

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM

UMA METODOLOGIA PARA AUXÍLIO AO PROJETO MECÂNICO
DE TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS

por

Carlos Roberto Cauduro

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM

Porto Alegre

1992

UMA METODOLOGIA PARA AUXÍLIO AO PROJETO MECÂNICO DE TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS

TESE

**Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica
e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de:**

Doutor em Engenharia

**ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA**

Área de Concentração: Ciências dos Materiais

por

Carlos Roberto Cauduro - Engenheiro Mecânico

1992

II

Esta TESE foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciências dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.



Orientador: Ildon Guilherme Borchardt
Doutor em Ciências, ITA-SP
Professor do DEMET/UFRGS

Banca Examinadora:

Volnei Andersson
Doutor em Engenharia, UFSC
Professor da FURG

Aluísio Otávio Vargas Ávila
Ph.D. em Educação Física, Vanderbilt - E.U.A.
Professor da UFSM

Lírio Schaeffer
Doutor em Engenharia, Univ. Aachen - R.F.A.
Professor da UFRGS

Altamiro Amadeu Suzim
Doutor em Engenharia, Inst. Pol. Grenoble - França
Professor da UFRGS

Ildon Guilherme Borchardt
Doutor em Ciências, ITA
Professor da UFRGS

Coordenador do PPGEMM
Carlos Hoffmann Sampaio
Doutor em Engenharia, Univ. Aachen - R.F.A.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ildon Guilherme Borchardt, pela orientação deste trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo.

Aos colegas do INMETAL: Eng. José Rogério Araújo, Prof. João Carlos P. Beck e Prof. Renato Machado de Brito pela amizade.

Ao PPGEMM e DEMET, pelo local de trabalho.

Ao Serviço de Biblioteca da Escola de Engenharia da UFRGS.

A todas as pessoas, que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

6

2

6

4

a meus pais

**UMA METODOLOGIA PARA AUXÍLIO
AO PROJETO MECÂNICO DE
TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS.**

SUMÁRIO

RESUMO	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE SÍMBOLOS.	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 HISTÓRICO E TIPOS DE TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS	1
1.2 PROJETO DE TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS	3
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO	5
1.4 OBTENÇÃO DO SINAL DE SAÍDA	6
1.5 ADAPTABILIDADE DA METODOLOGIA PROPOSTA	8
1.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM TRANSDUTOR EXTENSOMÉTRICO	9
2. PONTE DE WHEATSTONE	13
3. EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA	23
4. ELEMENTO ELÁSTICO	29
4.1 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO E MATERIAIS	29
4.2 CAMPO DE DEFORMAÇÕES	31
4.3 CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DO ELEMENTO ELÁSTICO .	33
5. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MECÂNICA DE UM TRANSDUTOR EXTENSOMÉTRICO	40

6. PROPOSTA DE UM ESQUEMA DE PROJETO DE UM TRANSDUTOR EXTENSOMÉTRICO	52
7. APLICAÇÕES EM TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS	56
7.1 LÂMINA ENGASTADA SOB FLEXÃO	58
7.2 CÉLULA DE CARGA TIPO COLUNA	62
7.3 CÉLULA DE CARGA TIPO "S" COM FURO RETANGULAR	68
7.4 CÉLULA DE CARGA TIPO "S" COM FURO CIRCULAR	73
7.5 CÉLULA DE CARGA TIPO ANEL APOIADO LATERALMENTE	81
7.6 CÉLULA DE CARGA TIPO PLACA CIRCULAR COM PINO CENTRAL	93
7.7 MANÔMETRO DE PLACA CIRCULAR	103
7.8 TORQUÍMETRO CRUCIFORME VAZADO	108
7.9 TORQUÍMETRO COM EIXO CIRCULAR MACIÇO	114
7.10 TORQUÍMETRO CIRCULAR VAZADO	122
7.11 CÉLULA DE CARGA CISALHANTE EM "S"	126
7.12 CÉLULA DUPLA VIGA COM FORÇA NO CENTRO	130
8. CARACTERÍSTICAS DOS PROTÓTIPOS E ELEMENTOS ELÁSTICOS	133
9. CONCLUSÃO	135
10. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

RESUMO

É feita a proposta de uma metodologia para o auxílio ao projeto de elementos elásticos de transdutores extensométricos. Esta metodologia é desenvolvida a partir de conceitos interligados da ponte de Wheatstone com as deformações relativas sobre o elemento elástico, através da introdução de uma função de transferência mecânica, que é composta de três parâmetros adimensionais aqui introduzidos: 1) a sensibilidade intrínseca ϵ_N , que é relativa ao material, englobando o módulo de elasticidade, a tensão de escoamento, o coeficiente de segurança e, se as deformações forem de cisalhamento, o coeficiente de Poisson; 2) o fator geométrico, que revela o comportamento das deformações relativas no elemento elástico e 3) a relação entre a grandeza mecânica aplicada e a grandeza mecânica nominal do transdutor. Com esta metodologia é possível uma rápida estimativa do sinal de saída de um transdutor extensométrico, mesmo sem o conhecimento de suas dimensões, que são posteriormente estabelecidas. É verificada a validade desta proposta em 14 protótipos de células de carga, um manômetro e 8 torquímetros, com elementos elásticos apresentando deformações do tipo axiais, flexionais ou cisalhantes.

ABSTRACT

It is proposed a methodology to aid the design of transducers' elastic element with strain gages. This methodology is developed from concepts joining the Wheatstone bridge with the strain over the elastic element, and defining a mechanical transfer function, which is based on three dimensionless parameters here introduced: 1) the intrinsic sensibility, which is concerning to material, comprising the modulus of elasticity, the yield strain, the safety factor and, if the strain are due the shear, the Poisson's ratio; 2) the geometric factor, which show the strain's distribution over the elastic element and 3) the relation between the applied mechanical quantity and the nominal's transducer mechanical quantity. This methodology permit to get a fast estimation of the transducer's output signal, without the knowledge of its dimensiones, which are set up later. The methodology is checked for 14 kinds of elastic elements of load cells, one manometer and 8 torquemeters, with axial, bending or shearing strains.

LISTA DE SÍMBOLOS

Estão listados os símbolos e siglas de caráter geral, e os símbolos específicos das diversas geometrias encontram-se nos itens que as descrevem.

- B - razão da ponte de Wheatstone
- E - módulo de elasticidade (Pa)
- EE - elemento elástico
- ERE - extensômetro de resistência elétrica
- F - força (N)
- F_N - força nominal (N)
- FTM - função de transferência mecânica
- G - grandeza mecânica
- G_N - grandeza mecânica nominal
- K - sensibilidade do extensômetro ("gage-factor")
- K_x - sensibilidade longitudinal na direção da grade
- K_y - sensibilidade transversal
- n_j - fator geométrico
- \bar{n}_j - valor médio de n_j
- P - pressão (Pa)
- P_N - pressão nominal (Pa)
- PW - ponte de Wheatstone
- R1, R2, R3, R4 - extensômetros de resistência elétrica, sendo cada um associado a um braço particular da ponte (Ω)
- S - sensibilidade da ponte de Wheatstone (Ω/Ω)
- sg - coeficiente de segurança
- S_0 - sensibilidade inicial da ponte de Wheatstone (Ω/Ω)
- T - torque (Nm)
- TE - transdutor extensométrico
- T_N - torque nominal (Nm)
- U_I - tensão de excitação da ponte de Wheatstone (V)
- U_0 - tensão de desbalanço da ponte de Wheatstone (V)
- W - coeficiente da sensibilidade intrínseca
- α - termo da equação da ponte de Wheatstone
- β - termo da equação da ponte de Wheatstone
- δ - erro de linearidade do transdutor extensométrico

$\Delta R_i/R_i$ - variação relativa de resistência em um braço particular
 $\Delta U_o/U_I$ - sinal de saída do transdutor extensométrico
 ϵ - deformação relativa (m/m)
 ϵ_j - deformação relativa em um ponto e orientação qualquer
 $\bar{\epsilon}_j$ - valor médio de ϵ_j
 ϵ_{jN} - deformação relativa devida a uma grandeza mecânica nominal
 ϵ_N - sensibilidade intrínseca ou máxima deformação
 ϵ_x - deformação na direção x
 λ - erro de linearidade da ponte de Wheatstone
 ν - coeficiente de Poisson
 ξ - termo da equação da ponte de Wheatstone
 σ_e - tensão de escoamento (Pa)
 σ_o - tensão mecânica atuante (Pa)
 τ_o - tensão de cisalhamento atuante (Pa)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA N°	PÁGINA
1.1 - Etapas da transdução em um transdutor extensométrico....	7
1.2 - Ponte de Wheatstone.....	8
2.1 - Configurações da ponte de Wheatstone.....	19
2.2 - Quadro-resumo da ponte de Wheatstone.....	22
3.1 - Tipos comerciais de extensômetros de resistência elétrica.....	24
3.2 - Esquematização de um extensômetro de resistência elétrica.....	25
4.1 - Deformações devidas a tensões normais.....	32
4.2 - Visualização das deformações devidas a tensões normais de cisalhamento.....	33
4.3 - Tipos básicos de elementos elásticos.....	34
4.4 - Diversas configurações de células de carga axiais.....	35
4.5 - Configurações de células de carga flexionais.....	36
4.6 - Configurações básicas de torquímetros.....	37
4.7 - Diversos elementos elásticos de células de carga tipo cisalhante.....	38
4.8 - Aspecto do elemento elástico de um manômetro tipo placa circular.....	39
5.1 - Elemento elástico genérico sob a ação de uma grandeza mecânica G , efeito da temperatura T e perturbações diversas D	41
5.2 - Representação do elemento elástico sob a ação da grandeza mecânica G/G_N	42
5.3 - Visualização das deformações ϵ_j , ϵ_{jN} e ϵ_N atuantes em uma lâmina.....	44
5.4 - Comportamento hipotético de n_j e o n_j médio de um extensômetro.....	48
6.1 - Fluxograma de projeto de um transdutor extensométrico usando a metodologia proposta.....	54
7.1.1 - Lâmina engastada.....	58
7.1.2 - Lâmina engastada usada em atividades didáticas.....	60
7.1.3 - Comportamento do fator geométrico de uma lâmina.....	61

7.2.1 - Elemento elástico de célula de carga tipo coluna.....	62
7.2.2 - Comportamento dos fatores geométricos, longitudinal e transversal, de uma lâmina.....	64
7.2.3 - Montagem de uma célula de 500 kN.....	65
7.2.4 - Vista do ensaio calibração realizado com a célula de 500 kN.....	66
7.2.5 - Ensaio de empuxo com a célula de 500 kN.....	67
7.3.1 - Célula de carga tipo "S", com furo retangular.....	68
7.3.2 - Comportamento de n_j em uma célula tipo "S", com furo retangular.....	70
7.3.3 - Ensaio de calibração de uma célula tipo "S", com furo retangular.....	71
7.3.4 - Ensaio de tração em couros.....	72
7.4.1 - Célula de carga tipo "S", com furo circular.....	73
7.4.2 - Comportamento de n_j de uma célula "S", com furo circular, com $R/h=100$	74
7.4.3 - Comportamento de n_j de uma célula "S", com furo circular, com $R/h=10$	76
7.4.4 - Comportamento de n_j de uma célula "S", com furo circular, com $R/h=5$	78
7.4.5 - Protótipo de célula de carga tipo "S", com furo circular, de 5500 N.....	78
7.4.6 - Comportamento de n_j de uma célula "S", com furo circular, com $R/h=4$	79
7.5.1 - Anel apoiado lateralmente.....	81
7.5.2 - Secção do anel apoiado lateralmente.....	82
7.5.3 - Comportamento do fator geométrico n_j do anel apoiado lateralmente.....	84
7.5.4 - Gráfico ampliado do fator geométrico n_j do anel apoiado lateralmente.....	85
7.5.5 - Célula apoiada lateralmente posicionada para teste de atuadores.....	87
7.5.6 - Vista superior da célula apoiada lateralmente para teste de atuadores.....	88
7.5.7 - Protótipo de célula de 1 MN, do tipo anel apoiado lateralmente.....	89
7.5.8 - Protótipo de célula de carga de 4 kN, construída em alumínio.....	90

7.6.1 - Célula de carga tipo placa circular.....	93
7.6.2 - Comportamento de n_j , radial e tangencial, de uma placa circular com pino central, para $a/b=0,2$	96
7.6.3 - Comportamento de n_j , radial e tangencial, de uma placa circular com pino central, para $a/b=0,05$	97
7.6.4 - Comportamento de n_j , radial e tangencial, de uma placa circular com pino central, para $a/b=(2/17)$	98
7.6.5 - Comportamento de n_j , radial e tangencial, de uma placa circular com pino central, para $a/b=(3/20)$	100
7.6.6 - Comportamento de n_j , radial e tangencial, de uma placa circular com pino central, para $a/b=(12,5/35)$	101
7.6.7 - Protótipos de células de carga de placa circular de 1000 N, 3000 N e 10000 N.....	102
7.7.1 - Vista do elemento elástico de um manômetro de placa circular.....	103
7.7.2 - Comportamento dos fatores geométricos radiais e tangenciais da placa circular do manômetro.....	105
7.7.3 - Manômetro de placa circular de 0,5 MPa.....	107
7.8.1 - Elemento elástico de um torquímetro de cruciforme vazado.....	108
7.8.2 - Comportamento do fator geométrico n_j de um torquímetro cruciforme vazado.....	110
7.8.3 - Protótipo de um torquímetro cruciforme vazado, girante, de 10,59 Nm.....	112
7.8.4 - Protótipo de um torquímetro cruciforme vazado, estático, de 8 Nm.....	113
7.8.5 - Torquímetro cruciforme vazado, no controle de qualidade de juntas homocinéticas.....	113
7.9.1 - Elemento elástico de um torquímetro de eixo circular maciço.....	114
7.9.2 - Conjunto de peças do torquímetro estático de 270 Nm usado para calibrar aparafusadeiras.....	116
7.9.3 - Aparafusadeira pneumática sendo testada com o torquímetro de 270 Nm.....	117
7.9.4 - Elemento elástico de um torquímetro de 4420 Nm.....	118
7.9.5 - Aspecto da montagem para a calibração do torquímetro de 4420 Nm.....	119

7.9.6 - Aspecto do conjunto de peças do torquímetro girante de 18,2 Nm.....	120
7.10.1 - Elemento elástico de um torquímetro de eixo circular vazado.....	122
7.10.2 - Protótipo de torquímetro girante com eletrônica embarcada.....	124
7.11.1 - Elemento elástico de uma célula de carga cisalhante em "S".....	127
7.11. 2 - Vista do protótipo de uma célula de carga cisalhante em "S".....	129
7.12.1 - Elemento elástico de uma célula de carga dupla viga, com a força aplicada no centro.....	130
7.12.2 - Comportamento do fator geométrico de uma célula de carga dupla viga.....	132

LISTA DE TABELAS

- Tabela 4.1 - Valores do módulo de elasticidade E , da tensão de escoamento σ_e e do coeficiente de dilatação térmica para alguns materiais de uso comum em elementos elásticos30
- Tabela 8.1 - Comportamento dos fatores geométricos dos elementos elásticos133
- Tabela 8.2 - Características dos protótipos construídos134

1. INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO E TIPOS DE TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS

Por transdutor (11,24,50,52) entende-se qualquer dispositivo que, sob a ação de um estímulo e ou devido à variação de uma grandeza física em sua entrada produz em sua saída uma resposta proporcional de natureza diferente do estímulo aplicado e conveniente para o seu manuseio, o que proporciona uma enorme variedade de tipos de transdutores. Por exemplo, a força ou o torque, aplicados em um corpo, podem ser avaliados (30,31) pela reflexão da luz, LVDT, extensômetros de resistência elétrica e capacitivos, convenientemente posicionados, entre outros métodos. Os transdutores constituem-se em elementos fundamentais da instrumentação para a monitoração e medida e controle de qualquer tipo de processo industrial, de laboratório, atividades biomédicas e atividades comerciais, pois possibilitam estabelecer padrões reproduzíveis a qualquer tempo, estando assim intimamente ligados com os diversos setores da atividade humana, desde aspectos de segurança, controle de qualidade e produtividade, até aspectos de ordem econômico-financeiros.

Um transdutor extensométrico (TE) é um dispositivo à base de extensômetros de resistência elétrica (EREs), convenientemente colados sobre regiões da superfície de um elemento elástico (EE), e ligados eletricamente entre si em ponte de Wheatstone (PW), que fornece um sinal de desbalanço proporcional e reversível à sollicitação mecânica que provoca a deformação relativa ϵ do elemento elástico.

O primeiro passo para o desenvolvimento de transdutores extensométricos foi dado por Lord Kelvin, em 1856, na Inglaterra, que constatou a variação da resistividade de fios

submetidos à tensão mecânica. Mais tarde, em 1908, o Dr. Lindeck, em Berlim, pesquisando resistores de manganin enrolados em um tubo de latão, impregnados de resina (Shellac), observou uma variação de resistência em função da umidade. Na investigação deste fenômeno, Lindeck submeteu o tubo a pressões, constatando uma variação de resistência proporcional, e sugeriu que este método poderia ser usado para a medida de pressão. Em 1944, Simmons registrou uma patente de um transdutor de pressão semelhante à idéia de Lindeck (45).

O primeiro tipo de extensômetro de resistência elétrica é atribuído a Simmons e Ruge, que o desenvolveram independentemente um do outro por volta de 1939, nos Estados Unidos. A técnica de construção e utilização dos extensômetros evoluiu muito até se chegar aos padrões atuais (40).

Atualmente, pode-se construir vários tipos de transdutores extensométricos (20) como: torquímetros, manômetros, células de carga, acelerômetros, "clip-gages" (sensores de deformação absoluta)(29), transdutores especiais sensíveis a força e torque, simultaneamente, em três direções ortogonais (55). As deformações relativas que se originam na superfície dos elementos elásticos destes diversos tipos de transdutores são devidas à ação de solicitações mecânicas como a flexão, tração, compressão, torção, ou combinação destas (54).

Os transdutores extensométricos, objetos deste trabalho, são torquímetros, manômetros e células de carga, os quais podem apresentar diversas geometrias para os seus elementos elásticos, e com diferentes capacidade e sensibilidade para cada transdutor extensométrico. A construção e o uso de transdutores extensométricos e de condicionadores de sinais constituem-se, nos últimos 10 anos, em parte significativa das atividades desenvolvidas pelo Laboratório de Instrumentação - INMETAL - , do Departamento de Metalurgia da UFRGS, onde o presente trabalho foi realizado.

1.2 PROJETO DE TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS

O projeto completo de um transdutor extensométrico envolve o conhecimento de vários fatores como a sua capacidade nominal, material do elemento elástico, sinal de saída nominal, frequência natural, comportamento com a temperatura, sobrecargas, precisão, custo, dimensões, etc, todos estes sendo determinados pela finalidade desejada. Muitas das informações de projeto de transdutores extensométricos, adquiridas através de longa experiência, encontram-se em forma de estado-de-arte, não publicadas (45).

Basicamente, o projeto de um transdutor extensométrico pode ser dividido em duas partes: 1) projeto mecânico do transdutor, envolvendo o elemento elástico, parafusos, proteções, chavetas, etc. e 2) projeto elétrico, envolvendo os extensômetros, suas ligações elétricas, resistores de compensação, etc.

As partes estruturais do transdutor extensométrico como parafusos, chavetas, etc, que não constituam o elemento elástico, estão excluídas da análise desenvolvida, considerando-se apenas as tensões e deformações no elemento elástico.

O projeto mecânico do elemento elástico envolve o conhecimento das tensões, deformações e deslocamentos produzidos pela ação de uma grandeza mecânica, e pode apresentar, dependendo da precisão desejada, as seguintes etapas (16):

- métodos analíticos;
- métodos experimentais;
- métodos numéricos.

Por métodos analíticos entendem-se os formulários deduzidos da resistência dos materiais, considerando-se apenas efeitos mecânicos de primeira-ordem, ou seja, só devidos diretamente à grandeza mecânica aplicada, sendo que o grau de precisão de dimensionamento do elemento elástico pode ser melhorado usando-se métodos experimentais e numéricos.

Já, com o uso de métodos experimentais, como a fotoelasticidade e extensômetros de resistência elétrica, e de métodos numéricos, consegue-se verificar efeitos mecânicos de segunda-ordem, que são interações e/ou perturbações, no elemento elástico, originadas pela aplicação da grandeza mecânica como, por exemplo, a flambagem provocada por uma compressão, originando deformações devidas a flexão do elemento elástico.

Para os transdutores extensométricos deste trabalho serão usadas fórmulas analíticas deduzidas a partir da resistência dos materiais, que fornecem o comportamento das tensões e deformações no elemento elástico sob solicitação mecânica, e o critério de segurança adotado é o de Tresca, ou Guest (38).

O projeto mecânico de um elemento elástico pode ser feito através do arbitramento de suas dimensões e de seu material e calculando-se as tensões e deformações, e estando o coeficiente de segurança e as deformações dentro de um limite aceitável, o elemento elástico estará determinado. Em caso contrário, devem ser alteradas as dimensões, material ou até o tipo de elemento elástico, até se obter uma relação de tensão e deformação satisfatória.

O projeto elétrico do transdutor extensométrico envolve o tipo de extensômetro utilizado, o posicionamento sobre o elemento elástico, a ligação em ponte de Wheatstone, a tensão de excitação e sinal de saída, resistores para ajuste de ganho e de zero, e resistores para compensar o efeito da temperatura no ganho e no ajuste de zero.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é a proposta de uma metodologia para auxílio ao projeto de elementos elásticos de transdutores extensométricos, caracterizada por um esquema de projeto que utiliza uma inédita função de transferência mecânica (FTM), em regime permanente e estático, e interligada com a ponte de Wheatstone.

A função de transferência mecânica é composta de três parâmetros adimensionais, introduzidos neste trabalho, que são:

1- A grandeza mecânica adimensional G/G_N , onde G é um valor da grandeza mecânica menor ou igual a G_N , que é o valor nominal da grandeza mecânica atuante no transdutor.

2- A sensibilidade intrínseca ϵ_N , que é função da tensão de escoamento σ_e do material, dividida pelo módulo de elasticidade E e coeficiente de segurança sg do elemento elástico, para deformações de tração/compressão, e multiplicado por $(1 + \nu)/2$, se as deformações forem de cisalhamento.

3- O fator geométrico n_j , que é a relação entre a deformação relativa em qualquer ponto e direção na superfície do elemento elástico pela máxima deformação ϵ_N . O fator geométrico n_j é próprio para cada tipo de geometria e orientação da deformação relativa sobre o elemento elástico.

Desta forma estes três parâmetros adimensionais são relacionados com a função de transferência geral de uma ponte de Wheatstone de uma maneira própria e adequada ao projeto de elementos elásticos de transdutores extensométricos, resultando uma expressão simples para o projeto e análise de elementos elásticos.

Assim, as dimensões do elemento elástico podem ser determinadas em função da máxima tensão mecânica atuante em qualquer parte do elemento elástico, e para a grandeza mecânica nominal G_N . A deformação relativa produzida por esta tensão mecânica pode ser igualada com a sensibilidade intrínseca ϵ_N , e para quaisquer dimensões possíveis do elemento elástico, o coeficiente de segurança sg estará sempre pré-definido, pois a sensibilidade intrínseca inclui o coeficiente de segurança.

De posse das dimensões do elemento elástico com o auxílio da função de transferência mecânica, pode-se, se for o caso em geometrias mais complexas, usá-las como dimensões preliminares para o emprego de um programa de elementos finitos, com economia de tempo (3).

Também, com o conhecimento do comportamento do fator geométrico, sobre a superfície do elemento elástico, pode-se ter uma estimativa do valor da deformação que cada extensômetro fornecerá, e conseqüentemente, o sinal de saída nominal do transdutor extensométrico em particular, tanto para o projeto como para a análise de um transdutor existente, conhecendo-se o material, o fator geométrico, a sensibilidade do extensômetro K ("gage-factor") e o coeficiente de segurança.

1.4 OBTENÇÃO DO SINAL DE SAÍDA

O transdutor extensométrico apresenta etapas distintas de transdução desde o estímulo até a resposta. O estímulo é feito por uma solicitação mecânica, que provoca deformações relativas ϵ no elemento elástico. Estas deformações provocam nos extensômetros, colados no elemento elástico, variações relativas $\Delta R/R$ de sua resistência inicial R . Por fim, estas variações relativas das resistências dos extensômetros produzem um sinal elétrico de desbalanço nos terminais a-c da

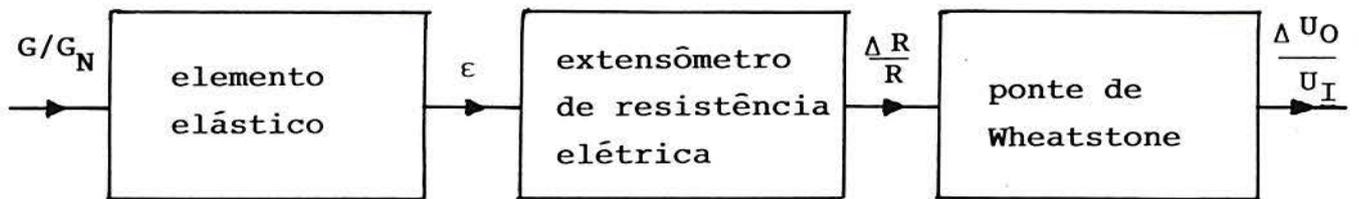


Figura 1.1 - Etapas da transdução em um transdutor extensométrico: elemento elástico, extensômetro de resistência elétrica e ponte de Wheatstone.

ponte de Wheatstone, excitada por uma tensão elétrica. Na figura 1.1 tem-se as etapas distintas de transdução de um transdutor extensométrico, desde o estímulo até a resposta.

O estímulo do transdutor é feito pela grandeza mecânica adimensional G/G_N , a qual pode ser devida a uma força, um torque ou uma pressão, sendo que o tipo de grandeza mecânica atuante poderá dar origem ao nome do transdutor como célula de carga, torquímetro ou manômetro, respectivamente, para as grandezas mecânicas acima citadas.

A resposta, de natureza elétrica, de um transdutor extensométrico é obtida com o auxílio de uma ponte de Wheatstone, fundamental ao uso de transdutores extensométricos, representada na figura 1.2, onde R_1 , R_2 , R_3 e R_4 representam as resistências elétricas dos extensômetros, colados em posições diversas e adequadas sobre a superfície do elemento elástico, e estão ligados de maneira que dois braços opostos da ponte de Wheatstone, R_1 e R_3 , apresentam deformações de mesmo sinal entre si e de sinal contrário aos outros dois braços, R_2 e R_4 ,

provocando um desbalanço que é tratado por um condicionador de sinais, AC ou DC, fornecendo assim o sinal de saída.

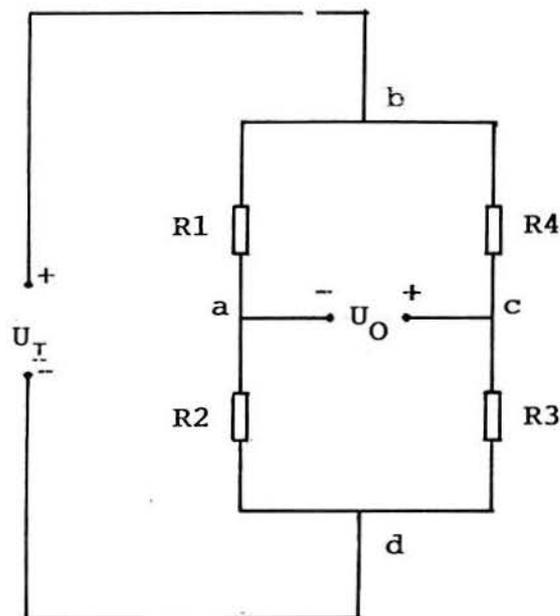


Figura 1.2 - Ponte de Wheatstone excitada por uma tensão U_I , e com sinal de saída U_O . Os extensômetros de resistência elétrica são representados por R_1 , R_2 , R_3 e R_4 ; ab , ad , dc e bc são os braços da ponte e bad e bcd são os ramos da ponte.

1.5 ADAPTABILIDADE DA METODOLOGIA PROPOSTA

A adaptabilidade desta metodologia foi verificada em 23 protótipos de transdutores extensométricos construídos no INMETAL - Laboratório de Instrumentação - do DEMET/UFRGS.

Estes transdutores consistem de 14 células de carga do tipo coluna, tipo "S" com furo circular e retangular, cisalhante em "S", placa circular com pino central e anel apoiado lateralmente; 8 torquímetros com eixo circular maciço, vazado e tipo cruciforme vazado; e 1 manômetro de placa circular. Para cada tipo de transdutor é feito um gráfico do comportamento do fator geométrico n_j para as orientações da grade dos extensômetros, sobre o elemento elástico, mais usuais e convenientes.

Todos os transdutores analisados foram construídos em aço ou em alumínio, ambos de boa condutividade térmica. Os extensômetros usados foram do tipo folha ("foil-gage") e sua sensibilidade ("gage-factor") é levemente superior a 2 $(\Omega/\Omega)/(m/m)$. As colas usadas foram de três tipos: a) cianoacriláticas, b) acrílicas e c) epóxis. Não se usaram, nestes transdutores, resistores auxiliares (25) para ajuste de ganho, variação da tensão com a temperatura, variação do zero com a temperatura e ajuste de zero da ponte de Wheatstone.

1.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM TRANSDUTOR EXTENSOMÉTRICO

Para a avaliação ou ensaio do desempenho de um transdutor extensométrico (6,8,24,37,50,56) necessita-se de um outro transdutor padrão ou de um sistema padrão, que sob a ação de uma grandeza mecânica, produz um sinal de saída elétrico no transdutor em teste. A qualidade do transdutor padrão ou sistema padrão usado influi na precisão da medida do transdutor extensométrico.

No ensaio do transdutor extensométrico podem ocorrer erros e surgir perturbações diversas como:

- Erros do sistema padrão,

- Erros humanos (leitura, procedimentos),
- Histerese,
- Influência da temperatura (variações, gradientes),
- Não-linearidades,
- Cargas excêntricas, laterais ou angulares,
- Interferências eletromagnéticas,
- Condições ambientais na realização do ensaio (temperatura e pressão).

Estes erros e perturbações podem estar associados, individualmente ou em conjunto, à cada uma das etapas do processamento da informação, vistas na figura 1.1.

Assim um transdutor extensométrico, quando sob a ação de grandezas mecânicas, e estando o seu sinal de saída elétrico correlacionado ao transdutor padrão ou sistema padrão, pode ter a sua curva de calibração caracterizada, o que é de fundamental importância à sua análise.

Em transdutores ou sistemas padrões, na aplicação da grandeza mecânica, para células de carga, podem-se usar pesos mortos, multiplicação de pesos mortos, cargas hidráulicas ou mecânicas; para torquímetros usa-se braço de alavanca com pesos mortos ou inserção em série com um outro torquímetro; para manômetros, calibrador de pesos mortos ou manômetro padrão.

Cada tipo de padrão apresenta particularidades, desde a precisão ao custo do equipamento. A seguir, apresentam-se termos básicos de um transdutor extensométricos, definidos pela S.M.A. (56) para células de carga e adotados pela norma brasileira

(6,7). Estes termos são válidos também para torquímetros e manômetros.

- Sinal de saída: sinal em tensão mV/V, ou corrente mV/A ou ainda em unidades de deformação $\mu\text{m}/\text{m}$.

- Sinal de saída nominal: sinal de saída para a grandeza mecânica nominal.

- Calibração: correlação entre o sinal de saída de um transdutor e a grandeza de referência aplicada.

- Curva de calibração: registro gráfico com os dados da calibração.

- Reta de referência: linha reta melhor ajustada (método dos mínimos quadrados) à curva de calibração, passando por zero e para a aplicação de uma grandeza crescente.

- Não-linearidade: desvio máximo entre a curva de calibração e a reta de referência, determinado somente com carga crescente. É expressa por uma porcentagem do sinal de saída nominal.

- Histerese: diferença máxima entre leituras do sinal de saída do transdutor, na aplicação de grandezas mecânicas crescentes e decrescentes. É expressa por uma porcentagem do sinal de saída nominal.

- Repetibilidade: diferença máxima entre sinais de saída para aplicações de uma mesma grandeza em iguais condições ambientais e de aplicação da grandeza. É expressa por uma porcentagem do sinal de saída nominal.

- Erro combinado: desvio máximo entre a reta de referência e a curva de calibração, englobando a não-linearidade, a repetibilidade e a histerese. É expresso por uma porcentagem do sinal de saída nominal.

- Capacidade nominal: grandeza mecânica para a qual o transdutor foi previsto para trabalhar sem danificar-se.

- Equilíbrio de zero: sinal de saída do transdutor com a excitação elétrica da ponte de Wheatstone recomendada e sem a ação de qualquer grandeza mecânica, e é expresso por uma porcentagem do sinal de saída.

2. PONTE DE WHEATSTONE

A ponte de Wheatstone (13,34,39,43), esquematizada na figura 1.2, é um circuito essencial à operação de um transdutor extensométrico, sendo constituída de extensômetros de resistência elétrica.

A ponte de Wheatstone pode operar em forma de ponte de balanço, quando a variação da resistência de um extensômetro é compensada pela variação da resistência de um elemento conhecido, retornando assim ao balanço. A outra forma é quando se mede o sinal da tensão de desbalanço na saída da ponte e correlacionando-o com a variação da resistência dos componentes constituintes da ponte, os extensômetros, tendo-se assim uma ponte de deflexão, que é usada para a medição de fenômenos rápidos, que não permitem o rebalço em tempo adequado.

Conforme a figura 1.2, os segmentos ab, ad, cd e bc são conhecidos como braços da ponte, e os segmentos bad e bcd são os ramos da ponte. Cada braço da ponte poderá conter mais de um extensômetro, sendo que a resistência equivalente de cada um dos quatro braços representada por R1, R2, R3 ou R4.

Se o transdutor extensométrico apresentar extensômetros sob deformação em todos os braços da ponte, variando as suas resistências elétricas, tem-se uma configuração de ponte conhecida como ponte inteira ou completa; se apenas um dos ramos apresentar variações de resistência, a configuração é de meia-ponte; e se apenas um braço apresentar variação de resistência, tem-se a configuração de um quarto de ponte.

A seguir, apresenta-se o desenvolvimento de uma equação geral para a ponte de Wheatstone, válida para qualquer amplitude e sinal de variação da resistência que pode ocorrer

simultaneamente e independentemente em cada um dos quatro braços da ponte de Wheatstone.

O sinal de saída da ponte, U_o , é função de:

$$U_o = f(R_1, R_2, R_3, R_4, U_I) = f(B_1, B_2, U_I) \quad (2.1)$$

onde os parâmetros B_1 e B_2 , chamados de razões da ponte, são definidos por:

$$B_1 = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.2)$$

e

$$B_2 = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.3)$$

Admitindo-se que a saída da ponte está aberta, ou seja, não flui corrente entre os terminais a-c da ponte, os ramos R1-R2 e R3-R4 formam dois divisores de tensão independentes. Assim, a equação 2.1 assume a forma:

$$U_o = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) U_I \quad (2.4)$$

Considerando-se variações finitas ΔR_i (i de 1 a 4) e independentes das resistências R_i (i de 1 a 4), e sendo ΔU_0 a correspondente variação da tensão de saída U_0 , tem-se:

$$\frac{U_0 + \Delta U_0}{U_I} = \frac{(R_3 + \Delta R_3)(R_1 + \Delta R_1) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2 + R_1 + \Delta R_1)} \quad (2.5)$$

Se estas variações ocorrem no entorno do balanço, isto é, $U_0 = 0$, e sendo $B_1 = B_2$, como ocorre nas aplicações com transdutores extensométricos, vem:

$$\frac{\Delta U_0}{U_I} = \frac{R_1 \Delta R_3 + R_3 \Delta R_1 + \Delta R_1 \Delta R_3 - R_2 \Delta R_4 - R_2 \Delta R_2 - \Delta R_2 \Delta R_4}{(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2 + R_1 + \Delta R_1)} \quad (2.6)$$

Colocando em evidência: $R_1 \cdot R_2$ no numerador; R_1 no primeiro termo do denominador; R_3 no segundo termo do denominador e fazendo $B_1 = B_2 = B$, conforme as definições dadas nas equações 2.2 e 2.3. Assim, consegue-se associar uma variação relativa para cada resistência, e a equação 2.6 fica:

$$\frac{\Delta U_0}{U_I} = \frac{B}{(1+B)^2} \left(\frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}}{1 + \frac{1}{1+B} \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{B}{1+B} \frac{\Delta R_2}{R_2}} + \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \frac{\Delta R_4}{R_4}}{1 + \frac{B}{1+B} \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{1}{1+B} \frac{\Delta R_4}{R_4}} \right) \quad (2.7)$$

que é a equação geral para a ponte de desbalanço.

Teoricamente, as variações de resistências $\Delta R_i/R_i$, podem ser desde -1, quando a resistência atinge o valor final zero, e infinito, para uma variação infinita da resistência, ou seja:

$$-1 \leq \frac{\Delta R_i}{R_i} \leq \infty \quad (2.8)$$

Na prática, estas variações são muito pequenas, e a equação 2.8 representa toda a faixa teoricamente possível de variação da resistência.

A equação 2.7 pode ser reescrita como:

$$\frac{\Delta U_o}{U_I} = S \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i} (-1)^{i+1} \quad (2.9)$$

onde

$$S = S_o \frac{(1+\alpha)}{(1+\xi+\beta)} \quad (2.10)$$

sendo S_o , a sensibilidade inicial, dada por:

$$S_o = \frac{B}{(1+B)^2} \quad (2.11)$$

O termo α é dado por:

$$\alpha = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \left(\sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i} (-1)^{i+1} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

o termo β , por:

$$\beta = \frac{1}{(1+B)^2} \left(B \frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{\Delta R_3}{R_3} + B^2 \frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{\Delta R_4}{R_4} + B^2 \frac{\Delta R_2}{R_2} \frac{\Delta R_3}{R_3} + B \frac{\Delta R_2}{R_2} \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.13)$$

e o termo ξ , por:

$$\xi = \frac{1}{(1+B)} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + B \frac{\Delta R_2}{R_2} + B \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.14)$$

Para os casos em que $\Delta R_i/R_i < 1$, os termos α e β , que representam a contribuição de produtos cruzados $(\Delta R_i/R_i) * (\Delta R_j/R_j)$, podem ser desprezados.

Assim:

$$S = S_0 \frac{1}{1+\xi} \quad (2.15)$$

ou, por conveniência prática de manuseio:

$$S = S_0 (1-\lambda) \quad (2.16)$$

onde o parâmetro λ representa o erro de linearidade de S com relação a S_0 , e é dado por:

$$\lambda = \frac{\xi}{1+\xi} \quad (2.17)$$

Do exposto até aqui, o sinal de saída adimensional $\Delta U_o/U_I$, da equação 2.9, pode ser concisamente escrito da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta U_o}{U_I} = S_o (1-\lambda) \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i} (-1)^{i+1} \quad (2.18)$$

que é função do somatório da variação das resistências, da sensibilidade inicial S_o e do erro de linearidade λ . Agora, a partir do desenvolvido acima, será feita uma análise de ligações em ponte de Wheatstone de extensômetros de resistência elétrica, que apresentam variações ΔR_i de suas resistências R_i , devidas às deformações do elemento elástico em que estão colados. Como já foi dito, cada braço da ponte de Wheatstone pode ser constituído de um ou mais extensômetros, com o objetivo de diminuir a potência dissipada, mantendo U_I constante, ou então fazer a média das deformações de diversos pontos de diversos extensômetros de um mesmo braço, como em célula de carga tipo anel deitado (81). Assim, pode-se aumentar a tensão de excitação U_I , melhorando a relação sinal ruído (26).

A seguir, com o auxílio da equação 2.7 ou da 2.18, serão feitas considerações da variação da resistência sobre o sinal de saída e da linearidade de sete configurações típicas de ponte, mostradas na figura 2.1.

a) Caso 1: Variação em apenas um braço

Tem-se uma variação de $\pm \Delta R_1/R_1$, permanecendo os demais braços constantes. A observação direta da equação 2.7

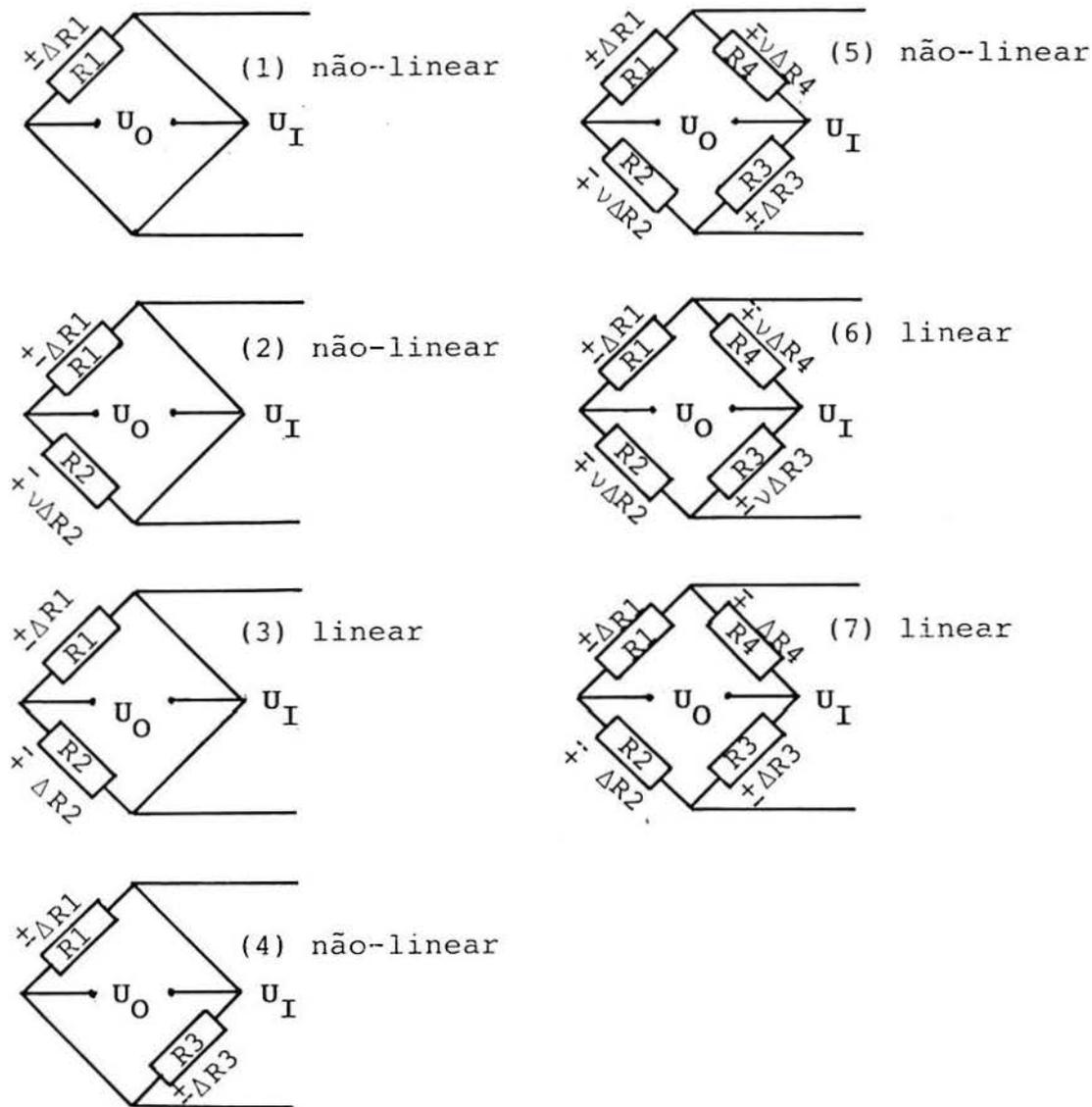


Figura 2.1 - Diversas configurações da ponte de Wheatstone e comentários quanto a sua linearidade.

revela que o sinal de saída é não-linear, e o erro de linearidade depende do aumento ou diminuição das resistências. O erro de

linearidade, considerando uma variação de $0,008 \Omega/\Omega$, que representa o início de escoamento de um aço ABNT 4340, é da ordem de 0,4%.

b) Caso 2: Variações diferentes em dois braços de um mesmo ramo

Tem-se $\pm\Delta R1/R1 \neq \mp \Delta R2/R2$ como condição para somar os dois sinais de saída, e da equação 2.7 verifica-se que esta configuração de ponte é não-linear. Este tipo de caso ocorre quando está presente deformações devidas ao efeito Poisson, como em uma célula tipo coluna.

c) Caso 3: Variações iguais em módulo de dois braços

Tem-se $\pm\Delta R1/R1 = \mp \Delta R2/R2$ como condição para o sinal de saída ser maximizado e diferente de zero, e observando-se a equação 2.7, verifica-se que esta configuração é linear.

d) Caso 4: Variações iguais entre dois braços opostos.

Tem-se $\pm\Delta R1/R1 = \pm\Delta R3/R3$ como condição para o sinal de saída ser diferente de zero e também maximizado. Observando-se a equação 2.7, verifica-se que a configuração é não-linear.

e) Caso 5: Variações iguais entre braços opostos e diferentes em valor e módulo entre braços adjacentes

Tem-se $\pm\Delta R3/R3 = \pm\Delta R1/R1 \neq \mp \Delta R2/R2 = \mp\Delta R4/R4$ e $\pm\Delta R3/R3 = \mp \Delta R4/R4$, como condição para maximizar o sinal de saída, e da equação 2.7, verifica-se que esta configuração é não-linear.

f) Caso 6: Variações diferentes em valor entre os braços opostos

Tem-se $\pm\Delta R1/R1 \neq \pm\Delta R3/R3$ e $\pm\Delta R2/R2 \neq \Delta R4/R4$, com $\pm\Delta R1/R1 = \mp\Delta R2/R2$ e $\pm\Delta R3/R3 = \mp\Delta R4/R4$, como condição para o máximo

sinal de saída e , da equação 2.7, verifica-se que esta configuração é não-linear.

g) Caso 7: Variações iguais em valor entre braços opostos e iguais em módulo entre braços adjacentes

Tem-se $\pm\Delta R_1/R_1 = \mp\Delta R_2/R_2 = \pm\Delta R_3/R_3 = \mp\Delta R_4/R_4$ como condição para um máximo sinal de saída e , da equação 2.7, verifica-se que esta configuração é linear. De todos os casos apresentados, esta é a configuração que apresenta o maior sinal de saída, comparando com um mesmo nível de variação da resistência em cada braço.

A verificação dos casos acima descritos mostra que:

1) O sinal de saída da ponte é função da variação da resistência e configuração adotada.

2) A linearidade da ponte de Wheatstone é determinada pela configuração e o valor das variações de resistência.

A primeira condição é fundamental na construção de um transdutor extensométrico e a segunda, para os níveis usuais de variação da resistência dos extensômetros, apresenta um erro de linearidade para a pior configuração de cerca de 0,4%, e é nulo para uma configuração adequada, que é adotada para um grande número de transdutores extensométricos.

Um quadro-resumo (13) é apresentado na figura 2.2 para a análise da ponte de Wheatstone, excitada por uma tensão U_1 . Com este quadro-resumo é possível a avaliação do sinal de saída de uma configuração em ponte de Wheatstone, com variações de resistências quaisquer em seus braços, e a não-linearidade associada a esta configuração.

Assim, conforme a figura 2.2, é feito o somatório das variações de resistência de todos os braços envolvidos, e que multiplicado por $S_0 * (1 - \lambda)$ (equação 2.16), obtém-se o sinal de

saída da ponte. Se existir não-linearidade na configuração em análise, o termo λ será diferente de zero.

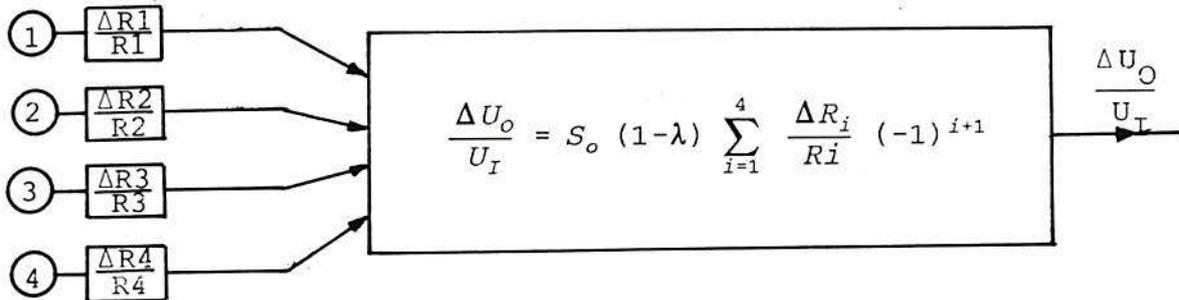


Figura 2.2 - Quadro-resumo para a análise da ponte de Wheatstone. As variações de resistências de cada braço, inseridas na equação 2.18, fornecem o sinal de saída, que poderá ser influenciado pelo erro de linearidade λ .

Quanto à tensão de excitação da ponte de Wheatstone, pode ser em AC ou em DC (51). O seu sinal de saída, quanto ao meio de obtenção, pode ser: a) direto; b) através de anéis e escovas; c) por telemetria; d) por transformador rotativo; e) por meio capacitivo. O sinal de saída é posteriormente condicionado com o uso de amplificadores de instrumentação (14), deixando-o em uma forma conveniente para o uso em ensaios com transdutores extensométricos.

3. EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Os extensômetros de resistência elétrica (2,12,23,33,36,49,54) são sensores de deformação relativa cuja resistência elétrica R varia de $\Delta R/R$ quando sob a ação de uma deformação relativa ϵ , a qual pode ser devida ao efeito da deformação mecânica ou ao efeito da variação de temperatura sobre o elemento elástico, onde estão colados.

Entre as aplicações gerais dos extensômetros tem-se: sensor de temperatura, sensor de deformação, sensor de velocidade e de comprimento de trincas, análise de tensões, tensões residuais e transdutores em geral.

Em transdutores extensométricos os extensômetros são colados no elemento elástico e ligados em ponte de Wheatstone. Na figura 3.1 estão representados alguns tipos de extensômetros para uso preferencial em transdutores, e cujas dimensões físicas, materiais de sua grade e base, e valores de suas resistências determinam uma grande variedade de modelos.

Basicamente existem três tipos de grades de extensômetros:

- tipo folha ("foil-gage"),
- tipo fio ("wire-gage"),
- tipo semiconductor.

Os extensômetros mais largamente usado em transdutores são os do tipo folha, mostrados na figura 3.1. O tipo semiconductor apesar de apresentar um sinal mais alto, apresenta problemas com a temperatura e seu custo é, atualmente,

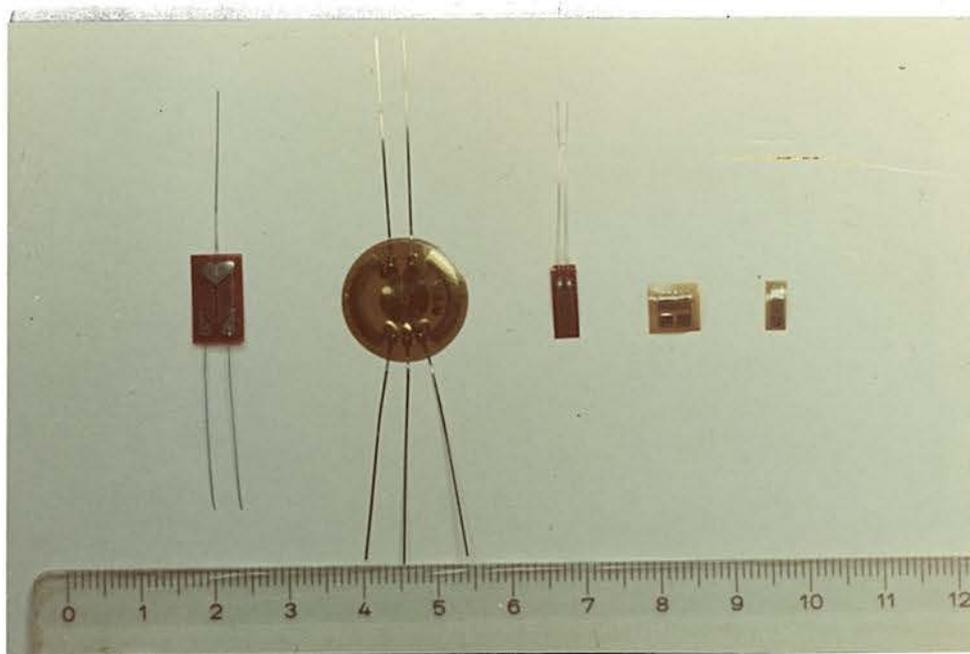


Figura 3.1 - Alguns tipos comerciais de extensômetros de resistência elétrica. Da esquerda para a direita: a) tipo espinha-de-peixe, com extensão de fio ("leads"); b) tipo diafragma, com "leads"; c) tipo grade unidirecional com "leads"; d) tipo grade unidirecional, sem "leads", e com predominância da largura da grade; e) tipo grade unidirecional, sem "leads".

mais elevado que o tipo folha. O tipo fio foi historicamente o primeiro a ser desenvolvido.

A seleção de extensômetros tipo folha para transdutores pode ser feita através dos seguintes fatores (45,46):

- comprimento da grade ativa - o extensômetro deve estar em áreas de deformações uniformes e maiores possíveis, evitando gradientes de deformação.

- Tipos de extensômetros:

quanto à base: poliamida, epóxi e epóxi reforçado.

quanto à grade: constantan, karma, isoelástica.

- resistência dos extensômetros: 120, 350 ou 1000 Ω (influência na relação sinal/ruído).
- extensômetros autocompensados: em função do material do elemento elástico usado.
- área da grade ativa: influência na dissipação térmica.
- adesivos: cada extensômetro exige um adesivo compatível com a sua base, faixa de temperatura de trabalho. Variações da sensibilidade do extensômetro podem ocorrer em função do adesivo usado, em uma faixa de temperatura (35,47).

Os extensômetros são construídos de modo que a sua resistência R seja predominantemente formada pela soma da resistência dos filetes longitudinais de sua grade, conforme exemplificado na figura 3.2 para um extensômetro de grade unidirecional.

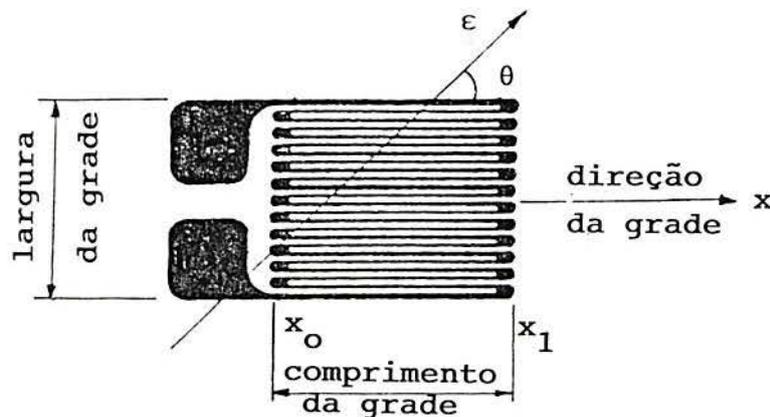


Figura 3.2 - Extensômetro de grade unidirecional, submetido a uma deformação a um ângulo qualquer com a direção da grade.

Uma característica importante do extensômetro é a sua sensibilidade ("gage-factor"), definida por:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (3.1)$$

e cujo valor situa-se próximo a 2 $(\Omega/\Omega)/(m/m)$, na maioria dos extensômetros tipo folha, e é superior a 100 para os tipos semicondutores. Para extensômetros com a grade feita com isoelástica, seu valor é próximo a 3,2.

A sensibilidade de um extensômetro comercial é definida de acordo com a norma ASTM E 251 67 (2) onde o extensômetro é submetido a um ensaio uniaxial que produz uma deformação constante ϵ_x em todos os seus pontos. Assim tem-se:

$$K = K_x \left(1 - \nu \frac{K_y}{K_x} \right) \quad (3.2)$$

onde K_x é a sensibilidade longitudinal; K_y , a sensibilidade transversal do extensômetro e ν , o coeficiente de Poisson da grade do extensômetro.

A sensibilidade transversal de um extensômetro tipo folha é tanto menor quanto maior for o comprimento da grade ativa pela largura da grade ativa do extensômetro (42).

Um extensômetro colado em um elemento elástico sujeito a uma deformação qualquer ϵ , conforme a figura 3.2, sofrerá uma deformação média $\bar{\epsilon}_x$ na direção x de sua grade, expressa por:

$$\bar{\epsilon}_x = \frac{\int_A \epsilon_{(x)} dA}{A} \quad (3.3)$$

onde A é a área da grade ativa do extensômetro e ϵ_x , a projeção da deformação ϵ na direção x.

A expressão 3.3 mostra que o extensômetro realiza a integração da deformação sob a sua grade e na direção da grade.

Quando o extensômetro é colado no elemento elástico, pressupõe-se que toda a deformação da superfície do elemento elástico seja integralmente transmitida à grade do extensômetro, ou seja, o conjunto cola e base do extensômetro não prejudicam a medida da deformação, e também a espessura da camada de cola e da base do extensômetro sejam desprezíveis frente à espessura do elemento elástico onde o extensômetro está colado.

Para extensômetros, mesmo autocompensados para o material do elemento elástico, colados em superfícies com pequeno raio de curvatura, ocorrem erros, devidos à variação da temperatura, tanto maiores quanto menor for o raio de curvatura (côncavo ou convexo). Este problema, conforme visto no estudo da ponte de Wheatstone, não prejudicará a linearidade do transdutor, para um mesmo raio de curvatura, mesma temperatura em todo o elemento elástico e usando-se os extensômetros em configuração de meia-ponte ou ponte inteira, e com as deformações, em braços de um mesmo ramo, iguais em módulo. Em transdutores de precisão, com o elemento elástico apresentando raio de curvatura, para evitar possíveis efeitos de gradientes de temperatura entre os diversos extensômetros, deve-se fazer, sempre que possível, pequenos planos para a colagem dos extensômetros e fazer o conjunto da cola e base do extensômetro com a menor espessura possível (35,47). As não-linearidades do transdutor extensométrico são

devidas à sua geometria específica e não ao extensômetro em si (53).

As características desejadas do extensômetro, quanto à sensibilidade K , são (47,48):

- a) deve ser constante,
- b) deve ser independente da temperatura,
- c) deve ser independente da deformação atuante.

As ligas metálicas usadas na confecção de extensômetros procuram manter estas características e tornar o extensômetro autocompensado para materiais usuais na construção de elementos elásticos. Para aplicações, é sempre recomendado a consulta às especificações do fabricante como colas, tensão de excitação e faixas de temperatura (44,46).

4. ELEMENTO ELÁSTICO

4.1 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO E MATERIAIS

A função do elemento elástico (26,33,45,54) de um transdutor extensométrico é servir de reação a grandeza mecânica aplicada e conduzir o efeito desta grandeza em um isolado, e se possível uniforme (32), campo de deformações relativas onde os extensômetros são colados para medi-las.

Os extensômetros colados na superfície do elemento elástico e ligados em ponte de Wheatstone, possibilitam a obtenção de um sinal elétrico proporcional à grandeza mecânica aplicada.

Os níveis de deformação do elemento elástico não excedem em qualquer ponto, quer seja ou não posição de algum extensômetro, o limite elástico do material de que é construído.

O elemento elástico é solidário a uma carcaça que tem por finalidade:

- a) delimitar os seus contornos geométricos,
- b) protegê-lo,
- c) servir-lhe de engaste.

O elemento elástico é a parte crítica de um transdutor extensométrico, e deve funcionar como se fosse uma mola de alta precisão, estável no tempo e insensível a variações de temperatura, o que implica em (15,26):

- a) linearidade,
- b) baixa histerese mecânica,
- c) baixa fluência,
- d) estabilidade metalúrgica.

O material do elemento elástico deve possuir também alta condutividade térmica para dissipar o calor gerado nos extensômetros em ponte de Wheatstone excitada, o que praticamente inviabiliza o uso de materiais não metálicos e, se o elemento elástico não estiver hermeticamente selado pela carcaça, alta resistência à corrosão do meio em que se encontra.

Material	E (G Pa)	σ_e (M Pa)	coeficiente de dilat. térmico ($\mu\text{m/m}$) / °C
Aço 4340	207	800	11,3
Aço 4140	207	750	11,7
Inox 17-4-PH	196	1000*	10,8
Inox 17-7-PH	200	1500*	10,2
Alumínio 2014-T6	73	414*	22,3
Alumínio 2024-T4	73	318*	22,7

Tabela 4.1 - Valores do módulo de elasticidade E , da tensão de escoamento σ_e e do coeficiente de dilatação térmica para alguns materiais de uso comum em elementos elásticos. O símbolo (*) indica a tensão de escoamento com tratamento térmico.

Os tipos de materiais mais usados são os aços ABNT 4140 e 4340; dos aços inoxidáveis, tem-se o tipo 17-7-PH e o 17-4-PH; e, dentre as ligas de alumínio, destacam-se a 2014-T6 e a 2024-T4. Para cada tipo de material do elemento elástico,

existem extensômetros autocompensados, que apresentam a mesma dilatação do material, para uma faixa de temperatura. Na tabela 4.1 estão relacionados os valores do módulo de elasticidade E , da tensão de escoamento σ_e e do coeficiente de dilatação térmico dos materiais acima relacionados. O uso de tratamento térmico pode alterar a tensão de escoamento.

Uma das características desejadas do elemento elástico é que o seu módulo de elasticidade seja igual em tração e em compressão. A dureza máxima recomendada para o elemento elástico, se for o aço, é em torno de 50 Rc, para evitar fraturas frágeis que podem produzir sérios problemas (45). Um transdutor extensométrico sujeito a sobrecargas deve ser o mais dúctil possível. Para transdutores sujeitos a ciclos mecânicos, o material do elemento elástico deverá ser capaz de resistir ao número de ciclos da grandeza mecânica atuante sem danificar-se. A seleção do material do elemento elástico leva em consideração também fatores como a disponibilidade, custo, usinabilidade e grau de precisão do transdutor a ser construído.

Os materiais de elementos elásticos, quanto a capacidade nominal, dividem-se em dois grandes grupos:

- Alto módulo de elasticidade: neste grupo estão os aços e suas ligas e são indicados para transdutores de alta capacidade.

- Baixo módulo de elasticidade: como o alumínio e ligas, usados em transdutores de baixa capacidade.

4.2 CAMPO DE DEFORMAÇÕES

A colagem de um extensômetro em uma região do elemento elástico pode alterar o campo de deformações se a espessura do conjunto cola mais extensômetro for da mesma ordem

de grandeza que a espessura do elemento elástico. Assim, o erro introduzido pela alteração do campo de deformações é desprezível na maioria dos casos.

As deformações relativas (58,59) que ocorrem na superfície do elemento elástico, devidas à tração, compressão, flexão, torção, tensões residuais ou tensões térmicas, podem ser divididas em dois grupos (33):

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

Para ilustrar as deformações normais, na figura 4.1 está representada uma barra sob a ação de uma força F de tração, que apresenta, longe das extremidades, uma deformação ϵ_1 , na direção longitudinal e, na direção transversal, a deformação é de compressão, valendo, em módulo, $\nu\epsilon_1$.

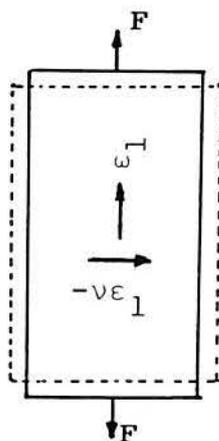


Figura 4.1 - Deformações devidas a tensões normais. Na direção longitudinal tem-se ϵ_1 , e na direção transversal tem-se uma contração de valor $\nu\epsilon_1$.

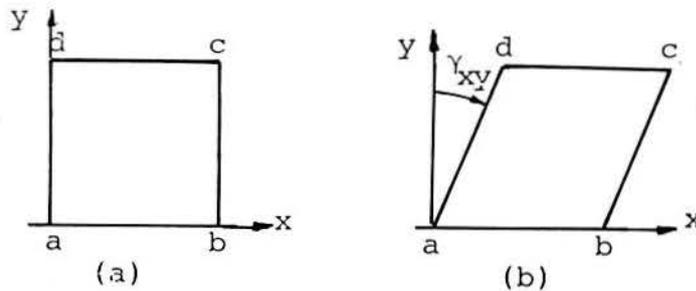


Figura 4.2 - Visualização das deformações devidas a tensões normais de cisalhamento. a) elemento prismático sem tensões de cisalhamento; b) o mesmo elemento sob efeito de tensão de cisalhamento, apresentando um deslocamento de um ângulo γ_{xy} , e tendo na direção a-c, deformações de tração e na direção b-d, de compressão.

Na figura 4.2 está representada uma visualização simplificada da deformação devida a tensões normais de cisalhamento. Inicialmente, sem tensão de cisalhamento atuando, tem-se o elemento formado por ângulos retos, conforme a figura 4.2.a. Sob a ação de uma tensão de cisalhamento, o mesmo elemento apresenta um deslocamento γ_{xy} , assumindo a forma de um losango, mostrado na figura 4.2.b, tendo-se assim deformações positivas entre os vértices opostos mais distantes, e deformações negativas entre os vértices opostos mais próximos.

4.3 CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DO ELEMENTO ELÁSTICO

O elemento elástico pode ser classificado em três tipos básicos (41), conforme a figura 4.3:

- a) cisalhante,
- b) axial,
- c) flexional.

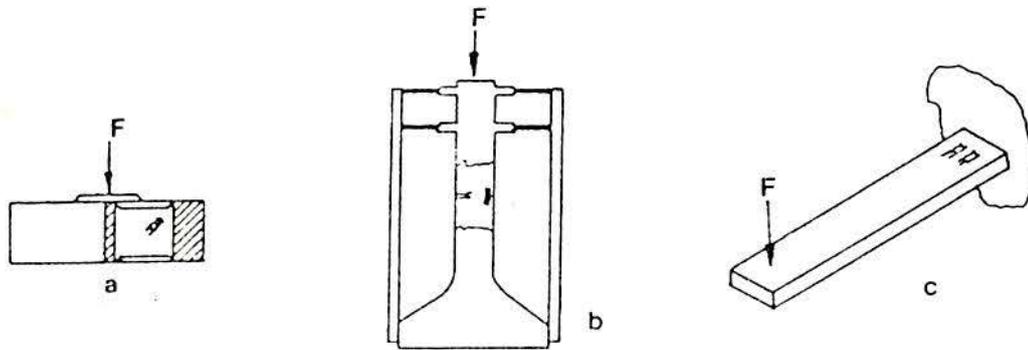


Figura 4.3 - Tipos básicos de elementos elásticos de transdutores extensométricos, conforme a deformação a que estão sujeitos: a) cisalhante; b) axial e c) flexional.

O elemento elástico cisalhante apresenta deformações devidas a tensões normais de cisalhamento, e os axiais e flexionais apresentam deformações devidas a tensões normais. Assim, os elementos elásticos podem apresentar inúmeras configurações geométricas, em função do tipo de grandeza mecânica e seu valor nominal. O desenvolvimento de configurações diferentes que otimizam o desempenho do transdutor extensométrico são passíveis de serem protegidos por patente (45).

A seguir, ilustram-se algumas das configurações geométricas características de elementos elásticos. Na figura 4.4 são vistas uma série de células do tipo axial. Na figura 4.4a tem-se quatro pequenas colunas, minimizando o problema de

flambagem e de cargas excêntricas, e realizando a média das deformações relativas dos extensômetros colados em cada coluna. A figura 4.4b apresenta dois discos na parte superior que servem de guia, evitando a flambagem e perturbações de cargas laterais, e na figura 4.4c, vê-se uma possível geometria na qual o efeito da flambagem também poderia ser minimizado. Em todas as células de carga axiais deve-se colar os extensômetros em regiões equidistantes das extremidades, pois estas apresentam uma distribuição das deformações não-uniformes. Como as deformações dos extensômetros não são iguais, estas células apresentam uma não-linearidade devida à ponte de Wheatstone e à variação da área, sob carga, de sua secção transversal (45). As células de

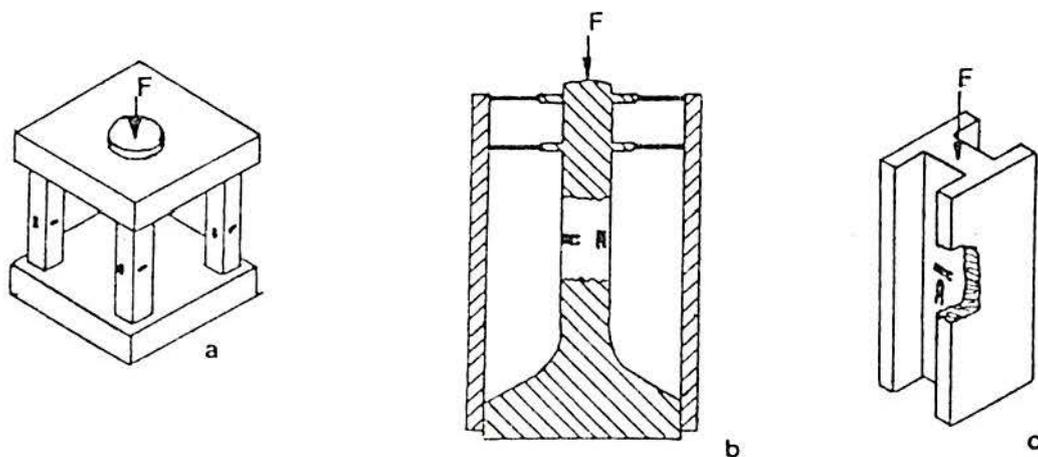


Figura 4.4 - Diversas configurações do elemento elástico de células de carga tipo axial.

carga do tipo flexionais e cisalhantes apresentam várias geometrias, conforme as figuras 4.5 e 4.7, respectivamente.

Cada tipo e geometria de célula de carga apresentam características específicas como a não-linearidade, deflexão, flambagem, frequência natural, que devem ser considerados em sua seleção.

No caso de torquímetros à base de extensômetros, tem-se seis configurações básicas de geometrias do elemento elástico (41), conforme a figura 4.6, onde em quatro das geometrias a deformação na superfície deve-se ao cisalhamento (4,5) e em duas, à flexão (cruciforme e cruciforme vazado) (8,19,57). As geometrias de flexão são usadas na medida de baixos torques, abaixo de 10 Nm, pois se fosse usado um eixo maciço ou vazado para esta faixa de torque, haveria a impossibilidade física de colar os extensômetros sobre o eixo, que seria de pequeno diâmetro.

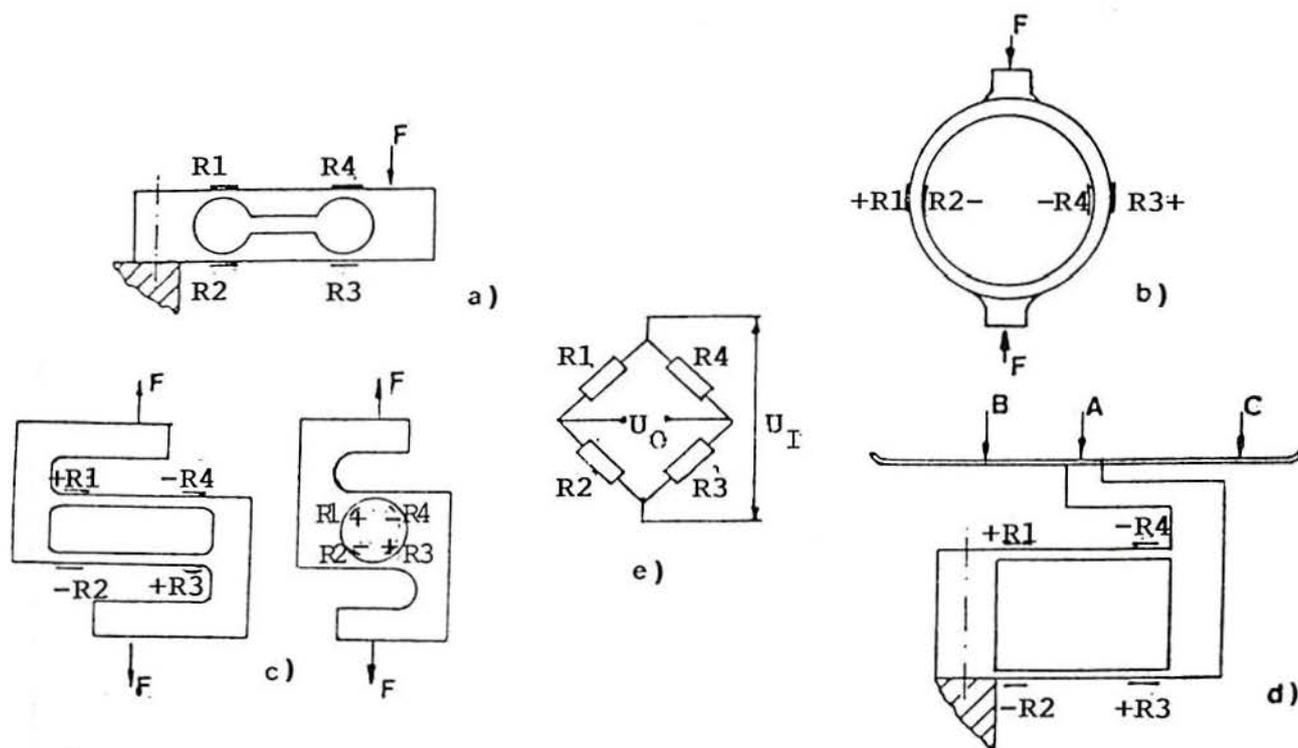


Figura 4.5 - Geometrias de células de carga do tipo flexional. Os sinais + e - assinalados indicam deformações de tração ou compressão, respectivamente, sob a ação da força F . Em: a) célula de carga binocular; b) tipo anel de flexão; c) tipo "S"; d) em dupla viga; e) ligação em ponte dos extensômetros R_1 , R_2 , R_3 e R_4 .

A figura 4.7 mostra a configuração de algumas células de carga cisalhantes.

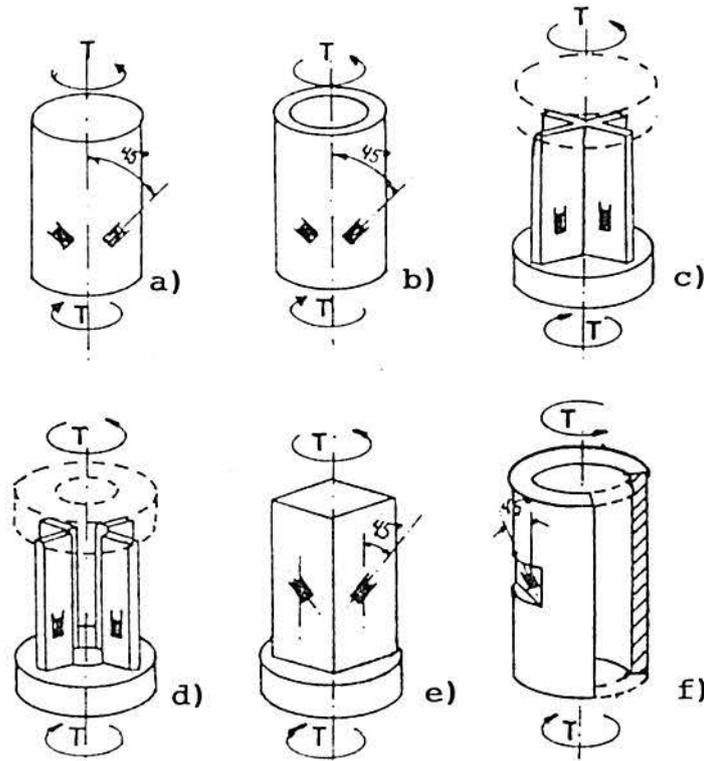


Figura 4.6 - Configurações básicas do elemento elástico de torquímetros: a) eixo circular maciço; b) eixo circular vazado; c) cruciforme; d) cruciforme vazado; e) secção quadrada; f) eixo circular vazado com chanfro.

Na figura 4.8 tem-se o elemento elástico de um manômetro à base de extensômetros. O extensômetro indicado para a sua construção está representado na figura 3.1b, ou também usando quatro extensômetros, convenientemente posicionados, do tipo indicado na figura 3.1c.

Nos transdutores extensométricos, para se ter um maior sinal de saída e a eliminação da não-linearidade da ponte de Wheatstone, deve-se usar ponte inteira, e com os extensômetros

submetidos a mesma deformação em módulo. Transdutores construídos em meia-ponte ou 1/4 de ponte apresentam um sinal de saída menor, que pode ser linear para a meia ponte, se as deformações forem iguais em módulo.

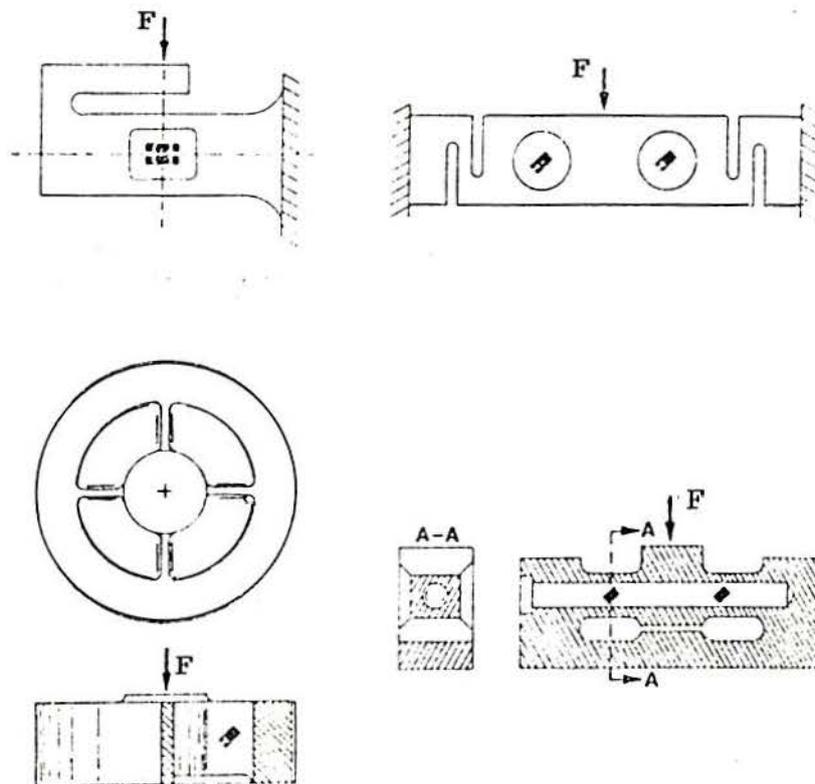


Figura 4.7 - Configurações do elemento elástico de algumas células de carga tipo cisalhante.

O elemento elástico é uma parte estrutural do sistema em que está inserido, e o seu completo dimensionamento deve levar em consideração o regime de esforços mecânicos a que estará sujeito, aspectos como cargas de impacto, frequência em que

operará, comportamento à fadiga, efeitos de concentração de tensões e, dependendo da temperatura de trabalho, deve-se conhecer a temperatura de transição de dúctil para frágil (28,38).

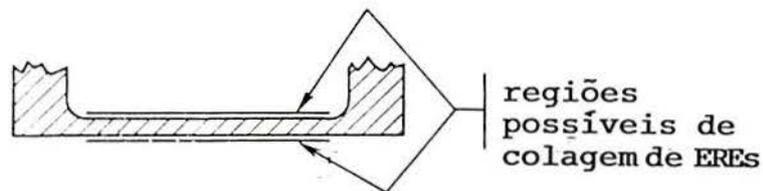


Figura 4.8 - Aspecto do elemento elástico de um manômetro tipo placa circular.

Conforme visto no capítulo 1, o projeto do elemento elástico pode envolver métodos analíticos, experimentais e numéricos. A partir de modelos desenvolvidos para calcular as deformações relativas em pontos da superfície de elementos elásticos, pode-se determinar, para efeito de projeto, o sinal de saída do transdutor. Os extensômetros, que apresentam uma dimensão finita, quando colados nas regiões apropriadas, converterão a média das deformações relativas, dos diversos pontos da superfície em que foram posicionados, em um sinal de saída elétrico com o auxílio da ponte de Wheatstone.

5. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA MECÂNICA DE UM TRANSDUTOR EXTENSOMÉTRICO

Neste capítulo descreve-se a base da metodologia proposta para o projeto de elementos elásticos de transdutores extensométricos, a partir da introdução da definição da função de transferência mecânica, assim chamada por envolver as deformações mecânicas do elemento elástico.

O elemento elástico de um transdutor extensométrico pode estar, simultaneamente, sob a ação de grandezas mecânicas G , efeitos da temperatura T e perturbações diversas D (pressão hidrostática, campos magnéticos, etc.), sendo que cada uma destas provoca deformações ϵ_j em pontos da superfície do elemento elástico.

Os valores das deformações ϵ_j , na superfície do elemento elástico, dependem de:

- a) posição do ponto considerado sobre o elemento elástico;
- b) orientação considerada sobre a superfície do elemento elástico.

Na figura 5.1 está representado um elemento elástico qualquer, sob a ação de G , T e D , com as deformações provocadas em pontos sobre a sua superfície e designadas por ϵ_j . Na prática, a orientação da deformação será definida pela orientação da grade dos extensômetros, e a posição dos pontos considerados é a região ocupada pelo extensômetro.

Assim, a deformação ϵ_j em um ponto e orientação qualquer, sobre a superfície do elemento elástico, pode ser expressa por:

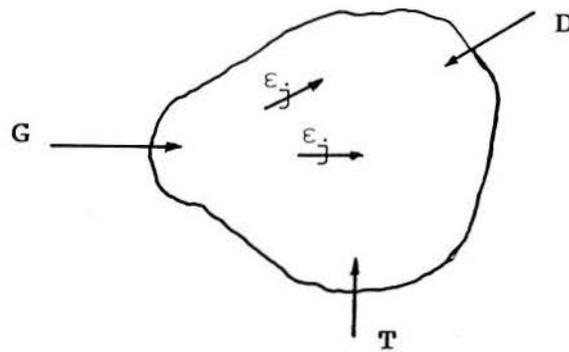


Figura 5.1 - Elemento elástico sob efeito de uma grandeza mecânica G , efeito da temperatura T e perturbações diversas D , que provocam deformações ϵ_j , sobre a sua superfície, e cujo valor depende do ponto e orientação considerados.

$$\epsilon_j = f(G, T, D) \quad (5.1)$$

Para se obter a expressão analítica de ϵ_j , desconsideram-se o efeito da temperatura T , que é compensado basicamente pela ligação em ponte de Wheatstone e uso de extensômetros autocompensados, e o efeito das perturbações diversas D , que também pode ser compensado pela ligação em ponte de Wheatstone. Para o aço comum, por exemplo, o efeito da temperatura é da ordem de $11 (\mu\text{m}/\text{m})/^\circ\text{C}$. As deformações produzidas pelas grandezas mecânicas, dentro da faixa de operação do transdutor extensométrico, são as realmente significativas.

Considerando a grandeza mecânica G na forma adimensional G/G_N , sendo G o valor da grandeza mecânica e G_N , o seu valor nominal, e sem os termos devidos aos efeitos da temperatura e às perturbações diversas, a equação 5.1, para um ponto e orientação particular, é expressa por:

$$\epsilon_j = f \left(\frac{G}{G_N} \right) \quad (5.2)$$

A figura 5.2 mostra uma representação do elemento elástico sob a ação de G/G_N , e o conseqüente conjunto de deformações ϵ_j provocado em sua superfície.



Figura 5.2 - Representação do elemento elástico de um TE, apresentando um conjunto de deformações ϵ_j em sua superfície, devido a grandeza mecânica G/G_N .

O desenvolvimento a seguir pressupõe que o comportamento do elemento elástico seja perfeitamente linear, estável e operando em regime permanente.

Sob a ação de uma grandeza mecânica G/G_N a deformação ϵ_j é:

$$\epsilon_j = k \frac{G}{G_N} \quad (5.3)$$

sendo k a constante de proporcionalidade.

A deformação ϵ_{jN} , para um carregamento nominal, com $G=G_N$, é:

$$\epsilon_{jN} = k \frac{G_N}{G_N} \quad (5.4)$$

de modo que, dividindo-se a equação 5.3 pela equação 5.4, obtém-se, para um ponto e orientação considerada:

$$\epsilon_j = \epsilon_{jN} \frac{G}{G_N} \quad (5.5)$$

Agora, define-se como ϵ_N a sensibilidade intrínseca, que é a máxima deformação atuante na superfície do material com um determinado coeficiente de segurança sg , e que pode ser devida a deformações de tração/compressão ou a deformações de cisalhamento. Assim, a sensibilidade intrínseca ϵ_N de um material com módulo de elasticidade E e tensão de escoamento σ_e , é:

$$\epsilon_N = W \frac{\sigma_e}{E s g} \quad (5.6)$$

onde:

$W = 1$ para deformações de tração ou de compressão e;

$W = (1 + \nu) / 2$ para deformações normais de cisalhamento.

Para auxílio à visualização destas deformações sobre a superfície do elemento elástico, tem-se, na figura 5.3, uma lâmina engastada sob a ação de uma grandeza mecânica. Na figura 5.3.a, estão representados os valores de ϵ_j para uma grandeza mecânica G , menor que a nominal, e na figura 5.3.b estão representadas as deformações ϵ_{jN} , devidas a grandeza mecânica nominal G_N , para os mesmos pontos e orientações da figura 5.3.a. No engaste, com orientação longitudinal à lâmina, a deformação ϵ_{jN} é igual, em módulo, a máxima deformação atuante, ϵ_N .

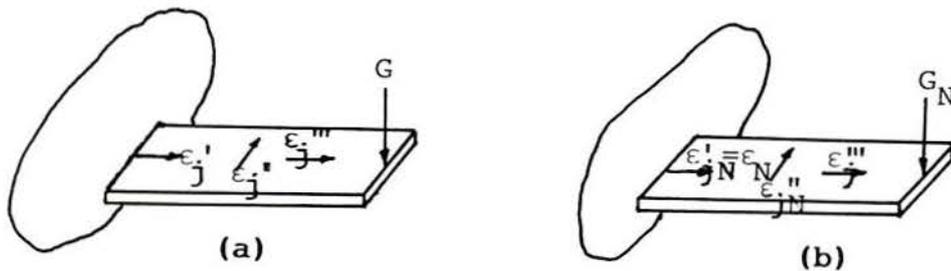


Figura 5.3 - Deformações atuantes na superfície superior de uma lâmina sob flexão devido a uma grandeza mecânica. a) A grandeza mecânica G provoca deformações ϵ_j diferentes, em pontos e orientações particulares e b) as deformações ϵ_{jN} , nos mesmos pontos e orientações anteriores, sob a ação da grandeza mecânica nominal G_N . Observe-se que $\epsilon_N = \epsilon_{jN}$ no engaste, na direção longitudinal da lâmina.

Com o objetivo de normalizar as deformações na superfície do elemento elástico, multiplica-se e divide-se a equação 5.5 pela sensibilidade intrínseca ϵ_N , obtendo-se:

$$\epsilon_j = \frac{\epsilon_{jN}}{\epsilon_N} \epsilon_N \frac{G}{G_N} \quad (5.7)$$

Definindo-se o fator geométrico n_j do transdutor extensométrico como:

$$n_j = \frac{\epsilon_{jN}}{\epsilon_N} \quad (5.8)$$

Assim, a equação 5.7 assume a seguinte forma:

$$\epsilon_j = n_j \epsilon_N \frac{G}{G_N} \quad (5.9)$$

que é a função de transferência mecânica proposta.

A função de transferência mecânica de um transdutor extensométrico, é função de três parâmetros adimensionais:

- 1 - fator geométrico: n_j ,
- 2 - sensibilidade intrínseca: ϵ_N ,
- 3 - relação entre a grandeza mecânica aplicada G e a grandeza mecânica nominal G_N : G/G_N .

Assim, com o uso da equação 5.9, é possível determinar a deformação ϵ_j na superfície de um elemento elástico de um transdutor extensométrico, para um ponto e orientação considerada.

A função de transferência mecânica é definida apenas para um ponto do transdutor extensométrico. Um extensômetro colado em um elemento elástico realiza a integração da deformação dos inúmeros pontos sob a sua grade ativa, fornecendo o valor médio das deformações ϵ_j , indicadas por $\bar{\epsilon}_j$.

A relação adimensional das grandezas mecânicas, G/G_N , está contida no intervalo $[0,1]$.

A sensibilidade intrínseca é função do material, dependendo da tensão de escoamento σ_e , do módulo de elasticidade E e do coeficiente de segurança sg para deformações de tração ou de compressão, acrescida do coeficiente de Poisson quando as deformações forem de cisalhamento. Seu valor será considerado sempre positivo.

O fator geométrico, definido pela equação 5.8 como a relação entre a máxima deformação existente em um ponto, e segundo uma orientação sobre a superfície do elemento elástico, pela máxima deformação, ϵ_N , existente no material, é de fundamental importância para o projeto do elemento elástico de um transdutor extensométrico.

O fator geométrico n_j do transdutor extensométrico está contido no intervalo $[-1,1]$, indicando a possibilidade de haver pontos do elemento elástico nos quais ϵ_{jN} seja igual, em módulo, a ϵ_N . Cada tipo de geometria de elemento elástico apresenta n_j característicos sobre a sua superfície, e que podem ser constantes para todos os pontos e a uma determinada orientação como, por exemplo, células de carga de coluna na direção longitudinal do eixo, e torquímetros de eixo circular a um ângulo de 45° com o seu eixo longitudinal, ou então serem

variáveis ponto a ponto para uma mesma orientação como, por exemplo, em lâminas sob flexão. Assim, para cada tipo de geometria de elemento elástico é necessário o conhecimento da posição e orientação dos extensômetros sobre o elemento elástico.

Para cada tipo de elemento elástico pode-se obter gráficos com o comportamento de n_j sobre a sua superfície, e usando a equação 5.9, é possível avaliar a deformação que um extensômetro apresentará. Os gráficos com o comportamento de n_j são de interesse para as posições e orientações particulares da grade dos extensômetros mais usuais em elementos elásticos.

Na figura 5.4 está representado um hipotético comportamento de n_j de um elemento elástico qualquer, em uma orientação particular sobre a sua superfície e entre dois pontos L1 e L2. Para um extensômetro colado em um ponto qualquer deste elemento elástico, e com sua grade, de comprimento x_0-x_1 , orientada na mesma direção para a qual foi construído o gráfico de n_j , será obtido um valor de \bar{n}_j , que é a média dos inúmeros valores de n_j sob a grade do extensômetro.

Uma análise deste gráfico mostra que é crítico o comprimento da grade e o posicionamento do extensômetro sobre o elemento elástico, podendo-se ter valores de \bar{n}_j positivos, negativos ou nulos.

Agora, usando-se a equação 2.18 da ponte de Wheatstone, com $\lambda = 0$, $S_0 = 1/4$ e as variações de resistência expressas pelas deformações relativas $\bar{\epsilon}_{j(i)}$ (i de 1 a 4), o sinal de saída, em V/V , é:

$$\frac{\Delta U_o}{U_I} = \frac{1}{4} K \sum_{i=1}^4 \bar{\epsilon}_{j(i)} (-1)^{i+1} \quad (5.10)$$

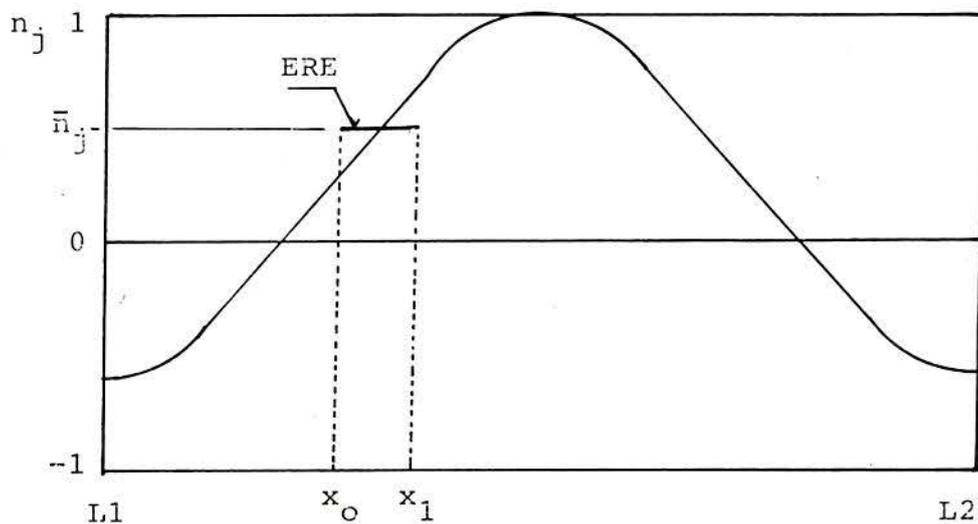


Figura 5.4 - Comportamento hipotético de n_j e a representação de um ERE, de comprimento x_0-x_1 , posicionado entre $L1$ e $L2$, e o seu respectivo n_j médio.

Tomando-se o valor médio das deformações $\bar{\epsilon}_j$, da equação 5.9, a equação 5.10 fica:

$$\frac{\Delta U_o}{U_I} = \frac{1}{4} K \epsilon_N \frac{G}{G_N} \sum_{i=1}^4 \bar{n}_{ji} (-1)^{i+1} \quad (5.11)$$

onde \bar{n}_j é o valor médio do fator geométrico.

A equação 5.11 pode ser reescrita, inserindo-se também o termo $(1 - \delta)$, que engloba as não-linearidades da ponte de Wheatstone e mecânicas, efeitos da temperatura, pressões hidrostáticas, sensibilidade transversal dos extensômetros, cargas laterais, campos magnéticos, erros de alinhamento dos extensômetros, etc. Assim:

$$\frac{\Delta U_O}{U_I} = \frac{1}{4} K \epsilon_N \frac{G}{G_N} (1-\delta) \sum_{i=1}^4 \bar{n}_{ji} (-1)^{i+1} \quad (5.12)$$

O termo $(1 - \delta)$ situa-se muito próximo a 1 nas aplicações normais dos transdutores extensométricos e o termo ϵ_N apresenta duas situações: para deformações de tração/compressão e deformações de cisalhamento, conforme a equação 5.6.

Da equação 5.12, obtém-se o seu sinal de saída, conhecendo-se o módulo de elasticidade E , a tensão de escoamento σ_e , o coeficiente de segurança sg , o coeficiente de Poisson ν (se as deformações forem de cisalhamento), a relação adimensional da grandeza mecânica G/G_N e os fatores geométricos n_j do transdutor extensométrico.

A equação 5.12 é fundamental para o projeto mecânico de um transdutor extensométrico, apresentando quatro características do transdutor:

- a) Material (ϵ_N)
- b) Sinal de saída ($\Delta U_O/U_I$)
- c) fator geométrico do transdutor (\bar{n}_j)
- d) coeficiente de segurança (sg)

Em um transdutor extensométrico, conhecendo-se três das características acima é possível a determinação da quarta. Por exemplo, conhecendo-se o sinal de saída, o fator geométrico de cada ponto onde os extensômetros estão posicionados e o material do transdutor, determina-se o seu coeficiente de segurança sem o prévio conhecimento das dimensões físicas elemento elástico.

Agora, para a determinação das dimensões do elemento elástico do transdutor extensométrico, tem-se que a sensibilidade intrínseca ϵ_N , também pode ser expressa em função das tensões de tração/compressão ou de cisalhamento na superfície do elemento elástico.

Assim, para deformações de tração ou de compressão, tem-se para ϵ_N :

$$\epsilon_N = \frac{\sigma_o}{E} \quad (5.13)$$

que é igual à equação 5.6, para $W = 1$, e σ_o é a máxima tensão atuante, que também depende do tipo de geometria e solicitações no elemento elástico.

Já, para as deformações devidas ao cisalhamento tem-se:

$$\epsilon_N = (1+\nu) \frac{\tau_o}{E} \quad (5.14)$$

que é igual a equação 5.6, para $W = (1 + \nu) / 2$, e τ_o é a máxima tensão de cisalhamento atuante, também dependente do tipo de geometria e solicitações do elemento elástico.

Igualando-se as equações 5.13 ou 5.14 com a equação 5.6, e conhecendo-se o tipo de deformação atuante no elemento elástico, é possível a determinação das dimensões físicas do elemento elástico.

Assim, o uso da função de transferência mecânica, possibilita um rápido projeto de um elemento elástico. O conhecimento do fator geométrico é útil para determinar o sinal de saída e para o posicionamento dos extensômetros; a sensibilidade intrínseca ϵ_N que engloba características do material do elemento elástico (E , σ_e , sg e v , para cisalhantes) possibilita avaliar se o nível de deformação é adequado ao material do elemento elástico; quando ϵ_N é expressa em termos das tensões de tração/compressão ou cisalhamento, é possível o dimensionamento do elemento elástico através do formulário desenvolvido.

6. PROPOSTA DE UM ESQUEMA DE PROJETO DE UM TRANSDUTOR EXTENSOMÉTRICO

Um elemento elástico estará definido com a determinação de seu sinal de saída e com o seu dimensionamento mecânico. Assim, a partir dos conceitos introduzidos no capítulo 5, elaborou-se o fluxograma, representado na figura 6.1, para o projeto mecânico de um elemento elástico, através do uso da equação 5.12 na configuração de ponte completa, que permite o cálculo do sinal de saída do transdutor extensométrico, e das equações 5.13 e 5.14, que relacionam as tensões e deformações atuantes. Se for utilizado apenas um braço da ponte de Wheatstone, 1/4 de ponte, a equação 5.12 apresenta apenas um único fator geométrico e , se forem usados dois braços, em meia-ponte, o somatório será de $i=1$ até $i=2$.

Para o projeto do elemento elástico, primeiramente define-se o material a ser utilizado e o coeficiente de segurança adotado, obtendo-se a sensibilidade intrínseca, que deve ser no máximo, como regra prática, a metade do valor da deformação relativa correspondente à tensão limite de escoamento. Valores muito altos da sensibilidade intrínseca podem comprometer por fadiga mecânica o elemento elástico.

Feita a seleção do extensômetro adequado ao transdutor em projeto, toma-se o valor de sua sensibilidade K e o comprimento de sua grade. O fator geométrico médio, para cada extensômetro posicionado, pode ser determinado graficamente, conforme a figura 5.4, ou analiticamente, a partir da expressão de n_j própria para a geometria escolhida.

Usando a equação 5.12, com $G/G_N = 1$ e $\delta = 0$, obtém-se o sinal de saída nominal do transdutor extensométrico. Apesar das

dimensões do elemento elástico não estarem ainda definidas, observa-se que o coeficiente de segurança já está pré-definido.

Se o sinal de saída não estiver adequado nesta fase do projeto, podem ser alterados: a sensibilidade intrínseca, trocando-se de material e ou coeficiente de segurança; o fator geométrico n_j , mudando-se a posição ou usando-se extensômetros com comprimento de grade diferente. As sensibilidades dos extensômetros tipo folha comerciais são praticamente constantes.

Usualmente, o sinal de saída nominal situa-se próximo a 2 mV/V. Neste caso, o projeto do elemento elástico deve resultar em um valor levemente superior, para ajuste posterior, com o uso de resistores de ajuste de ganho, adequadamente inseridos na fiação de excitação da ponte de Wheatstone (25,27).

Estando o sinal de saída nominal definido e adequado, define-se a grandeza mecânica nominal G_N e procede-se ao dimensionamento, usando-se as equações 5.13 ou 5.14, conforme as deformações do elemento elástico sejam de tração/compressão ou de cisalhamento.

Tanto a tensão mecânica σ_o e a tensão mecânica de cisalhamento τ_o são funções do tipo de elemento elástico e de suas dimensões físicas. Portanto, para cada tipo de elemento elástico, é necessário o conhecimento de seu σ_o ou τ_o , para o seu projeto.

As dimensões físicas do elemento elástico são obtidas com a sensibilidade intrínseca ϵ_N , dada pela equação 5.6 e igualando-a com as deformações provocadas por σ_o ou τ_o , dadas pelas equações 5.13 ou 5.14, respectivamente. O coeficiente de segurança já está pré-definido.

O projeto do elemento elástico estará concluído quando suas dimensões estarem de acordo com as necessidades de projeto. Não ocorrendo isto, altera-se suas dimensões, ou

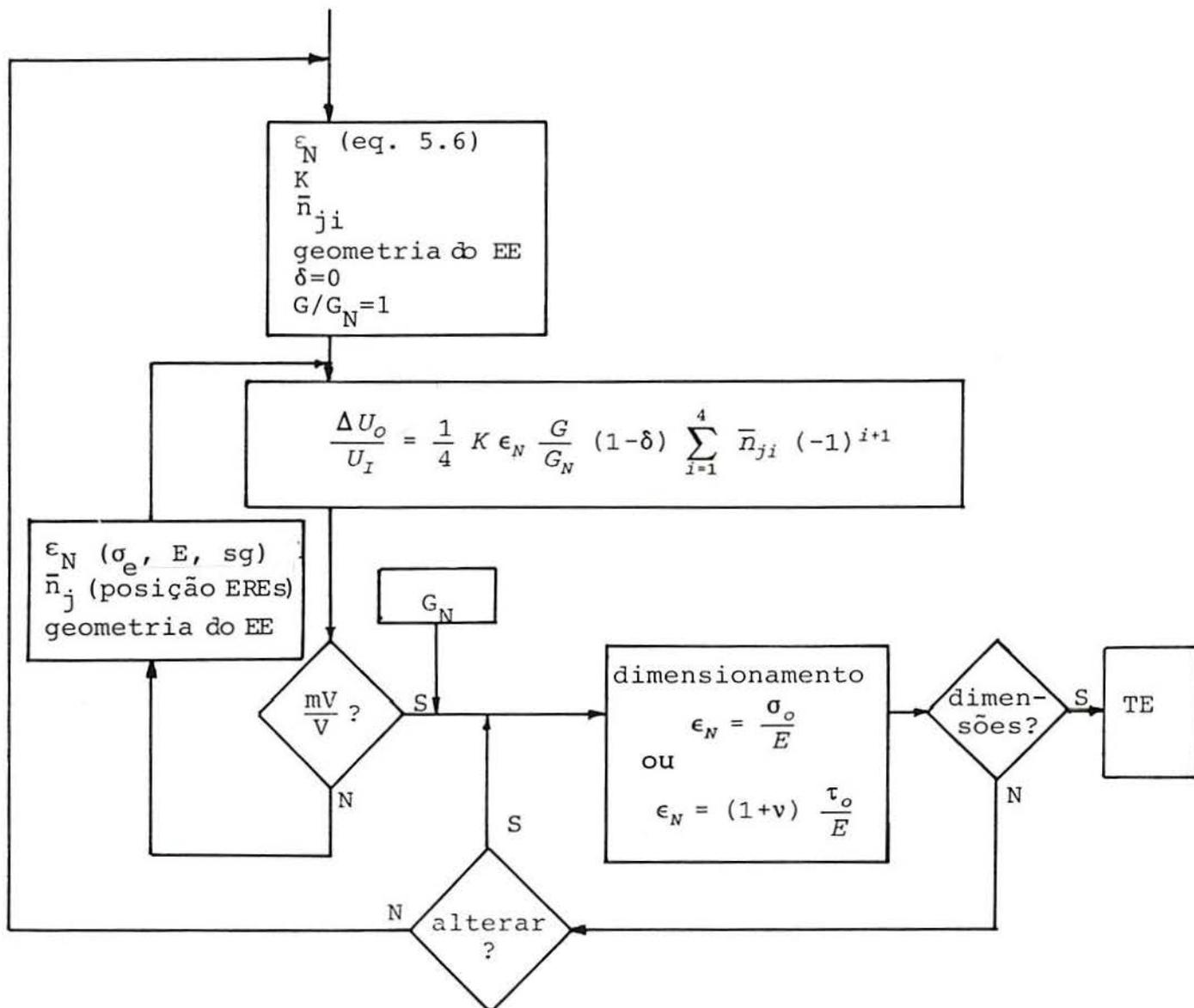


Figura 6.1 - Fluxograma de projeto mecânico de um transdutor extensométrico, em ponte completa. Com a equação 5.12, em função da sensibilidade intrínseca ϵ_N (material), fatores geométricos e sensibilidade K de cada extensômetro e coeficiente de segurança, estabelece-se o sinal de saída do transdutor. Conhecendo-se a grandeza mecânica G_N atuante no elemento elástico é feito o seu dimensionamento, com o auxílio das equações 5.13 ou 5.14, conforme o tipo de deformação atuante.

recomeça-se o projeto desde o seu início, com alteração de suas características, conforme o fluxograma.

7. APLICAÇÕES EM TRANSDUTORES EXTENSOMÉTRICOS

A seguir será feita a análise de diversos tipos de transdutores extensométricos aplicando a metodologia proposta para o projeto de seu elemento elástico.

Para cada tipo de transdutor será analisado o comportamento do fator geométrico n_j , definido na equação 5.8, através de equações próprias para cada tipo de elemento elástico, acompanhado de seus respectivos gráficos.

Também será analisada a máxima tensão atuante σ_0 , conforme o elemento elástico seja tipo axial ou flexional, ou a máxima tensão mecânica de cisalhamento τ_0 , se o elemento elástico for do tipo cisalhante.

Aplicando a metodologia proposta, será calculado o sinal de saída nominal analítico de cada protótipo construído, e a sua diferença em relação ao sinal nominal obtido experimentalmente. Foram construídos 15 células de carga, 8 torquímetros e 1 manômetro. O fator geométrico n_j é calculado analiticamente ou graficamente, considerando o ponto correspondente a metade do comprimento da grade do extensômetro utilizado.

A grandeza mecânica G será particularizada para F , T ou P , conforme o elemento elástico esteja submetido a uma força, torque ou pressão, respectivamente. O termo $(1 - \delta)$ será considerado igual a 1 e o valor de W será 1 para elementos elásticos do tipo axiais e flexionais, ou $W=0,65$ para os cisalhantes, ou seja, o coeficiente de Poisson é tomado como sendo igual a 0,3.

A imprecisão do sinal de saída nominal experimental de cada transdutor é no máximo $\pm 1\%$, e as medidas dimensionais apresentam uma imprecisão de $\pm 0,05$ mm. A tensão de escoamento de alguns materiais, como o aço 4340, varia em função do diâmetro do tarugo usado na usinagem do elemento elástico, podendo variar entre 750 e 800 MPa. Para calibrar as células de carga foram usados, para a aplicação da força, pesos suspensos ou prensas hidráulicas; para os torquímetros foram construídos braços de alavanca; para o manômetro foi feita a comparação contra um outro.

7.1 LÂMINA ENGASTADA SOB FLEXÃO

É um dos transdutores extensométricos mais simples, conforme as figuras 7.1.1 e 7.1.2, e sendo a sua principal aplicação em ilustrações didáticas. É uma célula de carga do tipo flexional e apresenta um deslocamento grande, comparado a sua espessura, quando submetida à ação de uma força em sua extremidade, introduzindo assim uma não-linearidade mecânica.

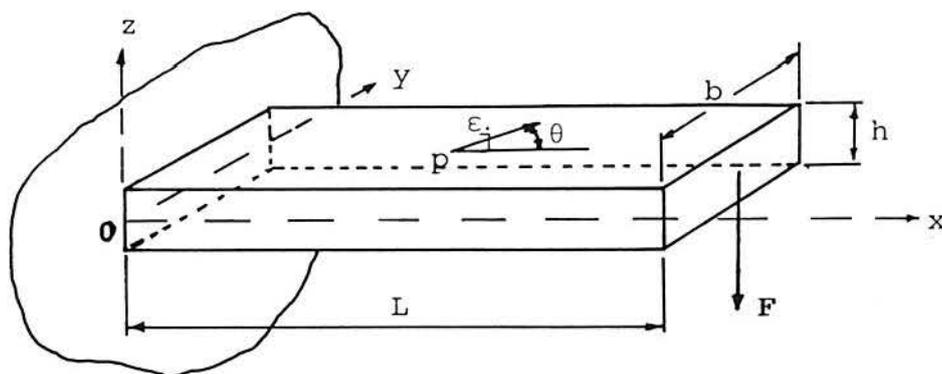


Figura 7.1.1 - Lâmina engastada submetida a uma força F que provoca deformações em sua superfície.

A tensão provocada pela força F, na superfície da lâmina e na direção $\theta = 0$, é:

$$\sigma(x, h, F) = \pm \frac{6(L-x)}{b h^2} F \quad (7.1.1)$$

O valor de σ_o , para $x = 0$, $z = \pm h/2$ e $F = F_N$, é:

$$\sigma_o = \pm \frac{6 L}{b h^2} F_N \quad (7.1.2)$$

Para o cálculo da função de transferência mecânica ϵ_j , divide-se a deformação devida à tensão expressa pela equação 7.1.1 pela deformação devida à tensão expressa pela equação 7.1.2, que é a ϵ_N , definida na equação 5.7, obtendo-se:

$$\epsilon_j = \left(1 - \frac{x}{L} \right) \epsilon_N \frac{F}{F_N} \quad (7.1.3)$$

de onde se obtém o fator geométrico n_j dado por:

$$n_j = (1 - (x/L))$$

Cada extensômetro, para este tipo de transdutor, é colado com a sua grade orientada longitudinalmente ao eixo da lâmina, com $\theta = 0^\circ$, e a figura 7.1.3 mostra o comportamento do fator geométrico na face superior da lâmina.

Colando-se agora um extensômetro, orientado na direção de $\theta = 0^\circ$ e o mais próximo possível do engaste, o fator geométrico médio \bar{n}_j pode ser calculado pela média dos n_j sob a grade ativa do extensômetro, ou posicionando o extensômetro com seu comprimento de grade em escala com respeito a L , obtendo-se assim o \bar{n}_j graficamente, com boa aproximação.



Figura 7.1.2 - Aspectos de uma lâmina engastada, sob a ação de uma força que provoca a sua flexão. Os extensômetros estão colados próximos ao engaste. Este tipo simples de construção encontra a sua grande aplicação em atividades didáticas com extensômetros.

Para um extensômetro colado na lâmina, o seu \bar{n}_j nunca será igual a 1, em módulo, devido à sua dimensão finita.

Usando-se a equação 5.12, determina-se o sinal de saída, em V/V, que uma lâmina de determinado material e coeficiente de segurança apresentará, conforme visto no capítulo 6.

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{1}{E} \frac{6 L}{b h^2} F_N \quad (7.1.4)$$

Arbitrando-se uma força F_N , qualquer combinação de

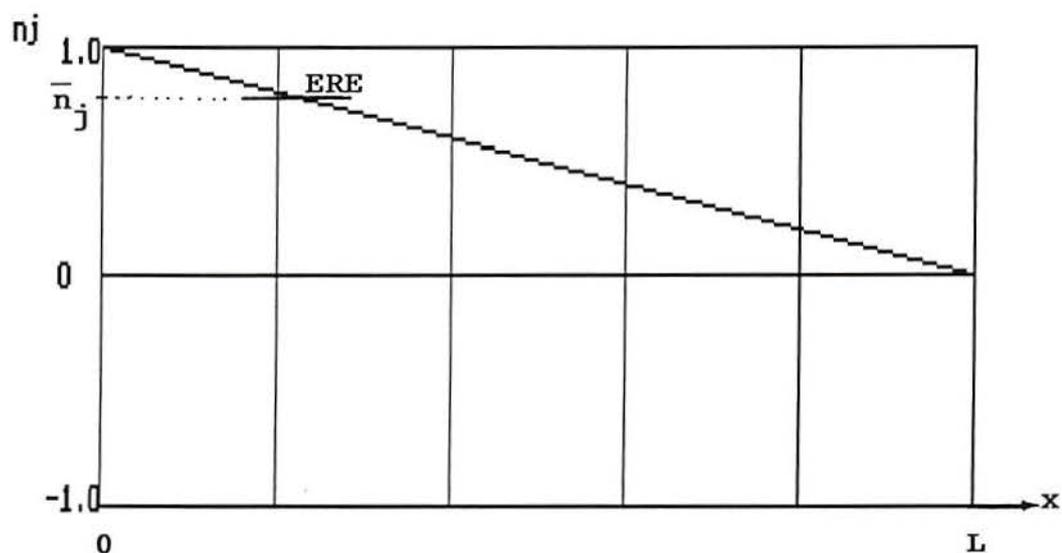


Figura 7.1.3 - Comportamento de n_j , na face superior da lâmina da figura 7.1.1, na direção perpendicular ao eixo da lâmina e, onde está representado o valor médio de n_j , de um extensômetro, em escala, sobre a lâmina.

L , b e h será possível, devendo estas dimensões satisfazer as seguintes relações: h maior ou igual a 1mm e menor que $L/3$; b maior ou igual a 4mm e menor que $L/3$; e L maior que $4b$.

7.2 CÉLULA DE CARGA TIPO COLUNA

Este também é um tipo de célula bastante simples, do tipo axial, podendo operar sob tração ou sob compressão, para grandes capacidades. Na figura 7.2.1 tem-se o elemento elástico tipo coluna submetido à tração, com uma deformação relativa ϵ_j de um ponto na superfície, longe das extremidades, e a um ângulo θ com o eixo axial.

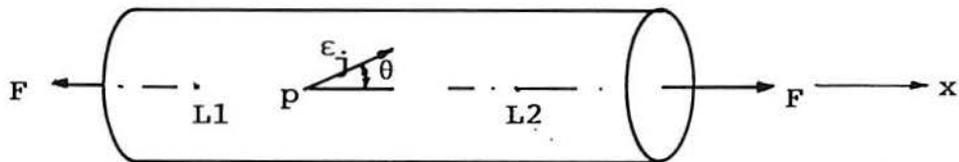


Figura 7.2.1 - Elemento elástico de uma célula de carga tipo coluna sob tração, e a representação da deformação em um ponto e orientação sobre a superfície, e entre L1 e L2, longe das extremidades, são pontos de colagem dos extensômetros.

A deformação ϵ_j em um ponto P e em uma direção $\theta = 0$ ou $\theta = 90^\circ$, da superfície da coluna, é dada por:

$$\epsilon_j = \frac{1}{EA} (\cos\theta - \nu \sin\theta) F \quad (7.2.1)$$

Para a coluna, o valor de σ_o é:

$$\sigma_o = \frac{F_N}{A} \quad (7.2.2)$$

onde A é a área da secção transversal da coluna.

A função de transferência mecânica da coluna, obtida pela divisão da deformação expressa na equação 7.2.1 pela deformação relativa ϵ_N , provocada pela tensão σ_o expressa na equação 7.2.2, é:

$$\epsilon_j = \epsilon_N (\cos\theta - v \sin\theta) \frac{F}{F_N} \quad (7.2.3)$$

onde $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 90^\circ$.

As células de carga tipo coluna são usualmente feitas com dois extensômetros orientados longitudinalmente, com o fator geométrico n_j de cada extensômetro igual a 1, em módulo, e dois extensômetros orientados perpendicularmente ao eixo da coluna, com o fator geométrico igual a v (praticamente igual a 0,3 para metais), em módulo, e sempre de sinal contrário ao longitudinal. Tem-se assim dois gráficos de fatores geométricos para esta situação, mostrados na figura 7.2.2.

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{1}{E} \frac{F_N}{A} \quad (7.2.4)$$

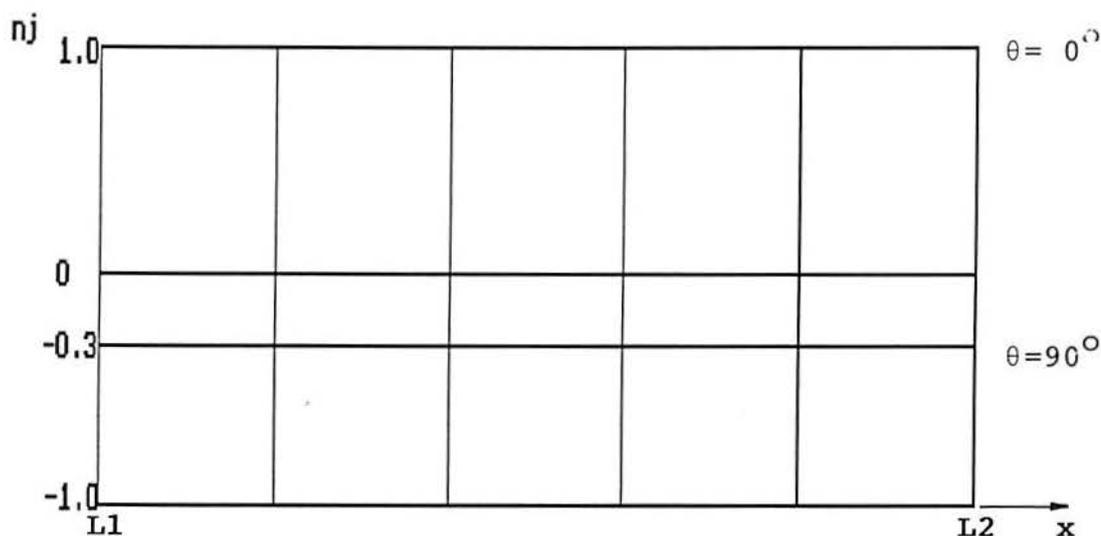


Figura 7.2.2 - Comportamento do fator geométrico n_j para as direções longitudinal ($\theta=0^\circ$) e transversal ($\theta=90^\circ$) da célula de carga tipo coluna, entre L1 e L2.

Arbitrando-se uma força F_N e calculando-se ϵ_N para o material escolhido, define-se uma área A, que deve ser de dimensões compatíveis para a colagem dos extensômetros utilizados.

Foi construída uma célula de carga com capacidade nominal de 500 kN (21), em tração, com quatro extensômetros do tipo KFC-2-D2-11, marca Kyowa, de $K=2,10$ e $R=120 \Omega$. O material usado foi aço VC-130, com tensão de escoamento de 780 MPa e módulo de elasticidade de 207 GPa; diâmetro de 52 mm e com coeficiente de segurança de 3,4, apresentando um sinal de saída de 1,42 mV/V e uma sensibilidade intrínseca de 1137 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Os extensômetros foram colados longe das extremidades, sendo dois longitudinalmente, com o n_j individual

igual a 1, em módulo, e dois transversalmente ao eixo, com o n_j individual igual a 0,3, em módulo, fornecendo um somatório dos fatores geométricos, em módulo, de 2,6.

Aplicando-se a equação 5.12, obtém-se um sinal de saída nominal de 1,55 mV/V, que é 9,2% maior que o experimental.

Nas figuras 7.2.3, 7.2.4 e 7.2.5 apresentam-se as etapas de montagem desta célula, a execução de sua calibração e a realização do ensaio de empuxo desenvolvido por um rebocador, respectivamente. O erro combinado desta célula foi de 0,4%.



Figura 7.2.3 - Aspecto da montagem da célula de carga de 500 kN, realizada no Estaleiro Só S.A., em Porto Alegre.



Figura 7.2.4 - Aspecto da realização do ensaio para calibração da célula de carga de 500 kN, usando-se massas conhecidas e suspensas por um guindaste. Uma dificuldade extra deste ensaio foi a existência de interferências eletromagnéticas provocadas por diversas estações radiotransmissoras próximas ao guindaste, que funcionava como uma antena, exigindo assim o uso de filtros de RF no condicionador de sinais.



Figura 7.2.5 - Vista da realização do ensaio de empuxo do rebocador Itu.

7.3 CÉLULA DE CARGA TIPO "S" COM FURO RETANGULAR

É uma célula de carga de tipo flexional, conforme figura 7.3.1, podendo operar tanto em tração ou em compressão. Os extensômetros podem estar posicionados interna ou externamente ao furo retangular, sobre a barra de espessura h , e o mais afastado possível do eixo de simetria formado pela linha de ação da força F . O sinal das deformações sobre as barras é alternado em função do lado da barra e em relação ao eixo de simetria da linha de ação da força F .

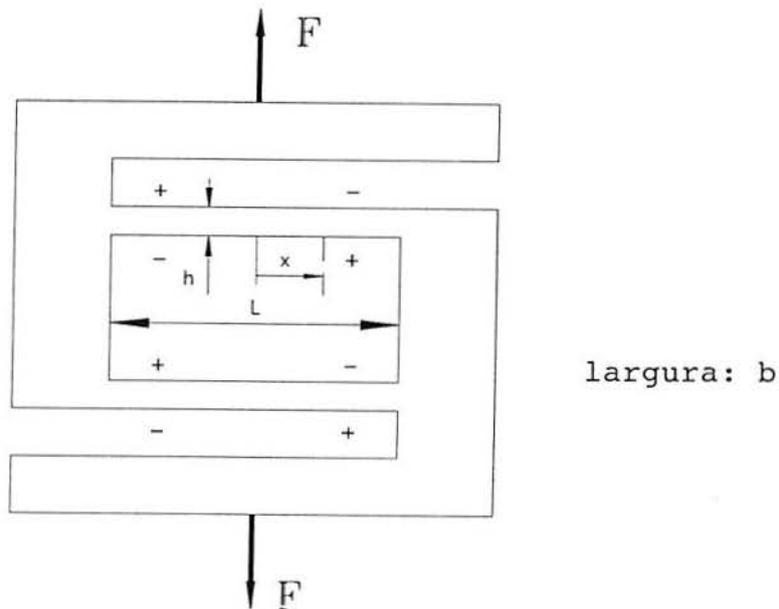


Figura 7.3.1 - Célula de carga tipo "S" com furo retangular, submetida a uma força F que provoca deformações (+, -), sobre a superfície da barra, de espessura h , onde são colados os extensômetros.

A deformação ϵ_j , na direção x , sobre a barra é:

$$\epsilon_j = \frac{3 F x}{E b h^2} \quad (7.3.1)$$

A tensão máxima σ_o na barra é:

$$\sigma_o = \frac{3}{2} \frac{F_N L}{b h^2} \quad (7.3.2)$$

A função de transferência mecânica ϵ_j é dada pela divisão da deformação da equação 7.3.1 pela deformação provocada pela tensão expressa na equação 7.3.2.

$$\epsilon_j = \epsilon_N \frac{2 x}{L} \frac{F}{F_N} \quad (7.3.3)$$

Na figura 7.3.2 está representado o comportamento de n_j para a face superior da barra superior da célula de carga.

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{3}{2} \frac{1}{E} \frac{L F_N}{b h^2} \quad (7.3.4)$$

Arbitrando-se uma força F_N , deve-se achar uma relação de L , b e h de forma que h seja maior ou igual a 1 mm e menor que $L/4$; b maior que 4 mm.

Foi construído um protótipo com as seguintes características:

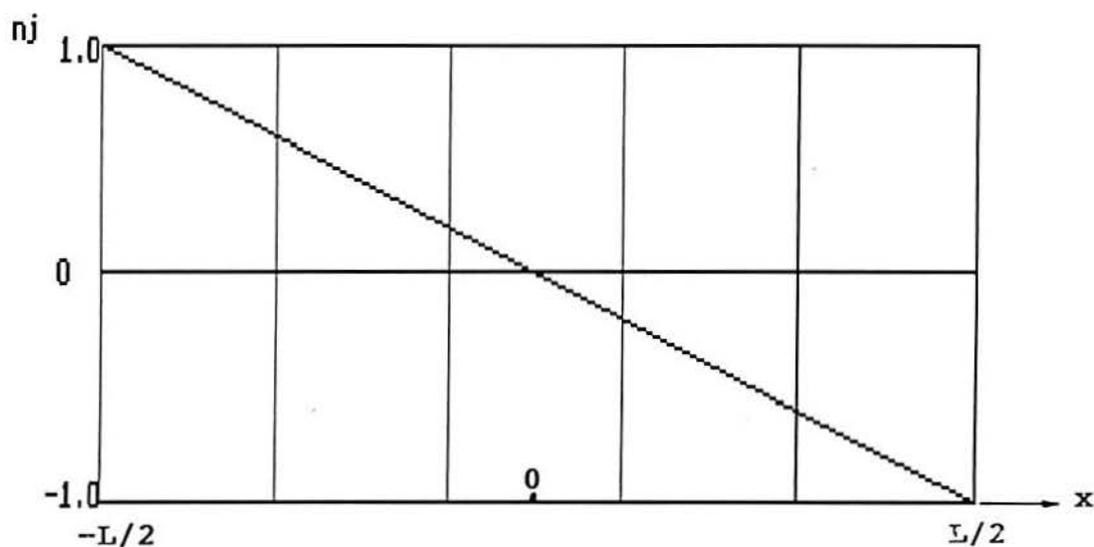


Figura 7.3.2 - Comportamento de n_j na face superior das barras da figura 7.3.1.

Capacidade: 1000 N

Sinal de saída nominal: 1,09 mV/V

Material: aço SAE 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Extensômetros com $K=2,10$; $R=120 \Omega$ e grade de 2 mm (KFC-2-C1-11, da Kyowa)

Coeficiente de segurança: 4,0

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 2,2 (centro da grade de cada extensômetro em relação ao engaste mais próximo: 8,1; 8,5; 8,4 e 8,0, respectivamente)

Sensibilidade intrínseca: 966 $\mu\text{m/m}$

$L = 30 \text{ mm}$

$b = 25 \text{ mm}$

$h = 3 \text{ mm}$

Usando a equação 5.12, acha-se um sinal de saída nominal de 1,11 mV/V, que é 1,8% maior que o experimental.

Esta célula de carga foi construída para ensaios de couros, sendo mostrados na figura 7.3.3 a sua calibração em tração, com um erro combinado de 0,4% e, na figura 7.3.4, a realização do ensaio de tração de couros.



Figura 7.3.3 - Realização do ensaio de calibração da célula tipo "S", com furo retangular de 1000 N de capacidade, através do uso de massas de 10 kg.



Figura 7.3.4 - Execução do ensaio de tração em couros, na Golden Export S.A., em Novo Hamburgo.

7.4 CÉLULA DE CARGA TIPO "S" COM FURO CIRCULAR

É uma célula de carga (18) do tipo flexional, vista na figura 7.4.1, semelhante ao tipo "S" com furo retangular, e que pode apresentar uma capacidade de carga superior para um mesmo b , h e com $2R$ igual à dimensão L da célula com furo retangular. Os extensômetros, de grade unidirecional, podem ser colados internamente ao furo ou na parte plana da barra de secção variável, externamente ao furo. Os extensômetros internos ao furo circular são posicionados com a direção da grade orientada tangencialmente ao furo, e se colocados externamente, a direção da grade é a mesma da barra de secção variável, perpendicular a linha de ação de F .

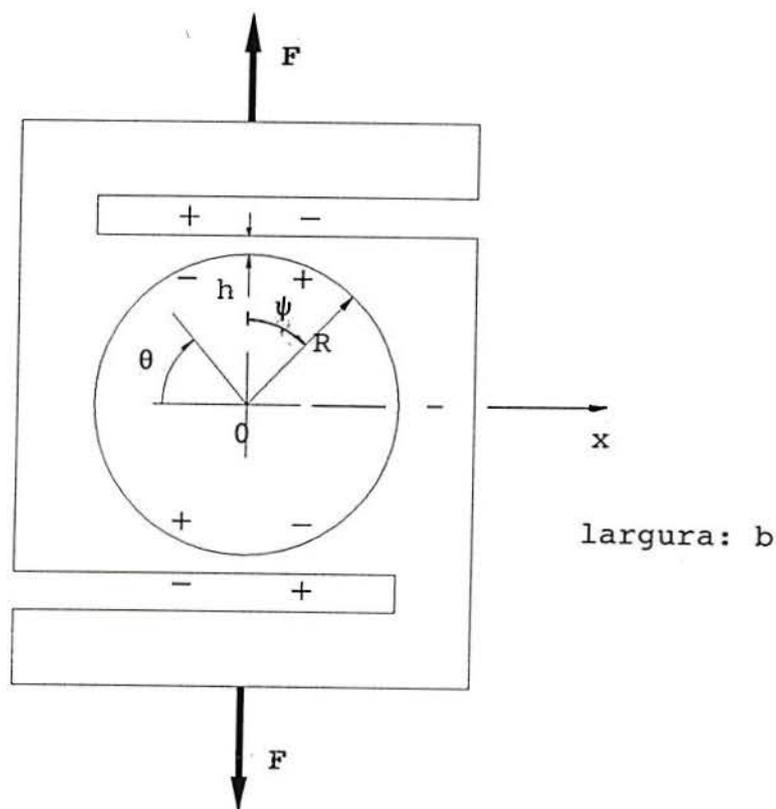


Figura 7.4.1 - Célula de carga tipo "S", com furo circular, sob a ação de uma força F que provoca deformações relativas de tração (+) ou de compressão (-), nas posições possíveis de colagem dos extensômetros.

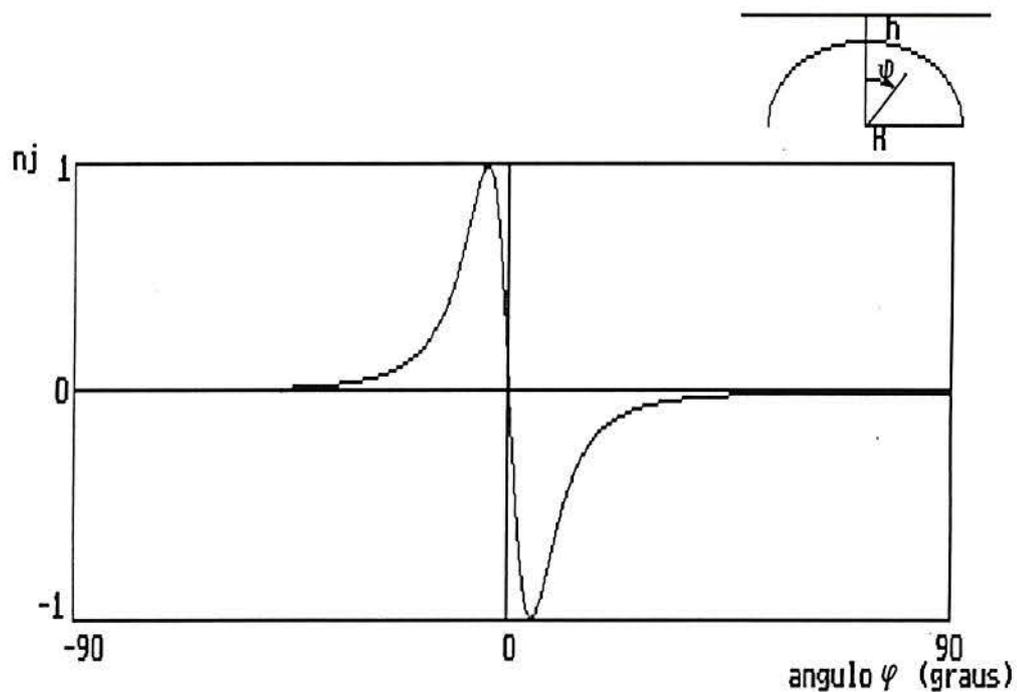


Figura 7.4.2 - Comportamento de n_j na face superior das barras de secção variável da figura 7.4.1, para uma relação de $R/h=100$.

A deformação sobre a barra de secção variável, na direção x , é (18):

$$\epsilon_j = \frac{3 F R \cos\theta}{E b (R (1-\sin\theta) + h)^2} \quad (7.4.1)$$

A máxima tensão σ_o atuante na barra de secção variável é:

$$\sigma_o = \frac{3 F R \cos\theta_{\max}}{b (R (1 - \sin\theta_{\max}) + h)^2} \quad (7.4.2)$$

onde θ_{\max} é o ângulo em que ocorre a máxima deformação e pode ser calculado, usando a equação 7.4.1, procurando o ângulo correspondente a máxima deformação, que depende da relação entre R e h. Este valor de θ_{\max} é válido para o quadrante entre $\theta=0^\circ$ a 90° , e nos outros quadrantes é obtido por simetria.

A função de transferência mecânica ϵ_j é obtida dividindo-se a deformação expressa pela equação 7.4.1 pela deformação devida à tensão expressa na equação 7.4.2. Não há uma expressão geral, pois θ_{\max} é função de cada relação particular entre R e h.

Na figura 7.4.2 apresenta-se o comportamento do fator geométrico para $R/h=100$, e na figura 7.4.3, para $R/h=10$. Observa-se que quanto maior for a relação R/h o fator geométrico fica igual a 1 para um ângulo ϕ menor, e apresenta um pico mais acentuado. O ângulo ϕ corresponde ao ângulo θ somado com 90° .

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{3 F_N R \cos\theta_{\max}}{E b (R (1 - \sin\theta_{\max}) + h)^2} \quad (7.4.3)$$

sendo necessário calcular θ_{\max} para a sua utilização. O valor de b deve ser maior que 4 mm; $R/h > 2$, e h maior ou igual a 1 mm.

Foram construídos dois protótipos descritos a seguir:

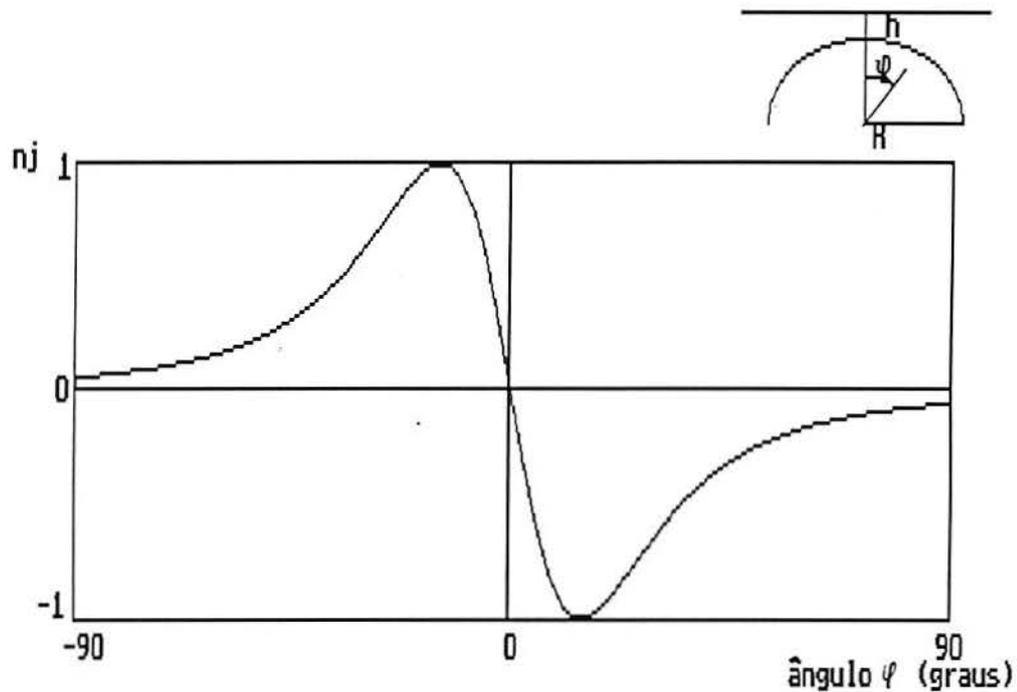


Figura 7.4.3 - Comportamento de n_j na face superior das barras de secção variável da figura 7.4.1, para uma relação $R/h=10$.

A) PROTÓTIPO N° 1

Capacidade: 5500 N

Material: Aço SAE 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Coefficiente de segurança: 3,0

Sensibilidade intrínseca: 1287 $\mu\text{m/m}$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,92 (centro da grade dos extensômetros posicionados nos seguintes ângulos φ : -20° , $+20^\circ$, -160° e $+160^\circ$).

$$R = 12,5 \text{ mm}$$

$$h = 2,5 \text{ mm}$$

$$b = 25 \text{ mm}$$

Extensômetros com $K=2,07$ (grade de 2 mm, tipo KFC-2-C1-11, da Kyowa), colados internamente ao furo.

Sinal de saída nominal: 2,80 mV/V

$$\theta_{\max} = 70^\circ$$

A figura 7.4.4 apresenta o comportamento do n_j para esta relação de R/h , e mostra, em escala, o posicionamento de um extensômetro em um pico de deformação. O valor de n_j para este extensômetro é praticamente igual a 1. Pode-se notar que n_j depende do correto posicionamento do extensômetro no pico de deformação e do comprimento da grade deste, e seu valor máximo em módulo é 1.

Usando a equação 5.12, acha-se um sinal de saída nominal de 2,60 mV/V, que é 7,2% menor que o experimental. A figura 7.4.5 mostra este protótipo.

B) PROTÓTIPO Nº 2

Capacidade: 1100 N

Material: alumínio

Tensão de escoamento: 150 MPa

Módulo de elasticidade: 70 GPa

Coefficiente de segurança: 2,5

Sinal de saída nominal: 1,13 mV/V

$$R = 8 \text{ mm}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$

$$b = 25,4 \text{ mm}$$

Extensômetros com $K=2,07$ e grade de 2 mm, e colados externamente ao furo, tipo KFC-2-C1-23, da Kyowa.

$$\theta_{\max} = 68^\circ$$

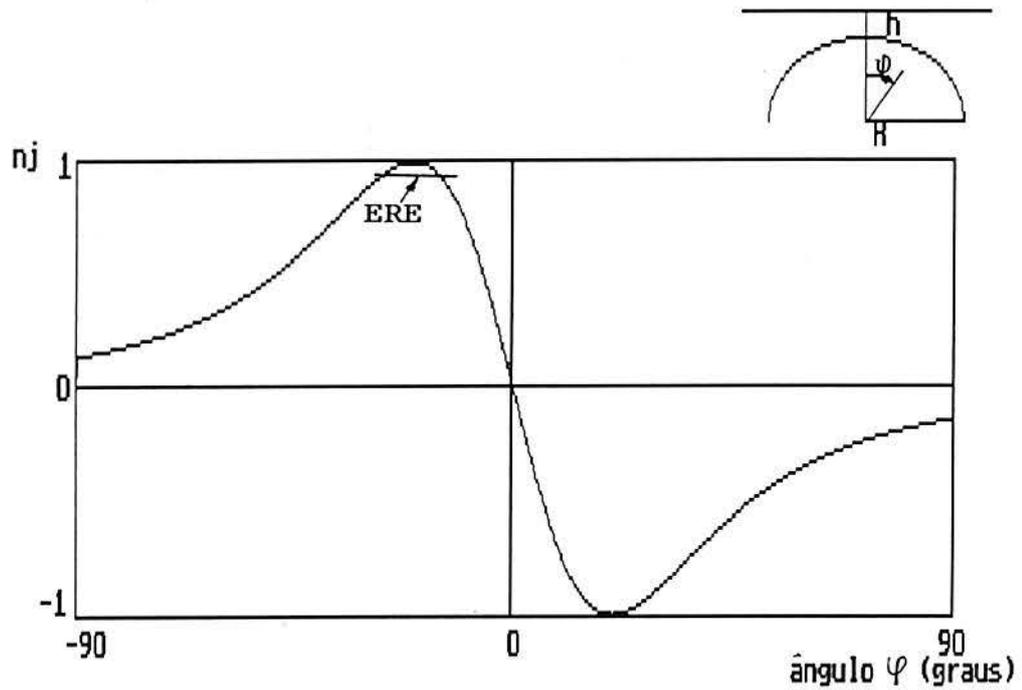


Figura 7.4.4 - Comportamento de n_j para $R/h=5$, referente ao protótipo de 5500 N.



Figura 7.4.5 - Célula de carga tipo "S", com furo circular, de 5500 N de capacidade. Os extensômetros estão colados internamente ao furo circular, o qual foi posteriormente preenchido com silicone visando a proteção mecânica da fiação.

Sensibilidade intrínseca: 834 $\mu\text{m}/\text{m}$

Na figura 7.4.6 está representado o comportamento do fator geométrico para a relação $R/h=4$.

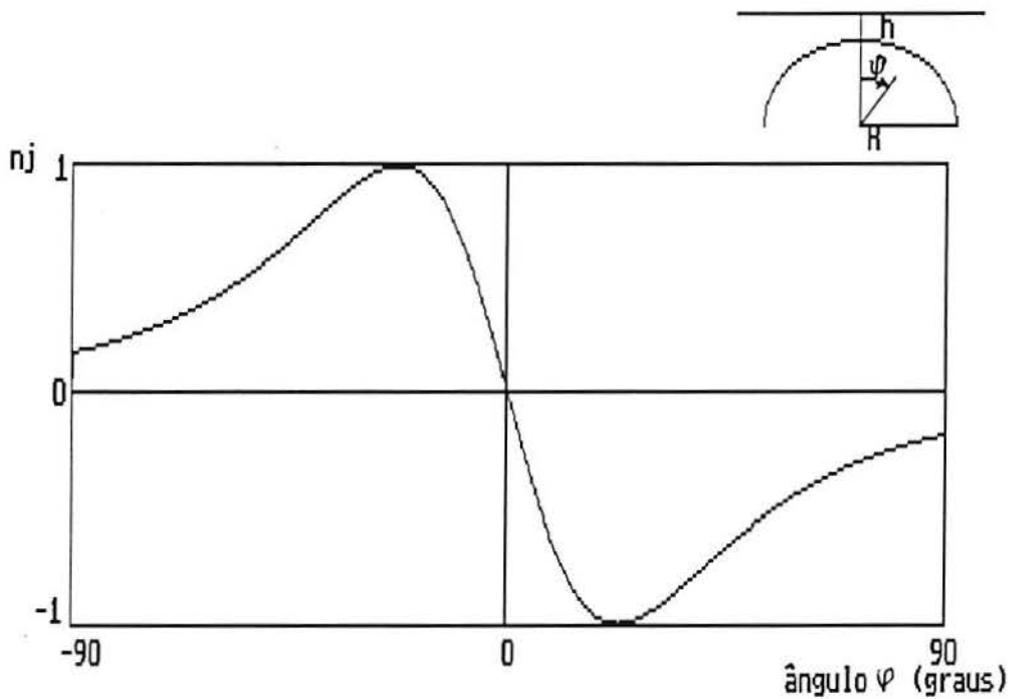


Figura 7.4.6 - Comportamento de n_j para $R/h=4$, referente ao protótipo de 1100 N ($n_j=1$ em $\varphi=22^\circ$ e $\varphi=-22^\circ$).

Os fatores geométricos médios para cada extensômetro, obtidos graficamente da figura 7.4.6, são:

- extensômetro 1: -0,62 para $\varphi= 9^\circ$
- extensômetro 2: 0,26 para $\varphi= -5,7^\circ$
- extensômetro 3: -0,64 para $\varphi= -178,7^\circ$
- extensômetro 4: 0,82 para $\varphi= 176,6^\circ$

onde o ângulo φ refere-se ao centro da grade do extensômetro considerado. O somatório em módulo dos fatores geométricos é 2,34, quando poderia ser superior a 3, observando-se assim que eles poderiam ser melhor posicionados.

Usando-se a equação 5.12, obtém-se 1,01 mV/V para o sinal de saída nominal, que é 10,6% menor que o experimental.

As células de carga tipo S, com furo circular, apresentam o n_j igual a 1 em uma posição bem definida, sendo aconselhável o uso de extensômetros com pequeno comprimento de grade e de maior largura de grade.

7.5 CÉLULA DE CARGA TIPO ANEL APOIADO LATERALMENTE

Este tipo de célula de carga (9,10) é do tipo flexional, combinada com a do tipo axial pois também ocorrem deformações devidas à compressão da força F aplicada. Nesta análise será considerado apenas o comportamento flexional da célula, representada na figura 7.5.1, onde os números 1, 2, 3 e 4 indicam os locais de colagem dos extensômetros dos protótipos construídos. Os extensômetros estão posicionados internamente e com a direção de sua grade tangencial à superfície interna do furo circular do anel.

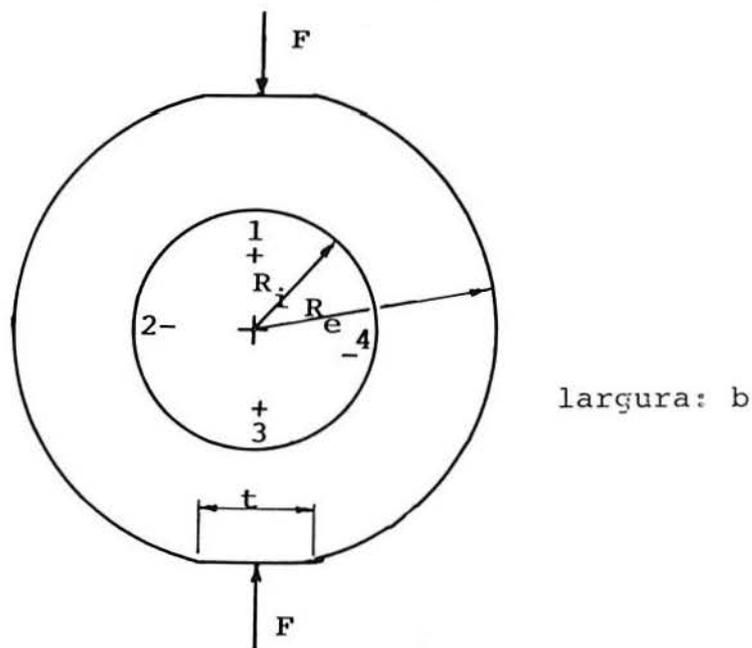


Figura 7.5.1 - Anel apoiado lateralmente, com chanfro de largura t , para a aplicação da força de compressão, sendo R_e o raio externo e R_i o raio interno, e os índices 1, 2, 3 e 4 indicam as posições dos extensômetros.

Pela sua forma construtiva, este tipo de célula de carga é recomendado apenas para a medida de força de compressão. É de fácil usinagem e apresenta na superfície externa dois chanfros diametralmente opostos que formam dois planos paralelos, para a aplicação da força.

Na figura 7.5.2 estão representados os parâmetros geométricos utilizados no desenvolvimento das equações para este tipo de célula.

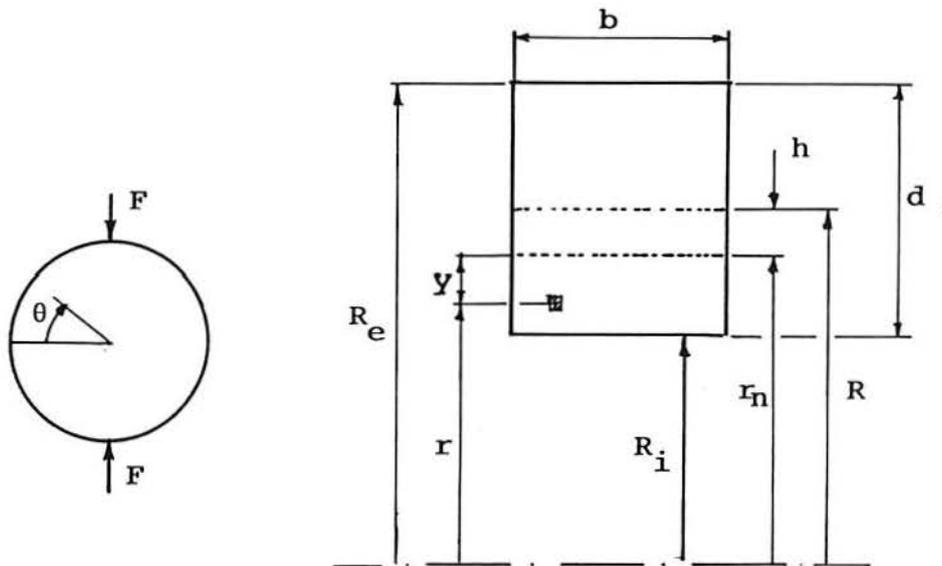


Figura 7.5.2 - Secção do anel, onde: R - raio médio; r_n - raio da linha neutra; r - raio considerado para o cálculo da tensão.

O momento atuante no anel, devido a ação da força F , é (28):

$$M_{(\theta)} = \frac{F r_n}{2} \left(\cos\theta - \frac{2}{\pi} \right) \quad (7.5.1)$$

As tensões devidas a este momento são:

$$\sigma_o = \frac{M_{(\theta)} y}{A h r} \quad (7.5.2)$$

onde

$$A = b \cdot d \quad ; \quad h = R - r_n \quad (7.5.3)$$

O valor de r_n é:

$$r_n = \frac{d}{\ln \frac{\left(\frac{2R}{d}\right)+1}{\left(\frac{2R}{d}\right)-1}} \quad (7.5.4)$$

Os valores da tensão e da deformação são, de agora em diante, em $r = R_i$, que é onde os extensômetros são colados. Assim a deformação relativa ϵ_j em função de θ , no sentido tangencial no interior do anel, é dada por:

$$\epsilon_j(\theta) = \frac{1}{E} \frac{M_{(\theta)} (r_n - R_i)}{A h R_i} \quad (7.5.5)$$

A máxima tensão atuante σ_o ($\theta = 90^\circ$ e $\theta = 270^\circ$), é:

$$\sigma_o = \frac{M_{(\theta=90^\circ)} (r_n - R_i)}{A h R_i} \quad (7.5.6)$$

A relação entre as deformações relativas dadas pela equação 7.5.5, e pela máxima deformação produzida pela equação 7.5.6, fornece os valores de n_j para a superfície interna do furo circular do anel, sendo seu valor independente da relação entre R_e e R_i . Na figura 7.5.3 está representado o comportamento do fator geométrico n_j na face interna do anel.

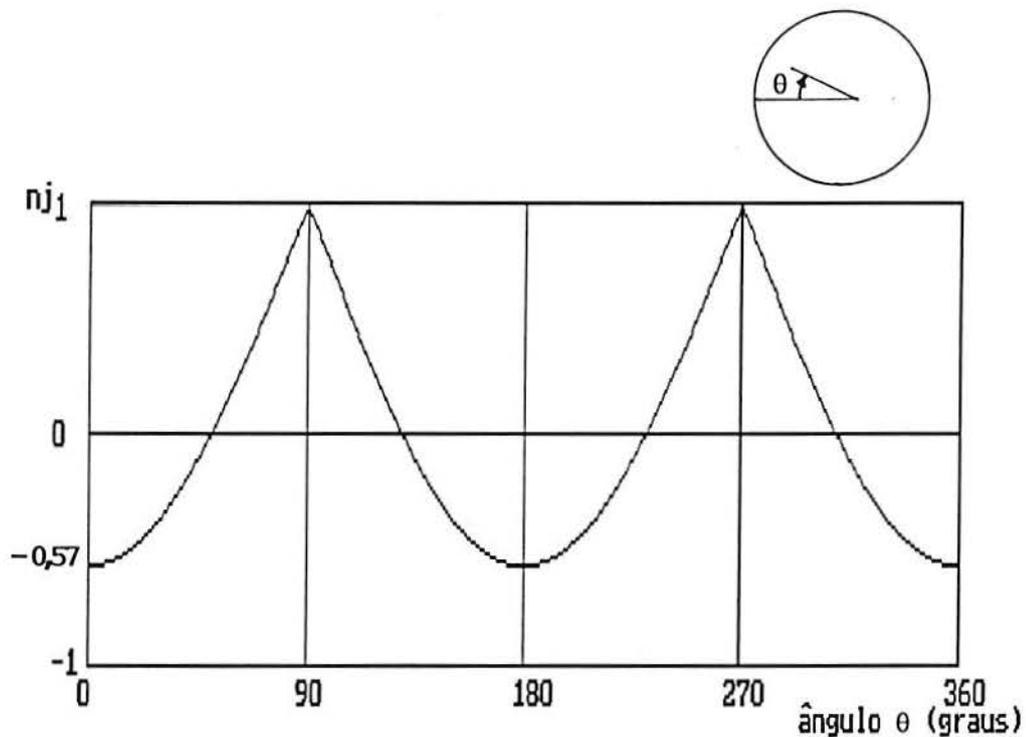


Figura 7.5.3 - Comportamento de n_j na superfície interna do furo do anel da figura 7.5.1.

Na figura 7.5.4 está representado o comportamento do fator geométrico entre 0° e 90° . Este gráfico é útil para a determinação do n_j médio de um extensômetro colado internamente, determinando um setor, pelo começo e fim da grade do extensômetro.

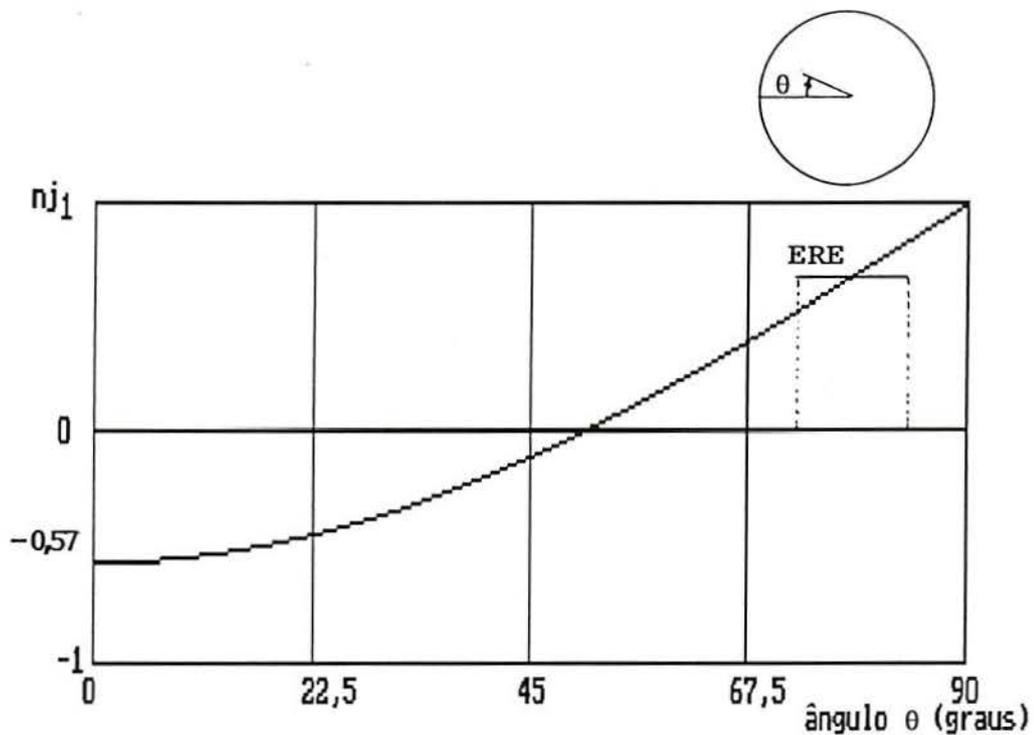


Figura 7.5.4 - Gráfico ampliado de n_j para determinar o n_j médio de um extensômetro. As deformações são simétricas nos outros quadrantes.

O comprimento t do chanfro, da figura 7.5.1, é dado pela seguinte expressão (10), e válido para t menor que d :

$$t = \frac{F \, sg}{L \, \sigma_e} \quad (7.5.7)$$

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{1}{E} \frac{M_{(\theta=90^\circ)} (r_n - R_i)}{A \, h \, R_i} \quad (7.5.8)$$

Foram construídos seis protótipos, descritos a seguir, todos com quatro extensômetros posicionados de acordo com a figura 7.5.1.

A) PROTÓTIPO N°1

Capacidade: 400 kN

Material: SAE D6

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Sinal de saída nominal: 2,67 mV/V

Coefficiente de segurança: 2,0

Sensibilidade intrínseca: 1932 $\mu\text{m/m}$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,14

Extensômetros 3/120 LY 11, da HBM

K = 2,10 (estimado, extensômetro não documentado)

$R_i = 19 \text{ mm}$

$R_e = 57 \text{ mm}$

$d = 38 \text{ mm}$

$b = 70 \text{ mm}$

$R = 38 \text{ mm}$

Usando-se a equação 5.12, tem-se 3,18 mV/V para o sinal de saída nominal, que apresenta uma diferença de -16% em relação ao experimental.

Esta célula foi usada no teste de atuadores, conforme as figuras 7.5.5 e 7.5.6.



Figura 7.5.5 - Aspecto do posicionamento da célula de carga de 400 kN, usada para medida de força em atuadores. O fuso do atuador pressiona a parte superior da célula.

B) PROTÓTIPO Nº 2

Capacidade: 1 MN

Material: aço SAE 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa



Figura 7.5.6 - Vista superior da célula de carga da figura 7.5.5, posicionada para teste de atuadores, realizados nas Indústrias Micheletto S.A., em Canoas.

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Coefficiente de segurança: 2,6

Extensômetros KFD-2-C1-11, da Kyowa, com grade de 5 mm

$K = 2,10$

Sensibilidade intrínseca: 1486 $\mu\text{m}/\text{m}$

Sinal de saída nominal: 2,15 mV/V

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,14

$R_i = 18 \text{ mm}$

$R_e = 86 \text{ mm}$

$b = 110 \text{ mm}$

$d = 68 \text{ mm}$

$R = 51,68 \text{ mm}$

Usando-se a equação 5.12, tem-se 2,45 mV/V para o sinal de saída nominal, apresentando uma diferença de -12,2% em relação ao experimental.

Esta célula, vista na figura 7.5.7, também foi construída para teste de atuadores.

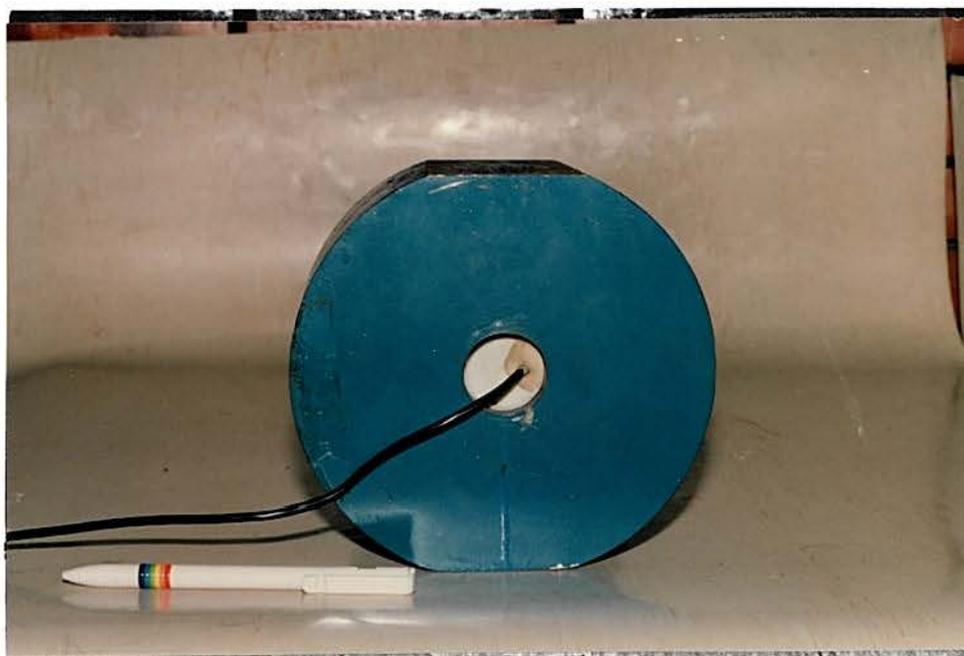


Figura 7.5.7 - Célula de carga de 1 MN, construída também para teste de atuadores.

C) PROTÓTIPO Nº 3

Capacidade: 4 kN

Material: Alumínio

Tensão de escoamento: 150 MPa

Módulo de elasticidade: 70 GPa

Sinal de saída nominal: 1,34 mV/V

Extensômetros KFC-5-C1-23, da Kyowa, com grade 5 mm

$K = 2,17$

Coeficiente de segurança: 2,5

Sensibilidade intrínseca: 854 $\mu\text{m}/\text{m}$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,14

$R_i = 15 \text{ mm}$

$R_e = 25 \text{ mm}$

$b = 30 \text{ mm}$

$d = 10 \text{ mm}$

Com a equação 5.12, tem-se 1,45 mV/V para o sinal de saída nominal, apresentando uma diferença de -7,5% em relação ao experimental. Na figura 7.5.8 tem-se o protótipo construído.

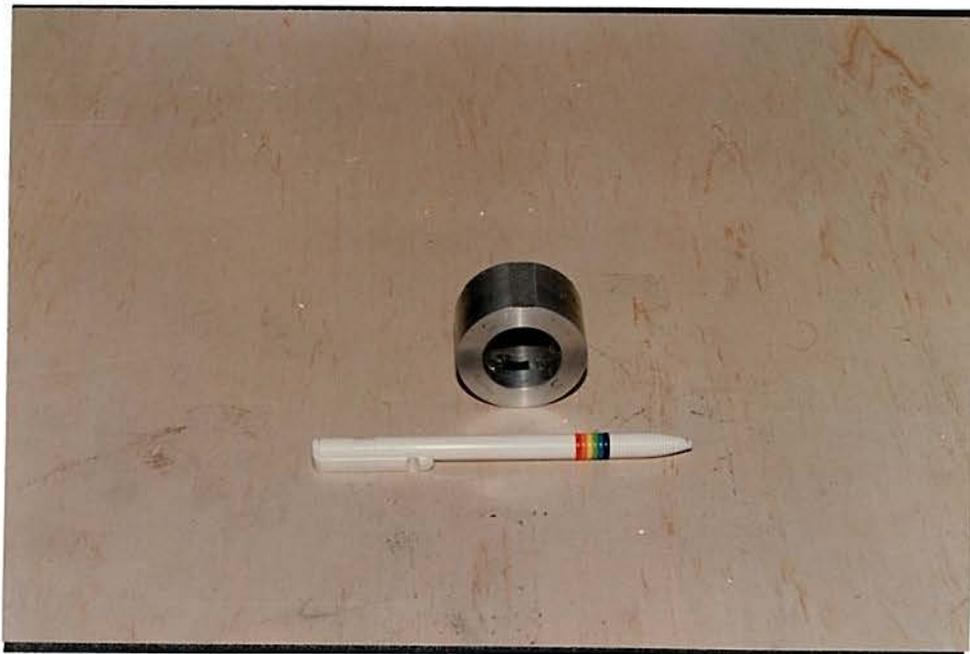


Figura 7.5.8 - Célula de carga de 4 kN, construída em alumínio.

D) PROTÓTIPO N° 4

Capacidade: 30 kN

Material: aço SAE 4340
Tensão de escoamento: 800 MPa
Módulo de elasticidade: 207 GPa
Sinal de saída nominal: 2,26 mV/V
Extensômetros KFC-5-C1-23, da Kyowa, com grade de 5 mm
 $K = 2,11$
Coeficiente de segurança: 3,0
Sensibilidade intrínseca: 1288 $\mu\text{m/m}$
Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,14
 $R_i = 15 \text{ mm}$
 $R_e = 28 \text{ mm}$
 $R = 22,5 \text{ mm}$
 $d = 13 \text{ mm}$
 $b = 34 \text{ mm}$

A equação 5.12 fornece um sinal de saída de 2,12, que representa uma diferença de 6,6% em relação ao experimental.

E) PROTÓTIPO N° 5

Capacidade: 100 kN
Material: Aço SAE 4340
Tensão de escoamento: 800 MPa
Módulo de elasticidade: 207 GPa
Sinal de saída nominal: 2,29 mV/V
Extensômetros KFC-2-C1-11, da Kyowa, com grade de 2 mm
 $K = 2,11$
Coeficiente de segurança: 2,9
Sensibilidade intrínseca: 1333 $\mu\text{m/m}$
Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,14
 $R_i = 15 \text{ mm}$
 $R_e = 38,5 \text{ mm}$
 $d = 23,5 \text{ mm}$
 $b = 46 \text{ mm}$
 $R = 26,75 \text{ mm}$

A equação 5.12 fornece um sinal de saída de 2,20 mV/V, que representa uma diferença de 4,1% em relação ao experimental.

G) PROTÓTIPO Nº 6

Capacidade: 400 kN

Material: aço SAE 4340

Tensão de escoamento: 750 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Sinal de saída nominal: 2,39 mV/V

Extensômetro 3/120 LY 11, da HBM

$K = 2,10$ (estimado)

Coefficiente de segurança: 2,3

Sensibilidade intrínseca: 1575 $\mu\text{m/m}$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,14

$R_i = 32,4$ mm

$R_e = 80,9$ mm

$b = 69,7$ mm

$d = 48,5$ mm

$R = 56,65$ mm

Usando-se a equação 5.12, chega-se a um sinal de saída nominal de 2,59 mV/V, que é -7,7% diferente em relação ao experimental.

7.6 CÉLULA DE CARGA TIPO PLACA CIRCULAR COM PINO CENTRAL

É uma célula de carga tipo flexional, representada na figura 7.6.1. A superfície do elemento elástico, devido à ação de uma força F , apresenta deformações radiais e tangenciais. Neste tipo de geometria é necessário a verificação do coeficiente de segurança à compressão e ao cisalhamento no pino.

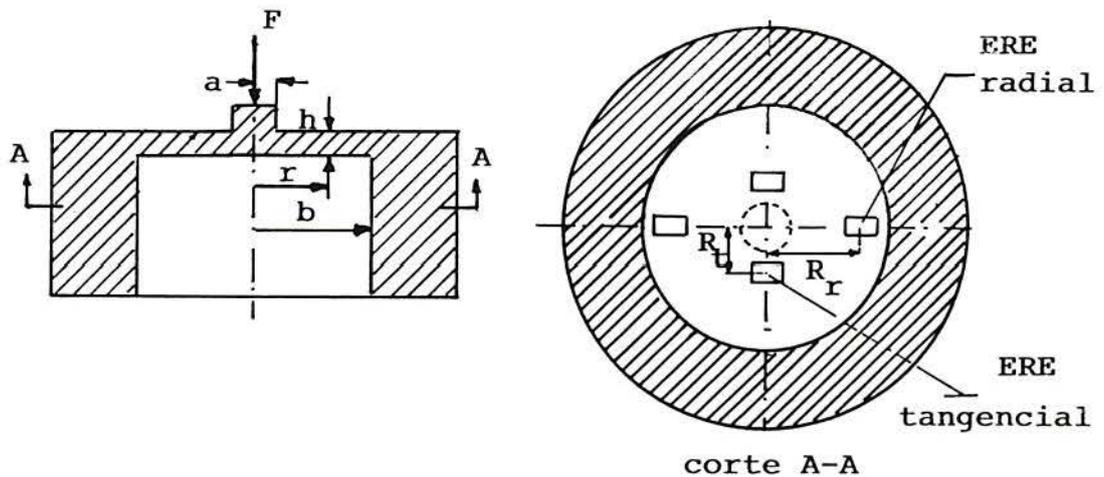


Figura 7.6.1 - Célula de carga tipo placa circular com pino central, e vista do posicionamento dos extensômetros sobre a placa.

O momento radial atuante M_r atuante na placa é (17):

$$M_r = \frac{F}{4 \pi} \frac{\left(\frac{a}{b}\right)^2 \left(\ln \frac{r}{a} + \nu \ln \frac{r}{a} + 1\right) + \left(\frac{a}{r}\right)^2 (1-\nu) \ln \frac{a}{b} + ((1+\nu) \ln \frac{b}{r}) - 1}{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (7.6.1)$$

e o momento tangencial é (17):

$$M_t = \frac{F}{4 \pi} \frac{\left(\frac{a}{b}\right)^2 \left(\ln \frac{r}{a} + \nu \ln \frac{r}{a} + \nu\right) + \left(\frac{a}{r}\right)^2 (1-\nu) \ln \frac{a}{b} + ((1+\nu) \ln \frac{b}{r}) - \nu}{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (7.6.2)$$

As tensões radiais atuantes na superfície da placa são:

$$\sigma_r = \frac{6 M_r}{h^2} \quad (7.6.3)$$

As tensões tangenciais são:

$$\sigma_t = \frac{6 M_t}{h^2} \quad (7.6.4)$$

As deformações radiais ϵ_r e tangenciais ϵ_t na superfície da placa são, respectivamente:

$$\epsilon_j(r) = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_t) \quad (7.6.5)$$

e.

$$\epsilon_j(t) = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r) \quad (7.6.6)$$

A máxima tensão atuante na placa, σ_o , é:

$$\sigma_o = \frac{6 M_{r(r=a)}}{h^2} \quad (7.6.7)$$

As funções de transferência mecânica para as orientações radial e tangencial, são obtidas dividindo as deformações das equações 7.6.5 e 7.6.6 pela deformação devida à tensão expressa pela equação 7.6.7.

O comportamento do fator geométrico n_j depende da relação a/b. Na figura 7.6.2 apresenta-se o seu comportamento para uma relação a/b=0,2, e na figura 7.6.3, para a/b=0,05.

Observa-se que, quanto menor for a relação a/b, os valores dos fatores geométricos radiais e tangenciais ficam maiores próximos ao pino.

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{1}{E} \frac{6 M_{r(r=a)} F_N}{h^2} \quad (7.6.8)$$

O deslocamento w_{\max} (17) no ponto de aplicação da carga deve ser muito menor que a espessura h da placa - no máximo 10% de h - para serem válidas as equações aqui relacionadas:

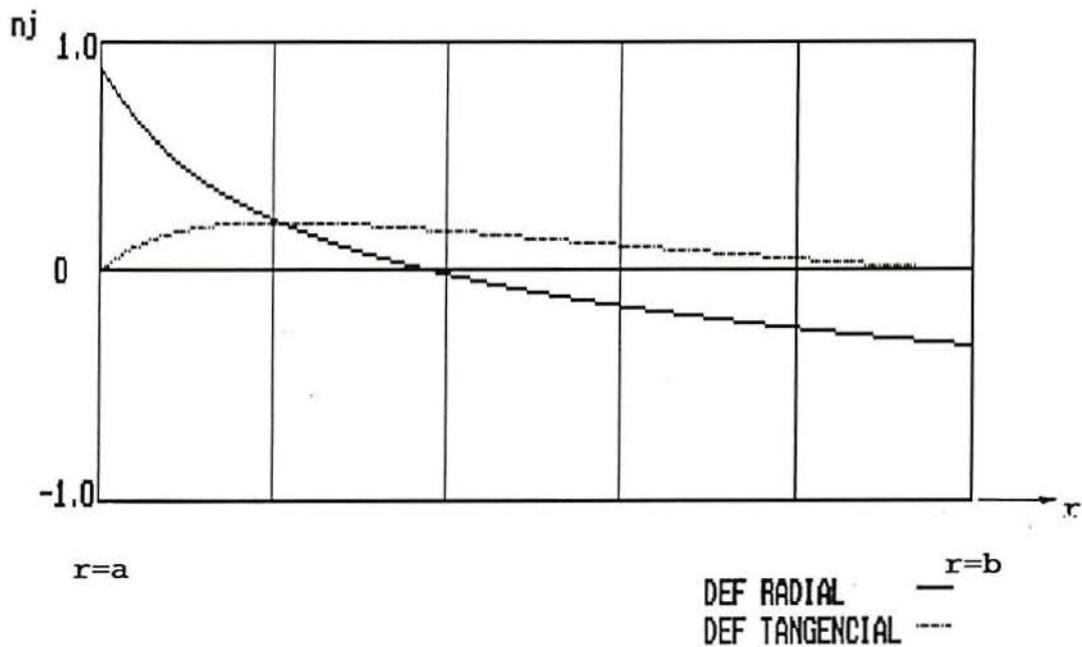


Figura 7.6.2 - Comportamento de n_j radial e tangencial, para uma relação $a/b=0,2$ de uma célula tipo placa circular com pino central.

$$w_{\max} = - \frac{F a^2}{4 \pi D} \frac{\frac{1}{4} (1 - (\frac{a}{b})^2 - (\frac{b}{a})^2) + (\ln \frac{a}{b})^2}{1 - (\frac{a}{b})^2} \quad (7.6.9)$$

onde D é a rigidez flexional, dada por:

$$D = \frac{E h^3}{12 (1 - \nu^2)} \quad (7.6.10)$$

Foram construídos três protótipos e, para cada um, apresenta-se o comportamento dos fatores geométricos radiais e

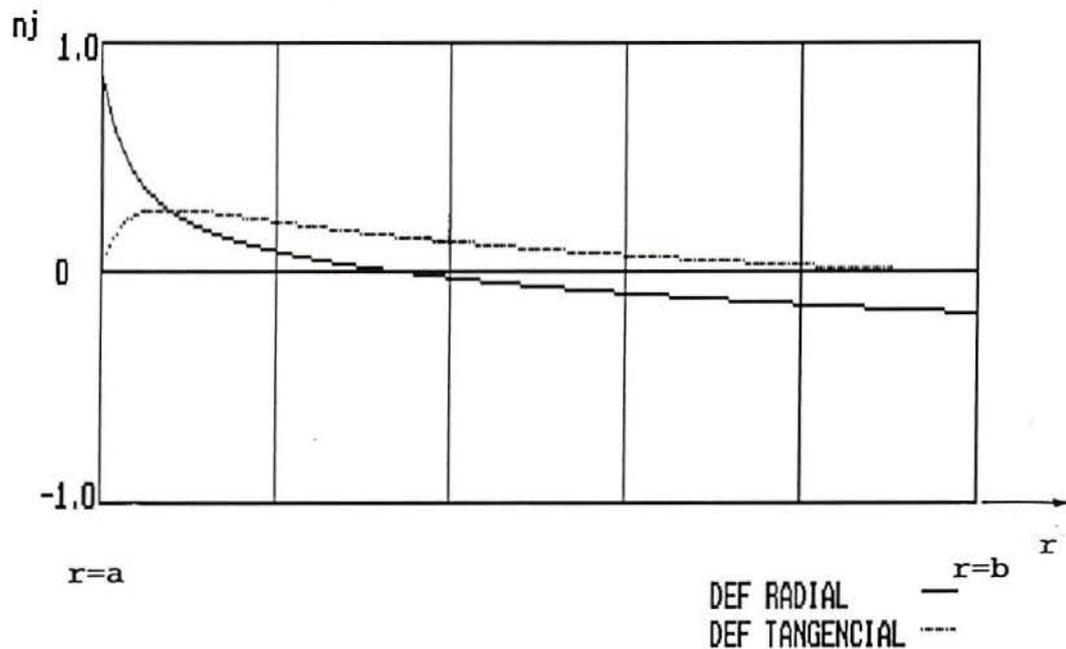


Figura 7.6.3 - Comportamento do n_j radial e tangencial para uma relação $a/b=0,05$ de uma célula de carga tipo placa circular com pino central.

tangenciais.

A) PROTÓTIPO Nº 1

Capacidade: 1000 N

Material: Aço SAE 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Sinal de saída nominal: 0,51 mV/V

$r_r = 11,5$ mm (corresponde a um n_j médio igual a $-0,15$)

$r_t = 5$ mm (corresponde a um n_j médio igual a $0,23$)

Somatório em módulo dos fatores geométricos médios: $0,76$

Coeficiente de segurança: 3,4

Extensômetros KFC-5-C1-11, da Kyowa, grade de 5mm

$K = 2,11$

$R = 120 \Omega$

Sensibilidade intrínseca: $1137 \mu\text{m/m}$

$a = 2 \text{ mm}$

$b = 17 \text{ mm}$

$h = 2,6 \text{ mm}$

Usando-se a equação 5.12, tem-se $0,46 \text{ mV/V}$ para o sinal de saída nominal, que representa uma diferença de $10,8\%$ em relação ao experimental. Na figura 7.6.7 apresenta-se esta célula, e na figura 7.6.4, o comportamento dos fatores geométricos.

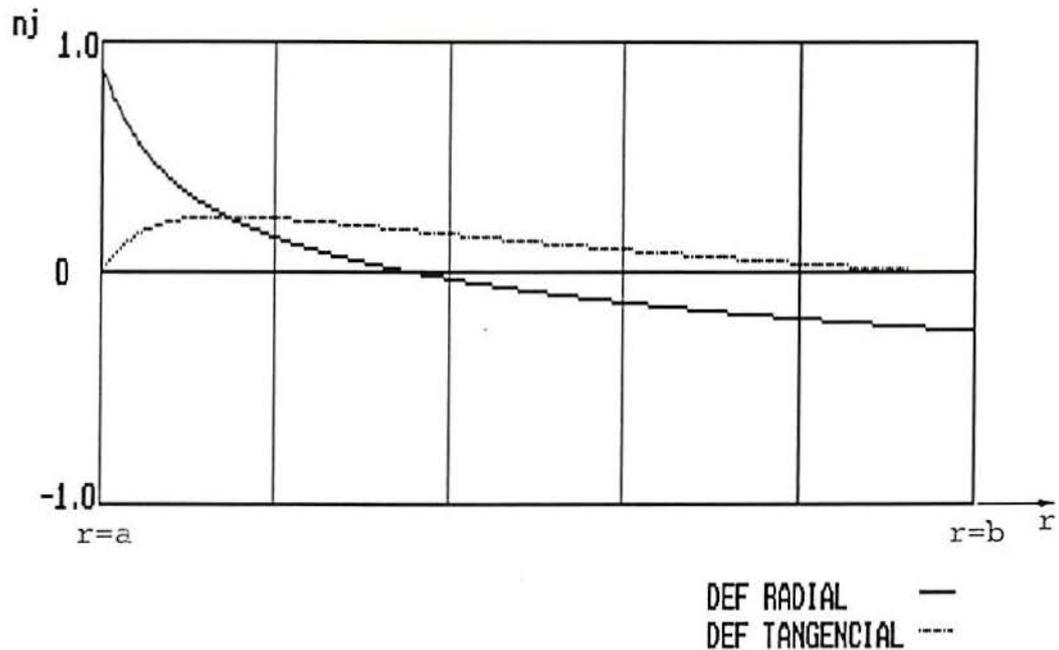


Figura 7.6.4 - Comportamento de n_j radial e tangencial para $a/b=(2/17)$ da célula de 1000 N.

B) PROTÓTIPO N° 2

Capacidade: 3000 N

Material: aço SAE 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Sinal de saída nominal: 0,49 mV/V

$r_r = 13$ mm (corresponde um n_j médio igual a -0,16)

$r_t = 6,5$ mm (corresponde um n_j médio igual a 0,22)

Somatório em módulo dos fatores geométricos médios: 0,76

Coefficiente de segurança: 3,4

Extensômetros tipo KFC-5-350-C1-11, da Kyowa, com grade de 5 mm

$K = 2,10$

$R = 350 \Omega$

Sensibilidade intrínseca: 1137 $\mu\text{m/m}$

$a = 3$ mm

$b = 20$ mm

$h = 4,2$ mm

Com a equação 5.12 encontra-se 0,45 mV/V para o sinal de saída nominal, que representa uma diferença de 8,8% em relação ao experimental. Na figura 7.6.7 mostra-se esta célula, e na figura 7.6.5, o comportamento de seus fatores geométricos.

C) PROTÓTIPO N° 3

Capacidade: 7848 N

Material: aço SAE 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Sinal de saída nominal: 0,36 mV/V

$r_r = 27$ mm (corresponde a um n_j médio de -0,28)

$r_t = 18$ mm (corresponde a um n_j médio de 0,21)

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 0,98

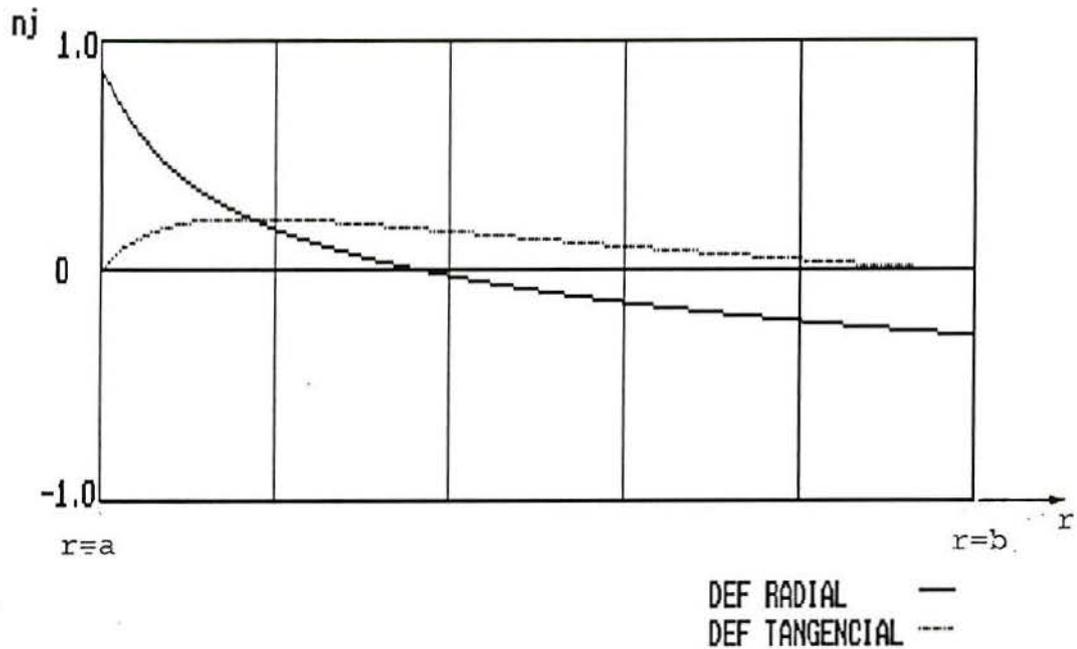


Figura 7.6.5 - Comportamento do n_j radial e tangencial para $a/b=(3/20)$, da célula de 3000 N.

Coeficiente de segurança: 5,6

Extensômetros KFD-5-C1-11, da Kyowa, com comprimento da grade de 5 mm

$K = 2,14$

$R = 120 \Omega$

Sensibilidade intrínseca: $690 \mu\text{m/m}$

$a = 12,5 \text{ mm}$

$b = 35 \text{ mm}$

$h = 6 \text{ mm}$

Usando-se a equação 5.12 encontra-se $0,36 \text{ mV/V}$ para o sinal de saída nominal, que é igual ao experimental.

Esta célula foi construída para a medição de força em ensaios de corrosão sob tensão, realizados pelo LAPEC, do

Departamento de Metalurgia da UFRGS. Na figura 7.6.6 estão representados o comportamento de seus fatores geométricos.

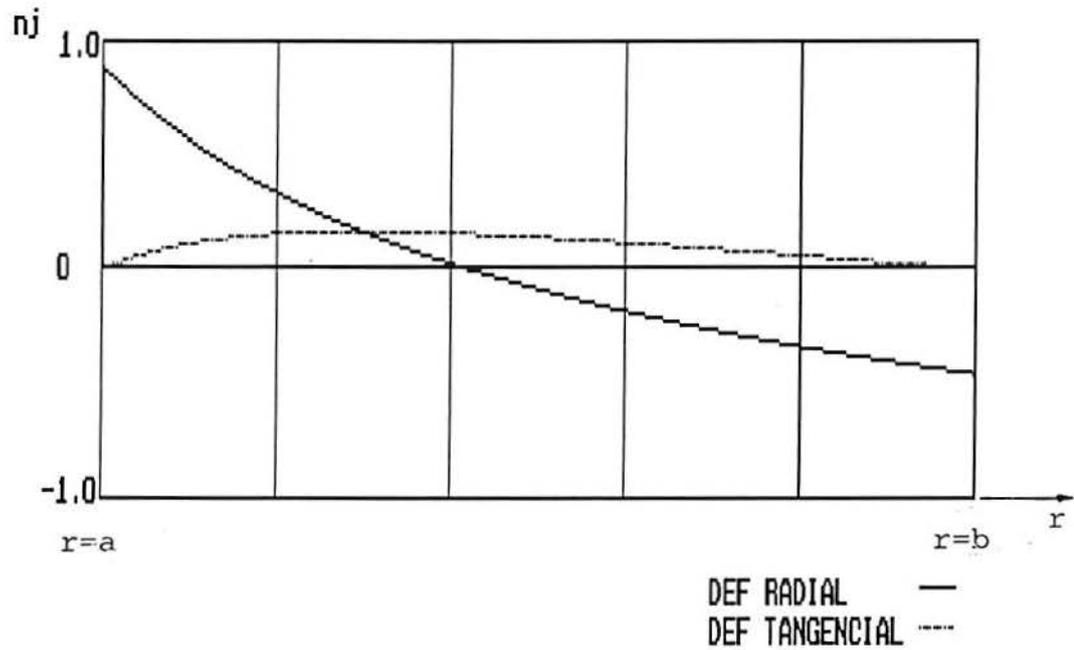


Figura 7.6.6 - Comportamento do n_j radial e tangencial para $a/b=(12,5/35)$, da célula de capacidade de 7848 N.

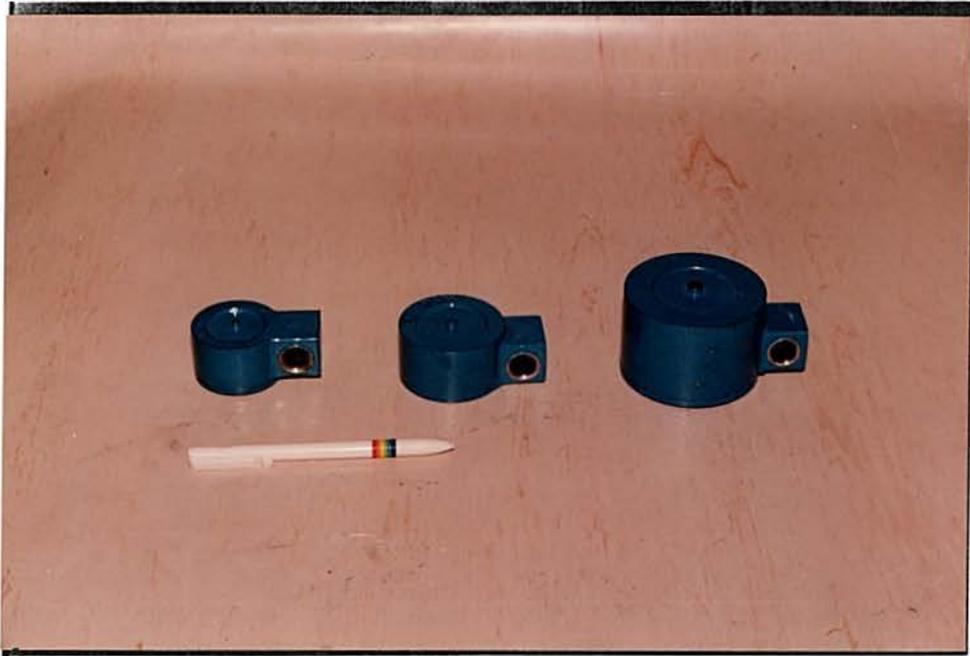


Figura 7.6.7 - Diversas células de carga tipo placa circular com pino central. A da esquerda refere-se à célula de 1000 N; a central, refere-se à célula de 3000 N, e à direita tem-se uma célula de 10000 N, não relacionada neste trabalho.

7.7 MANÔMETRO DE PLACA CIRCULAR

É um transdutor extensométrico do tipo flexional, cujo elemento elástico é uma placa de raio R e espessura h , esquematizada na figura 7.7.1. As deformações de interesse sobre a placa são a radial e a tangencial. Assim, tem-se dois fatores geométricos, um para cada direção de deformação considerada.

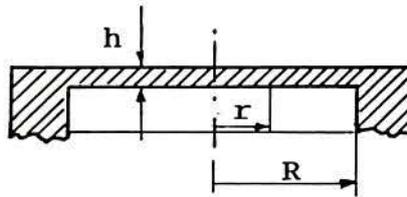


Figura 7.7.1 - Elemento elástico de um manômetro de placa circular sujeito a uma pressão interna P .

A deformação radial ϵ_r é dada por (22):

$$\epsilon_{jr}(r) = \frac{3 P (1-\nu^2)}{8 h^2 E} (R^2 - 3 r^2) \quad (7.7.1)$$

e a deformação tangencial ϵ_t por (22):

$$\epsilon_{jt}(r) = \frac{3 P (1-\nu^2)}{8 h^2 E} (R^2 - r^2) \quad (7.7.2)$$

A tensão máxima atuante na placa, σ_o , em $r=R$, é:

$$\sigma_o = \frac{3}{4} \frac{R^2}{h^2} P_N \quad (7.7.3)$$

Dividindo-se as deformações das equações 7.7.1 e 7.7.2 pela máxima deformação devida à equação 7.7.3, encontram-se as funções de transferência mecânica radial e tangencial, respectivamente:

$$\epsilon_{jL} = \epsilon_N \left(\frac{1}{2} (1 - \nu^2) \frac{R^2 - 3r^2}{R^2} \right) \frac{P}{P_N} \quad (7.7.4)$$

e

$$\epsilon_{jT} = \epsilon_N \left(\frac{1}{2} (1 - \nu^2) \frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) \frac{P}{P_N} \quad (7.7.5)$$

Na figura 7.7.2 estão representados o comportamento dos fatores geométricos radial e tangencial.

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{1}{E} \frac{3}{4} \frac{R^2}{h^2} P_N \quad (7.7.6)$$

O deslocamento y_{\max} no centro da placa (67) deve ser no máximo 10% da espessura h , e é expresso:

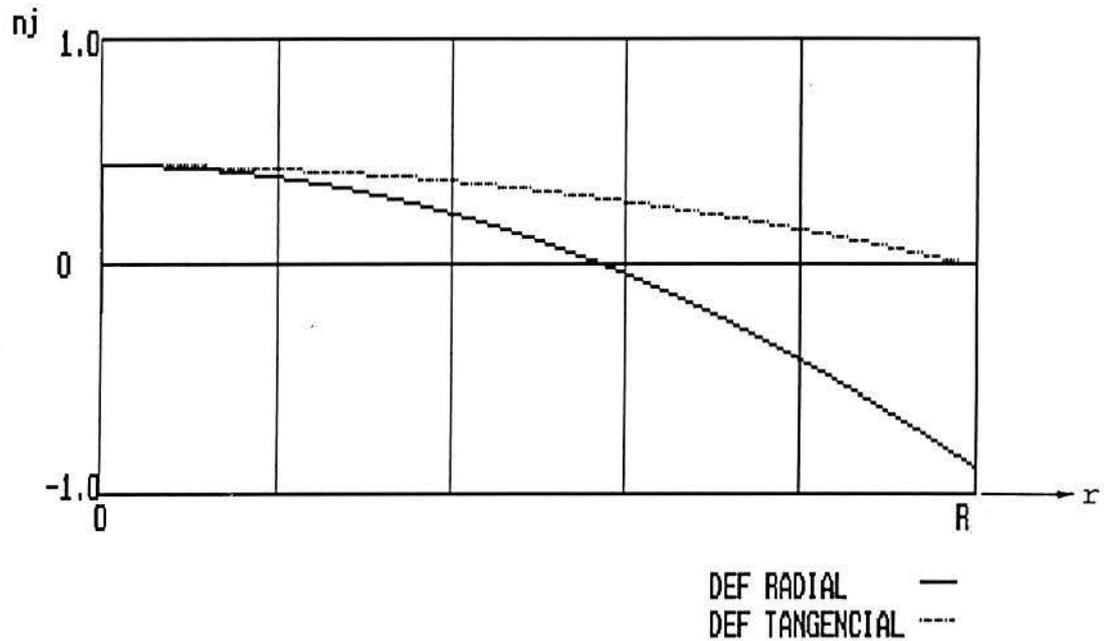


Figura 7.7.2 - Comportamento dos fatores geométricos n_j radiais e tangenciais sobre a superfície da placa circular do elemento elástico representado na figura 7.7.1.

$$y_{\max} = \frac{3 P_N (1 - \nu^2) R^4}{16 E h^3} \quad (7.7.7)$$

Os extensômetros usados em manômetros de placa podem ser de grade unidirecional, conforme a figura 3.1c, ou tipo diafragma, conforme a figura 3.1b.

Foi construído um protótipo com as seguintes características. Nota: r_r - é a distância do centro do manômetro até o centro da extensômetro radial e r_t - é a distância do centro manômetro até o centro da grade tangencial.

Capacidade: 0,5 MPa
Material: aço VC-131
Tensão de escoamento: 830 MPa
Módulo de elasticidade: 207 GPa
Sinal de saída nominal: 1,32 mV/V
Coeficiente de segurança: 3,3
Extensômetro tipo diafragma 25/120 MY 21, da HBM
K = 2,1 (estimado, pois em ERES tipo diafragma não é medido)
 $r_t = 3,1$ (corresponde um n_j médio de 0,43)
 $r_r = 11,1$ (corresponde um n_j médio de -0,54)
Somatório em módulo dos fatores geométricos: 1,94
Sensibilidade intrínseca: 1225 $\mu\text{m/m}$
h = 0,5 mm
R = 13 mm

Usando-se a equação 5.12, o sinal de saída nominal é 1,25 mV/V, que apresenta uma diferença de 5,6% em relação ao experimental. Na figura 7.7.3 mostra-se o protótipo construído, onde se vê o extensômetro tipo diafragma utilizado.

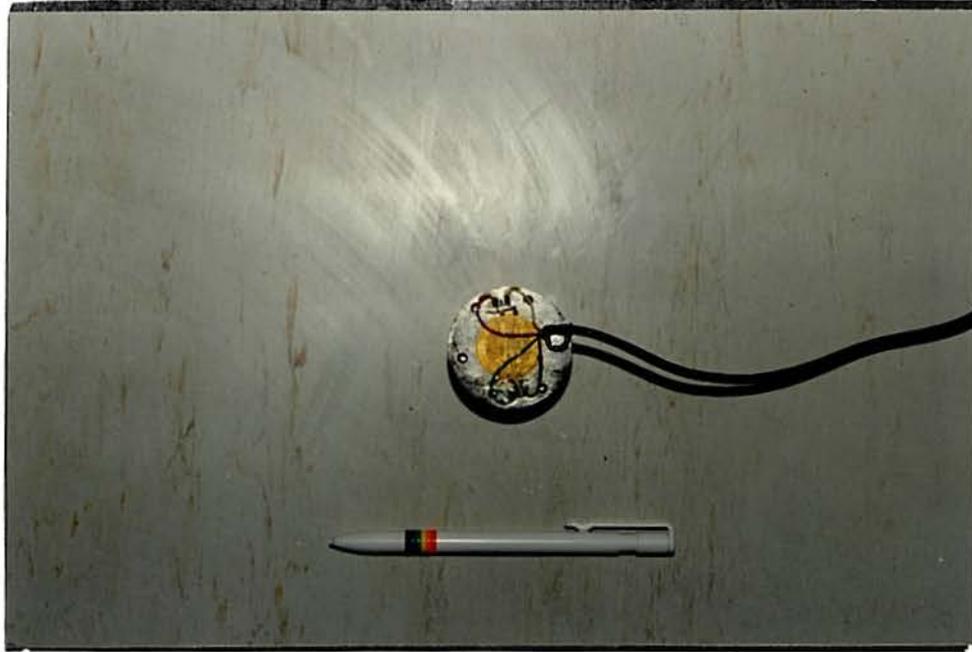


Figura 7.7.3 - Manômetro de 0,5 MPa, onde se nota o extensômetro tipo diafragma.

7.8 TORQUÍMETRO CRUCIFORME VAZADO

Este torquímetro, do tipo flexional, apresenta o elemento elástico composto de quatro barras prismáticas, com secção transversal retangular, arranjadas conforme esquematizado na figura 7.8.1, e submetidas à flexão, quando da aplicação do torque T . É uma geometria indicada para a medição de baixos torques.

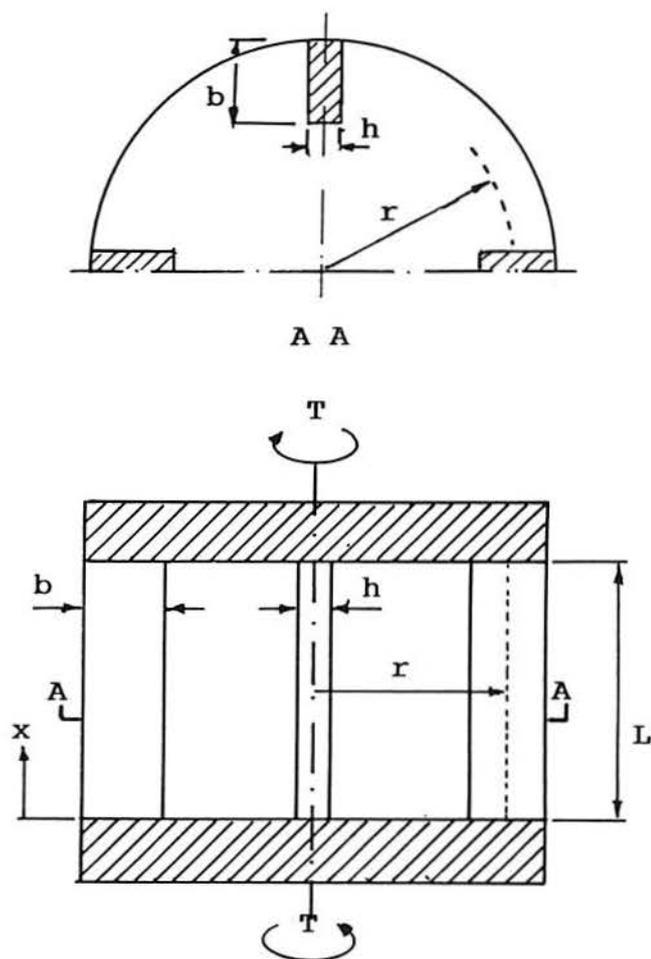


Figura 7.8.1 - Elemento elástico de um torquímetro cruciforme vazado, submetido a um torque T .

A deformação, na direção x de cada barra, é (57):

$$\epsilon_j(x) = \frac{3 T \left(\frac{L}{2} - x \right)}{2 E r b h^2} \quad (7.8.1)$$

A tensão máxima σ_o que atua na barra é:

$$\sigma_o = \frac{3}{2} \frac{T_N \left(\frac{L}{2} \right)}{r b h^2} \quad (7.8.2)$$

A função de transferência mecânica é encontrada dividindo-se a deformação da equação 7.8.1 pela deformação provocada pela tensão expressa pela equação 7.8.2. Assim:

$$\epsilon_j = \epsilon_N \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \frac{T}{T_N} \quad (7.8.3)$$

O comportamento do fator geométrico n_j sobre a superfície de uma barra está mostrado na figura 7.8.2.

Para o dimensionamento mecânico tem-se:

$$\epsilon_N = \frac{3}{2} \frac{1}{E} \frac{T_N \left(\frac{L}{2} \right)}{r b h^2} \quad (7.8.4)$$

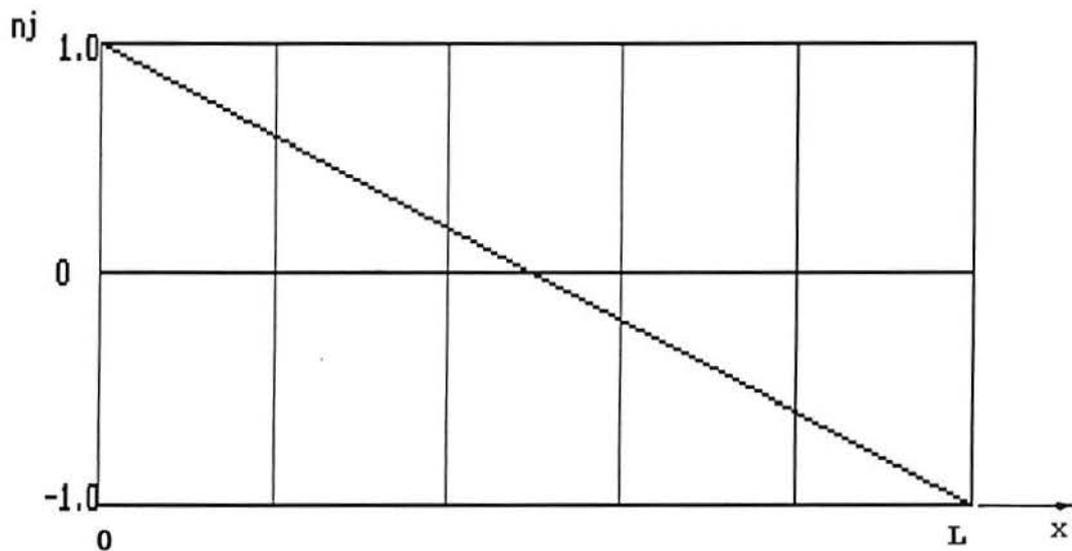


Figura 7.8.2 - Comportamento de n_j sobre uma barra do torquímetro cruciforme vazado da figura 7.8.1.

Foram construídos dois protótipos descritos a seguir.

A) PROTÓTIPO n° 1

Capacidade nominal: 10,59 Nm
 Coeficiente de segurança: 3,3
 Material: aço 4340
 Tensão de escoamento: 800 MPa
 Módulo de elasticidade: 207 GPa
 Sinal de saída nominal: 2,25 mV/V

Sensibilidade intrínseca: 1525 $\mu\text{m}/\text{m}$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,10

Extensômetros KFC-2-C1-11, da Kyowa, com grade 2 mm

Centro da grade de cada extensômetro em $x = 2,75$ mm em
média

$K = 2,07$

$r = 20,55$ mm

$h = 2,1$ mm

$b = 6,8$ mm

$L = 24,5$ mm

Com a equação 5.12, encontrou-se 2,44 mV/V para o sinal de saída nominal, que é 8,4% maior que o experimental. A figura 7.8.3 mostra o elemento elástico deste torquímetro, que é girante, sendo a excitação e o sinal de saída dos EREs obtidos por contato anéis/escovas.

B) PROTÓTIPO nº 2

Capacidade nominal: 8 Nm

Material: aço 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Coefficiente de segurança: 11,4

Sinal de saída nominal: 0,53 mV/V

Sensibilidade intrínseca: 339 $\mu\text{m}/\text{m}$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 3,0

8 extensômetros tipo KFD-2-C1-11, da Kyowa, formando braço com 240 Ω , com grade de 2 mm de comprimento, e posicionados com o centro de sua grade em $x = 5$ mm

$K = 2,10$

$R = 120$ Ω

$r = 40,45$ mm

$b = 16$ mm

$h = 2,3$ mm

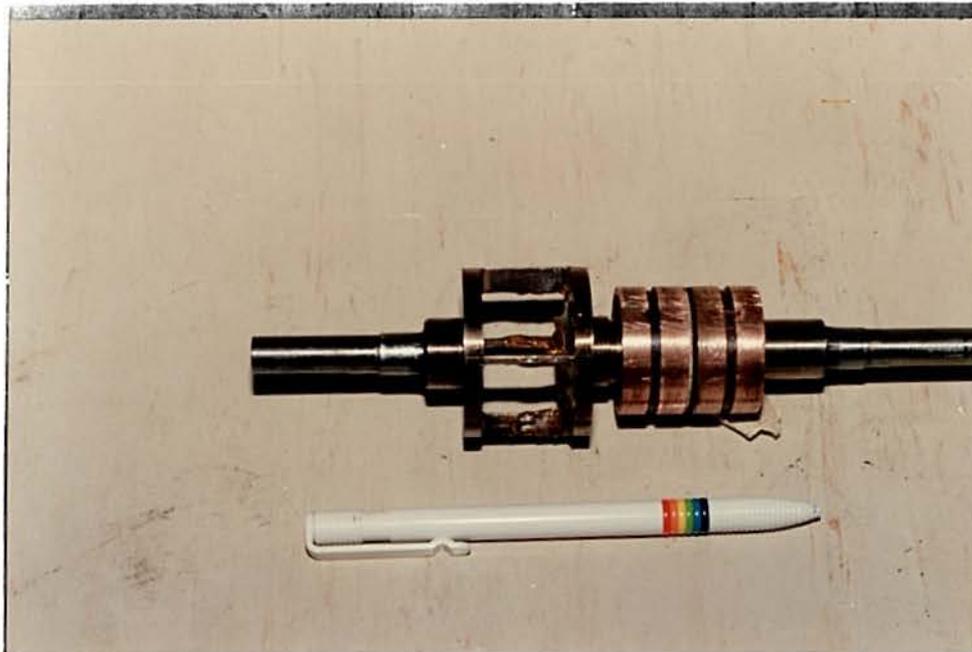


Figura 7.8.3 - Aspecto do elemento elástico do torquímetro cruciforme vazado de 10,59 Nm. Este torquímetro é girante, e a excitação e a obtenção do sinal de desbalanço da ponte de Wheatstone são feitos através dos quatro anéis de cobre, em contato com escovas.

$$L = 40 \text{ mm}$$

Usando-se a equação 5.12, encontra-se 0,53 mV/V para o sinal de saída nominal, que é igual ao obtido experimentalmente. Este torquímetro, construído para o controle de qualidade de juntas homocinéticas, é visto nas figuras 7.8.4 e 7.8.5.



Figura 7.8.4 - Aspecto do elemento elástico do torquímetro cruciforme vazado de 8 Nm, com oito extensômetros, sendo arranjados dois em cada braço da ponte de Wheatstone.



Figura 7.8.5 - Vista do torquímetro de 8 Nm usado no controle de qualidade, na montagem industrial da gaiola de esferas em juntas homocinéticas automotivas, na ATH Albarus S.A., em Porto Alegre.

7.9 TORQUÍMETRO COM EIXO CIRCULAR MACIÇO

As deformações na superfície deste elemento elástico são devidas ao cisalhamento. Na figura 7.9.1 está representado um elemento elástico elementar típico.

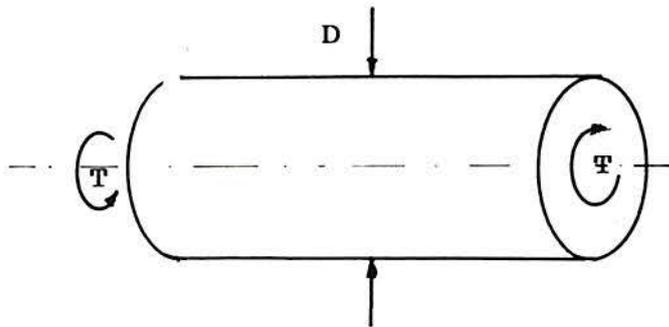


Figura 7.9.1 - Elemento elástico de um torquímetro de eixo circular maciço, sob a ação de um torque T .

As deformações normais de cisalhamento de interesse estão em direções a $\pm 45^\circ$ com o eixo axial, devendo serem estas as orientações da grade dos extensômetros colados no eixo, que pode ser de grade unidirecional ou espinha-de-peixe. As equações apresentadas a seguir são válidas para estas direções.

O valor da tensão de cisalhamento é (4):

$$\tau = \frac{16 T}{\pi D^3} \quad (7.9.1)$$

A deformação normal produzida por esta tensão de cisalhamento, a 45° , é (4):

$$\epsilon_j = \frac{\tau}{E} (1 + \nu) \quad (7.9.2)$$

A equação para o dimensionamento é:

$$\epsilon_N = \frac{16 T_N}{E \pi D^3} (1 + \nu) \quad (7.9.3)$$

O valor do fator geométrico é constante, e igual a 1, em módulo, a ângulos de $+45^\circ$ ou -45° , na superfície cilíndrica do elemento elástico, e os extensômetros assim posicionados apresentarão o valor máximo de 4 para o somatório, em módulo, dos fatores geométricos.

Foram construídos quatro protótipos, usando sempre extensômetros tipo espinha-de-peixe (direção da grade a $\pm 45^\circ$), com as seguintes características.

A) PROTÓTIPO N° 1

Capacidade: 270 Nm

Sinal de saída nominal: 3,25 mV/V

Material: Aço SAE 4340, com tratamento térmico

Tensão de escoamento: 1100 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Coefficiente de segurança: 2

D = 17 mm

Extensômetros KFC-2-D2-11, da Kyowa, com grade de 2 mm

$K = 2,04$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 4

Sensibilidade intrínseca: $1758 \mu\text{m/m}$

Aplicando-se a equação 5.12, tem-se $3,58 \text{ mV/V}$ de sinal de saída nominal, que representa uma diferença de $-9,2\%$ em relação ao experimental. Este torquímetro, visto nas figuras 7.9.2 e 7.9.3, foi construído para calibrar aparafusadeiras de uma linha de montagem industrial.

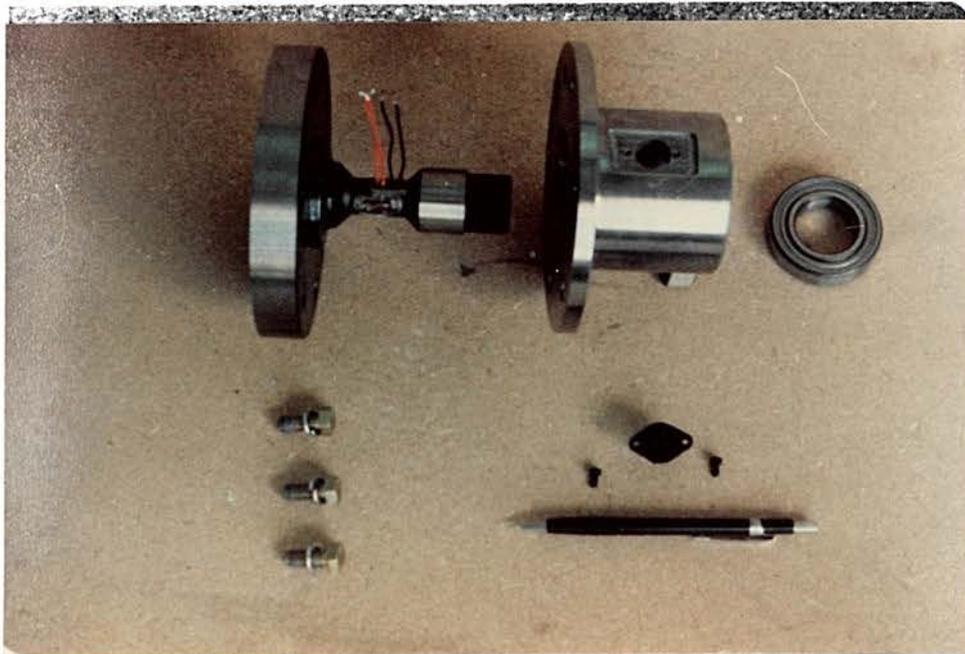


Figura 7.9.2 - Aspecto detalhado do torquímetro de 270 Nm.

B) PROTÓTIPO N^o 2

Capacidade: 4420 Nm



Figura 7.9.3 - Detalhe de uma aparafusadeira sendo testada com o torquímetro da figura 7.9.2. Este ensaio foi realizado na empresa SLC, de Horizontina, RS.

Material: Aço 4340

Tensão de escoamento: 720 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Sinal de saída nominal: 2,13 mV/V

Coefficiente de segurança: 2,0

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 4

Sensibilidade intrínseca: 1131 $\mu\text{m}/\text{m}$

Extensômetros KFC-2-D2-11, da Kyowa, com grade de 2 mm

$K = 2,05$

$D = 50 \text{ mm}$

Usando-se a equação 5.12, tem-se 2,32 mV/V para o sinal de saída nominal, que representa uma diferença de -8,1% em relação ao experimental. Nas figuras 7.9.4 e 7.9.5 apresenta-se detalhe do elemento elástico e de sua calibração.

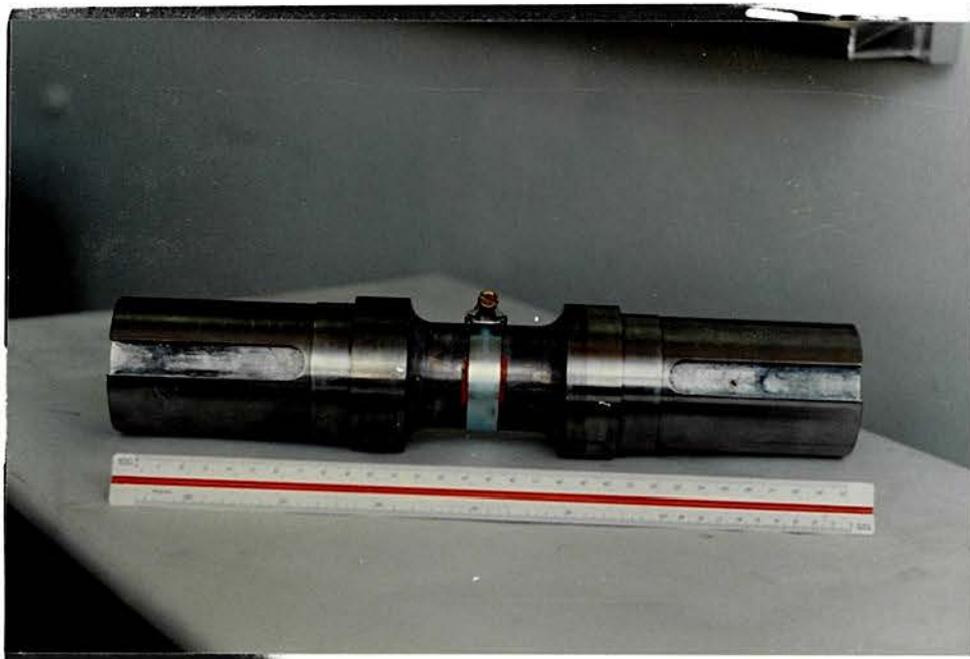


Figura 7.9.4 - Aspecto da elemento elástico do torquímetro de 4420 Nm, com os extensômetros pressionados por uma braçadeira, para a etapa da colagem.

C) PROTÓTIPO Nº 3

Capacidade: 18,2 Nm

Tensão de escoamento: 720 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Coefficiente de segurança: 2

Sinal de saída nominal: 2,08 mV/V



Figura 7.9.5 - Aspecto montagem para a calibração do torquímetro de 4420 Nm.

Sensibilidade intrínseca: $1137 \mu\text{m/m}$

$D = 8 \text{ mm}$

Extensômetros KFC-2-D2-11, da Kyowa, com grade de 2 mm

$K = 2,04$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 4

A equação 5.12 fornece um sinal de saída nominal de $2,32 \text{ mV/V}$, que representa uma diferença de $-10,3\%$ em relação ao experimental. A figura 7.9.6 mostra o elemento elástico e demais peças deste torquímetro girante.

D) PROTÓTIPO N° 4

Capacidade: $8,1 \text{ Nm}$

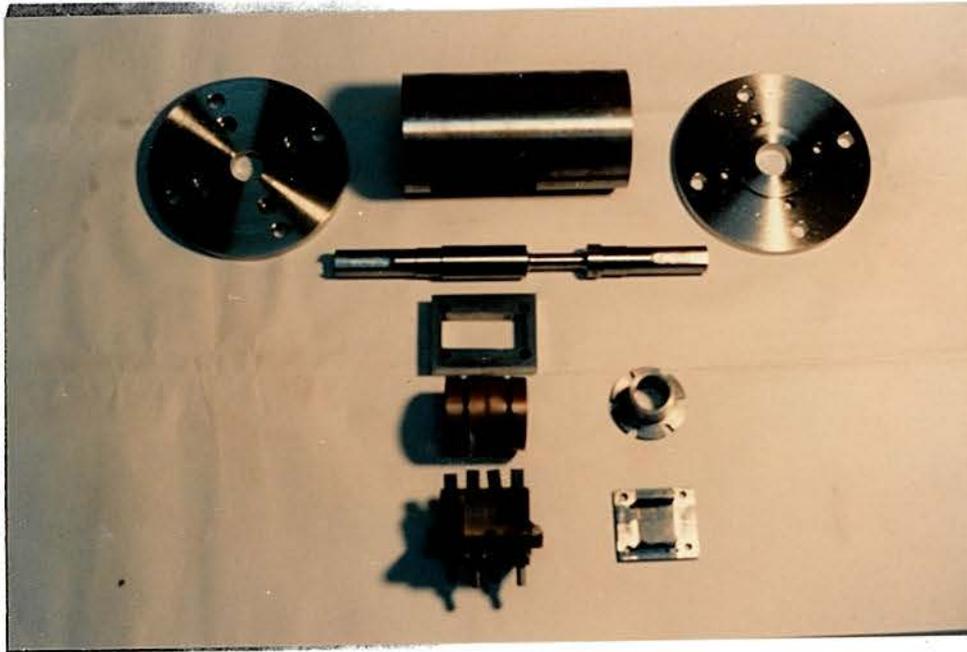


Figura 7.9.6 - Aspecto do conjunto de peças do torquímetro girante de 18,2 Nm.

Material: Aço 4340

Tensão de escoamento: 750 MPa

Sinal de saída nominal: 2,50 mV/V

Coefficiente de segurança: 1,9

Sensibilidade intrínseca: 1199 $\mu\text{m}/\text{m}$

D = 6 mm

Extensômetros KFC-2-D2-11, da Kyowa, com grade de 2 mm

K = 2,05

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 4

Usando-se a equação 5.12, tem-se 2,46 mV/V para o sinal de saída nominal, que corresponde a uma diferença de 1,6% em relação ao experimental.

O somatório, em módulo, dos fatores geométricos para esta geometria na orientação de $\pm 45^\circ$, é constante em toda a extensão da grade do extensômetro; o comprimento da grade não influi no valor do fator geométrico.

Esta geometria, a princípio, não possui um limite máximo de torque mas, para um torque muito baixo, pode haver a impossibilidade física de colar os extensômetros sobre o eixo do torquímetro, o que pode implicar na troca do material do elemento elástico e ou geometria, usando-se, por exemplo, um torquímetro tipo cruciforme vazado ou um torquímetro circular vazado.

7.10 TORQUÍMETRO CIRCULAR VAZADO

Sua representação está na figura 7.10.1, e o comportamento das deformações, devidas ao cisalhamento, em sua superfície externa é idêntico ao torquímetro circular maciço. O uso desta geometria apresenta uma maior sensibilidade que a geometria circular maciça de mesmo diâmetro externo e, para um mesmo torque, o seu perímetro é maior que o do maciço, o que proporciona uma superfície maior para a colagem dos extensômetros.

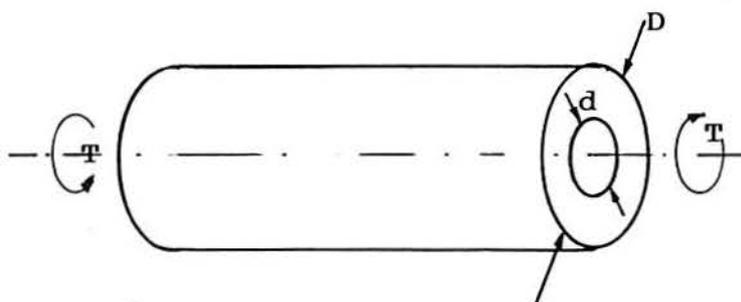


Figura 7.10.1 - Elemento elástico de um torquímetro com eixo circular vazado.

O valor da tensão de cisalhamento é (4):

$$\tau = \frac{16 T D}{\pi (D^4 - d^4)} \quad (7.10.1)$$

A deformação normal produzida a 45° por esta tensão de cisalhamento é (4):

$$\epsilon_j = \frac{\tau}{E} (1 + \nu) \quad (7.10.2)$$

A equação para o dimensionamento mecânico é:

$$\epsilon_N = \frac{16 T_N D (1 + \nu)}{E \pi (D^4 - d^4)} \quad (7.10.3)$$

Em direções a $\pm 45^\circ$ o fator geométrico é constante e igual a 1, em módulo, como ocorre com o torquímetro com eixo circular maciço.

Foram construídos dois protótipos, com extensômetros tipo espinha-de-peixe, descritos a seguir.

A) PROTÓTIPO Nº 1

Deste protótipo, o dado que se dispõe é o sinal de saída de 0,051 mV/V para um torque de 5,45 Nm, que não é o seu torque nominal.

Material: aço 4340

Tensão de escoamento: 800 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Coefficiente de segurança: 97 (não está em sua capacidade nominal)

Extensômetro KFC-2-D2-11, da Kyowa, com grade de 2 mm

K = 2,03

Sensibilidade intrínseca: 26 $\mu\text{m/m}$

Somatório em módulo dos fatores geométricos: 4

$D = 20,4 \text{ mm}$

$d = 13,7 \text{ mm.}$

Aplicando-se a equação 5.12, tem-se $0,052 \text{ mV/V}$ para o sinal de saída nominal, que representa uma diferença de $1,9\%$ em relação ao experimental. Este torquímetro foi construído com o objetivo de usar eletrônica embarcada no interior de um eixo vazado, conforme a figura 7.10.2.

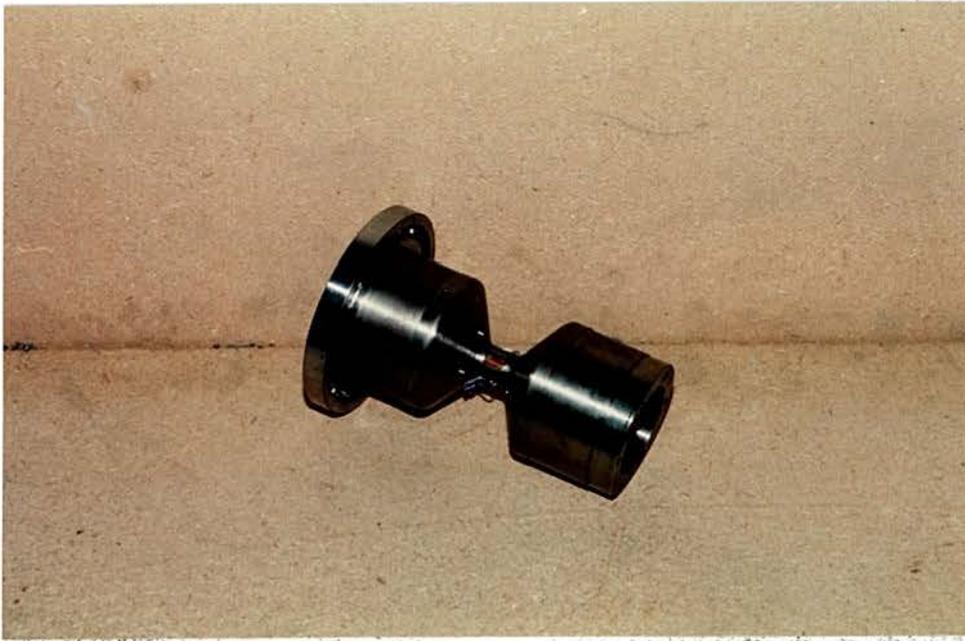


Figura 7.10.2 - Aspecto do eixo do torquímetro circular vazado. O elemento elástico situa-se no centro, que é a parte com menor diâmetro, onde estão posicionados os extensômetros. As extremidades do eixo são ocas para a instalação de eletrônica embarcada; a excitação da ponte é feita por transformador rotativo, e o desbalanço é coletado por via capacitiva.

B) PROTÓTIPO Nº 2

Capacidade nominal: 45 Nm
Material: aço 4340
Tensão de escoamento: 840 MPa
Módulo de elasticidade: 207 GPa
Coeficiente de segurança: 2,3
Sinal de saída nominal: 2,14 mV/V
Sensibilidade intrínseca: 1130 $\mu\text{m/m}$
Somatório em módulo dos fatores geométricos: 4
Extensômetros KFC-2-D2-11, da Kyowa, com grade de 2 mm
 $K = 2,11$
 $D = 11 \text{ mm}$
 $d = 5 \text{ mm}$

Usando-se a equação 5.12, tem-se um sinal de saída nominal de 2,38 mV/V, que é 10,0% menor que o experimental.

Esta geometria também apresenta o somatório, em módulo, dos fatores geométricos com o valor máximo de quatro em toda a extensão da grade do extensômetro.

7.11 CÉLULA DE CARGA CISALHANTE EM "S"

As deformações do elemento elástico desta célula, cuja geometria é mostrada na figura 7.11.1, são devidas ao cisalhamento. O corte, em perfil I, mostra a distribuição das deformações devidas ao cisalhamento, que atingem um valor máximo e praticamente uniforme junto ao centro da alma do perfil. As deformações normais são máximas a $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo de simetria da força F, sendo estas as orientações da grade dos extensômetros sobre o elemento elástico.

Esta célula de carga pode operar em tração e em compressão, apresentando um pequeno deslocamento sob carga, que é característica de células de carga cisalhantes (1,45). Existe atualmente uma tendência de aumentar o uso de célula de carga com deformações de cisalhamento devido a sua linearidade e seu menor deslocamento comparado com uma célula flexional tipo S, com furo retangular.

O valor da tensão de cisalhamento na alma do perfil é (28):

$$\tau = \frac{F}{b_1 I_z} \left(\frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{h_1^2}{4} \right) + \frac{b_1}{2} \left(\frac{h_1^2}{4} - y_1^2 \right) \right) \quad (7.11.1)$$

onde I_z é dado por:

$$I_z = \frac{b (h_1 + 2t)^3}{12} - \frac{(b - b_1) h_1^3}{12} \quad (7.11.2)$$

As deformações ϵ_j a 45° são:

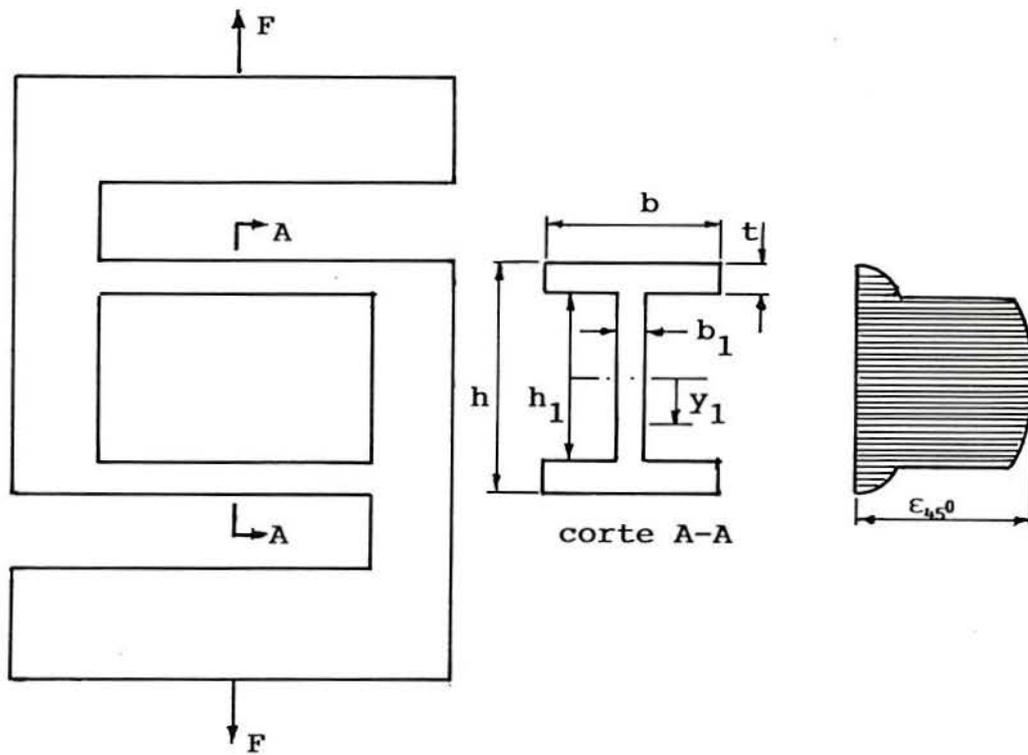


Figura 7.11.1 - Elemento elástico de uma célula de carga cisalhante em "S". Está representado o comportamento das deformações de cisalhamento, na alma do perfil em I.

$$\epsilon_j(45^\circ) = \frac{\tau}{E} (1 + \nu) \quad (7.11.3)$$

A equação para o dimensionamento mecânico é:

$$\epsilon_N = \frac{F}{E I_2} \left(\frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{h_1^2}{4} \right) + \frac{b_1}{2} \left(\frac{h_1^2}{4} - y_1^2 \right) \right) (1 + \nu) \quad (7.11.4)$$

Para regiões próximas a $y_1=0$, o valor do fator geométrico é praticamente igual a 1; assim, o somatório, em módulo, dos fatores geométricos, em ponte completa, é 4.

Foi construído um protótipo com as seguintes características:

Capacidade nominal: 2300 N
Material: aço 4340
Tensão de escoamento: 800 MPa
Módulo de elasticidade: 207 GPa
Sinal de saída nominal: 1,41 mV/V
Coeficiente de segurança: 3,4
Sensibilidade intrínseca: 741 $\mu\text{m/m}$
Extensômetros KFC-2-D2-11, da Kyowa, com grade de 2 mm
Extensômetros tipo espinha-de-peixe, colados no centro do perfil I, e com as grades a $\pm 45^\circ$
Somatório em módulo dos fatores geométricos: 4
 $K = 2,05$
 $t = 3,1 \text{ mm}$
 $b = 25 \text{ mm}$
 $b_1 = 0,94 \text{ mm}$
 $h = 24,1 \text{ mm}$
 $h_1 = 17,9 \text{ mm}$
 $y_1 = 1 \text{ mm}$

Usando a equação 5.12, tem-se 1,52 mV/V de sinal de saída nominal, que representa uma diferença de -7,2% em relação

ao experimental. Na figura 7.11.2 é mostrado o protótipo construído.

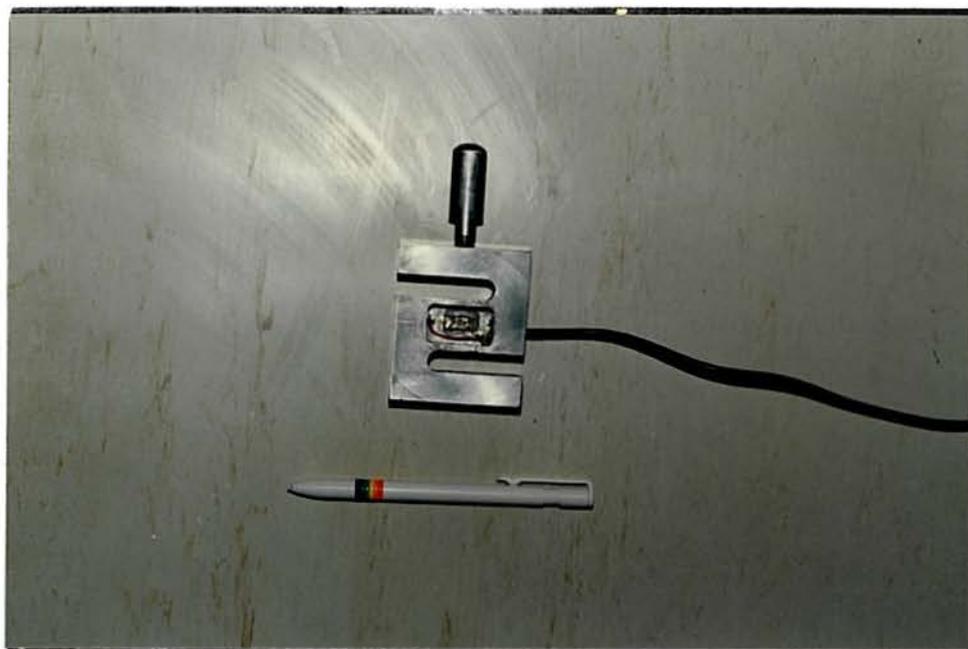


Figura 7.11.2 - Célula de carga cisalhante em "S" de 2300 N, em que se nota em seu centro, o extensômetro tipo espinha-de-peixe utilizado.

7.12 CÉLULA DUPLA VIGA COM FORÇA NO CENTRO

É uma célula de carga tipo flexional, conforme a figura 7.12.1, onde os extensômetros estão posicionados preferencialmente no interior do furo, e com a sua grade paralela à direção x da barra de comprimento L , e próximos aos engastes. Na região de aplicação da força F pode haver um ressalto para garantir a repetibilidade da célula. É uma célula de pequena altura.

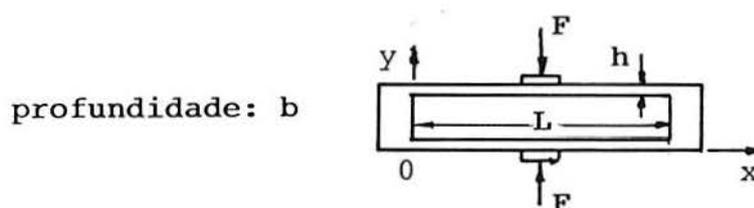


Figura 7.12.1 - Elemento elástico de uma célula de carga dupla viga com a força aplicada em seu centro.

As deformações ϵ_j , no sentido x ($x=0$ no engaste), em sua superfície, são dadas pela seguinte expressão (28):

$$\epsilon_j(x) = \frac{6 M}{E b h^2} \quad (7.12.1)$$

onde o momento M é dado por:

$$M = \frac{F x}{2} - \frac{F L}{8} \quad (7.12.2)$$

O valor da tensão máxima atuante σ_o , no engaste e no centro ($x=L/2$), é:

$$\sigma_o = \frac{3}{4} \frac{F L}{b h^2} \quad (7.12.3)$$

Dividindo-se a equação 7.12.1 pela deformação devida à tensão expressa pela equação 7.12.3, encontra-se a função de transferência mecânica, e cujo comportamento do fator geométrico está representado na figura 7.12.2. A equação para o dimensionamento mecânico é obtida dividindo a equação 7.12.3 pelo módulo de elasticidade E .

Foi construído um protótipo de 3000 N, para a aferição de prensas de capacitores da Icotron S.A., de Gravataí RS, com as seguintes características.

Capacidade nominal: 3000 N

Material: aço 4340, com tratamento térmico

Tensão de escoamento: 1100 MPa

Módulo de elasticidade: 207 GPa

Sinal de saída nominal: 1,75 mV/V

Coefficiente de segurança: 2,2

Sensibilidade intrínseca: 2415 $\mu\text{m/m}$

Extensômetros KFC-2-C1-11, da Kyowa, com grade de 2 mm

$K = 2,07$

$h = 3,6 \text{ mm}$

$L = 65,3 \text{ mm}$

$$b = 23 \text{ mm}$$

Em face da impossibilidade de verificar a posição de colagem dos extensômetros, pois foram recobertos por camadas protetoras opacas, não foi possível a comparação do seu sinal de saída com o obtido através da equação 5.12.

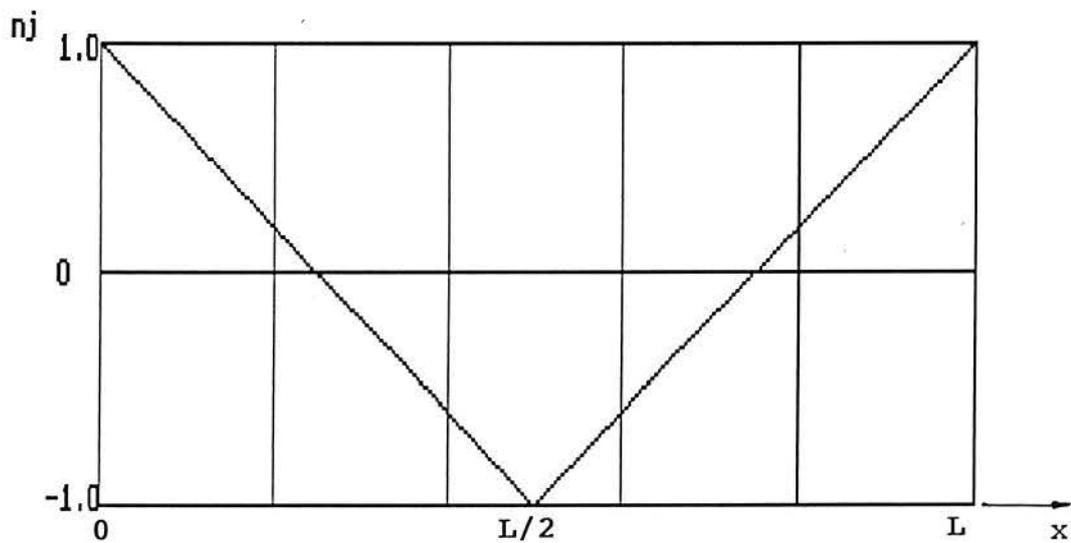


Figura 7.12.2 - Comportamento do n_j sobre a face superior da viga superior da célula da figura 7.12.1.

8. CARACTERÍSTICAS DOS PROTÓTIPOS E ELEMENTOS ELÁSTICOS

A seguir são apresentadas, em duas tabelas, as principais características dos protótipos e dos elementos elásticos desenvolvidos e analisados neste trabalho.

A tabela 8.1 apresenta o comportamento dos fatores geométricos n_j de cada elemento elástico e o seu valor máximo, em módulo, em uma configuração de ponte completa. A tabela 8.2 apresenta as características dos protótipos construídos (capacidade nominal, ϵ_N , somatório em módulo dos fatores geométricos n_j , sinal de saída experimental e o sinal de saída calculado pela equação 5.12).

tipo de elemento elástico	valor máximo para o somatório em módulo dos fatores geométricos n_j em ponte completa	comportamento do n_j sobre a superfície do elemento elástico
lâmina engastada sob flexão	4	variável
coluna	2,6	constante
'S' com furo retangular	4	variável
'S' com furo circular	4	variável
anel apoiado lateralmente	3,14	variável
placa circular com pino central	1,2 (depende de a/b)	variável
cisalhante em 'S'	4	constante
dupla viga com força no centro	4	variável
torquímetro c/ eixo circular maciço	4	constante
torquímetro c/ eixo circular vazado	4	constante
torquímetro cruciforme vazado	4	variável
manômetro de placa circular	2,7	variável

Tabela 8.1 - Comportamento dos fatores geométricos dos elementos elásticos.

protótipo	capacidade nominal	ϵ_N ($\mu\text{m/m}$)	sg	n_j	sinal de solda experimental (mV/V)	sinal de solda calculado (mV/V)
coluna	500 kN	1137	3,4	2,6	1,42	1,55
"S" com furo retangular	1000 N	966	4,0	2,2	1,09	1,11
"S" com furo circular	5500 N	1287	3,0	3,92	2,80	2,60
	1100 N	834	2,5	2,34	1,13	1,01
anel apoiado lateralmente	400 kN	1932	2,0	3,14	2,67	3,18
	1 MN	1486	2,6	3,14	2,15	2,45
	4 kN	854	2,5	3,14	1,34	1,45
	30 kN	1288	3,0	3,14	2,26	2,12
	100 kN	1333	2,9	3,14	2,29	2,20
	400 kN	1575	2,3	3,14	2,39	2,59
placa circular com pino central	1000 N	1137	3,4	0,76	0,51	0,46
	3000 N	1137	3,4	0,76	0,49	0,45
	7848 N	690	5,6	0,98	0,36	0,36
cisalhante em "S"	2300 N	741	3,4	4	1,41	1,52
dupla viga c/ F centro	3000 N	2415	2,2	-	1,75	-
torquímetro com eixo circular maciço	270 Nm	1756	2	4	3,25	3,58
	4420 Nm	1131	2	4	2,13	2,32
	18,2 Nm	1137	2	4	2,08	2,32
	8,1 Nm	1199	1,9	4	2,50	2,46
torquímetro com eixo circular vazado	5,45 Nm	26	97	4	0,051	0,052
	45 Nm	1130	2,3	4	2,14	2,38
torquímetro cruciforme vazado	10,59 Nm	1525	3,3	3,10	2,25	2,44
	8 Nm	339	11,4	3,0	0,53	0,53
manômetro placa circular	0,5 MPa	1225	3,3	1,94	1,32	1,25

Tabela 8.2 - Características dos protótipos construídos.

9. CONCLUSÃO

A metodologia proposta para o dimensionamento de elementos elásticos, usando a inédita função de transferência mecânica interligada à ponte de Wheatstone, proporciona um método eficaz de auxílio ao projeto de transdutores extensométricos.

O uso da função de transferência mecânica, composta da sensibilidade intrínseca ϵ_N , do fator geométrico n_j e a relação entre as grandezas mecânicas G/G_N , possibilita o uso de conceitos comuns à análise dos diversos tipos de transdutores extensométricos, tendo-se assim uma formulação simples e geral.

Em um transdutor extensométrico, o conhecimento do tipo de elemento elástico e do comportamento de seu fator geométrico n_j permitem o cálculo de um parâmetro, conhecendo-se os outros três, do seguinte conjunto: coeficiente de segurança, sinal de saída nominal, tensão de escoamento ou módulo de elasticidade.

O fator geométrico n_j de cada tipo de elemento elástico, possibilita o seu rápido projeto, através de seus gráficos característicos, ou analiticamente, considerando cada região onde será posicionado um extensômetro.

Com a metodologia proposta, pode-se definir o sinal de saída, o coeficiente de segurança e o material do elemento elástico, sem ter ainda o conhecimento de suas dimensões físicas, que são posteriormente calculadas com o uso da sensibilidade intrínseca ϵ_N .

Foi aplicada a metodologia proposta em 14 protótipos de células de carga, 8 torquímetros e um manômetros, englobando elementos elásticos do tipo axial, flexional ou cisalhante, sendo

que a diferença entre o sinal de saída nominal calculado e o experimental foi, na maioria dos casos, menor que 10%, considerando-se as simplificações no formulário de resistência dos materiais, imprecisões de medidas dimensionais e de constantes de materiais.

10. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Desenvolvimento e aperfeiçoamento de formulários para outras geometrias de transdutores extensométricos.

Análise do comportamento dinâmico dos transdutores extensométricos.

Desenvolvimento de programas para o dimensionamento de elementos elásticos com a metodologia aqui exposta.

Comparação e uso conjunto da metodologia desenvolvida com métodos numéricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- ABDULLAH, F. & ERDEM, U. Mathematische modellbildung und konstruktion von kraftaufnehmern für scherkrafte. VDI - Berichte. n° 312, 1978, p.149-155.
- 2- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for performance characteristics of bonded resistance strain gages: E-251-67. In. Metals-physical, mechanical, nondestrutive, and corrosion tests, metallography, fatigue, effect of temperature. Philadelphia, 1970. Pt 31 p. 752-72.
- 3- ANDERSSON, V. & LÜCKE, H. A. H. Critérios adequados para projetar elementos elásticos de transdutores elétricos em microcomputadores. In: X COBEM dez 1989. Anais... Rio de Janeiro, 1989, v. II, p. 197-200.
- 4- ARAÚJO, J.R. Transdutores estáticos e dinâmicos de torque. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 1986. 88 p. Diss. mest.
- 5- ARAÚJO, J.R., BORCHARDT, I.G. Transdutor de torque construído à base de extensômetros de resistência elétrica. In: VI CBECIMAT, 1984. Anais... Rio de Janeiro, 1984 p.316-319
- 6- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Células de carga (transdutores de força); métodos de ensaios recomendados: P-4:6.05-006. Rio de Janeiro, 1987, 18 p.
- 7- _____ Células de carga (transdutores de força); terminologia e definições: P-4:6.05-005, Rio de Janeiro, 1987. 13 p.
- 8- BASSANI, I.A. et alii. Transdutor extensométrico para torques menores que 10 Nm: Análise da função de transferência do

- elemento elástico. In: 7^o SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO, 1, Rio de Janeiro, 1987. Anais... Rio de Janeiro, IBP, 1987. p. 131-147.
- 9- BECK, J.C.P. et alii. Projeto e análise das tensões num transdutor de força do tipo anel. In: 1^o ENCONTRO REGIONAL DE AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO. Anais... Vitória, SBA/IBP, 1989, p. STA-04 a STA-06 (vol. I).
- 10- BECK, J.C.P. Projeto, construção e análise de células de carga de placa e anel. Porto Alegre, UFRGS, PPGEMM, 1983. Diss. Mest. eng. metalúrgica.
- 11- BECKWITH, J. G. & BUCK, N. L. Mechanical measurements. Reading, Addison-Wesley, 1961, 559 p.
- 12- BORCHARDT, I. G. & ZARO, M. A. Extensômetros de resistência elétrica. Porto Alegre, Ed. da Universidade, 1982, 69 p.
- 13- BORCHARDT, I.G. et alii. O circuito ponte para a medição de impedâncias e grandezas físicas. Porto Alegre, PPGEMM, 68 p. (Apostila de aulas).
- 14- BORCHARDT, I.G. Condicionador universal para uso em extensometria. In: 2^o SIMPÓSIO DE MANUTENÇÃO DE INSTRUMENTOS. Porto Alegre 26-28 set 1984. Anais... Rio de Janeiro, IBP, 1984 p. 265-273.
- 15- BORISOV, V.A. et alii. Characteristics of materials used for elastic member of strain gauge resistor measuring devices. Measurement Techniques. v. 28, n^o 9, 1985, p. 777-780.
- 16- BRAY, A. The role of stress analysis in the design of force-standard transducers. Experimental Mechanics. jan 1981, p. 1-20.

- 17- CAUDURO, C. R. Estudo de célula de carga de compressão, com elemento elástico de placa circular com pino central. Porto Alegre, PPGEMM, UFRGS, 1988. 81 p. Diss. mest.
- 18- CAUDURO, C. R. et alii. Célula de carga tipo "S" vazado. In: 44^o CONGRESSO ANUAL ABM, São Paulo, 1989. Anais... São Paulo, ABM, 1989, v. 1, p. 495-502.
- 19- CAUDURO, C. R. et alii. Desenvolvimento de um sistema para a medição de baixos torques(4 Nm). In: 9^o SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO, Rio de Janeiro, 18-21 nov 1991. Anais... Rio de Janeiro, IBP, 1991, p. 419-425.
- 20- CAUDURO, C. R. et alii. Projeto e utilização de transdutores extensométricos. In: 8^o SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO, Rio de Janeiro, 19-22 jun 1989. Anais... Rio de Janeiro, IBP, 1989, p. 301-309.
- 21- CAUDURO, C. R. et alii. Medição de esforços de tração de 500 kN. In: SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO, Belo Horizonte, 22-24 nov 1989. Anais... Belo Horizonte, ABM, 1989, p. 169-176.
- 22- CAUDURO, C. R. et alii. Projeto de manômetro utilizando extensômetros de resistência elétrica. In: 46^o CONGRESSO ANUAL DA ABM, São Paulo, 1991. Anais... São Paulo, ABM, 1991, v. 4, p.541-547.
- 23- DALLY, J. W. & RILEY, W. F. Experimental stress analysis. cap. 13, 14, 15, 16, 17, 18. 1965.
- 24- DOEBELIN, E. O. Measurement Systems; application and design. New York, McGraw Hill, 1990, 960 p.
- 25- DORSEY, J. Homegrown strain-gage transducers. Experimental Mechanics. jul 1977, p. 255-260.

- 26- EPSILONICS. Publicação da Measurements Group, Raleigh, 4 vol., 1981-1984.
- 27- ERDEM, U. Force and weight measurement. J. Phys. E: Sci. Instrum. v. 15, 1982, p. 857-872.
- 28- FAUPEL, J. H. Engineering design, New York, John Wiley, 1964, 980 p.
- 29- FLECK, N. A. Some aspects of clip gauge design. Strain. fev 1983, p. 17-22.
- 30- GINDY, S. S. Force and torque measurement: a technology overview part I - force. Experimental Techniques. jun 1985, p. 28-33.
- 31- _____. Force and torque measurement: a technology overview part II - torque. Experimental Techniques. jul 1985, p. 9-15.
- 32- HELLWIG, R. Precision force transducer for international comparison measurements on force standard machines. Reports in Applied Measurement, 3(1):17-22, 1987.
- 33- HOFFMANN, K. An introduction to measurements using strain stifle. Darmstadt, Hottinger Balwin Messtechnik, 1989, 291 p.
- 34- _____ Applying the Wheatstone bridge circuit. Darmstadt, HBM, s.d., 22 p.
- 35- _____ How to avoid or minimize errors in strain gauge measurement. Darmstadt, HBM, s.d., 57 p.

- 36- INTERNATIONAL measurement - technological recommendations of OIML: performance characteristics of metallic resistance strain gauges. PTB Mitteilungen, 96 (2): 101-108, abr 1986.
- 37- INTERNATIONAL vocabulary of basic and general terms in metrology. BIPM, IEC, ISO e OIML, 1984, 40 p.
- 38- JUVINAL, R. C. Fundamentals of machine component design. New York, John Wiley, 1983, 761 p.
- 39- KEIL, S. & HOFFMANN, K. Verstimmung der Wheatstoneschen brückenschaltung beim messen mit dehnungsmessstreifen. VDI-Z 115(11):904-11, 1973.
- 40- KEIL, S. On the strain gages 50th Jubilee - a review of its evolution an of 33 years strain gage production at Darmstadt. Reports in Applied Measurement. 1988, v. 4, n° 2, p. 39-48.
- 41- LEBOW ASSOCIATES INCORPORATION. Lebow torque sensor & dynamometer catalog. Troy, 1979, 58 p.
- 42- MEASUREMENTS GROUP. Errors due to transverse sensibility in strain gages. Raleigh, 1980, 16 p. (TN-137-2).
- 43- _____ Errors due Wheatstone bridge nonlinearity. Raleigh, 1976, 4 p. (TN-139-2)
- 44- _____ Optimizing strain gage excitation levels. Raleigh, 1979, 5 p. (TN-502).
- 45- _____ Strain gage based transducers; their design and construction. Raleigh, 1988, 75 p.
- 46- _____ Strain gage selection criteria, procedures, recommend ations. Raleigh, 1976, 12 p. (TN-505).

- 47- _____ Temperature-induced apparent strain and gage factor variation in strain gages. Raleigh, 1976, 10 p. (TN-504).
- 48- MURRAY, W. M. et alii. Strain gage techniques. Cambridge, M.I.T., v.1, 1962, 640 p.
- 49- NATIONAL AEROSPACE STANDARD Strain-gauges, bonded resistance: NAS-942. Washington, National Standards Association, jul 1964, 48 p.
- 50- NORTON, H. Handbook of transducers for electronic measuring systems. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1969. 704 p.
- 51- O'BRIEN, W. F. AC or DC excitation: which is best for transducers? Electronic Design. jun 1965 p. 26-31.
- 52- OLIVER, F. Practical instrumentation transducers. New York, Hayden Book, 1971.
- 53- ORT, W. New developments in foil strain gage transducers. Experimental Techniques. aug 1983, p. 19-23.
- 54- PERRY, C. C. & LISSNER, H. R. The strain gage primer. New York, McGraw-Hill, 1955.
- 55- ROSEN, C. A. & NITZAN, D. Use of sensors in programmable automation. Computer. dec 1977, p. 12-23.
- 56- SCIENTIFIC APPARATUS MANUFACTURES ASSOCIATION. Load cell terminology and teste procedure recommendations. Washington, Scale Manufatures Association, 1979, 20 p.
- 57- SZYMANSKI, D. Strain-gage-based torque-measuring test bench for stepping motors. Reports in Applied Measurements. v.2, n^o 1, 1986, p. 1-4.