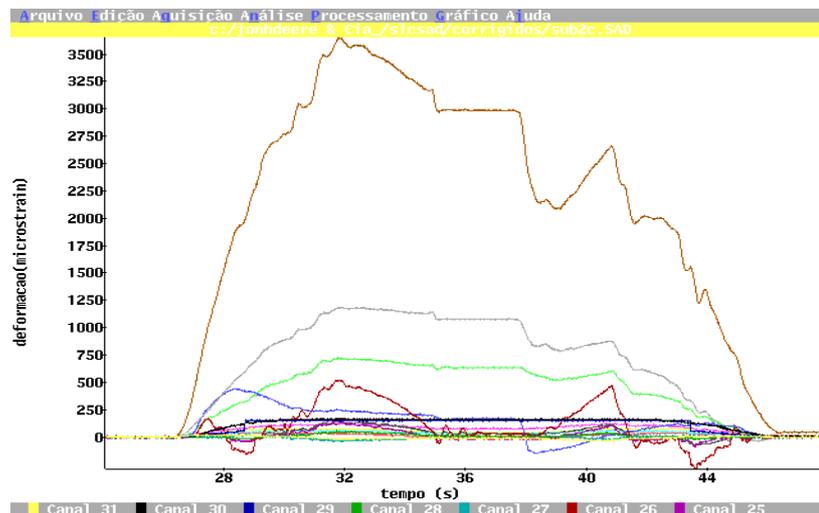


Figura 5.5 – Gráficos das deformações relativas em função do tempo.

5.5 – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Um dos recursos encontrados no SAD32 permitiu que fosse feita a investigação dos componentes em frequência (Fig. 5.6) contidas nos sinais adquiridos, através da função “FFT”, menu “processamento”. Observou-se não existir amplitudes significativas nos componentes de frequência acima de 1 ou 2 Hz. Esta informação pôde ser confirmada, quando observados mais criteriosamente os gráficos obtidos.

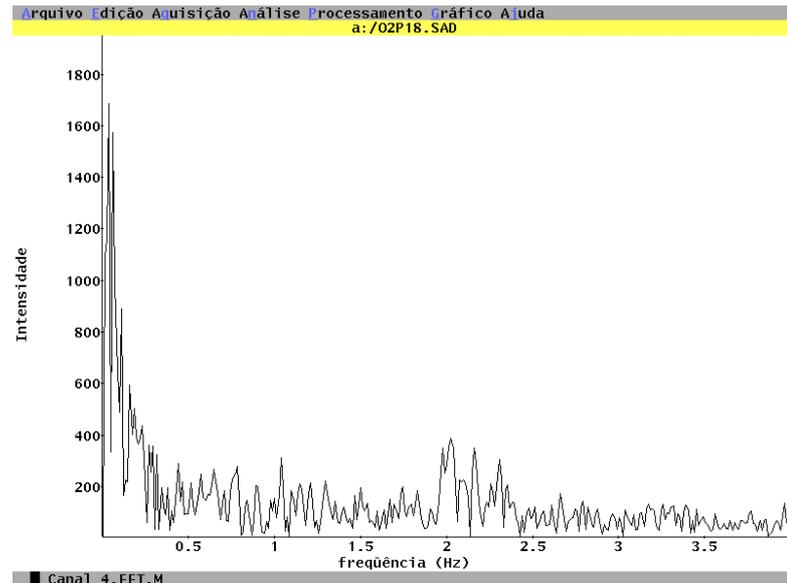


Fig. 5.6 – FFT dos sinais adquiridos.

5.6 - RUÍDOS NAS MEDIÇÕES

A relação sinal/ruído obtida nas medições realizadas nas duas primeiras semeadoras apresentou-se satisfatória. Já as medições feitas com o segundo sistema (terceira semeadora) não tiveram o mesmo resultado. Isto pode ser observado nos instantes iniciais dos gráficos, onde os dados ainda não haviam sido submetidos a um tratamento e quando ainda não tinha sido aplicado nenhum tipo de deformação sobre a estrutura (Fig.5.7). Era esperada uma reta próxima a zero, o que não se observou. Frequências relativamente altas compõem este ruído, facilitando muito o pós-processamento do sinal (de baixa frequência).

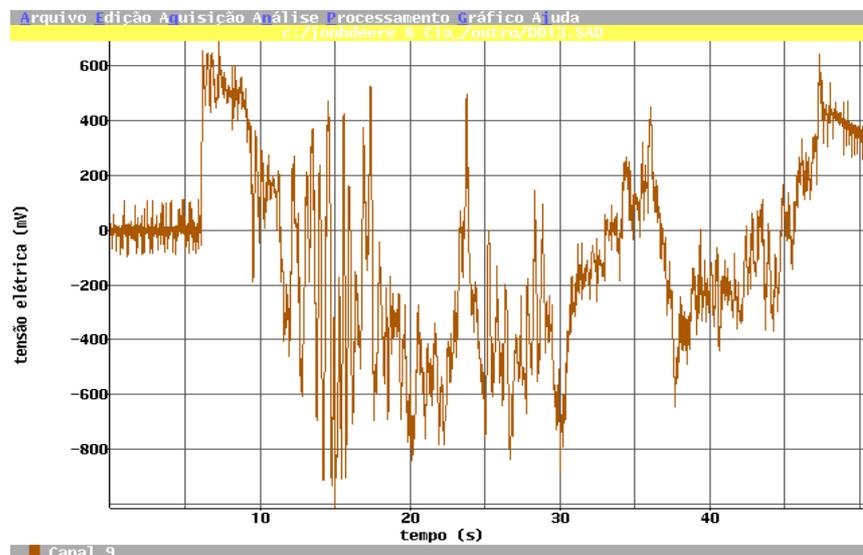


Figura 5.7 - Sinal com ruído elétrico presente.

5.7 - MULTIPLEXAÇÃO DOS DADOS

Observou-se em alguns dados adquiridos, que a partir de um instante de tempo aleatório, os resultados de diferentes canais se misturaram (Fig.5.8). Notou-se que a partir de um ponto, todos os registros mudavam de cor, mas que as curvas mantinha suas tendências. Isto ocorreu durante o processo de aquisição de dados. O sistema esporadicamente perdeu o sincronismo entre o que estava ocorrendo e o que estava sendo registrado, atribuindo os resultado de um determinado canal ao canal subsequente. Estes defeitos tiveram que ser corrigidos nos arquivos (manualmente, um a um), e não foi encontrada a origem da falha.

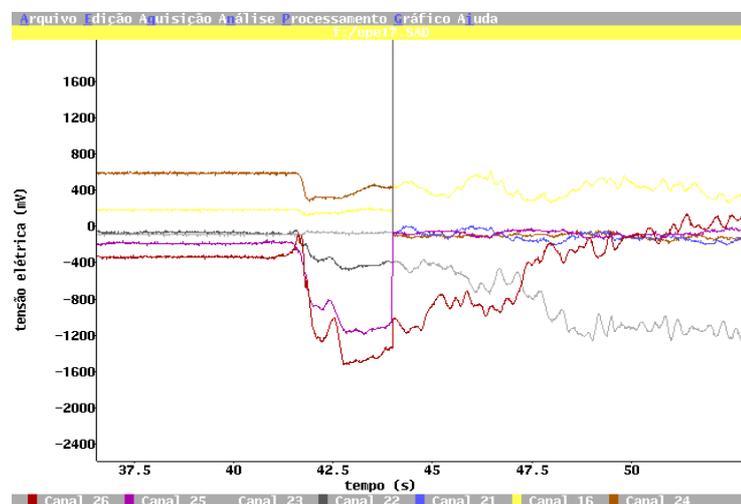


Figura 5.8 – Mistura de dados adquiridos nos diferentes canais.

5.8 – RECURSOS DE SOFTWARE UTILIZADOS

Foram usados muitos dos recursos presentes no software escolhido. A opção “zoom” do menu “gráfico” (Fig. 5.9) permite efetuar uma espécie de zoom em determinado trecho de uma das múltiplas curvas, tanto no eixo do tempo como no eixo da amplitude, facilitando que seja investigado algum detalhe que o usuário considere necessário.

Para realizar um ajuste de balanceamento (zero) mais preciso, no pós-processamento dos sinais utilizou-se inicialmente a opção “recorta janela” do menu “edição” a fim de separar somente o trecho inicial da curva. Em seguida, com a ajuda da opção “estatísticas” do menu “análise” (Fig.5.10), foi verificado o valor informado como “média Y”. Este valor foi levado para a opção “desloca” do menu edição para que fosse descontado (ou somado caso o valor fosse negativo) a fim de ajustar o início da curva o mais próximo de zero.

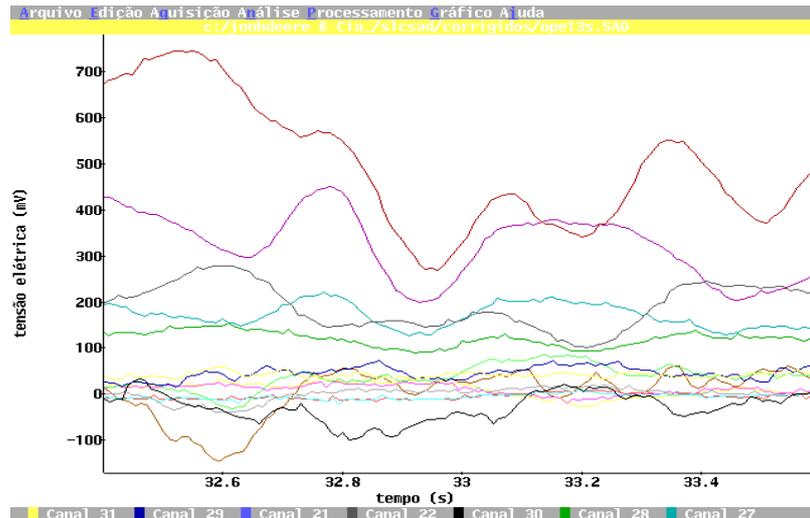


Figura 5.9 – Recurso de Zoom do SAD32.

Essa opção permite ainda que o usuário verifique uma série de outras informações pertinentes àquela curva selecionada, tais como taxa de amostragem, número de pontos adquiridos, valores mínimos, máximos, médias, mediana ou a correlação X-Y.

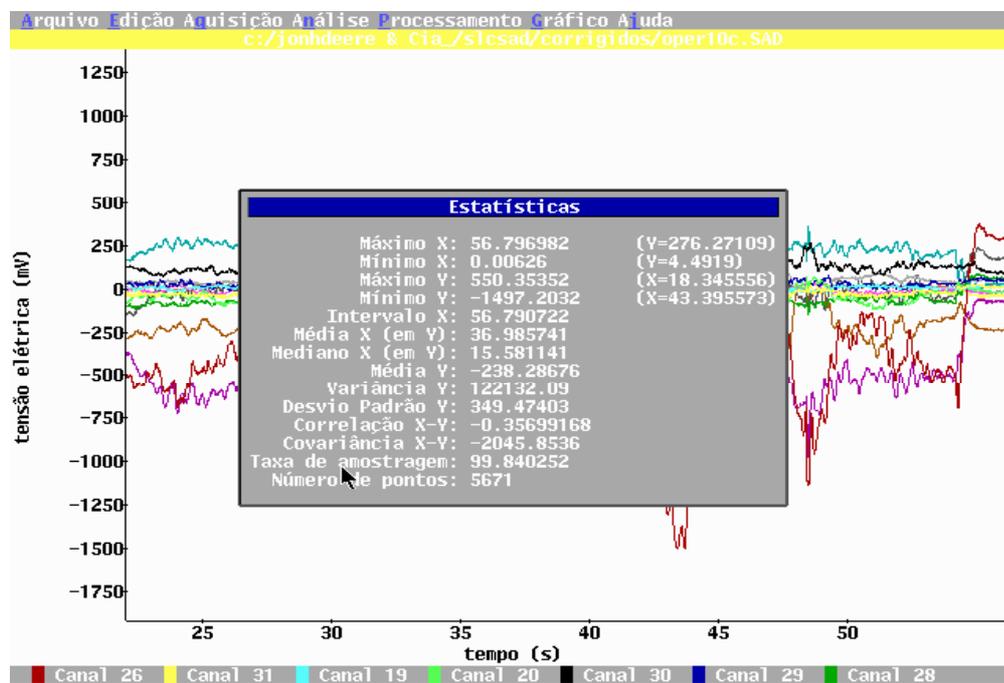


Figura 5.10 – Exibição dos dados estatísticos de determinado canal.

Também foram realizadas filtragens nos sinais adquiridos. No pós-processamento foi realizada uma filtragem (Fig.5.11) com o auxílio do filtro “*média móvel*” (frequência de corte =

30Hz) do menu “*processamento*”. O uso deste filtro proporcionou um resultado de filtro passa baixa, minimizando assim os ruídos elétricos sem alterar significativamente os dados contidos.

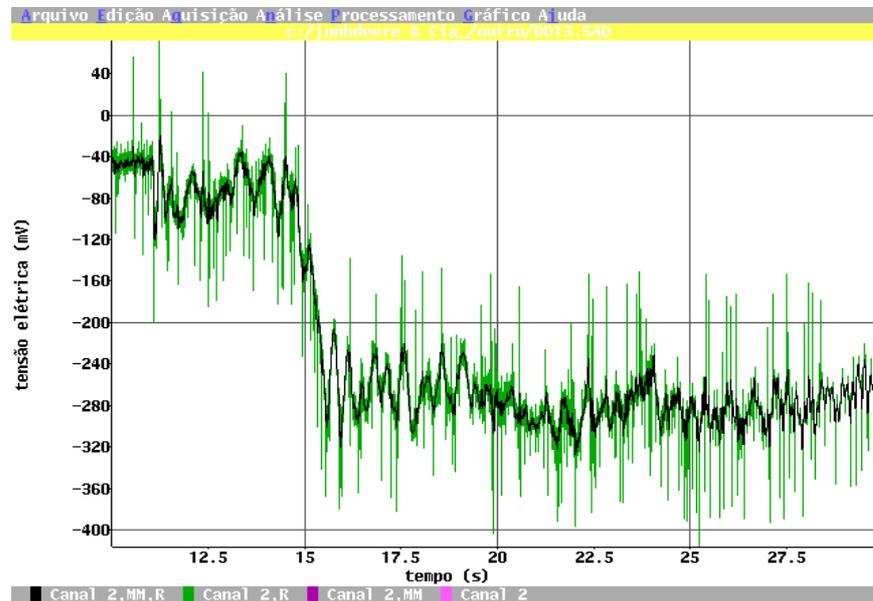
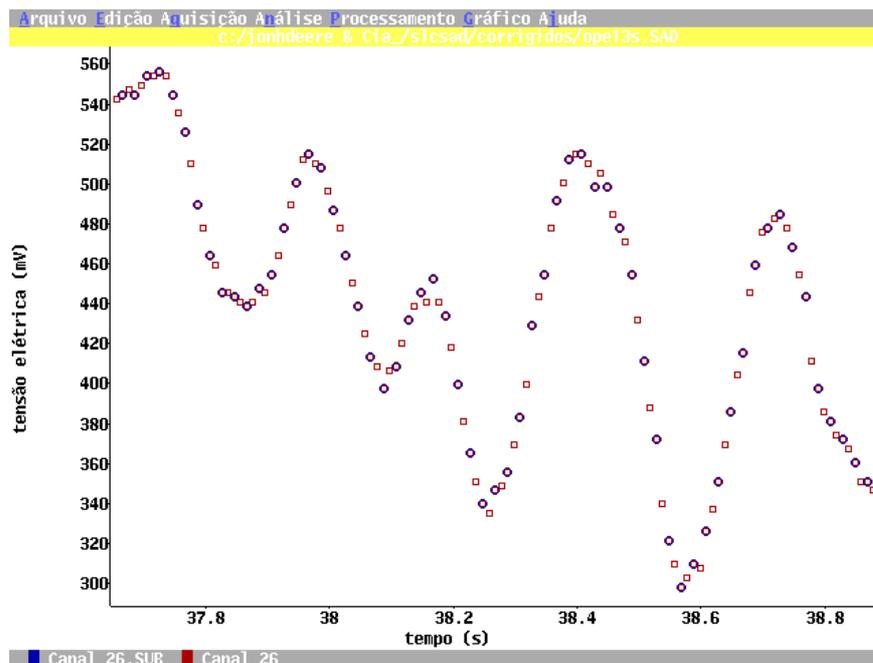


Figura 5.11 - Sinal com ruído (verde) e após aplicação do filtro média móvel 30Hz (preto).

Nos arquivos os quais utilizou-se uma taxa de amostragem superior a 100 amostras por segundo, foi aplicado o recurso “*sub-amostra*”, menu “*edição*” do SAD32 (Fig. 5.12). Esta aplicação visou diminuir o tamanho dos arquivos, uma vez que se verificou não serem necessários tantos pontos para caracterizar os eventos adquiridos.



5.12 – Sinais: original (□, vermelho) e sub amostrado (○, azul).

5.9 APRESENTAÇÃO FINAL DOS RESULTADOS

O sistema de aquisição de dados proporcionou obter arquivos contendo informações sobre cada um dos testes realizados. O SAD32 fornece arquivos com oito caracteres e extensão sad (xxxxxxxx.sad). Com estes arquivos foi possível o pós-processamento. Nesta etapa foram realizadas todas as operações necessárias. Em seguida foram exportados os resultados (função “*exporta*”, menu “*arquivo*”) em arquivos do tipo “DAT – Grapher”. Esta operação foi necessária para que os dados dos testes fossem apresentados como tabelas do Microsoft Excel, formatação de arquivo usado pela empresa para aplicação no software de análise dos dados. No Excel, os dados foram dispostos de maneira que o software pudesse interpretá-los corretamente, contendo ainda no final das colunas referente a cada ponto, os valores máximo e mínimo encontrados. Desta forma, o resultado final da investigação experimental nas três semeadoras foi uma série de arquivos do (xxxxx.XLS) decorrente de cada uma das operações realizadas, contendo 16 colunas (uma por canal analisado) e milhares de linhas.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

6.1 CONCLUSÕES

O método proposto apresentou bons resultados. O método da camada frágil demonstrou ser uma potente ferramenta sob o ponto de vista qualitativo e que apesar de ser uma técnica antiga e quase esquecida, ainda pode ser amplamente utilizada devido não só a facilidade de aplicação, mas principalmente pelo baixo custo. Este método permitiu simplificar a utilização da extensometria, pois indicou os pontos e direções que se deveria investigar, dispensando a necessidade de utilização de um grande número de strain gages triaxiais para que se obtivesse o mesmo resultado, baixando também os custos de implementação desta técnica.

O Hardware empregado nos testes apresentou bons resultados, embora a primeira composição apresentasse uma certa fragilidade e a segunda formação mostrou níveis de ruídos elétricos maiores que o primeiro.

O software utilizado mostrou-se satisfatório para a aquisição e análise dos dados. No entanto, devido ao formato dos arquivos requeridos para a análise final dos dados este mostrou-se um pouco trabalhoso .

De uma forma geral, o sistema que visava um baixo custo de implementação, apresentou o resultado desejado, atendendo as necessidades e permitindo que a equipe de projeto possa obter dados sobre as máquinas antes mesmo de longos testes de campo que além de apresentarem custo, demandam muito tempo em cronograma de avaliação deste tipo de produto.

Com um estudo mais direcionado, o fabricante pode procurar pontos visando correlacionar esforços com deformações. Estes, podem ser instrumentados permanentemente, podendo indicar ao operador que determinado componente está sendo mal usado, que um pneu está furado, que a semeadora passou sobre uma pedra, etc

Os dados adquiridos neste trabalho foram usados para estimar o tempo de vida útil de diversos componente da semeadora. No entanto, se fossem coletadas mais algumas informações de posição, força e/ou aceleração, com um custo adicional relativamente baixo, poderiam ser obtidos dados importantes para posteriores análises numéricas.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho foi estimado o tempo de vida de alguns componentes com o auxílio de um software comercial. As comparações preliminares entre o tempo estimado e o tempo real de vida dos componentes, indicam uma variação de $\pm 20 \%$,

embora o número de peças analisadas na amostra ainda seja pequena para tirar maiores conclusões.

6.2 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Em posse dos dados adquiridos, o projetista poderia verificar possíveis correlações entre os sinais de deformações, posições, forças e acelerações, visando encontrar a relação entre a causas e conseqüências, que muitas vezes permitem apontar diferentes soluções para cada problema encontrado.

Uma nova solução visando melhorar a etapa de conversão do hardware empregado pode ser objeto de estudos futuros. Um próximo trabalho pode por um lado procurar encontrar uma nova solução quanto ao problema da frágil conexão entre o conversor comercial e o condicionador utilizado, ou tentar solucionar o problema de ruído elétrico encontrado no protótipo do conversor desenvolvido para este trabalho.

Se um software mais específico para uso neste trabalho fosse desenvolvido, não seria necessário todo pós-processamento e adequação dos tipos de arquivos de saída.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdul-Baqi A.; Van der Giessen E., 2002. "Numerical analysis of indentation-induced cracking of brittle coatings on ductile substrates", *Int. J. Solids and Structures* **39**, pp. 1427 – 1442.

Alvarez, E. D. , 1998. "Análise de Tensões em Trilhos Ferroviários empregando Fotoelasticidade", **Dissertação de Mestrado**, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre.

Alvarez, E. D. ; Kieckow, F. ; Strohaecker, T. R., 2000. "Fotoelasticidade aplicada ao ensino de engenharia", **Revista de Ensino de Engenharia**, vol. 19, N^o2, pp. 27-33.

Arola, D.; Reinhall, P.G.; Jenkins, M.G.; Iverson, S.C., 1999." An Experimental Analysis of a Hybrid Bicycle Frame", **Experimental Techniques**, May/June 1999, Vol. 23, No. 3 pp. 21-24.

Asundi A.; M. R. Sajan, 1995. "Dynamic Photoelasticity using a Laser Scanner" **Optics and Laser Technology**, vol.27 (3), pp. 153-155.

Baek, T.H. ; Rowlands, R. E. , 2001. "Hybrid Stress Analysis of Perforated Composites Using Strain Gages, **Experimental Mechanics**, Vol.41, N^o.2, pp. 195-203.

Barreto, E. .J. , 2002. "**O extensometro Elétrico de Resistência**", Ieditora . Brasil

Borchardt I. G. ; Zaro, M. A. , 1982. "**Extensômetros de Resistência Elétrica**", Editora da Universidade, Porto Alegre.

Borchardt I. G. ; Zaro, M. A. , 1982. "**Instrumentação: Guia Prático de Aulas**", Editora da Universidade, Porto Alegre.

Budynas, R. G. , 1977. "**Advanced Strength And Applied Stress Analysis**". McGraw-Hill Book Company, Estados Unidos.

Chiang F. P.; Jaisingh G., 1973. "Dynamic Moiré Methods for the Bending of Plates", **Experimental Mechanics**, April 1973, pp. 168-171.

Dally, J. W. ; Riley, W. F. , 1991. "**Experimental Stress Analysis**". McGraw-Hill Book Company, Estados Unidos.

Freese, C. E. ; Gee, L. , 1999. "A Multilevel Treatment or Moiré Fringe Data Using Finite Elements", **Experimental Mechanics**, Vol.39, N^o. 4, pp. 304-310.

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

Hoffmann, K. , 1989. “**An Introduction to Measurements using Strain Gages**”, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Alemanha.

Kyowa, “**Strain Gages – A complete lineup of High Performance Strain Gages and accessories**”, Japão.

Lee, G. H. , 1950. “**An Introduction to Experimental Stress Analysis**”, John Wiley & Sons Inc., Estados Unidos.

Lin, S. T. , 2001. “A New Interferometer for Measurement In-Plane Displacement”, **Experimental Mechanics**, Vol.41, No 2, pp. 140-143.

Ma, C. -C. ; Huang, C. -H. , 2001. ”Experimental and Numerical Analysis of Vibrating Cracked Plates at Resonant Frequencies”, **Experimental Mechanics**, Vol.41, N° 1, pp. 8-18.

Mark, R. ; Abel, J. F. ; O’Niell, K. , 1973. “ Photoelastic and Finite-element Analysis of a Quadripartite Vault”, **Experimental Mechanics**, August 1973, pp.322- 329.

Measurements Group Inc., 1996. “**The Three-wire Quarter-Bridge Circuit**”, Boletim técnico TT-612, USA

Micro-Measurements Division, 1996. “**Catalog 500 – Precision Strain Gages**”, Estados Unidos.

Nishioka, T. ; Kurio, K. ; Nakabayashi, H. , 2000. “An Intelligent Hybrid Method to Automatically Detect and Eliminate Experimental Measurement Errors for Linear Elastic Deformation Fields”, **Experimental Mechanics**, Vol.40, No 2, pp.170-179.

Phillips J. W., 2000. “TAM 326—Experimental Stress Analysis *James W. Phillips* – brittle coatings”, notas de aula, University of Illinois, USA.

Phillips J. W., 2000. “TAM 326—Experimental Stress Analysis *James W. Phillips* – Photoelasticity”, notas de aula, University of Illinois, USA.

Plouzenec, N. ; Lagarde A., , 1999. “Two-wavelength Method for Full-field Automated Photoelasticity”, **Experimental Mechanics**, Volume 39, N° 4, pp. 274- 279.

Ribeiro J. L. D., 1996. “**Projeto de experimentos na Otimização de Produtos e Processos**”, Notas de Aulas, PPGEP/UFRGS, Porto Alegre.

Rubio-Gonzalez, C. ; Mason J. J. , 2001. “Experimental Investigation of Dynamic Punch Test on Isotropic and Composite Materials”, **Experimental Mechanics**, Vol.41, N°. 2, pp 129-139.

Sanford, R. J. , 1973. "Diferencial Stress-Holo-Intreferometry", **Experimental Mechanics**, Agosto de 1973, pp. 330-338.

Schwartz, R. C. ; Kutt, L. M. ; J. M. Papazian, 2000. "Measurement of Residual Stress Using Interferometric Moiré: A New Insight", **Experimental Mechanics**, Vol.40, No 3, pp. 271-281.

Shull, L. C. ; Wright, C. P. , 2001."Valid Strain Measurements for Structural Dynamics Testing", **Experimental Techniques**, Maio/junho 2001, pp. 42-44.

Stresscoat, "**Principles of Stresscoat – Brittle Coating**". Stresscoat[®], California - Estados Unidos.

Timoshenko, S. P., 1976. "**Resistência dos Materiais**", Livros técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.

Anexo 1:

Semeato	www.semeato.com.br
Tecmaster	www.tecmasteragricola.com.br
Sindicato rural de Jundiá	www.srjundiai.com.br
Agri-Tillage	http://www.agritillage.com.br
Sistema Plantio Direto	http://www.embrapa.br/plantiodireto/IntroducaoHistorico/sistemaPlantioDireto.htm
Universidade de Glasgow	http://www.faraday.gla.ac.uk/moire.htm
Vishay-Photoelasticity	http://www.vishay.com/test-measurements/photo-stress-plus/
TAM 326— Experimental Stress Analysis	http://www.tam.uiuc.edu/courses/TAM326/2000.1/syllabus.html